

修士学位論文

CTA 大口径望遠鏡用カメラ窓の
促進耐光性試験と性能評価

2016年度
(平成28年度)

茨城大学大学院理工学研究科
理学専攻（物理系）

15NM169G
本橋 大輔

概要

本研究では、次世代ガンマ線天文台 CTA 計画の大口径望遠鏡用焦点面カメラ窓の性能を評価するため、人工光源を用いた促進耐光性試験を行い、紫外線によるカメラ窓の透過率変化を測定した。この試験によるカメラ窓の透過率低下は小さく、試験後も十分に要求仕様を満たしているため、実際の運用にあたり紫外線に対する耐性があると判断した。また、カメラ窓成形時の加熱による透過率低下についても測定を行ったが、それによる顕著な劣化は確認できなかったため、熱の影響も非常に小さく、使用に問題がないことがわかった。

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画とは、既存の解像型チェレンコフ望遠鏡と比較して 10 倍の感度を達成し、20 GeV から 300 TeV までという非常に幅広いエネルギー帯域で観測を行うことで、ガンマ線天文学の飛躍的な発展を目指す国際共同プロジェクトである。解像型チェレンコフ望遠鏡は、宇宙から到来したガンマ線と地球大気との相互作用で、発生する空気シャワー中で放射されたチェレンコフ光を地上の望遠鏡の反射鏡で反射し、焦点面の検出器で捉えることによって、その光量やシャワーイメージから元のガンマ線のエネルギーと到来方向を決定する。CTA 計画では、口径の異なる大・中・小 3 種類の解像型チェレンコフ望遠鏡群を建設することになっており、そのうち CTA-Japan グループは大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST) の反射鏡と焦点面カメラの開発に大きく貢献している。

焦点面カメラは光電子増倍管 (Photomultiplier Tube ; PMT) 1855 本によって構成され、そのカメラの入り口部分は直径 2.5 m もの大きさになる。しかし、カメラを砂埃や風雨から守るために高い密閉性能が要求されており、焦点面側の入り口部分は透明な窓材で覆う必要がある。また、地上に到達するチェレンコフ光のスペクトルは紫外線領域にピークをもつため、窓材は 400 nm 以下の紫外線も十分に透過することが要求される。以上の条件を満たす LST 用カメラ窓として、三菱レイヨン製の紫外線透過型アクリル板「アクリライト®」が候補となっている。

LST 用焦点面カメラ窓はカメラの前部に設置されるため、その透過率が観測結果に直接影響を及ぼす。しかし、設置時やメンテナンス時などに長時間にわたって太陽光 (紫外線) に曝されることがあり、さらに 20 年間の運用が予定されていることから、それによる劣化が考えられる。そこで、「アクリライト®」サンプルに対して人工光源を用いた促進耐光性試験を行った。この試験には、地上に到達する紫外線の大部分を占める UV-A 領域 (315 - 400 nm) を効率的に照射が可能な紫外線蛍光ランプを用い、紫外線の照射を行った。すると、波長 350 nm 以上の領域では透過率が照射量に応じてほぼ線形に低下しているのに対して、波長 300 nm 付近では一時透過率が上昇するという振る舞いが確認された。また、各波長ごとにチェレンコフ光の photon flux と分割球面鏡の平均反射率を畳み込み、波長領域全体の efficiency を評価すると、約 9000 J/cm² の紫外線照射で efficiency が 1% 低下することがわかった。これは、地上に到達する紫外線を 5 mW/cm² としたとき、約 500 時間にわたって浴び続けたくらいの紫外線総量であり、実際の運用にあたり十分に紫外線に対する耐性があると判断した。

また、人工光源として殺菌ランプ (ピーク波長 254 nm) を用いて、UV-C 領域 (- 280 nm) の UV 照射試験も行った。60 分間の紫外線照射により波長 300 nm では 41.8 pt.、波長 350 nm では 15.1 pt. の透過率低下が見られた。また、48 時間にわたり紫外線照射を行った「アクリライト®」サンプルは未照射のものと比較して明らかに黄色く変色しており、また IR スペクトルにも大きな変化が確認できたため、紫外線の照射による劣化で物質の構造自体が

変化してしまったと考えられる。しかし、波長 254 nm の紫外線は実際に地上に到達することはない UV-C 領域であり、単純に太陽光による影響として換算することはできないが、劣化が重度に進行した場合を再現した結果として評価を行った。

LST 用焦点面カメラ窓は平面の「アクリライト®」を使用するのではなく、強度の都合により直径約 2.5 m、高さ約 20 cm の曲率をもった曲面に加工される。その際、100°C 程度まで加熱する必要があり、それによる影響が出ることも考えられるため透過率測定により評価を行った。加熱した「アクリライト®」サンプルと加熱していない「アクリライト®」サンプルを比較したところ、300 nm から 400 nm にかけて加熱した「アクリライト®」サンプルが最大で 2% 程度低下していたものの、波長領域全体の efficiency では顕著な差は見られなかった。つまり、加工時の加熱による影響は非常に小さく、使用に問題がないと判断した。

以上の結果より、LST 用カメラ窓の搭載が最終決定された。

目次

第 1 章 Introduction	7
1.1 高エネルギーガンマ線天文学	7
1.2 ガンマ線放射機構	8
1.3 解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線観測	11
1.3.1 空気シャワー	11
1.3.2 チェレンコフ放射	13
1.3.3 ガンマ線検出原理	15
1.3.4 イメージング法	16
1.3.5 ステレオ観測	19
1.3.6 現在稼働中の大気チェレンコフ望遠鏡	20
第 2 章 Cherenkov Telescope Array, CTA	21
2.1 CTA 計画	21
2.2 望遠鏡デザイン	22
2.3 望遠鏡設置サイト	23
2.4 大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST)	25
2.4.1 仕様	25
2.4.2 光学機器の開発	26
2.4.3 焦点面カメラの開発	29
第 3 章 大口径望遠鏡用カメラ窓に対する耐光性評価方法の検討	31
3.1 カメラ窓	31
3.2 促進耐光性試験 [23][24]	32
3.3 紫外可視分光光度計による透過率測定 [28][29]	37
3.3.1 紫外可視分光光度計	37
3.3.2 透過率測定	38
3.4 赤外分光光度計による IR スペクトル測定 [28][29][30]	39
3.4.1 赤外分光光度計	39
3.4.2 全反射測定 (Attenuated Total Reflection ; ATR) 法	40
3.5 アクリル樹脂の化学結合と IR スペクトル [28][30]	43
3.6 アクリル樹脂の劣化メカニズム [23][33]	45
第 4 章 大口径望遠鏡用カメラ窓に対する促進耐光性試験	47
4.1 紫外線蛍光ランプ (UV-A) による促進耐光性試験	47
4.1.1 ランプの選定	47
4.1.2 UV 照射装置とサンプル	47
4.1.3 紫外可視分光光度計 Agilent 8453 の誤差	49

4.1.4	UV 照射量による透過率変化	50
4.1.5	波長領域全体の efficiency による評価	54
4.1.6	赤外分光光度計 Tensor 27 の誤差	56
4.1.7	IR スペクトルによる評価	57
4.2	殺菌ランプ (UV-C) による促進耐光性試験	58
4.2.1	ランプの選定	58
4.2.2	UV 照射装置とサンプル	58
4.2.3	紫外可視分光光度計 V-660 の誤差	60
4.2.4	UV 照射量による透過率変化	61
4.2.5	波長領域全体の efficiency による評価	63
4.2.6	IR スペクトルによる評価	65
第 5 章	成形加工時の熱による影響	68
5.1	透過率測定	68
5.2	波長領域全体の efficiency による評価	70
5.3	IR スペクトルによる評価	70
第 6 章	Summary	72
Appendix		73
A.	接着剤サンプルに対する UV 照射と剪断強度試験 (CTA 内部会議資料)	73
B.	垂直入射時の多重繰り返し反射を考慮した反射率・透過率 [39]	75
C.	紫外可視分光光度計の選定と物質による系統誤差	77
References		80
Acknowledgments		83

目 次

1.1	超高エネルギーガンマ線天体のスカイマップ [1]	7
1.2	制動放射 [2]	8
1.3	シンクロトロン放射 [2]	9
1.4	逆コンプトン散乱 [2]	9
1.5	π^0 中間子の崩壊 [2]	10
1.6	電子 - 陽電子対消滅 (左)、陽子 - 反陽子対消滅 (右) [2]	11
1.7	電磁カスケードシャワーの模式図	12
1.8	ハドロンシャワーの模式図	13
1.9	チェレンコフ放射の模式図	15
1.10	地上に到達するチェレンコフ光のスペクトル (青) と夜光バックグラウンド (赤) [5]	15
1.11	解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線検出原理 [6]	16
1.12	Hillas parameters	17
1.13	100 GeV のガンマ線によるシャワー (左)、100 GeV の陽子によるシャワー (右) [8]	18
1.14	焦点面カメラで捉えられるガンマ線シャワーイメージ (左) とハドロンシャワーイメージ (右) [9]	18
1.15	複数台の望遠鏡を用いたステレオ観測 [10]	19
1.16	MAGIC 望遠鏡 [11]	20
1.17	H.E.S.S. 望遠鏡 [12]	20
1.18	VERITAS 望遠鏡 [13]	20
2.1	CTA 計画 完成予想図 (credit : Gabriel Pérez Diaz) [14]	21
2.2	エネルギー感度曲線 [15]	21
2.3	大口径望遠鏡 (左)、中口径望遠鏡 (右) [15]	22
2.4	小口径望遠鏡 (左から GCT、ASTRI、SST-1M) [15]	22
2.5	CTA 計画 望遠鏡設置サイト [15]	24
2.6	最適化されたアレイ配置 [15]	24
2.7	LST 完成イメージ図 (イラスト 池下章裕氏) [5]	25
2.8	大口径望遠鏡用分割鏡の配置 [5]	27
2.9	MAGIC 望遠鏡の AMC システム [16]	27
2.10	分割鏡表面 [17]	28
2.11	分割鏡裏面 [18]	28
2.12	2種類のアクチュエータと固定軸 [19]	28
2.13	分割鏡裏面の構造 [5]	28
2.14	CTA 用の PMT module [20]	29

2.15	PMT7本 (1 クラスター) にライトガイドを装着したイメージ [21]	29
2.16	ライトガイド (左)、PMT クラスター (右) [21]	30
2.17	焦点面カメラ完成イメージ [22]	30
3.1	製作された大口径望遠鏡用カメラ窓 (三光精衡所にて)	31
3.2	紫外線・可視光線・赤外線 の波長区分 [25]	32
3.3	キセノンアークランプ [26] (上図) と地上に到達する太陽光スペクトルとの比較 [27] (下図)	33
3.4	紫外線カーボンアークランプ [26] (左図) とそのスペクトル [27] (右図)	34
3.5	紫外線蛍光ランプ [26] (上図) と地上に到達する太陽光スペクトルとの比較 [27] (下図)	35
3.6	メタルハライドランプ [26] (左図) とそのスペクトル [27] (右図)	36
3.7	紫外可視分光光度計の光学系の例	37
3.8	ベースラインと試料の測定	38
3.9	赤外分光光度計 (フーリエ変換型) の光学系	39
3.10	インターフェログラム	39
3.11	透過法により測定した「アクリライト [®] 」サンプルの IR スペクトル	41
3.12	反射・屈折パラメータ (左) と光の波面 (右)	41
3.13	染み込み深さの入射角・波数依存性	42
3.14	ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) 断面図 (左) [31]、ATR crystal と試料の配置図 (右)	42
3.15	赤外分光光度計 Tensor 27 (Bruker) (左) と ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) をセットした場合 (右)	43
3.16	PMMA の IR スペクトル [32]	44
3.17	MMA の構造式 (左) と PMMA の構造式 (右)	44
3.18	自動酸化劣化反応機構	46
4.1	FL20S・BL-B (日立) を用いた UV 照射の様子 (左) と放射スペクトル (右) [36]	48
4.2	紫外線強度計 UV-340A (左) と感度スペクトル (右) [37]	48
4.3	「アクリライト [®] 」サンプル I、II、III	49
4.4	紫外可視分光光度計 Agilent 8453 (Agilent Technologies) の測定誤差	50
4.5	サンプル I の透過率変化	51
4.6	サンプル II の透過率変化	52
4.7	サンプル III の透過率変化	52
4.8	各サンプルの UV 照射量による 300 nm の透過率変化	53
4.9	各サンプルの UV 照射量による 350 nm の透過率変化	53
4.10	各サンプルの UV 照射量による 400 nm の透過率変化	54
4.11	望遠鏡に到達するチェレンコフ光のスペクトル分布 ; 40 GeV gamma, zenith angle=0deg, La Palma=2,200 m a.s.l. (左)、LST 用分割鏡 102 枚の反射率平均値 (右) [18] (林田将明特任助教 (東京大学宇宙線研究所) との private communication)	55
4.12	各サンプルの照射量による efficiency の変化	55

4.13	赤外分光光度計 Tensor 27 (Bruker) に ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) をセットしたときの測定誤差	56
4.14	サンプル I の IR スペクトルの変化	57
4.15	EL-187 P-ROM ERASER (MINATO ELECTRONICS) (左) と殺菌ランプ GL-6 (東芝) の放射スペクトル (右) [36]	59
4.16	EL-187 P-ROM ERASER (MINATO ELECTRONICS) の内部を真上から見たイメージ (左) と真横から見たイメージ (右)	59
4.17	紫外可視分光光度計 V-660 (日本分光)	61
4.18	60 min 照射したサンプルの透過率の時間変化	62
4.19	180 min 照射したサンプルの透過率の時間変化	62
4.20	48 hr 照射したサンプルの透過率の時間変化	63
4.21	48 hr 照射したサンプル (左) と未照射のサンプル (右)	63
4.22	60 min 照射したサンプルの efficiency の時間変化	64
4.23	180 min 照射したサンプルの efficiency の時間変化	64
4.24	60 min 照射したサンプルの IR スペクトルの変化	65
4.25	180 min 照射したサンプルの IR スペクトルの変化	66
4.26	48 hr 照射したサンプルの IR スペクトルの変化	66
4.27	UV 照射を行った表面と裏面の IR スペクトル比較	67
5.1	加熱サンプル (左: NO.7-A-heat) と非加熱サンプル (右: NO.7-A) の比較	68
5.2	NO.1 (非加熱・加熱)	69
5.3	NO.2 (非加熱・加熱)	69
5.4	NO.3 (非加熱・加熱)	69
5.5	NO.4 (非加熱・加熱)	69
5.6	NO.7 (非加熱・加熱)	69
5.7	NO.8 (非加熱・加熱)	69
5.8	NO.9 (非加熱・加熱)	69
5.9	NO.10 (非加熱・加熱)	69
5.10	NO.1-A (非加熱サンプル) と NO.1-A-heat (加熱サンプル) の IR スペクトル比較	71
A.1	各サンプルの様子	74
A.2	各サンプルの剪断強度試験結果	74
B.3	多重繰り返し反射の模式図	76
C.4	測定装置による CaF ₂ 窓材の透過率測定結果の差	78
C.5	測定装置による「アクリライト®」サンプルの透過率測定結果の差	79

表 目 次

1.1	現在稼働中の大気チェレンコフ望遠鏡の概要	20
2.1	各望遠鏡の主なパラメータ	23
2.2	LST のパラメータ	26
3.1	主な特性振動の吸収ピーク	44
3.2	PMMA を構成する化学結合と結合エネルギー	46
4.1	紫外線蛍光ランプ FL20S・BL-B (日立) の仕様	48
4.2	Agilent 8453 (Agilent Technologies) の主な仕様	50
4.3	殺菌ランプ GL-6 (東芝) の仕様	59
4.4	測定点 - ランプの距離とそれを用いた UV 強度換算値	60
4.5	V-660 (日本分光) の主な仕様	60
5.1	各ロット番号における非加熱・加熱サンプル別の efficiency 平均値 (上段: efficiency、下段: 標準偏差、両者とも小数点第 2 位以下四捨五入)	70
A.1	各サンプルの試験条件	73
B.2	多重繰り返し反射の各場所の光量	76
C.3	OPCFU-50C03-P (シグマ光機) の各波長ごとの屈折率 [42]	78
C.4	各測定装置の検出器	79

第1章 Introduction

1.1 高エネルギーガンマ線天文学

宇宙物理学における未解決課題の 1 つに、宇宙線発生源の解明がある。1912 年、V. F. Hess による気球実験によって宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線である宇宙線が発見されて以来、約 100 年経過した現在も発生源は明らかになっていない。荷電粒子である宇宙線は地球に到来するまでに星間磁場によって飛跡が曲げられてしまうため、宇宙線源の特定は困難を極める。しかし、宇宙線を発生・加速しうる高エネルギーの天体では、非熱的過程によってガンマ線を放射する。ガンマ線は中性粒子であるために星間磁場の影響を受けず、発生源から直進して地球に到来する。つまり、ガンマ線の到来方向を辿ることによって、宇宙線発生源を特定することが可能である。1950 年代に Morrison と Hayakawa によりこの考えが提唱され、それ以来様々なガンマ線望遠鏡によって観測が行われている。

1970 年代、SAS-II 衛星により初めてガンマ線放射に関する詳細が明らかにされた。1990 年に打ち上げられたコンプトンガンマ線衛星 (Compton Gamma-Ray Observatory ; CGRO) に搭載された EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) では、20 MeV から 30 GeV 程度のエネルギーをもつ数百ものガンマ線天体が発見された。2008 年には最新のガンマ線観測衛星であるフェルミガンマ線宇宙望遠鏡 Fermi-LAT (Large Area Telescope) が打ち上げられ、2000 を超える高エネルギーガンマ線天体が観測された。衛星に搭載された検出器では観測が難しい、数十 GeV から数百 GeV 以上の超高エネルギーガンマ線の観測は大気チェレンコフ望遠鏡により行われており、これまでに 180 を超える超高エネルギーガンマ線天体が発見されている。現在は CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画が進行中であり、宇宙線発生源など多くの未解決課題の解明に迫る活躍が期待されている。

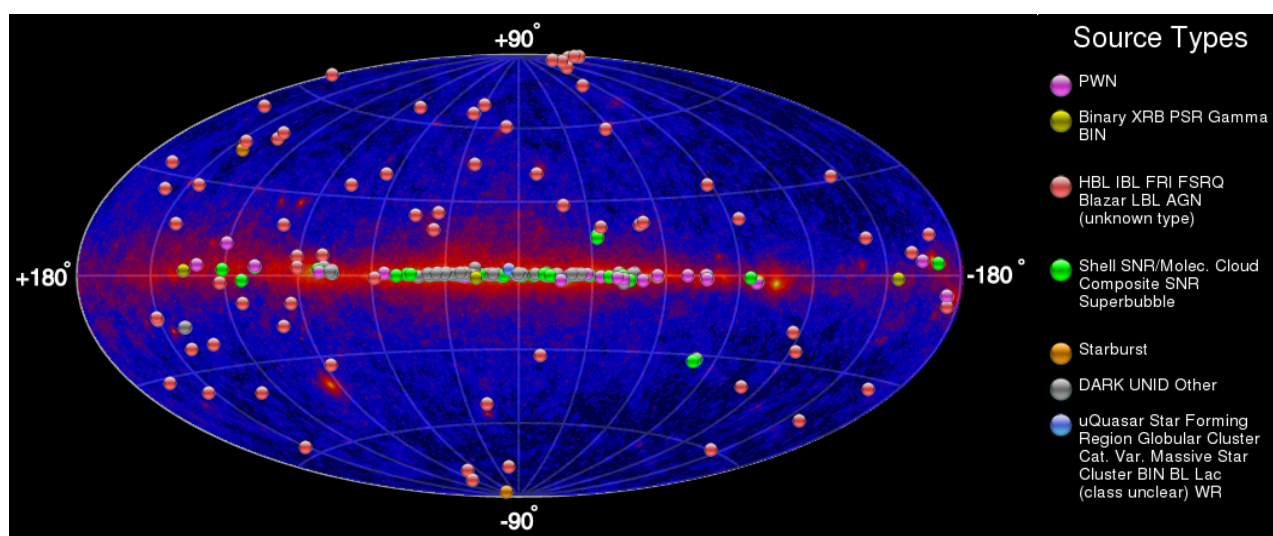


図 1.1: 超高エネルギーガンマ線天体のスカイマップ [1]
背景は Fermi-LAT によるガンマ線スカイマップ

1.2 ガンマ線放射機構

宇宙空間におけるガンマ線の生成過程について記述する。

- 制動放射 (Bremsstrahlung)

電子や陽子などの荷電粒子が原子核やイオンのクーロン場によって加速を受けることで、進路を曲げられて電磁波が放射される。この過程を制動放射と呼ぶ。制動放射による電磁波の放出に伴い荷電粒子はエネルギーを失っていく。相対論的な電子の場合、エネルギー損失は

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \log\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) = \frac{E}{X_0} \quad (1.1)$$

α : 微細構造定数、 N_A : アボガドロ定数、 A : 原子核質量数、 Z : 原子核電荷、
 r_e : 古典電子半径、 E : 電子のエネルギー、 X_0 : 放射長

と表される。放射長 X_0 は、制動放射によるエネルギー損失で電子のエネルギーが最初の $1/e$ になるまでの距離であり、空気中ではおよそ 37 g/cm^2 である。

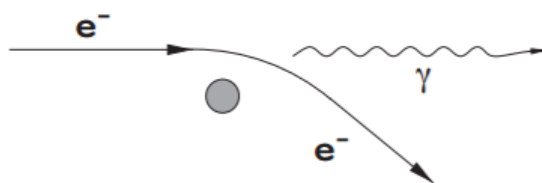


図 1.2: 制動放射 [2]

- シンクロトロン放射 (Synchrotron radiation)

相対論的な高エネルギーの荷電粒子は、磁場によるローレンツ力を受けて螺旋運動をする。このとき、荷電粒子は軌道の中心方向に加速を受けて電磁波を放射する。この過程をシンクロトロン放射と呼ぶ。電子のシンクロトロン放射による単位時間当たりのエネルギー損失は

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_B \quad (1.2)$$

σ_T : Thomson 散乱断面積、 γ : ローレンツ因子、 U_B : 磁場のエネルギー密度

と表される。相対論的な電子によるシンクロトロン放射のエネルギーは電波から軟ガンマ線領域程度であり、高エネルギーガンマ線にはあまり寄与しない。

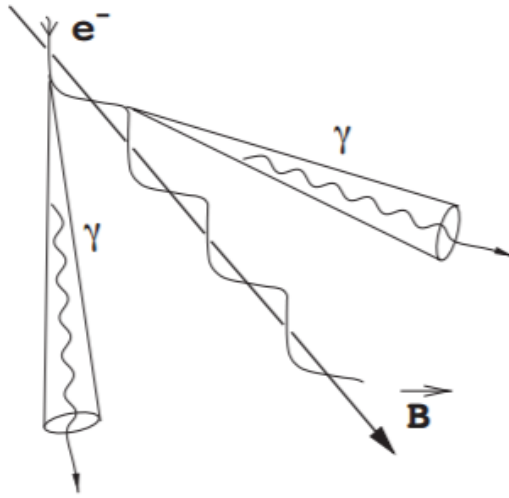


図 1.3: シンクロトロン放射 [2]

- 逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering)

相対論的な高エネルギーの荷電粒子が光子と衝突し、光子のエネルギーを叩き上げる現象を逆コンプトン散乱と呼ぶ。放射場（光子）のエネルギー密度を U_{rad} とすると、電子の逆コンプトン散乱による単位時間当たりのエネルギー損失は

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_{TC}\gamma^2 U_{rad} \quad (1.3)$$

と表される。相対論的な電子による逆コンプトン散乱の場合、GeV から TeV 程度まで光子のエネルギーを叩き上げることが可能であり、高エネルギーガンマ線放射過程の一つである。

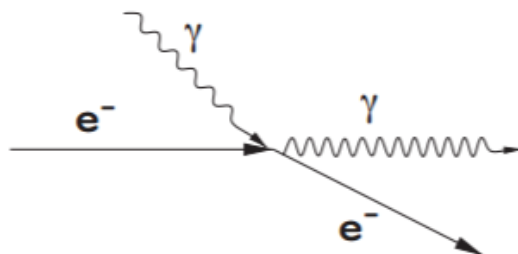


図 1.4: 逆コンプトン散乱 [2]

- 中性パイオンの崩壊 (π^0 decay)

加速された相対論的な宇宙線陽子が星間物質中の原子核や陽子と衝突することにより、中性・荷電パイオン (π^0 、 π^\pm) が生成される。このうち、中性パイオンが2つのガンマ線に崩壊する。

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^0 + \pi^+ + \pi^- \quad (1.4)$$

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma \quad (1.5)$$

この反応で中性パイオンが生成されるためには、宇宙線陽子のエネルギー E_p が

$$E_p - m_p c^2 \geq 2m_\pi c^2 \left(1 + \frac{m_\pi}{4m_p}\right) \approx 280 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

$$m_\pi c^2 = 135 \text{ MeV} : \text{中性パイオンの静止エネルギー、}$$

$$m_p c^2 = 938 \text{ MeV} : \text{陽子の静止エネルギー}$$

を満たす必要がある。また、中性パイオンは 8.4×10^{-17} 秒で2つのガンマ線に崩壊し、中性パイオンが静止していると仮定すると、 $E_\gamma = \frac{1}{2}m_\pi c^2 = 67.5 \text{ MeV}$ のガンマ線が正反対の方向に放射される。

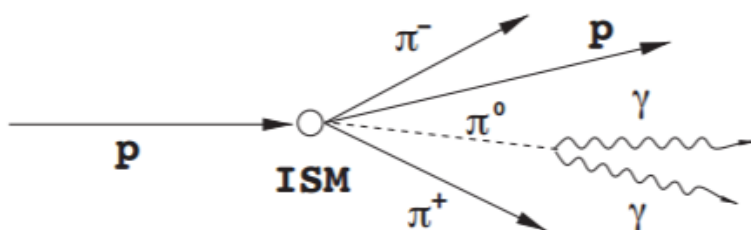


図 1.5: π^0 中間子の崩壊 [2]

- 粒子 - 反粒子対消滅 (Pair Annihilation)

粒子とその反粒子が衝突すると、そのエネルギーを光子に変換する。これを粒子 - 反粒子対消滅と呼ぶ。代表的な例として、図 1.6 の電子 - 陽電子対消滅

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma \quad (1.7)$$

および陽子 - 反陽子対消滅

$$p + \bar{p} \longrightarrow \pi^0 + \pi^+ + \pi^- \quad (1.8)$$

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma \quad (1.9)$$

が挙げられる。

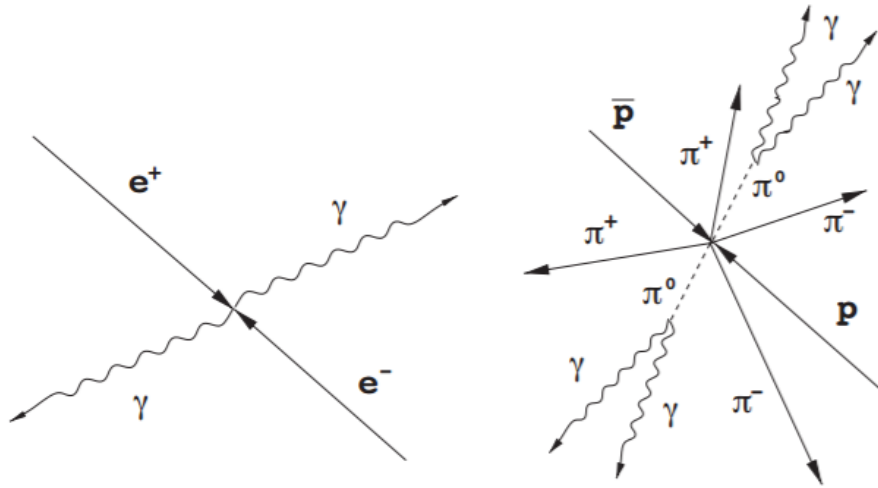


図 1.6: 電子 - 陽電子対消滅 (左)、陽子 - 反陽子対消滅 (右) [2]

1.3 解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線観測

1970 年代、衛星に搭載された検出器による観測から始まった宇宙ガンマ線の研究は、最新のガンマ線観測衛星であるフェルミガンマ線宇宙望遠鏡 Fermi-LAT の打ち上げ以来、高エネルギー天体の観測において数々の成果を残してきた。しかし、ガンマ線のエネルギーが高くなると急激に到来頻度が減少し、衛星に搭載可能な検出器での観測は難しくなる。現在では 300 GeV が Fermi-LAT のエネルギー上限値である。そこで、それ以上の高エネルギーガンマ線の観測に対して有効となるのが、解像型大気チェレンコフ望遠鏡による地上観測である。解像型大気チェレンコフ望遠鏡は上空の大気をカロリメータとするため、Fermi-LAT の 1 m^2 に対して 4 桁から 5 桁以上大きい有効面積を実現する。

以下では、チェレンコフ光の発生原理や解像型大気チェレンコフ望遠鏡の検出原理などについて述べる。

1.3.1 空気シャワー

大気圏に入射した高エネルギー粒子（一次粒子）が、大気中の原子核との相互作用によって二次粒子を生成する。生成された二次粒子は相互作用によってさらに粒子を生成する。このように一連の反応が雪崩的に起こることで生成される粒子の集まりを空気シャワーと呼ぶ。一次粒子がガンマ線である空気シャワーを電磁カスケードシャワー、一次粒子が宇宙線陽子である場合をハドロンシャワーと呼ぶ。

- 電磁カスケードシャワー

大気圏に入射する一次粒子がガンマ線の場合、相互作用には以下の二種類が考えられる。

- 電子 - 陽電子対生成

$$\gamma \longrightarrow e^+ + e^- \quad (1.10)$$

- 制動放射

$$e^+ \longrightarrow e^+ + \gamma \quad (1.11)$$

$$e^- \longrightarrow e^- + \gamma \quad (1.12)$$

電子 - 陽電子対生成と制動放射が雪崩的に起こることで、図 1.7 のように空気シャワーを生成し、この過程を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。この反応は大気中の相互作用において、電離損失が制動放射よりも優位になる臨界エネルギー約 83 MeV 以下になるまで繰り返される。

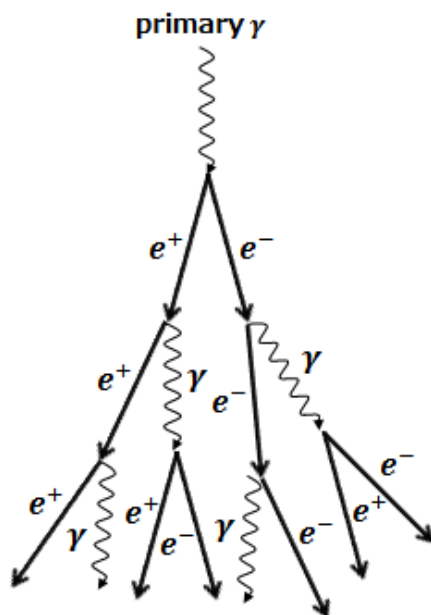


図 1.7: 電磁カスケードシャワーの模式図

- ハドロンシャワー

大気圏に入射する一次粒子が陽子などのハドロン由来の高エネルギー宇宙線の場合、1.2章で述べたように、大気中の原子核との相互作用により主に中性・荷電パイオン (π^0 , π^\pm) が生成される。ここで生成された荷電パイオンはさらに荷電ミューオン (μ^\pm) と

ニュートリノを生成する。中性パイオンは 8.4×10^{-17} 秒で 2 つのガンマ線に崩壊し、そのガンマ線が電磁カスケードを起こすことで空気シャワーが発達する。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.13)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.14)$$

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma \quad (1.15)$$

一方、生成した荷電ミューオンは電子 - 陽電子とニュートリノを生成し、電子 - 陽電子による制動放射によるガンマ線から電磁カスケードを起こす。

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.16)$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.17)$$

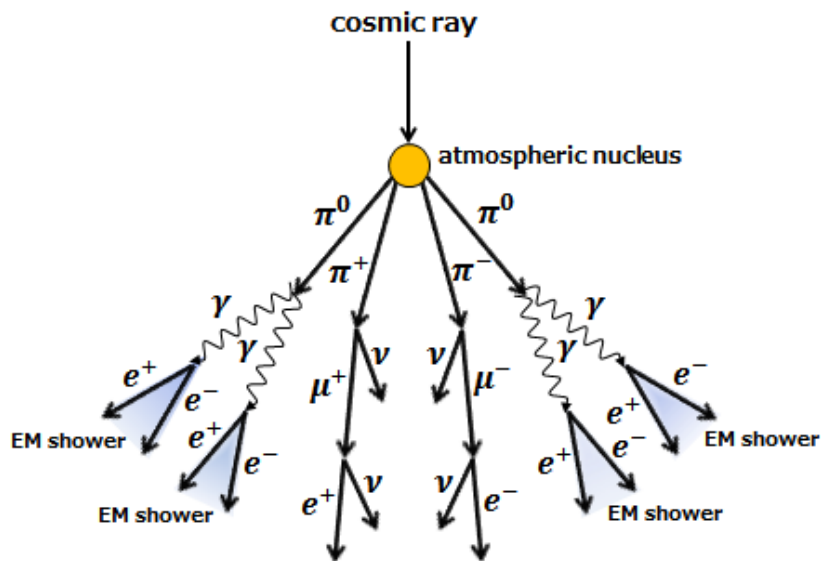


図 1.8: ハドロンシャワーの模式図

1.3.2 チェレンコフ放射

荷電粒子が大気中を通過するとき、大気を構成する物質のクーロン力により荷電粒子はエネルギーを損失し、そのエネルギーは荷電粒子の近傍で吸収されてしまう。しかし、荷電粒子の速度が大気中の光速を超えると電磁波を放射する。これをチェレンコフ光と呼ぶ。チェレンコフ光が放射される条件は荷電粒子が

$$v > \frac{c}{n} \quad (1.18)$$

v : 荷電粒子の速度、 c : 真空中の光速、 n : 大気の屈折率

を満たすときである。屈折率 $n \approx 1.00029$ の大気中において、荷電粒子がチェレンコフ光を放射することのできる速度は光速の約 99.97% 以上であり、このときの放射角 θ_c は

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{1}{\beta n}\right) \approx 1.38 \text{ deg.} \quad (1.19)$$

となり、進行方向に対し半頂角およそ 1.4° の円錐状にチェレンコフ光が放射されることになる (図 1.9 (b))。

電子 (陽電子) の運動エネルギーを E_e とすると、電磁カスケードシャワー中の電子 (陽電子) によってチェレンコフ光が放射される運動エネルギー条件は、

$$E_e \geq E_{tot} - m_e c^2 \approx 21 \text{ MeV} \quad (1.20)$$

E_{tot} : 電子 (陽電子) の全エネルギー、 m_e : 電子 (陽電子) の質量

であり、単位時間あたりに放射されるチェレンコフ光子の個数は

$$N = 2\pi\alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{(\beta n(\lambda))^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (1.21)$$

α : 微細構造定数、 λ_1 、 λ_2 : 観測する波長帯の下限、上限

で表され、大気による散乱・吸収を無視すると $1/\lambda^2$ に比例したスペクトル形状となる。

実際には上空で放射されたチェレンコフ光が地上に到達するまでに以下の要因により散乱や吸収を受けるため、そのスペクトルは 300 – 350 nm 付近にピークをもつ形状となる (図 1.10)。

- レイリー散乱 (Rayleigh scattering) [3][4]
入射波長に比べて非常に小さい粒子による光散乱プロセスである。レイリー散乱は入射波長の λ^{-4} に比例するため、チェレンコフ光の短波長領域に影響を及ぼし、チェレンコフ光減衰の主要なプロセスとなっている。
- ミー散乱 (Mie scattering) [3][4]
この散乱過程はエアロゾルと呼ばれる大気中の塵など、任意の大きさの粒子によるものである。標高 2000 m 以上でのチェレンコフ光減衰に対する相対的な寄与は小さいが、大気中の塵の増加や高湿度の条件では、ミー散乱が支配的なプロセスになることがある。
- オゾンによる吸収 ($\text{O}_3 + \gamma \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$) [3][4]
オゾン (O_3) は高度 10 - 40 km に広く分布しており、300 nm 以下の波長領域において非常に強い吸収を示す。この効果によって短波長のチェレンコフ光は、地面まで短い距離にある粒子によって生成されたときのみ検出することができる。

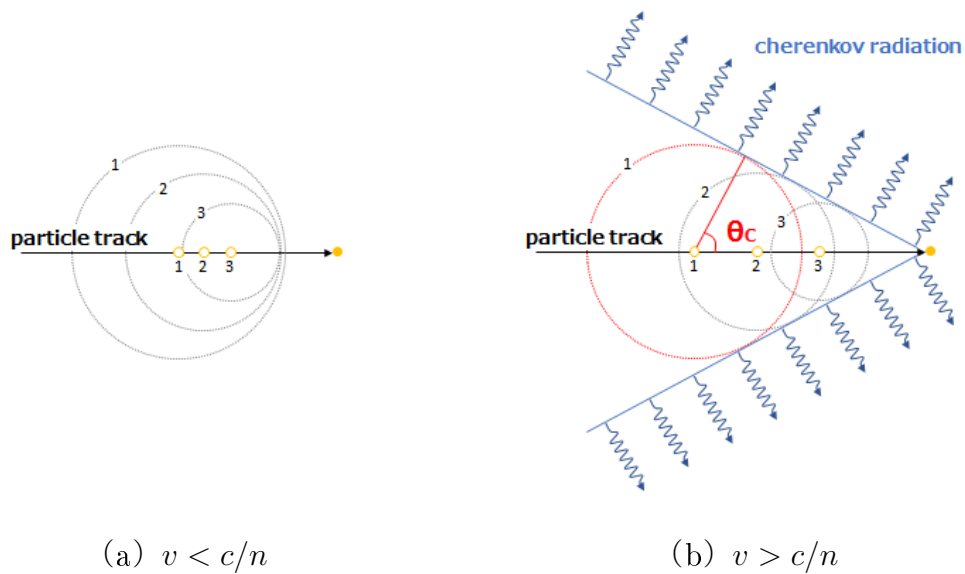


図 1.9: チェレンコフ放射の模式図

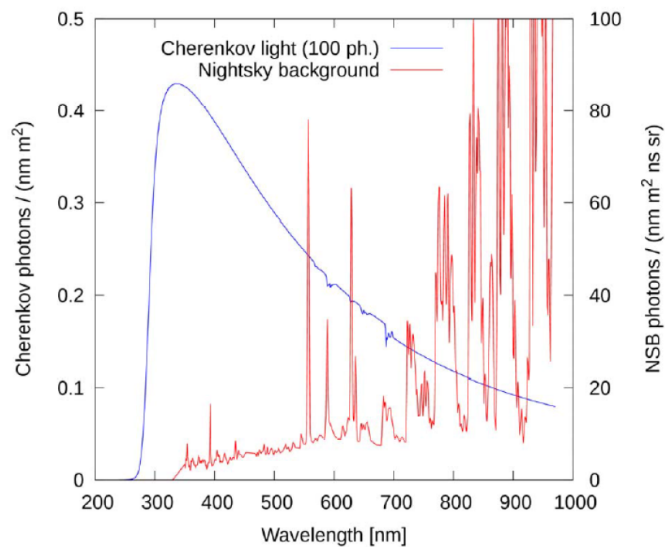


図 1.10: 地上に到達するチェレンコフ光のスペクトル（青）と夜光バックグラウンド（赤） [5]

1.3.3 ガンマ線検出原理

解像型大気チェレンコフ望遠鏡は上空で放射されたチェレンコフ光を地上で捉えることで、その由来であるガンマ線のエネルギーと到来方向を決定するということがコンセプトとなっている。

大気チェレンコフ望遠鏡は、放物状の主鏡とその焦点面に設置されたカメラによって構成される。チェレンコフ光は地上に設置された望遠鏡の主鏡によって反射・集光され、焦点面

のカメラによって光量とシャワーイメージが電気信号として記録される。シャワーイメージは空気シャワーの軸と望遠鏡のポインティングの角度によって異なり、図 1.11 のような楕円形状となる。このようなシャワーイメージと光量から、間接的に地球大気に入射したガンマ線の到来方向、エネルギーが決定される。

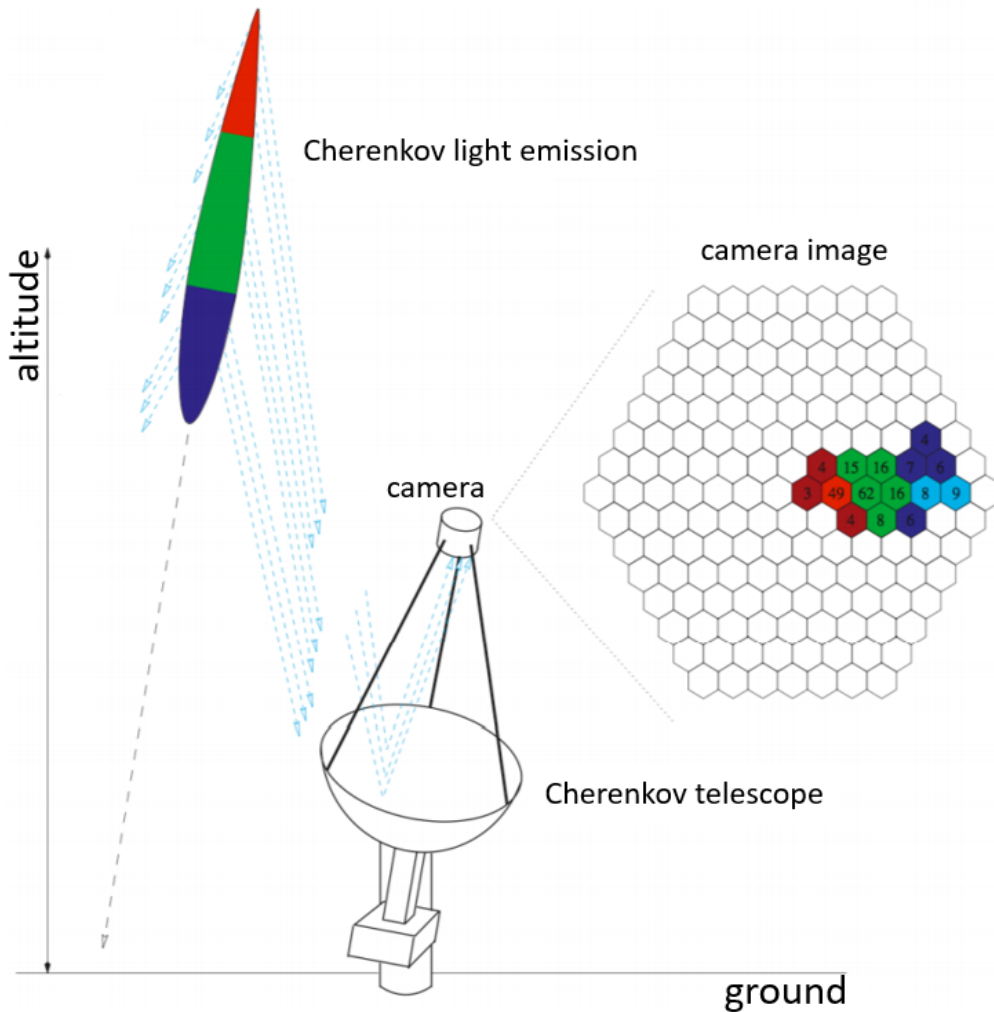


図 1.11: 解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線検出原理 [6]

1.3.4 イメージング法

解像型大気チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測においてバックグラウンドとなる宇宙線陽子もガンマ線と同様に多数のサブ電磁カスケードシャワーを生成し、チェレンコフ光を放射する。これらのハドロンシャワーによるチェレンコフ光のイメージと、ガンマ線によるチェレンコフ光のイメージを正確に分離することが重要となる。ガンマ線によるシャワーとハドロンによるシャワーは、発達の方法や広がり方に違いがあるため、望遠鏡で記録したシャワーイメージから識別することが可能である。その方法をイメージング法と呼ぶ。

イメージング法では、図 1.12 のように観測したシャワーイメージを楕円形で近似し、シャワーの形状を特徴づけるパラメータ (Hillas parameter) を定義することで定量的に記述し、

ガンマ線シャワーとハドロンシャワーを分離する。現状では Hillas parameter を用いた解析により、宇宙線除去率 $\sim 99.9\%$ を達成している。以下に主な Hillas parameter を示す。

- **Size** : シャワーイメージ内に含まれる総光量
- **Length** : 楕円形状の長軸に相当する広がり
- **Width** : 楕円形状の短軸に相当する広がり
- **Distance** : 楕円形状の重心とシャワー発生源との距離
- **Alpha** : 楕円形状の長軸と重心とカメラピクセル上での天体がなす角度

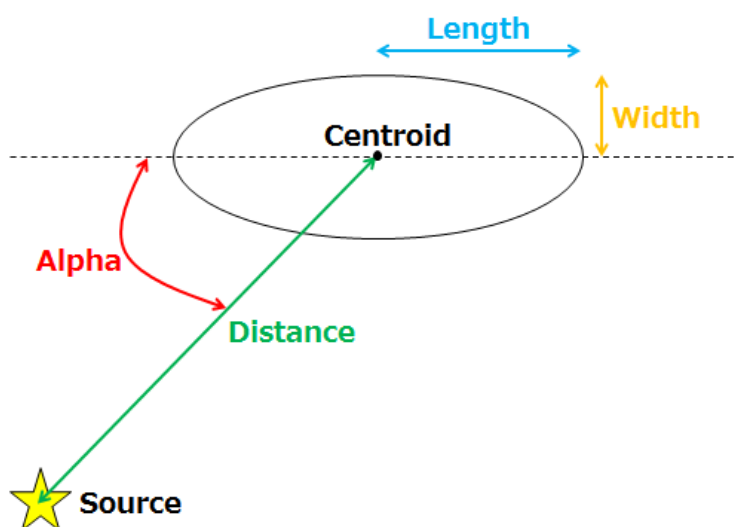


図 1.12: Hillas parameters

図 1.13 からガンマ線によるシャワーと比較して宇宙線陽子によるシャワーの方が横方向に広がっていることがわかる。ハドロンシャワーの横方向の広がり、宇宙線陽子と大気中の原子核との相互作用において二次粒子に与えられる横方向の運動量によって引き起こされ、それは一次粒子のエネルギーとはほぼ無関係に約 300 – 400 MeV であることが知られている [7]。その結果、図 1.14 のように焦点面カメラで捉えられるシャワーイメージは、ガンマ線由来のシャワーがコンパクトであるのに対し、宇宙線陽子由来のシャワーは横方向に広がり、不規則な形状となる。

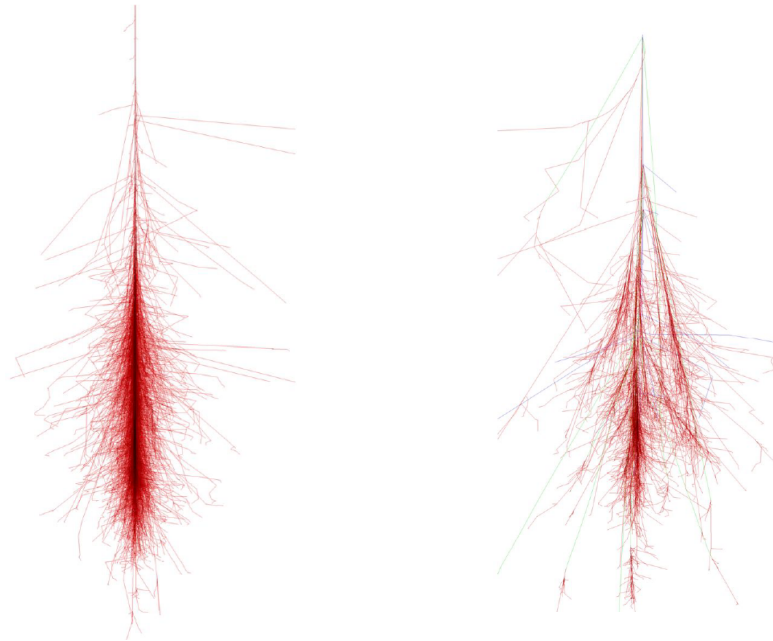


図 1.13: 100 GeV のガンマ線によるシャワー（左）、100 GeV の陽子によるシャワー（右） [8]

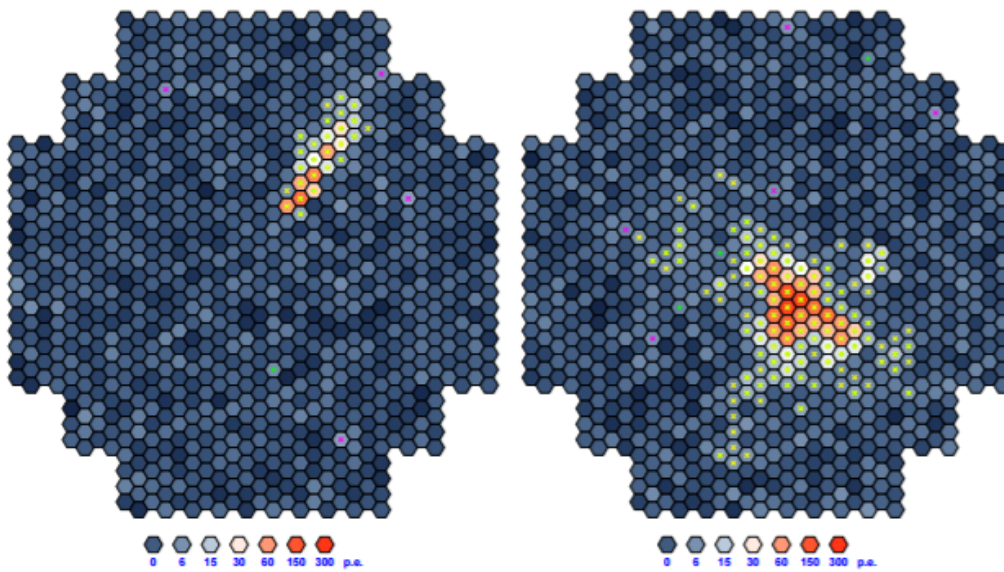


図 1.14: 焦点面カメラで捉えられるガンマ線シャワーイメージ（左）とハドロンシャワーイメージ（右） [9]

1.3.5 ステレオ観測

解像型大気チェレンコフ望遠鏡による観測では、ガンマ線の到来方向決定の手法としてステレオ観測技術を利用し、高い精度での到来方向決定が可能となる。ステレオ観測は2台以上の望遠鏡が必要であり、台数を増やすほど角度分解能やエネルギー分解能の向上が期待できる。

図 1.15 のように複数の望遠鏡により観測したシャワーイメージを楕円形で近似し、焦点面上で重ねることによって全シャワーイメージの長軸の交点を求める。この交点がシャワーの到来方向を示しており、つまりガンマ線の到来方向を決定することができる。しかし、シャワーイメージの長軸同士が平行に近くなると高精度で到来方向を決定することができないため、望遠鏡の位置関係を上手く調整する必要がある。

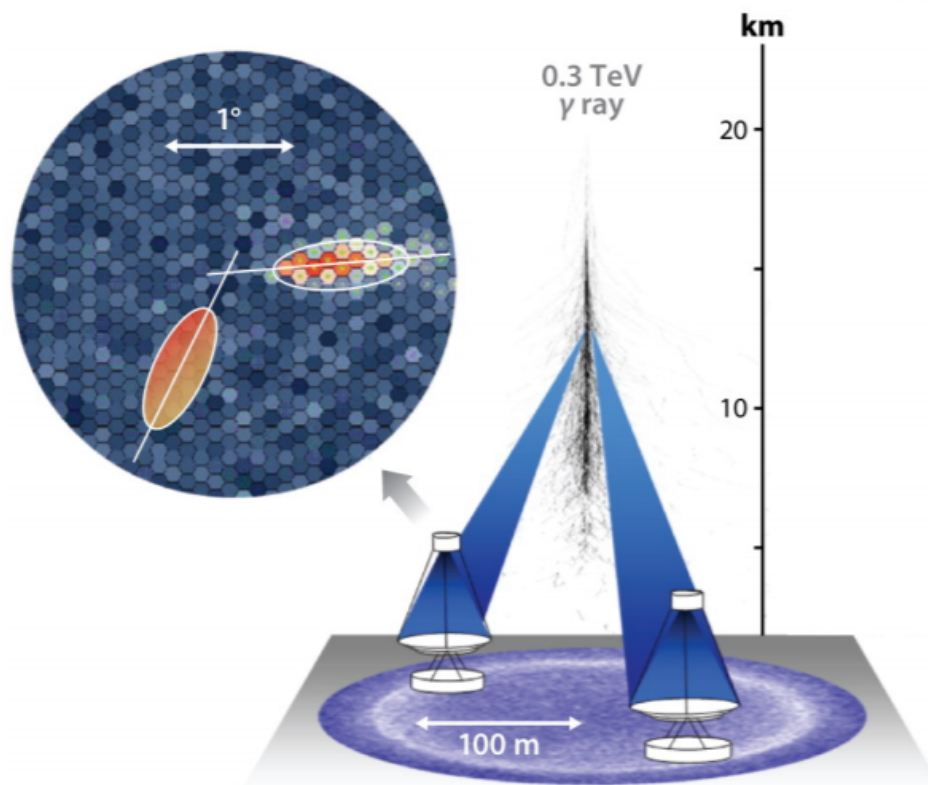


図 1.15: 複数台の望遠鏡を用いたステレオ観測 [10]

1.3.6 現在稼働中の大気チェレンコフ望遠鏡

複数台の解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるステレオ観測が主流となった 2000 年代以降、人工衛星の $10^4 \sim 10^5$ 倍に及ぶ有効面積や高い角度分解能を利用して、TeV 領域の超高エネルギーガンマ線天体の検出に貢献している。現在稼働中の主な大気チェレンコフ望遠鏡を以下に示す。

	MAGIC	H.E.S.S.	VERITAS
設置サイト	La Palma, Canary Islands	Namibia	Arizona, US
標高	2,200 m	1,800 m	1,400 m
緯度	28°45' N	23°16' S	31°07' N
望遠鏡台数 × 口径	2×17 m	4×12 m, 1×28 m	4×12 m

表 1.1: 現在稼働中の大気チェレンコフ望遠鏡の概要



図 1.16: MAGIC 望遠鏡 [11]



図 1.17: H.E.S.S. 望遠鏡 [12]



図 1.18: VERITAS 望遠鏡 [13]

第2章 Cherenkov Telescope Array, CTA

2.1 CTA 計画

次世代ガンマ線天文台 CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、TeV ガンマ線天体などの観測によりガンマ線天文学の飛躍的な発展を目指す国際共同実験計画である。現在 32 ヶ国から 1300 人を超える研究者が参加しており、2021 年から予定されているフルアレイによる観測に向けて進行中のプロジェクトである。

CTA 計画では、口径の異なる大・中・小 3 種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を設置することで、20 GeV から 300 TeV までという非常に幅広いエネルギー帯域での観測を可能にするとともに、角度分解能の向上やエネルギー分解能の改善、さらに既存の解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (1.3.6 章参照) と比較して 10 倍の感度を達成を目指す。

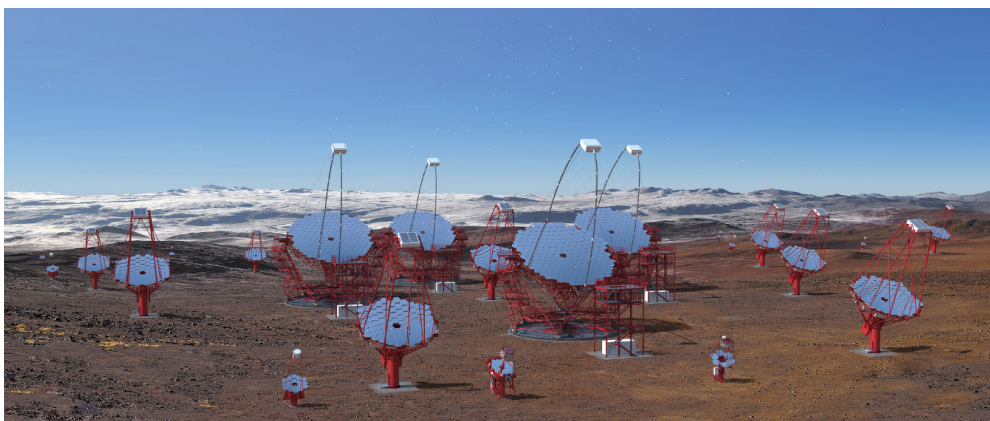


図 2.1: CTA 計画 完成予想図 (credit : Gabriel Pérez Diaz) [14]

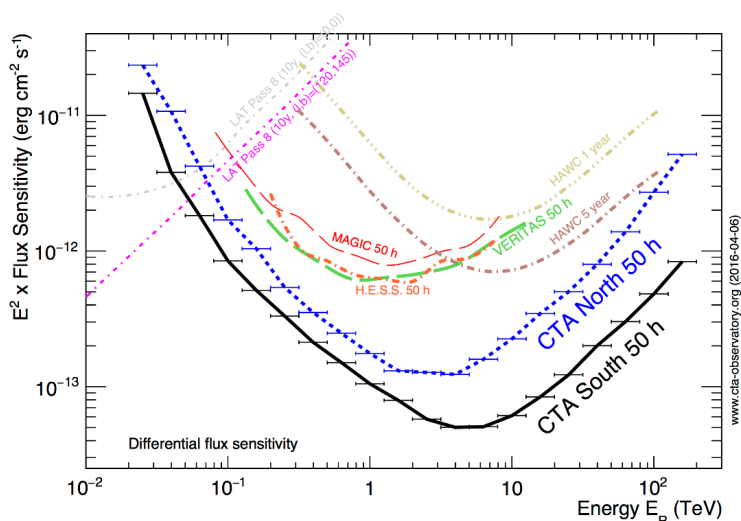


図 2.2: エネルギー感度曲線 [15]

2.2 望遠鏡デザイン

CTA 計画では、口径 23 m の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST)、口径 12 m の中口径望遠鏡 (Medium-Sized Telescope ; MST)、口径 4 m の小口径望遠鏡 (Small-Sized Telescope ; SST) が使用される。さらに、SST ではデュアルミラーの SST-GCT、SST-ASTRI、シングルミラーの SST-1M の 3 種類のデザインが検討されている (図 2.4)。望遠鏡は口径によって担当するエネルギー帯域が異なっており、LST、MST、SST を組み合わせることでコストパフォーマンスを最大化しつつ、20 GeV から 300 TeV という非常に幅広いエネルギー帯域を達成する。表 2.1 に各望遠鏡の主なパラメータを示す。

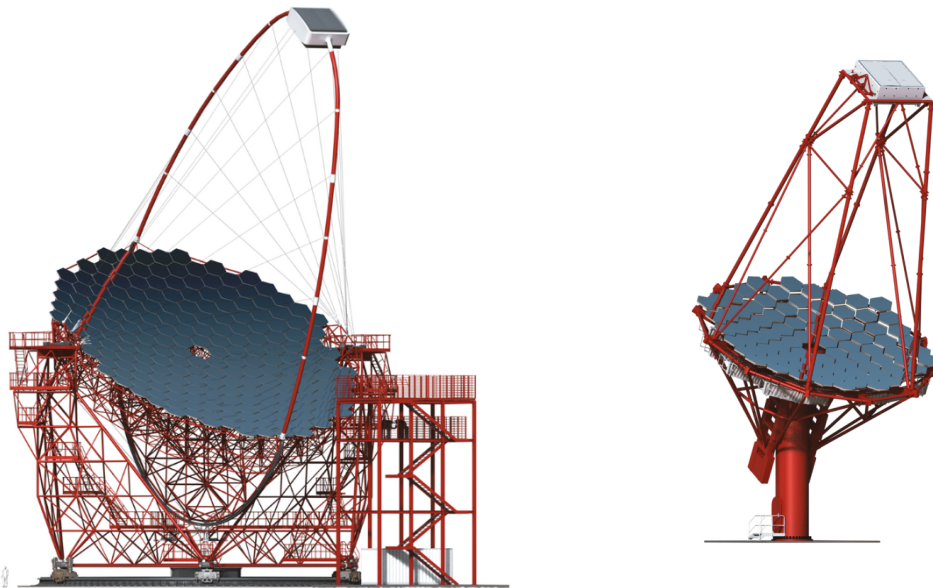


図 2.3: 大口径望遠鏡 (左)、中口径望遠鏡 (右) [15]

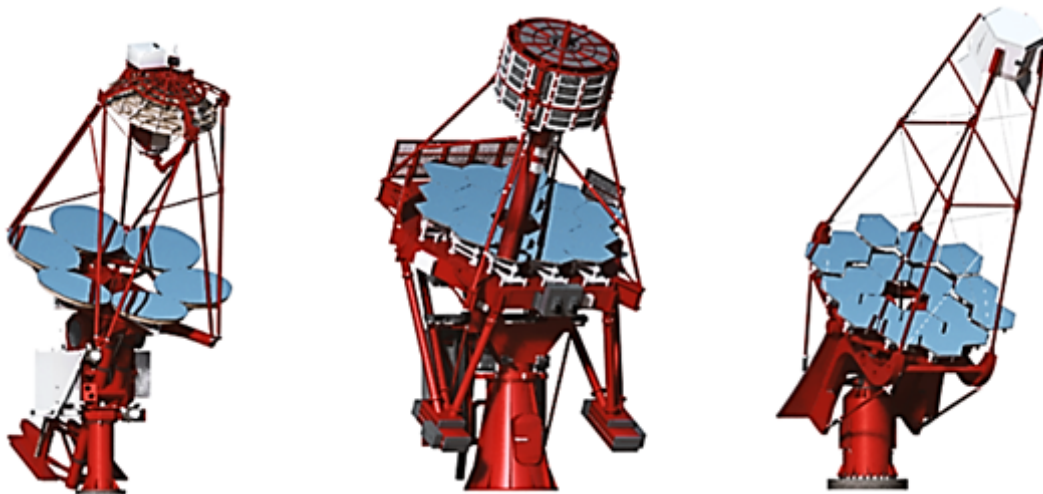


図 2.4: 小口径望遠鏡 (左から GCT、ASTRI、SST-1M) [15]

	LST	MST
口径	23 m	12 m
観測エネルギー範囲	20 GeV - 200 GeV	100 GeV - 10 TeV
反射面形状	Parabolic	Davies-Cotton or Schwarzschild-Couder
鏡有効面積	368 m ²	88 m ²
焦点距離	28 m	16 m
視野	4.5°	7° - 8°

SST (GCT)	SST (ASTRI)	SST (1M)
4 m		
5 TeV - 300 TeV		
Schwarzschild-Couder		Davies-Cotton
6 m ²	6 m ²	6.47 m ²
2.28 m	2.15 m	5.6 m
9.2°	9.6°	9.1°

表 2.1: 各望遠鏡の主なパラメータ

2.3 望遠鏡設置サイト

CTA では全天を観測するため、北半球と南半球二つの観測サイトからなり、どちらのサイトもガンマ線観測に最適な様々な条件を満たすことが要求される。以下に解像型大気チェレンコフ望遠鏡の設置場所として求められる主な条件を列挙する。

1. 高度 1000 - 3000 m
2. 夜間の晴天率 60% 以上
3. 人口光が夜光に比べて十分低い
4. 風速 20 m/s 以上になる頻度が十分低い

観測サイトの高度が高いほど空気シャワーまでの距離が近くなるため、地上で観測される光量が大きくなり、観測感度が改善する。逆に高度が低いほど地上におけるチェレンコフ光分布の広がりが大きくなるため、有効面積を改善する。これらの理由から、1 の条件は空気シャワーから放射されるチェレンコフ光の観測に適した高度である。2 から 4 の条件は観測への影響を考慮した条件となっている。

以上の地理的条件や気象条件に加え、アクセス、インフラ、政治的安定性などの条件を考えたうえで、北半球サイトをカナリー諸島（La Palma、28° N、2200 m a.s.l.）、南半球サイトをチリ（Paranal、25° S、2600 m a.s.l.）に決定した。

また、各望遠鏡（LST、MST、SST）の特徴やサイトの地理的条件などを考慮したモンテカルロシミュレーションによってアレイ配置の最適化を行い、広いエネルギー帯域での高感度観測を実現する。図 2.6 には、北半球サイトと南半球サイトそれぞれの最適化されたアレイ配置を示す。北半球サイトでは主に銀河系外天体を観測するため、SST は配置しない予定である。

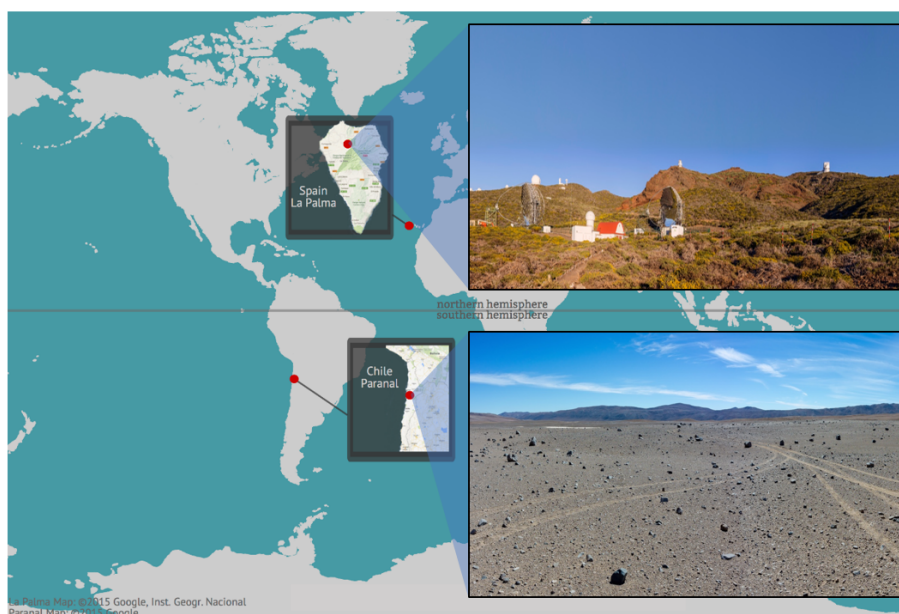


図 2.5: CTA 計画 望遠鏡設置サイト [15]

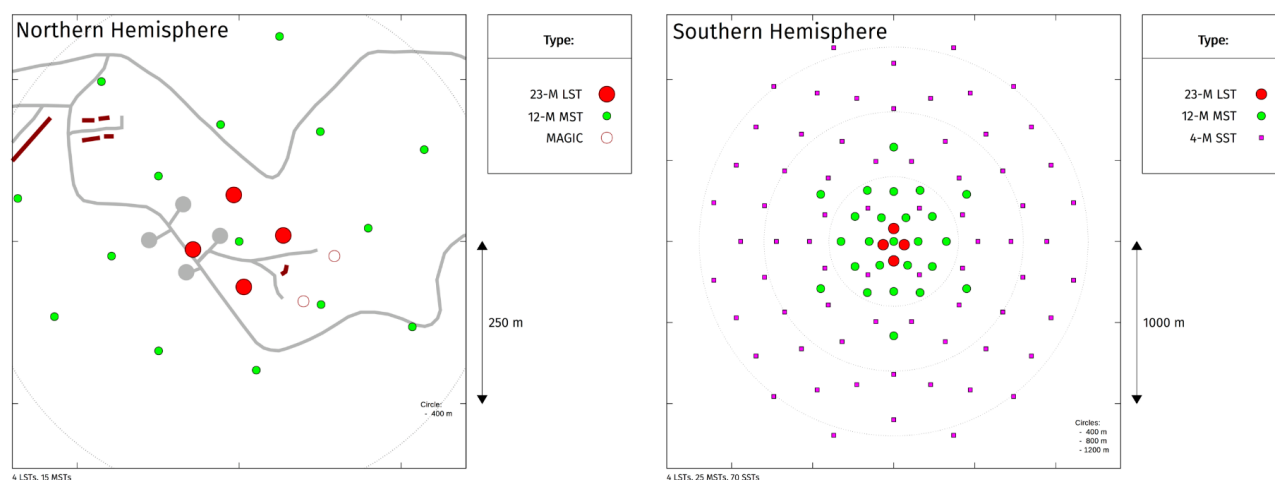


図 2.6: 最適化されたアレイ配置 [15]

2.4 大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST)

CTA-Japan グループが主体となって研究開発を進めているのが、この大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST) である (図 2.7)。LST の主鏡は 1 台あたり 198 枚の分割鏡を並べることで実現するが、そのほとんど全てを日本が生産する。また、分割鏡 1 枚 1 枚を制御し、最適化する Active Mirror Control (AMC) の開発も日本が担当している。これら光学系の開発に並び、焦点面カメラの開発も日本の大きな役割となっている。以上の光学機器、焦点面カメラの開発状況については 2.4.2 章、2.4.3 章に記述する。

また、LST 1 号機は北半球サイトの La Palma において建設が開始しており、2017 年 11 月にファーストライト (観測開始) を予定している。



図 2.7: LST 完成イメージ図 (イラスト 池下章裕氏) [5]

2.4.1 仕様

LST は 20 GeV から 200 GeV までの低エネルギー帯域をカバーし、今まで観測が困難であった数十 GeV のガンマ線観測に重要な役割を果たす。このエネルギー帯域ではチェレンコフ光の光子密度が低く、焦点面カメラで十分明るいイメージを得るためには広い集光面積が必要となる。そのため LST は主鏡口径 23 m、総有効面積 368 m² という非常に大きな集光面積を有する望遠鏡となっている。しかし、集光面積が大きくなると夜光 (バックグラウンド) の影響が大きくなるため、一般的なカメラの露光時間に対応するチェレンコフ光の積分時間を十分に短くすることが要求される。したがって主鏡は、集光されたチェレンコフ光の同時性を保証するために光路長一定の放物面鏡の構造をとる。

また、LST の観測エネルギー帯域では銀河系外のガンマ線バーストの観測が行えるため、それらの follow up 観測を行う。そのためガンマ線バーストなどの突発現象を捉えるために、高速回転により瞬時に天体を視野内に捉えることが必要となる。LST ではカメラ支持構造

とミラー支持構造には軽量かつ剛性を高めるカーボンファイバーチューブ、下部構造にはスチールパイプを用いることで総重量を約 100 トンとし、20 秒で 180 度回転が可能となるデザインである。表 2.2 には、LST の主要パラメータを示す。

反射面形状	Parabolic
焦点距離 (f)	28 m
主鏡口径 (D)	23 m
f/D	1.2
総有効面積	368 m ²
焦点面カメラ口径	2.25 m
ピクセル数	1855
ピクセルサイズ	50 mm
視野	4.5 deg
総重量	103 tons
回転速度	180 deg/20 sec

表 2.2: LST のパラメータ

2.4.2 光学機器の開発

分割鏡

LST の口径 23 m の主鏡は、対辺間の距離が 1.51 m の六角形の分割球面鏡 198 枚で構成され、図 2.8 が示すような構造で配置される。1 台の望遠鏡に対して必要とされる分割鏡の数が多ことから構造への荷重を考慮し、軽量であることが要求される。また、北半球・南半球サイトに建設される LST 8 台分計 1600 枚もの分割鏡が必要となるため、安価に効率的に製造する必要がある。

そこで、要求を満たす方法として「cold slump 法」を採用し、茨城県つくばみらい市の「三光精衡所」が全ての分割鏡を製造する。cold slump 法によって製造された分割鏡は、アルミハニカムをガラスシートで挟んだサンドイッチ構造であり、1 枚当たりの重さは約 47 kg に抑えられている。

また、低エネルギー帯域を観測する LST の主鏡に対しては高い反射率と集光効率も非常に重要となる。そのため、鏡面には 5 層の薄膜 (Cr + Al + SiO₂ + HfO₂ + SiO₂) がスパッタリング技術によってコーティングされており、高い反射率を実現すると同時に、劣化に強く長期間の使用も可能となっている。

能動的ミラー制御システム (Active Mirror Control ; AMC)

分割鏡は放物面上に最適化され配置されるが、仰角に大きく依存した構造体の歪みが発生し、期待する反射面からずれてしまう。この歪みは自重や風圧、温度変化によっても変化するため、鏡の向きを常に補正する必要がある。この歪みを補正する仕組みを能動的ミラー制

御システム（Active Mirror Control ; AMC）と呼び、図 2.9 は実際に MAGIC 望遠鏡に採用された AMC システムである。

MAGIC 望遠鏡では、各分割鏡に取り付けられたレーザーを焦点面に向けて照射し、望遠鏡中心のカメラでモニターすることによって、レーザースポットのずれから分割鏡のずれを検知する。一方、LST の AMC システムでは各分割鏡にカメラが取り付けられており、放物面鏡の光軸の基準となるレーザースポットをモニターすることでずれを検知する。つまり、LST と MAGIC 望遠鏡ではレーザーとカメラの役割が逆転している。各分割鏡の裏面には図 2.11 のように 3 つの固定パッドが取り付けられており、1 つは固定軸（図 2.12 (c)）、残り 2 つは 1 軸方向（図 2.12 (a)）、2 軸方向（図 2.12 (b)）にそれぞれ自由度をもつアクチュエータと接続し（図 2.13 ）、レーザースポットのずれをアクチュエータの長さに換算することで微調整を行う。

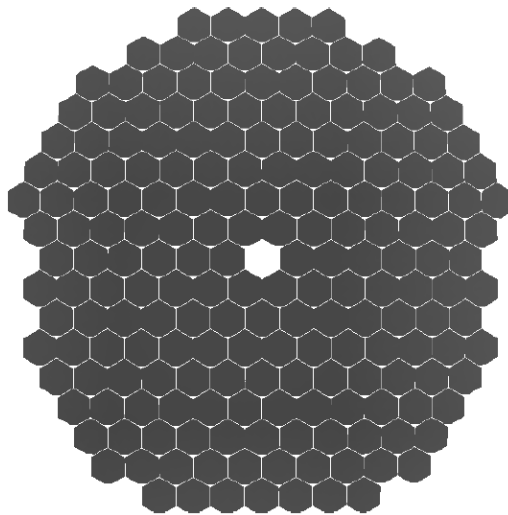


図 2.8: 大口径望遠鏡用分割鏡の配置 [5]

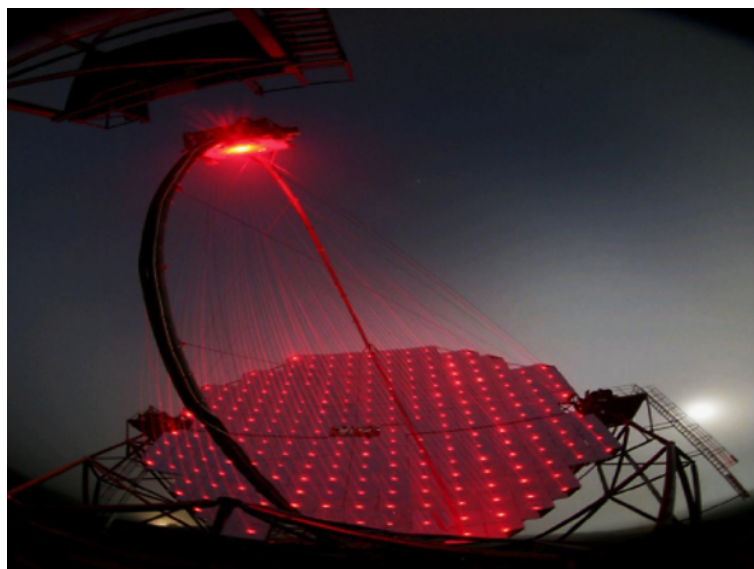


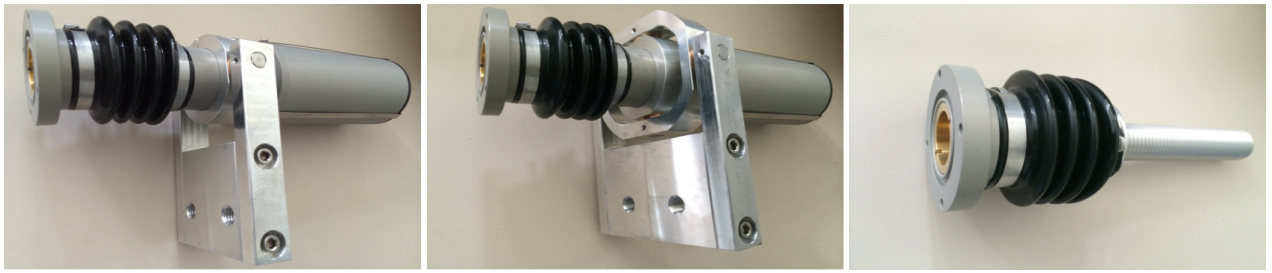
図 2.9: MAGIC 望遠鏡の AMC システム [16]



図 2.10: 分割鏡表面 [17]



図 2.11: 分割鏡裏面 [18]



(a) 1軸フリー

(b) 2軸フリー

(c) 固定軸

図 2.12: 2種類のアクチュエータと固定軸 [19]

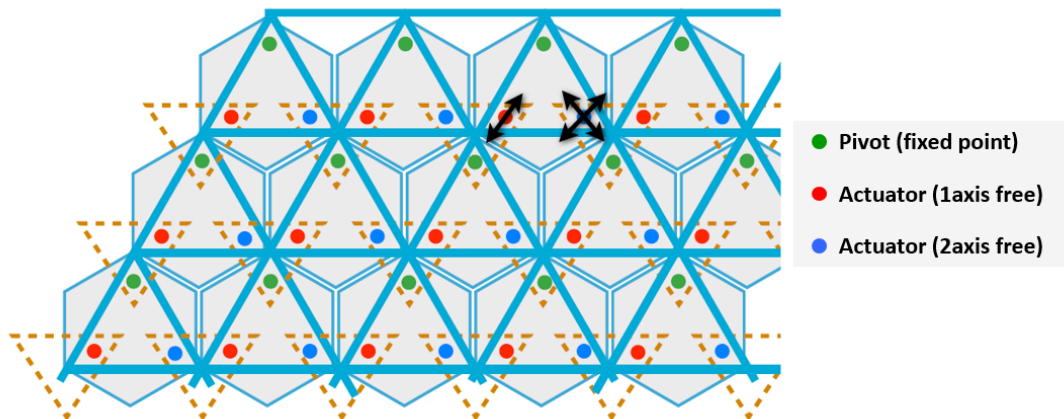


図 2.13: 分割鏡裏面の構造 [5]

2.4.3 焦点面カメラの開発

反射鏡によって集光されたチェレンコフ光イメージは、望遠鏡焦点面に設置されたカメラによって撮像される。焦点面カメラは光検出器として光電子増倍管（Photomultiplier Tube ; PMT）を使用し、それら 1855 本から構成される。PMT は入射窓が円形であるため、敷き詰めても隙間が生じてしまう。すなわち、デッドスペースとなるこの隙間に入射した光子は検出できない（図 2.14）。そこで、図 2.15 のようにライトガイドという光学素子を取り付けデッドスペースをなくすことで、効率よくチェレンコフ光を検出することが可能となる。このように、ライトガイドが装着された PMT 7 本を 1 束とし、後段にプリアンプ、読み出し回路、電源供給通信部分を取り付けたものをクラスターとして開発している（図 2.16）。PMT クラスターの環境による劣化を最小限に抑え、一定の環境で動作させるため、高い透過率の窓材を使用して密閉されたカメラ本体内部にインストールし、内部を適切な温度にコントロールする冷却システムの開発も進められている（図 2.17）。

3 章以降では本研究の本題である LST 用焦点面カメラ窓について詳細に記述する。

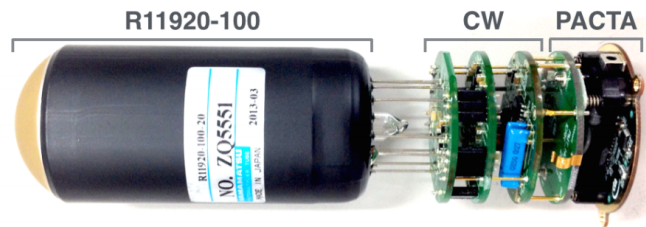


図 2.14: CTA 用の PMT module[20]

浜松ホトニクス社と共同開発したガンマ線観測用に最適化された PMT で、紫外線に対する量子効率が高い。PMT に Cockcroft-Walton (CW) 回路と前置増幅回路 PACTA を取り付け、PMT module として開発を行っている。

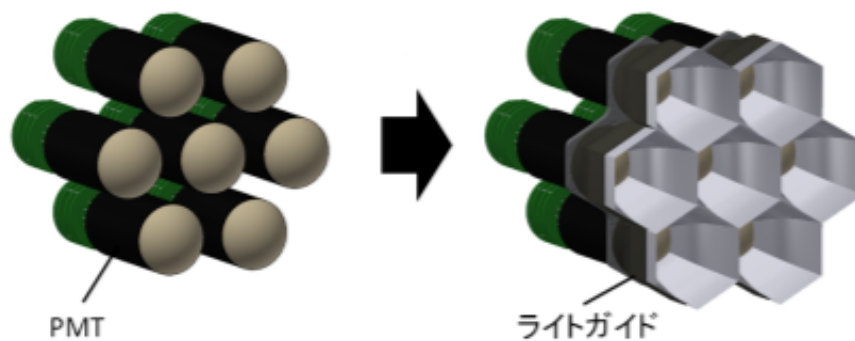


図 2.15: PMT7 本（1 クラスター）にライトガイドを装着したイメージ [21]

LST のカメラは PMT をハニカム構造に倣って配置するため、ライトガイドの入り口部分も六角形となっている。

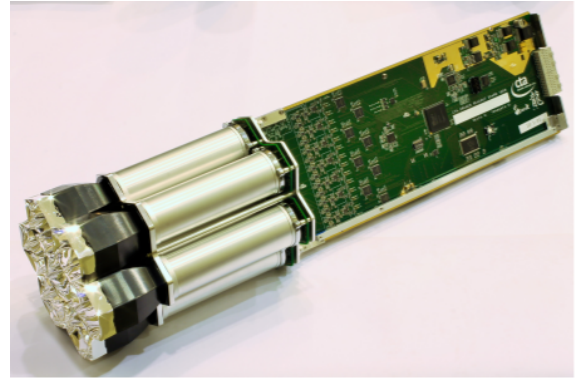


図 2.16: ライトガイド (左)、PMT クラスター (右) [21]

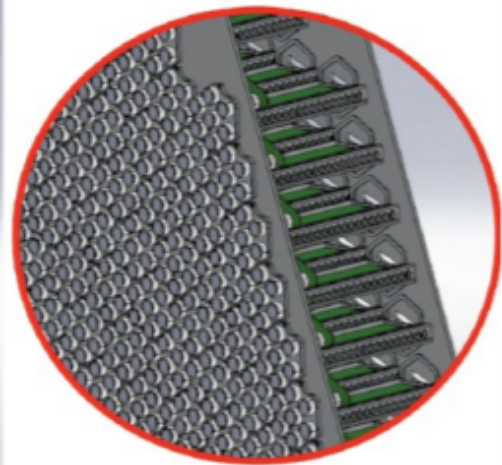
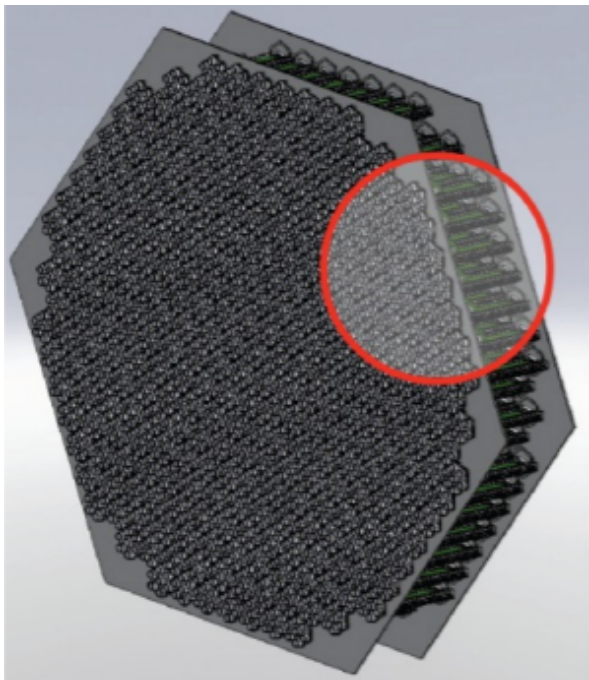


図 2.17: 焦点面カメラ完成イメージ [22]

第3章 大口径望遠鏡用カメラ窓に対する耐光性評価方法の検討

3.1 カメラ窓

LST の焦点面カメラは、砂埃や風雨などからカメラ表面を守るために高い密閉性能が要求されており、カメラの焦点面側の入り口部分は透明な窓材で覆う必要がある。地上に到達するチェレンコフ光のスペクトルは紫外線領域にピークをもつため、その窓材は波長 400 nm 以下の紫外線も十分に透過することが要求される。MAGIC 望遠鏡の焦点面カメラ窓には UV 透過型アクリル板「PlexiGlass[®]」が使用されており、紫外線透過性も十分あることが確認されている。しかし、LST の焦点面カメラの入り口部分を覆うためには直径 2.5 m 以上の大きさが必要となり、「PlexiGlass[®]」では製造できないことがわかった。そこで、以上の条件を満たす窓材として、三菱レイヨン社製の UV 透過型アクリル板「アクリライト[®]」が候補となっている。

焦点面カメラ窓に用いる予定になっている「アクリライト[®]」はそのサイズゆえに特注品である。「アクリライト[®]」は分割鏡の製造も行っている三光精衡所内の炉で加熱され、図 3.1 のようなドーム形状のカメラ窓に加工される。焦点面カメラの 2.5 m もの空間を平面な窓材で覆うとすると強度に問題があり、強風により内側に歪曲することでカメラを破壊する可能性があるが、ドーム形状に加工することで自重や強風にも耐えられる十分な強度を確保出来ることがわかった。

CTA 計画では約 20 年間の運用が予定されており、その期間中で焦点面カメラ窓の設置によるチェレンコフ光の損失を最小限に抑え、観測結果への影響を出来る限り最小化するためには、窓材の透過率や経年劣化などについて理解する必要がある。4 章では紫外線による劣化、5 章では加工時の熱による劣化について詳細に記述する。



図 3.1: 製作された大口径望遠鏡用カメラ窓 (三光精衡所にて)

3.2 促進耐光性試験 [23][24]

促進耐候性試験には太陽光を光源とした試験と人工光源を用いた試験に分類される。人工光源を用いた試験では降雨や温度差のサイクルなどにより実際の条件を再現させるような方法もある。4章では人工光源を用い、太陽光による劣化のみに特化した促進耐光性試験について記述する。

促進耐光性試験は、1910年代初めに紫外線カーボンアークが開発されてから約100年程度の歴史がある。現在の促進耐光性試験で主に用いられている人工光源は、紫外線カーボンアークランプ、サンシャインカーボンアークランプ、キセノンアークランプ、紫外線蛍光ランプ、メタルハライドランプである（以下にそれぞれのランプについて記述する）。これらのランプで実際の太陽光による劣化を再現出来るか、相関性があるのかといったことが非常に重要となってくるため、用いるランプのスペクトルが太陽光のスペクトルに似ていると良い。しかし、促進耐光性試験では放射照度が一定であるなど、実際の環境と促進耐光性試験の環境は異なるということを理解し、慎重に評価を行う必要がある。

項目	自然環境下	促進耐光性試験環境下
光	太陽光は1日において光に強弱がある。季節変動もあり、同一パターンでない。	放射照度がほぼ一定に制御されている。ランプによっては地上に到達しない紫外線の照射や、また促進性を上げるために高い放射照度を利用している。
熱	試料が受ける熱は絶えず変動している。	光源からの直接的な熱や制御によって温度がほぼ一定に保たれている。

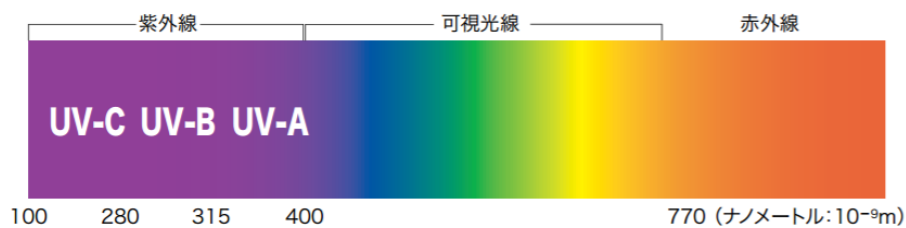


図 3.2: 紫外線・可視光線・赤外線 の波長区分 [25]

地上に到達する紫外線は UV-B (280 - 315 nm) と UV-A (315 - 400 nm) であり、UV-C 領域の紫外線は到達しない。

● キセノンアークランプ

キセノンアークランプ式耐光性試験は世界の主流となっている。このランプは石英ガラス管中に封入したキセノンガス中でアーク放電させることによって、脱励起時に地表での太陽光スペクトルに似ている発光が得られる。図 3.3 から紫外線領域から可視光線領域にかけて地上に到達する太陽光のスペクトルに近似した放射スペクトルであることがわかる。したがって、屋外曝露試験との相関性、再現性に優れている。しかし、赤外線領域に膨大な放射があるため非常に大きな熱が発生し、点灯中の石英ガラス管表面は数百度に達する。

キセノンアークランプ点灯時にはアーク放電を起こす必要があるため、数十 kV のトリガ電圧を供給する電源を要する。また、点灯後にはアーク放電に必要な電圧と電流を供給する安定器、発生する熱を処理する装置などが必要となる。

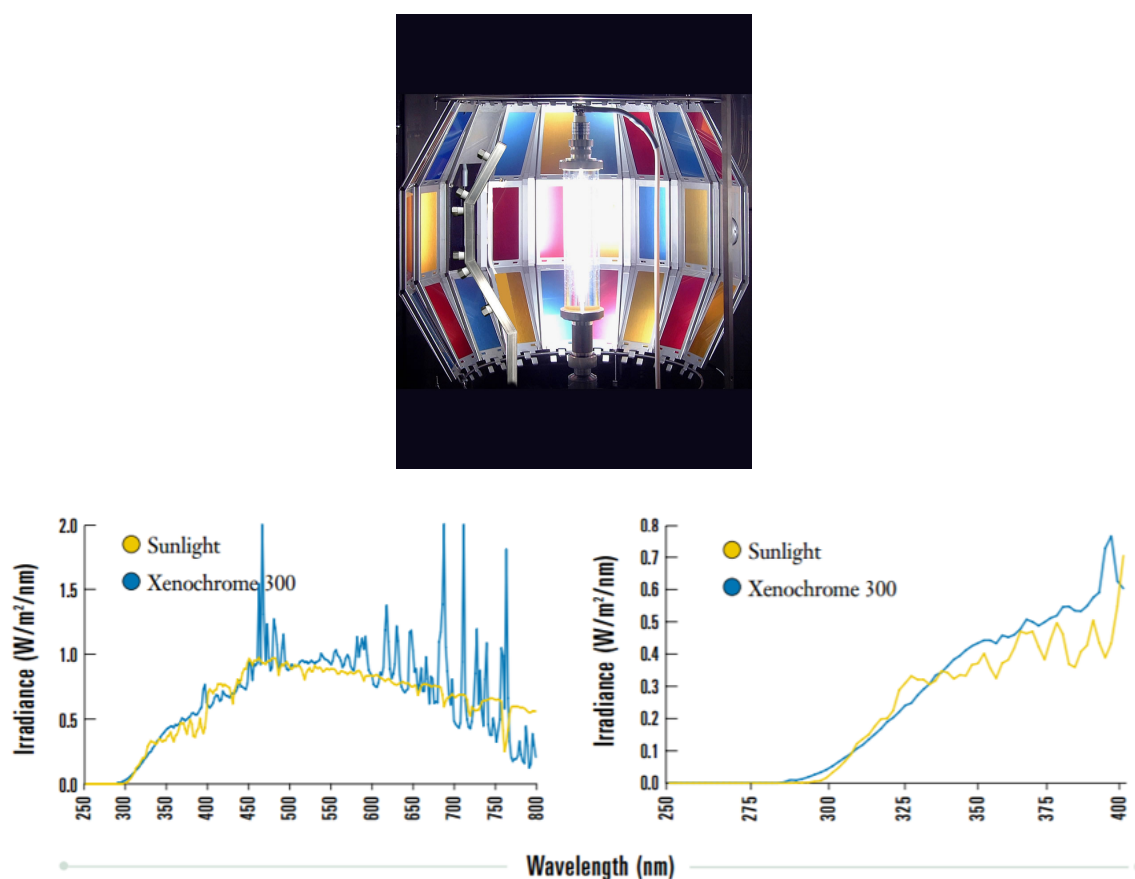


図 3.3: キセノンアークランプ [26] (上図) と地上に到達する太陽光スペクトルとの比較 [27] (下図)

黄線：地上に到達する太陽光のスペクトル、青線：キセノンアークランプの放射スペクトル。紫外線-可視光線域 (下図・左)、紫外線域拡大図 (下図・右)

● カーボンアークランプ

カーボンアークランプ式耐光性試験は最も古くから行われている試験であり、紫外線カーボンアークとサンシャインカーボンアークの2種類がある。

－ 紫外線カーボンアーク

密閉型カーボンアーク（Enclosed Carbon Arc Lamp）と呼ばれ、密閉された石英ガラス管中でカーボン電極をアーク放電させることで、紫外線を照射するものである。紫外線領域の放射が全体の80%以上を占めるので、主に降雨のない耐光性試験に用いられる。しかし、波長358、368、415 nmにピークをもつ極端に偏った放射スペクトルのため、屋外曝露試験との相関性、再現性という点ではあまり好ましくない。

－ サンシャインカーボンアーク

開放型カーボンアーク（Open Flame Carbon Arc Lamp）と呼ばれ、空气中でカーボン電極をアーク放電させる。地上に到達する太陽光に比べて紫外線領域の放射が大きく、太陽光には含まれない短波長の紫外線が少量含まれている。

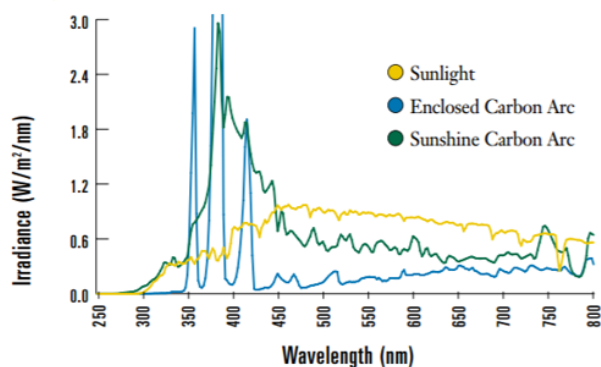
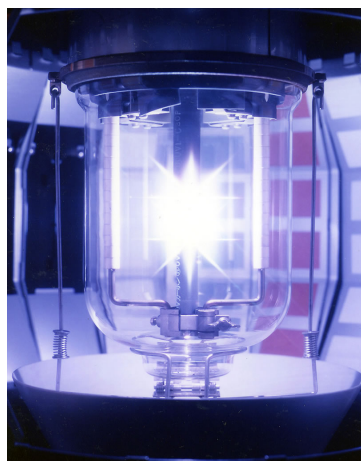


図 3.4: 紫外線カーボンアークランプ [26] (左図) とそのスペクトル [27] (右図)
黄線: 地上に到達する太陽光のスペクトル、青線: 紫外線カーボンアークランプの放射スペクトル、緑線: サンシャインカーボンアークランプの放射スペクトル

- 紫外線蛍光ランプ

紫外線蛍光ランプは一般にブラックライトと呼ばれ、発光原理は一般の蛍光灯と同じであるが使用する蛍光体によって波長分布を変えている。また、赤外線領域の放射が非常に小さく、また寿命が長いことも特徴の1つである。図 3.5 からタイプ 1A は波長 340 nm にピークをもち、放射スペクトルの立ち上がりが地上に到達する太陽光のスペクトルに似ている。タイプ 2 は波長 313 nm にピークをもつランプで、太陽光には含まれない短波長の紫外線が含まれている。

このランプは家電量販店などで安価に売られており、点灯により発生する熱も小さいことから非常に扱いやすいランプと言える。

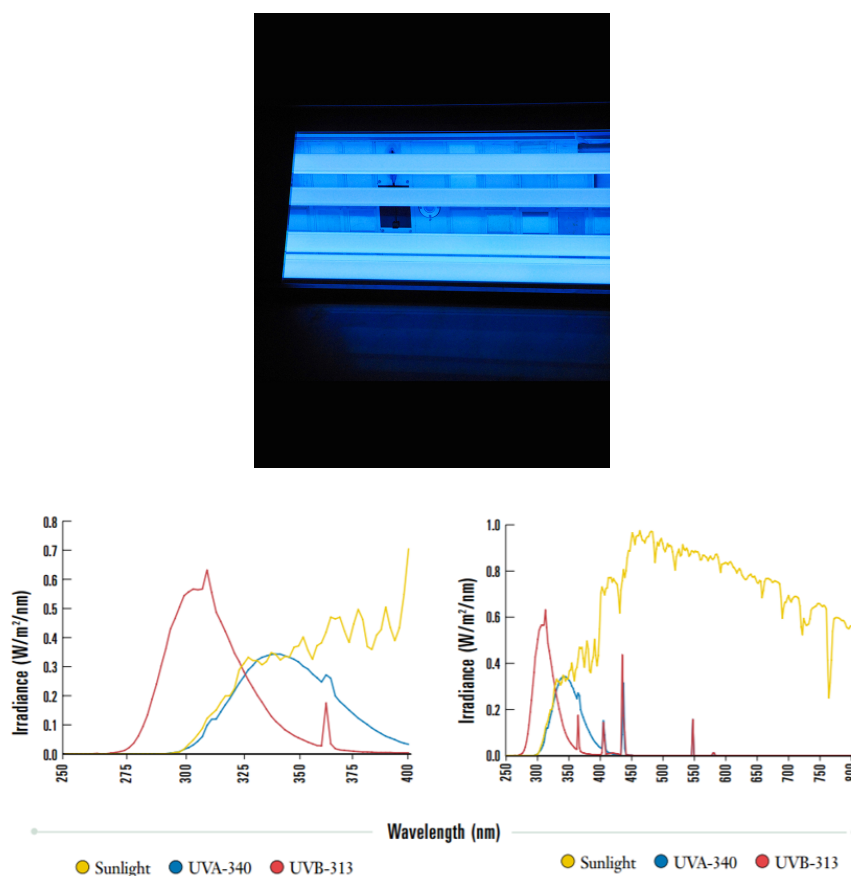


図 3.5: 紫外線蛍光ランプ [26] (上図) と地上に到達する太陽光スペクトルとの比較 [27] (下図)
 黄線：地上に到達する太陽光のスペクトル、青線：タイプ 1A (UVA-340 ; 340 nm にピークをもつ) の放射スペクトル、赤線：タイプ 2 (UVA-313 ; 313 nm にピークをもつ) の放射スペクトル。紫外線域拡大図 (下図・左)、紫外線-可視光線域 (下図・右)

- メタルハライドランプ

メタルハライドランプ式耐光性試験は 1980 年代後半に日本で独自に開発された試験でまだ歴史が浅い。メタルハライドランプは水銀ランプの一種である。水銀のほかにナトリウム、タリウム、インジウム、スカンジウム、錫などのハロゲン化物を封入したランプであり、非常に強力な紫外線を放射するが、組成は各メーカーにより異なるため放射スペクトルも異なっている。また、300 nm 以下の紫外線を大量に放射するため、一般的には短波長カットフィルタを用いている。

図 3.6 の放射スペクトルから、地上に到達する太陽光のスペクトルに非常に似ており、屋外曝露試験との相関性、再現性はキセノンランプよりも高いと考えられている。それに加え、放射照度が非常に大きく、太陽光の数十倍程度の促進性がある。

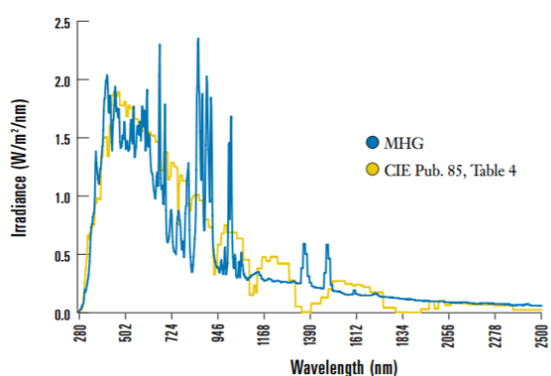
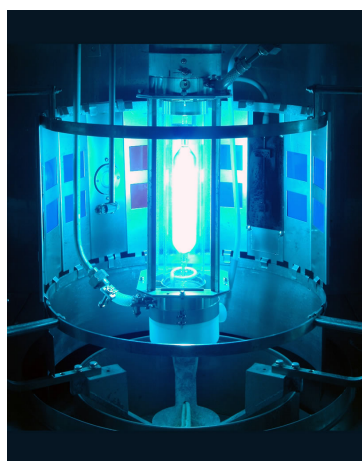


図 3.6: メタルハライドランプ [26] (左図) とそのスペクトル [27] (右図)
黄線: 地上に到達する太陽光のスペクトル、青線: メタルハライドランプの放射スペクトル

3.3 紫外可視分光光度計による透過率測定 [28][29]

3.3.1 紫外可視分光光度計

紫外可視分光法は主に電子遷移による吸収をスペクトルとして測定する。図 3.7 に紫外可視分光光度計の光学系の一例を示す。光源の光を回折格子で分光し、特定波長の光を順に試料とリファレンスに通していく。このようにして試料とリファレンスを通じた光を検出器によってデジタル処理し、スペクトルデータを得る。以下に紫外可視分光光度計の主な構成パーツである光源と検出器について記述する。

- 光源

紫外可視分光光度計は波長によって使用する光源を使い分けている。紫外線領域用には重水素ランプ（185 - 400 nm）、可視・近赤外線領域用にはハロゲンランプ（350 - 3000 nm）を使用しており、測定途中で光源を切り替える。検出器がフォトダイオードアレイである分光光度計の場合は短時間でのスペクトル測定が可能であるので、光源にはキセノンフラッシュランプ（185 - 2000 nm）を使用しているものもある。

- 検出器

紫外可視分光光度計の検出器も光源と同様、波長の感度特性によって使い分ける必要がある。代表的な検出器には、Si フォトダイオード（190 - 1100 nm）、PbS（900 - 1800 nm）、光電子増倍管（PMT、185 - 900 nm）がある。一般的には紫外線領域から可視光線領域にかけてを PMT、近赤外領域を PbS で検出するというように、2 種類の検出器を用いている分光光度計が多い。

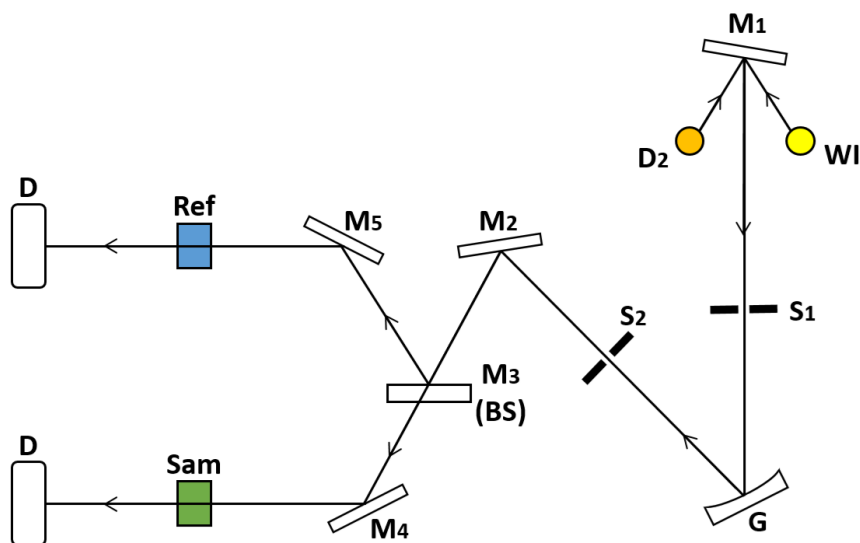


図 3.7: 紫外可視分光光度計の光学系の例

WI : ハロゲンランプ、D₂ : 重水素ランプ、G : 回折格子、M : ミラー、
BS : ビームスプリッター、S : スリット、D : 検出器、Sam : 試料光束、Ref : 対照光束

3.3.2 透過率測定

紫外可視分光光度計で透過率測定を行うときにはベースライン（ブランク）測定、試料測定
 の順で測定を進めていく。これはベースライン（ブランク）測定によって得られた透過率
 を 1 とし、試料測定の結果を補正するためである。図 3.8 のようにベースライン（ブランク）
 測定での対照光束、試料光束の透過度をそれぞれ R 、 S_{base} とすると、基準となるベー
 スライン（ブランク）の透過度 $Baseline$ が求まる。同様にして試料測定での対照光束、試
 料光束の透過度をそれぞれ R 、 S_{sample} とすると、試料測定透過度 $Sample$ が求まる。以
 上の結果を用いて、透過率 T は各波長ごとに下式で計算される。

$$T = \frac{Sample}{Baseline} \times 100 = \frac{(S_{sample}/R) \times 100}{(S_{base}/R) \times 100} = \frac{S_{sample}}{S_{base}} \times 100 \quad (3.1)$$

ここで、透過率 T の計算過程で 対照光束側の透過度 R が打ち消されるため、リファレンス
 を入れても入れなくても同じ結果になることがわかる。これは対照光束側と試料光束側で比
 をとることによって、光源の時間によるふらつきを補償し、透過率の時間による変動を低く
 抑えるためである。一般的に対照光束側には何も入れず、空気/空気でベースライン（ブ
 ランク）測定を行う。

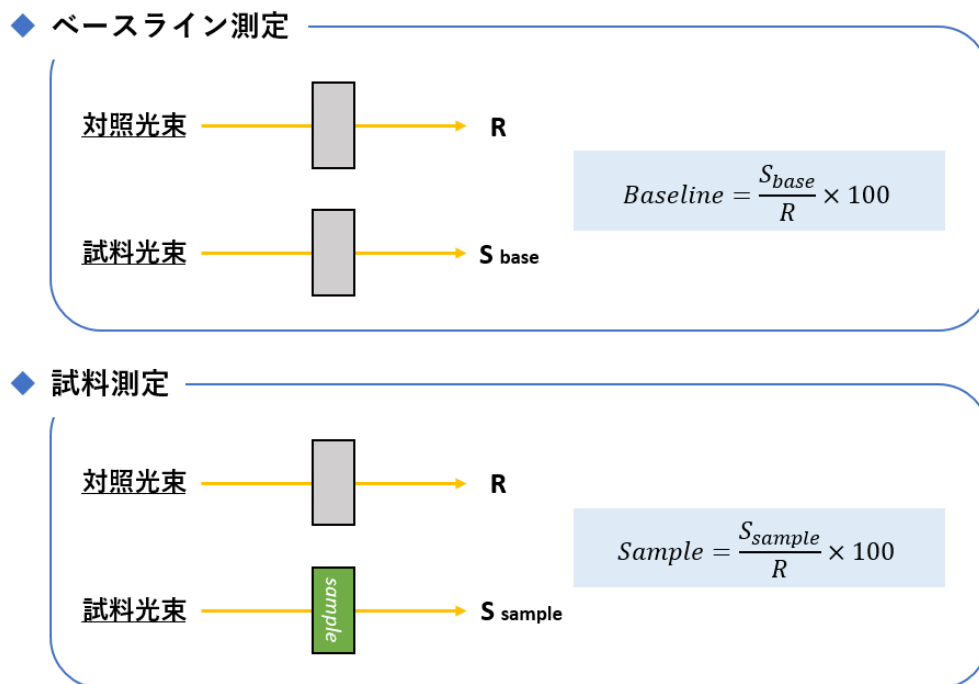


図 3.8: ベースラインと試料の測定

3.4 赤外分光光度計による IR スペクトル測定 [28][29][30]

3.4.1 赤外分光光度計

赤外分光法は主に物質構成分子の振動による吸収スペクトルを測定し、物質の分子構造（官能基、幾何異性、化学結合の状態など）の情報を得ることができる。そのため、現在では樹脂劣化・変色解析において必要不可欠な分析手法となっている。

赤外分光光度計は従来、走査型と呼ばれる回折格子を用いる光学系であったが、近年はコンピュータ技術を用いてスペクトルを得るフーリエ変換型（Fourier Transform Infrared Spectrometry ; FT-IR）が主流となっており、大部分を占めている。図 3.15 には FT-IR の光学系を示す。主に光源、干渉計、検出器から構成され、フーリエ変換やスペクトル計算を行うコンピュータが付属する。光源はセラミックスを使用したものが多い。検出器は焦電型の重水素化硫酸トリグリシン（Deuteriated triglycine Sulfate ; DTGS）検出器や半導体型のテルル化カドミウム水銀（MCT）検出器が最も一般的に用いられている。FT-IR の心臓部ともいえる干渉計はマイケルソン干渉計である。IR 光源から放射された光はまずビームスプリッタによって透過光と反射光に二分される。光の一方は固定鏡で、もう一方は可動鏡で反射されて、再びビームスプリッタで重ね合わされることによって干渉が起こる。この信号の交流成分をインターフェログラムと呼び、様々な波数の光の干渉波を重ね合わせたものとなる。この変調された光が試料を通ることで、励起された振動に応じて選択的に吸収を受け、インターフェログラムとして検出器で検出、記録される。最後にコンピュータがこのインターフェログラムをフーリエ変換することで透過スペクトルを得ることができる。

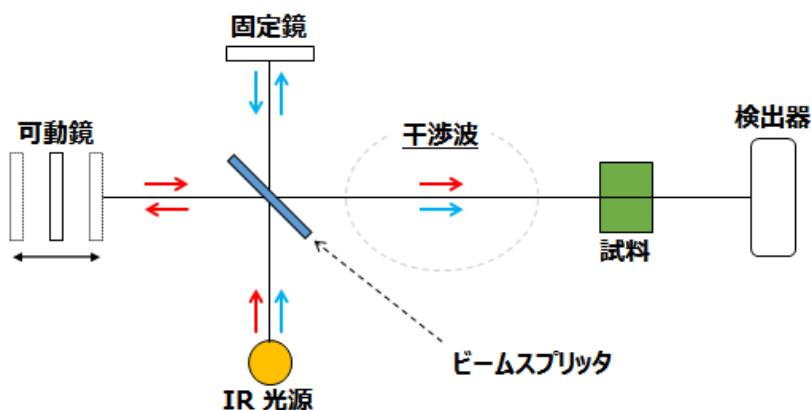


図 3.9: 赤外分光光度計（フーリエ変換型）の光学系

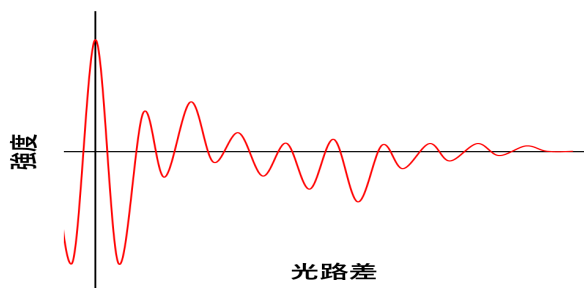


図 3.10: インターフェログラム
光路差が大きくなるほど波形は波打ちながら小さな値となる。

3.4.2 全反射測定 (Attenuated Total Reflection ; ATR) 法

試料が非常に薄く赤外光を十分に透過する場合は一般的に透過法によるスペクトル測定を行うが、試料が厚い場合やゴムなどのときは赤外光を十分に透過しないため、透過法によるスペクトル測定は難しい。実際に透過法により測定した「アクリライト[®]」サンプル (厚さ 6 mm) の IR スペクトルを図 3.11 に示す。見た目上は非常に透明度の高い物質であることは間違いないが、赤外光の透過率は小さい値をとっており、6 mm もの厚さがあると赤外光が十分に透過しないことがわかった。そこで、反射波を利用した全反射測定 (Attenuated Total Reflection ; ATR) 法により IR スペクトル測定を行う。

赤外光が屈折率の大きい物質 (物質 1) から屈折率の小さい物質 (物質 2) に入射する場合を考える (図 3.12 (左))。物質 1 と物質 2 の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 とすると、スネルの法則 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ が成り立つ。入射角 θ_1 が大きくなっていくと屈折角 θ_2 も大きくなっていくが

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = 1 \quad \left(\theta_2 = \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.2)$$

を超えると物質 2 に透過する赤外光は存在しない、すなわち全ての入射光が界面にて反射される。これを全反射と呼び、そのときの臨界角 θ_c は

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.3)$$

で表される。

全反射している場合、厳密には反射光のほかに、エバネッセント光と呼ばれる光が物質 1 から物質 2 に染み出しているような形態で存在する。エバネッセント光の電場は、Maxwell 方程式を起点にして界面における境界条件を考慮することにより

$$E(x, z) = E_0 \exp \left(-i\omega t - ik_2 x \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sin \theta_1 - k_2 z \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1 - 1} \right) \quad (3.4)$$

k_2 : 物質 2 での波数

と求められる。図 3.12 (右) に入射波、反射波、エバネッセント波の波面を示す。界面に垂直な z 方向の電場は、指数関数的に減衰することがわかる。この電場の値が $1/e$ になるときの z を染み込み深さと呼び、 d_p で表す。

$$d_p = \frac{\lambda_1}{2\pi \sqrt{\sin^2 \theta_1 - (n_2/n_1)^2}} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}} \quad (3.5)$$

λ : 真空中での赤外光の波長、 λ_1 : 物質 1 での赤外光の波長

ここで、物質 1 のことを ATR crystal (結晶) と呼び、主にゲルマニウム、ダイヤモンド、ZnSe が使用される。図 3.13 は ATR crystal (結晶) にゲルマニウム ($n_1 \approx 4.02$) を用い、アクリル樹脂 ($n_2 \approx 1.49$) を試料とした場合の染み込み深さの入射角・波数依存性である (式 (3.5) より)。図 3.14 は ATR アクセサリの断面図と ATR crystal (結晶) の配置図、図 3.15 には実際に本研究で使用した赤外分光光度計 Tensor 27 (Bruker) に ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) をセットした様子を示している。以上のように ATR crystal (結晶) から試料に光が染み出し、その試料に赤外光を吸収するエネルギー準

位が存在する場合には吸収が起きることで反射光が弱くなる。したがって、反射光の強度を波数の関数として測定することで、IR スペクトルを得ることができる。

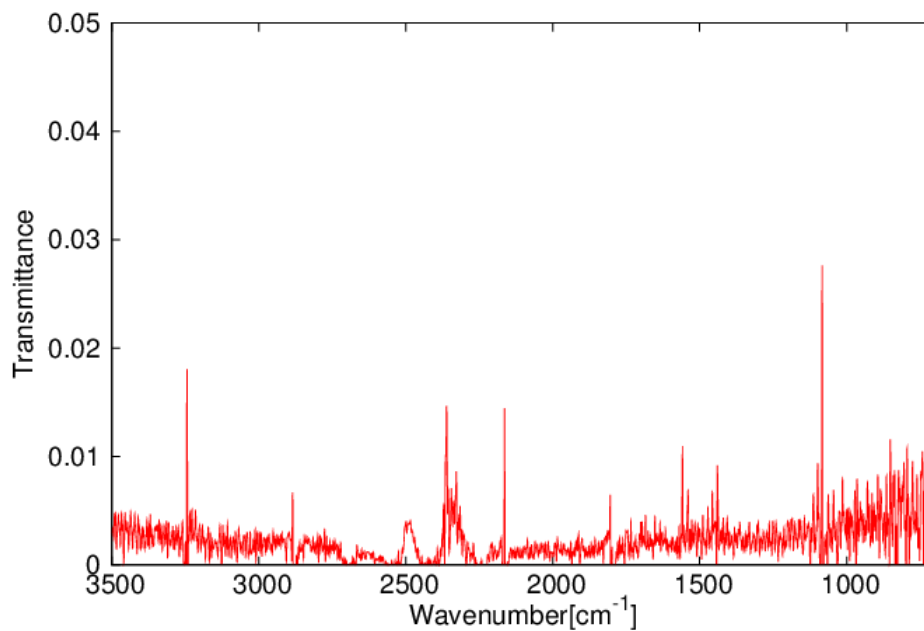


図 3.11: 透過法により測定した「アクリライト[®]」サンプルの IR スペクトル

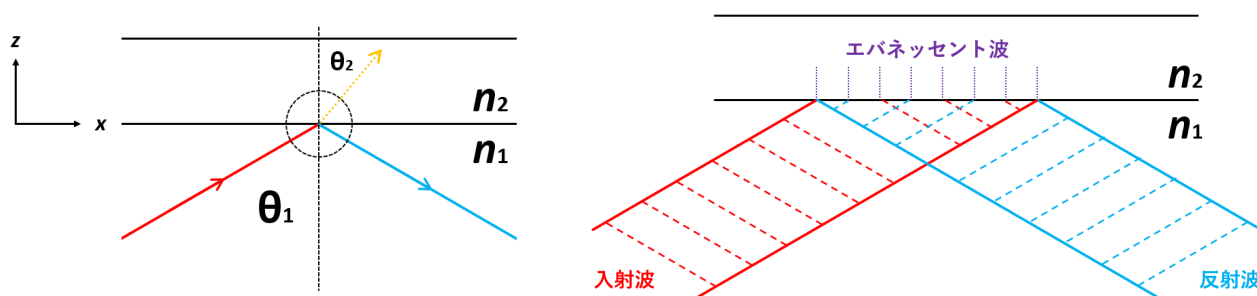


図 3.12: 反射・屈折パラメータ（左）と光の波面（右）

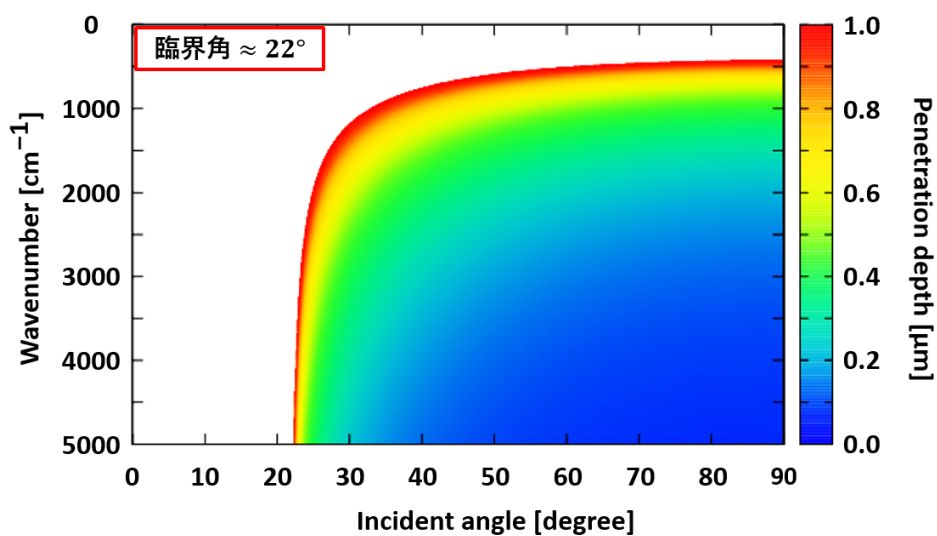


図 3.13: 染み込み深さの入射角・波数依存性
 縦軸：波数 (cm⁻¹)、横軸：入射角度 (degree)、カラー：染み込み深さ (μm)

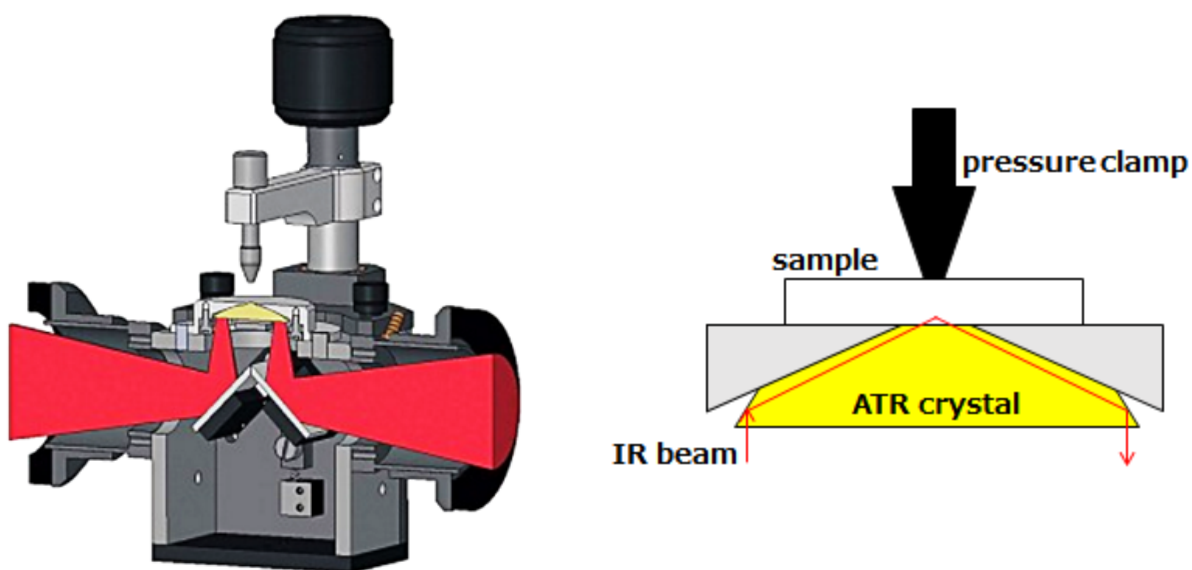


図 3.14: ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) 断面図 (左) [31]、
 ATR crystal と試料の配置図 (右)

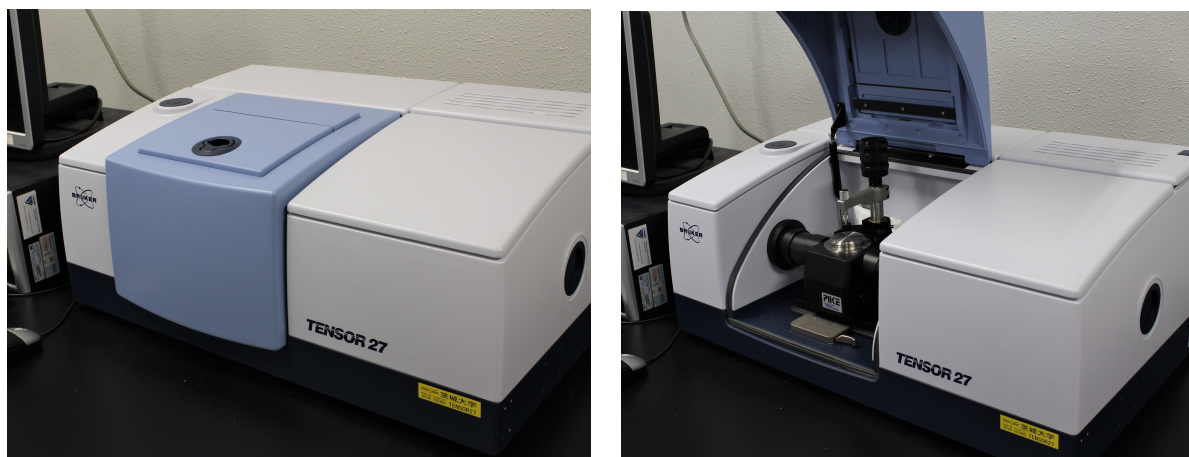


図 3.15: 赤外分光光度計 Tensor 27 (Bruker) (左) と ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) をセットした場合 (右)

3.5 アクリル樹脂の化学結合と IR スペクトル [28][30]

アクリル樹脂は主にメタクリル酸メチル (MMA と呼ばれる) (図 3.17 (左)) のポリマーで、透明性・耐候性が非常に優れた合成樹脂である。一般的には略称で PMMA (Polymethyl methacrylate、ポリメタクリル酸メチル) と呼ばれる。PMMA は図 3.17 (右) のような分子構造であり、3 種類の元素 (C、H、O) によって構成される。

IR スペクトルにはそれぞれの結合の伸縮・変角振動 (特性振動と呼ばれる) に対応する吸収ピークが存在する。それらの多くは物質特有の物性や化学反応性などの性質を示す原子団である官能基の同定に用いられている。図 3.16 は PMMA の IR スペクトルと主な特性振動の吸収ピークを示しており、以下の記号が用いられる。

- ν = 伸縮振動
- δ = 変角振動
- γ = 面外変角振動
- τ = ねじれ振動 (ねじれ角の変化)

ある特定の結合による振動でも、含まれている官能基の化学構造により波数が異なる。

比較的低エネルギー領域 (1500 cm^{-1} 以下) には多くの吸収ピークが生じる。これは指紋領域と呼ばれ、分子構造を顕著に反映したもので、様々なピークが重なり合うために全ての特性振動の同定は困難である。また、強い吸収ピークではその波数の 2 倍、3 倍、もしくはそれ以上の領域にピークが現れることがある。これを倍音振動と呼び、PMMA の 3500 cm^{-1} 付近の吸収ピークは C = O (基準振動 1734 cm^{-1}) の倍音振動である (図 3.16)。

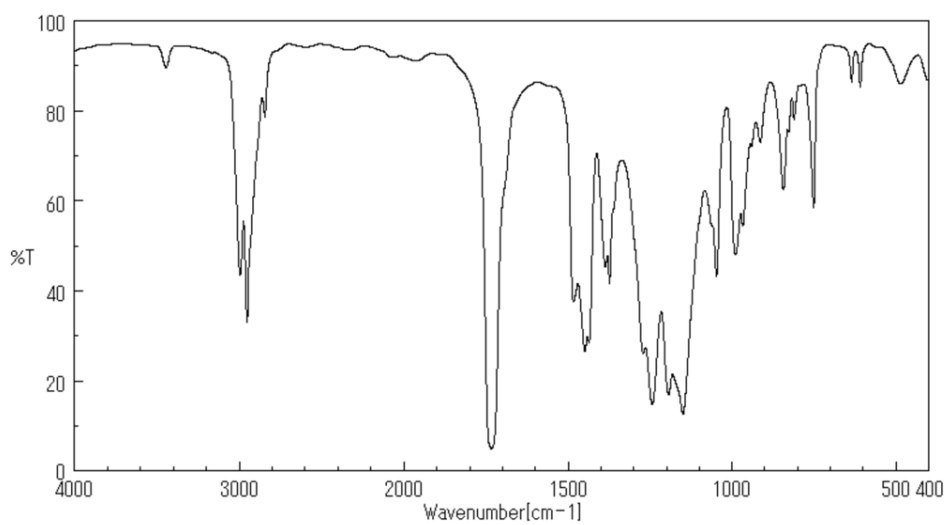


図 3.16: PMMA の IR スペクトル [32]

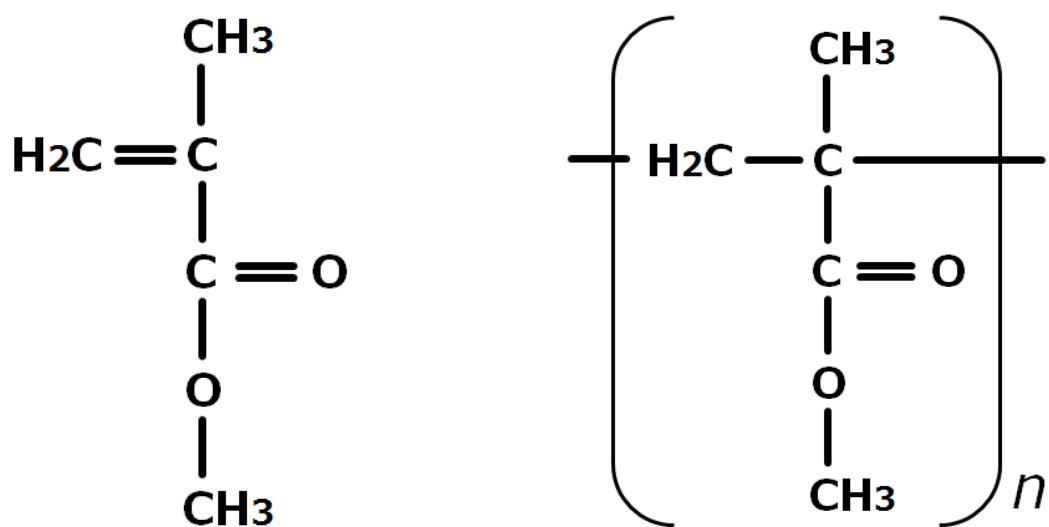


図 3.17: MMA の構造式 (左) と PMMA の構造式 (右)

	対応する波数 [cm ⁻¹]
$\nu(\text{CH}_3)$	2995
$\nu(\text{CH}_2)$	2952
$\nu(\text{C} = \text{O})$	1734
$\delta(\text{CH}_2)$	1449
$\delta(\text{CH}_3)$	1374
$\nu(\text{C} - \text{O})$	1100 - 1300

表 3.1: 主な特性振動の吸収ピーク

3.6 アクリル樹脂の劣化メカニズム [23][33]

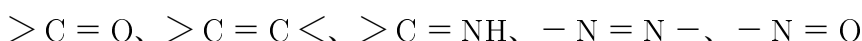
高分子の劣化は要因別に、熱、光、化学的、生物的、機械的劣化などに分類される。本節では熱劣化および光劣化について記述する。

熱、光劣化は酸素が存在する環境下で生じ、自動酸化と呼ばれる。図 3.18 に自動酸化劣化の反応機構を示す。この反応は熱や光のエネルギーが高分子に与えられることにより、C-H 結合から水素が引き抜かれて炭素ラジカル（不対電子をもつ原子）が生成することで開始される。生成された炭素ラジカル (R·) は空気中の酸素と結合し、ペルオキシラジカル (ROO·) を生成する。さらにペルオキシラジカル (ROO·) が高分子中の C-H 結合から水素を引き抜くことで、連鎖的に自動酸化劣化反応が起こることとなる。また、ヒドロペルオキシド (ROOH) の酸素-酸素間の単結合は非常に不安定であり、熱や光によってアルコキシラジカル (RO·) を生成する。このラジカルによる主鎖切断によって、分子量が減少していくこともある。

表 3.2 に PMMA を構成する結合と結合エネルギーを示す。太陽光は波長 280 nm よりも長波長の光 (UV-B、UV-A、図 3.2 参照) が地上に到達することから、PMMA の C=O 以外の結合を切断するには十分なエネルギーをもっていることになる。つまり、PMMA が太陽光に曝されることにより、単結合である主鎖や側鎖は切断され、分子量が低下する。

また、これらの劣化反応が進行すると、分子構造または不純物中にカルボニル基 (C=O) や炭素-炭素二重結合 (C=C) などの発色団が生成する。発色団とは化合物の発色の原因となる原子団のことで、 π 結合 (単結合は σ 結合、二重結合は σ 、 π 結合から成る) を有している。二重結合と単結合が交互に連続し (共役二重結合と呼ぶ)、束縛の弱い π 電子が非局在化されることによって発色が起こる。さらに、助色団と呼ばれる非共有電子対をもつ原子団が共役系に結合すると、共役系に電子を送り込んで π 電子の運動に影響を与えることで発色が著しくなる。以下に発色団と助色団の一例を示す。

- 発色団



- 助色団



- R : アルキル基 (鎖式飽和炭化水素から水素原子 1 個除いた原子団、 $-C_nH_{2n+1}$)

例えば、劣化により炭素-炭素の二重結合が形成されたとすると、この結合エネルギーは 607 kJ/mol である。C-C の結合エネルギー 347.7 kJ/mol が σ 結合のエネルギーとすると、 π 結合のエネルギーは $607 - 347.7 = 259.3$ kJ/mol ≈ 461 nm と求められる。したがって、二重結合の π 電子が波長 461 nm の光 (青色) を吸収するため、その補色である黄色に変色することになる。PMMA 光劣化の対策として紫外線吸収剤を添加し、高分子鎖の切断に必要なエネルギーを紫外線吸収剤に吸収させることによって、耐光性を向上させるものもある。

また、熱劣化については 140°C 付近から分解することが知られており、高温での成形加工時には注意を要する。さらに、熱劣化と光劣化に促進される形で、加水分解が生じることも知られている。長期的な促進耐光性試験後の PMMA サンプル表面では、水酸基 ($O-H$ 、 3500 cm^{-1})、酸無水物 (1750 cm^{-1})、炭素-炭素二重結合 (C=C、 1700 cm^{-1}) に帰属するピークが現れ、試験前と比較して分子量が減少することが知られている。

以上のように PMMA の劣化が進むことは知られているが、最も耐候性に優れる透明な樹脂の一つとして古くから使用されているように、劣化の進行は非常に遅く、シリコン樹脂やポリスチレン樹脂などと比較しても PMMA の耐候性の高さは群を抜いている [34]。

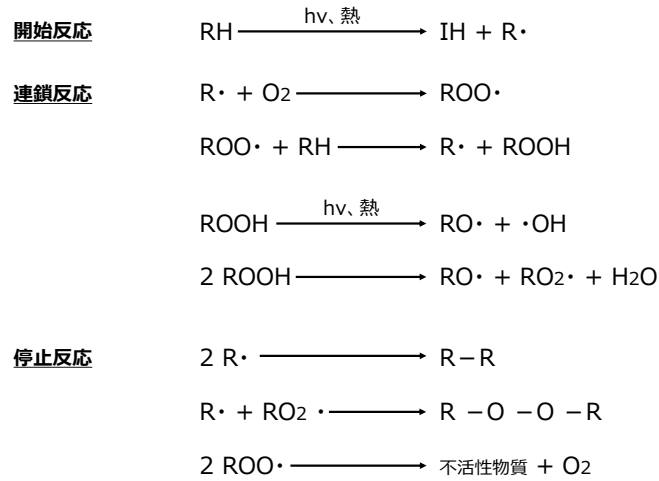


図 3.18: 自動酸化劣化反応機構

I : 開始剤、R· : 炭素ラジカル、RO· : アルコキシラジカル、
 ROO· : ペルオキシラジカル、ROOH : ヒドロキシペルオキシド

	結合エネルギー [kJ/mol]	結合エネルギー [eV/ケ]	対応する波長 [nm]
C = O	724	7.46	165
C - H	413.4	4.26	289
C - O	351.5	3.62	340
C - C	347.7	3.58	344

表 3.2: PMMA を構成する化学結合と結合エネルギー

第4章 大口径望遠鏡用カメラ窓に対する 促進耐光性試験

4.1 紫外線蛍光ランプ（UV-A）による促進耐光性試験

4.1.1 ランプの選定

3.2 章で記述したように、人工光源を用いた促進耐光性試験で重要な点は、実際の自然環境での劣化をいかにして再現するかである。すなわち、光源の放射スペクトルが地上に到達する太陽光のスペクトルに似ていることが重要となってくる。この観点から、キセノンアークランプが紫外光領域から可視光領域にかけて最も似ており、太陽光による劣化を再現するには適していると考えた。しかし、キセノンアークランプの特徴として赤外光領域の放射が非常に大きく膨大な熱が発生することから、実験室での処理が難しいと考えた。また、非常に高価であり長期間にわたり多くの費用を費やすこととなる。

以上の理由から、キセノンアークランプと比較して実験室での扱いが容易であり、比較的安価で地上に到達する紫外光の大部分を占める UV-A 領域を主に放射する、紫外線蛍光ランプ（UV-A）を本試験で用いることを決定した。

4.1.2 UV 照射装置とサンプル

本試験では、紫外線蛍光ランプ（UV-A）による UV 照射試験を行った。紫外線蛍光ランプの仕様（表 4.1）と放射スペクトル（図 4.1）を以下に示す。UV 照射装置は紫外線蛍光ランプを 2 本並べ、その上部に格子状の柵を設置することにより、サンプルを置いて UV 照射を行えるようにした。UV 照射装置による UV 照射中の様子を図 4.1 に示す。UV 強度の測定には、図 4.2 に示す紫外線強度計 UV-340A を用い、ランプから約 5 cm の距離で 2 wW/cm^2 程度の UV 照射強度で試験を行った。また、UV 照射装置の紫外線強度の一様性についても測定しており、複数のサンプルを照射した場合も UV 照射量の差が 5% 以内になるように考慮している [35]。

サンプルは切り出し位置による性能差を考慮するため、厚さ 8 mm の同一の板から切り出した「アクリライト[®]」サンプルを計 3 枚用い、UV 照射および透過率測定、IR スペクトル測定を行った。

定格ランプ電力	20 W
管長	580 mm
管径	32.5 mm
質量	132 g
ランプ電流	0.36 A
紫外線出力	3.7 W
定格寿命	4000 hr.
ピーク波長	352 nm

表 4.1: 紫外線蛍光ランプ FL20S・BL-B（日立）の仕様

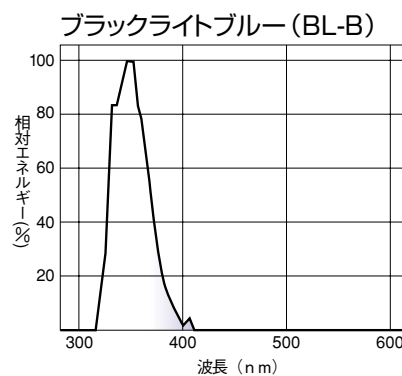
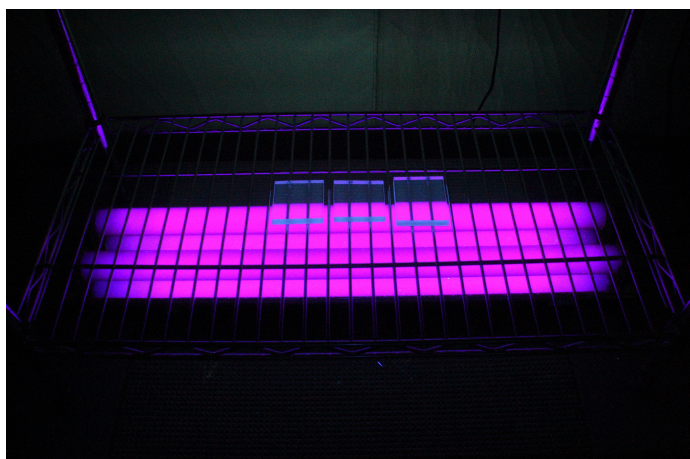


図 4.1: FL20S・BL-B（日立）を用いた UV 照射の様子（左）と放射スペクトル（右） [36]

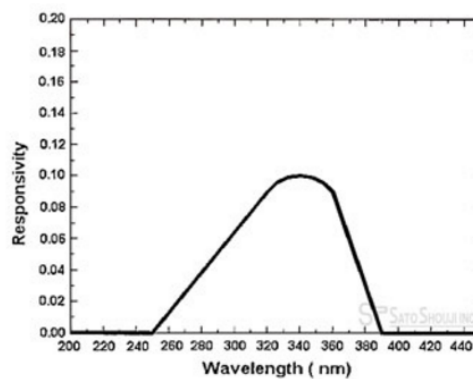


図 4.2: 紫外線強度計 UV-340A（左）と感度スペクトル（右） [37]

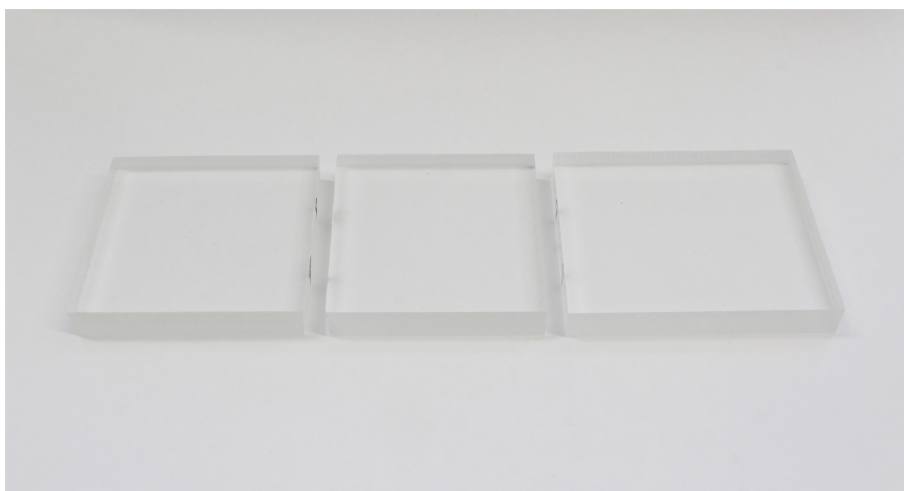


図 4.3: 「アクリライト®」サンプル I、II、III
左 2 枚 : 50×50×8 mm、右 : 50×60×8 mm

4.1.3 紫外可視分光光度計 Agilent 8453 の誤差

本章では茨城大学の紫外可視分光光度計 Agilent 8453 (Agilent Technologies) を用いて透過率の測定を行った。表 4.2 に Agilent 8453 (Agilent Technologies) の主な仕様を示す。Agilent 8453 (Agilent Technologies) はサンプルに白色光を透過させてから分光し、フォトダイオードアレイで検出するという光学系になっている。この測定装置では測定時にサンプルの微妙な傾きによって透過率測定結果が大きく変動してしまうことがわかった。そこでサンプルを垂直に維持して測定するために、測定装置の箱に押しえつけるという形でサンプルを固定し、測定を行った。図 4.4 は Agilent 8453 (Agilent Technologies) を用いて「アクリライト®」の同一サンプル (サイズ 50×50×8 mm) を 5 回測定したときの平均値と測定誤差を表している。Agilent 8453 (Agilent Technologies) では測定ごとに生じる装置由来の測定誤差が 0.3% 程度あることがわかる。また、480、650 nm 付近に振幅の大きな部分があるが、これは別の測定装置 (4.2 章以降) による透過率測定結果には現れないため、この部分を Agilent 8453 (Agilent Technologies) による測定装置固有のノイズであると判断した。

ここで、測定した「アクリライト®」サンプルの屈折率を $n_1 \approx 1.49$ [38]、空気の屈折率を $n_2 \approx 1$ とすると、垂直入射時の多重繰り返し反射 (吸収なし) を考慮した場合の透過率は

$$T = \frac{1 - R_0}{1 + R_0} \approx 0.925 = 92.5\% \quad (4.1)$$

と求められる。ただし

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (4.2)$$

である (Appendix B 参照) [39]。以上の結果より Agilent 8453 (Agilent Technologies) の測定結果は計算と比較して 2% 程度高くなっていることが確認できた。したがって、Agilent 8453 (Agilent Technologies) の測定には系統的な誤差が約 2% あると結論付けた。

波長範囲	190~1100 nm
光源	D2 (重水素) ランプ タングステン (ハロゲン) ランプ
検出器	1024 素子ダイオードアレイ
波長正確さ	±0.2 nm
波長再現性	±0.02 nm
測光正確さ	±0.005 Abs
RMS ノイズ	0.0002 Abs

表 4.2: Agilent 8453 (Agilent Technologies) の主な仕様

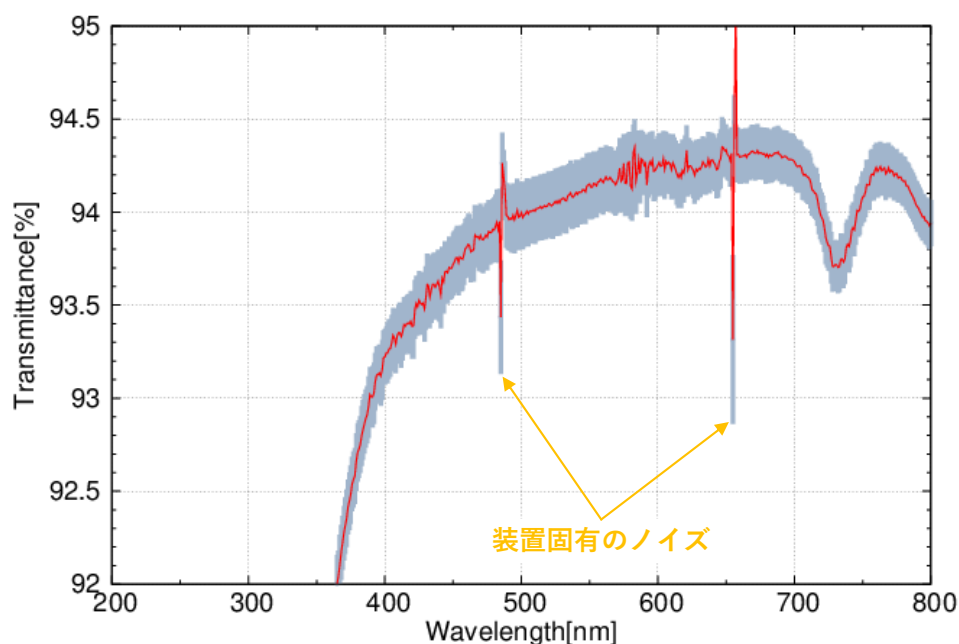


図 4.4: 紫外可視分光光度計 Agilent 8453 (Agilent Technologies) の測定誤差
赤: 平均値、グレー: 標準偏差

4.1.4 UV 照射量による透過率変化

CTA 計画の北半球サイトである La Palma 島における UV-A 強度の日内変動の測定により 1 日のピーク強度が 3.5 mW/cm^2 程度であることがわかっている [40]。これは冬における UV 強度であるため、1 年の UV 強度の変動を考慮し、地上に到達する太陽光 (紫外線) を 5 mW/cm^2 と仮定した。本試験では、各サンプルに対して総量としておよそ 17000 J/cm^2 の UV 照射を行ったが、これは太陽光におよそ 1000 時間にわたって曝露した場合と同程度であると考えられる。サンプルにより UV 照射量が異なるのは、UV 照射装置での照射位置により UV 強度が若干異なるためである。

図 4.5、4.6、4.7 から、すべてのサンプルで UV 照射量に応じてほぼ同様な透過率の低下が見られるので再現性があると考えられる。

さらに透過率変化をわかりやすくするために、300、350、400 nm の透過率変化のみピックアップした結果を図 4.8、4.9、4.10 に示す。図 4.8 から、300 nm 付近は初めの 3000–4000 J/cm² の UV 照射により透過率が急激に上昇し、初期値から最大で 8 pt. 程度の透過率上昇が確認できた。しかし、累算でそれ以上の UV 照射を行うことにより透過率は急激に低下を始め、最終的に約 17000 J/cm² 照射後は初期値から 13 pt. 程度の低下が見られた。図 4.9、4.10 から、350、400 nm 付近では UV 照射量に応じてほぼ線形に低下をし、約 17000 J/cm² の UV 照射により初期値から 2 - 3 pt. 程度の低下であった。以上、3 つのサンプルとも同様の結果が得られており、サンプルの切り出し位置に依存した部分的な特性ではないと考えられる。

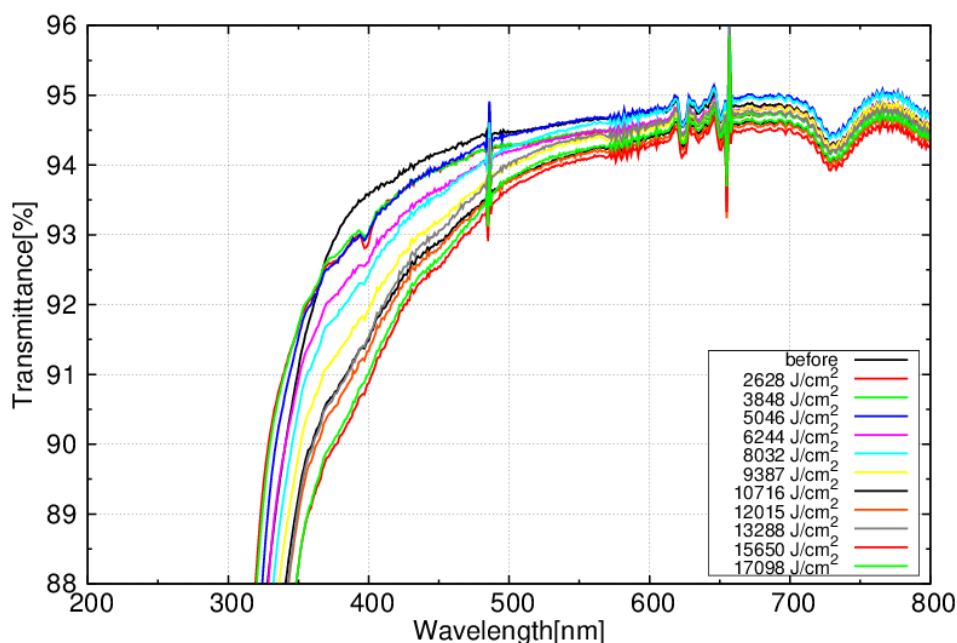


図 4.5: サンプル I の透過率変化

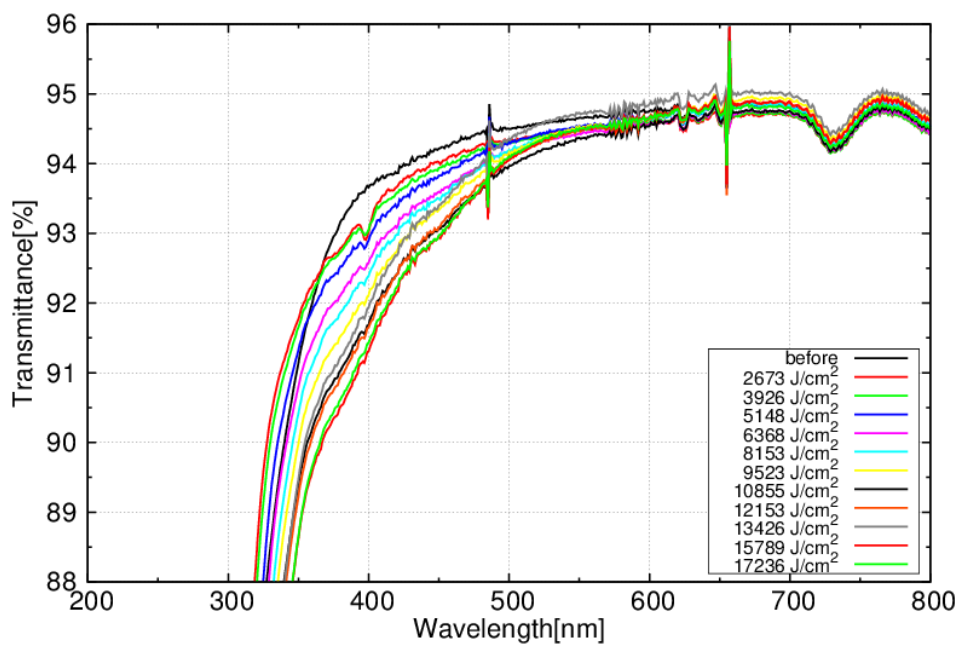


図 4.6: サンプル II の透過率変化

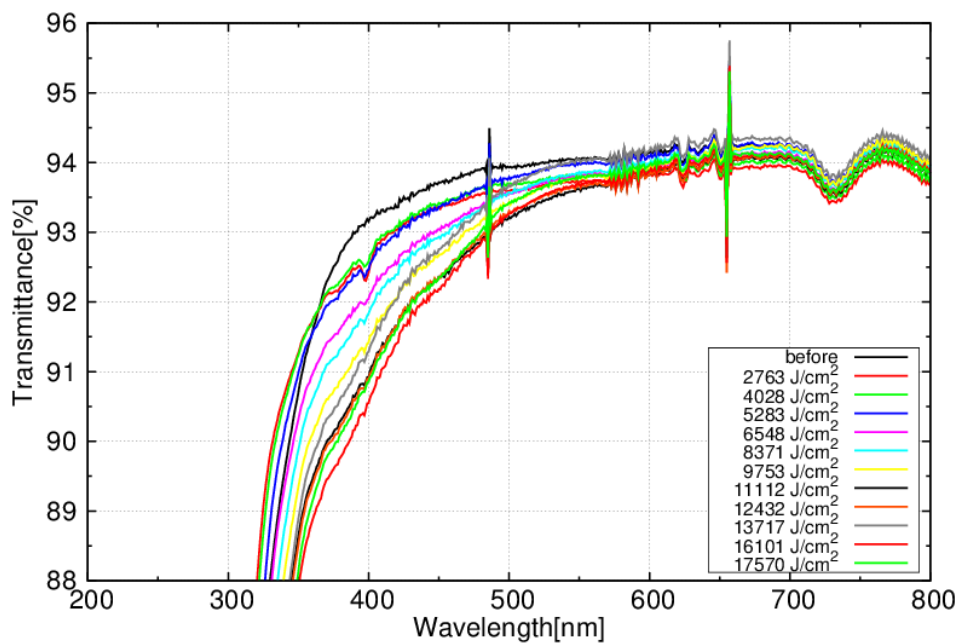


図 4.7: サンプル III の透過率変化

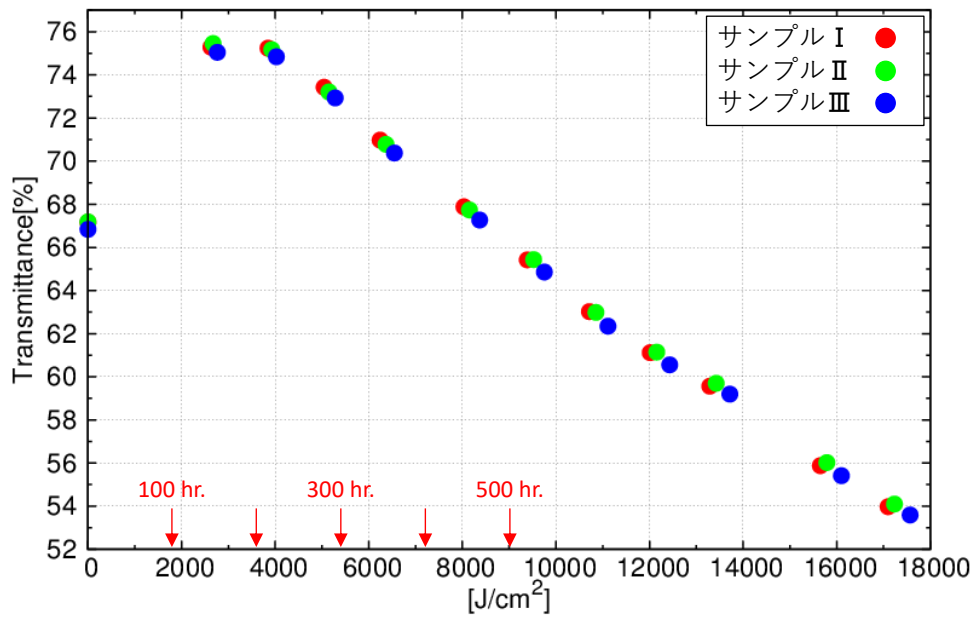


図 4.8: 各サンプルの UV 照射量による 300 nm の透過率変化
 赤字 : 地上に到達する太陽光 (紫外線) を 5 mW/cm² としたときの時間スケール

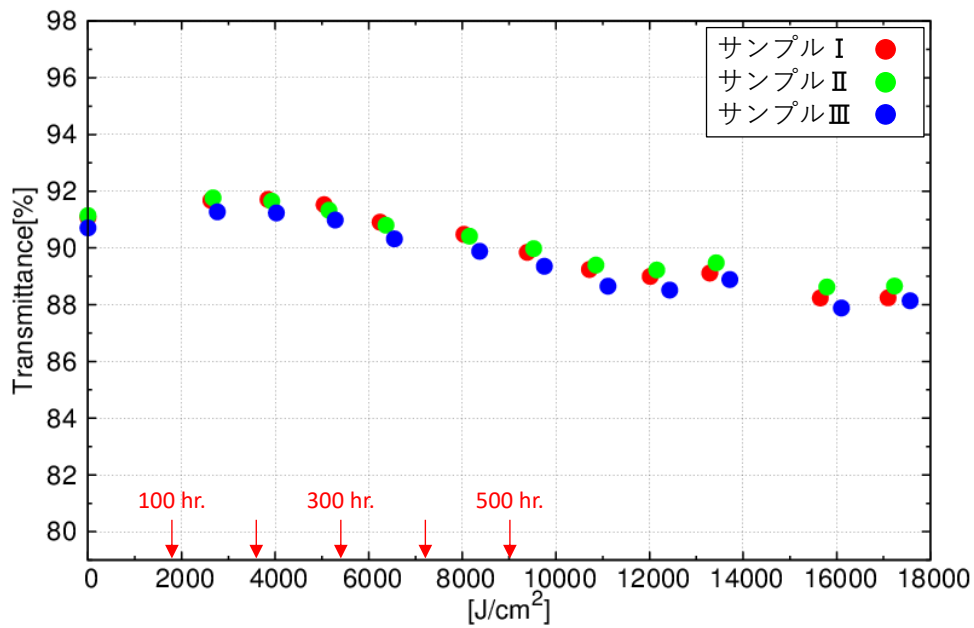


図 4.9: 各サンプルの UV 照射量による 350 nm の透過率変化
 赤字 : 地上に到達する太陽光 (紫外線) を 5 mW/cm² としたときの時間スケール

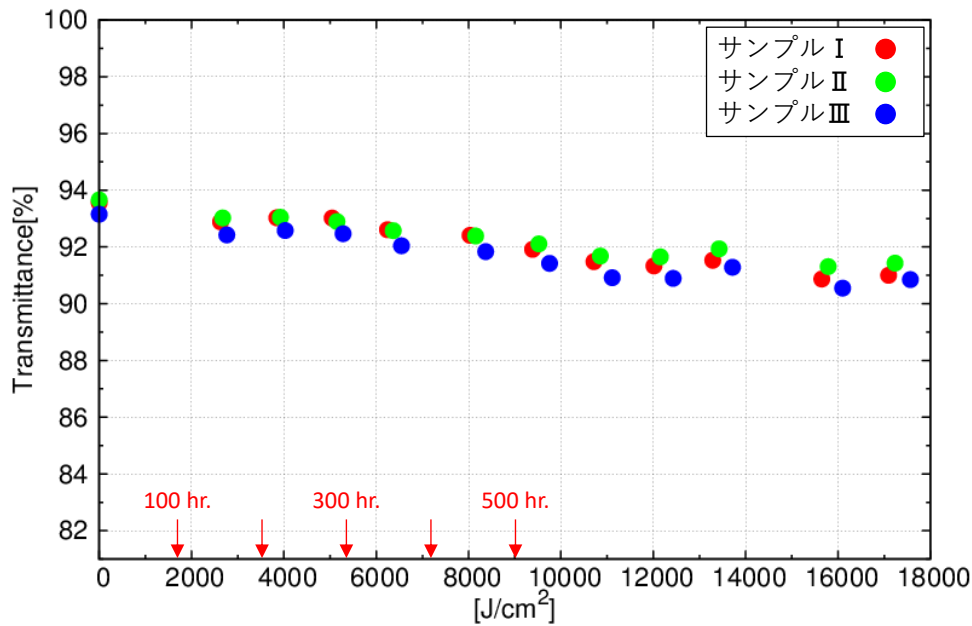


図 4.10: 各サンプルの UV 照射量による 400 nm の透過率変化
 赤字：地上に到達する太陽光（紫外線）を 5 mW/cm² としたときの時間スケール

4.1.5 波長領域全体の efficiency による評価

ここまでは「アクリライト®」サンプルの透過率のみを見て評価を行ってきた。ここではさらに波長領域全体の efficiency として評価するために、望遠鏡に到達するチェレンコフ光のスペクトルと LST 用分割鏡の平均反射率（図 4.11）を畳み込んだ値を用いる。この値は La Palma 上空で放射されたチェレンコフ光が LST の主鏡で反射、焦点面カメラ窓を透過し、ライトガイドに入射する直前の efficiency ということになる。各波長ごとのチェレンコフ光の photon flux を $F(\lambda)$ 、LST 用分割鏡の平均反射率を $R(\lambda)$ 、「アクリライト®」サンプルの透過率を $T(\lambda)$ とすると、波長領域全体の efficiency は

$$\epsilon = \frac{\int F(\lambda) \times R(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda}{\int F(\lambda) \times R(\lambda) d\lambda} \quad (4.3)$$

で求められ、各サンプルの UV 照射量による efficiency の変化を図 4.12 に示す。

図 4.12 から、初めの 3000 – 4000 J/cm² までは、300 nm 付近の透過率上昇の影響により 0.5 pt. 程度の上昇が見られるが、その後はほぼ UV 照射量に依存して線形に低下していることが確認できた。ここで、運用中におけるメンテナンスの総時間を考える。3 か月に 1 回の間隔で、1 回あたり 6 時間のメンテナンスを仮定すると、20 年間の運用中に約 480 時間のメンテナンス時間が想定される。したがって、メンテナンスの総時間に相当する UV 量を照射しても efficiency の低下は 1 pt. 程度であることがわかる。また、300 - 550 nm の波長帯において平均透過率 85% という要求仕様に対しても数% 上回っているため、実際の運用にあたり十分紫外線に対する耐性があることが期待できる。

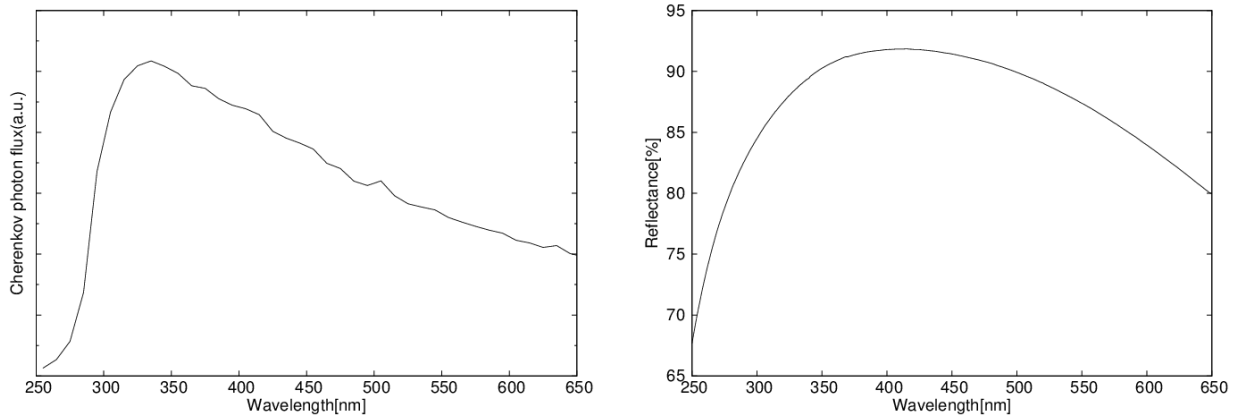


図 4.11: 望遠鏡に到達するチェレンコフ光のスペクトル分布 ; 40 GeV gamma, zenith angle=0deg, La Palma=2,200 m a.s.l. (左)、LST 用分割鏡 102 枚の反射率平均値 (右) [18] (林田将明特任助教 (東京大学宇宙線研究所) との private communication)

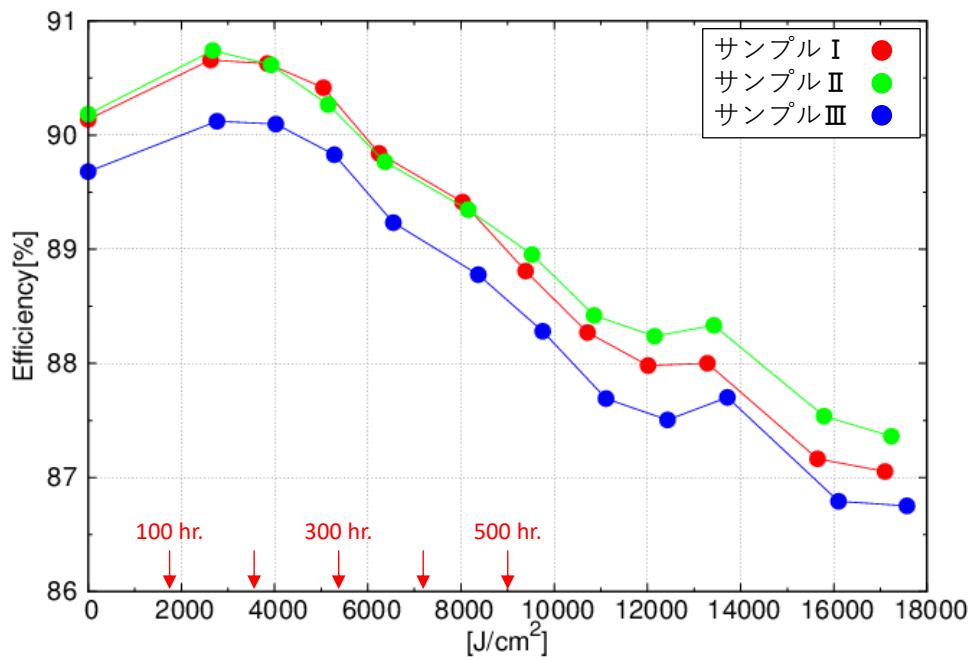


図 4.12: 各サンプルの照射量による efficiency の変化
赤字 : 地上に到達する太陽光 (紫外線) を 5 mW/cm^2 としたときの時間スケール

4.1.6 赤外分光光度計 Tensor 27 の誤差

IR スペクトル測定でも透過率の測定と同様に、バックグラウンド測定データを差し引く処理を行っているが、空気中の二酸化炭素や水蒸気の影響を差し引ききれずに IR スペクトルに残ってしまう。波数 2350 cm^{-1} 付近に二酸化炭素 (CO_2)、波数 $2000 - 1300\text{ cm}^{-1}$ 付近の細かいノイズは水蒸気 (H_2O) による影響である。

本研究の IR スペクトル測定は Tensor 27 (Bruker) に PIKE Technologies の 1 回反射 ATR アクセサリをセットして行っている。図 4.13 には「アクリライト[®]」サンプル (サイズ $50 \times 50 \times 6\text{ mm}$) を 3 回測定したときの平均値と測定誤差を表しており、波数が大きくなるほど測定誤差は大きくなっている。これは図 3.13 のように波数が大きくなるにしたがって染み込み深さが浅くなるために、不定性も大きくなっていると考えられる。また ATR 法の場合、試料を ATR 結晶に押し付ける圧力によってスペクトル強度が大きく変化するため定量的な分析は難しいことがわかっている。本研究の測定では圧力計など定量的に圧力を計測できるような装置を用いることはなく、pressure clamp のねじ穴の角度を目安にして圧力が一定になるよう、測定ごとに調整を行った。しかし、全波数領域において 1% 未満の誤差に収まっており、これ以上の変化量であれば変化を検出できると考えられる。

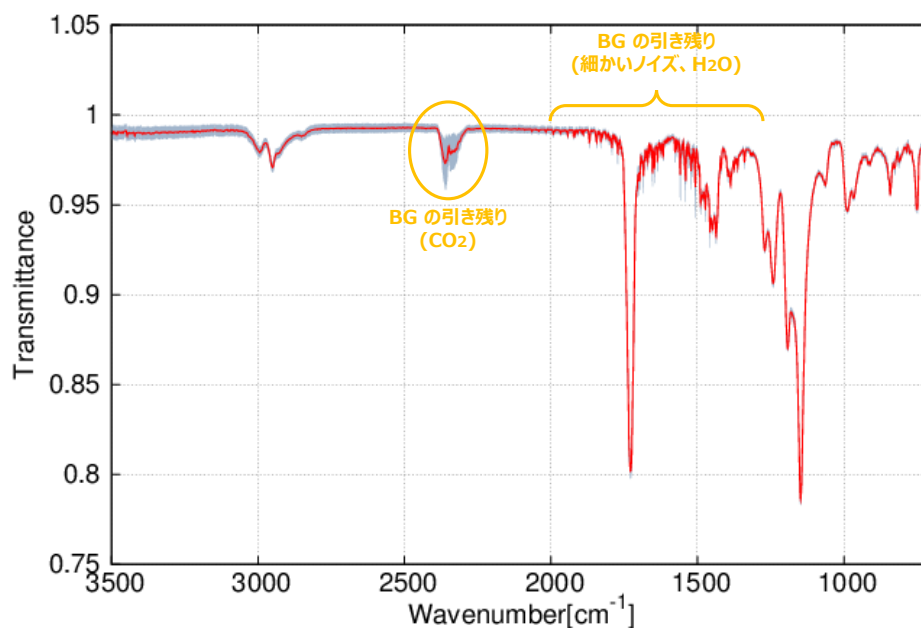


図 4.13: 赤外分光光度計 Tensor 27 (Bruker) に ATR アクセサリ (PIKE Technologies Single Reflection ATR) をセットしたときの測定誤差

赤 : 平均値、グレー : 標準偏差

4.1.7 IR スペクトルによる評価

4.1.3 章では UV-A 領域の UV 照射により「アクリライト®」の透過率が低下していることがわかった。そこで透過率低下に伴って、どのような分子構造の変化をしているのか IR スペクトルの測定を行った。

図 4.14 にはサンプル I の UV 照射前と照射後の IR スペクトルを示す。これは波数 2700 cm^{-1} で normalize をして UV 照射前後の IR スペクトルを重ねているが、この付近に大きな吸収帯が存在しないことを確認している。以降の IR スペクトルでは同様の処理を行っている。これより UV 照射前と照射後で IR スペクトルには差がないことがわかった。よって、透過率低下による分子構造のわずかな変化はあると考えられるものの、IR スペクトルの測定では劣化物などを検出することはできなかった。これは PMMA が耐候性に最も優れた樹脂の一つとして古くから使用されていることからわかるように、劣化の進行が非常に遅いことが一つの要因であると考えられる。

したがって、「アクリライト®」は UV-A 領域の UV 照射によって大きな分子構造の変化を引き起こされるようなことはなく、耐候性の高さを確認することができた。

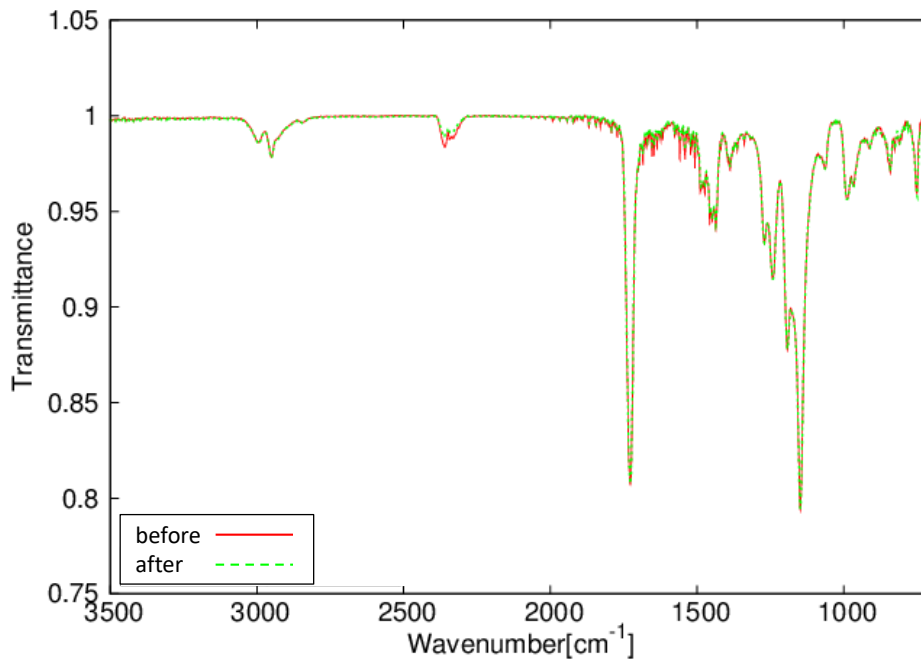


図 4.14: サンプル I の IR スペクトルの変化

4.2 殺菌ランプ（UV-C）による促進耐光性試験

4.2.1 ランプの選定

4.1 章では紫外線蛍光ランプ（UV-A）による促進耐光性試験について述べ、焦点面カメラ窓としての使用に耐えうるものと判断した。ここで、さらなる UV 照射による劣化の進行具合や過酷な状況下での使用による劣化の程度を検証するために、短波長の紫外線を放射する紫外線蛍光ランプでの促進耐光性試験を行った。この試験に用いたランプは一般的に殺菌ランプと呼ばれ波長 254 nm の紫外線を放射する。波長 254 nm の紫外線は UV-C に分類され、実際には地上に到達することはないが、非常に促進性が高い試験であると予想される。

同様の試験を荻野さん（2015、東京大学宇宙線研究所）が行っており、数十分から数時間の照射により透過率は大きく低下することがわかっている。また、UV 照射後のサンプルは黄色く変色しており、劣化が非常に進行したことを確認できた。この結果から劣化が非常に進行した場合の「アクリライト」の状態を理解することができるのではないかと考え、殺菌ランプによる促進耐光性試験を行った。

4.2.2 UV 照射装置とサンプル

本試験では、殺菌ランプによる UV-C 領域の UV 照射試験を行った。殺菌ランプの仕様（表 4.3）と放射スペクトル（図 4.15）を以下に示す。UV 照射装置として 2 本の殺菌ランプが内蔵されている、EL-187 P-ROM ERASER（MINATO ELECTRONICS）を用いた。この装置の内部は図 4.16 のようであり、天板には鏡面加工がなされているため、殺菌ランプ 2 本と鏡面部分による反射分を合わせて計 4 本の殺菌ランプの寄与を考える。「アクリライト®」サンプルの測定点とそれぞれの殺菌ランプとの距離を r_i とすると、測定点が 4 本の殺菌ランプから受ける UV 光の強度 I は

$$I = \sum_{i=1}^4 \frac{P}{2\pi r_i L} \quad (4.4)$$

P : 殺菌ランプの紫外線出力、 L : 殺菌ランプの管長

で求めることができ、表 4.4 に換算結果を示す。

4.1 章では厚さ 8 mm の「アクリライト®」サンプルを用いていたが、カメラ窓をドーム状に加工した際の強度計算により LST 用カメラ窓には厚さ 6 mm の「アクリライト®」を使用することが決定された。そのため、本章の殺菌ランプ（UV-C）による促進耐光性試験では厚さ 6 mm の「アクリライト®」サンプルを用いた。

定格ランプ電力	6 W
管長	210.5 mm
管径	15.5 mm
質量	21 g
ランプ電流	0.147 A
紫外線出力	2 W
定格寿命	4000 hr.
ピーク波長	254 nm

表 4.3: 殺菌ランプ GL-6 (東芝) の仕様

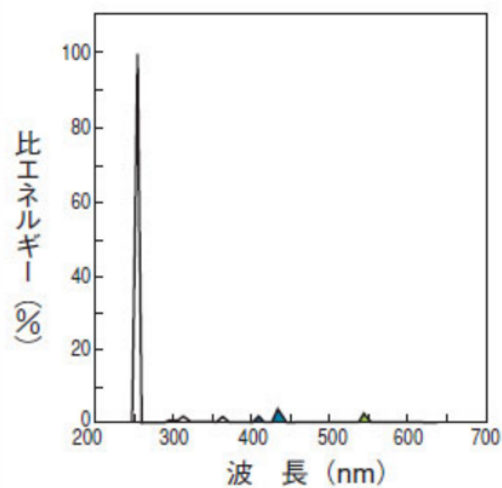


図 4.15: EL-187 P-ROM ERASER (MINATO ELECTRONICS) (左) と殺菌ランプ GL-6 (東芝) の放射スペクトル (右) [36]

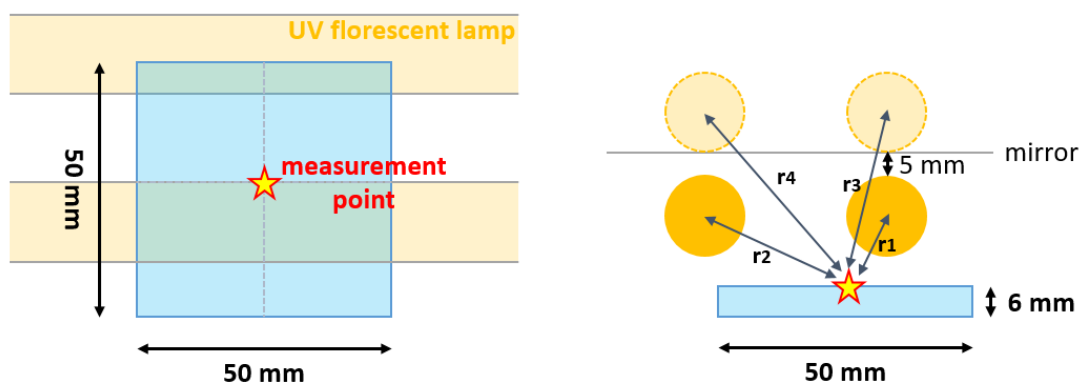


図 4.16: EL-187 P-ROM ERASER (MINATO ELECTRONICS) の内部を真上から見たイメージ (左) と真横から見たイメージ (右)

	measurement point
r_1 (mm)	11.6
r_2 (mm)	42.2
r_3 (mm)	31.7
r_4 (mm)	51.5
I (mW/cm ²)	24.3

表 4.4: 測定点 - ランプの距離とそれを用いた UV 強度換算値

4.2.3 紫外可視分光光度計 V-660 の誤差

本章では茨城大学の紫外可視分光光度計 V-660（日本分光）を用いて透過率の測定を行った。表 4.5 に V-660（日本分光）の主な仕様を示す。V-660（日本分光）は分光した光をサンプルに透過し、光電子増倍管（Photomultiplier Tube ; PMT）で検出するという光学系である。4.1 章では Agilent 8453 を用いて透過率測定を行っていたが、系統誤差や測定装置固有のノイズが大きいため、本章では V-660（日本分光）を使用することにした。図 4.17 は V-660（日本分光）を用いて「アクリライト[®]」の同一サンプル（サイズ 50 × 50 × 6 mm）を 5 回測定したときの平均値と測定誤差を表している。V-660（日本分光）では測定ごとに生じる装置由来の測定誤差が 0.1% 程度に抑えられている。

また、V-660（日本分光）の測定結果は Agilent 8453 のそれ（図 4.4）と比較して、式 (4.1) での簡易的な計算に近い値をとっている。この二つの測定装置は光学系が大きく異なっていることから、系統誤差は測定装置の光学系に起因するものではないかと考えている。

波長範囲	187~900 nm
光源	重水素ランプ (187~350 nm) ハロゲンランプ (330~900 nm)
検出器	PMT
波長正確さ	±0.1 nm
波長再現性	±0.05 nm
測光正確さ	±0.3 %T
RMS ノイズ	0.00005 Abs

表 4.5: V-660（日本分光）の主な仕様

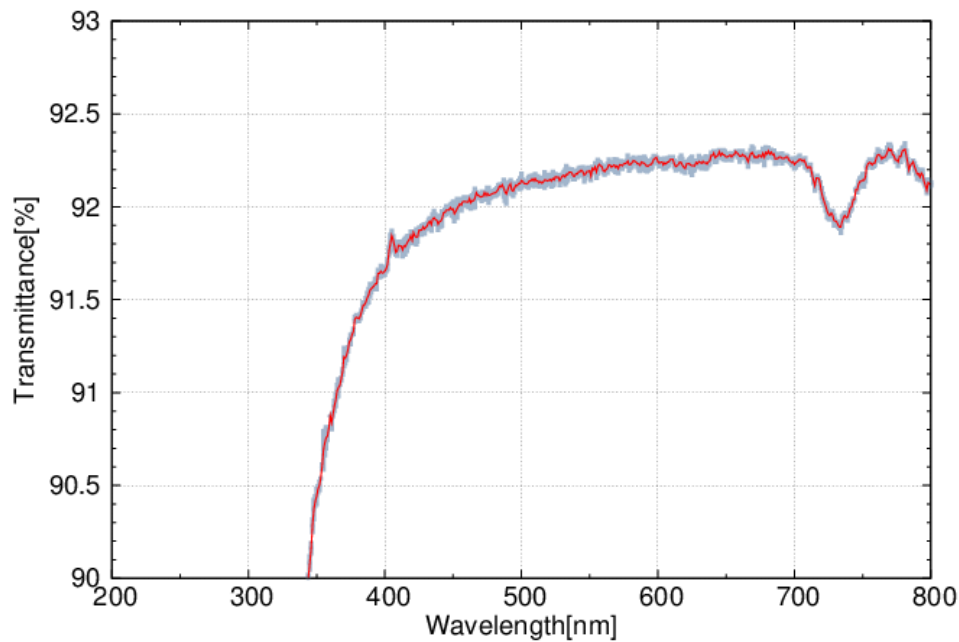


図 4.17: 紫外可視分光光度計 V-660 (日本分光)
赤 : 平均値、グレー : 標準偏差

4.2.4 UV 照射量による透過率変化

殺菌ランプを用いた UV 照射による透過率の時間変化は図 4.18、4.19、4.20 のとおりである。これら 3 パターンは、別々の「アクリライト」サンプル (サイズ 50×50×6 mm) を用いて試験を行った。図 4.18 は UV 照射前から 60 分間照射後までの透過率変化をプロットしており、300、350 nm ではそれぞれ 41.8、15.1 pt. の低下が見られた。次の図 4.19 では UV 照射前から 180 分間照射後までの透過率変化をプロットしており、300、350 nm ではそれぞれ 65.4、34.5 pt. の低下が見られた。図 4.20 では UV 照射前と 48 時間照射後の透過率をプロットしており、300 nm 付近の透過率がほぼ 0% になるまで劣化が進行していることがわかる。また、図 4.21 のように 48 時間に渡り UV を照射したサンプルは、未照射のサンプルと比較して明らかに黄色く変色していることがわかる。

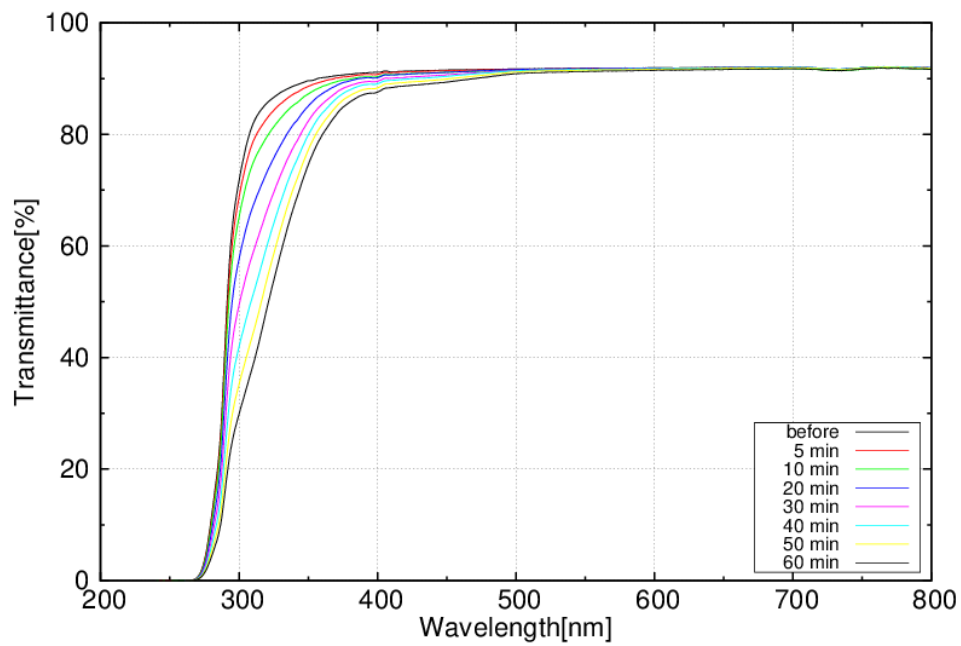


図 4.18: 60 min 照射したサンプルの透過率の時間変化

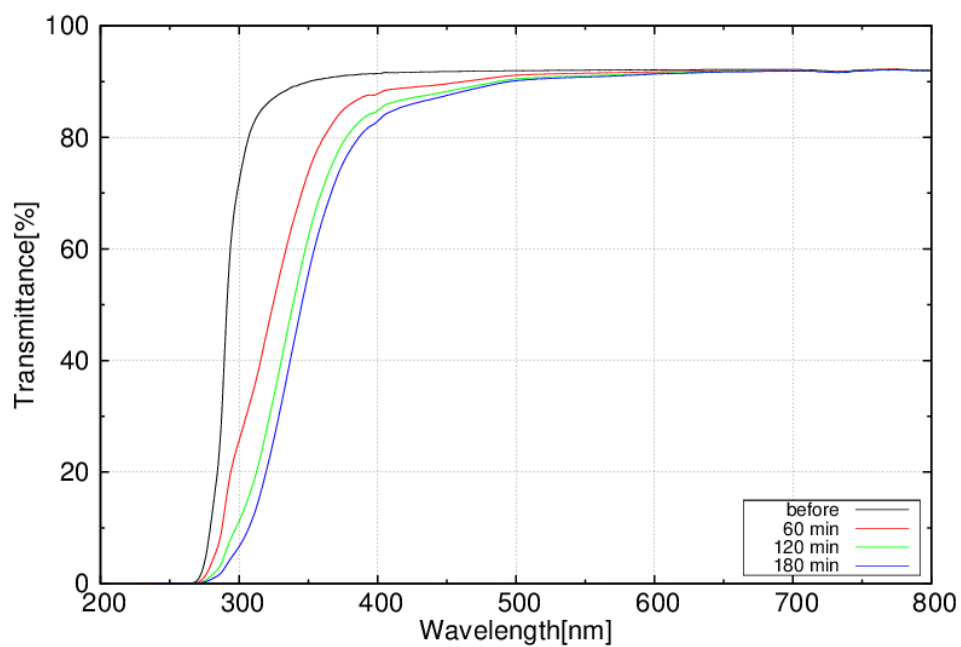


図 4.19: 180 min 照射したサンプルの透過率の時間変化

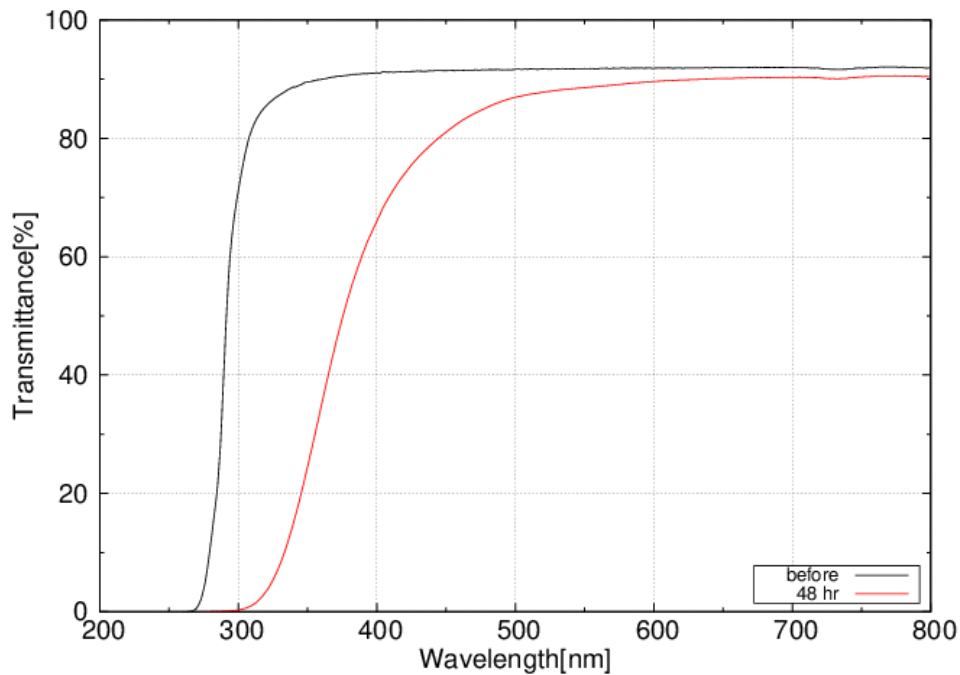


図 4.20: 48 hr 照射したサンプルの透過率の時間変化

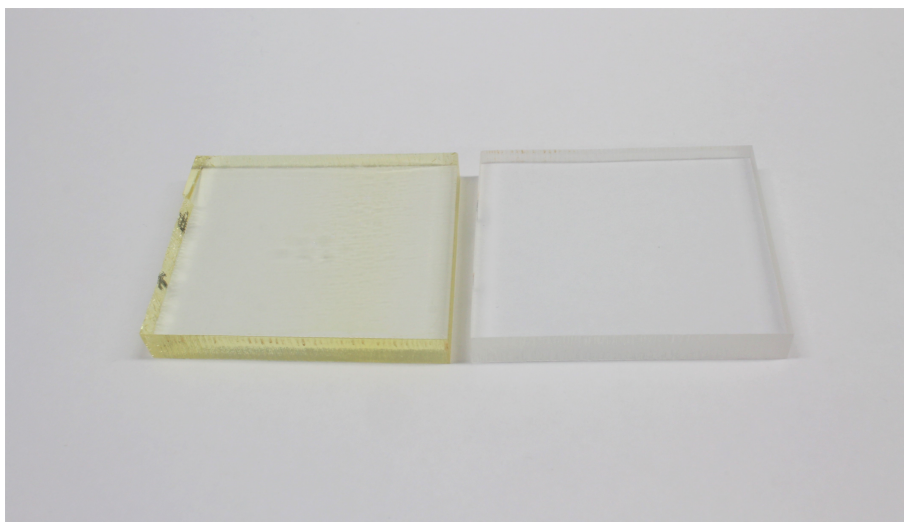


図 4.21: 48 hr 照射したサンプル (左) と未照射のサンプル (右)

4.2.5 波長領域全体の efficiency による評価

4.1.4 章と同様に波長領域全体の efficiency として評価するために、望遠鏡に到達するチェレンコフ光のスペクトルと LST 用分割鏡の平均反射率 (図 4.11) を畳み込んだ値を用いる。

60、180 分間照射したサンプルの efficiency の時間変化は図 4.22、4.23 のとおりである。60 分間 (1 時間) 程度のスパンで見ると efficiency はおおよそ線形に低下しているように見え

る。しかし、それ以上のスパンで見ると照射時間に依存して低下の割合が小さくなっており、0 - 60 分で約 10 pt.、60 -120 分で約 5 pt.、120 - 180 分で約 2.5 pt. 低下、最終的に 180 分間の照射で約 17.5 pt. の低下が見られた。48 時間照射したサンプルは約 29 pt. 低下した。

この UV 照射試験で用いた殺菌ランプのスペクトルは図 4.1 のとおり 254 nm にピークを持つが、この波長帯の紫外線は一般的に地上に到達しないため、この結果を実際の太陽光による影響に換算することは難しいが、劣化が非常に進行した場合の状況が再現できたのではないかと考える。

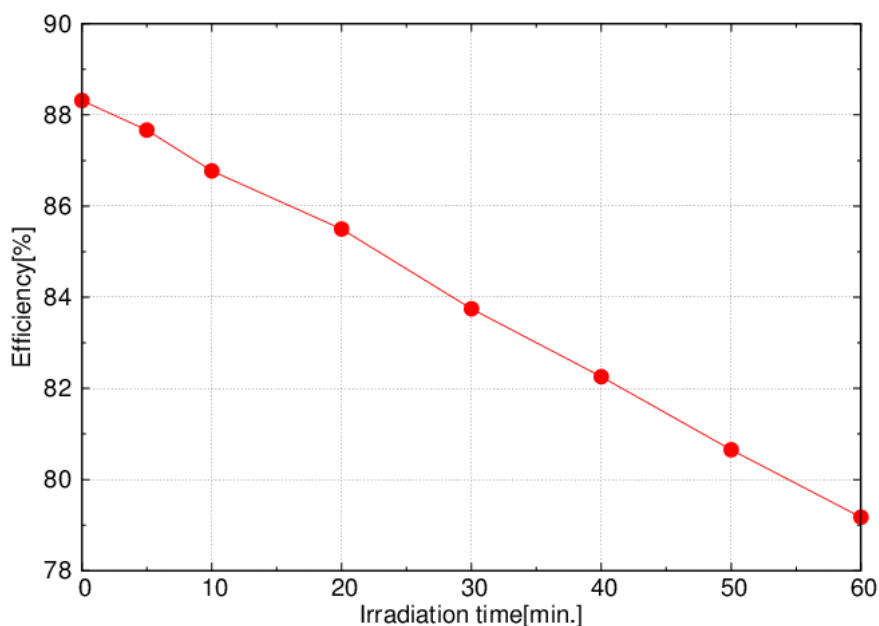


図 4.22: 60 min 照射したサンプルの efficiency の時間変化

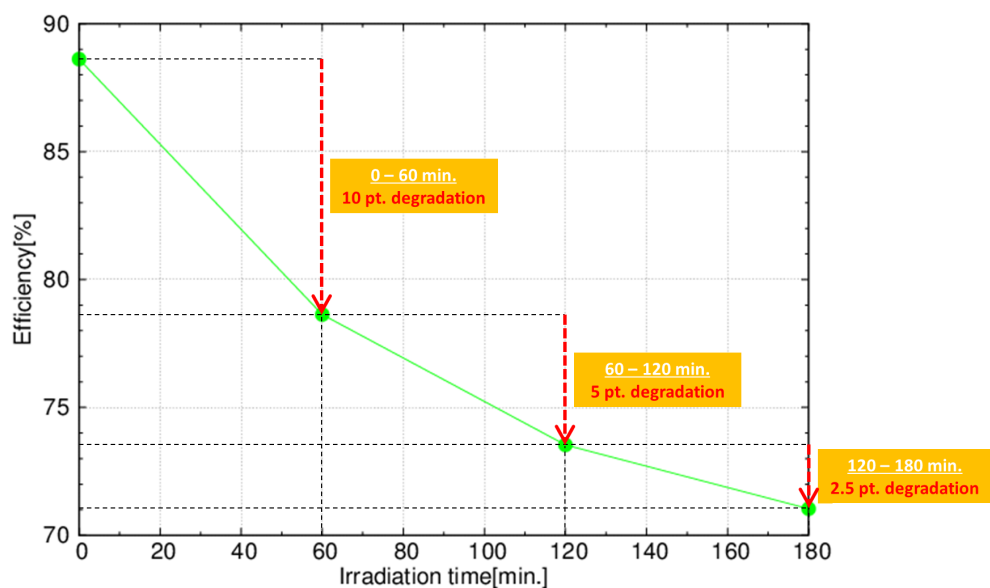


図 4.23: 180 min 照射したサンプルの efficiency の時間変化

4.2.6 IR スペクトルによる評価

殺菌ランプを用いて UV 照射を 60 分間、180 分間、48 時間行ったサンプルの IR スペクトルは図 4.24、4.25、4.26 のとおりである。60 分間照射後の IR スペクトルは照射前と比較してほとんど違いは見られないが、180 分間照射を行うと、 1200 cm^{-1} 前後の C-O 結合によるピークが若干浅くなっていることが確認できる。さらに 48 時間照射後の IR スペクトルは照射前のそれとは大きく異なったものになっている。 3000 cm^{-1} 付近の C-H 結合 (CH_3 、 CH_2) によるピークは非常に小さくなっていることから、UV 照射によって結合が切断され、高分子内の C-H 結合が減少している。また、 1700 cm^{-1} 付近に存在するカルボニル基 ($\text{C}=\text{O}$) によるピークは小さくなり広がっている。このことからカルボニル基が減少したことに加え、炭素-炭素二重結合 ($\text{C}=\text{C}$) が生成されたことによるピークが近傍に現れたため、その 2 つのピークが重なっているのではないかと推測できる。したがって、3.6 章に記述したように炭素-炭素の共役二重結合 ($\text{C}=\text{C}$) が生成されたことにより、黄変したと考えられる。以上のように IR スペクトルから劣化物の生成が確認できたため、殺菌ランプ (UV-C) による促進耐光性試験では劣化を促進することができており、「アクリライト」の劣化が非常に進行した際の状態を再現できたのではないかと考えている。

また、図 4.27 から UV を照射されていたサンプル表面は劣化が非常に進行しているが、裏面は UV 照射前と変化はなく劣化が進んでいないことがわかる。このことから、UV を照射されている表面のみ劣化が進行しており、UV 照射量の増加に伴い、劣化が内部に進行していくことが予想される。

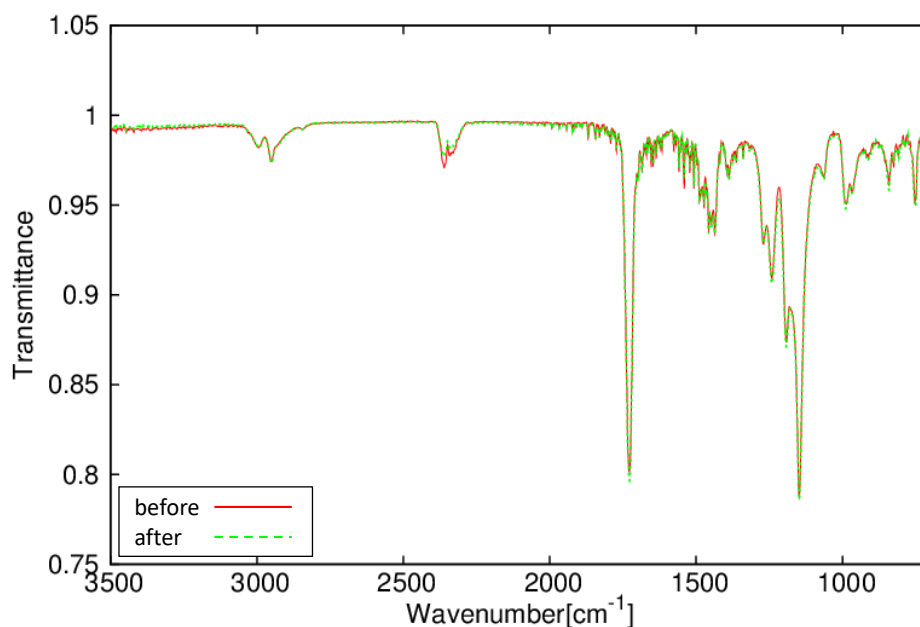


図 4.24: 60 min 照射したサンプルの IR スペクトルの変化

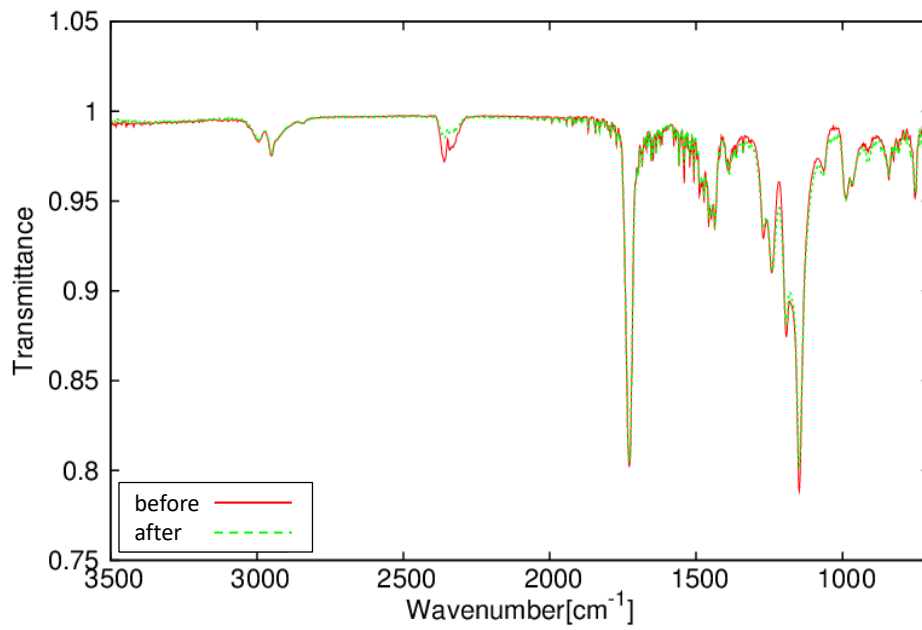


図 4.25: 180 min 照射したサンプルの IR スペクトルの変化

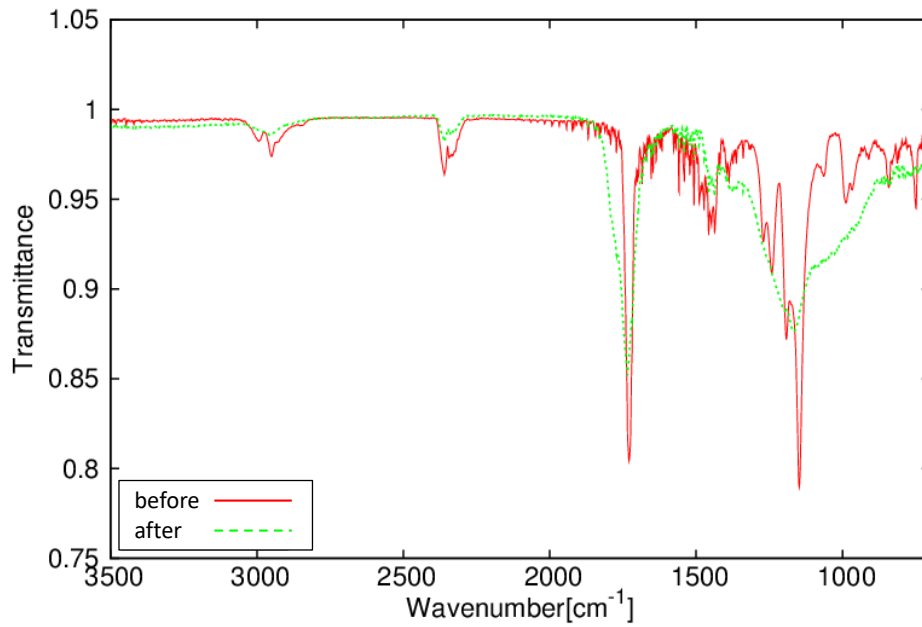


図 4.26: 48 hr 照射したサンプルの IR スペクトルの変化

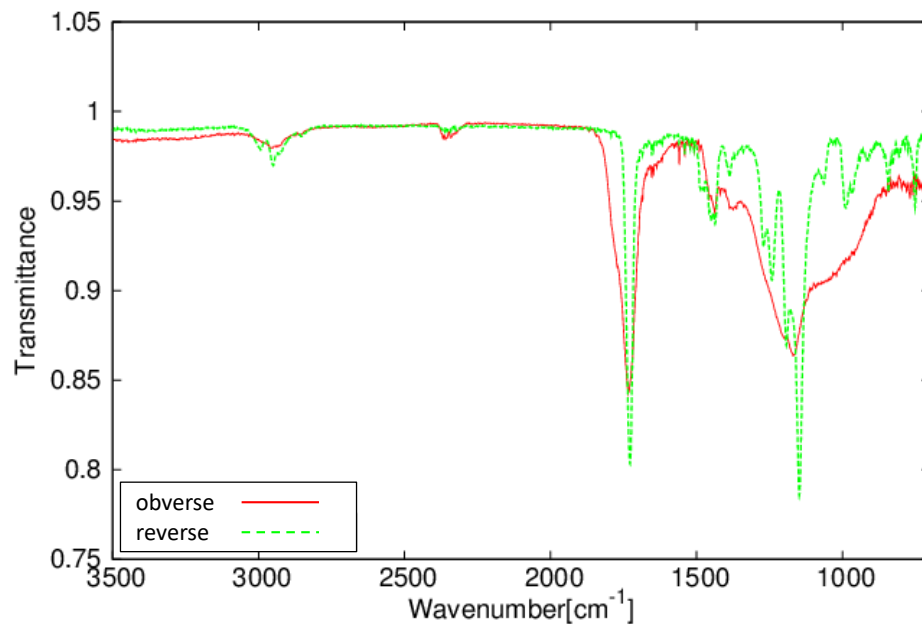


図 4.27: UV 照射を行った表面と裏面の IR スペクトル比較

第5章 成形加工時の熱による影響

「アクリライト®」は高温での成形加工により、ドーム状のカメラ窓が造られる。その際、三光精衡所内の炉において約 100°C まで加熱することになっているが、3.6 章に記述したように、PMMA は 140°C 付近から分解することが知られているため、非常に近い温度まで加熱しなければならないことがわかる。そこで本章では、成形加工時の熱による影響を評価し、カメラ窓としての使用に問題がないことを確認することを目的としている。

5.1 透過率測定

LST 用焦点面カメラ窓を加工するときの加熱による影響を透過率測定により評価する。図 5.1 に加熱サンプルと非加熱サンプルの様子を示す。図 5.1 の NO.1-A-heat の表面は NO.1-A にはないテカテカとした光沢があり、気泡のような凹凸が所々に確認できた。この状態は全ての加熱サンプルで確認できたが、後に加工をしたサンプルほど表面状態が非加熱サンプルに近づいており、製造元で質の高い LST 用焦点面カメラ窓の加工方法が確立されてきたのではないかと考えている。

サンプルは番号 NO.1 から NO.4、NO.7 から NO.10 の 8 つのロット、また、各ロット番号で非加熱サンプル 4 枚、加熱サンプル 4 枚の計 8 枚であり、全体で計 64 枚の透過率測定を行った。サンプルサイズは各サンプル若干の差はあるものの、50 × 50 × 6 mm である。

図 5.2 から 5.9 に NO.1 から NO.4、NO.7 から NO.10 の透過率測定結果を示す。これらの結果から非加熱サンプルと比較して加熱サンプルの透過率が若干低いことが確認できる。特に、350 nm 前後の紫外線領域で最大 2% 程度の差が見られた。

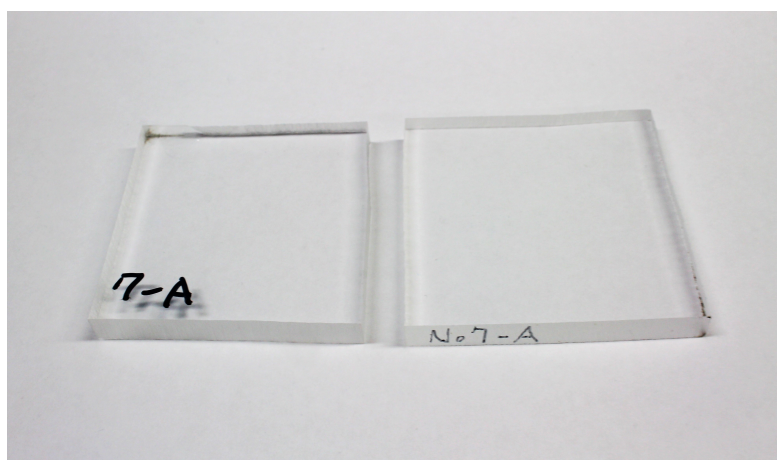


図 5.1: 加熱サンプル（左：NO.7-A-heat）と非加熱サンプル（右：NO.7-A）の比較

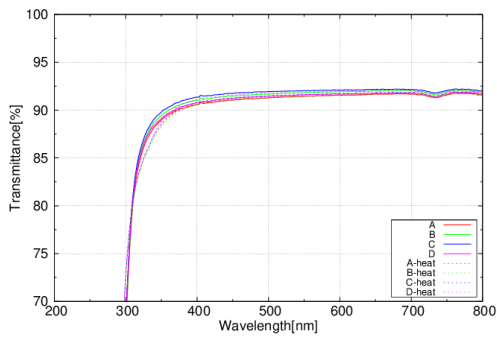


図 5.2: NO.1 (非加熱・加熱)

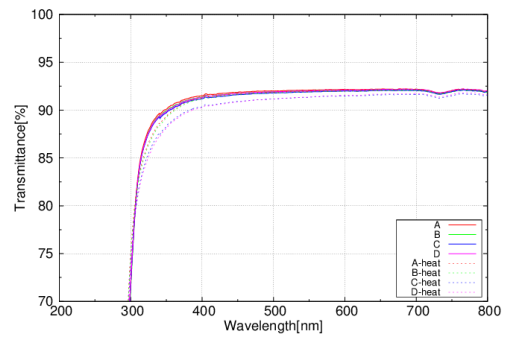


図 5.3: NO.2 (非加熱・加熱)

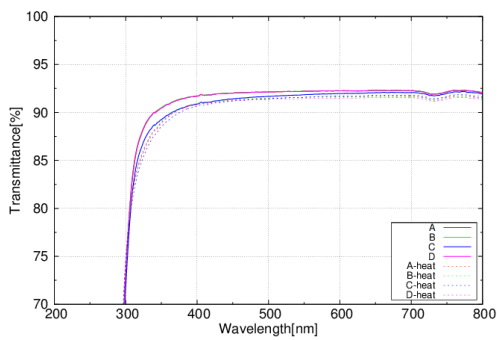


図 5.4: NO.3 (非加熱・加熱)

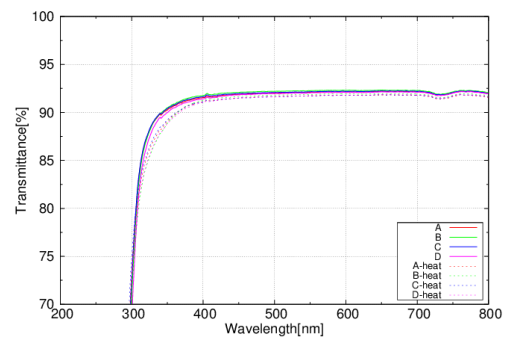


図 5.5: NO.4 (非加熱・加熱)

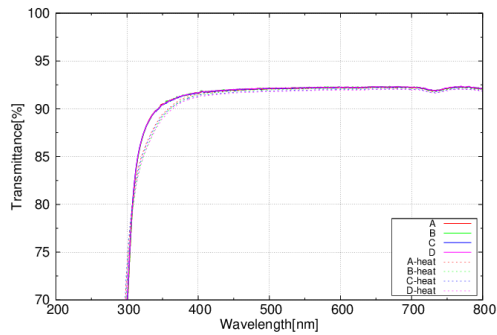


図 5.6: NO.7 (非加熱・加熱)

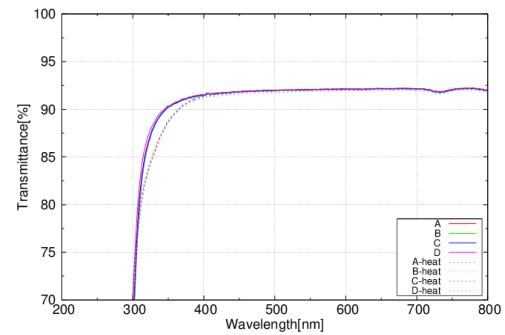


図 5.7: NO.8 (非加熱・加熱)

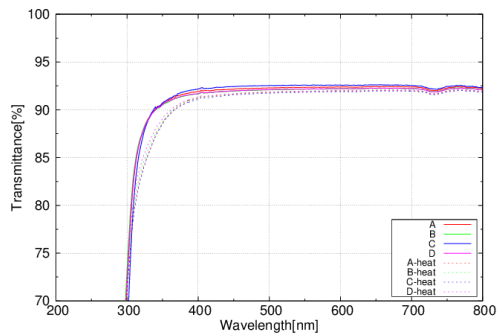


図 5.8: NO.9 (非加熱・加熱)

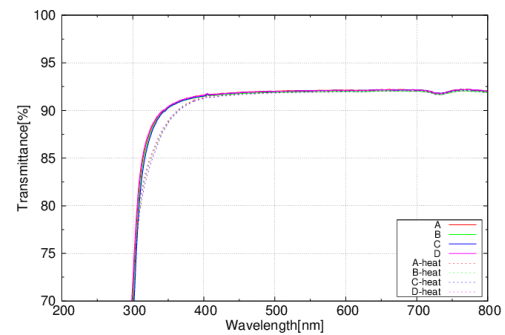


図 5.9: NO.10 (非加熱・加熱)

A, B, C, D : 非加熱サンプル
A-heat, B-heat, C-heat, D-heat : 加熱サンプル

5.2 波長領域全体の efficiency による評価

4.1.4 章と同様に波長領域全体の efficiency として評価するために、望遠鏡に到達するチェレンコフ光のスペクトルと LST 用分割鏡の平均反射率 (図 4.11) を畳み込んだ値を用いる。

表 5.1 に非加熱サンプルと加熱サンプルの efficiency を示す。非加熱サンプルと加熱サンプルの efficiency の差は平均で約 0.5 pt. 程度であり顕著な差は見られないため、加工時の加熱による影響は非常に小さく、LST 用焦点面カメラ窓としての使用において問題がないと判断した。

	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.7	NO.8	NO.9	NO.10
非加熱 (%)	87.9 ±0.3	88.6 ±0.1	88.8 ±0.3	88.7 ±0.2	88.7 ±0.0	88.4 ±0.2	89.0 ±0.1	88.6 ±0.2
加熱 (%)	87.8 ±0.2	88.1 ±0.5	88.1 ±0.1	88.1 ±0.1	88.3 ±0.2	87.9 ±0.1	88.0 ±0.2	88.1 ±0.1

表 5.1: 各ロット番号における非加熱・加熱サンプル別の efficiency 平均値 (上段: efficiency、下段: 標準偏差、両者とも小数点第 2 位以下四捨五入)

5.3 IR スペクトルによる評価

5.1 章では加工時の約 100°C の熱により「アクリライト®」の透過率が 350 nm 前後で低下していることがわかった。そこで透過率低下に伴って、どのような分子構造の変化をしているのか IR スペクトルの測定を行った。

PMMA は 140°C 付近から熱分解が始まると言われている。図 4.14 には NO.1-A (非加熱) と NO.1-A-heat (加熱) の IR スペクトルを示す。これより加熱前と加熱後で IR スペクトルには差がないことがわかった。よって、透過率低下による分子構造のわずかな変化はあると考えられるものの、IR スペクトルの測定では熱による分解を検出することはできなかった。

したがって、「アクリライト®」は加工時の 100°C 程度の熱では大きな分子構造の変化を引き起こされるようなことはなく、「アクリライト®」の加工温度に問題がないことが確認できた。

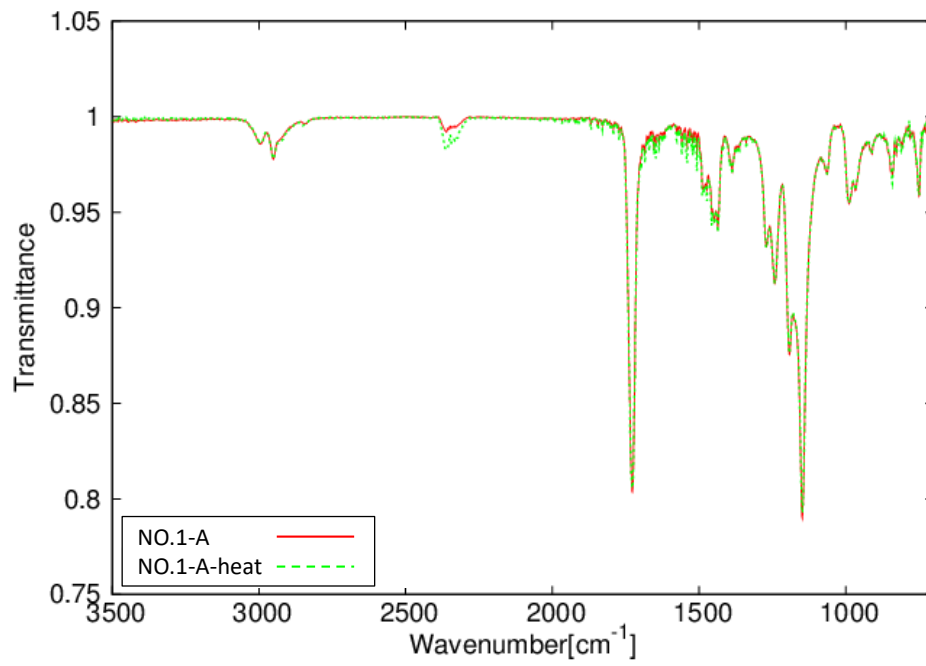


図 5.10: NO.1-A (非加熱サンプル) と NO.1-A-heat (加熱サンプル) の IR スペクトル比較

第6章 Summary

本研究では、次世代ガンマ線天文台 CTA 計画の大口徑望遠鏡用焦点面カメラ窓の紫外線による劣化、および加工時の加熱による劣化に関して、紫外線から可視光線領域にかけての透過率測定ならびに IR スペクトルの測定による評価を行った。

焦点面カメラの入り口部分を覆うためには直径 2.5 m 以上のカメラ窓が必要である。またチェレンコフ光を観測するにあたり、波長 400 nm 以下の紫外線も十分に透過する必要がある。これらの条件を満たす窓材として、三菱レイヨン製の UV 透過型アクリル板「アクリライト®」が候補となっている。CTA は 20 年間運用される予定であるため、カメラ窓は設置・メンテナンス時などに長時間にわたり太陽光に曝される可能性がある。そのため、太陽光、特に紫外線によるカメラ窓の劣化について理解する必要がある。そこで「アクリライト®」の紫外線による劣化を評価するため、紫外線蛍光ランプ (UV-A) を用いた促進耐光性試験を行った。UV 総量およそ 17000 J/cm^2 (昼間の太陽光に 1000 時間程度曝された場合の UV 量) を「アクリライト®」サンプルに照射し透過率測定を行った結果、波長 300 nm 付近では 13 pt.、それ以上の波長領域では 2 - 3 pt. 程度の低下が見られた。これらの透過率にチェレンコフ光の photon flux、分割鏡の反射率平均値を畳み込み、波長領域全体の efficiency として評価すると約 3 pt. 程度の低下に抑えられており、波長 300 - 550 nm で平均透過率 85% 以上という要求仕様を十分に満たしていることが確認できた。また、IR スペクトルの測定では劣化物の生成を確認することはできなかった。したがって、運用に伴う紫外線によるカメラ窓の劣化については問題がないと判断した。

殺菌ランプによる波長 254 nm の UV 照射では実際に地上に到達することはない波長の紫外線を照射するために促進性が高く、劣化が非常に進行した状態を再現できるのではないかと考えられる。ここでは照射時間 60 分、180 分、48 時間の 3 通り (別サンプル) で UV 照射を行った。透過率測定を行ったところ短時間の照射でも低下量が大きく、UV 照射前に波長 300 nm 付近において 70% 近くあった透過率は 48 時間照射後ではほぼ 0% にまで低下していた。また、このサンプルは照射前と比較して明らかに黄変しており、IR スペクトルにも劣化物の生成が確認できた。

焦点面カメラの 2.5 m もの広さを平面のアクリル樹脂で覆うとすると、自重や風により内側に歪曲してしまいカメラを破壊してしまう可能性がある。そこで、ドーム形状に加工することにより十分な強度が確保できることが確認されている。しかし、ドーム形状に加工するには大きな「アクリライト®」の一枚板を 100°C 程度まで加熱する必要があり、その熱による透過率の低下や変性が考えられるため熱による影響を確認した。透過率測定では加工前と比較して波長 350 nm 前後で最大 2% 程度の低下が見られたが、波長領域全体の efficiency では 1% 未満の低下に抑えられており、カメラ窓としての使用に問題がないことが確認できたため、LST 用カメラ窓の搭載が最終決定された。

Appendix

A. 接着剤サンプルに対する UV 照射と剪断強度試験 (CTA 内部会議資料)

2.4.2 章で述べたように CTA では AMC システムにより各分割鏡の向きを補正するため、各分割鏡裏面に固定軸と 2 つのアクチュエータを取り付ける構造となっている。本試験では分割鏡裏面の固定パッドと治具の接着に用いる接着剤に対して UV 照射を行い、剪断強度試験を近畿大学素粒子・宇宙物理研究室（中島侑哉さん）の協力の下行った。これにより接着剤の紫外線による劣化を検証する。

サンプルは 50 × 10 × 10 mm のアルミ片を用いて以下の条件により作製し、UV 照射条件を表 A.1 のように定めた。

- 接着剤 : E-60HP (Hysol)
- 接着面積 : 10 mm × 3 mm
- 硬化方法 : 93°C で 2 時間加熱硬化

NO.	接着剤の厚み [mm]	UV 照射条件
1	0.215	UV 照射なし
3	0.207	
5	0.188	UV 照射あり
7	0.179	
9	0.174	UV 照射あり (シリコンコーティング)
11	0.171	

表 A.1: 各サンプルの試験条件

ここで、NO.9 と NO.11 は信越化学工業 KE445W を用い、接着面を覆うように裏表ともシリコンコーティングを施した。UV 照射には 4.1 章で述べた紫外線蛍光ランプ (UV-A) を用いて、約 755.5 MJ/cm² (3 年分相当) 照射を行った。

図 A.1 (a) の UV 照射を行っていないサンプルと比較すると、図 A.1 (b) の UV 照射を行ったサンプルは接着面からはみ出した接着剤が黄色く変色していることが確認できる。したがって、約 3 年分の紫外線により接着剤が劣化をすることがわかった。

図 A.2 から各サンプルの剪断強度に有意な差があるとは言えないため、約 3 年相当の UV 照射による強度劣化はほとんどないことがわかった (NO.3 は測定に失敗しているため議論からは除いている)。これは、接着面の端の非常に狭い領域 (0.2 mm × 3 mm 程度) にしか UV が直接照射されないために、剪断強度に影響が出るほどの劣化をしなかったと考えられ

る。実際の状況下でも接着面のほとんどは紫外線に曝されることがないために、紫外線劣化による影響は小さいことが予想される。

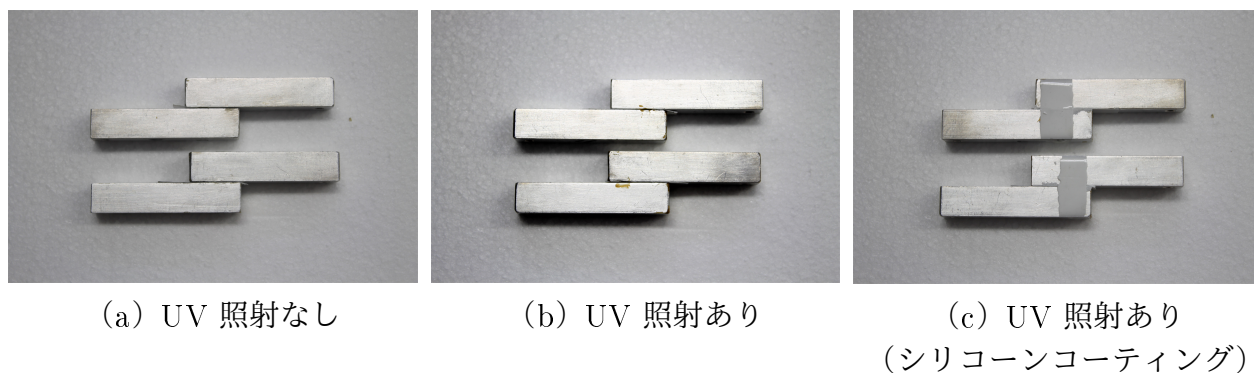


図 A.1: 各サンプルの様子

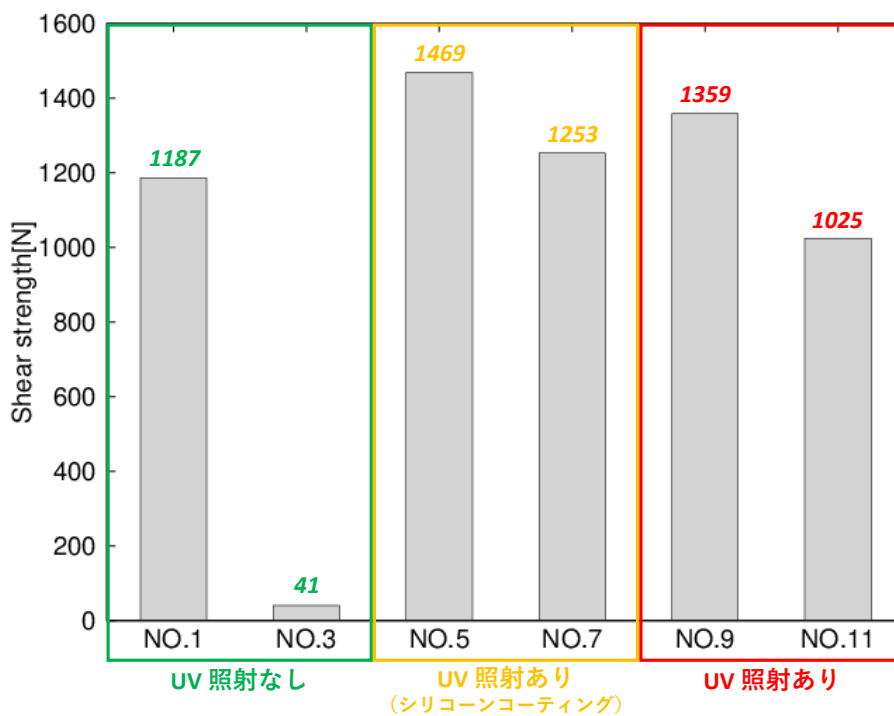


図 A.2: 各サンプルの剪断強度試験結果

B. 垂直入射時の多重繰り返し反射を考慮した反射率・透過率 [39]

媒質に吸収がある場合の多重繰り返し反射を考慮した反射率および透過率を求める。図 B.3 のように媒質表面と裏面による反射を考え、媒質には吸収があるとする。媒質に吸収があるとすると内部透過率 T_i はランベルト・ベールの法則より

$$T_i = \exp(-\alpha d) = \exp(-4\pi k_2 d/\lambda) \quad (\text{B.1})$$

α : 媒質の吸収係数、 d : 媒質の厚み、 k_2 : 媒質の消衰係数

で与えられる。したがって、各場所の光量は表 B.2 のようになるため、反射率および透過率は等比級数の和となる。

反射率 (吸収あり)

$$\begin{aligned} R &= R_0 + (1 - R_0)^2 T_i^2 R_0 (1 + T_i^2 R_0^2 + T_i^4 R_0^4 + \dots) \\ &= \frac{R_0 + (1 - R_0)^2 T_i^2 R_0}{1 - T_i^2 R_0} \\ &= \frac{R_0 \{1 + (1 - 2R_0) T_i^2\}}{1 - T_i^2 R_0} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

透過率 (吸収あり)

$$\begin{aligned} T &= (1 - R_0)^2 T_i (1 + T_i^2 R_0^2 + T_i^4 R_0^4 + T_i^6 R_0^6 + \dots) \\ &= \frac{(1 - R_0)^2 T_i}{1 - T_i^2 R_0^2} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

ただし

$$R_0 = \frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2} \quad (\text{B.4})$$

である。媒質に吸収がない場合、式 (B.2)、(B.3) において内部透過率 $T_i = 1$ として

反射率 (吸収なし)

$$R = \frac{2R_0}{1 + R_0} \quad (\text{B.5})$$

透過率 (吸収なし)

$$T = \frac{1 - R_0}{1 + R_0} \quad (\text{B.6})$$

ただし

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{B.7})$$

である。

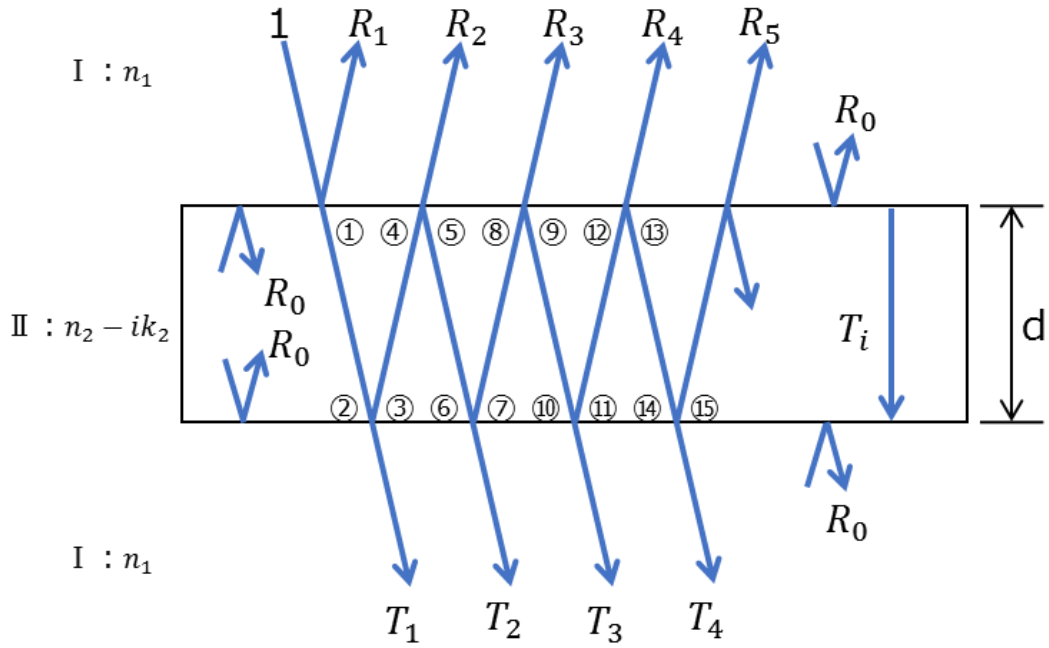


図 B.3: 多重繰り返し反射の模式図
 図ではわかりやすいように光線を斜入射で描いている。

場所	光量		
①	$1 - R_0$	⑥	$(1 - R_0)T_i^3 R_0^2$
②	$(1 - R_0)T_i$	⑦	$(1 - R_0)T_i^3 R_0^3$
③	$(1 - R_0)T_i R_0$	⑧	$(1 - R_0)T_i^4 R_0^3$
④	$(1 - R_0)T_i^2 R_0$	⑨	$(1 - R_0)T_i^4 R_0^4$
⑤	$(1 - R_0)T_i^2 R_0^2$	⑩	$(1 - R_0)T_i^5 R_0^4$
		⑪	$(1 - R_0)T_i^5 R_0^5$
		⑫	$(1 - R_0)T_i^6 R_0^5$
		⑬	$(1 - R_0)T_i^6 R_0^6$
		⑭	$(1 - R_0)T_i^7 R_0^6$
		⑮	$(1 - R_0)T_i^7 R_0^7$

表 B.2: 多重繰り返し反射の各場所の光量

C. 紫外可視分光光度計の選定と物質による系統誤差

本研究では、「アクリライト®」サンプルの他にもリファレンスとして厚さ 3 mm の CaF_2 窓材（シグマ光機 OPCFU-50C03-P）の透過率測定を行うことによって、測定装置による違いを評価し、本測定に用いる紫外可視分光光度計を選定した。以下に測定装置と測定場所を示す。

- U-4100（日立） @ 茨城県工業技術センター
- V-660（日本分光） @ 茨城大学
- Agilent 8453（Agilent Technologies） @ 茨城大学
- * V-570（日本分光） @ 東京大学物性研究所

* 実際に測定は行ったが、他の測定装置と同サンプルの測定結果が存在しないために図 C.4、C.5 では省略している

表 C.3 にはリファレンスとして用いた CaF_2 窓材（シグマ光機 OPCFU-50C03-P）の各波長ごとの屈折率を示す。また、図 C.4 は、表 C.3 の屈折率を用いて求めた透過率計算値（Appendix B 参照）と各測定装置の CaF_2 窓材（シグマ光機 OPCFU-50C03-P）の透過率測定結果を示している。この結果より、可視光領域では U-4100（日立）と V-660（日本分光）がほとんど差はなく、計算値とメーカー測定値に最も近くなっているが、紫外光領域になると U-4100（日立）の測定結果が計算値とメーカー測定値から大きく外れたため、4.2 章と 5 章の透過率測定には V-660（日本分光）を用いることを決定した。

図 C.5 では「アクリライト®」の屈折率 [38] を用いた透過率計算値（Appendix B 参照）と各測定装置の透過率測定結果を示している。図 C.4 CaF_2 窓材（シグマ光機 OPCFU-50C03-P）では計算値とメーカー測定値から一番外れていた Agilent 8453（Agilent Technologies）で +1 pt. 程度（可視光領域）の差だったが、図 C.5 の「アクリライト®」サンプルでは +2 pt. 程度（可視光領域）の差があることがわかる。また、U-4100（日立）と V-660（日本分光）に測定結果に関しても、 CaF_2 窓材（シグマ光機 OPCFU-50C03-P）では差がほとんどなかったのに対し、「アクリライト®」サンプルでは 0.5 pt. 程度の差が確認できる（可視光領域）。したがって、測定装置による系統的な誤差があることは間違いないが、測定する物質によっても系統誤差が発生すると考えられる。

さらに、以上の 3 装置（V-570（日本分光）は除く）は全て検出器が異なっていることも系統誤差が発生する原因になっているのではないかと考えている。表 C.4 に各装置の検出器の違いを示す。U-4100（日立）と V-660（日本分光）は、初めに光源からの光を分光し、波長ごとにサンプルに透過させることで透過率を得るため、測定には数分を要する。一方で Agilent 8453（Agilent Technologies）は、白色光をサンプルに透過させた後に分光し、波長ごとに割り当てられたダイオードで検出することによって数秒で透過率を得ることができる。4.1 章では系統誤差が比較的大きい Agilent 8453（Agilent Technologies）を用いているが、この系統誤差を把握したうえで、相対的な低下量を見ているので問題はないと考えている。

波長 (nm)	屈折率
200.0	1.496
248.4	1.467
308.0	1.453
355.0	1.446
404.7	1.442
488.0	1.437
632.8	1.433
694.3	1.432
780.0	1.430

表 C.3: OPCFU-50C03-P (シグマ光機) の各波長ごとの屈折率 [42]

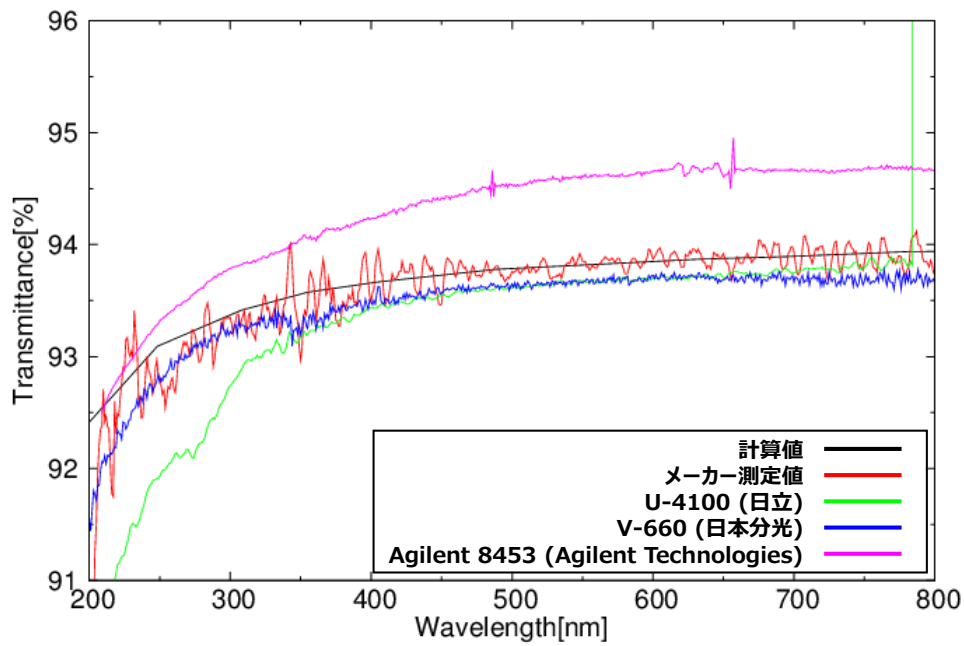


図 C.4: 測定装置による CaF₂ 窓材の透過率測定結果の差

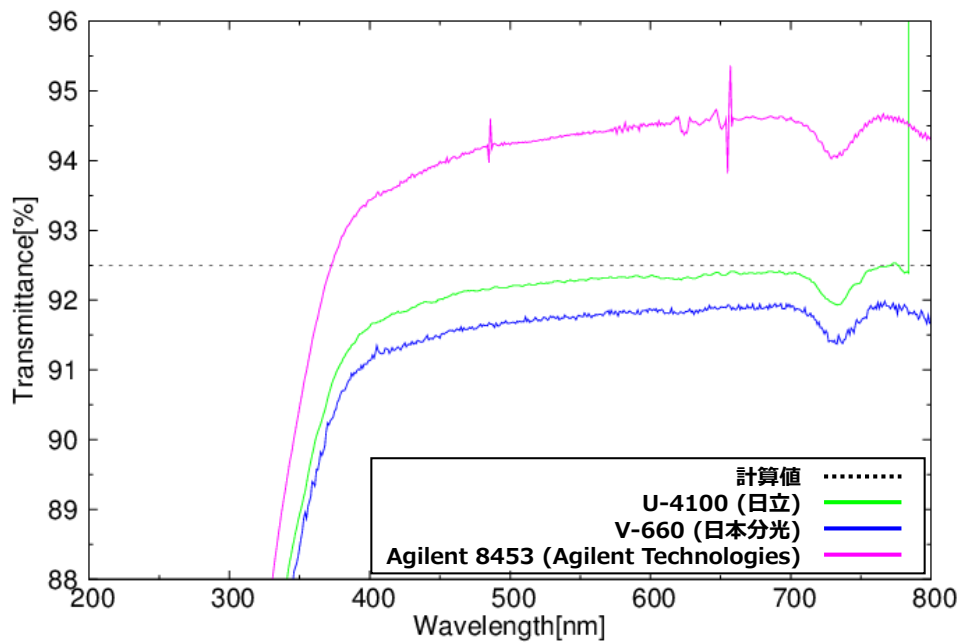


図 C.5: 測定装置による「アクリライト®」サンプルの透過率測定結果の差

	検出器	備考
U-4100 (日立)	積分球 + PMT	分光後、サンプルに透過して検出
V-660 (日本分光)	PMT	
Agilent 8453 (Agilent Technologies)	フォトダイオードアレイ	白色光をサンプルに透過後、 分光して検出

表 C.4: 各測定装置の検出器

References

- [1] Scott Wakely & Deirdre Horan, "TeVcat"
<<http://tevcat.uchicago.edu/>>
- [2] Tonello N., PhD Thesis "Study of the VHE γ -ray emission from the Active Galactic Nucleus 1ES1959+650", Technische Universität München, 2006
- [3] Masaaki Hayashida, PhD Thesis "Observation of Very-High-Energy Gamma-Rays from Blazars with the MAGIC Telescope", Universität München, 2008
- [4] 浅野正二, 「大気放射学の基礎」, 朝倉書店, 2010
- [5] CTA Construction Project, "Large Size Telescope Technical Design Report", 2015
- [6] Diego Tescaro, PhD Thesis "TeV γ -ray observations of nearby Active Galactic Nuclei with the MAGIC telescope: exploring the high energy region of the multiwavelength picture", Universitat Autònoma de Barcelona, 2010
- [7] Katagiri Hideaki, PhD Thesis "Detection of TeV gamma-rays from the Supernova Remnant RX J0852.0-4622", The University of Tokyo, 2013
- [8] Marcus Wagner R., PhD Thesis "Measurement of Very High Energy Gamma-Ray Emission from Four Blazars Using the MAGIC Telescope and a Comparative Blazar Study", Technische Universität München, 2006
- [9] Völk H. J. & Bernlöhr K., "Imaging very high energy gamma-ray telescopes", Experimental Astronomy, 2008, (astro-ph/arXiv:0812.4198)
- [10] J. A. Hinton & W. Hofmann, "Teraelectronvolt Astronomy", Ann. Rev. Astron. Astrophys. 47:523-565, 2010, (astro-ph.HE/arXiv:1006.5210)
- [11] The MAGIC Telescopes
<<https://magic.mppmu.mpg.de/>>
- [12] H.E.S.S.
<<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>>
- [13] VERITAS
<<http://veritas.sao.arizona.edu/>>
- [14] CTA-Japan Collaboration
<<http://www.cta-observatory.jp/index.html>>

- [15] Chrenkov Telescope Array Observatory gGmbH
<<https://www.cta-observatory.org/>>
- [16] A. Biland, M. Garzarczyk, H. Anderhub, V. Danielyan, D. Hakobyan, E. Lorenz, R. Mirzoyan on the behalf of the MAGIC Collaboration, "The Active Mirror Control of the MAGIC Telescope", Proc. 30th ICRC (Merida), 2007, (astro-ph/arXiv:0709.1574)
- [17] 長紀仁, 修士学位論文 「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡用分割鏡の性能評価-2f 法を用いた結像性能および反射率の評価-」, 茨城大学, 2015
- [18] 荻野桃子, 修士学位論文 「CTA 大口径望遠鏡光学システムの性能測定と空気シャワーシミュレーションによる評価」, 東京大学宇宙線研究所, 2014
- [19] 深見哲志, 修士学位論文 「CTA 大口径望遠鏡分割鏡能動制御システムの開発」, 東京大学宇宙線研究所, 2015
- [20] 永吉勤, 修士学位論文 「次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array 大口径望遠鏡初号機の光電子増倍管の較正試験」, 埼玉大学, 2014
- [21] 小野祥弥, 修士学位論文 「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡初号機用ライトガイドの量産及び性能評価」, 茨城大学, 2015
- [22] CTA-Japan Consortium, 「Cherenkov Telescope Array 計画書」, 2014
- [23] 株式会社 R&D 支援センター出版, 「高分子劣化・変色メカニズムとその対策および評価方法」, 2014
- [24] 安藤幸司, 「光と光の記録 [光編]」, 産業開発機構株式会社, 2003
- [25] 環境省, 「紫外線環境保健マニュアル 2015」, 2015
- [26] スガ試験機株式会社
<<http://www.sugatest.co.jp/contents/>>
- [27] Atlas Electric Devices Company, 2001, "Weathering Testing Guidebook"
- [28] M. Hesse, H. Meier, B. Zeeh, (野村正勝 監訳), "Spectroscopic Methods in Organic Chemistry[2nd Edition]" (「有機化学のためのスペクトル解析法 [第 2 版]」), 2015
- [29] 日本分光株式会社/ Web 基礎セミナー
<<https://www.jasco.co.jp/jpn/technique/internet-seminar/index.html>>
- [30] 日本分光学会, 分光測定入門シリーズ 6 「赤外・ラマン分光法」, 2011
- [31] 分析機器の総合商社 株式会社 エス・ティ・ジャパン
<<http://www.stjapan.co.jp/products/232>>
- [32] 産業技術総合研究所、有機化学のスペクトルデータベース SDBS
- [33] 角岡正弘, 「高分子劣化のメカニズム」, 日本ゴム協会誌, 68, 276 (1995)

- [34] 田島政弘, 「養液浄化装置用光拡散部樹脂の選定試験 -各種樹脂材料の紫外線耐久性比較-」, 島根県産業技術センター研究報告, 51, 5-10 (2015)
- [35] 本橋大輔, 学士学位論文「紫外線蛍光ランプを用いた促進耐光性試験機制作と評価」, 茨城大学, 2014
- [36] 日立アプライアンス株式会社
<<http://www.lighting.hitachi-ap.co.jp/lighting/>>
- [37] 株式会社佐藤商事
<<http://www.ureruzo.com/uv340.htm>>
- [38] 三菱レイヨン株式会社/アクリライト
<<https://www.mrc.co.jp/acrylite/index.html>>
- [39] 小檜山光信, 「光学薄膜の基礎理論 増補改訂版 - フレネル係数、特性マトリクス -」, 株式会社オプトロニクス社, 2011
- [40] M. Hayashida, PMMA Entrance (sealing) window for imaging cameras (Shinkolite), CTA General Meeting, 2014
- [41] 東芝ライテック株式会社
<<http://saturn.tlt.co.jp/pdocs//s/GL6>>
- [42] シグマ光機株式会社
<https://www.global-optosigma.com/ja/page_pdf/OPCFU_OPFCF.pdf>

Acknowledgments

本研究にあたり、多くの方々のご指導、ご協力を賜りましたこと深く感謝申し上げます。指導教員である吉田龍生教授には研究を始める以前の基礎的な物理から研究での些細な疑問まで、手厚くご指導、ご鞭撻を賜りましたこと深く感謝申し上げます。副指導教員の片桐秀明准教授には研究に関してのみならず、研究に対する姿勢や社会人としてのあるべき姿についてもご指導を賜りましたこと感謝申し上げます。柳田昭平名誉教授にもゼミ等でご指導を賜りましたこと感謝申し上げます。

研究室で生活を共にした同期である佐藤亘君、重中茜、Dang Viet Tan 君、若松諒君、また天体形成理論グループの菊入勇伸君には多くの刺激をいただきました。皆一人一人のキャラクターが非常に強く、騒がしいくらいに楽しい研究室生活を送ることができました。高エネルギー宇宙物理グループのみならず天体形成理論グループの先輩方、また後輩達にも日頃の研究室での生活や研究室外での活動などで非常にお世話になりましたこと深く感謝申し上げます。

東京大学宇宙線研究所の林田将明特任助教には、研究における的確なアドバイスから、「アクリライト[®]」サンプルの調達、配送まで様々なご指導、ご協力を賜りましたこと深く感謝申し上げます。また、荻野桃子さんには東京大学物性研究所において紫外可視分光光度計の操作方法、測定方法のご指導を賜りましたこと感謝申し上げます。同期である稲田知大君には、「アクリライト[®]」サンプルを切るときに毎回ご協力いただきましたこと感謝申し上げます。

近畿大学素粒子・宇宙物理研究室の千川道幸教授には接着剤サンプルに対する試験において様々なご協力を賜りましたこと深く感謝申し上げます。岡本健太君、本田真也君は試料片の作成、また、中島侑哉君には UV 照射したサンプルの剪断強度試験を行っていただきましたこと感謝申し上げます。

茨城大学の化学領域の先生方である大友征宇教授、藤澤清史教授には様々な紫外可視分光光度計や赤外分光光度計の使用方法のご指導、また、化学に関しては素人である私に対しても熱心なご指導と研究に対する的確なアドバイスを賜りましたこと深く感謝申し上げます。

茨城県工業技術センターの加藤健さんには紫外可視分光光度計の利用の際に丁寧な使用方法の説明や治具の載せ換えなど、様々なご協力を賜りましたこと深く感謝申し上げます。

CTA-Japan の皆様、特に私の所属していた CTA-Japan MIR グループの皆様には、週に一度行われる研究報告の場におきまして研究に対する様々なご指導を賜りましたこと深く感謝申し上げます。CTA-Japan グループの一員として、この壮大な計画の一部に貢献できたこと非常に光栄に思います。

最後に、今までお世話になった方々に改めて深く感謝申し上げるとともに、私の修士学位論文を締めさせていただきます。誠にありがとうございました。