

2010 年度 卒業論文

宇宙線望遠鏡計画の中央レーザー装置に設置した LIDAR システム

指導教員

本田 建 教授

2011 年 3 月

山梨大学工学部
機械システム工学科

T07MI019 末木 聖

概要

宇宙を無数に飛び交っている放射線のことを宇宙線と呼ぶ。この宇宙線は絶えず地球にも降り注いでいる。 10^{18} eV を超えるエネルギーをもつ宇宙線は「超高エネルギー宇宙線」と呼ばれ、特に 10^{20} eV 以上の超高エネルギー宇宙線は地球に到達することが極めて困難であると考えられている。しかし、2003年に日本で実験を行っていた AGASA グループは、地表検出器アレイを用いて 10^{20} eV を超える宇宙線を 11 例観測したと発表した。一方、アメリカの HiRes グループは大気蛍光鏡を用いた観測の結果、 10^{20} eV を超える宇宙線を予想と同程度観測したと発表、双方の実験結果が食い違う結果となったが、両実験ともエネルギーの決定精度・検出頻度が低く、どちらの結果が正しいかは明確にならなかった。

そこで、この問題を解決し、超高エネルギー宇宙線の起源を明らかにするために 2003 年より日米韓露共同で宇宙線望遠鏡実験(Telescope Array Project : TA 実験)を米国ユタ州に建設、2008 年 3 月より定常観測を開始した。TA 実験は約 500 台の地表検出器と 3 ヶ所のステーションに設置された計 38 台の大気蛍光望遠鏡からなり、到来する宇宙線を 2 種類の検出方法で同時観測することが可能である。

大気蛍光望遠鏡は宇宙線が大気圏内に突入後に起こす空気シャワー現象で発する大気蛍光を鏡で集め、光電子増倍管を用いたカメラによって観測する装置である。観測される大気蛍光は大気中を伝播してくるため、一次宇宙線エネルギーの推定にあたっては大気の透明度が非常に大きく影響する。

TA 実験で使用している大気透明度の測定装置の中に、LIDAR(Light Detection And Ranging)と CLF(Central Laser Facility : 中央レーザー装置)がある。LIDAR は環境分野で用いられている手法であり、レーザーの後方散乱光を観測することで大気の状態を測定する方法である。この方法は、大気中に浮遊するエアロゾル粒子による散乱の高度分布を知ることができる。CLF は 3 ヶ所ある FD ステーションから等距離の位置に設置されており、そこから垂直にレーザーを射出し、その側方散乱光を 3 ヶ所の FD ステーションで観測するものである。CLF の主目的は 3 ヶ所に設置された大気蛍光望遠鏡のキャリブレーションであるが、もしキャリブレーションが精度良く行われている場合には、大気の不透明度を測定することもできる。CLF では、大気蛍光望遠鏡による観測中レーザーを 30 分毎に射出している。そこで、新たな大気透明度の観測手法として、CLF の垂直射出レーザーの後方散乱光を観測する LIDAR 型観測装置である LIDAR@CLF が提案された。このデバイスは、CLF から射出されるレーザーを利用した LIDAR システムであり、CLF の 30 分毎のレーザー光の射出と LIDAR システムの高度分解能を持ち合わせた観測が可能となる。本研究は新たに提案されたデバイスである LIDAR@CLF の開発・設計について行ったものである。

目次

第1章 宇宙線	1
1.1 宇宙線	1
1.2 空気シャワー	3
1.3 超高エネルギー宇宙線	5
第2章 テレスコープ・アレイ実験	7
2.1 テレスコープ・アレイ実験概要	7
2.2 地表検出器 (SD)	9
2.3 大気蛍光望遠鏡 (FD)	10
第3章 大気の散乱現象	13
3.1 Rayleigh 散乱	14
3.2 Mie 散乱	16
第4章 大気の測定装置	19
4.1 LIDAR システム	19
4.2 CLF	22
第5章 CLF へ導入した LIDAR システム	27
5.1 プラットホーム	29
5.1.1 架台	30
5.1.2 プレート	32
5.2 カバーボックス	37
5.3 高高度域観測用受光デバイス部分	39
5.3.1 集光鏡	39
5.3.2 PMT(H8643)	40
5.3.3 集光鏡固定台	42
5.4 低高度域観測用受光デバイス部分	44

5.4.1 PMT(H3178-51)	45
5.4.2 PMT 保持筒	46
5.4.3 アリミズレール	47
5.4.4 PMT 取り付け位置調節パーツ	48
5.4.5 PMT アライメントパーツ	49
5.5 PMT 電力供給用デバイス	51
5.5.1 高圧モジュール電源	51
5.5.2 直流安定化電源	53
5.5.3 パワーサプライコントローラ	55
5.6 データ取得用デバイス	56
5.6.1 オシロスコープ	56
5.6.3 LIDAR PC	57
5.7 問題点と対策	59
第6章 まとめ	66
参考文献	67

第1章 宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの陽子や原子核、電子、 γ 線、ニュートリノなどの放射線のことである。1912年にオーストリアの物理学者である Victor Francis Hess による気球を用いた放射線計測実験によって発見された。

宇宙線のエネルギーには eV (エレクトロンボルト) という単位を用いる。1eV は、電位差 1V の 2 点間を動いた電子の得る運動エネルギーである。今日までのさまざまな実験によって、 10^7 eV \sim 10^{20} eV の宇宙線が観測されている。現在までに観測された宇宙線のエネルギースペクトルを図 1.1 に示す。

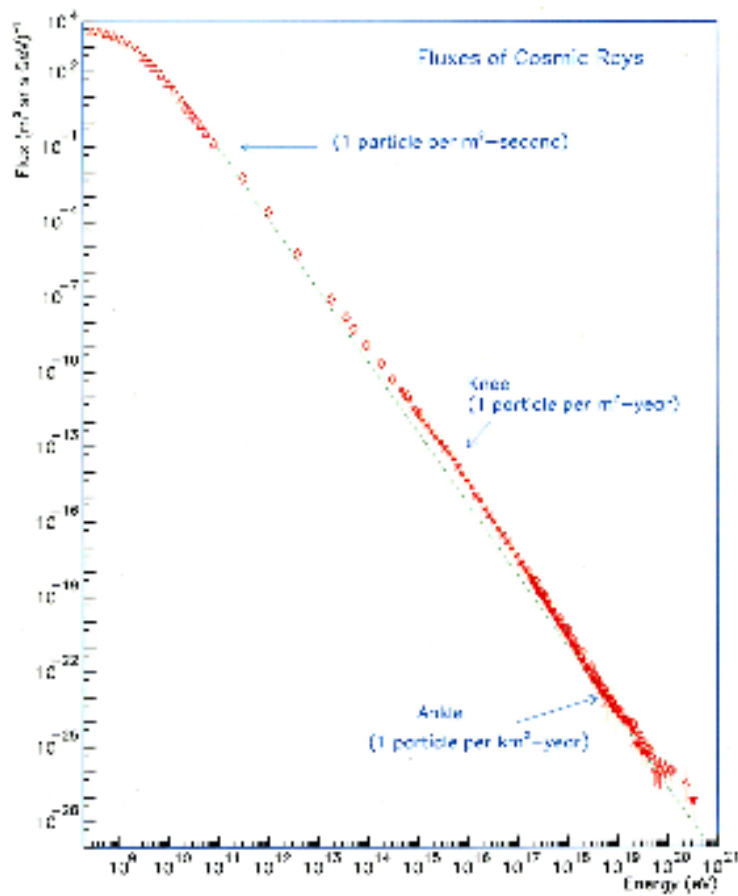


図 1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

荷電粒子は一様な電場の中では等速円運動を行う。この円運動の半径をラーモア半径と呼び、銀河磁場による荷電粒子のラーモア半径 r_L は、

$$r_L = \frac{mv}{ZeB} \quad (1.1)$$

で表される。ここで、 m は粒子の質量、 v は電場に垂直な方向の粒子の速度、 Z は粒子の原子番号、 e は素電荷、 B は銀河磁場の強さである。

図 1.1 において、 10^{15} eV 付近と $10^{18.5}$ eV 付近にはそれぞれ knee と ankle と呼ばれるスペクトルの折れ曲がりが存在する。 10^{15} eV 付近に存在する knee は我々の銀河系内を起源にもつ宇宙線の組成変化によるものと考えられている。宇宙線のエネルギーが 10^{19} eV を超えると、そのラーモア半径は銀河系の大きさと同程度となる。このようなエネルギーの宇宙線は銀河系外から到来してくることが考えられ、これによって ankle の折れ曲がりが存在していると考えられている。

宇宙空間には、宇宙背景放射と呼ばれる約 2.7K のマイクロ波が存在している。銀河系外から我々の銀河へと到来する高エネルギーの宇宙線はその長い伝播過程の中でこのマイクロ波と衝突、反応を起こし、エネルギーを損失する可能性が極めて高い。このエネルギー損失により、 10^{20} eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線は 10^{19} eV 程度にまでエネルギーを損失した状態で地球に到来すると考えられている。この理論を、提唱した Greisen、Zatsepin、Kuzmin の 3 人の頭文字から GZK カットオフと呼ぶ。

1.2 空気シャワー

10^{14} eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線が地球へと入射すると、宇宙線は地球大気を構成する窒素や酸素などの原子核と衝突し、数多くの二次粒子を発生させる。この二次粒子がさらに衝突を繰り返しカスケード状に粒子が増加し、最初は 1 個だった粒子は大気を降下するとともに二次粒子の大群となって大地に到達する。この現象を空気シャワーと呼ぶ。空気シャワーの概念図を図 1.2 に示す。

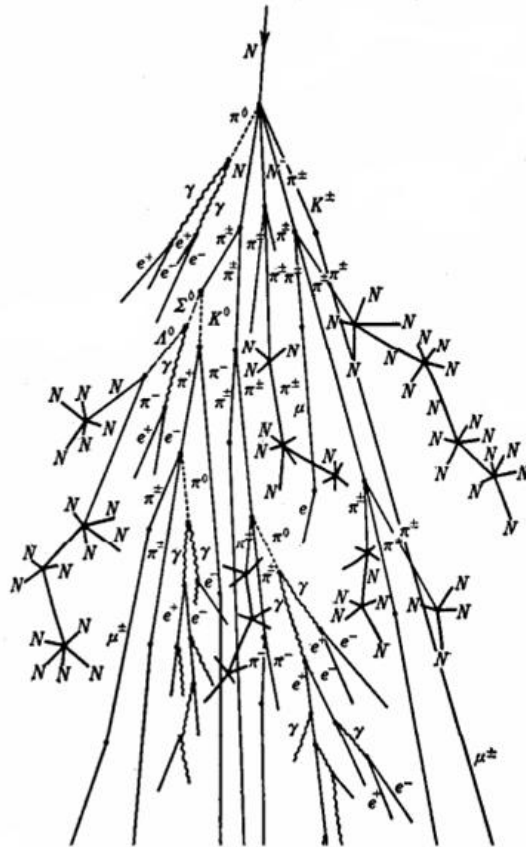


図 1.2 空気シャワー

宇宙空間を飛び交い、地球大気へと入射する宇宙線を一次宇宙線と呼ぶ。これに対し、地球大気へ入射し、そこから発生した二次粒子群を二次宇宙線と呼ぶ。

地球大気へ入射した一次宇宙線（陽子や原子核）は大気中の原子核と衝突し、多数の π 中間子 (π^+, π^-, π^0) と K 中間子 (K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0) を生成する。生成される π 中間子

の内、電荷を持たない中性 π 中間子 (π^0) は、荷電 π 中間子 (π^\pm) の半数程度存在する。中性 π 中間子は約 8.4×10^{-17} 秒という極短い寿命を持つため、直ちに2つの γ 線 (光子) へと崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.2)$$

γ 線は、原子の原子核と反応することによって電子と陽電子 (電子対) を生成する (電子対創生)。

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad (1.3)$$

さらに、電子及び陽電子は原子の原子核と反応して γ 線を放出する (制動放射)。

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma \quad (1.4)$$

$$e^+ \rightarrow e^+ + \gamma \quad (1.5)$$

また、 γ 線は原子の電子に衝突することで、その電子を跳ね飛ばす (コンプトン効果)。同様に、電子も原子の電子に衝突することで、その電子を跳ね飛ばす (電離)。電子対創生、制動放射、コンプトン効果、電離が立て続けに発生することで、粒子数が加速度的に増加する現象を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。

一方、荷電 π 中間子 (π^\pm) は、約 2.6×10^{-8} 秒という中性 π 中間子 (π^0) に比べて長い寿命を持ち、 π^+ は反ミューオンとミューニュートリノへ、 π^- はミューオンと反ミューニュートリノへと崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.6)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.7)$$

ミューオンは電子とミューニュートリノ、反電子ニュートリノへ、反ミューオンは陽電子と反ミューニュートリノ、電子ニュートリノへと崩壊するが、ミューオンは電離損失が小さく原子核とは極めて弱くしか相互作用を起ささないうえに、約 2.2×10^{-6} 秒という比較的長い寿命を持つ。加えて、特殊相対論効果により寿命が延びて、その殆どが崩壊せずに地表にまで到達する。したがって、高度が低くなるほど空気シャワー中の粒子成分の内ミューオンの割合が大きくなる。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.8)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.9)$$

K 中間子はそれぞれが異なる幾つかの寿命と崩壊パターンを持ち、 π 中間子やミュオン、ニュートリノへと崩壊する。

このように、宇宙線は大気に入射するとともに空気シャワー現象を起こし、生成された粒子のうち寿命の短いものは崩壊し、残った γ 線、電子、ミュオン、核子などの粒子が地表に複数同時に到来する。

1.3 超高エネルギー宇宙線

GZK カットオフを超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線が地球に到来して来ないのかを研究した実験に AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) 実験がある。この実験は日本の山梨県を実験地とし、 100 km^2 地表に配置した 111 台の検出器で宇宙線の空気シャワー粒子を検出したものである。この実験により、 1 km^2 あたりに 100 年に 1 例程度という極めて低い到来頻度ながら、 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線が 2003 年までに 11 例観測され、GZK カットオフを否定する結果となった。図 1.3 に AGASA 実験で観測された超高エネルギー宇宙線のスペクトル図を示す。

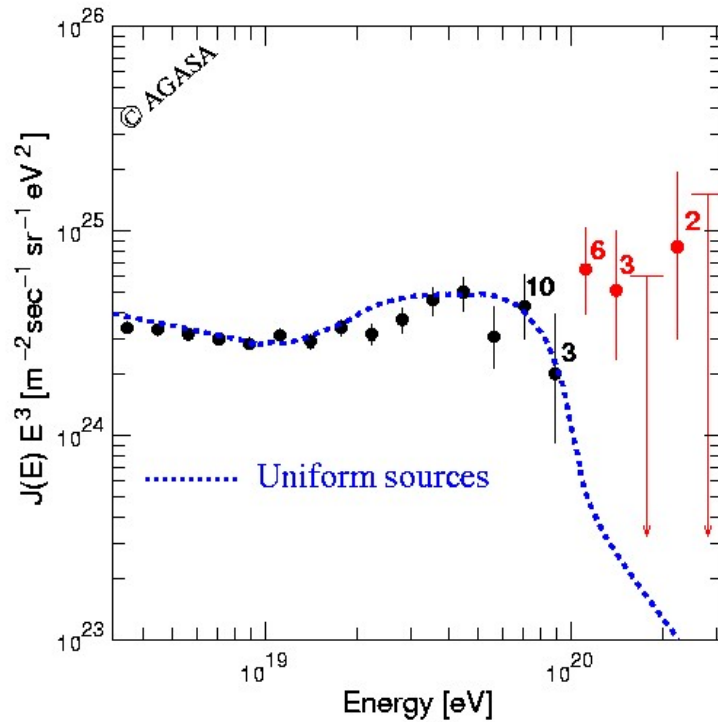


図 1.3 AGASA 実験で観測された宇宙線のスペクトル
(青線が理論予想、赤点が GZK カットオフを超える宇宙線を示す)

しかし、アメリカのユタ州で大気蛍光法によって宇宙線の観測を行っていた HiRes (High Resolution Fly's Eye) 実験は、2004 年に AGASA とは逆に GZK カットオフを肯定するエネルギースペクトルを発表した。

二つの実験の結果は食い違うこととなったが、どちらの実験も統計数が十分でない上に、エネルギー統計誤差が AGASA で 18%、HiRes も 22% 程度あり、どちらの実験が正しい結果を示しているかの結論がつかない状態であった。そこで、この二つの実験結果を受けて、GZK カットオフの有無を明らかにするためにテレスコープ・アレイ実験が始まった。

第2章 テレスコプ・アレイ実験

2.1 テレスコプ・アレイ実験概要

テレスコプ・アレイ (Telescope Array : 以後 TA) 実験とは、AGASA 実験と HiRes 実験の結果を受け、地表検出器 (Surface Detector : 以後 SD) 約 500 台と、大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : 以後 FD) のステーション 3 台の 2 種類の観測装置を用いて宇宙線のハイブリッド観測を行い、超高エネルギー宇宙線の観測するための実験である。図 2.1 にハイブリッド観測の概念図を示す。

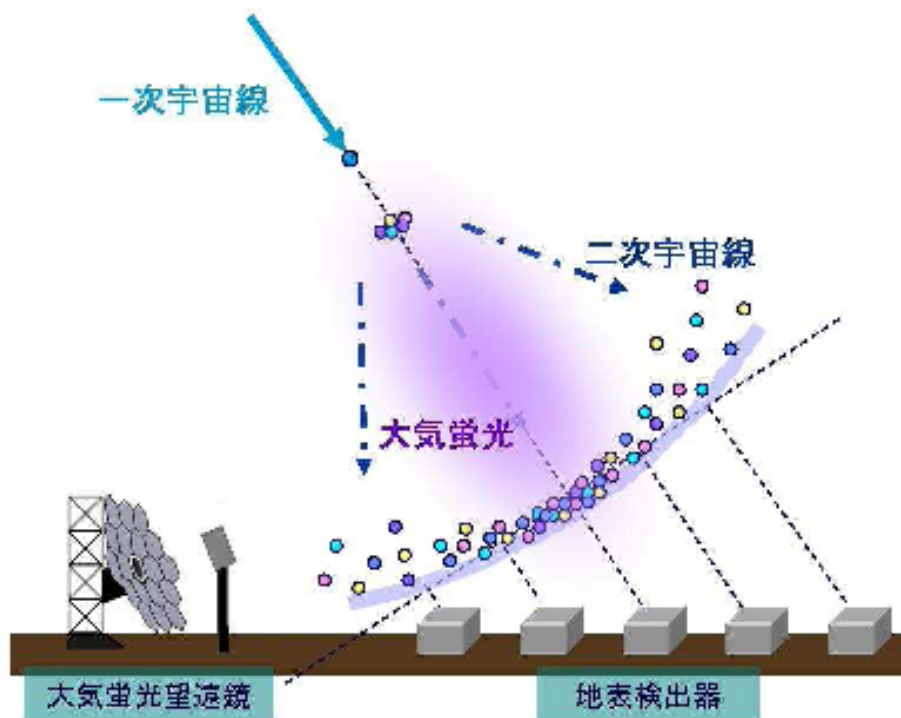


図 2.1 ハイブリッド観測概念図

図 2.1 に示されるように、地表に配置された SD によって宇宙線の二次粒子を直接観測するとともに、FD によって宇宙線が空気シャワーを起こす際に発する微弱な光を観測する。FD を用いた観測は、宇宙線の到来方向やエネルギーを精度良く観測できるが、非常に微弱な光を観測するという性質上、月の出ていない暗夜にしか観測が行えず、観測時間効率は

およそ 10~12%程度である。これに対して、SD による観測は、FD に比較して到来方向やエネルギーの決定精度は若干低下するが、24 時間連続稼働が可能であり、観測時間効率が良い。

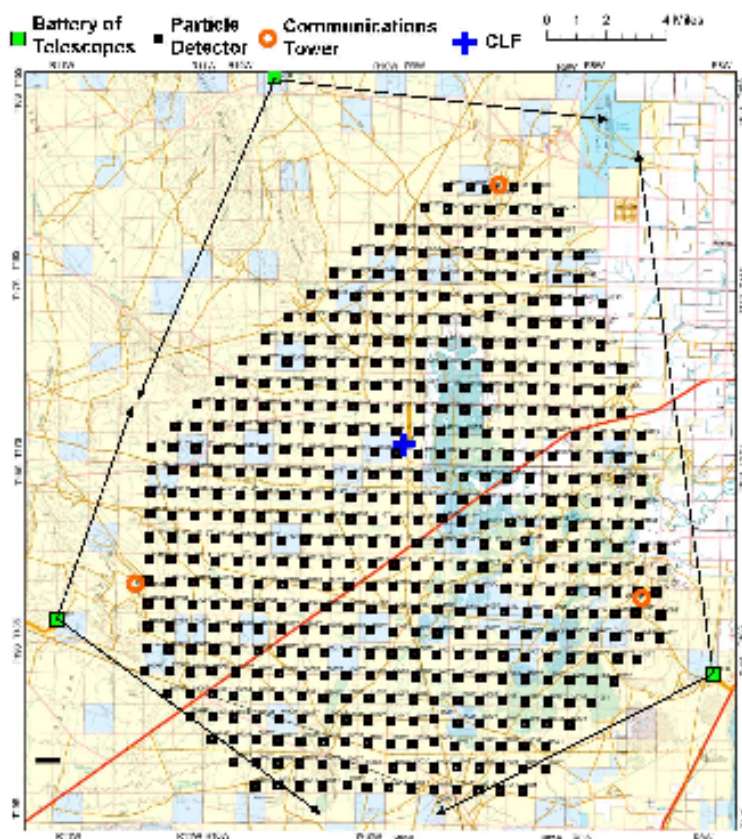


図 2.2 TA 実験装置配置図

TA 実験の実験装置はアメリカのユタ州ミラード郡デルタ市郊外に位置する標高 1400m の砂漠地帯に設置されている。この場所は晴天率が良く、大気が乾燥していて大気透明度が非常に高い。また、街から離れているため人工光が少なく、宇宙線の観測に適している。

図 2.2 は TA 実験における実験装置の配置図である。黒い四角が SD を表し、1.2km 間隔で基盤の目状に設置されている。また、オレンジ色の丸印は SD の通信塔、アレイ中心部にある青の+印は CLF(後述)の位置である。緑の四角は 3 ヶ所の FD ステーションの位置を表している。

2.2 地表検出器 (SD)

SD は、プラスチックシンチレーターを使用することで空気シャワーによって発生する荷電粒子を直接観測する装置である。



図 2.3 地表検出器

SD は、主に荷電粒子が通過すると微弱な光を発するプラスチックシンチレーターと、これによって得られる光を電気信号に変換増幅するための光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube : 以後 PMT) が収められたシンチレーターボックス、電供給用バッテリー及びシステム制御用の電子部品を収めたエレキボックス、通信塔との通信を行うためのワイヤレス LAN アンテナ、GPS アンテナ、ソーラーパネルから構成されている。SD を稼働させるための電力はすべてソーラーパネルによって発電されるので、外部からの電力供給なしで独立に稼働することが可能である。シンチレーターボックスは $230 \times 170 \times 10 [cm^3]$ で、SD の総重量は約 190kg である。

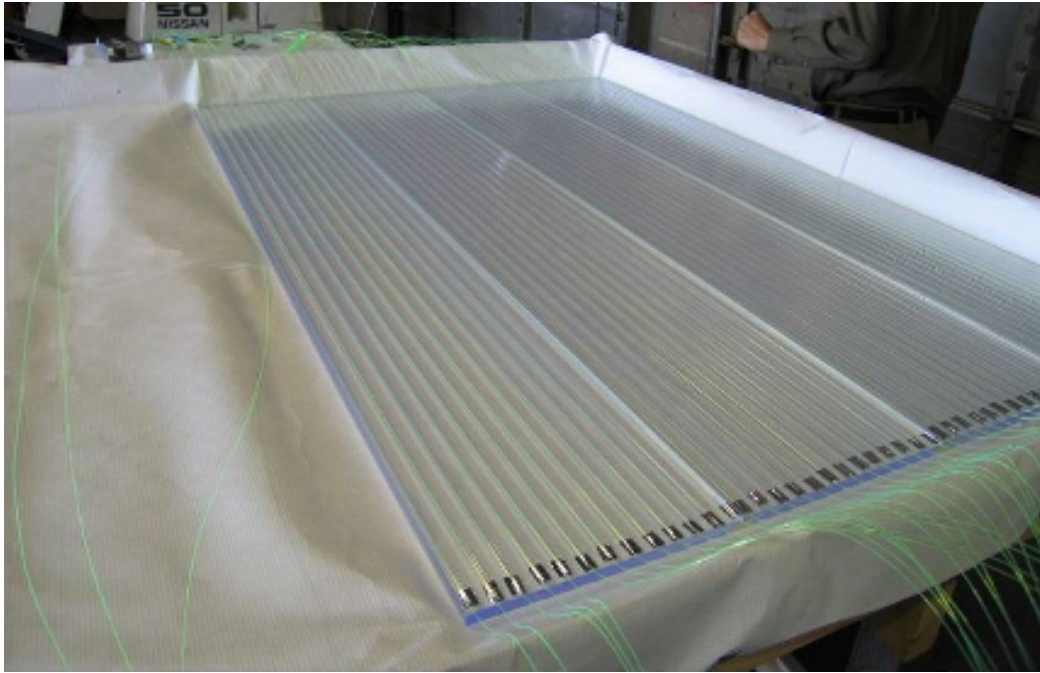


図 2.4 SD に使用されているプラスチックシンチレーター

シンチレーター内を荷電粒子が通過すると、荷電粒子はシンチレーター内の電子を励起させ、微弱な光を発する。この光を波長変換ファイバーで収集し、PMTによって電気信号に変換増幅したものを測定する。各SDの信号はGPSによって時間同期し、デジタル化された電気信号がワイヤレスLANアンテナによって通信塔とデータ交信している。

2.3 大気蛍光望遠鏡 (FD)

FD は、空気シャワーによって生じる大気蛍光を球面鏡で集光し PMT カメラで撮像することで宇宙線を観測する装置である。



図 2.5 FD ステーション(BRM)

FD のステーションは SD アレイを囲むように、Black Rock Mesa (BRM)、Long Ridge (LR)、Middle Drum (MD) の 3 ヶ所に設置されている。

3 ヶ所 FD ステーションの内、MD ステーションは HiRes 実験で使用された望遠鏡 14 台を移設したものである。BRM 及び LR ステーションはこの実験のために新たに設計、製作されたもので、望遠鏡が上下に分けて 6 台ずつ計 12 台設置されており、FD1 台の視野は仰角 15.5 度、方位角 18 度であり、各ステーションの視野は仰角 3~33 度、方位角 108 度である。また、ステーション内にはデータ収集エレクトロニクスと観測制御装置が格納されているコントロールルームとシフト従事者の観測活動室がある。

FD は球面鏡とカメラから構成されている。球面鏡は曲率半径 6.067m、口径 3.3m で、18 枚のセグメントミラーからなる合成鏡である。セグメントミラーは対辺間隔 660mm の

六角形で、厚み 11mm、曲率半径は $6067 \pm 40\text{mm}$ 、Tempax glass 製で表面には陽極酸化処理によって Al_2O_3 がコーティングされている。反射率は 300nm~450nm の波長域で 80% 以上である。

FD1 基の視野は、仰角方向に 15.5° であり、この望遠鏡を二段重ねることによって仰角は上段が $3^\circ \sim 18.5^\circ$ 、下段が $18.5^\circ \sim 33^\circ$ となり、全体で $3^\circ \sim 33^\circ$ をカバーする。カメラには、 16×16 に配置した PMT256 本が使用されている。使用している PMT は浜松ホトニクス製の R9508 であり、1 本で約 $1^\circ \times 1^\circ$ の視野を持つ。焦点面の PMT カメラで結ぶスポットサイズは、ほとんどの視野で半値幅にして 30mm 以下になるように調整されており、これは PMT の大きさ(六角形の幅 61mm)に比べ十分小さい。各 PMT の光電面には BG3 フィルターが取り付けられており、このフィルターによって観測対象となる波長域 300~400nm の大気蛍光だけを通し、それ以外の波長域のバックグラウンド光をカットする。さらに、PMT カメラには 300nm 以降の波長域に対して透過率が 90%以上であるクラレ製のパラグラス-UV00 を用いている。

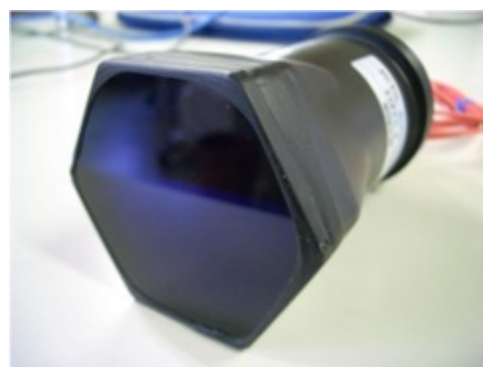


図 2.6 カメラ本体(左)と、BG3 フィルターの取り付けられた PMT(右)

第3章 大気の散乱現象

FDは空気シャワー現象によって発生した大気蛍光を観測している。この際、観測される大気蛍光は大気中を伝播してくるため、宇宙線のエネルギーを推定するにあたって、大気の透明度は非常に大きく影響する。

LIDAR法による大気透明度の測定を説明するにあたり、ここでは大気における光の散乱現象について述べる。

光は大気を伝播するにあたり、大気中に存在している分子やエアロゾル粒子によって吸収・散乱され光の強度は減衰していく。光が、単位面積の底面を持ち高さ dx の媒質を垂直に入射する場合を考える。この媒質内の散乱体1個あたりの吸収・散乱断面積を σ 、散乱体の個数を N とすると、入射光量 I がこの媒質によって散乱する割合 dI は以下の式で表すことができる。

$$\frac{dI}{I} = -I\sigma N dx \quad (3.1)$$

(3.1)式を解くと

$$I = I_0 \exp(-\sigma N x) \quad (3.2)$$

となり、これをランバート・ベールの法則という。ここで、 I_0 は初期光量である。また、 $N\sigma$ は同じ光の波長が入射した場合において媒質固有の値であるため、 $N\sigma = \alpha$ とおくと

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3.3)$$

と表せる。ここで、 α は光の減衰率を表した値で、消散係数と呼ぶ。大気中の消散係数 α は大気分子による散乱成分とエアロゾル粒子による散乱成分の2成分によって決定される。エアロゾル粒子とは、大気中に浮遊している水滴や塵などの微粒子のことであり、分子による散乱をRayleigh散乱、エアロゾル粒子による散乱をエアロゾル散乱と呼ぶ。

大気中の光の伝播がランバート・ベールの法則に従うものとする、大気中の消散係数

は大気の透明度を示す値とであると言える。このことより、FDによる大気蛍光の観測時においての大気の消散係数を精度よく測定することが重要である。

3.1 Rayleigh 散乱

Rayleigh 散乱とは、光の波長に対して $1/10$ 以下の非常に小さい粒子または分子による光の散乱で、散乱の前後において光の波長が変わらない弾性散乱である。大気中にはエアロゾル粒子が多数存在するため、可視・赤外領域の散乱はエアロゾルによるエアロゾル散乱が支配的であるが、エアロゾル散乱の散乱係数は近似的に波長に反比例するのに対し、Rayleigh 散乱は波長の 4 乗に反比例する。このため、紫外領域及びエアロゾル粒子の存在が希薄になる対流圏中層域以上では Rayleigh 散乱の寄与も大きい。

Rayleigh 散乱は透明な液体や固体中でも起こるが、典型的な現象として、大気分子による散乱が挙げられる。大気分子一個あたりの Rayleigh 散乱による散乱断面積は入射場によって誘導された電気双極子、磁力双極子の放射であるとする、以下の式で表すことができる。

$$\sigma(\lambda) = \frac{24\pi^3(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N^2 (n^2 + 2)^2} \cdot \left(\frac{6 + 3\rho}{6 - 7\rho} \right) \quad (3.4)$$

ここで、 N はある温度と気圧における大気分子の数密度、 n は同じ温度・気圧の条件下における波長 λ の光の屈折率である。 ρ は偏光解消度を表し、波長によって変化する値である。

この散乱断面積を温度 15°C 、1 気圧の条件で値を求めると状態方程式より

$$N_0 = 2.54 \times 10^{25} [\text{個}/m^3] \quad (3.5)$$

となる。また、同じ条件下における波長 λ ($\lambda > 0.23 \mu\text{m}$) の屈折率は

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = \frac{5791817}{238.0185 - \left(\frac{1}{\lambda[\mu\text{m}]}\right)^2} - \frac{167909}{57.362 - \left(\frac{1}{\lambda[\mu\text{m}]}\right)^2} \quad (3.6)$$

と近似できる。よって入射波長 355nm における屈折率は

$$n_0 = 1.000286 \quad (3.7)$$

と求められる。偏光解消度 ρ は入射波長 355nm において $\rho = 3.010 \times 10^{-2}$ であるから、

$$\sigma = 2.76 \times 10^{-30} [m^2] \quad (3.8)$$

である。ここで、ある気圧 P と温度 T における分子数密度は理想気体の状態方程式から、

$$N = N_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (3.9)$$

となる。

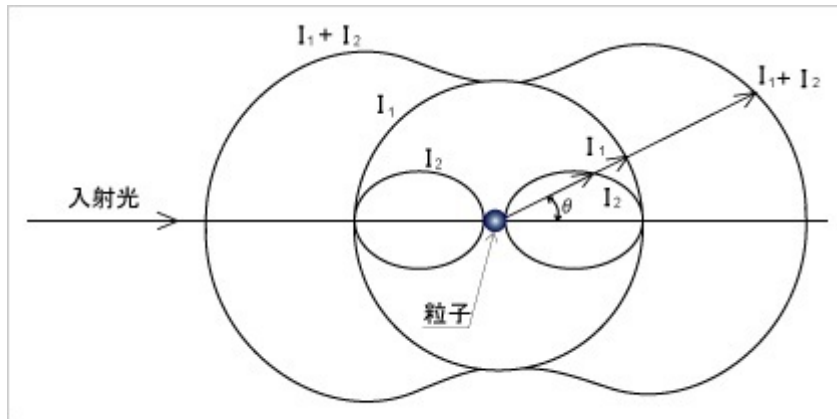
以上より、ある高さにおける Rayleigh 散乱の消散係数 α は、散乱断面積 σ の式とその高さにおける分子密度の式より以下のように求めることが出来る。

$$\alpha = N\sigma = N_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \times 2.76 \times 10^{-30} \quad (3.10)$$

また、入射光が一様な偏光面を持つ円偏光の場合、Rayleigh 散乱の微分断面積は、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 + \cos^2 \theta \quad (3.11)$$

となり、Rayleigh 散乱は図 3.1 のように前後方に対称散乱を起こす。



<http://www.nikkiso.co.jp/> より引用

図 3.1 Rayleigh 散乱における散乱強度分布図

3.2 Mie 散乱

Mie 散乱とは、入射光の波長程度以上の大きさの球状の粒子による散乱でかつ弾性散乱のことを言う。大気中のエアロゾル粒子は球形ではないが、エアロゾル粒子による散乱現象はこの Mie 散乱として近似的に求めることができる。

Mie 散乱を起こす粒子は入射光の波長以上の大きさを持つため、Rayleigh 散乱のように単一の双極子放射として扱えなくなり、粒子を双極子の集まりと捉えて双極子どうしの相互干渉効果も考慮しなければならず散乱の振る舞いは非常に複雑になる。G.Mie が導いた厳密解によると、単一強度の偏光していない自然光の入射があった時、散乱粒子から距離 R 、散乱角 θ における散乱光強度 I_θ は式(3.12)のようになる。

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} (i_1 + i_2) \quad (3.12)$$

ここで、 λ は波長。 i_1 、 i_2 はそれぞれ観測面に対しての垂直及び水平方向の偏光成分に対する相互作用係数であり、波長、散乱体の大きさ、媒質の屈折率によって定まる。

散乱体の大きさは粒径パラメータ β で定義される。 a は散乱体の半径であり、粒径パラメータは、

$$\beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (3.13)$$

となる。この粒径パラメータ α により i_1 、 i_2 が変化する。Mie 散乱による散乱パターンは図 3.2、図 3.3、図 3.4 のようになり、粒径パラメータ β が大きくなるほど前方

散乱の方が後方散乱に比べると強く発生する。Mie 散乱は粒径パラメータ、つまりエアロゾルの種類が違うとその様相は異なる。

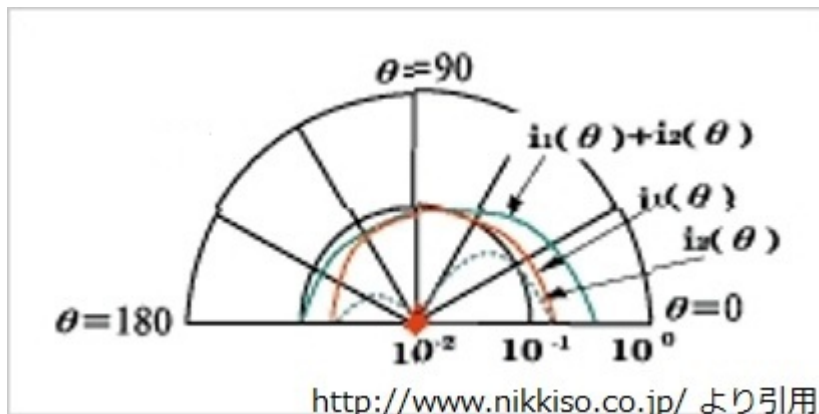


図 3.2 Mie 散乱の散乱光強度の分布の概念図 ($\beta = 1$)

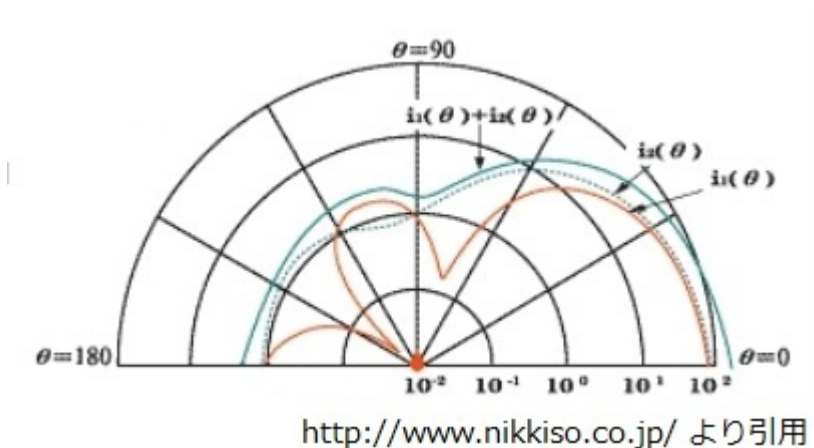


図 3.3 Mie 散乱の散乱光強度の分布の概念図 ($\beta = 3$)

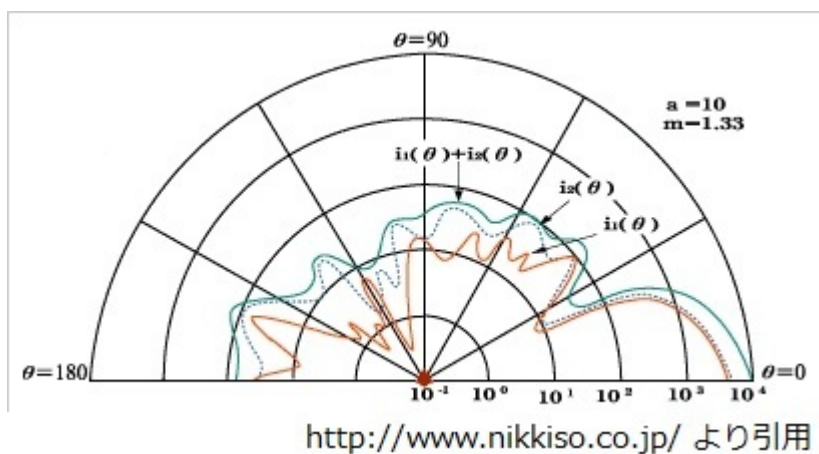


図 3.4 Mie 散乱の散乱光強度の分布の概念図 ($\beta = 10$)

このため、エアロゾルによる Mie 散乱は日時や場所による変化が大きく、実際に測定により求める必要がある。

Mie 散乱の消散係数は計算で求めることはできないが、大気の消散係数の主成分は、Rayleigh 散乱と Mie 散乱であるため、観測による全消散係数の値から Rayleigh 散乱の成分を差し引くことで、Mie 散乱による消散係数を知ることができる。

第4章 大気の測定装置

第2章でも述べた通り、FDは空気シャワーによって発生し大気を伝搬してくる微弱な大気蛍光を観測するため、大気蛍光を観測する上で大気透明度の測定による較正はとても重要である。

TA実験では大気の状態を測定する装置として、LIDAR、CLF、IRカメラを使用している。また、気温・気圧の情報を得るため、実験地近くのラジオゾンデのデータを利用している。

4.1 LIDAR システム

LIDAR(Light Detection And Ranging)法は環境分野で用いられている手法であり、レーザーを光源として大気の状態を測定する方法である。図3.1にLIDAR法の概念図を示す。

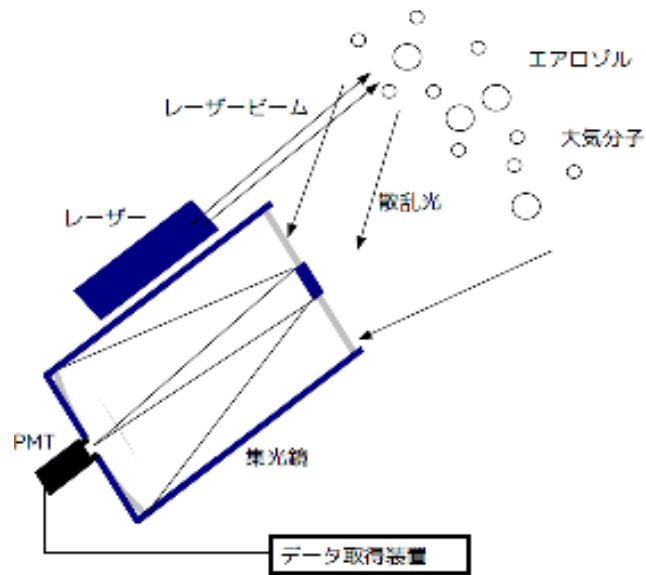


図 4.1 LIDAR 法概念図

TA実験では、LIDARシステムはBRMのFDステーションからおよそ100m離れた場所に位置している。LIDARシステムは図4.2に示すドームの中に格納されており我々はこのドームをLIDARドームと呼んでいる。



図 4.2 LIDAR ドームの概観

図 4.2 のように LIDAR ドームには開閉式のスリットがついており、スリットは方位角方向に 360 度回転する。

使用しているレーザーは、New Wave Research社製の空冷Nd:YAGレーザーOrionである。このレーザーは出力が最大で4mJ、波長は355nm(3倍高調波)である。このレーザーの仕様を表3.1に示す。

表4.1 空冷式Nd:YAGレーザー(Orion)仕様

パルス幅	4~6ns
ビーム径	2.5mm
ビーム広がり	3mrad
最大射出出力	4mJ
パルスレート	1Hz
最大パルスレート	5Hz
ジッター	±1nm

射出されたレーザーは直線偏光のため $\lambda/4$ 水晶波長板により円偏光にした後、ビームスプリッターを用いてビームのエネルギーの8%を反射、エナジーセンサーに入射させ、その信号をADコンバータに入力しエネルギーを測定する。ビームスプリッターを透過したレーザーは大気中に射出され、大気中の散乱体による後方散乱光をBG-3フィルタを通して光電子増倍管に入射させることにより、微弱な光を電気信号に変換する。この光によりPMTか

ら検出された出力信号波形はデジタルオシロスコープで測定され、その波形データはPCに記録される。

LIDAR システムの受光部には Meade 社製経緯台つき望遠鏡 LX200GPS-30 を改良したものを使用しており、望遠鏡横には光学系を乗せるための台がついている。副鏡の補正版は紫外光透過率 80%の亚克力板(UVT000)に代わっている。散乱光の検出器として PMT が CCD カメラの代わりに取り付けられており、PMT には BG-3 フィルターが取り付けられている。使用している PMT は浜松ホトニクス製 光電子増倍管 R3479 である。図 4.3 は LIDAR ドーム内の望遠鏡と望遠鏡に取り付けられた PMT、表 4.2 は望遠鏡 LX200GPS-30 の仕様、表 4.3 は PMT(R3479)の仕様である。

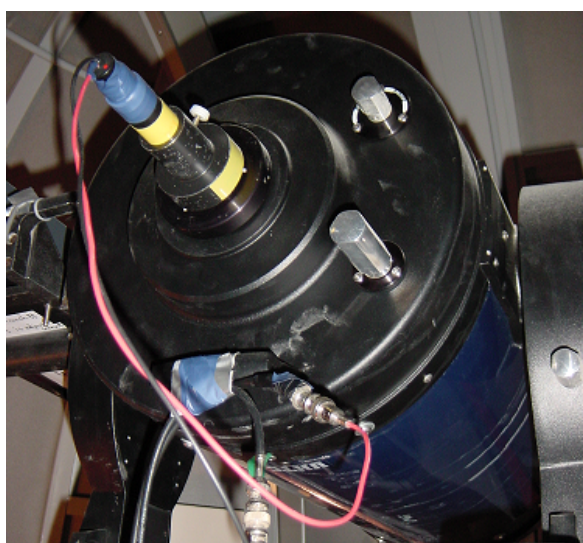


図 4.3 LIDAR システムの望遠鏡と PMT

表 4.2 LX200GPS-30 仕様

光学系	シュミットカセグレン式
有効径	305mm
焦点距離	3048mm
口径比	F10
副鏡遮蔽率	11.1%
分解能	0.38 秒
集光力	1836 倍
極限等級	15.0 等
最短合焦距離	23m

表 4.3 PMT(R3479)仕様

種類	ヘッドオン型
管径	φ 19 mm
受光面サイズ	φ 15 mm
感度波長 (Short,Long,Peak)	185nm , 650nm , 420nm
分光感度特性 カーブ No.	400U
光電面 種類	バイアルカリ
窓材質	UV ガラス
ダイノード	ラインフォーカス 8 段
[絶対最大定格] 陽極－陰極間電圧	1800 V
[絶対最大定格] 平均陽極電流	0.1 mA
陽極－陰極間 印加電圧	1700 V
[陰極特性] ルーメン感度 Min. (Typ.)	70 uA/lm (115 uA/lm)
[陰極特性] 青感度指数 (CS 5-58) Typ.	11
[陰極特性] 放射感度 Typ.	88 mA/W
[陽極特性] ルーメン感度 Min. (Typ.)	100 A/lm (200 A/lm)
[陽極特性] 放射感度 Typ.	1.5E+05 A/W
[陽極特性] ゲイン Typ.	1.70E+06
[陽極特性] 暗電流(30 分後) Typ. (Max.)	10 nA (300 nA)
[時間特性] 上昇時間 (Tr) Typ.	1.3 ns
[時間特性] 走行時間 (T.T.) Typ.	14 ns

LIDAR では、Klett's 法と Slope 法という 2 種類の解析手法を組み合わせることで各高度でのエアロゾル散乱の詳細を知ることができる。しかしその一方で、LIDAR で使用しているレーザーは空冷で、レーザーを 1Hz で射出するため、長時間の観測時間が必要となる。そのため、現在 TA 実験ではこの LIDAR システムによる大気透明度の測定を FD 観測の開始前と終了時に行っており、FD 観測中には行っていない。

3.2 CLF

CLF とは中央レーザー装置(Central Laser Facility)のことで、レーザー光を利用して 3ヶ所の FD のキャリブレーションを大気の状態の測定も含めて行うものである。

CLF は 3 ヲ所ある FD ステーションから等距離の位置に設置されており(図 2.3 の青い+印)、そこから垂直に紫外線(355nm)レーザーを射出し、その側方散乱光を 3 ヲ所の FD ステーションで観測することによって大気の見通しを含めた測定を行っている。図 4.4 に CLF の概観を示す。また、図 4.5 は CLF の観測の模式図である。



図 4.4 CLF の概観

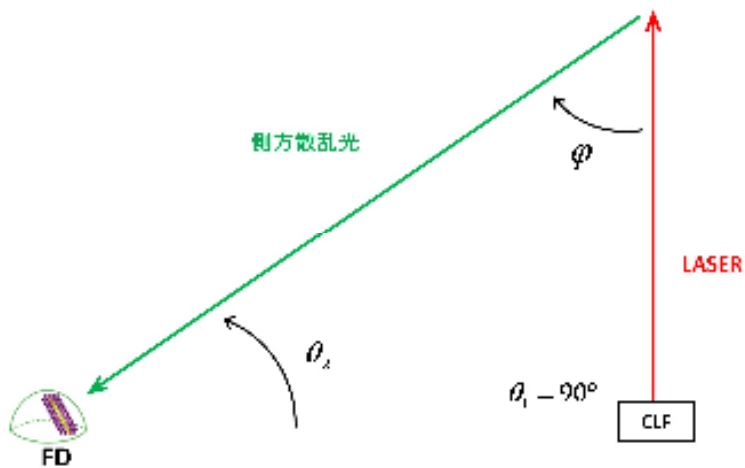


図 4.5 FD による側方散乱光の観測

CLF から射出されるレーザーは側方散乱を 3 方向から観測されているため、円偏光であることが望ましく、射出されるレーザーのエネルギーを計測する必要がある。また荒野に設置されたコンテナにシステムの全てを構築しているため、FD ステーションからの遠隔操作は絶対条件であり、コンテナは防塵性能に優れてはいないため介する光学系は最小限に留める必要がある。図 4.6 に示されているように、CLF の光学系は反射鏡、ハーモニックセパレータ、ビームエキスパンダ、ビームスプリッタ、 $\lambda/4$ 偏光板で構成されている。CLF で使用しているレーザーは 355nm(3 倍高調波)の水冷式 Nd:YAG レーザーであり、射出されたレーザーは 2 種のハーモニックセパレータによって 1 倍及び 2 倍高調波を取り除かれ 3

倍高調波のみとなる。その後、ビームエキスパンダでレーザー径を 5 倍に拡張、 $\lambda/4$ 偏光板で円偏光にし、ビームスプリッターで相対値測定用レーザーと光路の分別を経て、最終的に反射鏡で鉛直に跳ね上げられて大気中に射出される。また射出されるレーザーの絶対値測定用プローブは観測時には光路から取り除かれており、レーザーの絶対値の計測時のみ光路上に移動する。表 4.4 に CLF で使用している Big Sky Laser Technologies 社製：ULTRA CFR、Nd:YAG レーザーの仕様を示す。また、図 3.7 に CLF 内部の光学系の概観を示す。

表 4.4 水冷式 Nd:YAG レーザー(ULTRA CFR) 仕様

パルス幅	6~8ns
ビーム径	3.0mm
最大射出出力:1064nm(1 倍波)	100mJ
パルスレート	0~20Hz
最大パルスレート	30Hz
ジッター	±7nm

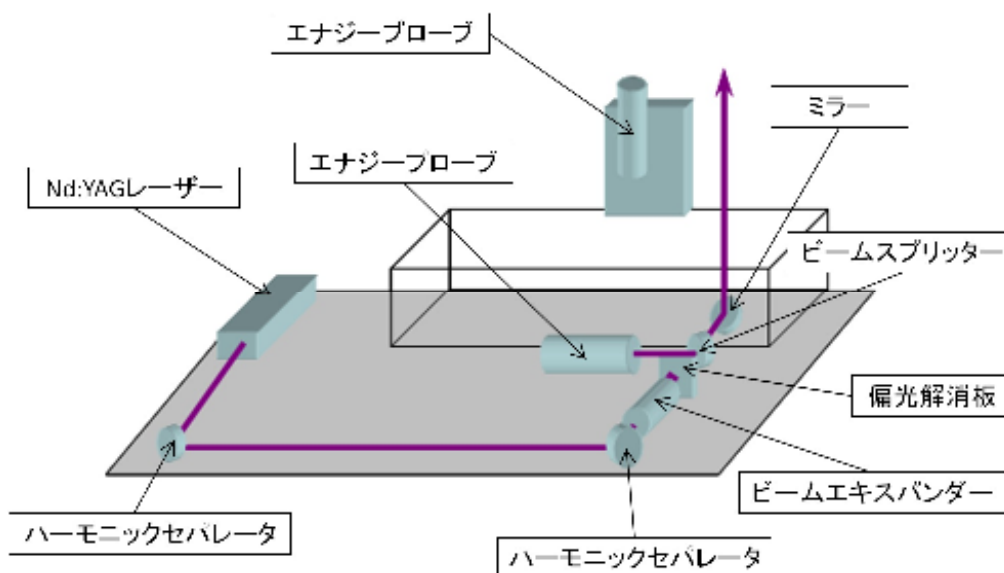


図 4.6 CLF の光学系配置図

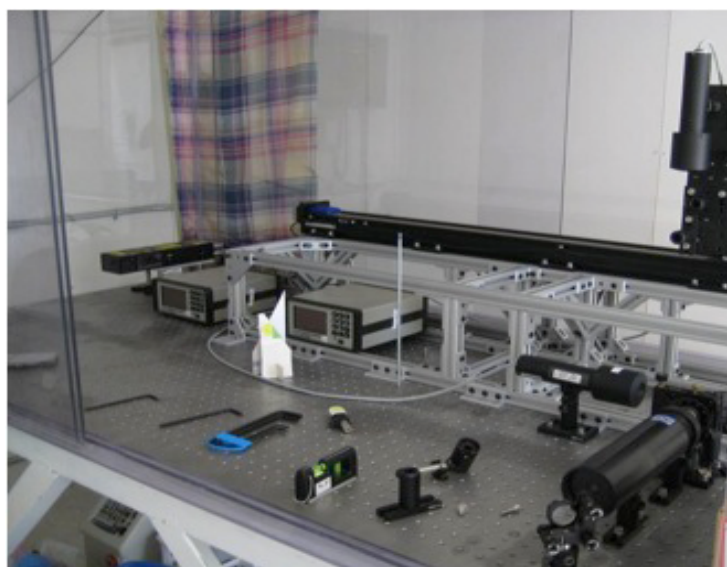


図 4.7 CLF 内部の光学系

CLF のレーザーは水冷式のレーザーであり、冬期におけるコンテナ内の温度低下は即レーザー冷媒の凍結による故障につながる。このため、CLF は安定な自動温度管理及び発電機の遠隔制御の必要性が高い。そのため、CLF コンテナ内部は1分刻みで内部温度を測定し、CLF 内のパソコンに記録している。この情報は5分毎に観測員の活動拠点であり、TA実験のローカルネットワークで接続されている Cosmic Ray Center (CRC) 内の発電機制御用パソコンに送信される。発電機制御用パソコンは CLF コンテナ内部の温度が低下の場合、発電機を遠隔起動し保温用ヒーターを作動させる。また、CLF コンテナ内部の温度が十分に高くなると同様のプロセスでヒーター、発電機は自動停止することになっている。

CLF の制御管理用のパソコンには小型のボードパソコンである Technologic 製の TS-5500 が採用されている(図 4.8)。このボードパソコンはデータの保存にコンパクトフラッシュメモリーを使用しており、消費電力が 5W と非常に小さい。オペレーションシステムには LINUX-OS が採用されており、外部デバイス制御インターフェイスには USB ポート×2、9pin シリアルポート×3、25pin パラレルポート×1 を持ち、CLF ではさらに 9pin シリアルポート×4 の PC/104 接続の拡張ボードを 2 枚取り付けてシリアルポートを 8 つ追加している。

制御用 PC の配下にはレーザー、エネルギーセンサー×2、ステッピングモーター(vxm)、リレー回路内蔵の電力マルチタップがあり、さらに PC/104 接続の GPS-Timing モジュール(GPSy-II)が取り付けられている。これによって、レーザー射出用のトリガーパルスの生成と射出時間の記録を行っている。レーザー、エネルギーセンサー、ステッピングモーター、レーザー射出口は電力的には電力マルチタップの下流に位置し、これを制御することで各デバイスへの電力供給を制御している。



図 4.8 ボードパソコン TS-5500

CLF は水冷レーザーを使用することによってレーザーを高頻度で射出することができ、短時間で観測が可能である。そのため、CLF では FD 観測中 30 分毎にレーザーを射出し観測を行っている。しかし、エアロゾル散乱の含まれる高度の解析にはエアロゾル散乱の散乱微分断面積が必要となるため、CLF では高高度での散乱光のみが解析可能となっている。

第5章 CLF へ導入した LIDAR システム

第4章で述べた通り、TA 実験では現在 BRM の FD ステーションの北東 100m に設置されている LIDAR システムでエアロゾルの透明度を測定している。この LIDAR システムはエアロゾル散乱の高度分布の詳細を知ることができるが、使用しているレーザーが空冷レーザーであるためにレーザーを高頻度で射出することができず、長時間の観測時間が必要となる。その結果現状では FD 観測の前後一回ずつしか観測を行っておらず測定頻度が低い。そのため、短時間での大気の変化に対応できない。一方、3ヶ所の FD ステーションの中央に位置してレーザーを射出し、FD 観測中 30 分毎に観測を行っている CLF に使用されているレーザーは、水冷レーザーであるためレーザーを高頻度で射出することができ、短時間で観測が可能である。しかし、CLF では LIDAR のようにエアロゾル散乱の高度分布を詳しく知ることはできず、高高度での散乱光のみが解析可能である。

そこで、CLF に LIDAR システムの受光デバイスを設置することで、CLF から射出されているレーザー光を光源とした LIDAR システムを構築する LIDAR@CLF が考案された。LIDAR システムの高度分解能と CLF の時間分解能を持ち合わせた観測が可能となり、現行の LIDAR システムで得られたエアロゾル散乱による消散係数の高度分布との比較を行う事で、エアロゾル散乱の消散係数の高度分布が水平方向に一様であるという仮定の検証も可能となる。

図 5.1、図 5.2 は LIDAR@CLF の受光デバイス部分の全体図である。また、図 5.3 は CLF 及び LIDAR@CLF のデバイス接続図であり、黒字部分が既存の CLF デバイス、赤字部分が LIDAR システムのために新たに追加した部分である。図 5.1 及び図 5.2 で示した LIDAR@CLF の受光デバイス部は図 5.3 の青枠部分に当たる。

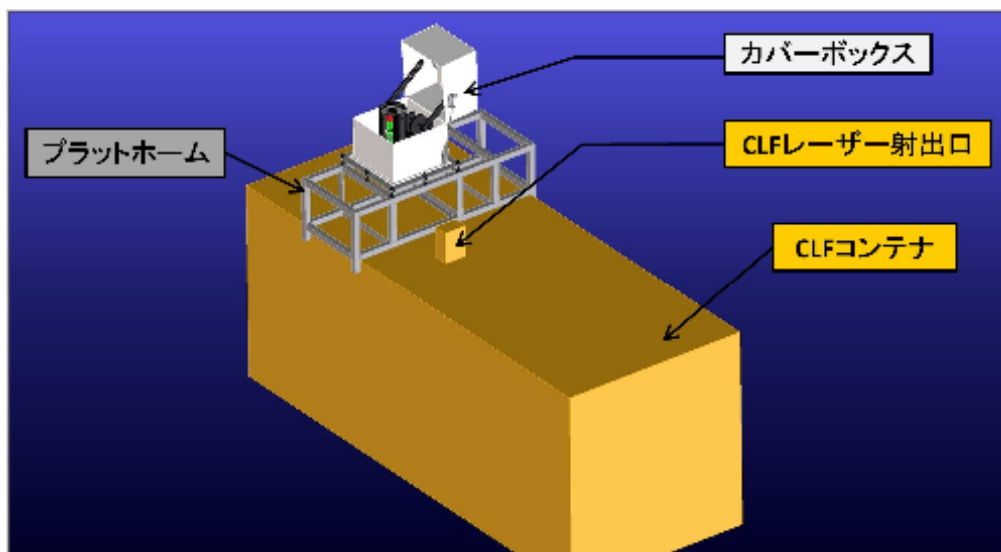


図 5.1 全体配置図

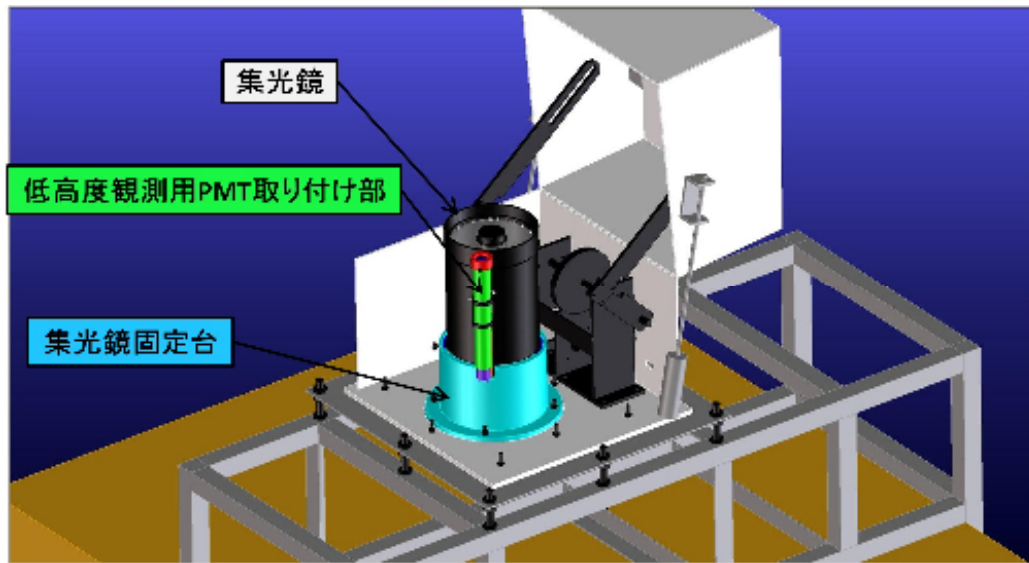


図 5.2 カバーボックス内配置図

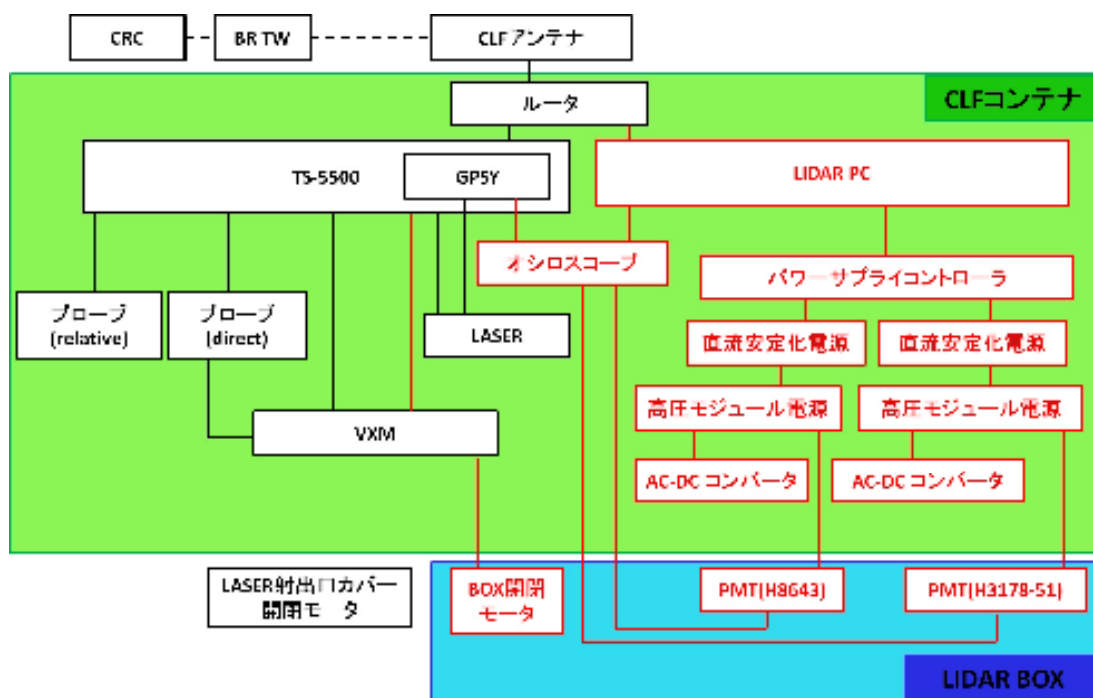


図 5.3 CLF 及び LIDAR@CLF デバイス接続図

新たに導入する LIDAR システムの受光デバイス部は、CLF から放たれたレーザーの散乱光を受光する PMT 及び集光鏡、PMT 等の受光部を収めるためのカバーボックスと、カ

カバーボックスを CLF コンテナ上に設置するためのプラットホームからなる。カバーボックスは、プラットホームの上にボルトおよびナットで固定される。

ここからはこの LIDAR システムの受光デバイス部の詳細な設計について述べていく。

5.1 プラットホーム

架台とプレートからなり、LIDAR 受光デバイスのプラットホームとなる。CLF のコンテナの上に設置され、上にはカバーボックスが設置される。

カバーボックスの CLF コンテナへの設置と、カバーボックス内に収められた受光デバイスのレーザー光と受光軸の調整を担う部分である。

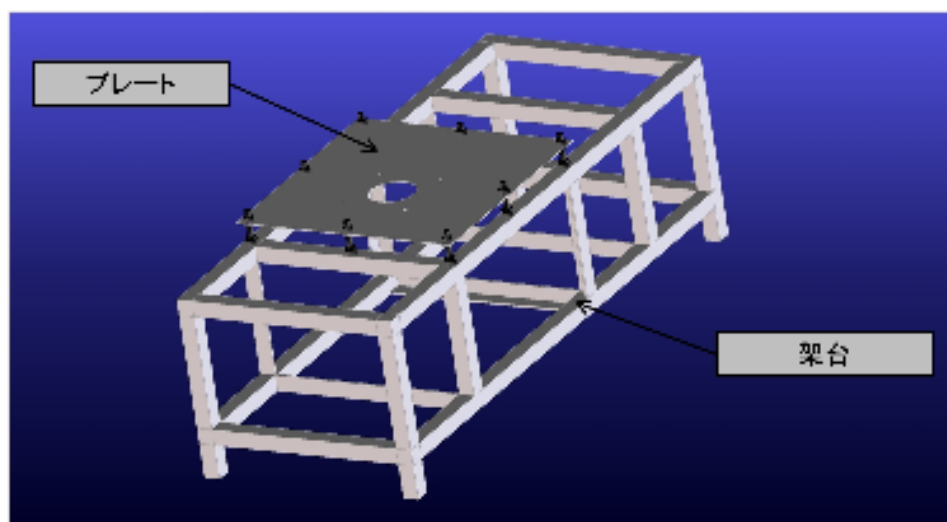


図 5.4 プラットホーム(設計予想図)



図 5.5 プラットホーム

5.1.1 架台

集光鏡内に取り付けられた PMT を外から取り外し等の作業を行えるよう、高さを 50cm としている。

CLF のコンテナ上に取り付けられるので、コンテナの幅に合わせて、両端の鋼材間の長さは 2400mm とした。また、架台上に取り付けられるカバーボックスのサイズを考慮し、架台の幅は 1000mm とした。

設置されるカバーボックス等の重さを支えるため、枠組みとなる部分には角形鋼管を用いる。また、CLF コンテナの強度は未知であり、コンテナへの負担を考慮すると設置される装置は軽量であることが望ましい。そのため、架台の枠組み以外の部分には等辺山形鋼を使用する。架台の形状及び角形鋼管と等辺山形鋼の使用部分を図 5.5 に示す。

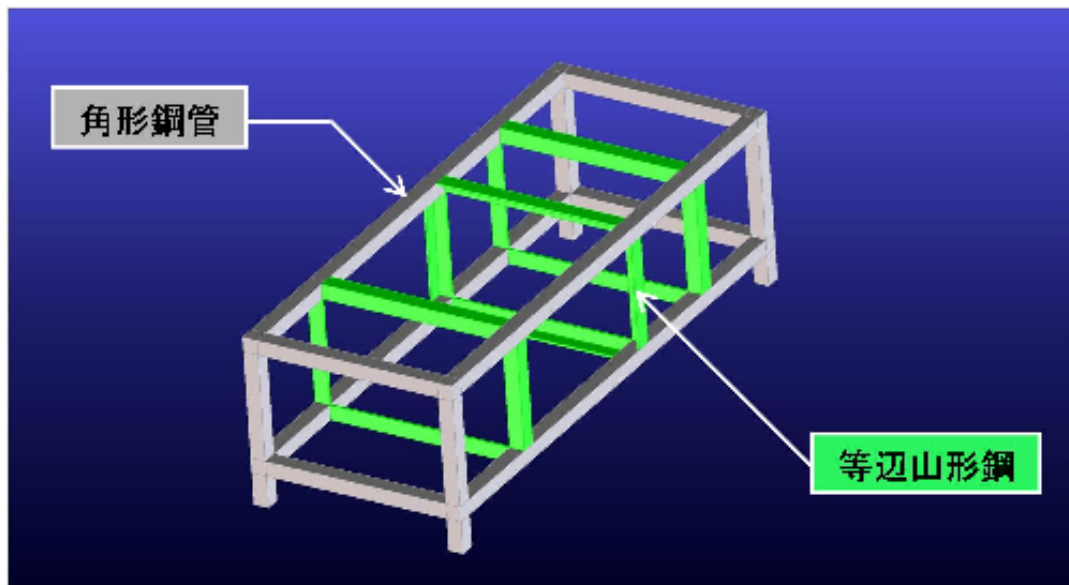


図 5.6 架台

プレートの取り付け位置はコンテナのレーザー射出部とカバーボックス内の集光鏡とが近くなるように設計されており、プレートを取り付ける位置には取り付け用のボルトが通るように穴を8箇所開ける。プレートに取り付けに使用するボルトは M12 規格のものだが、現地入手しやすいウィット規格のボルトにも対応するため、開ける穴のサイズは M12 ボルトに近い 1/2inch サイズにも対応可能な $\phi 0.53\text{inch}$ となっている。

プレート上に設置されるカバーボックス及びカバーボックス内の受光デバイスによる荷重によって、架台はたわみを起こす。設計上、このたわみがある程度知る必要があるため、カバーボックス及び受光デバイスの質量を 200kg と仮定し CAE によるたわみのシミュレーションを行った。使用ソフトは SolidWorks 2009 x64 Edition SP3.0 である。図 5.6 にシミュレーションによって得られた図を示す。

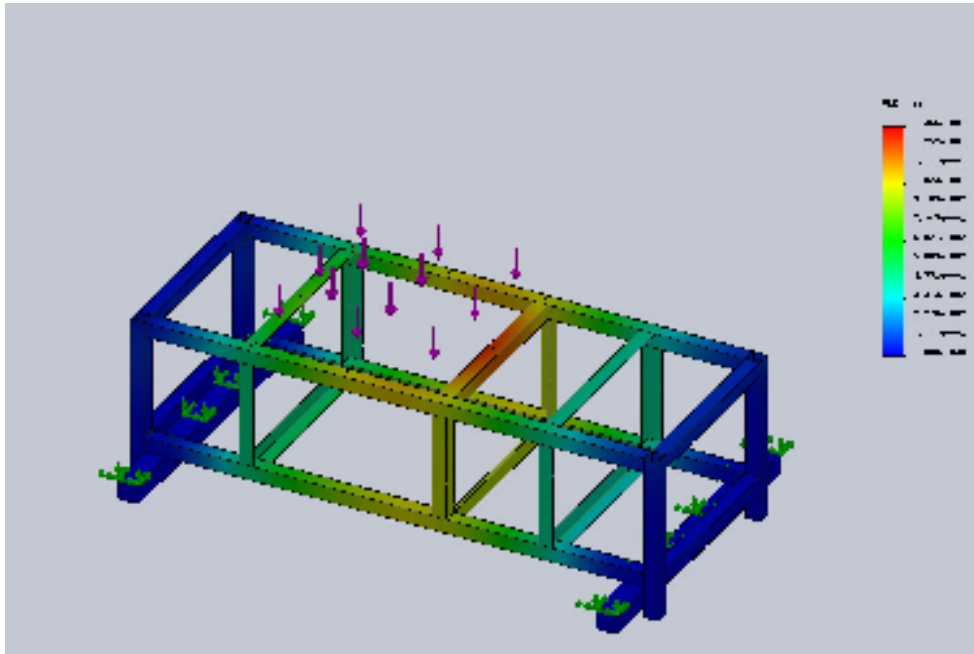


図 5.7 架台のたわみの CAE シミュレーション

5.1.2 プレート

ボルトとナットを利用し、架台の上に取り付けられるプレート。このプレートの角度を変えることで、受光デバイスのレーザー光と受光軸の調整を行う。

プレートのサイズは、プレート上に設置されるカバーボックスのサイズ(約 787mm×787mm)と、ボルトによる架台への取り付けを考慮し 1000mm×1000mm となっている。

プレートの周囲には架台への取り付けの為、 $\phi 0.53\text{inch}$ の穴を 8 箇所開ける。また、集光鏡に取り付けられた PMT の取り外しのための穴を開ける必要がある。人の手が入り、且つ簡単な作業ができる径を考え、 $\phi 150\text{mm}$ とした。さらに、集光鏡固定台及びカバーボックスを固定するための $\phi 0.53\text{inch}$ 穴 4 つを、取り付け位置に対応した箇所空ける。

カバーボックスを取り付けた際に、カバーボックス及びその内部に取り付けられた装置による過重によって、プレートはたわむことが考えられる。このたわみが実用上問題ない値になるようプレートの厚さを設計する。

プレートの一部をはりとして考え、近似的にたわみを算出する。

プレートを支えるボルトのうち、左右 3 本ずつの 6 本を考える。プレートの上に取り付けられるカバーボックスの重さを 200kg とし、荷重がプレート全面に様に分布すると仮定すると、左右のボルトが 100kg ずつの重さを支えることになる。

次に、3 本のボルトに対する荷重分布を考える。プレート上の一遍あたりのボルト 3 本 (A,B,C とする) に対して、プレート上に取り付けられるカバーボックスによって等分布荷重 w がかかる。(図 5.8)

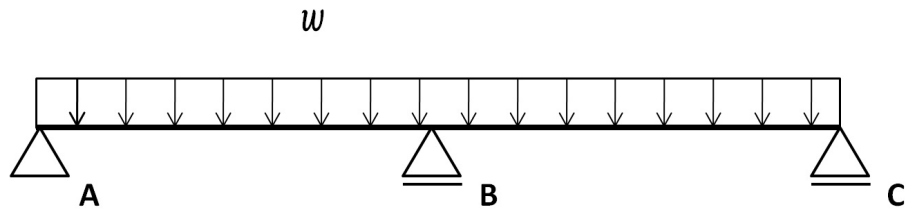


図 5.8 各ボルトにおける荷重分布のためのモデル

ここで、

$$w = 100 \times 9.8 = 980 [\text{N}] \quad (5.1)$$

3本のボルトに対してかかる荷重 980N を等分布荷重として考え、それぞれの支点反力 R_A, R_B, R_C を求めると

$$R_B = \frac{5}{4}wl \quad (5.2)$$

$$R_A = R_C = \frac{3}{8}wl \quad (5.3)$$

となり、この関係から、3本のボルトにかかる荷重の比を 3:10:3 と考える。

ここで、もっとも荷重のかかる中央部分に対してのたわみを考える。カバーボックスとプレートは固定され離れないものと仮定すると、たわみの最大点はカバーボックスの端に位置することとなる。ボルトからカバーボックスまでの距離 106.5mm を $l/2$ とした長さ l でスパン中央に集中荷重 P を受ける両端固定でのはりを考え、近似的にたわみを算出する。(図 5.9)

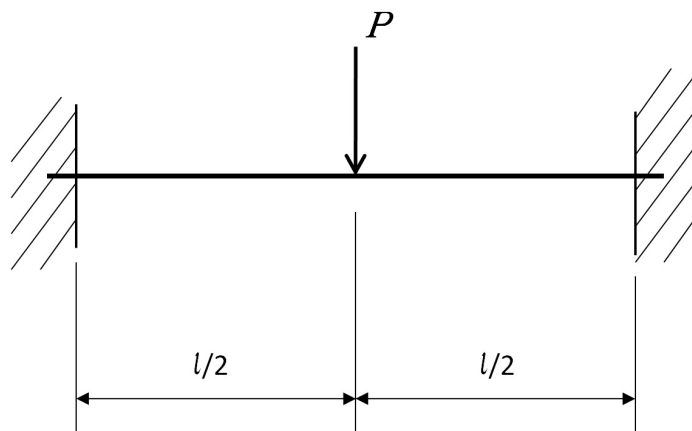


図 5.9 たわみ計算のためのモデル

980N の荷重が 3:10:3 の割合でかかっていることから、荷重 P は

$$P = 980 \times \frac{10}{16} = 612.5[N] \quad (5.4)$$

となる。ここで、

$$\frac{l}{2} = 106.5[mm] \quad (5.5)$$

このとき、このはりの最大たわみ v_{\max} は

$$v_{\max} = \frac{Pl^3}{192EI} \quad (5.6)$$

で求められる。ここで、 I は断面二次モーメント、 E は材料のヤング率である、プレート厚を 5mm とすると、それぞれ

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{256 \times 10^{-3} \times (5 \times 10^{-3})^3}{12} = 2.67 \times 10^{-9}[m^4] \quad (5.7)$$

$$E = 205 \times 10^9[Pa] \quad (5.8)$$

である。

これをもとに、たわみを計算すると、

$$v_{\max} = 5.63 \times 10^{-5}[m] \quad (5.9)$$

となり、設計上無視して問題ない値であると言えることから、プレートの厚みを 5mm とした。

プレートは、周囲に空けた 8 箇所の穴にボルトを通し、ナットで架台に締結される。各ナットの高さを調整することでプレートに角度をつけ、集光鏡の角度を垂直に調節する。

今回、プレートで調節すべき角度は最大で約 2 度程度と考え、これだけの角度を調節するために十分なボルトの長さとして、首下長さ 250mm のものを使用する。

締結に使用するボルトとナットは雨晒しになるため、材質はステンレスのものを使用する。ステンレスの中でも比較的耐食性の高いオーステナイト系のステンレス材の中で、汎用性が高く最も広く利用されている SUS304 を使用する。

架台側を押さえるナット 8 本により、プレートとカバーボックスによる加重を支えることになる。

プレートは $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.005\text{m}$ の鉄板である。鉄の比重 7.85 をもとに、その重量 M_p を計算すると、

$$M_p = 1 \times 1 \times 0.005 \times 1000 \times 7.85 = 39.25[\text{kg}] \quad (5.10)$$

となる。プレート上に設置されるカバーボックスの重量を 200kg と仮定すると、ボルトが支える荷重 P は

$$P = (200 + 39.25) \times 9.8 = 2344.65[\text{N}] \quad (5.11)$$

である。

プレートとカバーボックスを支えるボルトは 8 本だが、プレートの角度調整は実質 3 本のボルトで行うため、ボルト 3 本で荷重を支えられるだけの強度が必要である。今回使用するボルトとして $M12$ ボルトを考える。 $M12$ ボルトの有効断面積 A_s は 84.3mm^2 である。安全率 S を 10 とし、ボルト 1 本当たりにかかる応力 σ を計算すると

$$\sigma = \frac{SP}{nA_s} = \frac{10 \times 2344.65}{3 \times 84.3 \times 10^{-6}} = 92.7[\text{MPa}] \quad (5.12)$$

この値は $SUS304$ の 0.2% 耐力である 205MPa よりも小さいため、強度的に問題ないと言える。

さらに、ボルトとナットのねじ山部分が、荷重によるせん断応力によってせん断破壊されないか強度計算を行う。

おねじ(ボルト)・めねじ(ナット)、それぞれのねじ山の根元の断面に作用するせん断応力 τ_b および τ_n は次式で求められる。

$$\tau_b = \frac{SP}{Z\pi d_1 k p} \quad (5.13)$$

$$\tau_n = \frac{SP}{Z\pi D k p} \quad (5.14)$$

ここで、 d_1 はおねじの谷径、 D はめねじの谷径、 p はねじのピッチ、 k はねじ形状によって決まる値であり、 $M12$ のメートル並目ねじの場合、それぞれの値は以下ようになる。

$$d_1 = 10.106[mm]$$

$$D = 12.000[mm]$$

$$p = 1.75[mm]$$

$$k = 0.75$$

また、 Z はねじ山の巻き数で、かみ合うネジ部の高さ H を用いて、次式で求められる。

$$Z = \left(H - \frac{p}{2} \right) / p \quad (5.15)$$

今回、かみ合うネジ部の高さ H は、1 種の M12 六角ナットのナット高さと同値で、

$$H = 10[mm] \quad (5.16)$$

である。

これにより、ねじ山の巻き数 Z は式(5.15)を用いて

$$Z = \left(10 - \frac{1.75}{2} \right) / 1.75 = 5.21 \quad (5.17)$$

と求められる。

これらの値を用いて、せん断応力 τ_b および τ_n を求める。静荷重を想定し、安全率 S を 3 とすると、

$$\tau_b = \frac{3 \times 2344.65}{5.2143 \times \pi \times 10.106 \times 0.75 \times 1.75} = 32.372[N/mm^2] \quad (5.18)$$

$$\tau_h = \frac{3 \times 2344.65}{5.2143 \times \pi \times 12.000 \times 0.75 \times 1.75} = 27.263[N/mm^2] \quad (5.19)$$

この値が、材料の許容せん断応力以下であれば、強度的に問題ないといえる。

許容せん断応力 τ_{\max} は、許容引張応力 σ_t の 0.5 倍程度である。今回の使用条件を 100°C 以下と考えると、SUS304 の許容引張応力 σ_t は

$$\sigma_t = 90[N/mm^2]$$

である。よって、許容せん断応力 τ_{\max} は

$$\tau_{\max} = 0.5\sigma_t = 0.5 \times 90 = 45[N/mm^2] \quad (5.20)$$

となり、強度的に問題無いと言える。このことから、プレートを支えるためのボルト及びナットには M12 のものを使用する。

プレートを支え高さを決定する部分のナット緩み防止のためダブルナットとする。使用するナットはすべて一種の物で、架台とプレートに接する部分については平座金も使用する。

今回使用するボルト・ナットの緒元を表 5.1 に、締結部分の図を図 5.7 に示す。

表 5.1 プレート調整用ボルト・ナット緒元

種類	呼び	材質	ネジ形状
六角ボルト(全ネジ)	M12×250	SUS304	三角ネジ
六角ナット(一種)	M12	SUS304	三角ネジ

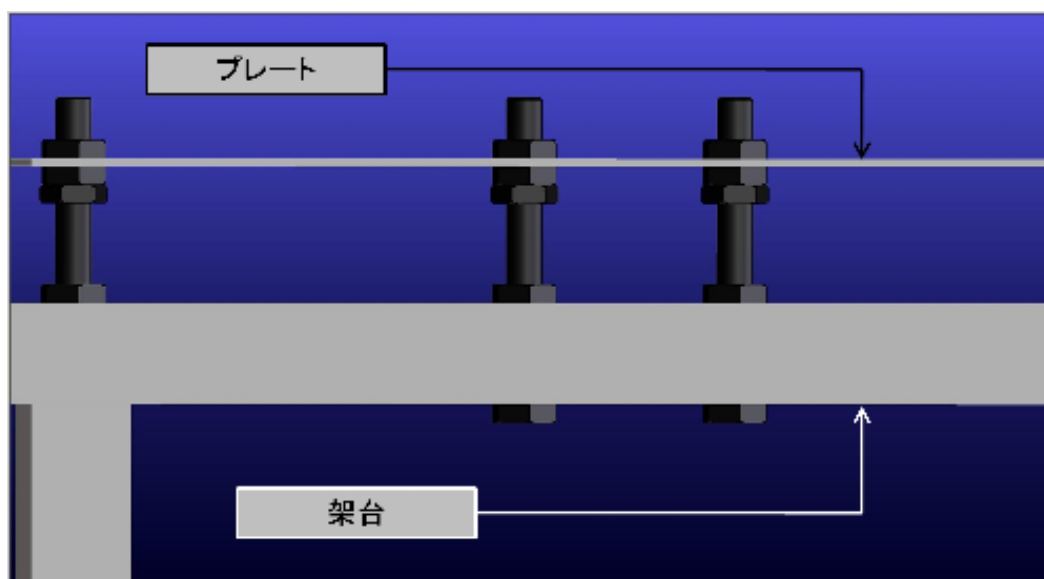


図 5.10 ボルト及びナットによるプレートの締結

5.2 カバーボックス

カバーボックスは、CLF から射出されたレーザーの散乱光を観測するための受光デバイス及びその周辺パーツを収め、受光デバイスを日中の太陽光及び雨や砂などから保護する。

ユタ大学で製作されたカバーボックスは、プラットホーム上に設置され、LIDAR システム稼働時にのみモーターによって蓋を開ける。背面及び内壁面に設置されたリミットスイッチによってカバーボックスの蓋の開閉の完了を把握することが可能である。(図 5.11)

カバーボックス底面には、集光鏡を固定するパーツを避けるため、 $\phi 460\text{mm}$ の穴を開けている。

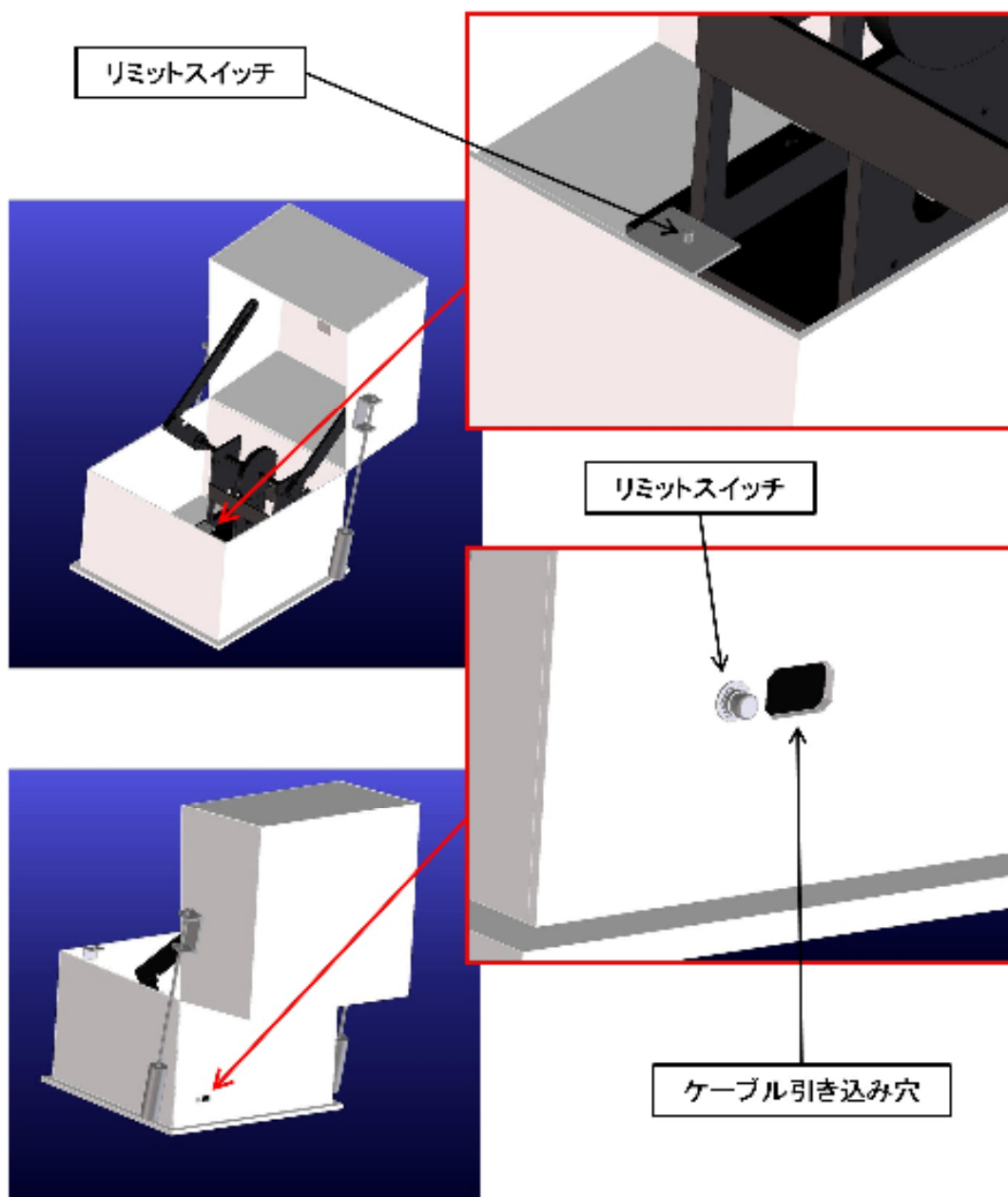


図 5.11 カバーボックス



図 5.12 プラットホーム上に置かれたカバーボックス

カバーボックス背面のリミットスイッチ横には $25\text{mm} \times 40\text{mm}$ の穴が開いており、そこから PMT(H3178-51)用の HV 及びシグナルケーブルと、リミットスイッチの信号ケーブル各 1 本の計 4 本のケーブルをカバーボックス内へ引き込んでいる。図 5.12 はカバーボックスがプラットホーム上に置かれた状態である。

5.3 高高度域観測用受光デバイス部分

高高度域におけるエアロゾルの透明度の測定には PMT(H8643)を用いる。散乱光を集光するための集光鏡が取り付けられ、カバーボックス内に集光鏡固定台によって取り付けられる。

5.3.1 集光鏡

PMT(H8643)に取り付けられる集光鏡には、TA 実験で稼働中の LIDAR システム内で利用している集光鏡と同一型であるシュミットカセグレン式の CELESTRON 製、C11 S XLT 鏡筒を使用する。表 5.2 にこの鏡筒の仕様を示す。

表 5.2 C11 S XLT 仕様

光学系	シュミットカセグレン(反射式)
対物鏡有効径	280mm (11.02 in)
焦点距離(口径比)	2800mm (110.24 in)
F 値	10
ファインダースコープ	9x50
接眼レンズ	40mm (1.57in)
倍率	70x
有効倍率(最大値)	661x
等級制限	14.7
分解能(Rayleigh)	0.5"
分解能(Dawes)	0.41"
視野角	0.71°
直線視野(@1000 yds)	38 ft (11.58m)
筒長	24 in (609.6mm)

5.3.2 PMT(H8643)

集光鏡を取り付け、高高度域の大気の状態を読み取るための PMT には、取り付け部分である集光鏡開口部の寸法が $\phi 31.7\text{mm}$ であることを考慮し、直径 $\phi 31.2\text{mm}$ の、浜松ホトニクス製 光電子増倍管 R7899 内蔵光電子増倍管アセンブリ H8643 を使用する。これにより、PMT を集光鏡の開口部へ直接取り付けることが可能となる。

H8643 は管径 $\phi 31\text{mm}$ 、長さ 120mm である。

R7899 の仕様を表 5.3 に示す。

表 5.3 R7899 仕様

種類	ヘッドオン型
管径	$\phi 25\text{ mm}$
受光面サイズ	$\phi 22\text{ mm}$
感度波長 (Short,Long,Peak)	300nm , 650nm , 420nm
分光感度特性 カーブ No.	400K
光電面 種類	バイアルカリ

窓材質	硼硅酸ガラス
ダイノード	ラインフォーカス 10 段
[絶対最大定格] 陽極－陰極間電圧	1800 V
[絶対最大定格] 平均陽極電流	0.1 mA
陽極－陰極間 印加電圧	1250 V
[陰極特性] ルーメン感度 Min. (Typ.)	70 uA/lm (95 uA/lm)
[陰極特性] 青感度指数 (CS 5-58) Typ.	11
[陰極特性] 放射感度 Typ.	88 mA/W
[陽極特性] ルーメン感度 Typ.	190 A/lm
[陽極特性] 放射感度 Typ.	1.7E+05 A/W
[陽極特性] ゲイン Typ.	2.00E+06
[陽極特性] 暗電流(30 分後) Typ. (Max.)	2 nA (15nA)
[時間特性] 上昇時間 (Tr) Typ.	1.6 ns
[時間特性] 走行時間 (T.T) Typ.	17 ns

PMT(H8643)は集光鏡の開口部に挿入され、開口部側面部分から M3 のネジ 2 本によって固定される。この PMT は 120mm の長さを持っており、ネジの固定位置によって約 50mm 程度の位置調節が可能である。

また、PMT には $\phi 25\text{mm}$ 、厚さ 1mm の BG3 フィルターが取り付けられる。集光鏡の開口部が $\phi 31.7\text{mm}$ であるのに対して、H8643 の直径が $\phi 31.2\text{mm}$ であり、機械的に取り付けることが困難であるため、BG3 フィルターはフィルターを PMT 中央部に固定するためのリングとともにテープで PMT に固定される。PMT(H8643)と集光鏡との取り付け部分の詳細図を図 5.9 に示す。

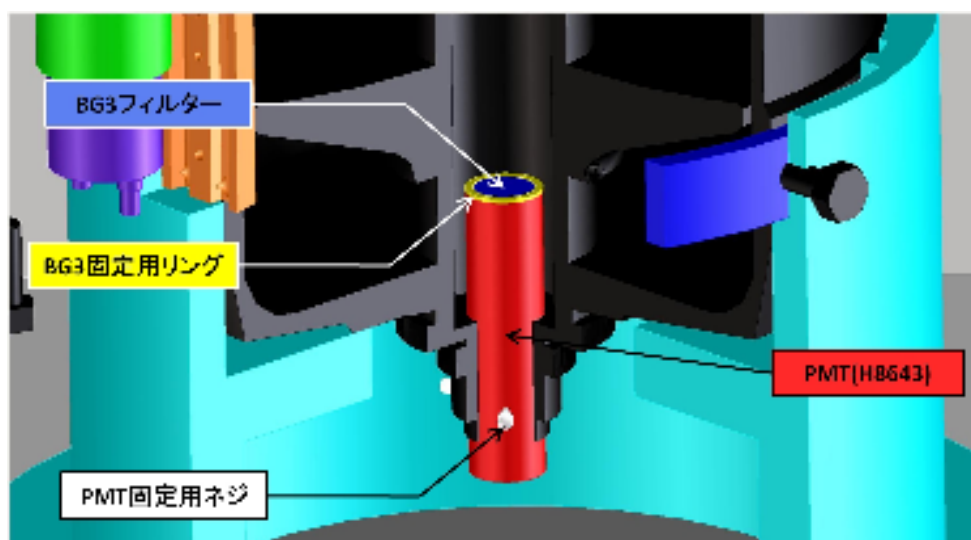


図 5.13 PMT(H8643)取り付け部分

5.3.3 集光鏡固定台

カバーボックス内において、集光鏡を固定するための役割を担う台座がこの部分である。プラットホームへの負担を極力減らすため、固定台は集光鏡をしっかりと保持しつつ、できるだけ軽いことが望ましい。そのため、不要な部分は出来る限り削り取るよう設計されている。

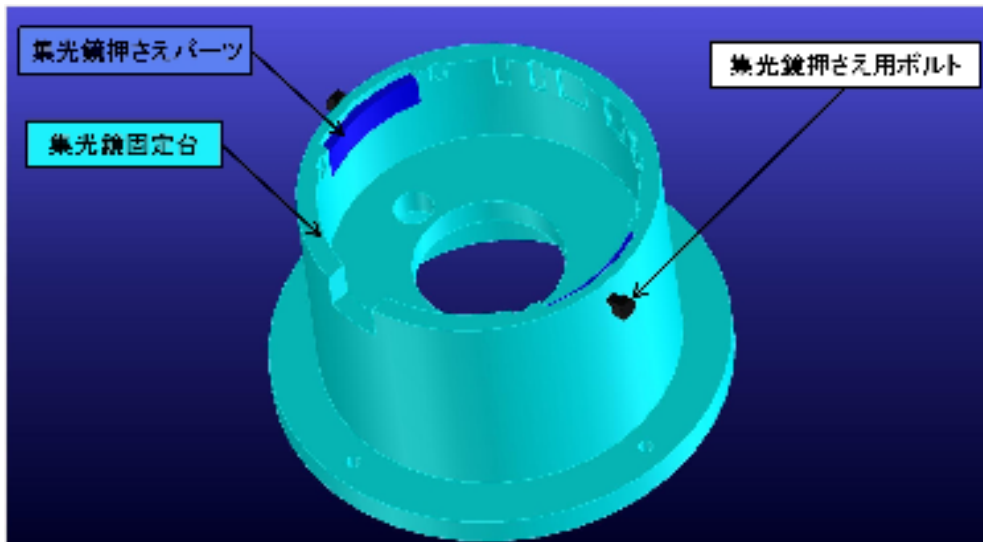


図 5.14 集光鏡固定台(設計予想図)



図 5.15 集光鏡固定台

集光鏡固定台の材料は、価格や使用条件等を考慮し、アルミニウム合金の中でも比較的強度の高い A5056 の丸棒を使用し、マシニングセンタにより加工し作成する。

集光鏡を保持・固定し、固定後はできる限り集光鏡が動くこと防ぐため、固定台の内壁寸法と集光鏡の側面寸法の差が小さいことが望ましい。集光鏡の実測円周 984.5mm から求めた集光鏡の半径約 156.7mm を元に、マシニングセンタの加工精度等を考慮し、集光鏡固定台内壁面の寸法は半径 157mm とした。

取り付けの際に集光鏡のネジ部品が干渉するのを防ぐために、必要な個所には切り欠きを設ける。集光鏡のネジ位置は全て実測値であり、切り欠きは測定時の誤差を考慮してネジの径から左右 2mm 程大きく設計されている。また、加工するエンドミルの形状によって、切り欠き頂点部分は丸みを帯びる。さらに、ネジ部の切り欠きとは別に、低高度域観測用の PMT を取り付けのために集光鏡に取り付けられるアリミゾレールの干渉を防ぐための切り欠きも設ける。

集光鏡内に取り付けた PMT を固定した状態のまま外から取り外しできるように、中心には $\phi 150$ の穴を設ける。集光鏡のフォーカス調整用のつまみが干渉しないように $\phi 40$ の穴も設けている。

固定台の両端に取り付けられた集光鏡押さえパーツによって両脇から集光鏡を押さえる形で集光鏡の固定を行う。安定性を考えると集光鏡側面の 3 箇所から固定するのが望ましいが、集光鏡側面のネジの配置を考えると面による固定のための十分な面積が得ることが困難であることから、左右の 2 箇所からの固定を行う。このパーツは、集光鏡固定台に設けられたこのパーツを収めるための切り欠き部分に取り付けられ、外側からボルトによって集光鏡押さえパーツを押し込むことで面接触により集光鏡を固定する。集光鏡押さえパーツを押し込むために使用するボルトは W1/2 の六角ボルトで、首下長さ 15mm のものを使用する。

集光鏡押さえパーツの材料には、集光鏡固定台と同一の A5056 を使用する。

固定台底面には、固定台をボルトにより固定するための $\phi 0.53\text{inch}$ の穴を四か所空ける。この穴はプレートに空けられた $\phi 0.53\text{inch}$ の穴と対応しており、集光鏡固定台はこの穴を用いてボルトとナットによってプレートに固定される。固定の際には、集光鏡固定台の $\phi 150\text{mm}$ の穴、プレートの $\phi 200\text{mm}$ の穴、及びカバーボックスに空けられた $\phi 460$ の穴の軸が一致する形となる。

固定に用いるボルト及びナットは M12 のものを使用する。ボルトは首下長さ 90mm の半

ネジの物を用い、ナット側には緩み防止のためにスプリングワッシャーも使用する。
集光鏡固定台の締結部分を図 5.11 に示す。

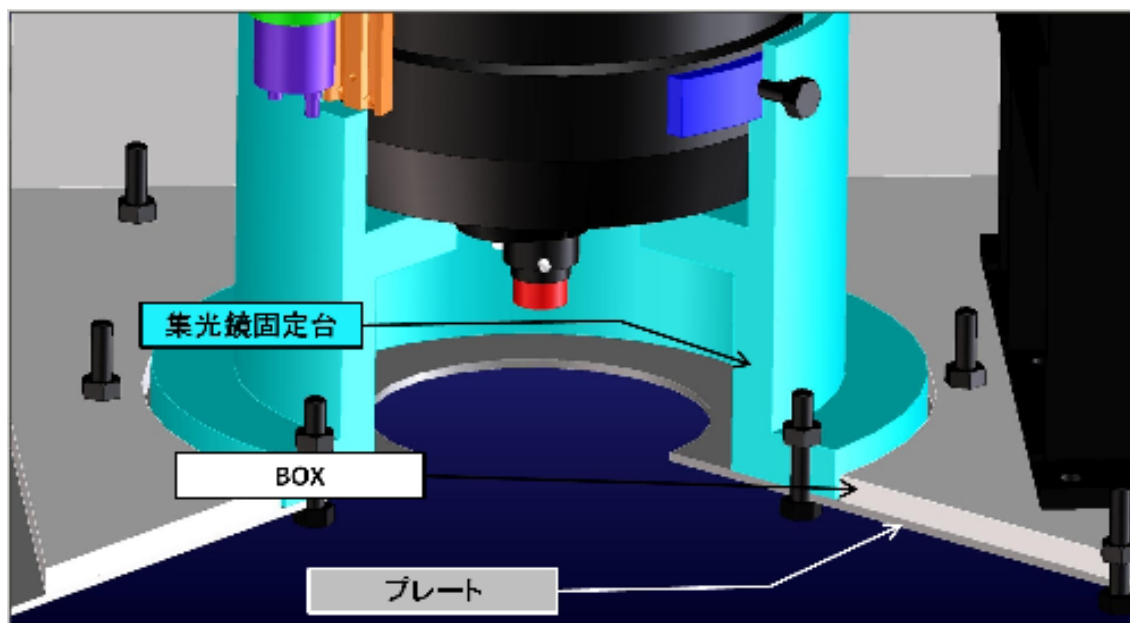


図 5.16 集光鏡固定台の締結

5.4 低高度域観測用受光デバイス部分

集光鏡の側面には低高度域における散乱光を観測するための PMT(H3178-51)が図 5.17 のように取り付けられる。ここでは PMT(H3178-51)、PMT 保持筒及び図 5.18 に示されている取り付け用パーツについて述べる。

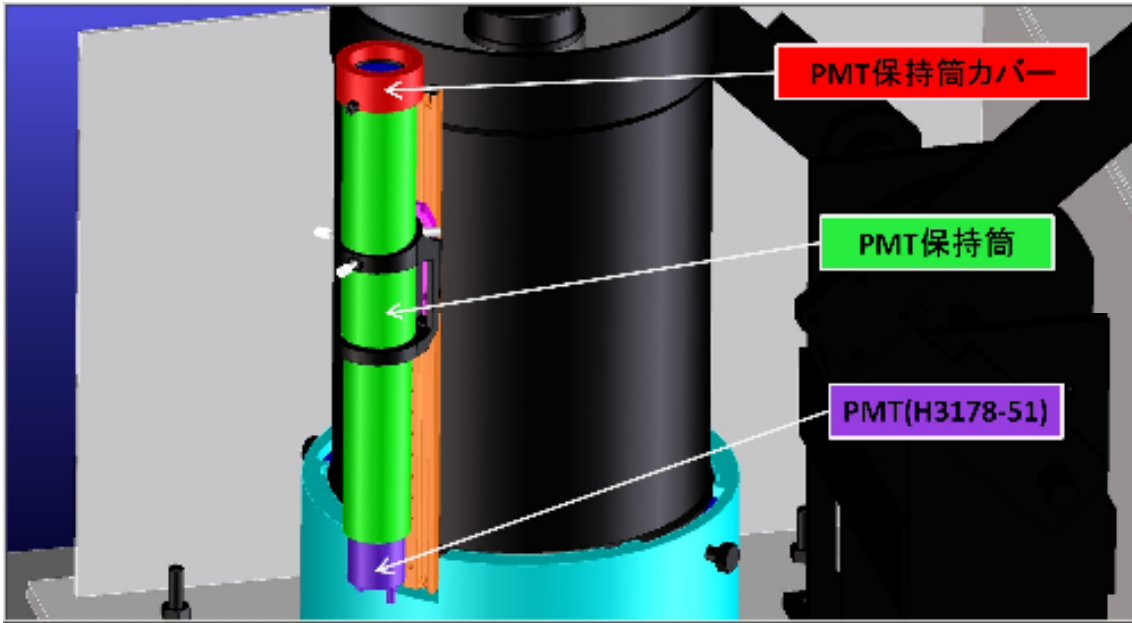


図 5.17 PMT(H3178-51)取り付け部分

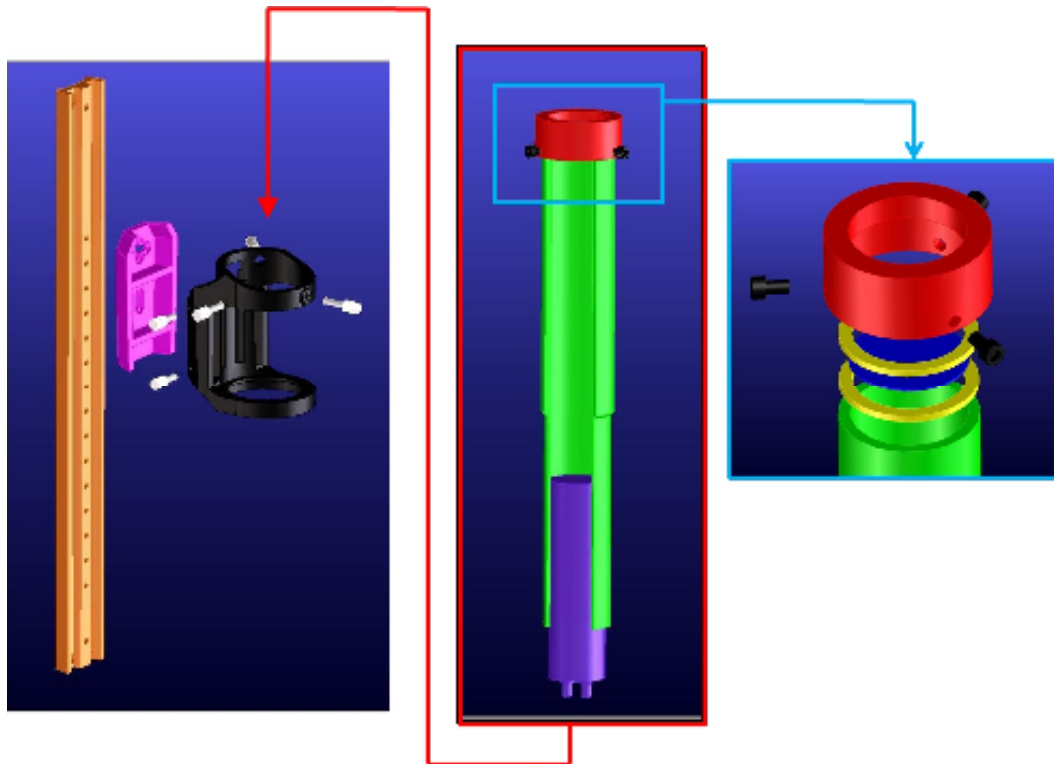


図 5.18 PMT(H3178-51)取り付け部分詳細

5.4.1 PMT(H3178-51)

低高度の大気の情報を読み取るための PMT のサイズは大きい方が好ましいが、集光鏡側面に取り付けることを考慮し、浜松ホトニクス製の光電子増倍管 R580 内蔵の光電子増倍

管アッセンブリ H3178-51 を使用した。H3178-51 は管径 ϕ 47mm、長さ 162mm(コネクタ部は含まない)である。

R580 の仕様を表 5.4 に示す。

表 5.4 R580 仕様

種類	ヘッドオン型
管径	ϕ 38 mm
受光面サイズ	ϕ 34 mm
感度波長 (Short , Long , Peak)	300nm , 650nm , 420nm
分光感度特性 カーブ No.	400K
光電面 種類	バイアルカリ
窓材質	硼硅酸ガラス
ダイノード	ラインフォーカス 10 段
[絶対最大定格] 陽極－陰極間電圧	1750 V
[絶対最大定格] 平均陽極電流	0.1 mA
陽極－陰極間 印加電圧	1250 V
[陰極特性] ルーメン感度 Min. (Typ.)	70 μ A/lm (95 μ A/lm)
[陰極特性] 青感度指数 (CS 5-58) Typ.	11
[陰極特性] 放射感度 Typ.	88 mA/W
[陽極特性] ルーメン感度 Min. (Typ.)	10 A/lm (100 A/lm)
[陽極特性] 放射感度 Typ.	9.7E+04 A/W
[陽極特性] ゲイン Typ.	1.10E+06
[陽極特性] 暗電流(30 分後) Typ. (Max.)	3 nA (20nA)
[時間特性] 上昇時間 (Tr) Typ.	2.7 ns
[時間特性] 走行時間 (T.T.) Typ.	37 ns

5.4.2 PMT 保持筒

PMT(H3178-51)を収め、その視野角を狭めるためのパーツである。材料には集光鏡固定台と同一のアルミニウム合金 A5056 を使用する。また、このパーツの先端には BG3 フィルターが取り付けられる。

PMT(H3178-51)の管径は ϕ 47mm である。視野角を狭めるため、PMT 保持筒の内径はこの管径よりも大きく、しかし極力小さいことが望ましい。今回は加工の簡易化のため、使用するアルミニウム合金 A5056 の円筒材料で容易に入手可能な物の中から、最も値の近い内径 ϕ 50mm のものを使用した。

PMT(H3178-51)の受光面はφ34mmであり、このPMTの視野角を20度以内にすると考えたと、φ50mmの保持筒の場合、PMT受光面からの必要長さは238mm以上必要である。さらに、このPMT保持筒は長さ162mmあるPMT(H3178-51)を筒内に保持しなければならない。このことを考慮して、PMT保持筒の長さは400mmとした。PMTはその長さの2/3程度が筒内に収まれば保持が可能のため、視野角は20度未満となる。

PMT保持筒は外形φ60mm、肉厚5mm、長さ400mmの円筒形材料を旋盤によって加工して作成する。側面にはテーパ加工を施す。このテーパ部分が後述のPMTアライメント用パーツに引っかかるような形となる

PMT(H3178-51)は、側面にテープを巻きつけた状態でPMT保持筒下部へ挿入され、テープとPMT保持筒内壁面との摩擦力によって保持・固定される。

小筒内に入射した光の反射を抑える為に、アルミ専用のカラーアルミスプレーで、つや消しの黒に塗装した。

PMT(H3178-51)には、φ51mm,厚さ1mmのBG3フィルターを取り付ける必要がある。

BG3フィルターが破損した際の付け替えのことを考え、できる限り容易にBG3フィルターの取り外しが行えることが望ましい。そのため、BG3フィルターの取り付け及び脱落防止のためのPMT保持筒カバーを作成し、BG3フィルターを取り付けた。

小筒上端にゴムリングを2つ取り付け、2つのゴムリングの間にBG3フィルターを挟み、その上からPMT保持筒カバーを取り付ける。PMT保持筒カバーはM6・首下長さ10mmの六角穴付ボルト3本を用いて側面からPMT保持筒へ固定される。BG3フィルター取り付け部分の詳細図を図5.19に示す。

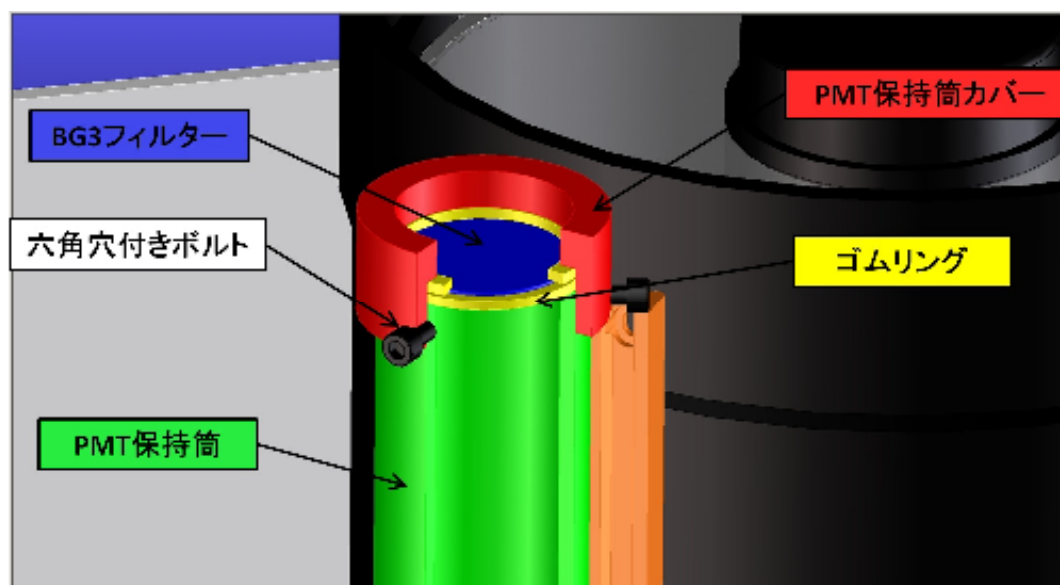


図 5.19 BG3 フィルター取り付け部分詳細

5.4.3 アリミズレール

図 5.20 のアリミズレールは集光鏡に取り付けられ、PMT 取り付け位置調節パーツ役割を担うパーツである。本来は集光鏡を三脚に取り付ける為のレールであるが、これを PMT 保持筒固定用に利用する。

レール中央部分には、PMT 取り付け位置調節パーツを取り付けるための M4 のネジ穴を 19mm 間隔で 15 箇所加工した。

レールは、上下 2 箇所ずつに設けられたネジ穴を用いて、六角穴付ボルトによって集光鏡に固定される。



図 5.20 アリミズレール

5.4.4 PMT 取り付け位置調節パーツ

アリミズレールに取り付けられ、垂直方向における PMT の取り付け位置の調節を行うためのパーツである。(図 5.21)

本来は集光鏡に副鏡を取り付ける為のものであるが、このパーツを PMT 保持筒固定に利用する。曲面となっている底面を、アリミズレールへの取り付けを可能にするために平面に加工した。さらに、アリミズレールへの固定のための M4 のネジが通る穴を 2 ヶ所設ける。PMT アライメントパーツとネジとの干渉を防ぐため、固定用の M4 皿小ネジが沈み込むように穴にはザグリ加工を施した。

このパーツのアリミズレールへの取り付け位置を変えることで、PMT は垂直方向に約 270mm 上下させることが可能である。

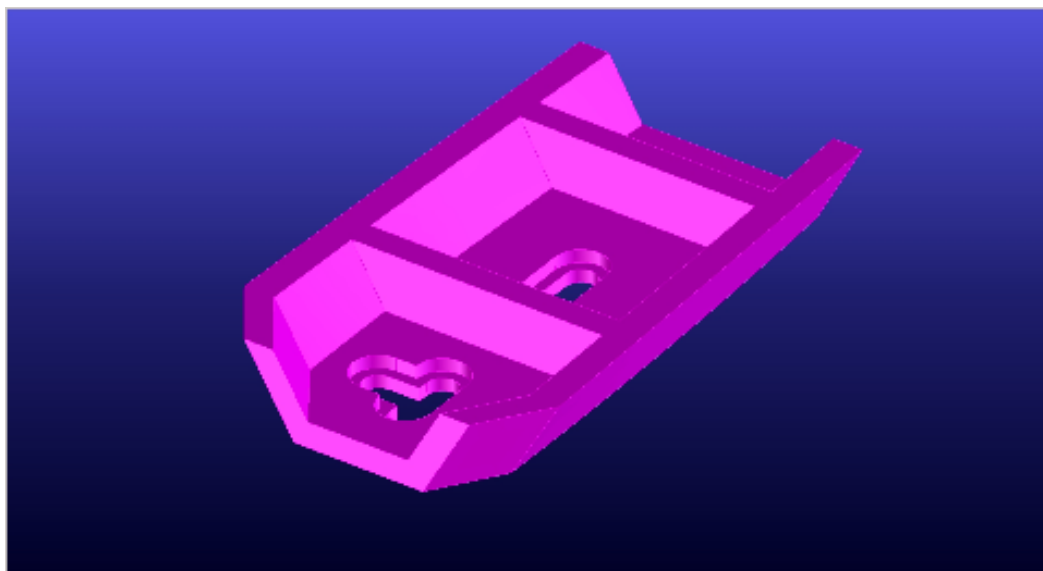


図 5.21 PMT 取り付け位置調節パーツ

5.4.5 PMT アライメントパーツ

PMT(H3178-51)取り付け位置調節パーツに取り付けられるアライメントパーツを図 5.22 に示す。このパーツは PMT 保持筒を保持するとともに PMT(H3178-51)のアライメントを行うためのものである。本来は集光鏡に副鏡を取り付ける為のものであるが、副鏡を保持する部分をそのまま利用した。

PMT(H3178-51)を取り付ける際に、既にプラットホームのプレートの角度調節によって集光鏡を取り付けた PMT(H8643)のレーザー光と受光軸の調整が完了しているため、PMT(H3178-51)のレーザー光と受光軸の調整はこのパーツによる角度の微調整によって行われる。レーザー光と受光軸の調整には、パーツ上部のリング状の部分に取り付けられた 2 本の M5 ネジを使用する。

また、PMT アライメントパーツは側面に位置する M5 ネジ 2 本によって PMT 取り付け位置調節パーツへ固定される。

カバーボックスに収められた受光デバイスの実際の写真を図 5.23 に示す。

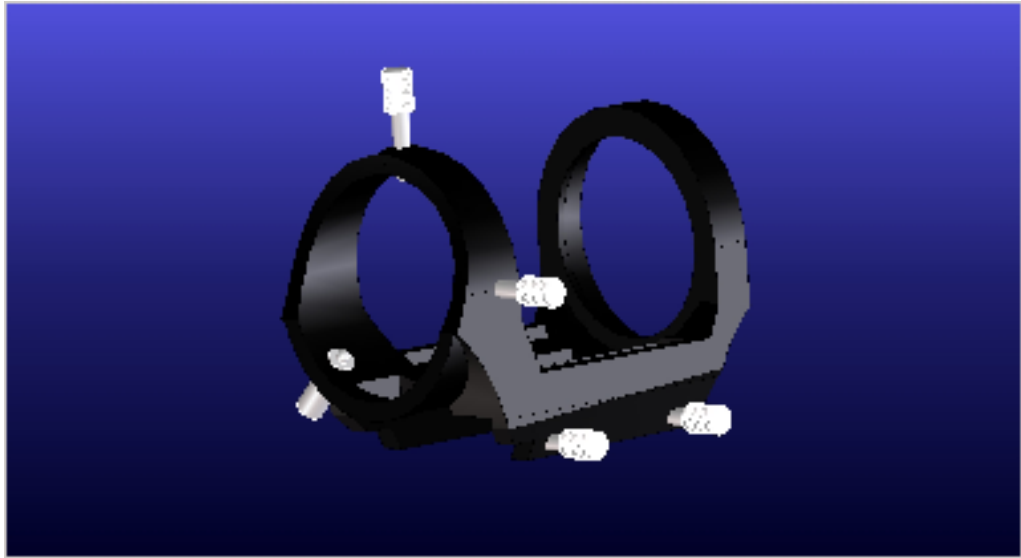


図 5.22 PMT アライメントパーツ



図 5.23 カバーボックス内に収められた受光デバイス

5.5 PMT 電力供給用デバイス

PMT(H3178-51)と PMT(H8643)への高圧電源の供給及び制御は、高圧モジュール電源、直流安定化電源、パワーサプライコントローラによって行われる。

ここでは、PMT へ電力を供給するこれらのデバイスについて述べる。図 5.24 は、PMT への電力供給用デバイス及び後述のデータ取得用デバイスの CLF コンテナ内での配置図である。

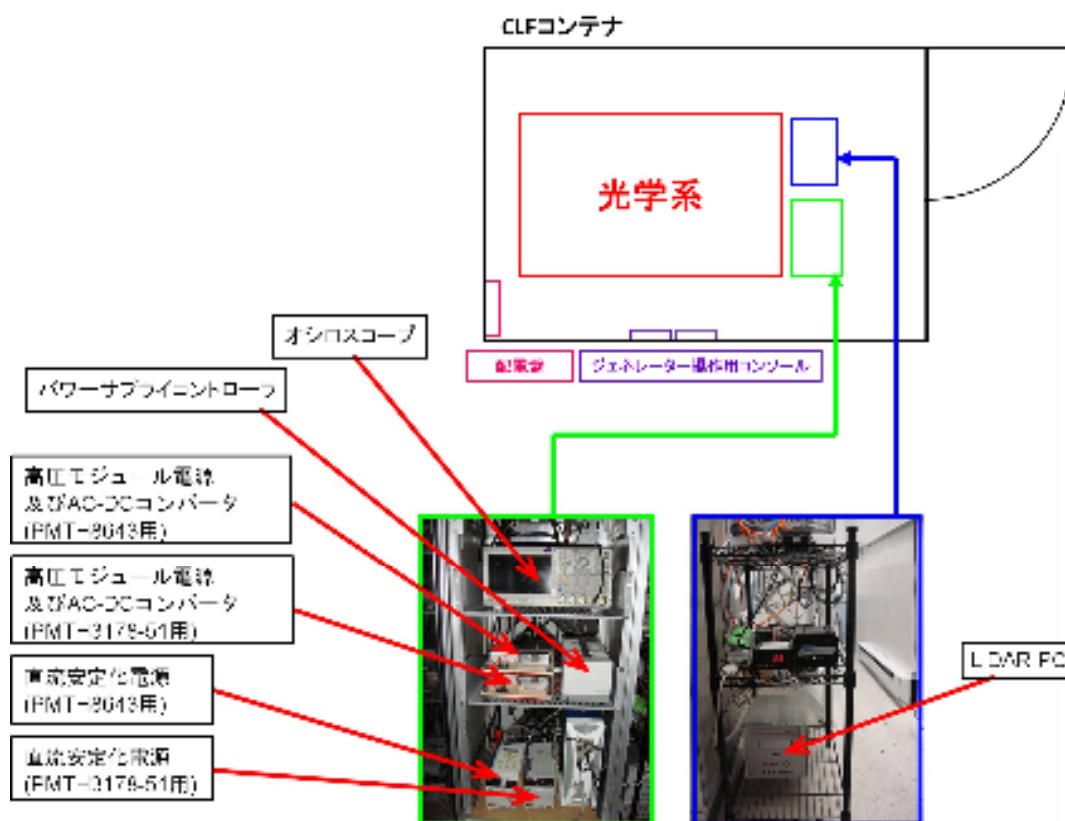


図 5.24 LIDAR@CLF デバイスの配置

5.5.1 高圧モジュール電源

PMT を動作させるための高圧電源を供給させるための装置として、松定プレジジョン株式会社製の高圧モジュール電源 J4-3N を使用する。表 5.5 に J4-3N の仕様を示す。また、実物の写真を図 5.25 に示す。

表 5.5 J4-3N仕様

入力電圧	+24~+30Vdc @400mA _{typ.}
出力電圧	0~-3kV
出力電流	0~-1mA
リップル	3mV _{p-p}
出力制御(リモート)	外付5Ωボリューム又は外部コントロール電圧(V _{con-in})0~9Vdcによる
出力制御(ローカル)	内部多回転ポテンションメータ
変動率(対入力)	0.001% (±1%の入力に対して)
変動率(対負荷)	0.0001% (0~100%の負荷変動に対して)
安定度	0.005%/hr 0.02%/8hr
温度係数	50ppm/°C
出力電流制限	最大出力電流の120%
出力電圧モニタ	-3V/-3kV 出力インピーダンス 30kΩ
保護機能	負荷短絡、アーク放電に対する保護
入力端末	8ピンコネクタ
出力端末	シールドケーブル 50cm 長 1本
動作温度	0°C~+50°C
保存温度	-20°C~+60°C

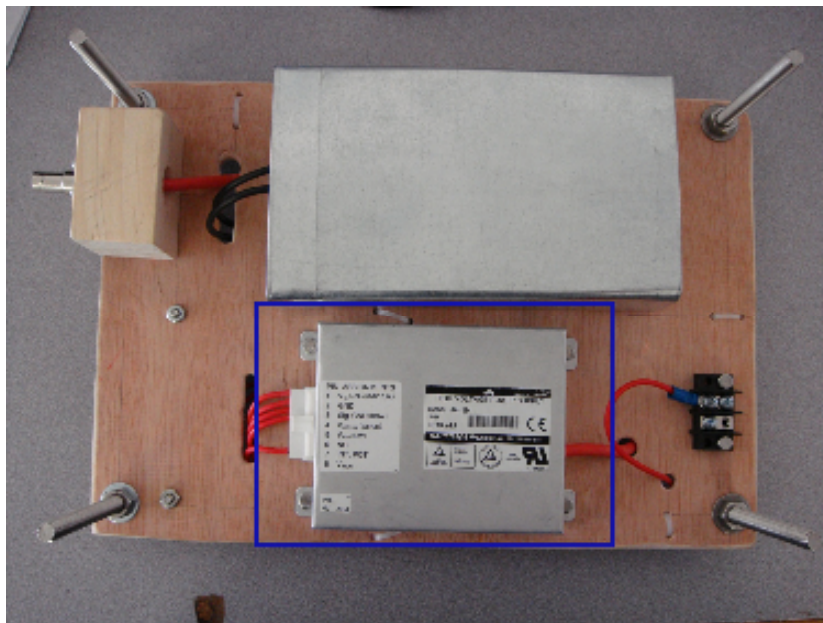


図 5.25 高圧モジュール電源 J4-3N(青枠部分)

5.5.2 直流安定化電源

高圧電源モジュールの供給電源として、KIKUSUI 社製の直流安定化電源 PMC18-2A を使用した。表 5.6 に PMC18-2A の仕様を示す。また、実物の写真を図 5.26 に示す。

表 5.6 PMC18-2A 仕様

出力電圧	0~18V (10 回転連続可変)
出力電圧温度係数	100ppm/°C
出力電圧過渡応答特性	50 μ s
出力電圧リモートコントロール(電圧, 抵抗)	0~10V, 0~10k Ω
出力電流	0~2A (10 回転連続可変)
出力電流温度係数	200ppm/°C
出力電流リモートコントロール(電圧, 抵抗)	0~10V, 0~10k Ω
リップル(電圧, 電流)	0.5mVrms, 1mA _{rms}
電源変動(電圧, 電流)	1mV, 10mA
負荷変動(電圧, 電流)	2mV, 5mA
電源	100V \pm 10% (交流)
消費電力	約 100VA
接地	正または負端子を接地可能
動作周囲温度	0°C~+40°C (但し結露なきこと)
動作周囲湿度	10%rh~80%rh (但し結露なきこと)
冷却方式	自然冷却
対設置電圧	DC \pm 250V
寸法	107W \times 124(134)H \times 270(305)Dmm



図 5.26 直流安定化電源 PMC18-2A
左が PMT(H8643)用、右が PMT(H3178-51)用

5.5.3 パワーサプライコントローラ

直流安定化電源の供給電力をコントロールする装置として、KIKUSUI 社製のパワーサプライコントローラ PIA4810 を使用する。表 5.6 に PIA4810 の仕様を、図 5.27 に実物の写真を示す。

表 5.7 PIA4810 仕様

TP-BUS 接続	付属の TP-BUS コネクタにて接続 デジタルリモートコントロール機能付き直流電源:31 台接続可(PMR、PAM)/32 台接続可(PAS、PWR) (総延長:200m 以下、ツイスト回数:1 回/cm 以上)
TP-BUS 極性	なし
TP-BUS 適合電線	撚り線:0.32mm ²
SHUT DOWN 入力信号	接点信号 1 秒以上の入力により、接続されたすべての直流電源装置の出力を OFF
SHUT DOWN+端子	4.7k Ω で+5V にプルアップ
SHUT DOWN-端子	制御系コモン
SHUT DOWN 適合電線	単線: ϕ 0.65(AWG22) 撚り線:0.32mm ² (AWG22) 素線径 ϕ 0.18 以上
入力電圧範囲	次の電圧範囲を底面の電圧切換スイッチにより選択 AC90 \sim AC110V/AC106 \sim AC125V/AC180 \sim AC220V/AC211 \sim AC250V
入力周波数	48Hz \sim 62Hz
入力消費電力	50VA 以下
動作周囲温度範囲	0 $^{\circ}$ C \sim 40 $^{\circ}$ C (ただし、結露なきこと)
動作周囲湿度範囲	10% \sim 90% (ただし、結露なきこと)
保存周囲温度範囲	-20 $^{\circ}$ C \sim 70 $^{\circ}$ C (ただし、結露なきこと)
保存周囲湿度範囲	10% \sim 90% (ただし、結露なきこと)
入カ-シャーシ 絶縁抵抗	DC500V、30 Ω 以上
TP-BUS-シャーシ 絶縁抵抗	DC1000V、30 Ω 以上
CH 端子-シャーシ 絶縁抵抗	DC500V、30 Ω 以上
入カ-シャーシ 絶縁耐圧	AC1500V、1 分間
入カ-TP-BUS 絶縁耐圧	AC1500V、1 分間
TP-BUS-シャーシ 絶縁耐圧	AC600V、1 分間
CH 端子-シャーシ 絶縁耐圧	AC600V、1 分間
入カ-CH 端子 絶縁耐圧	AC1500V、1 分間
質量	5kg
寸法 ()は最大寸	141.9W \times 123.4(160)H \times 350(365)Dmm



図 5.27 パワーサプライコントローラ PIA4810

5.6 データ取得用デバイス

PMT によって観測した信号は、オシロスコープによって波形として取得され、その波形データは LIDAR PC に保存される。ここではオシロスコープと LIDAR PC の仕様について述べる。

5.6.1 オシロスコープ

波形データを取得するためのオシロスコープは Tektronix 社製、ベンチトップオシロスコープ DPO3034 を使用する。表 5.8 に DPO3034 の仕様を、図 5.28 に実物の写真を示す。

表 5.8 DPO3034 仕様

帯域幅	300MHz
サンプリングレート	2.5GS/s
チャンネル数	4
ディスプレイタイプ	color
質量	約 4kg



図 5.28 オシロスコープ DPO3034

5.6.2 LIDAR PC

波形データを保存する LIDAR PC には Shuttle 社製のベアボーン PC である XPC SB61G2 を使用する。表 5.9 に XPC SB61G2 の仕様を、図 5.29 に実物の写真を示す。

表 5.9 XPC SB61G2 仕様

対応ソケット	LGA775
チップセット	875P/ICH5R
FSB	800/533
RAM	400/333 × 2
PCI	1
AGP	1
S-ATA	○
LAN	GbE
1394	○
USB2.0	2+2
電源	静音 250W



图 5.29 LIDAR PC (XPC SB61G2)

5.7 問題点と対策

図 5.30、図 5.31 に示すのは CLF へ導入した LIDAR システムによって 2010 年 9 月に取得した波形である。

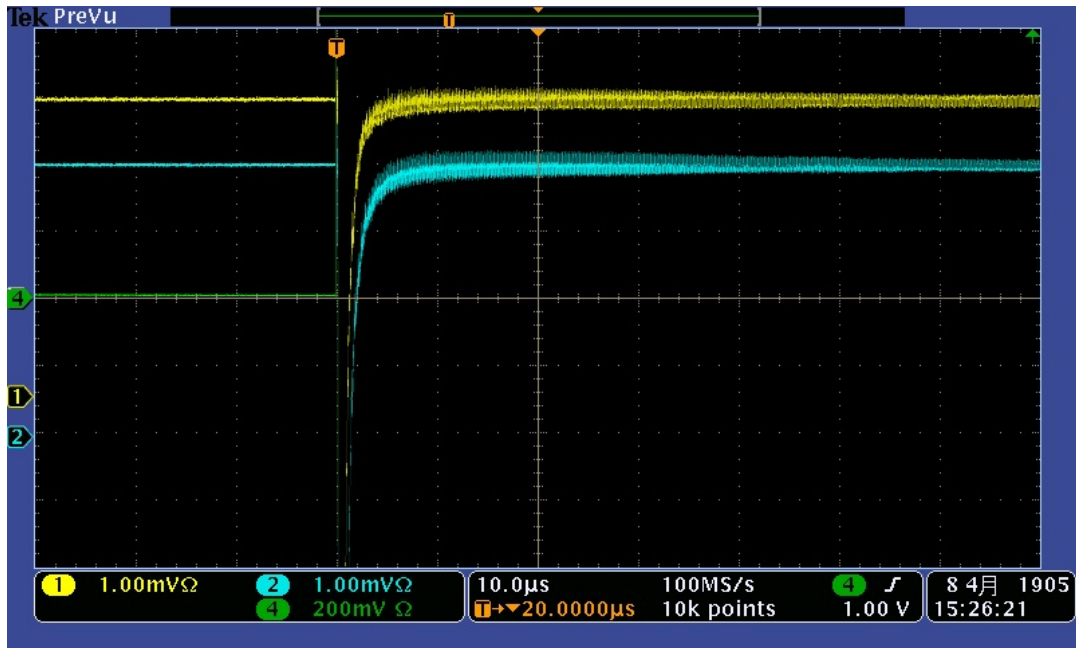


図 5.30 得られた波形(1)



図 5.31 得られた波形(2)

図に示した波形のうち、Ch1(黄色)が集光鏡を取り付けた PMT(H8643)によって得られた波形で、Ch2(水色)が PMT(H3178-51)によって得られた波形である。この波形から、高高度域のエアロゾルの透明度を測定するための PMT(H8643)が低高度域用の PMT(H3178-51)よりも低い範囲までしか観測できていないことが見て取れる。PMT への印加電圧を上げることで PMT の感度を上げることができるが、PMT への印加電圧をある程度以上に上げると、波形の立ち上がりの部分において、波形がベースラインを超過するオーバーシュートを起こす(図 5.31 の赤丸部分)。

高高度域観測用の PMT(H8643)で観測した波形が低い範囲までしか観測できていない原因として、PMT(H8643)に取り付けられた集光鏡のシュミット補正板が、CLF が射出しているレーザーの波長である 355nm の波長域の光を遮断していることが考えられる。そこで、分光光度計を用いて集光鏡に取り付けられていたシュミット補正板の透過率特性の測定を行った。使用したのは島津製作所製の分光光度計 UV-160 である。図 5.32、図 5.33 にシュミット補正板と使用した分光光度計を示す。



図 5.32 シュミット補正板(中央は凸面鏡)



図 5.33 分光光度計 UV-160

測定の結果、シュミット補正板の波長 355nm における透過率は 49.1%で、CLF から射出されたレーザーの後方散乱光が集光鏡によって集光される際に、その光量が 5 割程度カットされていることになる。図 5.34 に透過率の測定結果のグラフを示す。

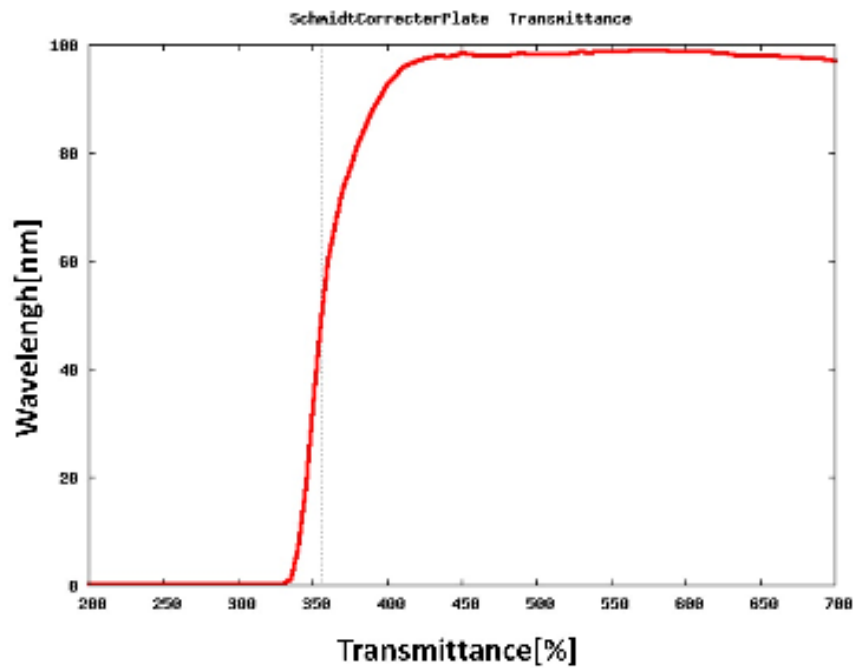


図 5.34 シュミット補正板の透過率

この問題に対して、シュミット補正板を紫外領域の光の透過率の良い材料のものに変更する必要がある。集光鏡のシュミット補正板は凸面鏡を取り付ける役割と収差を除去する役割を担っているが、PMTで散乱光を観測する場合において収差の除去は重要ではないため、新たに作成するパーツは主として集光鏡への凸面鏡の取り付けを担う。そこで、紫外光の透過率と加工のしやすさを考慮して、三菱レイヨン社製のアクリル樹脂板であるアクリライトの#000をシュミット補正板と同じサイズに切りだして使用する(提供:三菱レイヨン株式会社)。使用するアクリライト#000の透過率を測定すると、355nmでの透過率は90.8%であり、シュミット補正板をこのアクリライト#000に変更した場合、散乱光の光量は約1.85倍となることが考えられる。図5.35にアクリライト#000の透過率測定結果を示す。

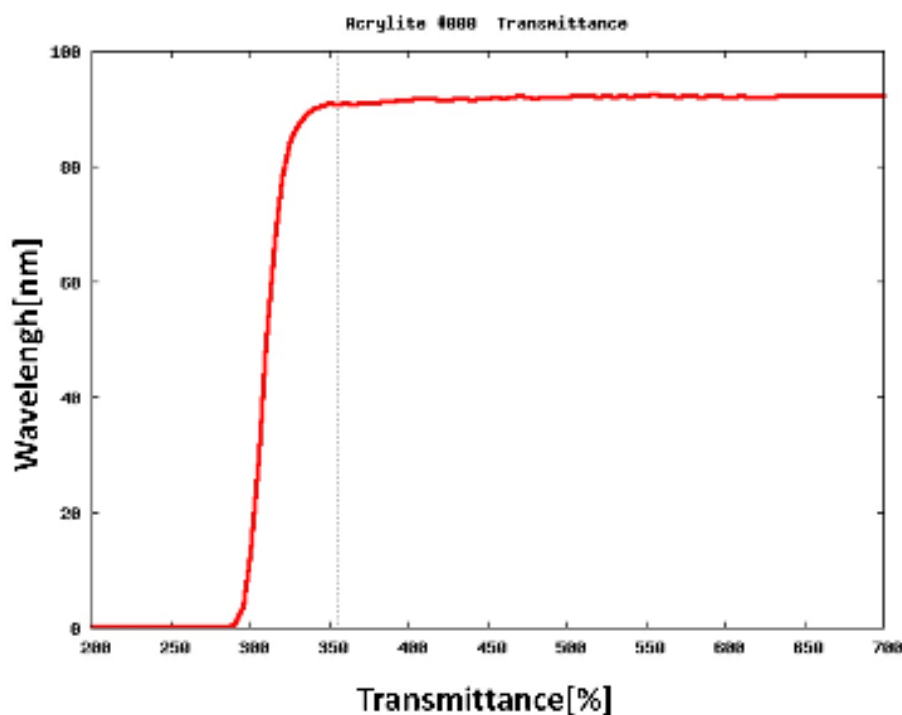


図 5.35 アクリライト#000の透過率

アクリライト#000は厚さ5mmのものを使用する。これに対しシュミット補正板の厚さは5.75mmであるため、シュミット補正板中央の凸面鏡取り付け部分と外周部分のシュミット補正板取り付け部分の隙間を埋めるためのパーツをそれぞれ作成し取り付けた。図5.36、図5.37はそれぞれ作成したパーツである。

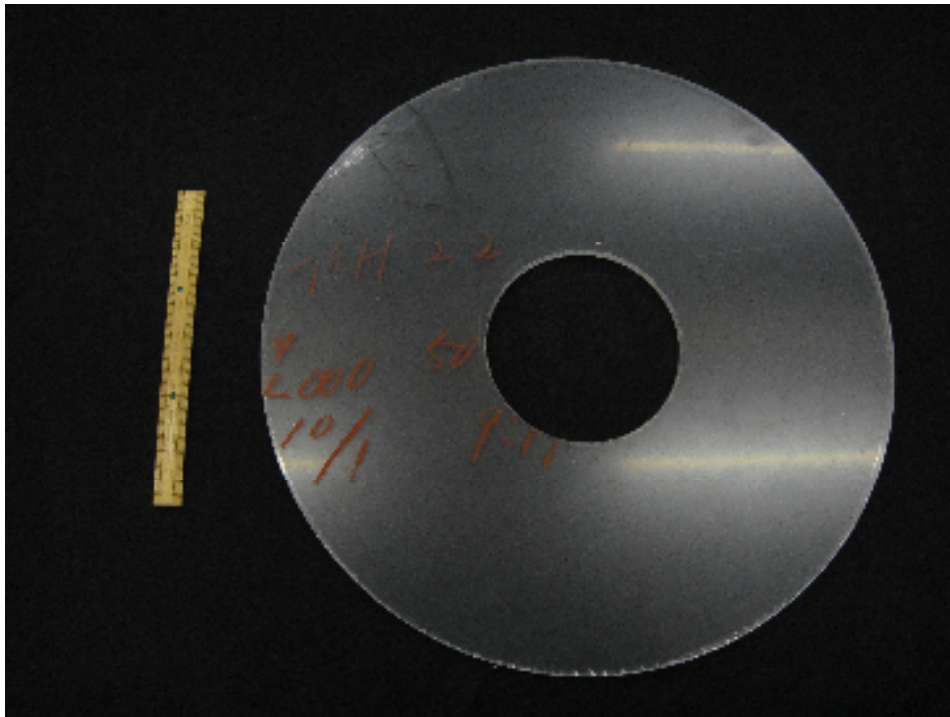


図 5.36 シュミット補正板と同サイズに切り出したアクリライト#000
(画像の物差しは 15cm)

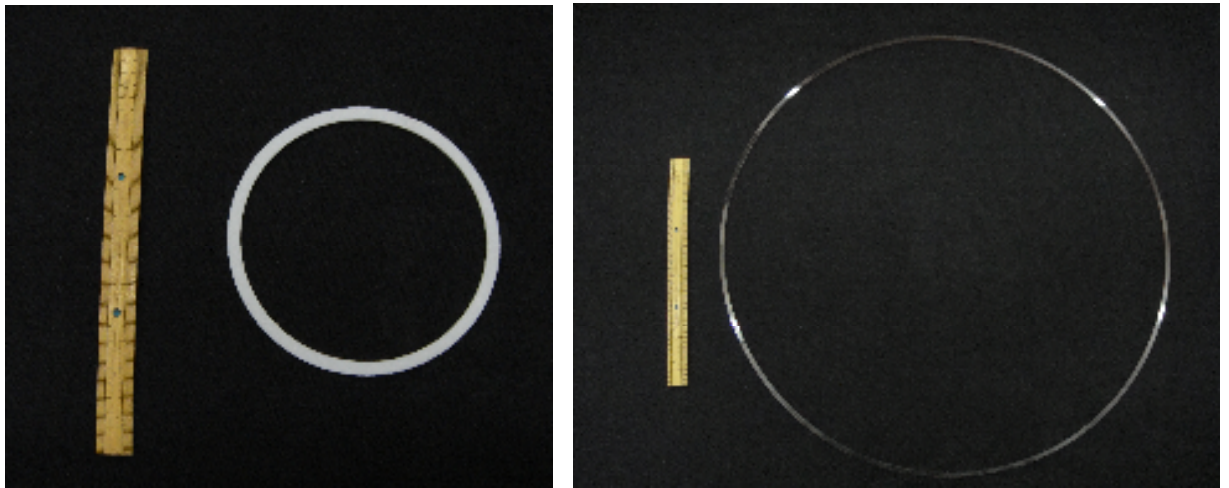


図 5.37 アクリライト板取り付け用パーツ
(左が凸面鏡取り付け用、右が集光鏡への取り付け用)

また、波形がオーバーシュートを起こす原因として、観測される散乱光が集光鏡によって集光されることで、PMT 受光面の一点に集中して入射していることが考えられ、何らかの方法で PMT 受光面において入射する光を分散する必要がある。

この問題については、集光鏡内に凹レンズを取り付けることによって集光してきた光を発散させる。凹レンズを集光鏡内に取り付けるためのパーツを作成し、集光鏡内の光軸上

に凹レンズを取り付ける。凹レンズにはシグマ光機社製の球面両凹レンズ SLSQ-50.88-200N を使用する。この凹レンズの材質は合成石英で 355nm の波長域において 90%程度の透過率を持つ。表 5.10 に使用する凹レンズの仕様を、図 5.38 に実物の写真を示す。

表 5.10 SLS-50.88-200N 仕様

材質	合成石英
外径	ϕ 50.8 mm
焦点距離	-199.5 mm
後焦点距離	-200.5 mm
中心厚	3.0 mm
縁厚	6.5 mm
曲率半径	184.00 mm



図 5.38 凹レンズ SLS-50.88-200N

この凹レンズを集光鏡内へ取り付け及び固定するパーツ(図 5.39)を製作した。



図 5.39 凹レンズ取り付け用パーツ

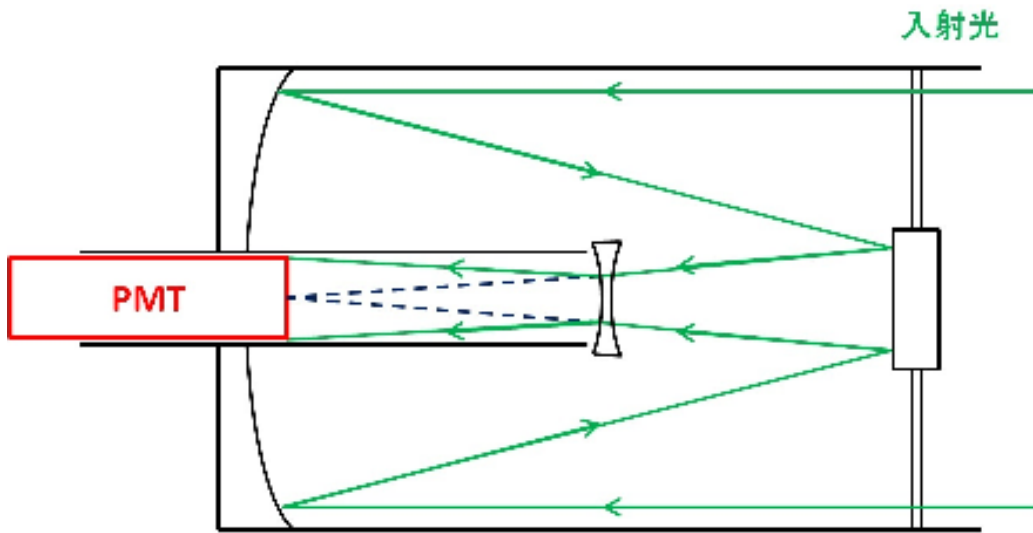


図 5.40 凹レンズによる集光光の発散予想

このアクリライト板及び凹レンズは 2011 年春に設置予定である。

第6章 まとめ

LIDAR@CLF デバイスの開発・設計を行い、CLF へ LIDAR システムの導入を行い、波形を取得した。LIDAR@CLF デバイスは高高度域観測用と低高度域観測用の 2 種類の PMT を備えているが、高高度観測用 PMT は低高度域観測用の PMT よりも低い高度までしか観測できていないという結果であった。この原因として高高度域観測用の PMT に取り付けられたシュミットカセグレン式集光鏡のシュミット補正板が CLF から射出されるレーザーの波長域の光を大幅に遮断する特性を持つことが挙げられ、シュミット補正板の変更先として紫外光領域において高い透過率を持つアクリル板の選定・加工を行った。また、PMT への印加電圧をある程度高くすると観測される波形にはオーバーシュートが見られるという問題に対しても、凹レンズ選定と凹レンズの取り付け用パーツを作成した。2011 年 2 月現在、この問題に対する対策を実際に CLF で試している段階であり、現地からの報告が待たれるところである。

参考文献

- 宇宙線（改訂版）裳華房 小田 稔
- The atmospheric calibration of fluorescence technique in the Telescope Array
Private Communication 富田 孝幸
- テレスコープアレイ大気蛍光望遠鏡のためのイベント再構成ソフトウェアの開発と極高エネルギーニュートリノの探索
大阪市立大学 修士論文 平成 21 年度 藤井 俊博
- 宇宙線望遠鏡計画における LIDAR による大気透明度測定
山梨大学 修士論文 平成 20 年度 露口 勇輔
- LIDAR による大気透明度測定データの解析
山梨大学 卒業論文 平成 21 年度 奥 大介
- 宇宙線望遠鏡実験で使用しているバッテリーの耐久試験およびバッテリー寿命に関する解析
山梨大学 卒業論文 平成 21 年度 山口 隆二

謝辞

本研究に当たり、担当教員である本田建教授をはじめ、多くの方々のお世話になり、ご協力頂いた多くの方々にこの場を借りて感謝の意をしめさせていただきます。

同大学の

大内英俊教授、古屋信幸教授、北村敏也教授には強度計算にあたり助言・ご指導をいただきました。深く感謝しております。

張本鉄雄教授、金蓮花准教授には凹レンズの選定及び光学知識の面において助言・ご指導をいただきました。深く感謝しております。

堀井宏祐助教授、保坂正信氏には CAE シミュレーションにおいてご協力いただきました。深く感謝しております。

本田建教授、富田孝幸氏、鵜飼久氏、相田龍太氏、西森祐平氏、奥大介氏、柴田文哉氏、丸尾将寛氏、山口隆二氏、池田誠氏、利藤万鵬氏、新聞健司氏、向井啓兒郎氏、町田和広氏、秋山優太氏には研究活動に対する助言・協力だけでなく、日常生活においても支え、励ましていただきました。深く感謝しております。

三菱レイヨン株式会社様にはアクリライト#000 を提供していただきました。深く感謝しております。

皆様のご指導やご協力がなければ本論文の完成はありませんでした。心より感謝しております。ありがとうございました。