

2010 年度 卒業論文

GPS と LED を用いた光電子増倍管 Linearity 測定用システム

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

T07MI047 利藤 万鵬

目次

第1章 宇宙線

1.1 宇宙線	1
1.2 空気シャワー	2
1.3 超高エネルギー宇宙線	4
1.3.1 宇宙線観測	4
1.3.2 GZK cutoff	5

第2章 Telescope Array Project

2.1 Telescope Array 実験概要	6
2.2 大気蛍光望遠鏡(FD)	7
2.3 地表検出器(SD)	8
2.4 大気のキャリブレーション・システム	9
2.4.1 LIDAR	9
2.4.2 CLF	12
2.4.3 IR カメラ	12
2.4.4 ラジオゾンデ	13

第3章 大気解析

3.1 大気における散乱現象	14
3.1.1 大気の散乱	14
3.1.2 Rayleigh 散乱	15
3.1.3 Mie 散乱	17
3.2 CLF-LIDAR システム	19
3.2.1 CLF の概要	19
3.2.2 CLF-LIDAR の導入	21
3.2.3 CLF-LIDAR の観測原理	24

第4章 PMT の Linearity 測定用システム的设计

4.1 PMT の Linearity 測定システムの設計	25
4.1.1 Linearity 測定の仕組み	26
4.1.2 Linearity 測定システムの構成	27
4.1.3 Linearity 測定システムの電気回路	28
4.2 LED Flasher の波形試験装置	29
4.2.1 LED	31
4.2.2 パルス発振装置(GPSy)	33
4.2.3 外部電源	34
4.2.4 光電子増倍管(PMT)	35
4.2.5 オシロスコープ	36
4.2.6 高電圧電源(HV)	37
4.3 LED Flasher の波形試験	38
4.3.1 ノイズ除去用コンデンサ試験	38
4.3.2 LED ケーブル選定試験	39
4.3.3 LED 光の強度による波形の変化	40
4.3.4 波形のオーバーシュート	43
4.3.5 PMT の受光面を考慮した LED の角度特性	44

第5章 PMT の Linearity 測定用システムの製作

5.1 CLF-LDAR 用 LED Flasher 回路箱の製作	47
5.2 LED Flasher 各部品の仕様	50
5.2.1 トランジスタ	50
5.2.2 ノイズ除去用コンデンサ	51
5.2.3 その他(基板、箱、端子など)	52
5.2.4 BNC ケーブル	53
5.2.5 LED 用ケーブル	54
5.2.6 電源用ケーブル	56

第6章 結論

6.1 まとめ	57
6.2 今後の課題	58

参考文献	59
------	----

謝辞	60
----	----

第 1 章 宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙空間には高いエネルギーを持った放射線が多く飛び交っている。その構成粒子は陽子が 90%、アルファ粒子(ヘリウムの原子核)が 9%でその他が 1%だと言われている。これらの宇宙を起源とする放射線を総じて宇宙線と呼ぶ。宇宙線は地球にも常時飛来し、1 m²あたり毎秒約 10000 個の粒子が降り注ぐ。

宇宙線の存在は 1912 年にオーストリアの物理学者 Victor Francis Hess の気球を用いた放射線の計測実験によって確認された。その後、様々な観測実験が行われ、10⁷ eV~10¹⁹eV の範囲に存在することが明らかになっている。これ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。

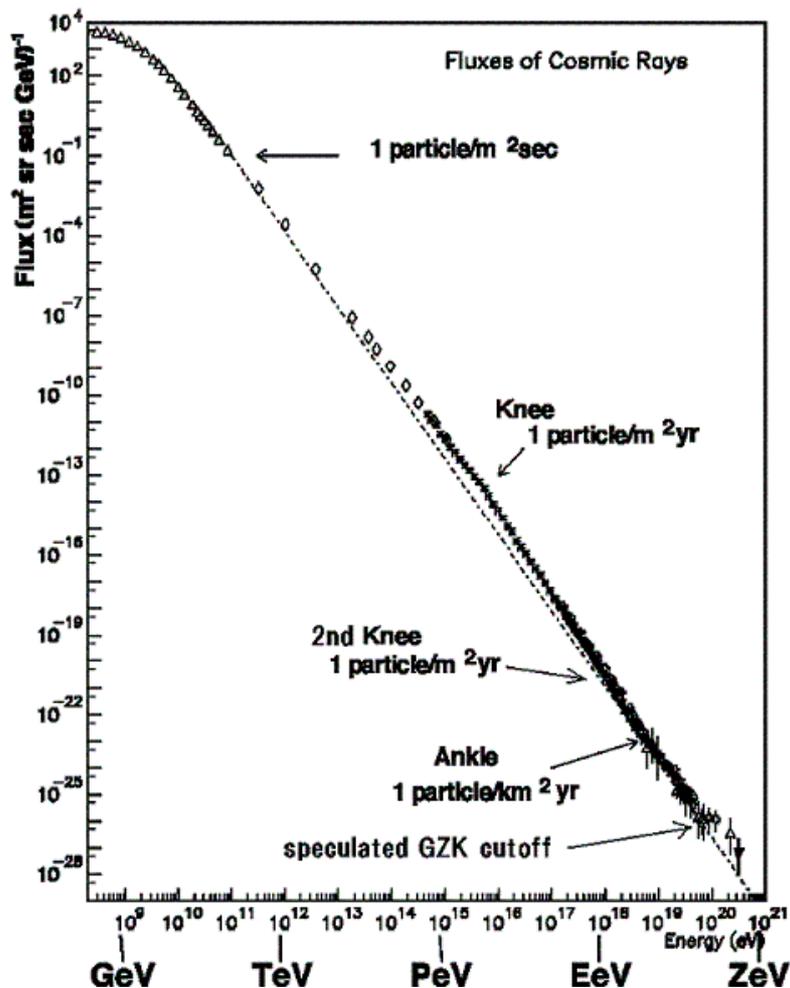


図 1-1 宇宙線のエネルギースペクトルの図

スペクトル図からわかるように、 10^{15}eV 付近と 10^{19}eV 付近にはそれぞれ折れ曲がりが見られる。 10^{15}eV 付近に存在する折れ曲がりには **knee**、 10^{19}eV 付近に存在する折れ曲がりには **ankle** と呼ぶ。銀河磁場による荷電粒子のラーモア半径は、

$$r_L = \frac{mv}{ZeB} \quad (1-1)$$

と表される。 m は粒子の質量、 v は磁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 $10^{18.5}\text{eV}$ 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 $10^{18.5}\text{eV}$ 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すると考えられている。

1960 年代後半、Greisen、Zatsepin、Kuzmin らは宇宙線のエネルギースペクトルが $6 \times 10^{19}\text{eV}$ 付近でカットオフを持つことを予言した。これは、 $6 \times 10^{19}\text{eV}$ 以上のエネルギーを持つ宇宙線は地球には届かないという予言である。このカットオフは予言した 3 人の頭文字から **GZK cutoff** と呼ばれている。しかし、近年では観測技術の上昇に伴い、**GZK cutoff** を超える超高エネルギー宇宙線が観測され続けている。これについては後の 1.3.2 にて詳しく記述する。

宇宙線がどのようにこれほど大きなエネルギーを持つように至ったのか。その加速メカニズムの一つとして挙げられるのが、天体衝撃波面を介した荷電粒子と磁気流体乱流との相互作用によるフェルミ加速である。天体衝撃波は、天体プラズマが希薄なため、衝撃波面を粒子が自由に横切って運動できる。そのため、粒子は電磁流体乱流によって上流と下流を何度も往復し、この間に大きなエネルギーを得ることができる。しかし、粒子を $6 \times 10^{19}\text{eV}$ に加速することの出来る天体は限られており、**GZK cutoff** を考慮するとそれらの天体が 100Mpc 以内に存在しなければならない。現在ではブラックホールや γ 線バーストなどが可能性として考えられる。

1.2 空気シャワー

宇宙から地球に入射してくる宇宙線を一次宇宙線と呼ぶ。きわめてエネルギーの高い一次宇宙線が大気に突入すると、大気中の原子核と衝突して多くの二次粒子ができる。これらを総じて二次宇宙線と呼ぶ。この二次宇宙線がさらに衝突を繰り返して核子カスケード

を作る。この核子カスケードを増加させるのは π^\pm である。カスケード過程の間に行われる多数の π^\pm にまじって、その半分程度 π^0 もつくられる。 π^0 は寿命が短いので2個の γ に崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1-2)$$

γ は大気中で電子と光子の電磁カスケードシャワーを発達させる。核カスケードの中には各世代に多種多様なエネルギーの π^0 があるので、大気中のいろいろな高度に始まる多種多様なエネルギーの電磁カスケードシャワーが発達し、多数の電子及び γ を地上に降らす。

核カスケードの π^\pm の一部分、特に後世代でエネルギーの低くなった π^\pm の大部分は崩壊して μ^\pm が生成される。

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1-3)$$

このようにして最初1個の粒子が大気中を降下するとともに電子、 π^\pm 、 μ^\pm 、K粒子、核子の大量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。空気シャワーの模式図を図1-2に示す。

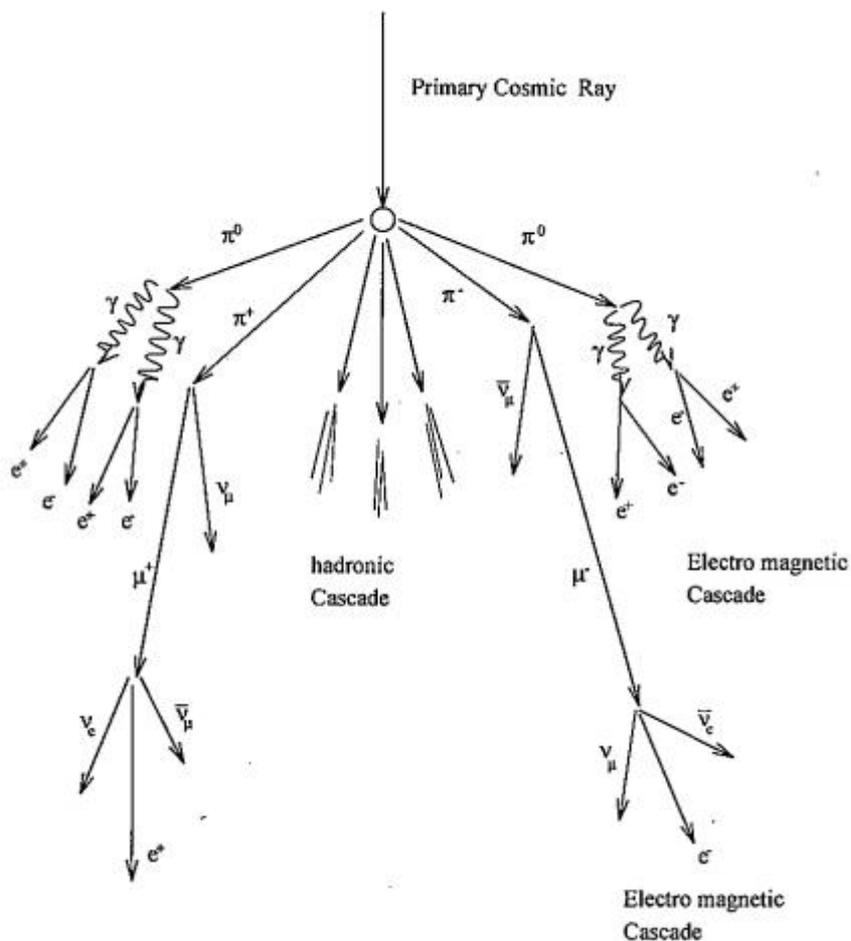


図 1-2 空気シャワー

1.3 超高エネルギー宇宙線

1.3.1 宇宙線観測

GZK cutoff を超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線が実際に地球に飛来しているかどうかを観測した代表的な実験が、Akeno Giant Air Shower Array(AGASA)実験と High Resolution Fly's Eye(HiRes)実験である。

AGASA 実験は 1990～2004 年にかけて、山梨県北杜市明野にて行われた実験である。観測に使用したのは地表検出器で、これを 100 k m²の地表に配置して宇宙線の空気シャワー粒子を検出するものであった。その有効観測立体角は約 150(k m²・sr)。この実験において 10²⁰eV を超える最高エネルギー宇宙線が 11 例観測されており、GZK cutoff を否定している結果となっている。それに対して HiRes 実験では GZK cutoff がある結果が出ている。HiRes 実験は 1997～2006 年にかけて、アメリカ合衆国ユタ州にて行われた実験である。使用した検出器は大気蛍光望遠鏡で、空気シャワーにより発生する大気蛍光を捕らえるものであった。有効観測立体角は 500(k m²・sr)。

この二つの実験では矛盾する結果が出たが、どちらの実験も統計数が十分ではなく、エネルギー系統誤差も AGASA 実験は 18%、HiRes 実験は 21%と大きかった。そのため、超高エネルギー宇宙線の存在は現在も確定できておらず、その起源も不明のままである。図 1-3 に AGASA と Hires が観測した宇宙線エネルギースペクトルを示す。

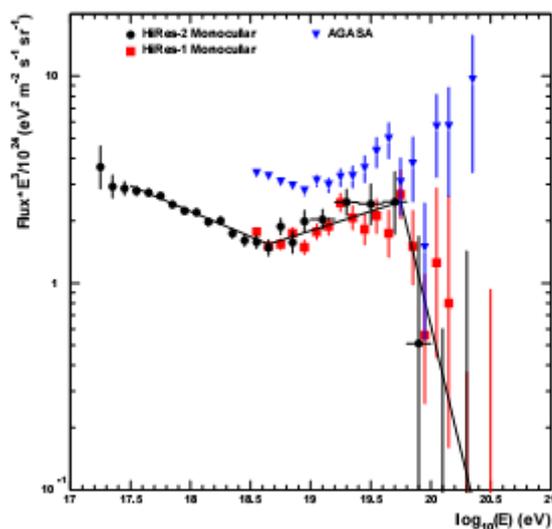


図 1-3 AGASA と HiRes が観測した宇宙線エネルギースペクトル比較

1.3.2 GZK cutoff

宇宙線は地球の大気に突入する前は宇宙空間を伝播してくるが、宇宙空間は 2.7K の宇宙背景放射で満たされている。宇宙背景放射はビッグバンの残光で、全天球上からほぼ等方的に観測されるマイクロ波のことである。そのスペクトルは 2.7K の黒体放射に極めてよく一致している。6×10¹⁹eV 以上の宇宙線が発生すると、この 2.7K の宇宙背景放射と衝突を重ねるうちにエネルギーを減らされ、1.5 億光年程度の間には必ず 6×10¹⁹eV 以下になる。この 6×10¹⁹eV という値はアインシュタインの特殊相対性理論に基づくローレンツ変換から求められたものである。よって、6×10¹⁹eV を超える超高エネルギー宇宙線が観測される理由として、現時点でいくつかの原因が考えられている。

- ・ 1.5 億光年以内に未知の超高エネルギーの発生源が存在する

超高エネルギー宇宙線の発生源が 1.5 億光年以内に存在すれば、6×10¹⁹eV 以上のエネルギーを持って地球に飛来してくる。超高エネルギー宇宙線の起源として、超新星爆発、γ線バースト、活動銀河中心核、中性子星、電波銀河などが考えられるが、現在の理論ではそれらの天体では超高エネルギー宇宙線は発生させることは不可能である。よって、1.5 億光年以内に未知の天体が存在して、それが発生源もしくはもっと効率のよい粒子加速機構になっている可能性がある。

- ・ 特殊相対性理論が超高エネルギー領域で破れている

6×10¹⁹eV という値は特殊相対性理論のローレンツ不変性から求められたものである。特殊相対性理論はアルベルト・アインシュタインが 1950 年に発表した物理学の理論で、光速不変の原理「真空中の光の速さは、光源の運動状態に影響されない一定値である」と特殊相対性原理「お互いの等速度で運動しているすべての慣性系において、すべての基本的物理法則は、全く同じ形で表される。それらの慣性系のなかから、なにか特別なものを選び出すことはできない」の二つを原理とする理論である。6×10¹⁹eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線が観測されるということは、この特殊相対性理論が高エネルギー領域において“ほころんでいる”ことになる。よって、特殊相対性理論には適応限界が存在する可能性がある。また、「相対性理論は正しいか」という記事が理化学研究所の HP で掲載されていることから、相対性理論全体を根本的に見直す必要があると主張する科学者もいる。超高エネルギー宇宙線の存在は物理学の根本を揺るがすものである。

これ以外にも、宇宙線と光が反応する確立の間違いや宇宙背景放射の密度の観測の誤りなどが説として存在する。また、観測自体が間違いだと主張する科学者もおり、超高エネルギー宇宙線は未だに解明されていない部分が多い。

この GZK cutoff が存在するかという問題に決着をつける為、2007 年から日米韓共同で Telescope Array(TA)実験が行われている。TA 実験は AGASA 実験が使用した地表検出器と、HiRes 実験が使用した大気蛍光望遠鏡の両方を用いたハイブリット実験である。これによって超高エネルギー宇宙線の真相を解明することが期待されている。

第 2 章 Telescope Array Project

2.1 Telescope Array 実験概要

Telescope Array(TA)実験は 507 台の地表検出器(SD)と、それらを取り囲む 3 ステーションに設置された 38 台の大気蛍光望遠鏡(FD)とを用いて超高エネルギー宇宙線を観測するハイブリッド実験である。図 2-1 にハイブリッド観測の概念図を示す。

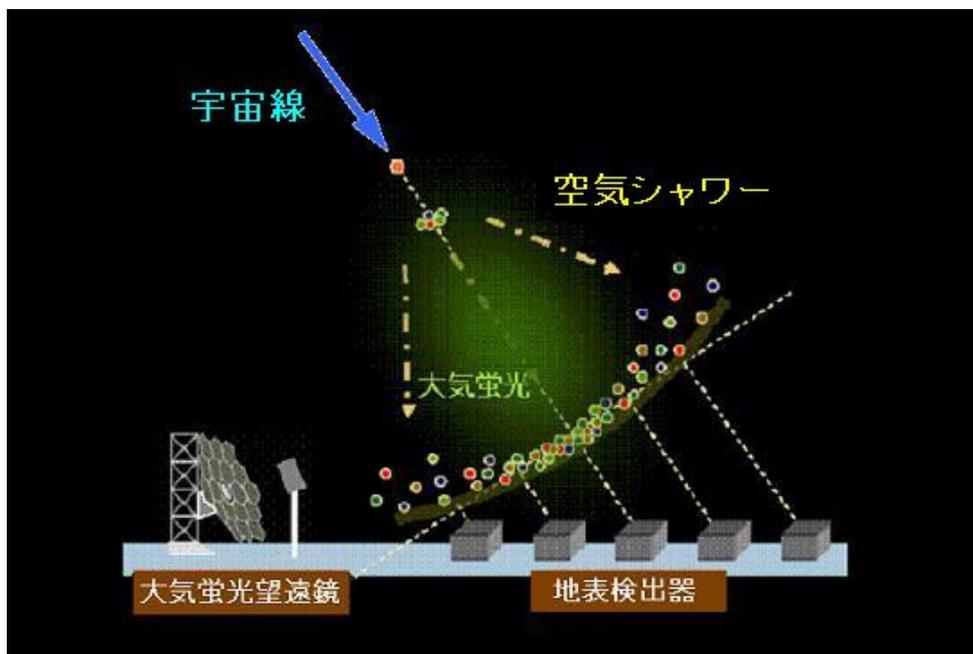


図 2-1 ハイブリッド観測の概念図

FD は宇宙線による空気シャワー現象から発する微弱な光を観測するため、月の出ていない暗夜のみ可能である。その観測時間効率は 10~12%程度であるが、宇宙線の到来方向や宇宙線エネルギーを精度良く決定できる。これに対して、SD を用いた観測は宇宙線の到来方向や宇宙線エネルギーの決定精度は多少落ちるが、24 時間連続観測が可能であるため、その観測効率は 95%以上にもなる。

実験場所は米国ユタ州ミラード郡、標高 1400m の砂漠地帯である。この場所は大気が乾燥していて透明度が非常に高く、晴天率が良く、町から離れているため人工光によるノイズが少ないので観測に適している。

実験装置の配置図を図 2-2 に示す。1.2km 間隔で基盤目状に SD を配置し、その SD アレイを取り囲む視野を持つように 3 箇所に FD ステーション(図中の BR,LR,MD)を設置してある。

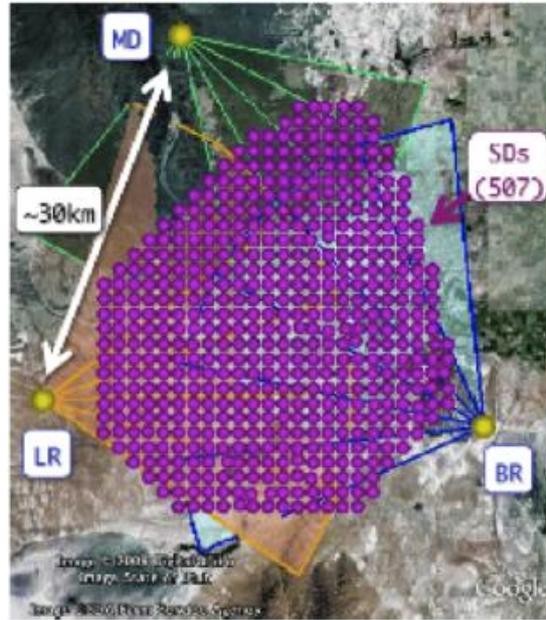


図 2-2 実験装置の配置図

2.2 大気蛍光望遠鏡(FD)

FD は空気シャワーにより発する大気蛍光を鏡で集光して観測する装置である。FD ステーションの外観を図 2-3 に示す。FD ステーションには望遠鏡が上下に 6 台ずつ計 12 台設置されている。図 2-4 に上下 2 台の FD の外観を示す。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 度となっている。



図 2-3 FD ステーション



図 2-4 大気蛍光望遠鏡

FDステーションは3箇所に設置されている。そのうち、Middle Drum(MD)サイトにはHiResで使用していたシステムを移築し、Black Rock Mesa(BRM)サイトと Long Ridge(LR)サイトにはTA実験のためにシステムを新築した。

FDは球面鏡とカメラで構成されている。球面鏡は曲率半径6.067m、口径3.3mで18枚の部分鏡からなる。合成鏡の中心部に部分鏡はなく、PMT較正のためにXenon flasherのシステムが取り付けられている。カメラには16×16に配置した光電子増倍管(略称PMT、浜松ホトニクス社製R6234)計256本が図2-5に示すように使用されている。図2-6に示すように各PMTの光電面にはBG3フィルター(Scott社製)が取り付けられており、観測対象となる波長域300~400nmの大気蛍光だけを通す。



図 2-5 カメラ本体

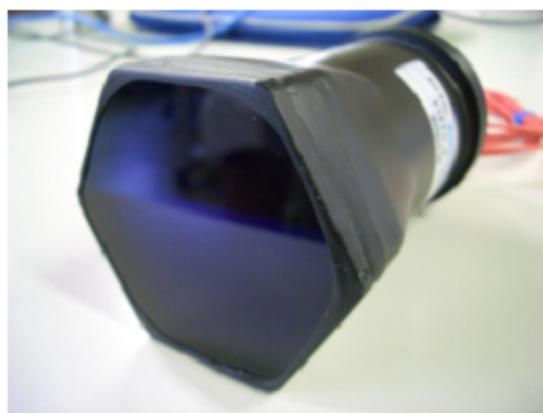


図 2-6 BG-3 フィルター付き PMT

2.3 地表検出器 (SD)

SDはプラスチックシンチレーターを使用して空気シャワーの電磁成分を検出する。プラスチックシンチレーターとは、荷電粒子が入射するとその物質中の電子を励起させ光を出すものである。シンチレーターから出た光をPMTで電気信号に変換し観測する。

図2-7はTA実験で使用しているSDである。ステンレス製のシンチレーターボックス内に溝が切られたプラスチックシンチレーターを2層入れ、その溝に光ファイバーを通してある。入射した荷電粒子をシンチレーターが光信号に変換し、その光信号を光ファイバーによってPMTに伝達される。シンチレーターボックスの内部構造を図2-8に示す。

SD同士の時間同期のためにGPSアンテナ(Motorola社製M12+)を使用しており、20ns以下の精度で同期されていて、無線LANアンテナにより2.4GHz帯で通信塔と交信が可能である。また、砂漠には電源供給する場所がないため最大出力120Wのソーラーパネルと12V、100Ahrのバッテリーを装備して独立稼働が可能となっている。



図 2-7 地表検出器の外観



図 2-8 シンチレーターボックス内部

2.4 大気のキャリブレーション・システム

FD は空気シャワーからの微弱な蛍光を捉えて観測する。蛍光は大気を通して伝わってくるので、大気の透明度によって光が減衰する量が異なる。故に FD 観測において大気透明度を把握するのはとても重要である。大気透明度を観測するために現在、レーザーを光源とした LIDAR、CLF、赤外線を用いた IR カメラなどのキャリブレーションシステムを使用している。また、TA 実験では行っていないが、世界気象機関で行っているラジオゾンデの公表されたデータを使用している。以下の項目でこれらのシステムについて説明する。

2.4.1 LIDAR

Light Detection And Ranging(LIDAR)システムは Black Rock Mesa(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 の装置はドーム状に施設に格納されており、このドームを LIDAR ドームと呼ぶ。LIDAR ドームの開口部は方位角 360° 回転可能である。

LIDAR は大気中にレーザーを射出し、レーザーの後方散乱光を望遠鏡で集光し、PMT で光から電気信号に変換する。そのオシロスコープを PC で処理して消散係数を求める。その方程式については次の章で詳しく説明する。図 2-9 に LIDAR ドームの外観を示す。



図 2-9 LIDAR ドーム外観

LIDAR 受光部には Meade 社の LX200GPS-30 望遠鏡を改造して使用している。この望遠鏡は経緯台に乗せられており、副鏡の補正版は紫外線透過型のアクリル板(UVT000)に変更してある。また、PC 操作で任意の方向に向けることができる。望遠鏡の鏡筒わきにはレーザー光学系を乗せるための台がついてあるレーザーと望遠鏡を一体化することにより、両者のアライメントを保ったまま装置全体を任意の方向に向かせることができる。散乱光の検出器として PMT が取り付けられ、元の CCD カメラが外されている。

レーザー部では、Nd:YAG レーザーという非常に強力な紫外線レーザーを射出する。レーザーは出力が最大 4mJ で波長 355nm のものを使用している。出力の調整はレーザーヘッド内部に入っている減衰器を用いる。これは、モーター、ドライブ・アッテネータであり、モーターのステップ角度を変えることで出力を絞る装置である。LIDAR から射出されたレーザーは直線偏光しているので偏光面を一様にする $\lambda/4$ 水晶波長板を通す。ビームスプリッターを用いてビームの 10%を反射させてエネルギーセンサーに入射し、その信号を ADC に入力してエネルギーを測定する。透過させた 90%のエネルギーを持つレーザーは大気中に射出される。大気中で後方散乱された光は光電子増倍管(PMT)に入射し、その微弱な光は電気信号に変換され増幅される。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。図 2-10 では Meade 望遠鏡の写真を、図 2-11 では LIDAR のレーザー部の写真を掲載した。また、図 2-12 にて

LIDAR システムの概要図を示す。



図 2-10 望遠鏡(MeadeLX200GPS-30)

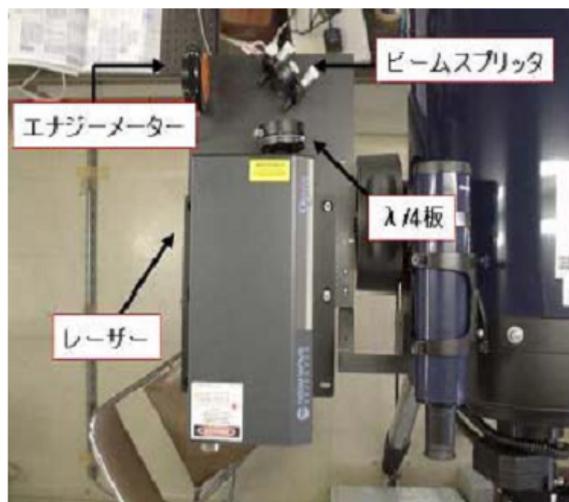


図 2-11 LIDAR のレーザー部

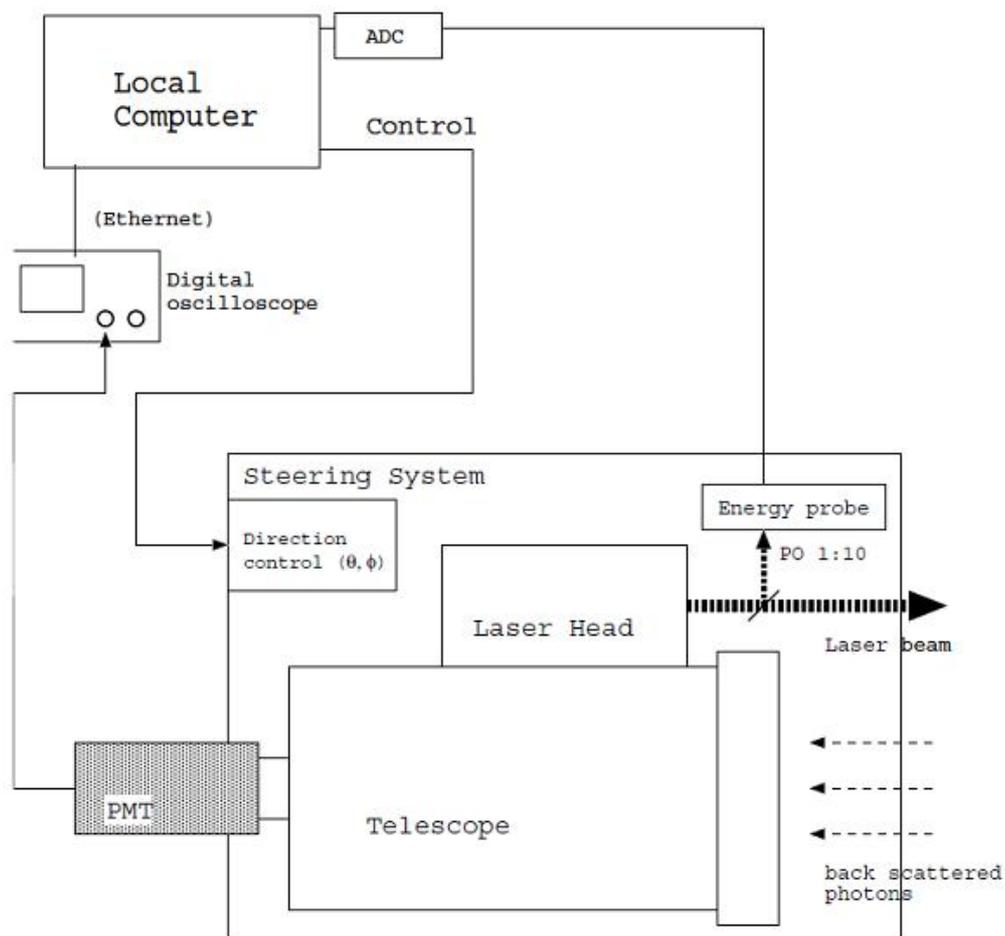


図 2-12 LIDAR システムの概要図

2.4.2 CLF

Central Laser Facility(CLF)は、中央レーザー装置のことである。CLFの装置を収納したコンテナは3台のFDステーションの中央に位置しており、垂直に紫外線レーザーのパルスを射出し、大気散乱の側方散乱光をFDで観測することでFDのキャリブレーションを大気透明度も含めて測定するシステムである。CLFコンテナはFDステーションから離れているため、遠隔操作をしている。また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てある。現在、CLFはFD観測中30分毎にレーザーを射出している。図2-13にCLFコンテナの写真を示す。なお、CLFの内部構造及び作動原理については次章にて詳しく説明する。



図 2-13 CLF コンテナの外観

2.4.3 IR カメラ

IR(Infrared)カメラは、可視光をカットする赤外線フィルムを用いて、赤外線だけの撮影を行っている。赤外線の波長は可視光より長いので散乱しにくい。光の撮像であるため、夜間でも撮影できる。赤外線を捉えることで大気の色度を測定し、その色度をカラーバーに変えて明瞭な画像を得ることができる。FD観測では、FD視野内に雲の有無を観測するのに使用している。図2-14はIRカメラの外観、図2-15はIRカメラより撮影される画像である。



図 2-14 IR カメラの外観

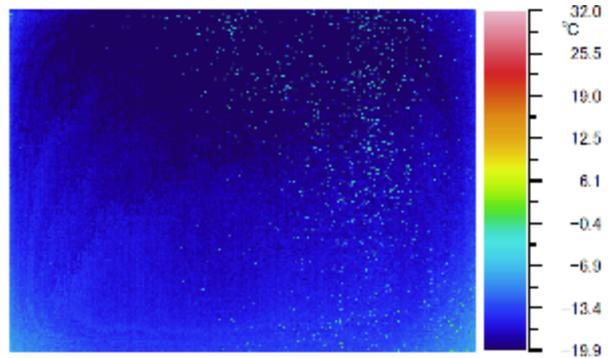


図 2-15 IR カメラにより撮影される画像の例

2.4.4 ラジオゾンデ

ラジオゾンデ(radiosonde)とは無線機付きの気象測定器である。気球に乗せて飛ばすことで、地球全体の大気高層の大規模な流れや気候の変動を把握する事を目的としている。このため、世界中に点在している世界気象機関 (WMO) に登録されている高層気象観測地点 (約 900 ヶ所) で同時刻 (世界標準時刻(UT)の 0 時と 12 時) に観測を行われており、各国とのデータ交換、公開がなされている。ラジオゾンデは主に気圧、気温、露点を測定し、さらに風力、風向も観測するものをレーウィンゾンデ(Rawinsonde)という。ここで用いられる測定器の 1 つである明星電器株式会社製の RS2-91 型レーウィンゾンデの外観を図 2-16、構造の概念図を図 2-17 に示す。

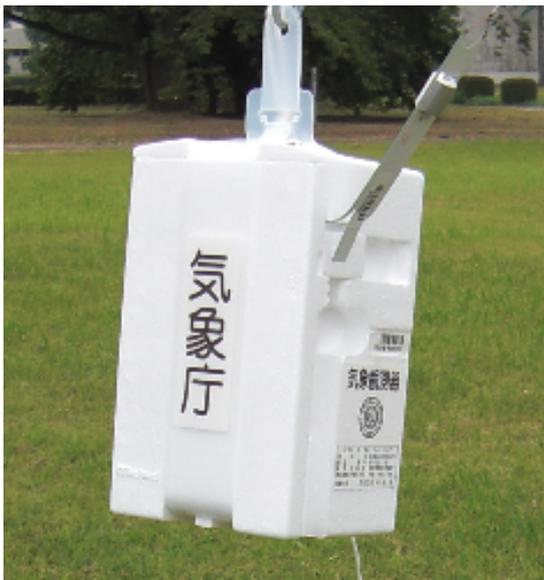


図 2-16 レーウィンゾンデ外観

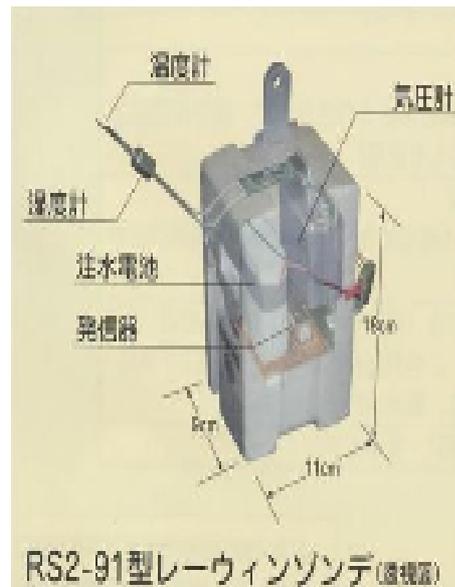


図 2-17 レーウィンゾンデ構造図

第3章 大気解析

3.1 大気における散乱現象

FD は空気シャワーが発する大気蛍光を捉えることで宇宙線のエネルギーを観測している。このエネルギーを決定する際の大気蛍光は、大気を伝播して測定されているため、大気透明度は大気蛍光の観測に大きく影響する。

ここでは、大気における光の散乱現象について説明する。

3.1.1 大気の散乱

光が大気を伝播する際、一般的に光の強度は大気中の分子やエアロゾルによって吸収・散乱された光の強度は減衰する。エアロゾルとは大気中に浮かぶ塵や水蒸気などの分子より大きい散乱を示している。光が単位面積高さ 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 、散乱体の単位面積あたりの個数を N とする。入射光量 I がこの媒質で散乱する割合 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。 I_0 は初期光量である。また α 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 $\alpha = N\sigma$ とすると

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3-3)$$

と表すことができる。ここで α は消散係数と呼ばれる光の減衰率を示した値で、この消散係数 α は主に大気中の大気分子に起因している散乱とエアロゾルに起因している散乱の 2 つにより決定される。そして大気分子に起因している散乱は **Rayleigh** 散乱と呼ばれ、エアロゾルによる散乱は **Mie** 散乱と呼ばれている。

このランバート・ベールの法則より、大気の大気透明度は消散係数 α で表すことができる。よって FD を観測する上で大気中の消散係数を精度よく観測することが重要である。

3.1.2 Rayleigh 散乱

Rayleigh 散乱とは大気中の、光の波長にくらべてはるかに小さい粒子または分子による散乱で、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。Rayleigh 散乱は透明な液体や固体中でも起きるが、典型的な現象は気体中の散乱である。大気分子 1 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考えて、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。

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

$$N_0 = 2.54 \times 10^{25} [\text{個} / \text{m}^3] \quad (3-5)$$

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

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = \frac{5791817}{238.0185 - \left(\frac{1}{\lambda[\mu\text{m}]}\right)^2} - \frac{167909}{57.362 - \left(\frac{1}{\lambda[\mu\text{m}]}\right)^2} \quad (3-6)$$

で近似できる。よって入射波長 355nm における屈折率

$$n_0 = 1.000286 \quad (3-7)$$

が求められる。また、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。以上から、

$$\sigma = 2.76 \times 10^{-30} [\text{m}^2] \quad (3-8)$$

である。また、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、

$$N = N_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (3-9)$$

として求められる。

以上よりある高さにおける Rayleigh 散乱に消散係数 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 のように前後方向に対称散乱を起こすことが分かる。

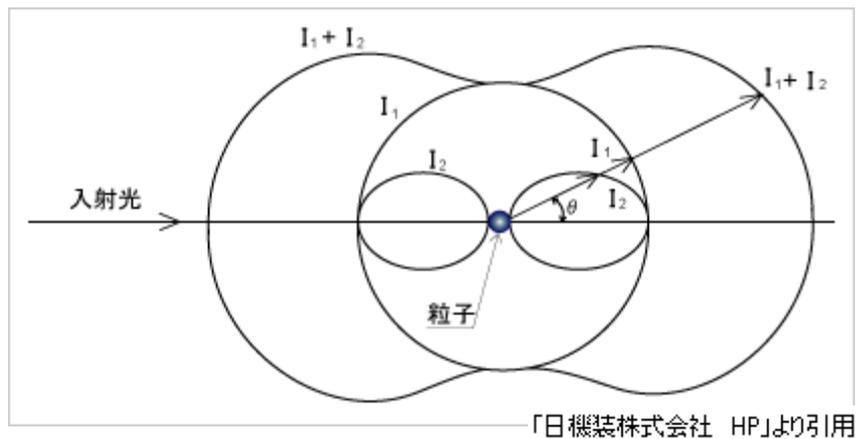


図 3-1 Rayleigh 散乱の散乱光強度分布

3.1.3 Mie 散乱

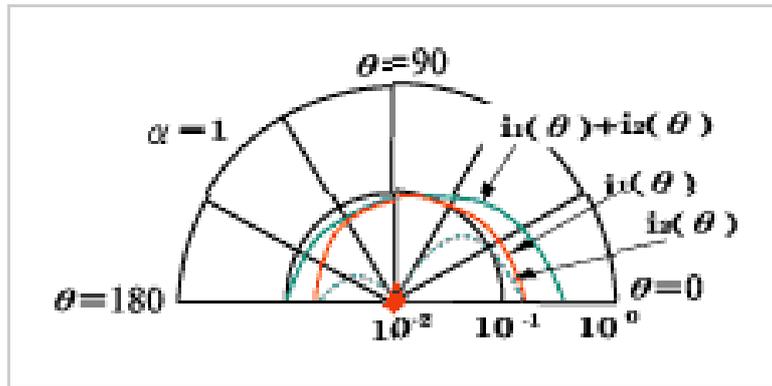
Mie 散乱とは、光の波長以上の大きさの球形の粒子による光の散乱現象である。Rayleigh 散乱よりも粒子が大きいため Rayleigh 散乱のように単一の双極子放射として扱うことが出来ない。そのため粒子の振る舞いが非常に複雑となり、G.Mie は 1988 年に、均一媒質内に存在し任意な直径を持ち任意材質の均一な球による平面単色波の回折を、電磁気学によって取り扱い厳密な解を得た。散乱粒子からの距離 R 、散乱角 θ における散乱光強度 I_θ は式 (3-12) のようになる。

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} (i_1 + i_2) \quad (3-12)$$

λ は波長を示しており、 i_1 と i_2 は垂直方向を水平方向のミー強度を示している。そして強度パラメータ i_1 、 i_2 は屈折率 m 、粒径パラメータ α 、および散乱角 θ の関係で表される。この式から散乱光強度は波長の 2 乗に比例していることが分かる。また粒径パラメータは散乱体の半径を a とすると、

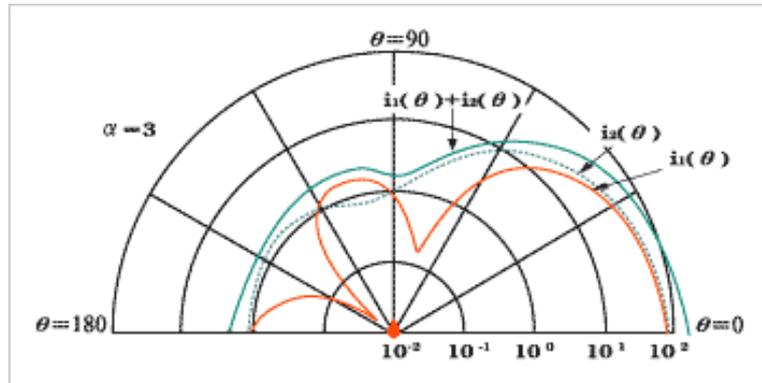
$$\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (3-13)$$

と示せる。また散乱パターンの角度分布は Rayleigh 散乱と違い Mie 散乱は図 3-2、図 3-3、図 3-4 のように前方散乱の方が後方散乱に比べると遥かに強く発生する。図 3-2 は $\alpha = 1$ 、図 3-3 は $\alpha = 3$ のとき、図 3-4 は $\alpha = 10$ のときのものを示している。 α は粒径パラメータを示しており α が 1 よりもずっと小さいレベルの分子が Rayleigh 散乱である。また光路に対して角度 0、つまり光の進行方向の強度と垂直方向の強度を比較すると α が大きいほど光の進行方向に発生する散乱光の方が大きくなっていくのが分かる。そしてこの散乱パターンはエアロゾルの種類が異なるとその様相は変化する。



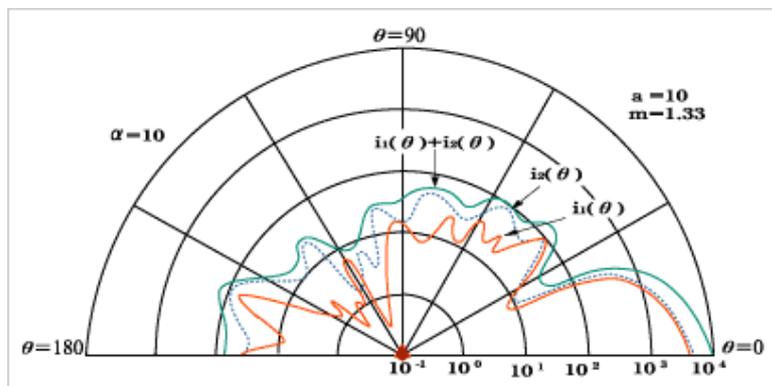
「日機装株式会社 HP」より引用

図 3-2 粒径パラメータによる散乱分布の変化($\alpha=1$)



「日機装株式会社 HP」より引用

図 3-3 粒径パラメータによる散乱分布の変化($\alpha=3$)



「日機装株式会社 HP」より引用

図 3-4 粒径パラメータによる散乱分布の変化($\alpha=10$)

そのため Mie 散乱は Rayleigh 散乱と違い、日時や場所による変化が大きい。よって Mie 散乱は計算ではなく実際に観測で求めなければならない。大気の大半は、Mie 散乱と Rayleigh 散乱で占めているため観測による消散係数と計算で求めた Rayleigh 散乱の消散係数差で Mie 散乱の消散係数が導き出せる。

3.2 CLF-LIDAR システム

3.2.1 CLF の概要

大気を測定する新しいシステムとして、CLF-LIDAR が導入された。ここでまず CLF について詳しく説明する。CLF は 3 台の FD の中心に建設されており、FD 観測中に 30 分毎にレーザーを射出し、その側方散乱光を FD で観測して大気透明度を測定している。CLF は電力供給部、レーザー射出部と光学系制御部によって主要部が構成される。その他に環境管理部と通信アンテナが存在する。図 3-5 と図 3-6 に CLF 光学系の配置図とその写真を示す。また、CLF のレーザーを FD で受光するため、建設時は独自の受光部を所持していない。

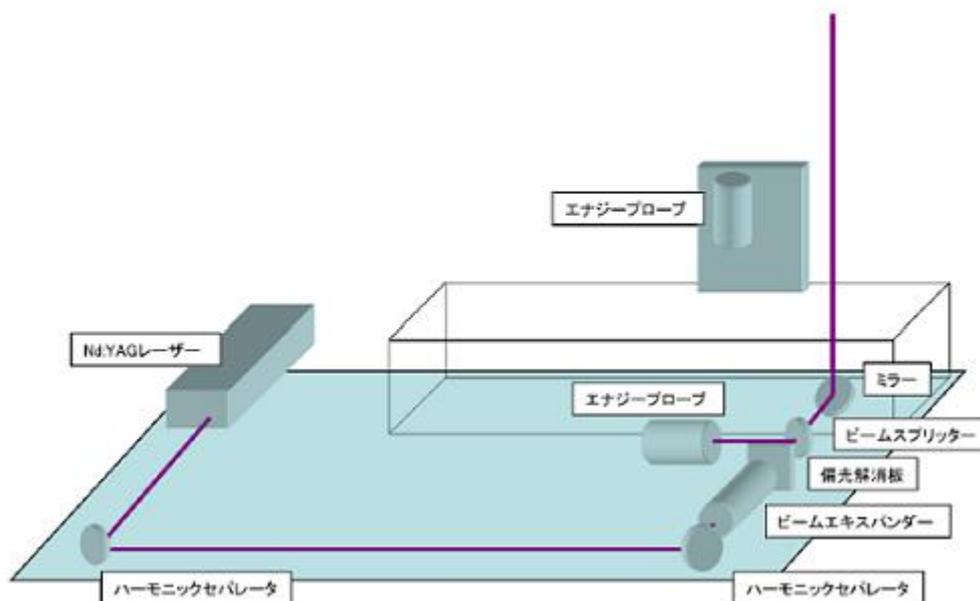


図 3-5 CLF 光学系の配置図

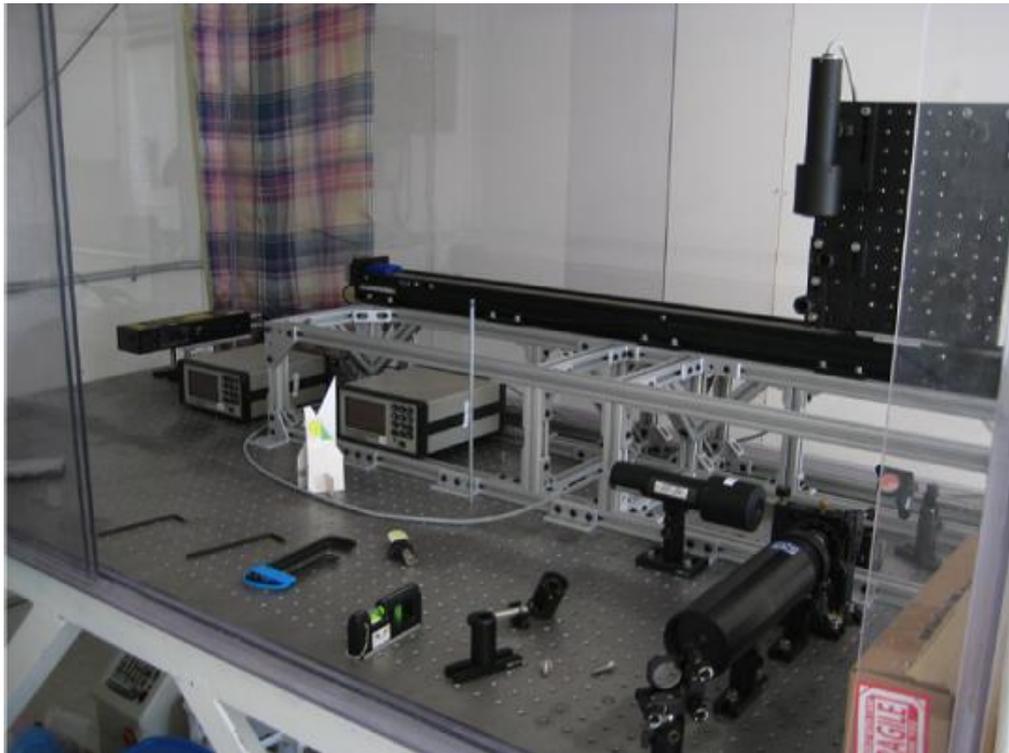


図 3-6 CLF 光学系の配置写真

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、 $\lambda/4$ 偏光板から構成されている。使用するレーザーは BRM の LIDAR システムと同じく 355nm(3 倍高調波)の水冷式 Nd:YAG レーザーである。射出されたレーザーは多種の光学系を介して調整される。まず 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。次にビームエキスパンダでレーザー径を 3 倍に拡張され後、脱偏光版によって脱偏光状態になる。その後レーザーをビームスプリッタによってその 10%を反射し、レーザー出力測定プローブによってレーザー出力を相対的に測定する。ビームスプリッタを透過したレーザーは、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、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、1 回観測終了毎に垂直の光軸上に移動してレーザーの絶対出力測定を行う。この絶対出と相対出力の同時測定によって両者の相関を測定し、射出出力を見積もることが可能になる。

CLF にて使用するレーザーは水冷式であり、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。これを防止するため、CLF は安定な自動温度管理及び発電機の遠隔制御を行っている。

まず、CLF コンテナ内部の温度管理のため、1 分刻みで内部温度を測定し記録している。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コズミック・レイ・センター (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

これにより、CLF は 2008 年 12 月から現在まで安定に作動している。

3.2.2 CLF-LIDAR の導入

大気透明度を観測するシステムとして、前述の CLF と前章 2.1.4 の BRM 付近に設置された LIDAR の二つを紹介した。ここで、その二つのシステムのそれぞれの特徴をまとめる。

利点： BRM の LIDAR システムは高度ごとの消散係数を観測できる

CLF は 30 分毎の観測が可能

不利点： BRM の LIDAR システムの観測は 1 日 2 回のみ

CLF は受光デバイスがなく、FD によって高い高度のみ観測

このように、この二つのシステムは相反する利点と不利点を持っている。そこで、この二つのシステムの利点を併せ持つ CLF-LIDAR システムが考案された。CLF-LIDAR とは、CLF コンテナに鉛直型の受光デバイスを取り付け、CLF の射出したレーザーの後方散乱光を観測するシステムである。今までの CLF はレーザーを射出するのみで、受光のシステムは存在しなかった。そこに LIDAR システムを独自の受光システムとして搭載させた。これにより、CLF の射出するレーザーの後方散乱光を集光し、30 分に 1 回の LIDAR 観測が可能となった。また、この方法によって高度ごとの消散係数を得ることができる。このシステムの導入により、今まで以上に正確に大気透明度の観測が可能となる。

CLF-LIDAR の製作と設置は 2010 年夏に行われた。図 3-7 が搭載を完了した CLF コンテナの写真である。屋上の架台に乗っているのが CLF-LIDAR の受光部を収納したカバーボックスである。

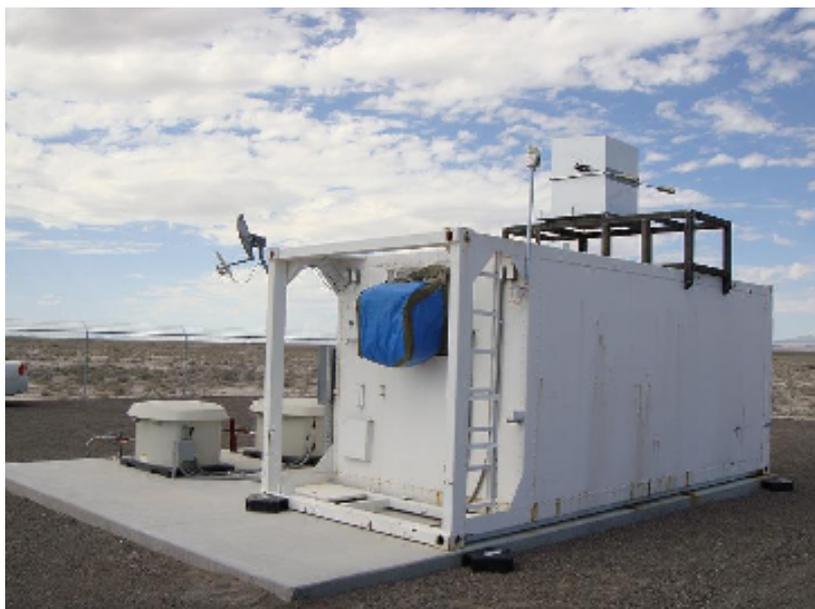


図 3-7 LIDAR システムを搭載した CLF コンテナ

CLF-LIDAR のカバーボックスはプレートと架台から構成されるプラットフォームに乗せられている。光電子増倍管(PMT)を外から取り外し等の作業を行えるよう、架台の高さを50cmとしている。プレートは8個のネジによって架台に固定されていて、ネジを回すことによって受光軸を鉛直になるよう調整している。カバーボックスと集光鏡固定台はこのプレートの上に固定されている。また、カバーボックスには開閉モータが取り付けられており、蓋は自動に開閉する。

カバーボックス内には高高度域用受光デバイスと低高度域用受光デバイスが配置されている。高高度域用受光デバイスは H8643MOD 型(浜松ホトニクス製、管径:φ25mm、アッセンブリ:H8643)の PMT(R7899)を使用し、集光鏡を介して高高度域のエアロゾル透明度を測定する。集光鏡は LIDAR システムで使用しているものと同様のシュミットカセグレン式の CELESTRON 製、C11 S XLT 鏡筒を使用する。PMT の受光面には BG-3 フィルターを取り付け、その後ネジ 2 本によって集光鏡の受光部に固定されている。集光鏡は専用の集光鏡固定台に支持されている。

低高度域用受光デバイスは H3178-51 型(浜松ホトニクス製、管径:φ47mm、アッセンブリ:H3178-51)の PMT(R580)を使用し、集光鏡を通さずに低高度の散乱光を測定する。PMT には視野を狭くする保持筒を取り付けている。この筒は PMT を保持と共に、PMT に入る光を上方のみに絞る効果を持っている。保持筒の上方に同じ BG-3 フィルターを固定してある。この保持筒はアライメントパーツと呼ばれるホルダーに固定されており、アライメントパーツは集光鏡のアリミゾレールに固定されている。カバーボックスの内部構造を図 3-8 に示す。

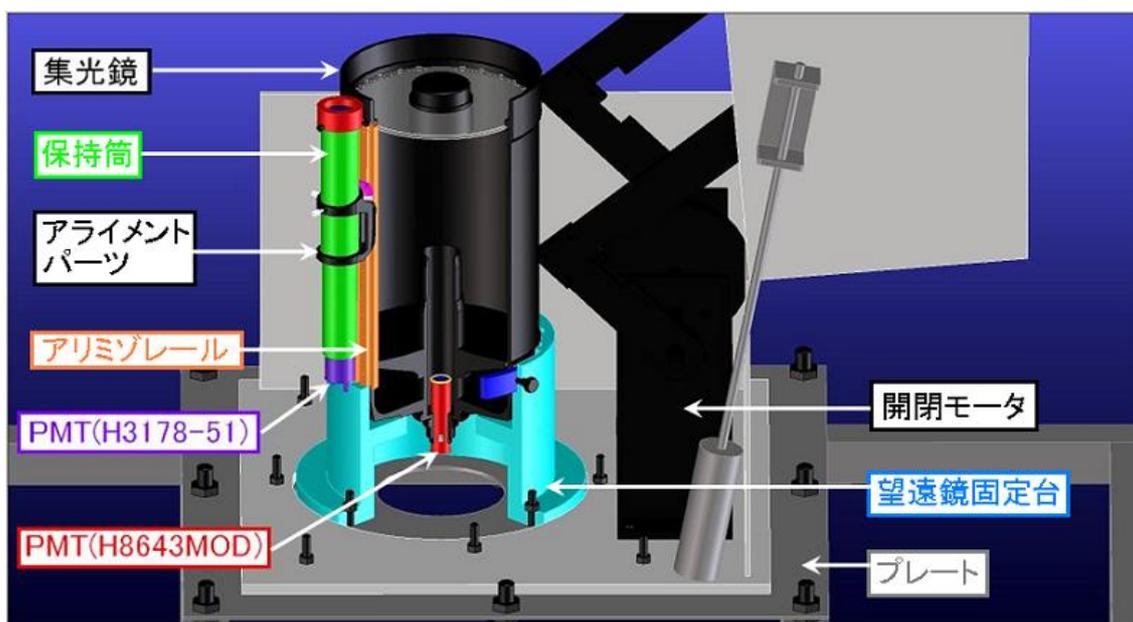


図 3-8 CLF-LIDAR カバーボックスの内部構造

CLF コンテナ内には、PMT を作動させる HV は松定プレジジョン製の高電モジュール電源(J4-3N)を配置し、その電源としての AC-CD コンバータと、シグナル電流の供給源として直流安定化電源(KIKUSUI 社製の PMC18-2A)も追加された。また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 を使用した。そして、PMT から送られる信号を波形データとして取得するために、Tektronix 社製のオシロスコープ(ベンチトップオシロスコープ DPO3034)と、波形データを保存する LIDAR PC(Shuttle 社製 SB61G2)が新たに配置された。LIDAR システム導入後の CLF 全デバイス接続図を図 3-9 に、コンテナ内の LIDAR ようデバイス写真を図 3-10 に示す。

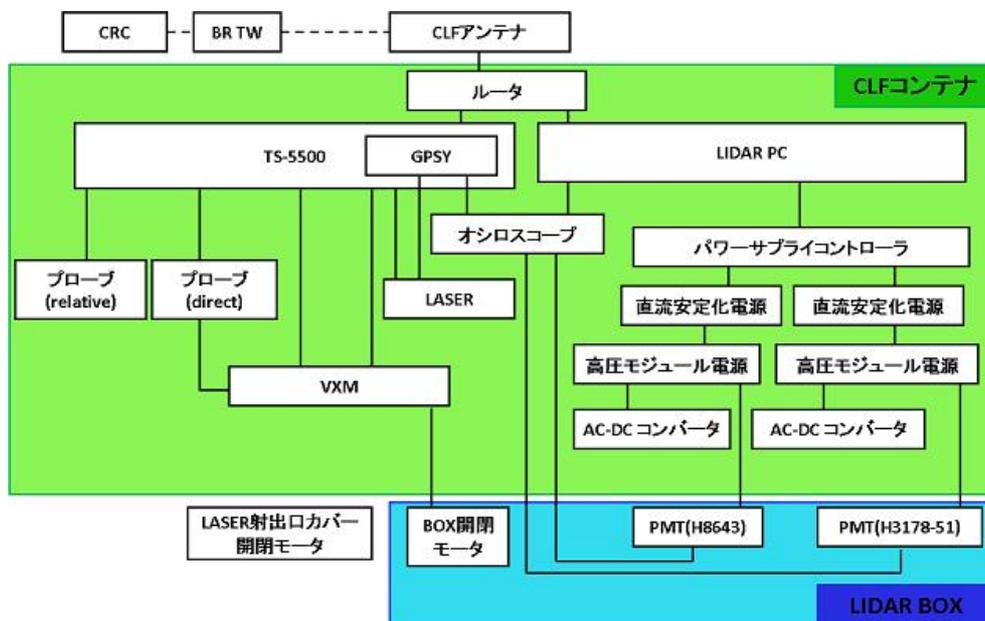


図 3-9 CLF 全デバイス接続図

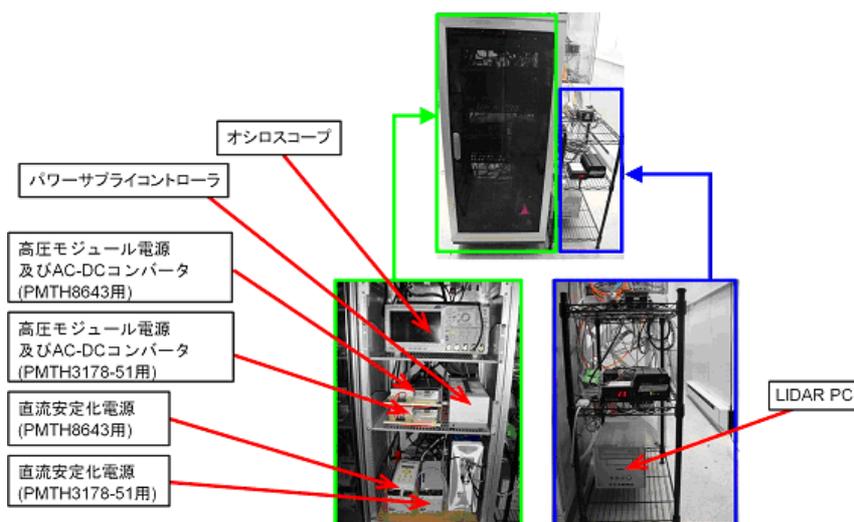


図 3-10 コンテナ内の LIDAR 用デバイス

3.2.3 CLF-LIDAR の観測原理

CLF-LIDAR は BRM で作動している LIDAR と同じ LIDAR 法を用いて大気の状態を観測。大気による散乱は主に大気中のエアロゾルによる Mie 散乱と大気分子による Rayleigh 散乱である。地表付近にはエアロゾルが多数存在するため、可視、赤外領域の散乱がエアロゾルによる Mie 散乱の影響が大きい。大気中の Mie 散乱は近似的に波長に逆比例するのに対して、Rayleigh 散乱は波長の 4 乗に逆比例する。このため紫外領域では Rayleigh 散乱の成分も大きい。また、上空ではエアロゾルの濃度が減少するので Rayleigh 散乱が重要になる。

LIDAR 法とは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。CLF-LIDAR による測定方法は観測するターゲットに発信時間の短いパルスレーザーを射出しそのターゲットからの後方散乱光を PMT が取り付けられた集光鏡によって捉えることにより大気の状態を測定するものである。概念図を図 3-11 に示す。

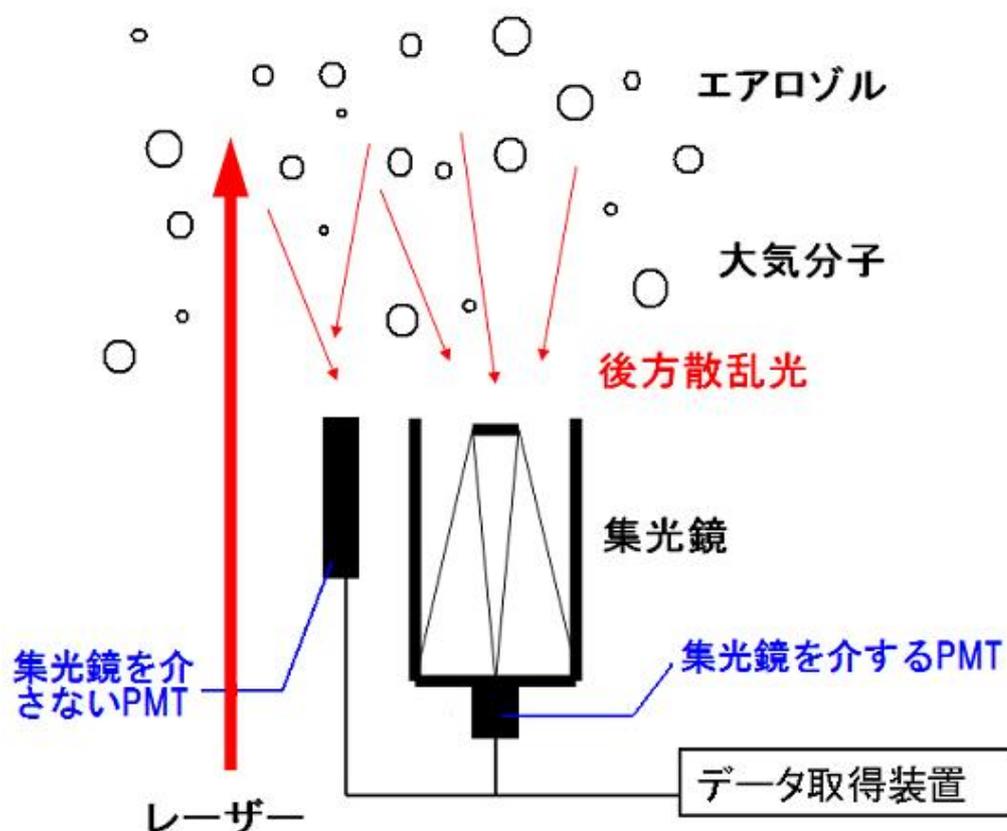


図 3-11 LIDAR の概念図

第4章 PMT の Linearity 測定用システムの設計

4.1 PMT の Linearity 測定システムの設計

CLF-LIDAR は、望遠鏡を通して観測する H8643MOD と、望遠鏡を通さずに観測する H3178-51 の二つの PMT を搭載している。CLF が垂直にレーザーを打ち上げ、その後方散乱光をこの状況の異なる二つの PMT を通してそれぞれ観測している。PMT において、レーザーを射出した近傍の後方散乱光がとても強いため、それが原因となって空間電荷効果を引き起こす。空間電荷効果とは、放出された電子の一部が PMT のダイノード間に停滞し、それによって生じた電場がダイノード間にかかる電圧を下げてしまう効果である。これによって、信号波形が線形性を失う。図 4-1 は空間電荷効果が生じている一例である。この図は、LIDAR の射出したレーザーの後方散乱光を PMT で観測し、その信号波形をオシロスコープで測定した結果である。横軸の時間を射出地点から散乱点までを距離に換算している。

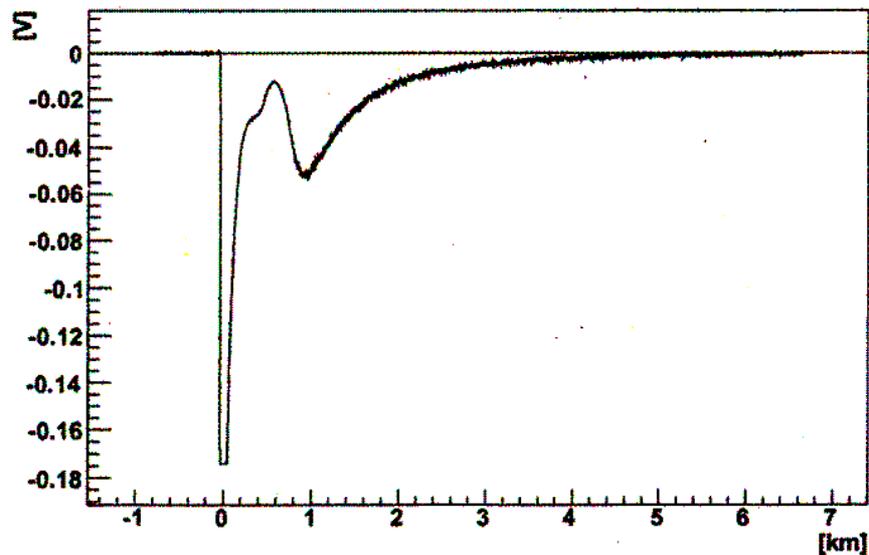


図 4-1 レーザーを射出した時の PMT 信号

図 4-1 の距離 0~1km 付近で空間電荷効果が起こっていると考えられる部分で、電圧が大きく落ちて、線形性がなくなっている。

CLF-LIDAR の二つの PMT においても空間電荷効果が生じることが予測される。そのため、PMT の Linearity を測定して、失われた本来の線形性を較正することが必要である。

それらを目的とした LED Flasher システムの設計を行った。

4.1.1 Linearity 測定の仕組み

ここで、図 4-2 を用いて Linearity 測定の仕組みについて説明する。なお、図中の I ~ IV のグラフは横軸が時間、縦軸が電圧である。

まず、図 4-2 の I はパルス波高が一定のパルス信号で、このパルス波高を V_0 と表す。

そして、II は電圧が高い部分においては実際の信号電圧より低くなってしまふ信号だと仮定し、その部分の値を較正することを目的とする。ここで、II のグラフの横軸(T)にて、電圧が高い部分で任意の点 X を取り、電圧が低い部分で任意の点 F を取る。そのときの電圧をそれぞれ V_{in-X} 、 V_{in-F} と表す。

II に I を足し合わせた信号がグラフ III である。このとき、赤い線の信号の上には本来ならば青線のようなパルス高が V_0 の均一なパルスが乗るが、II のグラフの仮定に従うとそうはならず、黒線のような不均一なパルスが乗る。これは、II において電圧が高い部分で信号電圧が低下するので、足し合わせたパルス波も同じ割合で低下することになるからである。よって、足し合わせたパルス波は、電圧の低い点 V_{in-F} におけるパルス高に変化はないが、電圧の高い点 V_{in-X} におけるパルス高は低くなる。

最後に、III の信号から II の信号を引いたのが、パルス波だけが残った IV のグラフである。IV を I と比較すると、点 X におけるパルス高が V_0 より低下している。この値を V_i と表すと、パルス信号の低下する割合は V_i/V_0 で与えられる。そして、II における信号も同じ割合で減少するので、点 X の本来の電圧を V_{cor} とすると、その値式(4.1)によって求められる。

$$V_{cor}(T) = V_{in-X}(T) \frac{V_0}{V_i(T)} \quad (4.1)$$

(4.1) 式の $V_{cor}(T)$ が較正された時間 T における電圧である。この電圧低下は IV のパルス高で $V_i \neq V_0$ の範囲で起きていることがわかる。その値をすべて較正することによって、本来の信号を導くことが出来る。

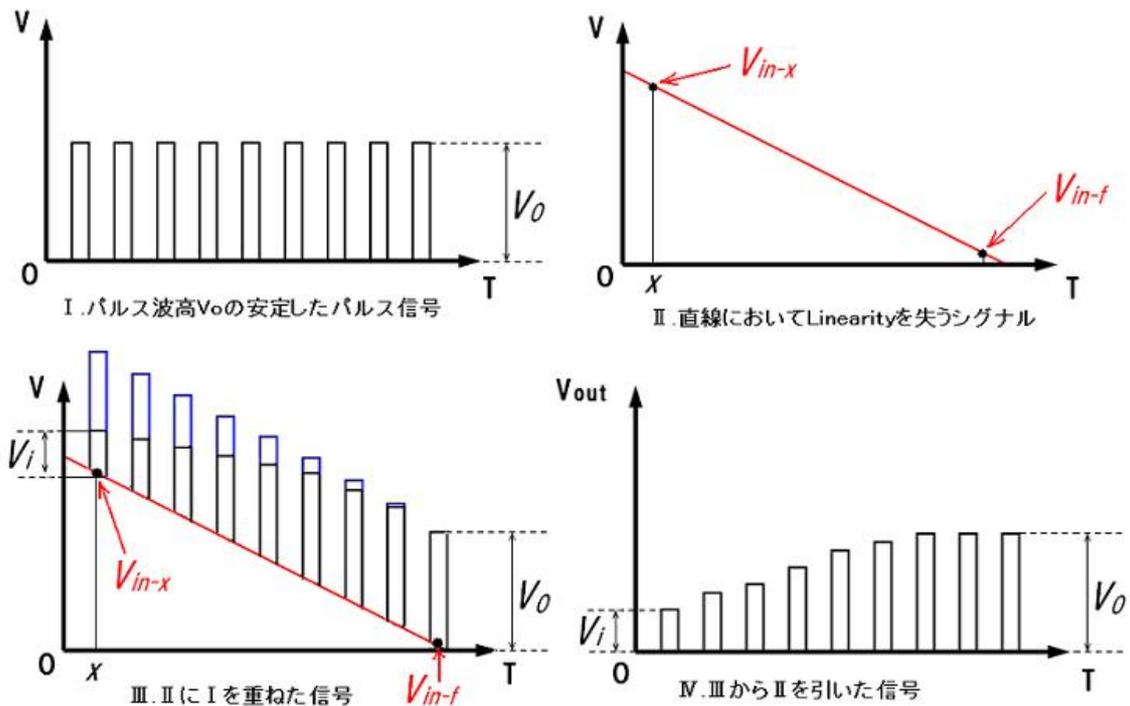


図 4-2 Linearity 測定の仕組み図

LED Flasher は LED を一定の光量で点滅させることによって、図 4-2 の I のような均一のパルス信号を PMT に送る装置である。これを LIDAR のレーザーのシグナルに重ね合わせることで、PMT の Linearity 測定を行う。

4.1.2 Linearity 測定システムの構成

LED Flasher システムを CLF-LIDAR に組み込んだ後の全体構成図を図 4-3 に示す。今回設計した LED Flasher は赤色で表示してある。LED と回路箱は CLF-LIDAR のカバーボックス内部に設置し、回路へ電力を供給する外部電源は CLF コンテナの中に置く。GPS によって制御されたパルス発信装置(GPSy)は現在 CLF でレーザーの射出を制御しているものを使用する。

ここで動作の流れを説明する。GPSy から 1V の安定したパルス波が発振され、回路箱に送られる。回路箱の中にあるのはトランジスタを用いたスイッチング回路で、送られたパルスをトリガーに LED と外部電源のスイッチングを行う。このパルスが 1V の時に外部電源と LED のスイッチが on になり、外部電源から電気が流れて LED が点灯。パルスが 0V の時にスイッチが off になり、LED が消灯。このように、LED は入力されたパルス信号の通りに点滅して、PMT に信号を送る。

実際の測定方法の手順を以下に示す。

- 1 : CLF-LIDAR のカバーボックスが閉じた状態で LED のみを光らせて PMT 信号を測定する。
- 2 : CLF-LIDAR のカバーボックスを開き、レーザーのみを射出して、PMT でシグナルを測定する。
- 3 : LED をレーザーに同期させ、同時に光らせて、PMT でシグナルを測定する。
- 4 : 3 番の結果から 2 番の結果を引いたものと 1 番を比較して、LED 信号が減少している部分について較正を行う。

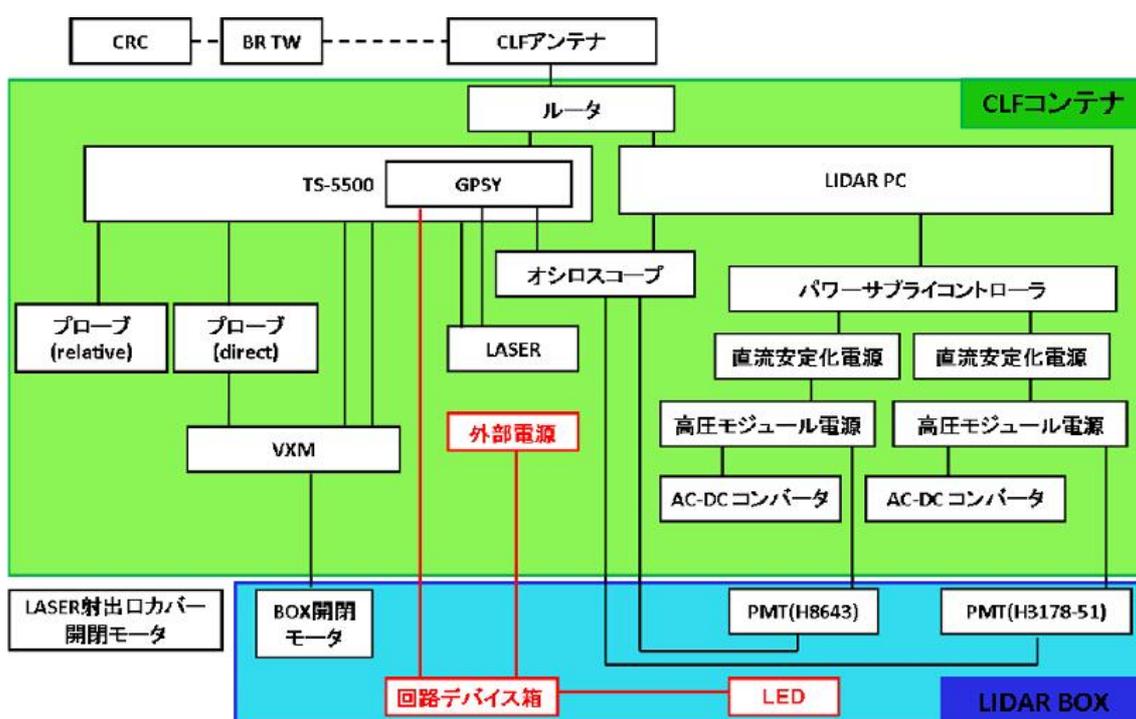


図 4-3 システムの全体構成

4.1.3 Linearity 測定システムの電気回路

LED Flasher の電気回路図を図 4-4 に示す。パルス発信装置(GPSy)から入力されたパルスがトランジスタのスイッチングのトリガーとなる。このパルスが 1V の時に、外部電源から LED への接続が on になり、外部電源から 5V の電圧が流れる。LED の最大電圧は 20mA の時で 4.0V である。LED 波形に 1V 以下のアンダーシュートがあるので、3.0V 以下の電圧をかける。よって、300Ω の抵抗を直列に入れて、LED にかかる電圧を 2.9V に調整した。0V の時にスイッチが off になる。トランジスタへ入力するパルスに対して、スイッチングの遅れをなくすため、トランジスタのベース側に 100pF の積層セラミックコンデンサを抵抗と並列接続に入れてある。

GPSy から回路へ信号を伝える同軸ケーブルは 10m で、そのマッチングを取るために 50

Ω の抵抗をいれてある。これは 5.2.4 の BNC ケーブルの仕様による値である。また、外部電源へ接続するケーブルも 10m で、電源から 2 種類のノイズを除去するため、 $22\mu\text{F}$ のタンタルコンデンサと 100pF のセラミックコンデンサというタイプの異なる 2 つのコンデンサを入れてある。

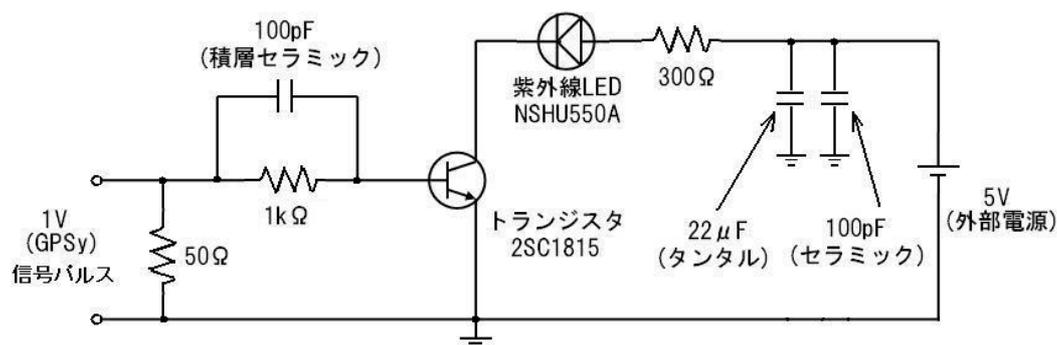


図 4-4 LED Flasher の電気回路図

4.2 LED flasher の波形試験装置

回路設計時の各種パーツ選定及び性能試験を行うため波形試験を行った。その時に使用した試験装置について説明する。

試験では、CLF-LIDAR のカバーボックスの代わりに、内面をつや消しブラックのラッカープレーで塗装したダンボール箱 (Size: 750mm × 550mm × 300mm) を使用した。本章において、この箱を「試験箱」と呼ぶ。

PMT は発泡スチロールで製作したスタンドの上に黒テープで固定し、それを外部光カット筒で包んである。この筒は LED 付近まで伸ばされ、外部光を遮断する。また、PMT と LED の間には反射光カット板を置き、試験箱内を反射する LED 光が PMT に入射しないようにしてある。LED の角度測定装置は二枚の分度器からなり、一枚は台の上に固定され、もう一枚は LED の支具に固定されている。この二つの分度器の中心を鉄針で貫通させてある。分度器を回すことで LED と PMT の角度を調整する。測定の精度は 1° 単位である。また、装置自体の高さは、セットされた LED がちょうど PMT 受光面の中心に来るように調整されている。図 4-5 は試験箱の内部構造を示した写真である。

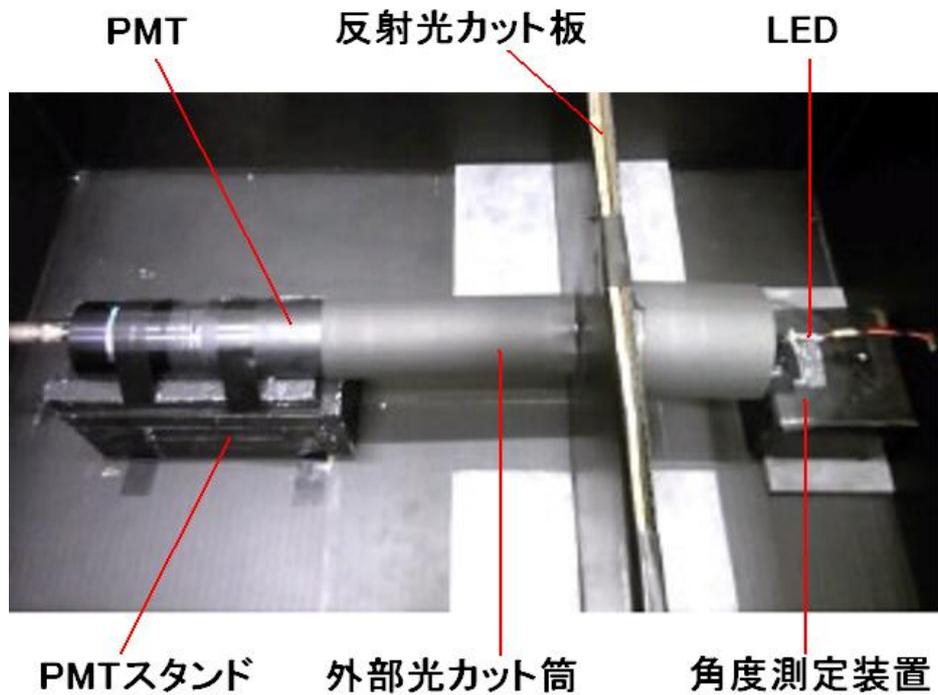


図 4-5 試験箱の内部構造

試験装置全体の構成を図 4-6 に示す。試験装置は LED、回路箱、GPSy、外部電源、PMT、高電圧電源、オシロスコープから構成されている。これらの電子機器については以下の項目で詳しく説明する。

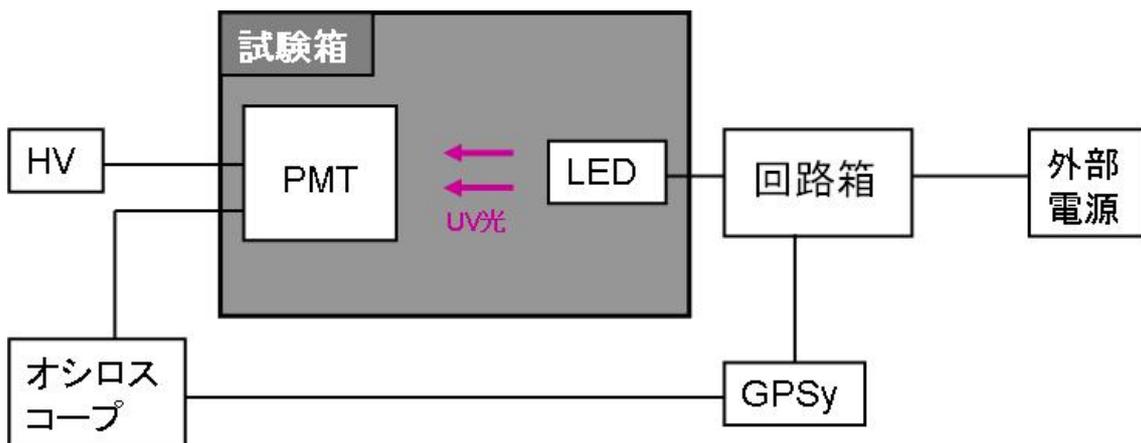


図 4-6 試験装置全体の構成図

4.2.1 LED

CLF が射出するレーザーは紫外線で、その光波長は 355nm である。よって、CLF のレーザーのシグナルに信号を重ねるためには、それに近い波長の光を放つ UV-LED を使用しなければならない。LED Flasher システムにて使用する LED は日亜化学工業製の NSHU550A で、図 4-7 はその写真である。

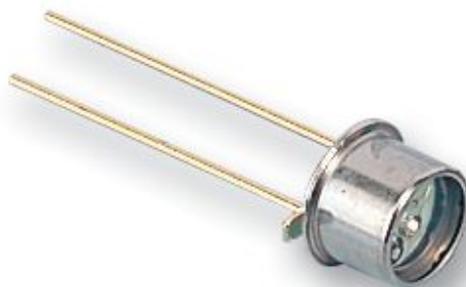


図 4-7 UV-LED(NSHU550A)

NSHU550A の光波長は 375nm 前後で CLF のレーザー光の波長とほぼ等しい。また、動作温度は -30 ~ +85°C と広く、砂漠地帯特有の -20 ~ +40°C という温度変化の下でも動作する。以下、表 4-1 と表 4-2 は LED の規格と特性である。また、図 4-8 と図 4-9 はそれぞれ LED の温度特性と角度特性を示した図である。

表 4-1 絶対最大規格(Ta=25°C)

項目	記号	最大規格	単位
順電流	I_F	25	mA
パルス順電流	I_{FP}	80	mA
逆方向許容電流	I_R	85	mA
許容損失	P_D	100	mW
動作温度	T_{opr}	-30 ~ +85	°C
保存温度	T_{stg}	-40 ~ +100	°C
半田付け温度	T_{sld}	265°C 10sec 以内	

I_{FP} 条件: パルス幅 ≤ 10 ms, デューティー比 $\leq 1/10$

表 4-2 初期電気／光学特性(Ta=25°C)

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位	
順電圧	V_F	$I_F=20[\text{mA}]$	-	3.5	4.0	V	
ピーク波長	ランク Ub	λ_p	$I_F=20[\text{mA}]$	370	375	380	nm
スペクトル半値幅	$\Delta \lambda$	$I_F=20[\text{mA}]$	-	10	-	nm	
	ランク 3	P_o	$I_F=20[\text{mA}]$	1200	1400	1700	μW
放射束	ランク 4	P_o	$I_F=20[\text{mA}]$	1700	2000	2400	μW
	ランク 5	P_o	$I_F=20[\text{mA}]$	2400	2800	3400	μW

※ 放射束分けについては±10%の公差がある。

※※ ピーク波長については±3nmの公差がある。

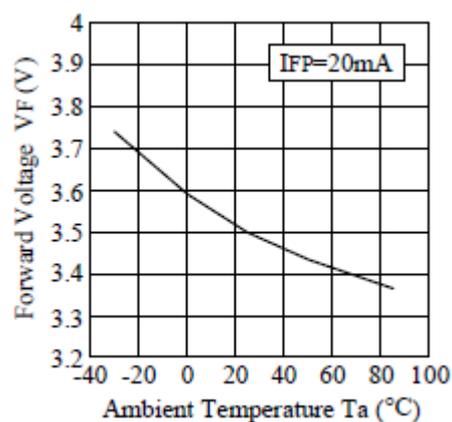


図 4-8 LED の温度特性(日亜化学のカタログより)

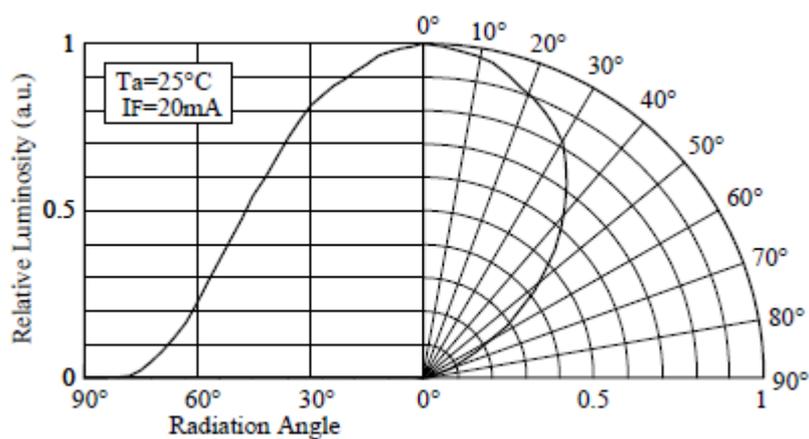


図 4-9 LED の角度特性(日亜化学のカタログより)

4.2.2 パルス発振装置(GPSy)

GPSyとは、LED Flasher システムにおいて、GPS 制御されたパルス信号を発振する装置である。小型のボードパソコン(Technologic 製、TS-5500)にパルス発振用の回路が搭載されている。CLF では同型のボードパソコンを制御管理用として使用し、レーザーの射出を制御している。GPSy の外観を図 4-10 に示す。

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。

ボードパソコンの電源は外部から供給され、作動すると同時に GPSy の内臓電池に充電する。そして、操作は LAN を通して他の Linux パソコンからコマンドを送りパルス発振をコントロールしている。パルスを発振するのに使用する電力は GPSy の内臓電池から供給される。発振している間も電池は絶えず充電される。しかし、充電速度は電力消費速度より遅いため、パルス発振中は電池の残量は少しずつ減っていく。つまり、非常にパルス幅の長い信号を発振すると内臓電池の中に貯蓄された電気が底を尽きる。その後は充電した分だけ消費するので、信号は矩形波ではなく、パルス高が段々低下していく曲線波形になるのである。

今回の LED Flasher システムにおいて、GPSy が発振する信号の設定はパルス数 100 回、パルス幅 300nsec、周波数 1MHz である。このパルス信号においては、放電時間は非常に短いため、信号は矩形波を保つ。また放電時間 300ns に対して充電時間は 700ns と十分に確保できるので、全てのパルスを打ち終わるまで、パルス高が低下することはなかった。



図 4-10 GPSy を搭載したボード型パソコン

4.2.3 外部電源

スイッチング回路に電力を供給する外部電源は、菊水電子工業製の直流安定化電源 PAB18-1 である。その写真を図 4-11 に、仕様を表 4-3 に示す。全ての試験において電圧は 5V に設定してある。



図 4-11 DC 型可変直流電源(PAB 18-1)

表 4-3 PAB 18-1 の基本仕様

入力電源	100V \pm 10%,50/60Hz
入力皮相電力	約 38VA
周囲温度	0 \sim 40 $^{\circ}$ C
極性	正また負極性
対接地電圧	\pm 150V
出力電圧	0 \sim 18V
出力電流	最大 1A
リップル	500 μ Vrms(5Hz \sim 1MHz)
電源変動	0.02%+2mV
負荷変動	0.02%+2mV
電流制限	定格電流の 10% \sim 100%連続可変
電圧計フルスケール	20V(確度 2.5 級)
電流計フルスケール	1.2A(確度 2.5 級)

4.2.4 光電子増倍管(PMT)

PMT は種類により性能が異なる。CLF-LIDAR にて使用されている PMT は浜松ホトニクス社製の H8643 と H3178-51 の 2 つであるが、本実験で使用したものは研究室に常備されている浜松ホトニクス社製の R329 である。そのため、CLF-LIDAR の PMT と同じ信号にならない場合もある。今回の試験は LED の波形の把握と改良のみを目的としている。

R329 の仕様を表 4-4 に、写真及び寸法図を図 4-12 に示す。

表 4-4 R329-02 の仕様

種類	ヘッドオン型
管径	φ 51 mm
受光面サイズ	φ 46 mm
感度波長 (Short)	300 nm
感度波長 (Long)	650 nm
感度波長 (Peak)	420 nm
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
ダイノード構造	ラインフォーカス
ダイノード段数	12
[絶対最大定格] 陽極－陰極間電圧	2700 V
[絶対最大定格] 平均陽極電流	0.2 mA
陽極－陰極間 印加電圧	1500 V
[陰極特性] ルーメン感度 Min.	60 uA/lm
[陰極特性] ルーメン感度 Typ.	90 uA/lm
[陰極特性] 青感度指数 (CS 5-58) Typ.	10.5
[陰極特性] 赤感度比 (R-68) Typ.	
[陰極特性] 放射感度 Typ.	85 mA/W
[陽極特性] ルーメン感度 Min.	30 A/lm
[陽極特性] ルーメン感度 Typ.	100 A/lm
[陽極特性] 放射感度 Typ.	9.4E+04 A/W
[陽極特性] ゲイン Typ.	1.1E+06
[陽極特性] 暗電流(30 分後) Typ.	6nA
[陽極特性] 暗電流(30 分後) Max.	40 nA
[時間特性] 上昇時間 (Tr) Typ.	2.6 ns
[時間特性] 走行時間 (T.T) Typ.	48 ns

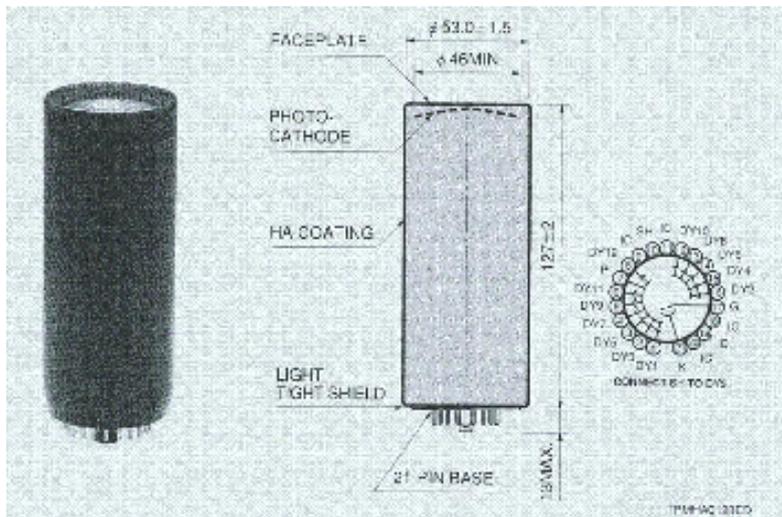


図 4-12 光電子増倍管(R329)

4.2.5 オシロスコープ

LED Flasher の波形は、研究室現有のアナログオシロスコープで見ることが困難であった。そのため、神奈川大学から Agilent 社のデジタルオシロスコープ(DSO5032A)を借りて測定を行った。その写真を図 4-13、仕様を表 4-5 に示してある。LED Flasher の周波数は 1MHz なので、1 周期の時間は $1\mu\text{s}$ である。これに対して、DSO5032A のサンプリング・レートは 2G サンプル/s。これを計算すると、LED Flasher 波形の 1 パルスを 2000 サンプルで計測するので、十分に波形を解析することが可能である。

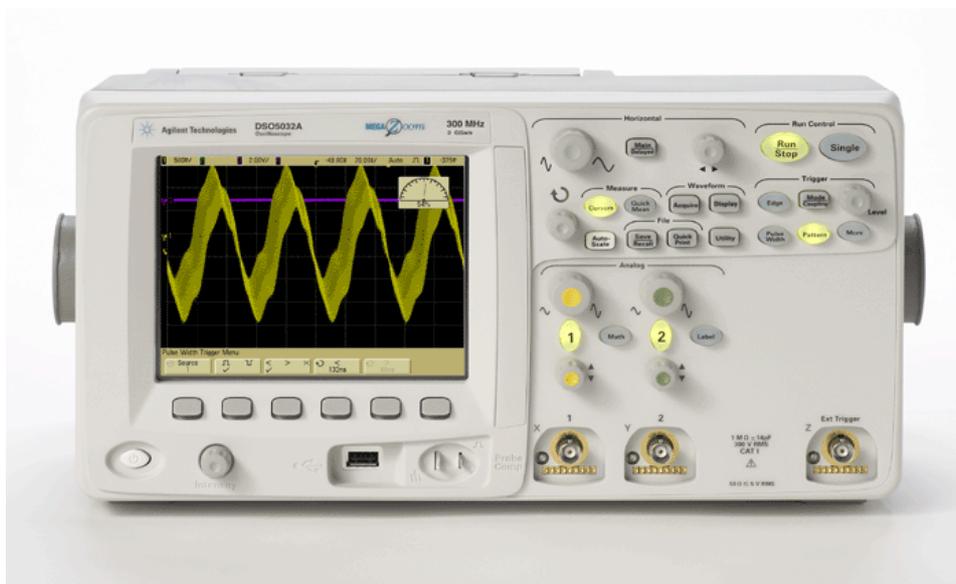


図 4-13 オシロスコープ(DSO5032A)

表 4-5 DSO5032A の仕様

帯域幅	300MHz
チャンネル数	2
最大サンプリング・レート	2G サンプル/秒
メモリ	標準 8Mpts
波形更新速度	最大 100.000 波形/秒

オシロスコープの波形の数値データを Excel 形式で保存し、以降の解析はこの数値データを元に行っている。なお、Excel でオシロスコープの数値データを取り込むのに、以下のソフトウェアを使用した。

- ・ Agilent IO Library Suite

電子計測プログラムでオシロスコープを使用するためのライブラリである。このソフトウェアには、オシロスコープと PC 間の接続を容易にするユーティリティが含まれており、Intuilink システムの使用条件を整えられる。

- ・ Intuilink

Agilent オシロスコープのデータを PC アプリケーションで利用できるようにするコネクティビティ・ソフトウェアである。このソフトウェアによって、Microsoft の Word 及び Excel に測定ツールバーを追加し、データを転送することが可能になる。

- ・ Intuilink Toolbar for Excel,Word

Excel,Word へツールバーをアドオンする。これによって、Excel,Word で波形の画像データ、数値データを取得することが可能となる。

4.2.6 高電圧電源(HV)

本試験で使用した HV は FLUKE 社の HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY 415B である。出力電力は 0~±3100V で、分解能は 5mV である。その写真を図 4-14 に示す。

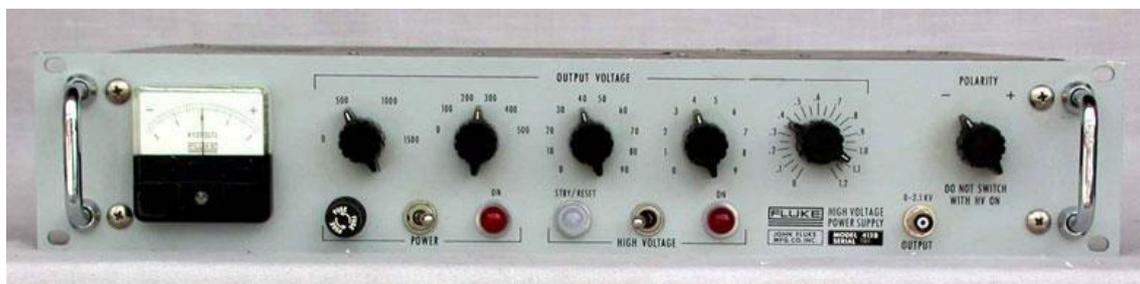


図 4-14 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY(415B)

4.3 LED Flasher の波形試験

4.3.1 ノイズ除去用コンデンサ試験

回路箱と外部電源は距離が離れているため、10m のケーブルで接続される。電源ケーブルが長いと、入力される電圧にノイズが発生する。ここで、GPSy をパルス数 100 回、パルス幅 300nsec、周波数 1MHz に設定して LED を光らせて試験した。図 4-15 は 0.5m のケーブルを使用したときの波形で、図 4-16 は 10m ケーブルを使用した時の波形である。

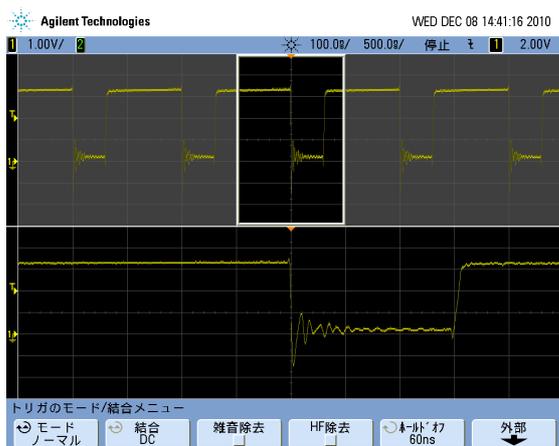


図 4-15 電源ケーブル 0.5m の時の波形

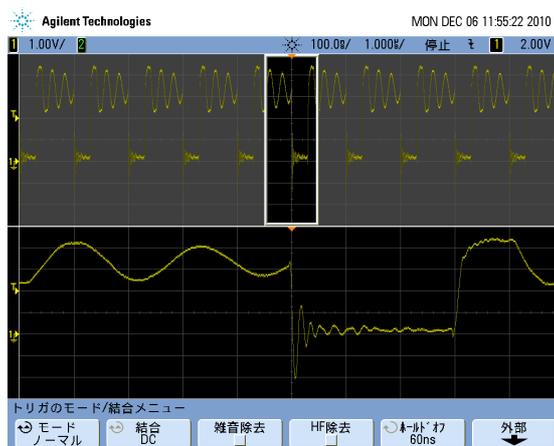


図 4-16 電源ケーブル 10m の時の波形

ケーブル長 0.5m の時の電圧にあまりブレがないのに対して、10m では大きなブレが見られる。また、パルスのアンダーシュートも 10m ケーブルは 0.5m ケーブルの倍近く発生している。このノイズを修正するため、2 種類のコンデンサを使用した。電圧にブレを修正するために、 $47\mu\text{F}$ の電解コンデンサを、さらにアンダーシュートを抑えるために 100pF のセラミックコンデンサを入れた。その結果を図 4-17 と図 4-18 に示す。

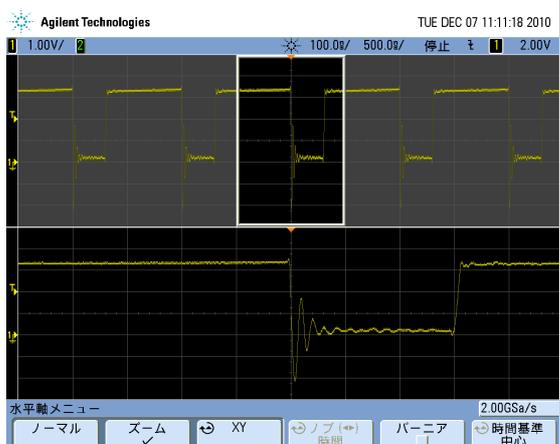


図 4-17 $47\mu\text{F}$ 電解 C を入れた波形

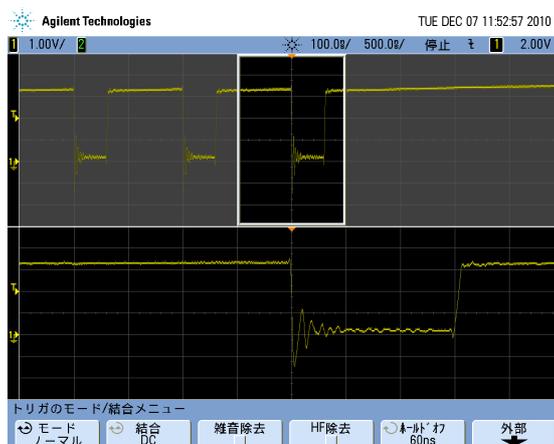


図 4-18 100pF セラミック C も入れた波形

2種類のコデンサを入れたことによって、波形の形状は大幅に修正された。その値を表4-6にまとめる。

表 4-6 コンデンサによって修正された値

	0.5m ケーブル	10m ケーブル		
		コンデンサ無	47 μ F 電解	47 μ F 電解+100pF セラミック
電圧のブレ	0.1V	1.5V	0.1V	0.1V
アンダーシュート	1.5V	2.1V	2.1V	1.4V

表 4-6 からわかるように、2種類のコデンサによって電圧のブレとパルスのアンダーシュートはケーブル長 0.5m の時と同じ程度まで修正できた。

観測地は砂漠であり、昼夜の温度変化が激しいため、LED Flasher 実作においては電解コンデンサの変わりに、温度特性に優れたタンタルコンデンサ(22 μ F)を使用した。これによって、電解コンデンサと同じ程度の修正が出来ていた。

4.3.2 LED ケーブル選定試験

回路デバイス箱から LED へ伸ばすケーブルは、その種類や接続方法によって LED の波形が変化する。よって、ケーブルを変えて試験し、より矩形波に近い信号を出すケーブルを選択する必要がある。

ケーブルの選択において、判断の基準となるポイントを二つ定義した。一つ目はスイッチング速度が速いことである。スイッチング速度が速いほど、観測される LED の波形の立上がりや立下がり速い。これは、PMT の Linearity 測定において、レーザーのシグナルに重ねる際に重要となる。LED の信号が空間電荷効果によってパルス高が低くなったとき、立上がりや立下がり速やかであると、パルスの始点と終点の判別が困難になってしまう。二つ目はアンダーシュートが小さいことである。アンダーシュートがあまりに大きいと、パルス高が定まらなくなり、Linearity 測定の時、空間電荷効果によって低下した範囲を判断ができなくなる。よって、立上がりや立下がり速いものとアンダーシュートが少ないものを選ぶようにした。

LED Flasher の製作に当って、測定したケーブルは以下の 4 パターンであり、長さは 1m で統一した。なお、3m にしなかったのは、現時点で設置について考慮していなかった故である。

1. ツイストペア(TP)ケーブル(1.0mm と 1.2mm)：ツイストペアにより磁場を打ち消し合う性質によってノイズを出しにくいと思われたため使用した。1.0mm と 1.2mm の 2 種類を試験したのは、太さによって変化があるかどうか調べるためである。

2. 同軸ケーブル 1 本：構造上、+と-で磁場を打ち消し合うため、ノイズカットができるとして使用した。内部導線を正極、外部導線を負極として使用した。
3. 同軸ケーブル 2 本：2 本の同軸ケーブルの内部導線をそれぞれ正極と負極に繋げ、外部導線の片側は 2 本のケーブル同士で接続し、反対側はグラウンドに接続した。これによって誘導電流をすばやく逃がせる。

測定方法としては、GPSy をパルス幅 300ns、周波数 1MHz に設定してパルスを発信させ、その時の LED の波形と PMT の波形をオシロスコープで複数回収集し、その平均を求めた。その測定結果を表 4-7 に示す。

表 4-7 ケーブルの測定結果

	TP ケーブル 1.0mm	TP ケーブル 1.2mm	同軸ケーブル1 本	同軸ケーブル2 本
立上がり平均(LED)	43.9ns	41.00ns	49.95ns	80.9ns
立上がり平均(PMT)	41.35ns	42.15ns	46.2ns	58.6ns
立下がり平均(LED)	4.94ns	4.5ns	4.8ns	6.4ns
立下がり平均(PMT)	33.2ns	34.55ns	31.05ns	32.25ns
アンダーシュート(LED)	0.93V	0.97V	0.97V	0.57V

測定結果から、TP(1.0mm と 1.2mm)と同軸 1 本は立上がり速度が速く、アンダーシュートが大きいものに対して、同軸 2 本は立上がりが遅く、アンダーシュートが小さいという傾向をうかがえる。

PMT の波形では、アンダーシュートよりも立上がりの方が顕著に現れていたため、ケーブルは立上りをより重要視し、同軸ケーブル 2 本の使用を見送った。

残りの 3 パターンを比較すると、TP ケーブル(1.2mm)と同軸ケーブル 1 本においては、アンダーシュートが同じであるが、立上がり速度は同軸の方がわずかに遅いため、同軸ケーブルを使用しないことにした。また、TP ケーブルの太さによる変化はあまりなかったため、物理強度がより強い 1.2mm を使用することに決定した。

4.3.3 LED 光の強度による波形の変化

図 4-19 は回路に入力された GPSy の波形(緑)と、それに対する LED の波形(黄)を示している。スイッチング回路は、入力波形に対して反転した波形を出力するのが特徴である。この時、PMT の反応は図 4-20 のようにならない。ここで、各条件を変更しても波形が保たれるかについて試験する。なお、図 4-20 の時の設定を表 4-8 に示す。

表 4-8 試験条件

パルス数	100 回
パルス幅	300nsec
周波数	1MHz
HV	500V
LED-PMT 間距離	300mm

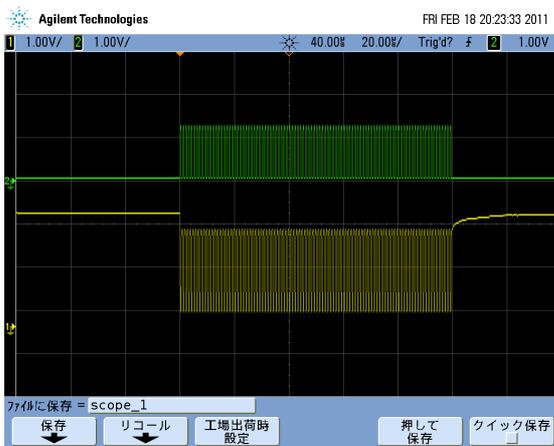


図 4-19 GPSy 波形(緑)と LED 波形(黄)

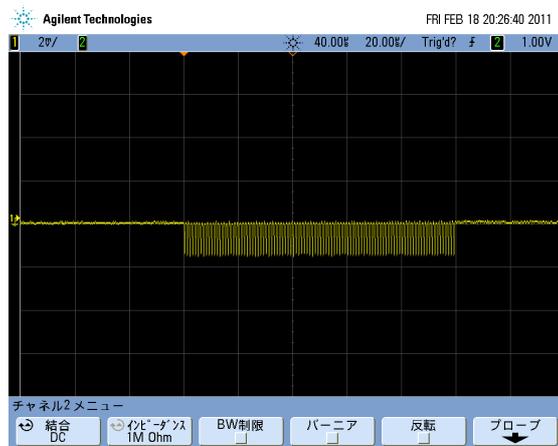


図 4-20 HV500V の時の PMT 波形

これに対して、下の図 4-21 と図 4-22 は HV によって、LED 光の強度を強くした時の PMT の波形である。図 4-21 は HV が 1000V の時の波形で、全体が右上がりになる現象が発生している。PMT に入射される光が強いと、パルスの立上がり時にオーバーシュートが発生し、それが下がり切らないうちに次のパルスが入力されるので、結果として全体的に右上がりになる。これに対して、図 4-22 は HV1500 の時の波形で、PMT に入射される光がさらに強いと、1 パルスのパルス高が低下し、全体がカーブ状になる。パルス高が一定でないと、試験の結果が正確ではなくなる。ここでは、HV 電圧、GPSy 波形のパルス幅を変更した時の PMT 波形を観測し、どの値からパルス高が低下するかについてまとめた。



図 4-21 1000V 時の PMT 波形

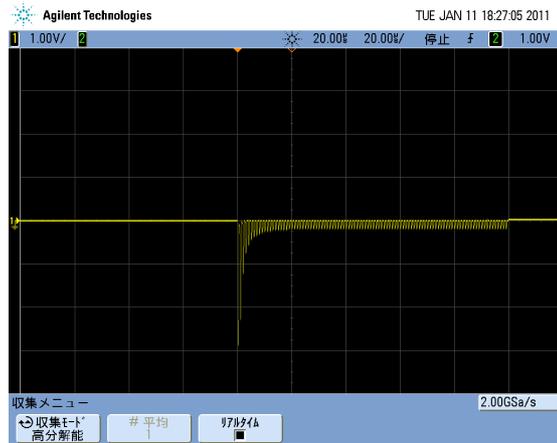


図 4-22 1500V 時の PMT 波形

図 4-23 は GPSy の設定を変更せずに、HV のみを 100V ずつ変化させた時の、最初のパルスと最後のパルスのパルス高の差を示している。この図から、HV が 800V 以下においてパルス高の低下はないことがわかる。

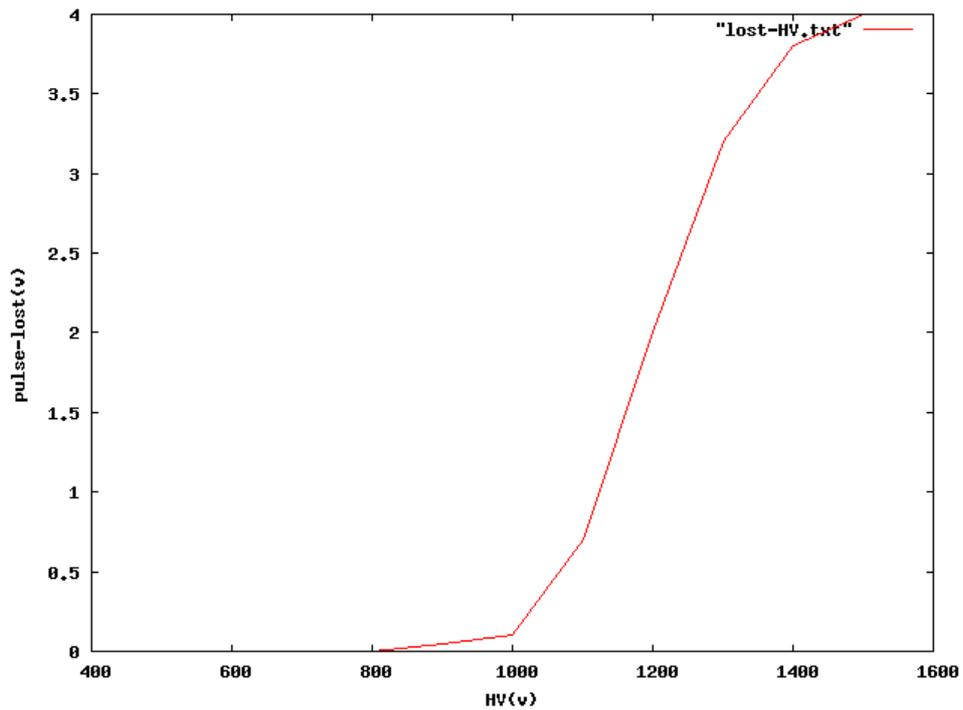


図 4-23 HV を変化させた時のパルス高低下

そして、図 4-24 は HV を 1000V に設定した時、パルス幅を 100~300ns まで 50ns ずつ変化させた時の最初のパルスと最後のパルスのパルス高の差を示している。この図から、HV が 1000V の時でも、パルス幅 150ns 以下においてパルス高の低下はない。

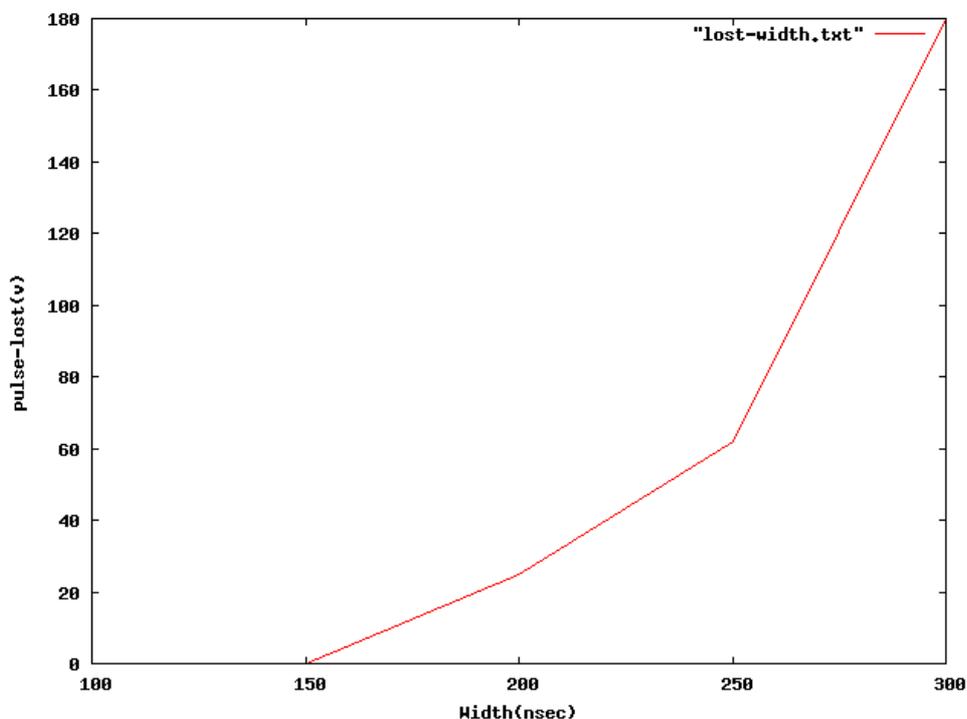


図 4-24 パルス幅を変化させた時のパルス高低下

よって、以下の試験では HV800V までの値を信頼する。また、1000V まで上げる必要がある時はパルス幅を 150ns で統一する。

4.3.4 波形のオーバーシュート

PMT の Linearity を測定するために、LED のパルスが一定であることが必要。そのため、前の図 4-21 のようなオーバーシュートも押さえなければならない。ここで、1 パルスのみを発信して、HV を変える試験をした。その結果によって HV とオーバーシュートの関係を探り、オーバーシュートの起きない HV を設定する。

LED と PMT の角度を向かい合いで固定し、GPSy の設定をパルス数 1 回、パルス幅 100 μ s に設定。この条件で HV を 500~800V の間 50V ずつ変化させて試験した。HV ごとにオーバーシュートの面積がパルス面積に対して何%であるかを示したのが図 4-25 である。図において、値にブレはあるが、全体的に右上がりである。よって、HV を下げることによって、オーバーシュートの割合が減少することがわかる。しかし、オシロスコープの分解能の限界で、HV が 500V 以下の時の値は測定できていない。

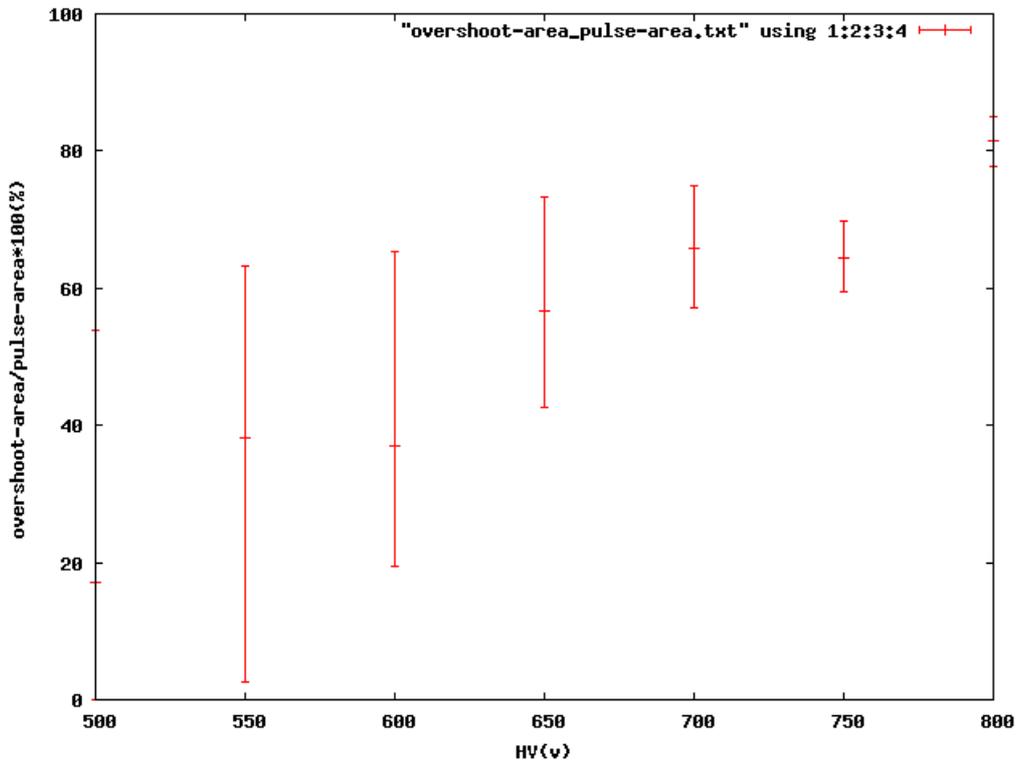


図 4-25 HV 別のパルス面積に対するオーバーシュートの面積

パルス幅と配置距離を変更したときのパルス面積に対するオーバーシュートの面積についても同じように測定したが、図は水平線であったため、影響はないと考える。ここではその図の掲示を省略する。

4.3.5 PMT の受光面を考慮した LED の角度特性

前章の図 4-9 にて掲載した LED の角度特性は、特定の角度における光量を示したものである。しかし、PMT の受光面は面積を持つため、下の図 4-26 のように、特定の角度からの光ではなく、ある範囲の角度に跨った光が入射される。ここで、PMT の受光面を考慮して、PMT が観測する信号が LED の角度特性と一致するかについて試験する。

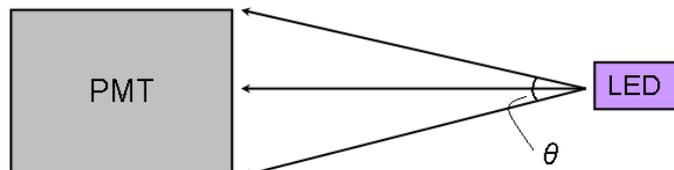


図 4-26 PMT の受光面が受ける LED 光の角度

まず、PMT の受光面において、LED の光の角度が何度にかつて入射されるかを三角関数で割り出す。LED の角度特性表をその跨る角度で積分することによって、面積としての LED 光量が得られる。それを次の図 4-27 にて、LED の仕様書に掲載されている角度特性(赤色の線)と、PMT の受光面を考慮した時に計算される角度特性(緑色の線)を比較する。

図 4-27 において、二本の線は概ね一致していることがわかる。従って、PMT 受光面の面積を考慮した場合でも、計算上光量の角度特性に大きな変化はない。

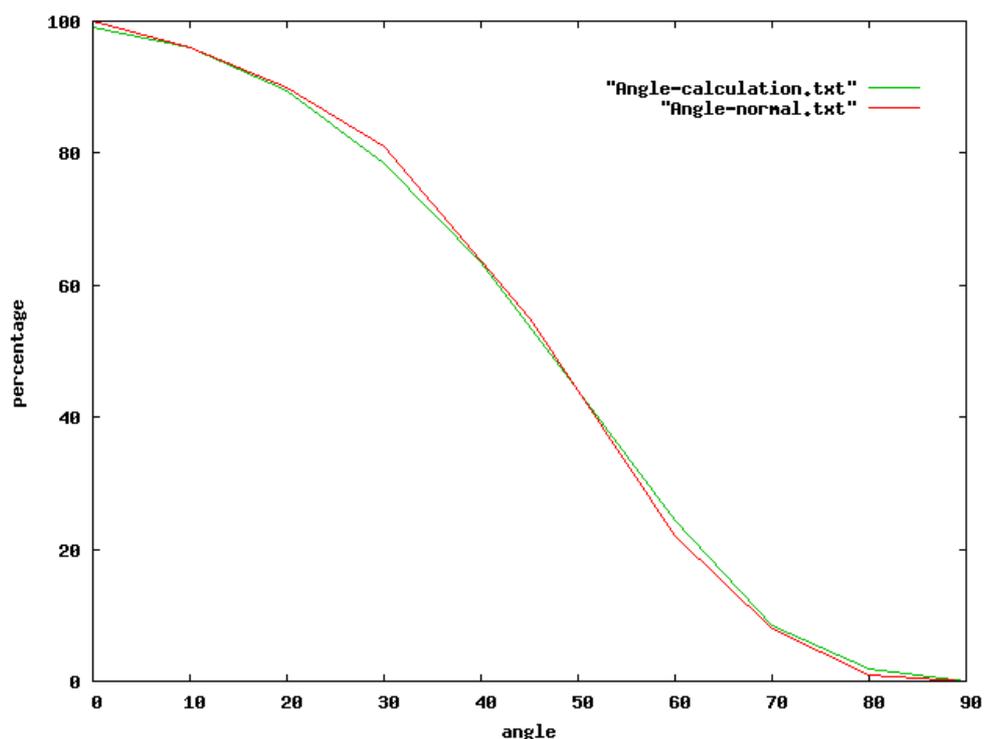


図 4-27 仕様書の LED 角度特性と PMT 受光面を考慮した計算上の角度特性

次に、GPSy はオーバーシュートが起こらないようパルス数 20 回、パルス幅 300ns、周波数 200KHz に設定し、HV を 600V かけた。この条件で LED を PMT に対して 10° ずつ回転して LED を光らせる。その時にオシロスコープで観測された信号のパルス高を記録した。図 4-28 でその値(青色の点)と先ほどの計算上の値を比較してある。青色の点は $30\sim 70^\circ$ の範囲赤色の線より少し高い値を示している。これは外部光カット筒内の光の反射が原因だと考えられる。

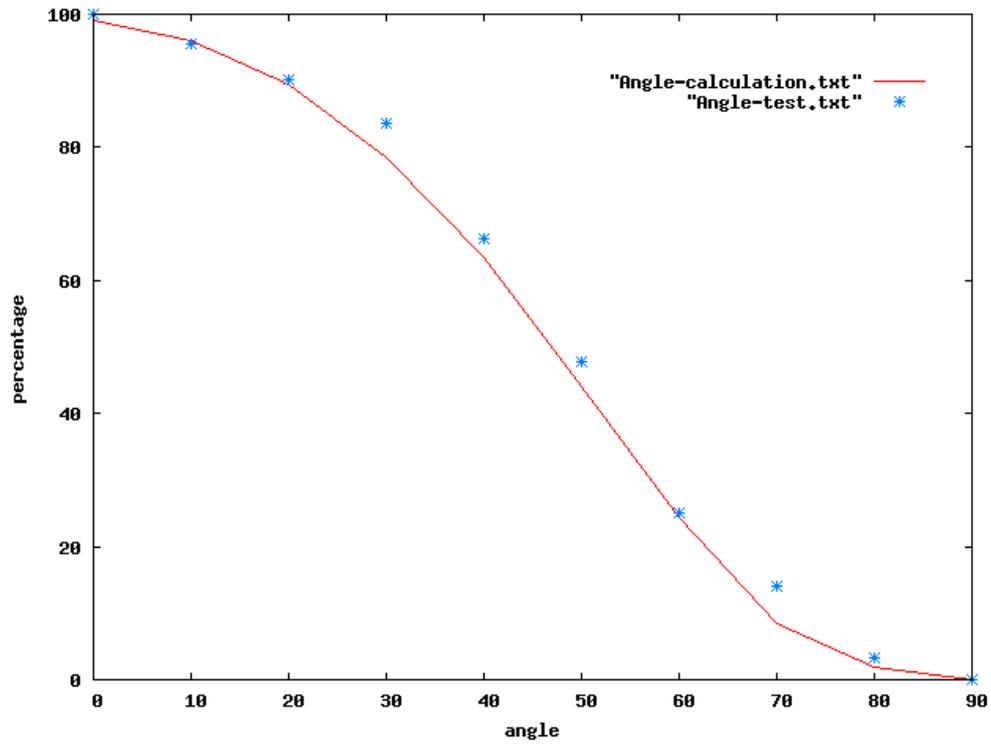


図 4-28 測定した PMT の値と計算上の角度特性

以上の結果から、PMT の受光面にはある程度の角度に跨った光が入射されても、反射などの原因がない限り、仕様書の角度特性と同じ形状になる。

第5章 PMT の Linearity 測定用システムの製作

LED Flasher システムは大まかには LED、回路箱、外部電源、GPSy の四つのデバイスに分けられる。このうち、LED と回路箱は CLF-LIDAR のカバーボックス内に取り付け、外部電源と GPSy は CLF コンテナ内に置く。GPSy は現在 CLF でレーザーを制御しているものを兼用し、外部電源は現在のところ判明していない。この章では、LED Flasher システム回路箱の製作の詳細と、その他のパーツについて説明する。なお、LED と GPSy については前章で述べた通りで、ここでの記述を省略する。

5.1 CLF-LIDAR 用 LED Flasher 回路箱の製作

図 5-1 は CLF-LIDAR 用に製作された LED Flasher システムの回路箱である。スイッチング回路の基板をアルミシャーシの底面に固定し、側面から外部へ接続する端子を出してある。LED Flasher は電子機器であるため、雨天時の浸水によるショートを防ぐ必要がある。雨風に直接晒されないように、回路箱は CLF-LIDAR のカバーボックス内部に固定する。しかし、カバーボックスが開いている観測時に雨が降ることも考えられるため、回路箱自体も防水を考慮した構造設計をしてある。

アルミシャーシは底面と 100mm×40mm の面は一枚のアルミ板からなるため、この二つの面の間から浸水することはない。よって、この構造を利用して 100mm×40mm の面を上に向けて取り付けることを想定して、基板を底面に固定してある。固定方法としては、プラスチック棒を長さ 10mm に切り、その両端にタップで直径 3mm のネジ穴を切った。それを 4 本アルミシャーシの底板にネジ固定し、その上から回路基板を同じようにネジ固定した。

回路箱から外部へ出す端子は GPSy 用、LED 用、外部電源用の 3 つである。図 5-1 で見て、左側の GPSy へ接続されるものは BNC 端子、真ん中の LED へ接続されるものと右側の外部電源へ接続されるものはコネクタ端子を使用した。雨に当たりにくいことと、CLF-LIDAR のカバーボックスからケーブルを通す穴が下部にあるなどの理由で、全ての端子を下向きとなる面から出した。さらに、コネクタ端子と箱の隙間からの浸水を防ぐため、接合部に接着剤エポクリヤーを塗った。

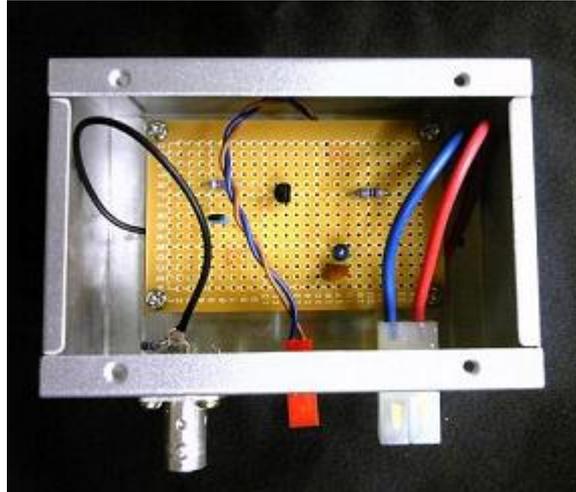


図 5-1 回路デバイス箱内部構造

アルミシャーシの加工はボール盤で行った。コブラー端子の出し口はボール盤で円形の穴を開けた後、金属ヤスリで寸法の四角形になるように削った。加工の CAD 図面を図 5-2 に示す。なお、基板固定の穴を中心からずらし、基板が端子の出る面から離れたのは、基板の回路と端子を繋げるケーブルにかかる応力を減らすようにするためである。また、横面の寸法は本来 100mm×40mm であるが、加工時は蓋(厚さ 1mm)を外してあるため、寸法は 100mm×39mm に変更してある。

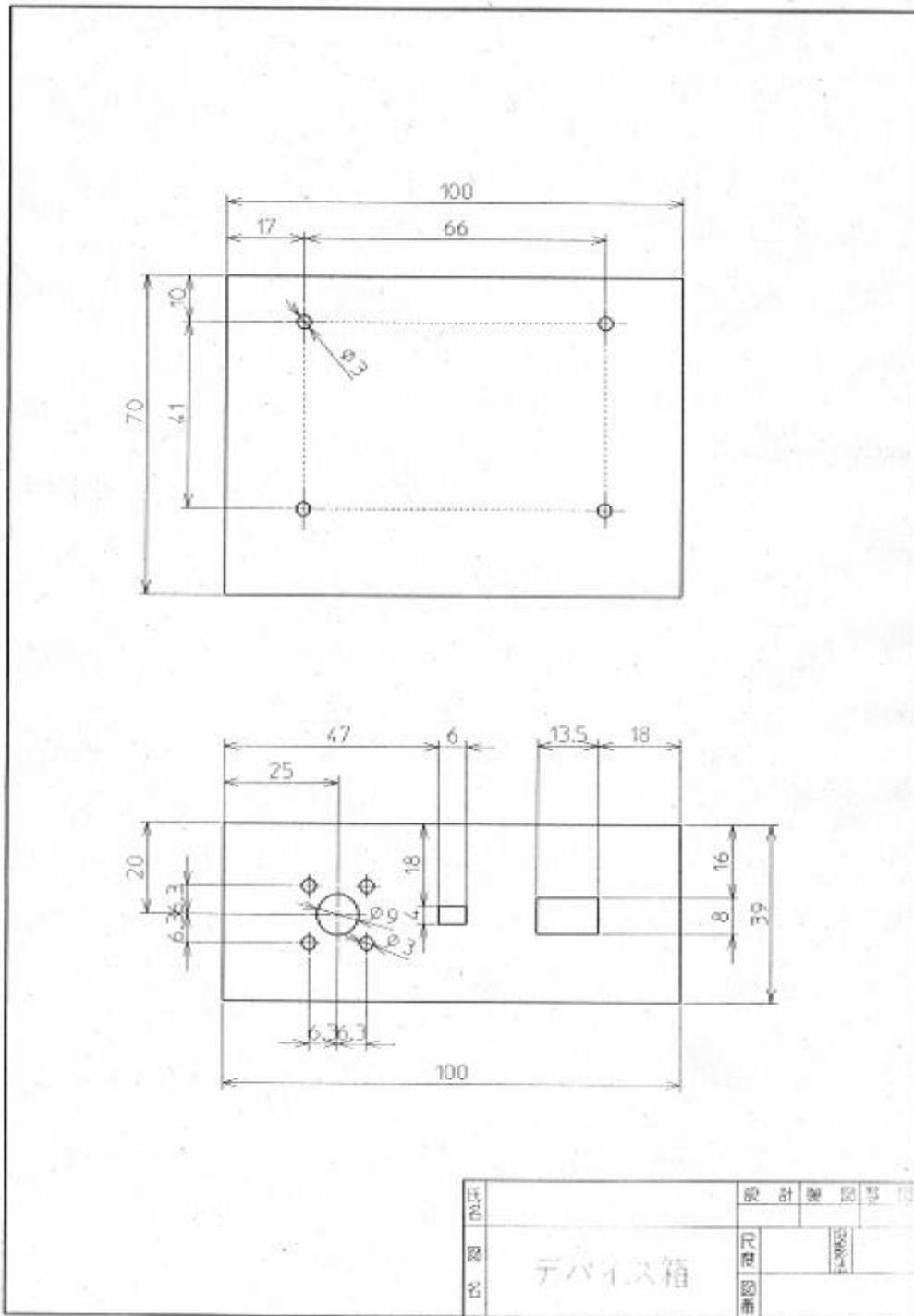


図 5-2 回路デバイス箱加工用 CAD 図面

5.2 LED Flasher 各 부품の仕様

5.2.1 トランジスタ

トランジスタはエミッタ・ベース間の小さい電流によって、エミッタ・コレクタ間の大きな電流を制御できる。このため、トランジスタはリレースイッチとして利用できる。回路箱の内部にある回路は、トランジスタのこのスイッチング作用を利用したスイッチング回路である。GPSy から送られるパルスを使って、LED と外部電源間のスイッチングを行っている。今回使用したトランジスタは東芝製の 2SC1815 である。このトランジスタは電流容量が大きく、アンプのドライバ及び一般スイッチング用に適しているなどが選定した理由である。図 5-3 に 2SC1815 の写真を、表 5-1 と表 5-2 に最大定格と電気的特性を示す。

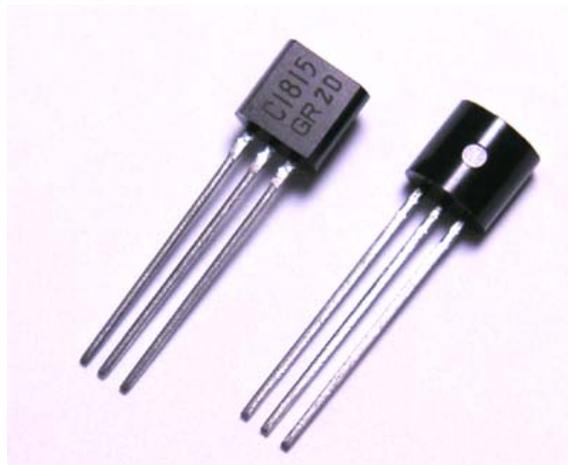


図 5-3 トランジスタ(2SC1815)

表 5-1 最大定格(Ta=25°C)

項目	記号	定格	単位
コレクタ・ベース間電圧	V_{CBO}	60	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V_{CEO}	50	V
エミッタ・ベース間電圧	V_{EBO}	5	V
コレクタ電流	I_C	150	mA
ベース電流	I_B	50	mA
コレクタ損失	P_C	400	mW
接合温度	T_j	125	°C
保存温度	T_{stg}	-55~125	°C

表 5-2 電気的特性(Ta=25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタ遮断電流	I_{CBO}	$V_{CB}=60V, I_E=0$	-	-	0.1	μA
エミッタ遮断電流	I_{EBO}	$V_{EB}=5V, I_C=0$	-	-	0.1	μA
直流電流増幅率	$h_{FE(1)}$	$V_{CE}=6V, I_C=2mA$	70	-	700	
	$h_{FE(2)}$	$V_{CE}=6V, I_C=150mA$	25	100	-	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C=100mA, I_B=10mA$	-	0.1	0.25	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	$V_{BE(sat)}$	$I_C=100mA, I_B=10mA$	-	-	1.0	V
トランジション周波数	f_T	$V_{CB}=10V, I_C=1mA$	80	-	-	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	$V_{CE}=10V, I_E=0, f=1MHz$	-	2.0	3.5	pF
ベース拡がり抵抗	$r_{bb'}$	$V_{CE}=10V, I_E=-1mA,$ $f=30MHz$	-	50	-	Ω
雑音指数	NF	$V_{CE}=6V, I_C=0.1mA,$ $f=1kHz, R_G=10k\Omega$	-	1	10	dB

5.2.2 ノイズ除去用コンデンサ

コンデンサを電源に対して並列に入れることでノイズを除去できる。LED Flasher のスイッチング回路において、2種類のコンデンサを用いて外部電源からのノイズ除去を行っている。その効果については4.3.1で述べた通りである。

タンタルコンデンサは、スイッチが off の時の外部電源からのノイズを除去する。通常は電解コンデンサを使用するが、今回は観測地の激しい温度変化に対応するため、温度特性の優れた $22\mu F$ のタンタルコンデンサを使用する。また、パルスのアンダーシュートを抑えるため、 $100pF$ のセラミックコンデンサを一緒に入れてある。2つのコンデンサの写真を図 5-4 に示してある。

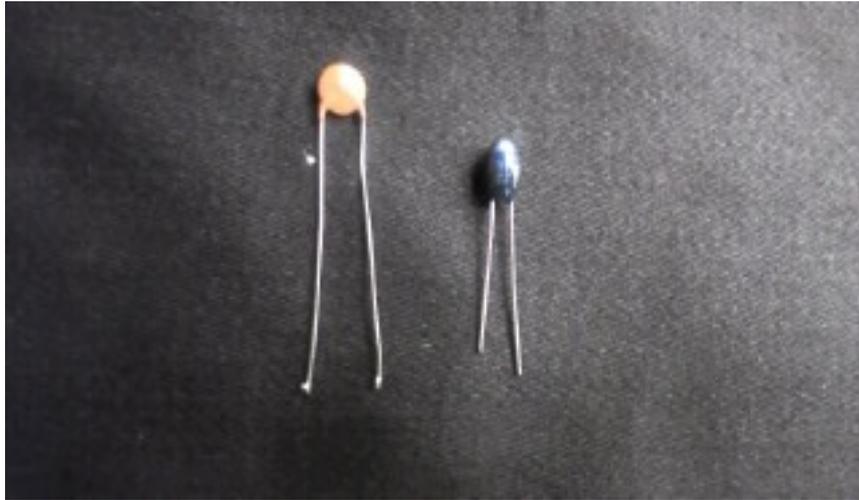


図 5-4 セラミックコンデンサ(左)とタンタルコンデンサ(右)

5.2.3 その他(基板、箱、端子など)

LED やトランジスタ、コンデンサなどを固定基板、それを収納した箱について説明する。

LED フラッシャーの回路デバイス箱は CLF-LIDAR の BOX の内部に取り付けるため、その他のデバイスの作業の妨げにならないよう、箱のサイズを必要以上の多きくしない必要がある。なので、基板は Sunhayato 社の汎用型の基板の中の最小のサイズのものである ICB-88(Size:47mm×72mm×1.6mm pitch:2.54mm 10φ)を使用した。また、箱もこれを収納できるもののなかで最もサイズの小さいものである LEAD 社の P4(Size:100mm×40mm×70mm アルミシャーシ)を使用した。その写真はそれぞれ図 5-5、図 5-6 にて示してある。

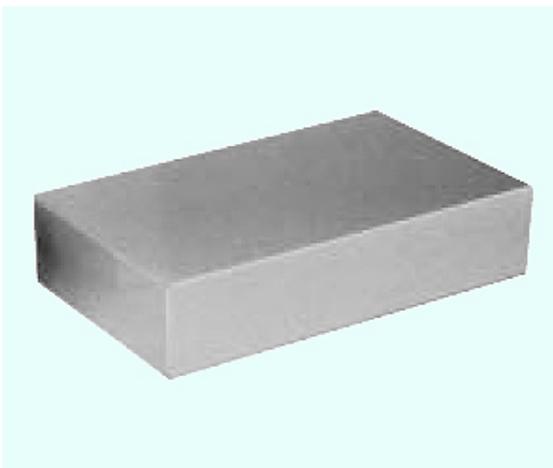


図 5-5 アルミシャーシ(P4)

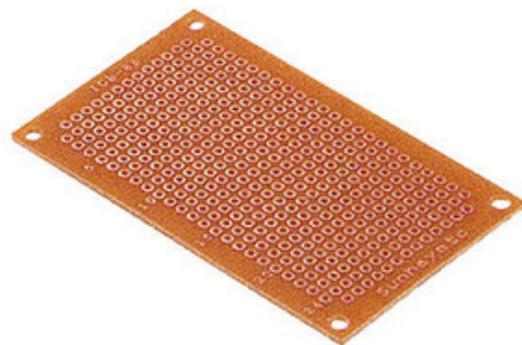


図 5-6 基板(ICB-88)

LED へ接続するケーブルの端子にはイーグル模型の#2890 BEC Connector Gold(図 5-7)、そして外部電源へ接続するケーブルには端子には同社の#2713 7.2V Connector Gold(図 5-8)をそれぞれ使用した。理由としては、カップラー端子は接続してある端子なら全ての方向から浸水しにくく、取り外しも簡単なことが挙げられる。



図 5-7 外部電源用端子(#2713)

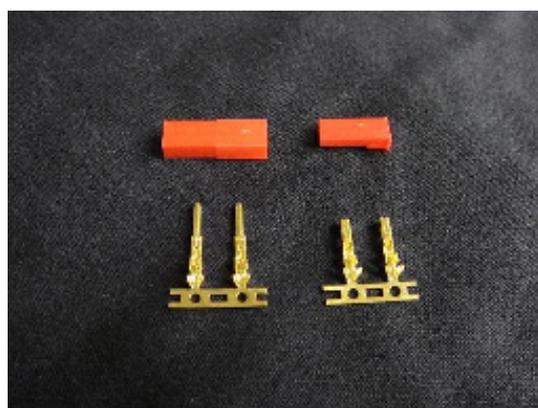


図 5-8 LED 用端子(#2890)

5.2.4 BNC ケーブル

回路デバイス箱と GPSy の接続に使用したケーブルは、藤倉電線の RG58C/U である(図 5-9)。RG58C/U は RG58A/U の軍事仕様で、以下のような特長がある。

- ・ 絶縁抵抗が高い
- ・ 絶縁耐圧が高い
- ・ 耐水性、対老化性が良好
- ・ 機械的強度が高い

このケーブルは米軍防衛庁仕様に準拠した高周波ケーブルで、米国ではもとより、日本でも広く使用されている。今回のケーブルは研究室に常備されているものの中から、長さ 10m で両端に BNC 端子が付いているものを選んで使用した。なお、ケーブルの特性については表 5-3 に示してある。



図 5-9 BNC ケーブル(RG58C/U)

表 5-3 RG58C/U の特性

静電容量(nF/km)		102
インピーダンス標準 Ω		50
減衰量標準値	1MHz	14
	10MHz	48
	30MHz	81
	100MHz	160
	200MHz	230
	2000MHz	900
波長 短縮率(%)		67
最大使用電圧(kV)		1.9

5.2.5 LED 用ケーブル

回路デバイス箱から LED へ接続するケーブルは 1.2mm のケーブルを 2 本撚って作ったツイストペアケーブル(TP ケーブル)である。TP ケーブルが平行線ケーブルよりノイズの影響を受けにくいのである。その理由を簡単に説明する。撚り対線を流れる信号電流の電磁誘導によって発生する磁場は、+と-で反転しているので互いに打ち消しあう。よって、伝送する信号により、外部にノイズを出しにくい。また、対線を貫通する磁束によって発生する電流は+と-で互いに打ち消しあうため、外部からの影響も受けにくい。

また、他のケーブルとの比較実験でも、TP ケーブルを使用したときのノイズ量は少なく、パルスの反応速度の速い。なお、比較実験の詳細結果は後の章にて詳しく述べる。

図 5-10 は LED フラッシャーのために作成された LED 用 TP ケーブルである。片側には回路デバイス箱に接続するためのコネクタ端子(#2890)を取り付け、もう片側には LED ソケットを半田付けしてある。

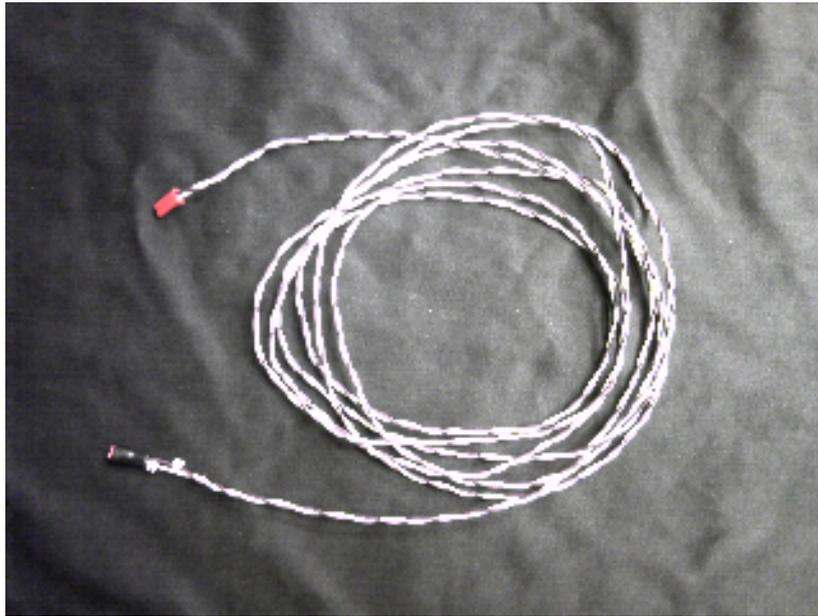


図 5-10 LED 用ツイストケーブル

LED は距離と角度によって発する光量は大きく異なる。なので、CLF-LIDAR に取り付ける段階で、LED と PMT の距離と、PMT に向ける方向を調整する必要がある。そのため、デバイス箱をどの位置に取り付けても LED がカバーボックス内全ての位置に届くように 3m にした。また、LED ソケット部分の防水も意識した。LED ソケットの作りを図 5-11 で説明する。

まず、TP ケーブルを + と - で異なる長さでビニールをはがし、長い方に絶縁チューブを通して LED ソケットを半田付けする(図 5-11 の I の状態)。これは、ビニールを剥がしたことによって両極がショートするのを防ぐためである。次に II のように、半田付けした部分に熱縮チューブを通す。そして、チューブが完全の収縮するまで熱して、III のようにする。最後に固定によって半田付けの部分に応力がかかりにくくするため、IV のようにゴムチューブを被せる。なお、写真では見えないが、LED の差込が逆にならないように、アノード側のケーブルには、Anode の頭文字 A が書いてあるリングを、Cathode 側には C が書いてあるリングを通してある。

今回使用する LED の Anode と Cathode の両端子はどちらも長さ 14.5mm である。これに対して、LED ソケットは 4mm までしか差し込むことができないため、端子を 4mm になるように切らなければならない。その後 LED を差し込んで、必要ならば上から再度ビニールテープを巻いて浸水を防ぐ。

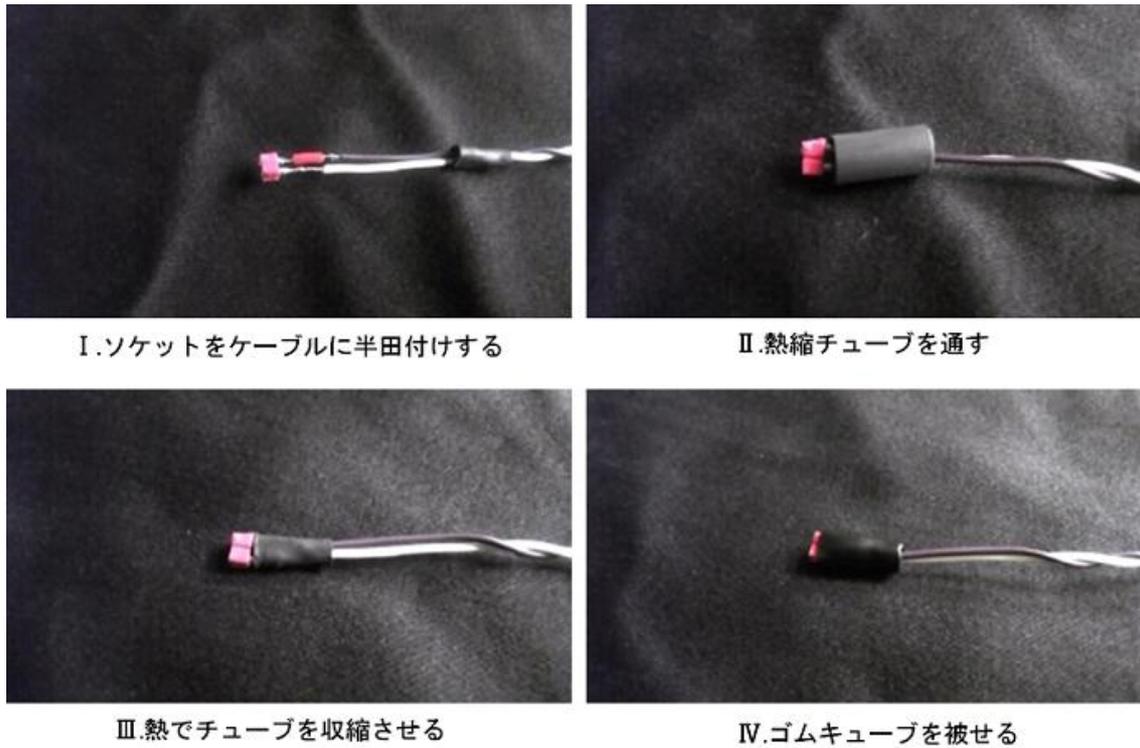


図 5-11 LED ソケットの防水加工

4.2.7 電源ケーブル

回路デバイス箱と外部電源の接続には、太さ 3mm のコード 2 本を撚って作った TP ケーブルを使用する。長さは BNC ケーブルと同じ 10m である(図 5-12)。TP ケーブルの使用理由は LED ケーブルと同じで、ノイズの影響を受けにくいからである。回路側はデバイス箱に接続するためにカプラー端子(#2713)を取り付け、ノイズ除去のための、5.2.2 で紹介したコンデンサを回路に入れてある。外部電源の形状がまたわからないため、端子は取り付けていない。また、電源側にも同じ用にノイズ除去のコンデンサを入れることが望ましい。



図 5-12 電源ケーブル

第 6 章 結論

6.1 まとめ

CLF-LIDAR に搭載されている PMT の Linearity を測定するため、紫外線 LED と GPS に時間制御されたパルス発信機を用いた LED Flasher システムを設計した。このデバイスを 2011 年春に CLF-LIDAR に取り付ける。製作されたシステムの全体図が図 6-1 である。(撮影のため、ケーブルは本来より短いものに換えてある。)

LED Flasher のパルス発振では、CLF で現在使用されている GPSy を兼用する。その設定は表 6-1 である。このパルス信号をレーザーのシグナルに重ねることで PMT の Linearity を測定し、線形性が失われている場合は線形性を較正する。

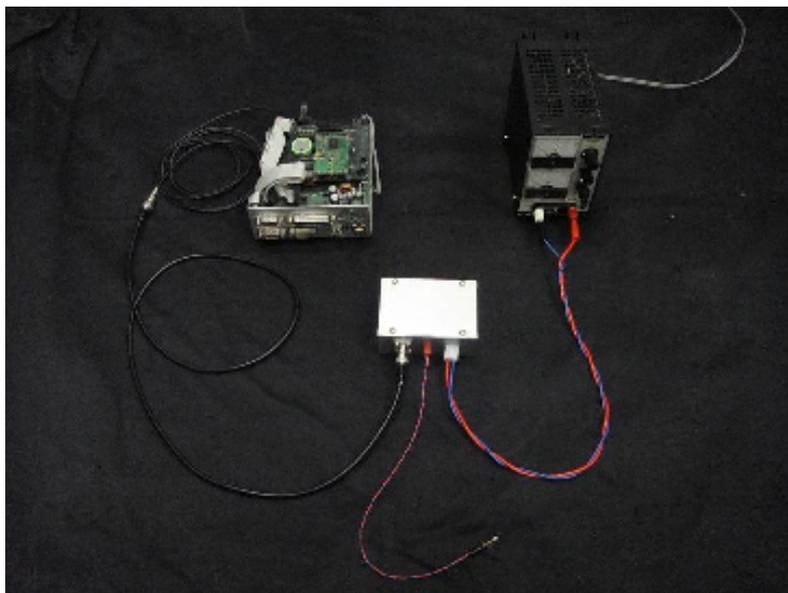


図 6-1 LED Flasher の製作完了の回路箱

表 6-1 LED Flasher 用の GPSy 設定

Length	100
Width	300
Offset	0
Period	1
Frequency	1E6

6.2 今後の課題

LED フラッシャーの取り付け及び運用に当って、以下の課題が残されている。それらの解決法を考案する必要がある。

I.回路デバイス箱の取り付け

LED フラッシャーの回路デバイス箱は CLF-LIDAR のカバーボックス内に取り付ける。その時、他の作業にならないことと、濡れないようにすることを考慮した位置に取り付ける必要がある。また、取り付けの方法も考案しなければならない。

II.LED 位置の調整

LED と PMT 間の距離と向き合う角度を変えることで、PMT に入る光量に変化する。PMT で観測される信号にオーバーシュートが起きない、LED を配置しなければならない。LED ケーブルの長さは3mあり、回路デバイス箱からどの位置でも届くようになっている。この長さでは余ることも考えられるので、配置後はノイズカットのため、適当な長さに調整することが望ましい。

III.LED の取り付け

現在のカバーボックスが開いている時の外観を図 6-2 に示す。この図からわかるように、カバーが開いているとき、集光鏡より上部に構造物は存在しない。つまり、このままでは LED を適切な位置に取り付けることは困難である。今度は LED 取り付けのため、カバーボックス内部に LED 用の持具を製作する必要がある。



図 6-2 カバーボックスが開いている時の外観

参考文献

- 宇宙線(改訂版) 小田 稔
- 文章 Wikipedia 宇宙背景放射、GZK 限界
- JEM-EUSO パンフレット(2010 年)
- The atmospheric calibration of fluorescence technique in the Telescope Array 富田 孝幸
- テレスコープ・アレイ実験のための LIDAR システム R&D
-装置の開発と BRM における大気透明度観測- 辨野 拓哉
- LIDAR による大気透明度測定データの Klett's 法解析 相田 龍太
- LIDAR による大気透明度測定データの解析 奥 大介
- 極高エネルギー宇宙線の大气蛍光法観測に用いる大気較正法の開発 部山 和愛
- 宇宙線望遠鏡計画におけるデータ通信塔の電源供給システム 岩本 祥平
- 日亜化学カタログ(SPECIFICATIONS FOR NICHIA UV LED MODLE: NSHU550A)

謝辞

本研究にあたり、担当教員である本田建教授をはじめ、多くの方々の御世話になり、御協力頂きました。この場を借りて感謝の意を示させていただきます。

同大学の
矢野浩司教授、小川覚美准教授には電気回路の設計においてご指導をいただきました。深く感謝しております。

本田建教授、富田孝幸氏、奥大介氏、柴田文哉氏、池田誠氏、末木聖氏には研究に対する助言・協力だけでなく、日常生活においても御世話になりました。深く感謝しております。

皆様の御指導や実験への御協力、相談にのっていただく事が無ければ本論文の完成はありませんでした。深く感謝しております。