

大阪大学理学研究科物理学専攻

修士論文

# 荷電粒子位置測定用検出器の開発

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻

山中卓研究室 前期博士課程2年

渡邊 誠

2015年2月

## 概要

LHC-ATLAS 実験では、LHC の HL - LHC への移行に伴い、ATLAS 飛跡シリコン検出器のアップグレードを行い、性能評価のためにビームテストを行う予定である。ビームテスト時、シリコン検出器の性能評価をするために、シンチレーションファイバーを並べた検出器を製作した。この検出器はシリコン検出器全体をカバーでき、1mm 程度の位置分解能をもち、高周波数で照射するビームの形と位置をモニターする事ができ、トリガー出力できる。この検出器の動作確認を行い、ビームプロファイルモニタ兼トリガー検出器として利用可能である事を示した。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 ビーム形状測定兼トリガー検出器の仕様	1
<b>第2章 ファイバートラッカーの構成</b>	<b>3</b>
2.1 ファイバートラッカーの概略	3
2.2 粒子検出・光伝搬部～シンチレーションファイバー	4
2.3 シンチレーション光受光部～光検出器 MPPC～	6
2.3.1 MPPC 増幅率の電圧依存性	8
2.4 MPPC 信号読み出し部～EASIROC MODULE～	9
2.4.1 EASIROC MODULE で使用した機能	9
2.5 筐体部	13
2.5.1 ファイバーの固定	14
2.5.2 遮光	15
2.5.3 モバイル性～軽量・コンパクト～	15
<b>第3章 レーザー光による基本試験</b>	<b>17</b>
3.1 実験セットアップ	17
3.2 増幅率の調整	19
3.3 ビームレート耐性試験	21
<b>第4章 <math>\beta</math>線源 <math>^{90}\text{Sr}/\text{Y}</math> による性能評価</b>	<b>26</b>
4.1 実験セットアップ	26
4.2 ファイバートラッカーの光量測定	28
4.3 ファイバートラッカーの検出効率測定	30

<b>第 5 章</b>	<b>ビームテストによるトリガーおよびビームプロファイル測定</b>	<b>32</b>
5.1	実験セットアップ . . . . .	32
5.2	ビーム位置測定 . . . . .	35
5.3	トリガー機能 . . . . .	37
5.4	ペDESTALの Run 毎における安定性 . . . . .	38
<b>第 6 章</b>	<b>考察と今後の課題</b>	<b>39</b>
6.1	第 5 章ビームテスト結果の考察 . . . . .	39
6.2	今後の課題 . . . . .	40
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>42</b>
<b>付 録 A</b>	<b>筐体部の図面</b>	<b>43</b>



# 目 次

2.1	ファイバートラッカーの概略図 . . . . .	3
2.2	本研究で利用したシンチレーションファイバー SCSF-78MJ[1] . . . . .	4
2.3	SCSF-78MJ の断面図 [1] . . . . .	5
2.4	SCSF-78MJ の放出光波長 [1] . . . . .	5
2.5	本研究で利用した MPPC(S10362-11-050C)[3] . . . . .	6
2.6	MPPC 光子検出効率の波長依存性 [3] . . . . .	7
2.7	MPPC の増幅率の逆電圧依存性 . . . . .	8
2.8	EASIROC-MODULE の写真 . . . . .	9
2.9	EASIROC MODULE の機能の概略図 . . . . .	10
2.10	EASIROC-chip の回路図 . . . . .	10
2.11	ペDESTルのトリガーレート依存 . . . . .	11
2.12	EASIROC からの出力信号。黄色が入力した NIM 信号、緑色が増幅・整形のみでピークホールドしていない信号、マゼンタ色が増幅・整形後に入力 NIM 信号のタイミングにてピークホールドされた信号。 . . .	12
2.13	筐体部の写真 . . . . .	13
2.14	ファイバーを固定する 1mm 間隔の溝付きアルミニウム板 (土台側) . . .	14
2.15	ファイバーを固定した状態 . . . . .	14
2.16	筐体土台・蓋部における遮光の構造 . . . . .	15
2.17	筐体側面部における遮光の構造 . . . . .	16
3.1	ピコ秒ライトパルサ PLP-10 の写真 [6] . . . . .	18
3.2	増幅率の調整時のセットアップ概要図 . . . . .	19
3.3	Laser を照射した時の MPPC の ADC 分布 . . . . .	20
3.4	増幅率を調整後の Peak Interval . . . . .	20
3.5	ペDESTルのビームレート依存性測定時のセットアップ概要図 . . . . .	21

3.6	ペDESTALのビームレート依存性測定結果 . . . . .	22
3.7	光量の測定値のビームレート依存性測定時のセットアップ概要図 . . .	23
3.8	光量の測定値のビームレート依存性測定結果 . . . . .	24
3.9	EASIROC を用いた信号の確認 . . . . .	25
3.10	PMamp を用いた信号 (EASIROC 不使用) の確認 . . . . .	25
4.1	外部トリガー使用時のセットアップ概略図 . . . . .	27
4.2	$\beta$ 線非照射時の ADC 分布 . . . . .	28
4.3	$\beta$ 線照射時の ADC 分布 . . . . .	28
4.4	ch 毎の光量 (ピーク値) . . . . .	29
4.5	外部トリガー使用時の検出効率 . . . . .	30
4.6	平均 7.2.p.e. のポアソン分布 . . . . .	31
5.1	ビームテスト時のセットアップ概略 (全体図) . . . . .	33
5.2	ビームテスト時のセットアップ (ファイバートラッカー内のセルフ トリガー) . . . . .	34
5.3	run005 におけるヒットマップ . . . . .	36
5.4	run065 におけるヒットマップ . . . . .	36
5.5	run026 におけるヒットマップ . . . . .	36
5.6	telescope 検出器のヒットマップ . . . . .	37
5.7	ペDESTALの安定性 . . . . .	38
6.1	新しいファイバー固定案 . . . . .	41
A.1	筐体部の図面 1 表 . . . . .	43
A.2	筐体部の図面 1 裏 . . . . .	44
A.3	筐体部の図面 2 表 . . . . .	44
A.4	筐体部の図面 2 裏 . . . . .	45
A.5	筐体部の図面 3 - 4 . . . . .	45
A.6	筐体部の図面 5 - 6 . . . . .	46
A.7	筐体部の図面 7 . . . . .	46
A.8	筐体部の図面 8 - 9 . . . . .	47
A.9	筐体部の図面 10 - 11 - 12 . . . . .	47

# 表 目 次

2.1	Kuraray SCSF-78MJ の材質 [1]	5
2.2	使用した Kuraray SCSF-78MJ の性能 [1]	5
2.3	MPPC(S10362-11-050C) の仕様 [3]	7
3.1	使用したピコ秒ライトパルサのコントローラ PLP-10 の仕様 [6]	17
3.2	使用したピコ秒ライトパルサのレーザーヘッド PLP-10-044c の仕様 [6]	18

# 第1章 序論

我々のグループが現在進めている 高エネルギー陽子・陽子衝突型実験 LHC-ATLAS 計画では、LHC の高輝度化を図る HL - LHC へのアップグレードに伴って 2023 年の RUN4 実験の開始前に、ATLAS 飛跡検出器のアップグレードを行う予定である。アップグレード用 ATLAS 飛跡検出器であるシリコン検出器の性能評価をするためには、ビームテストを行う予定である。

そのためには、約 10mm × 10mm という小さい面積のシリコンセンサー全体をカバーでき、1mm 程度の位置分解能をもち、高周波数でやってくるビームの性質をモニターする事が出来る、ビーム形状測定用検出器が必要になる。

また想定されるビーム試験場としては、CERN、DESY、SLAC、など様々な場所があり、それぞれ DAQ システムが異なる。それらの既存の DAQ システムを使うと、セットアップや解析に時間を浪費する事となるので、自前で DAQ システムを用意したい。

さらに、ビーム形状測定用検出器は、シリコン検出器を読み出すためのトリガーを作る検出器としても使用したい。

またこの検出器は、ビームテストだけではなく  $\beta$  線源・宇宙線等を用いた研究室内での使用も想定している。

## 1.1 ビーム形状測定兼トリガー検出器の仕様

本研究の目的は、ビームの形状を測定でき、またトリガーを出力する検出器をつくることである。この節では、これらの機能を備えた検出器の仕様について述べる。

## ビームの位置を測定するための仕様

ビームをシリコン検出器に照射する際、照射する対象であるシリコン検出器のセンサーのサイズは約 10mm 角であるのに対して、ビームの位置は通常それより大きく動かせるので、シリコン検出器を用いてビームの位置を調べるのは困難である。そこで、ビームを覆う事ができる、より大きな面積の検出器が必要である。また、プロトタイプ用シリコン検出器のセンサー部は最小限の約 10mm 角くらいの大きさになっている場合が多い。したがってシリコン検出器の簡易試験をする際にトリガーを作るには、ピクセルやストリップセンサー数チャンネル分に対応するように 1mm 程度の分解能が必要である。よって、ビームの位置の測定精度は **1mm** を要求する。

## 多チャンネルモバイル性を持つこと

荷電粒子によるビームテストにおいて、一般的にプラスチックシンチレータと PMT1~2 個と NIM モジュールを組み合わせてトリガーを作ることが多い。それらは 1~2 チャンネルのみでは機動性が高いが、1mm の位置精度を得るために PMT のチャンネル数を多くすると、アンプなどの増幅機構や shaper などの整形機構、またディレイケーブルなどの遅延機構等がチャンネル数の分必要になり、それらの機構の大型化、また準備による時間の浪費を招く。

また、PMT を用いると、1000V~2000V 程度の非常に高い電圧 (HV) を出力する HV 電源や HV ケーブルもチャンネル数分必要となってシステムが大型化し、モバイル性は無い。そこで、多チャンネルでもモバイル性があるように、低い電圧で増幅機構を持ち合わせた小型の光検出器を用いる。また信号処理と光検出器に印加する電圧の供給は小型の NIM モジュール 1 個で行う。

## 第2章 ファイバートラッカーの構成

この章では、前章で述べた仕様を満たす検出器として、シンチレーションファイバーを用いた”ファイバートラッカー”を作った。以下その構成物に関して述べる。

### 2.1 ファイバートラッカーの概略

ファイバートラッカーは、図2.1のように、粒子検出・光伝搬部にはx軸,y軸にそれぞれ方向に32本のシンチレーションファイバーを用いる。シンチレーション光の検出部にはファイバーと1対1対応の64個の光検出器 Muti-Pixel Photon Counter(MPPC)を用いる。MPPCの制御・信号読み出しには EASIROC MODULEを用いる。また、シンチレーションファイバーと MPPC の性能を十分に発揮するために、専用の筐体を製作し、遮光性・アライメントを高める。ファイバートラッカーは大きく分けて4つの部位によって構成される。次の節からこれらについて一つずつ述べる。

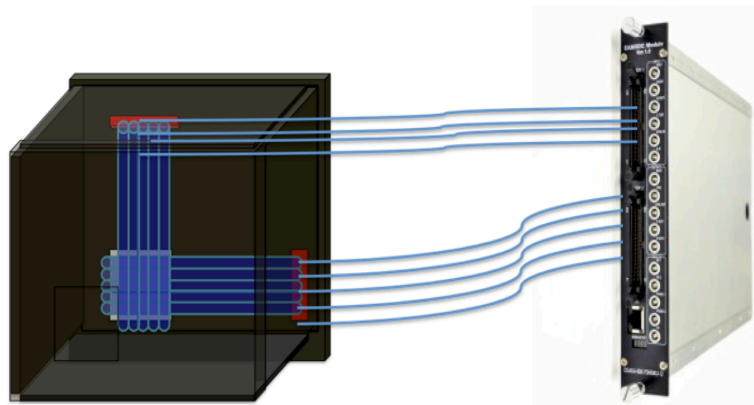


図 2.1: ファイバートラッカーの概略図

## 2.2 粒子検出・光伝搬部～シンチレーションファイバー

シンチレーションファイバーには、プラスチックシンチレーターをファイバー状にした Kuraray 社の SCSF-78MJ を採用する [1]。図 2.2 にその写真を載せる。

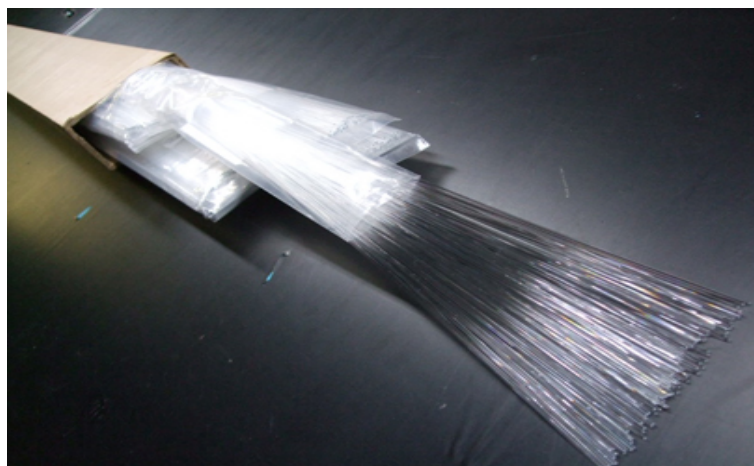


図 2.2: 本研究で使用したシンチレーションファイバー SCSF-78MJ[1]

### SCSF-78MJ の構造・性能

表 2.1 に Kuraray SCSF-78MJ の材質 [1] を、図 2.3 に SCSF-78MJ の断面図をそれぞれ示す。このファイバーは内側 (コア) と外側 (クラッド) の材質が異なり、内側と外側の屈折率の違いから境界で生じる全反射を利用してシンチレーション光を伝達する。ファイバー内側の材質には励起発光する物質が混ぜられている。外側は、光量を増加させるために、マルチクラッドと呼ばれる二層構造になっている。特にコアとクラッドの構造は、後述する検出効率と関連が深い。

表 2.2 に Kuraray SCSF-78MJ の特性、図 2.4 に SCSF-78MJ の放出光の波長分布を示す。放出光の減衰時間は 2.8ns と短く、トリガー信号を作るのに適している。光の減衰長は 4m で、ファイバーの長さより十分長く、著しく光量は減衰しない。

表 2.1: Kuraray SCSF-78MJ の材質 [1]

	物質	反射率	密度 [ $g/cm^3$ ]	原子数 [ $\times 10^{22}/cm^3$ ]	大きさ [ $\mu m$ ](割合)
コア	PS	1.59	1.05	C:4.9 H:4.9	直径 940(94%)
クラッド 外	PMMA	1.49	1.19	C:3.6 H:5.7 O:1.4	厚さ 30(3%)
最外	FP	1.42	1.43		厚さ 30(3%)

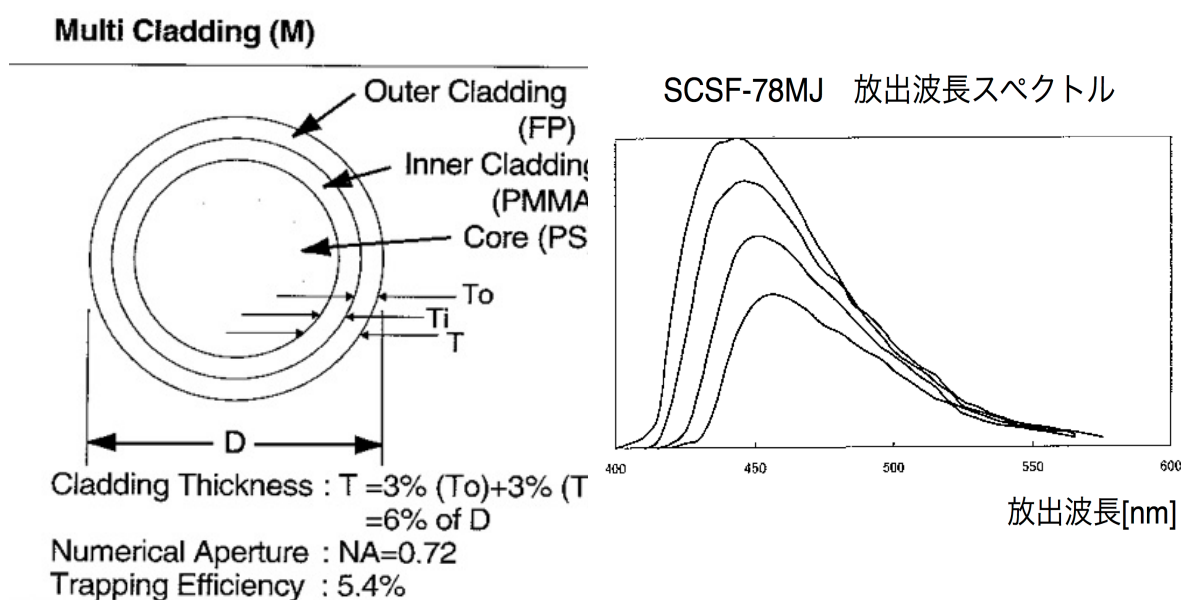


図 2.4: SCSF-78MJ の放出光波長 [1]

図 2.3: SCSF-78MJ の断面図 [1]

表 2.2: 使用した Kuraray SCSF-78MJ の性能 [1]

	Emission peak[nm]	Decay time[ns]	Att. length [m]
SCSF-78MJ	450	2.8	4.0



## 2.3 シンチレーション光受光部～光検出器 MPPC～

シンチファイバーによるシンチレーション光を電気信号に変換するために、小型のピクセル型半導体光検出器の一種である MPPC を用いた。ファイバーと MPPC は gomiconnector によって接続した [2]。MPPC は Avalanche Photo Diode(APD) の集合体であり、並列に接続された APD の信号の和を読み出す。

APD(MPPC) に印可する逆バイアス電圧を高くしていくと、内部の電場が高くなり増幅率は  $10^5 \sim 10^6$  まで増大する。増幅率が増大する閾値である外部印可電圧を降伏 (break down) 電圧と呼ぶ。APD(MPPC) を降伏電圧以上で動作させると、APD はガイガーモードとなり、個々の APD の出力は常に一定となる。MPPC の出力は、APD の出力の和であるので、入射光子数に比例する。APD は一度放電を起こすと直列に接続されているクエンチング抵抗によって雪崩増幅領域まで電圧が降下し、流れている電流が止まる。この後再び充電されて逆電圧が降伏電圧以上になり、ガイガーモードに戻る。

本研究では図 2.5 に示す MPPC(S10362-11-050C) を使用した。型番の末尾である

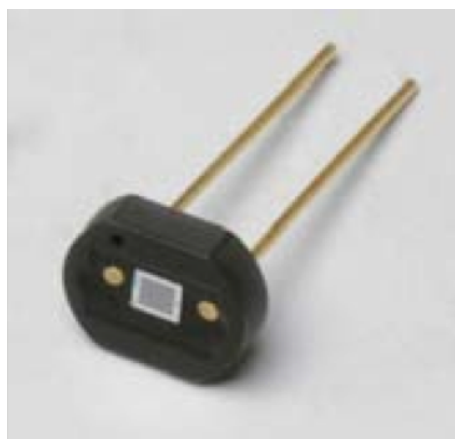


図 2.5: 本研究で使用した MPPC(S10362-11-050C)[3]

050 は APD ピクセルの一辺である  $50\mu\text{m}$  を、C はセラミックを意味する。表 2.3 に MPPC(S10362-11-050C) の仕様を示す。MPPC の増幅率は、MPPC の出力電荷量を入力電荷量で割った値である。

図 2.6 に、MPPC の光子検出効率の波長依存性を示す [3]。MPPC は SCSF-78MJ から放出された光の波長領域をカバーする。

表 2.3: MPPC(S10362-11-050C) の仕様 [3]

Index	
光電面有効領域	1mm × 1mm
APD ピクセル数	20 × 20
APD ピクセルサイズ	50 $\mu$ m × 50 $\mu$ m
感度波長範囲	270~900nm
最大感度時波長	450nm
検出効率	45%
動作電圧	70 ± 10 V
端子間電気容量	35pF
ゲイン (増幅率)	~7.5 × 10 <sup>5</sup>

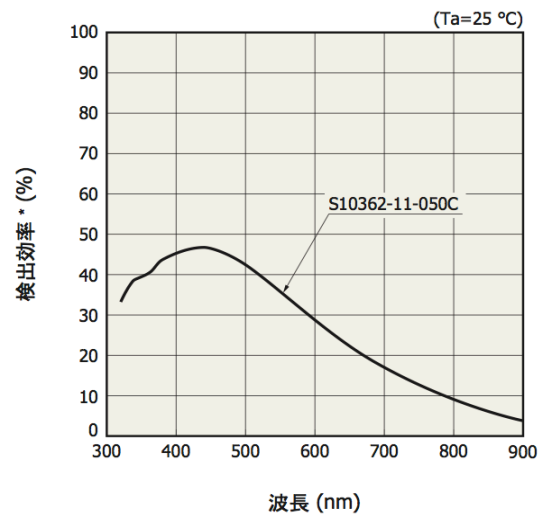


図 2.6: MPPC 光子検出効率の波長依存性 [3]

### 2.3.1 MPPC 増幅率の電圧依存性

MPPCを複数使うファイバートラッカーでは、後述するように複数のMPPC間の増幅率を一定にすることが求められる。

MPPCの増幅率は逆バイアスの印加電圧に依存する。一定温度において、降伏電圧以上においては図2.7に示すように、印加電圧を上げるほどMPPCの増幅率は大きくなる。

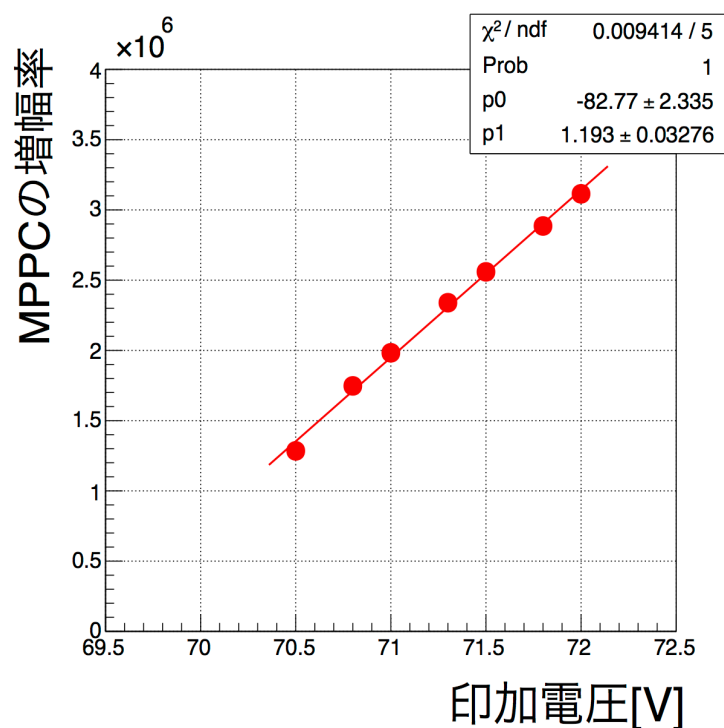


図 2.7: MPPC の増幅率の逆電圧依存性

## 2.4 MPPC信号読み出し部～EASIROC MODULE～

MPPCからの読み出しは石島直樹氏が開発した、NIMに搭載可能なEASIROC-MODULEを採用する(図2.8)[4, 5]。



図 2.8: EASIROC-MODULE の写真

### 2.4.1 EASIROC MODULE で使用した機能

図 2.9 に、EASIROC MODULE の機能の概略図を示す。EASIROC MODULE には、図 2.10 に示す EASIROC という chip[4] が 2 つ搭載されていて、1 つの chip で MPPC の信号を最大 32ch、2chip で最大 64ch 読み出せる。chip の具体的な機能は、MPPC への印加電圧の微調節、MPPC からの出力の増幅 ( $\times 10 \sim 150$ )、その後の slow shaper による信号整形、外部入力による hold 機能、セルフトリガー出力を行うためのディスクリミネーター機能、などである。個々の MPPC に対して、20mV 刻みで最大 0.5V、印加している電圧を下げる事が出来る。これにより、電圧依存性の大きい MPPC の増幅率の微調節を行う。MPPC への印加電圧は、EASIROC MODULE 内に搭載されている LT3482 から供給できるため、外部からの HV 供給を必要としない。

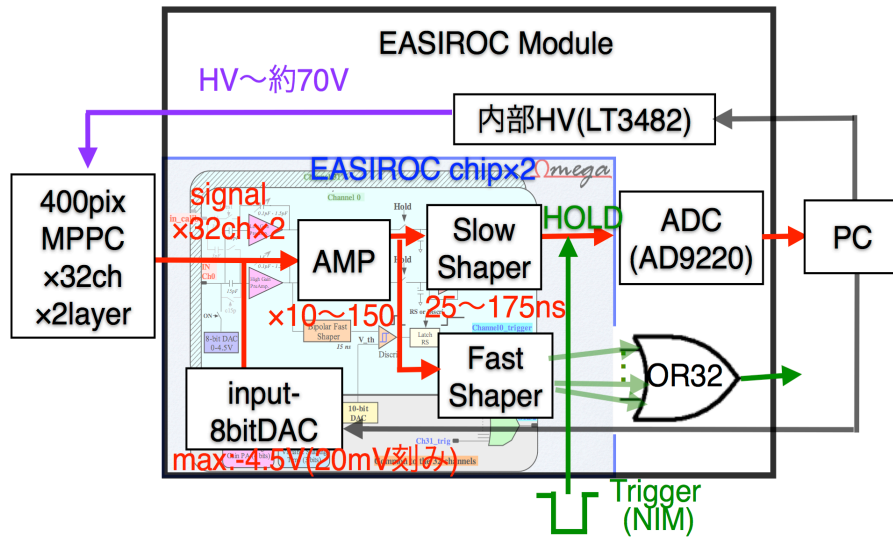


図 2.9: EASIROC MODULE の機能の概略図

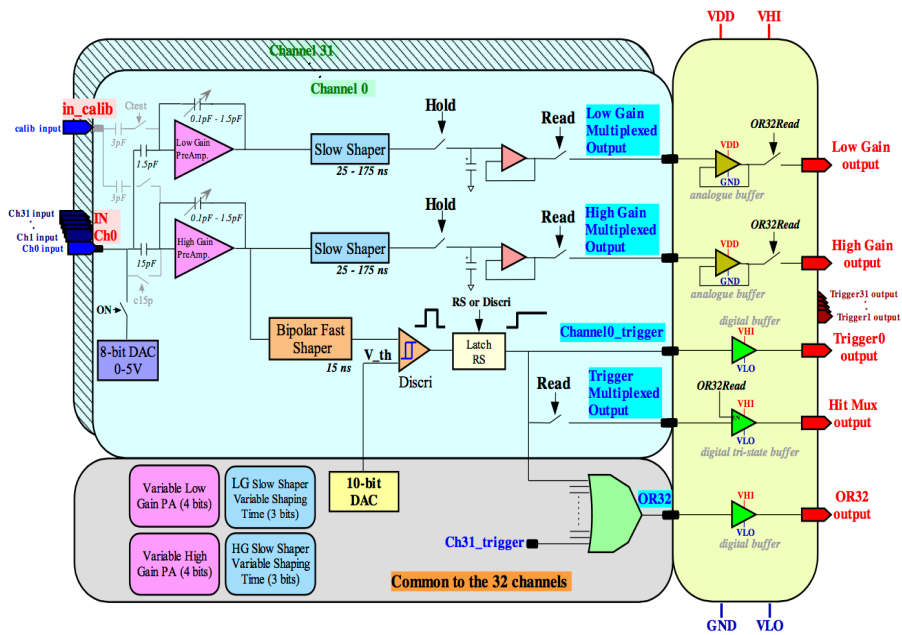


図 2.10: EASIROC-chip の回路図

EASIROC chip 内に入力された信号は、増幅・整形・ホールドされた後、AD9220 という ADC によって記録される。AD9220 は 12bit のピークホールド型 ADC であるため、MPPC のノイズの 1 つであるアフターパルスには不感である。AD9220 の サンプルング周波数は 600kHz であり、1 チャンネル分のホールドタイムに相当する レートである。AD9220 は、EASIROC MODULE に 2 つ搭載されており、EASIROC chip と 1 対 1 で対応している。1 つの AD9220 が 32 チャンネル分を処理するため、信号をホールドしてからおよそ  $50\mu\text{s}$  の間は新たな信号をデータとして記録する事は出来ない。そのためビームレートにしておよそ 20kHz 以上の場合は、正しい ADC の 値を得る事ができない (図 2.11)。 (注) ちなみに、トリガー検出器として利用する

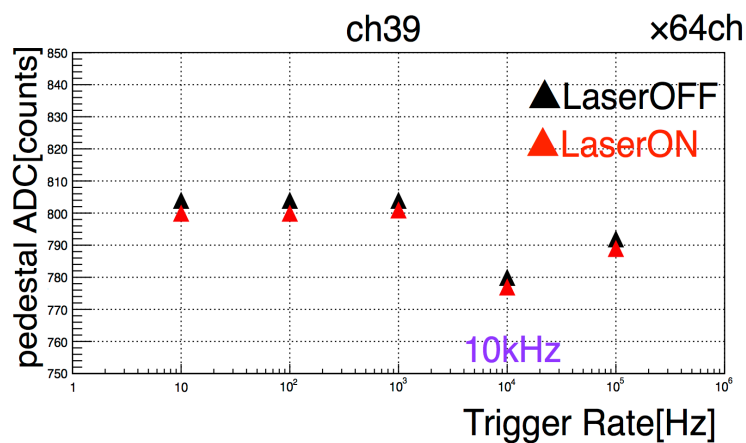


図 2.11: ペDESTALのトリガーレート依存

際、トリガーを供給するという意味では、20kHz は上限にはならない。

図2.12に、オシロスコープで見た EASIROC MODULE の出力例を示す。入力 NIM 信号 (黄色) のタイミングで入力信号の高さが保持される。

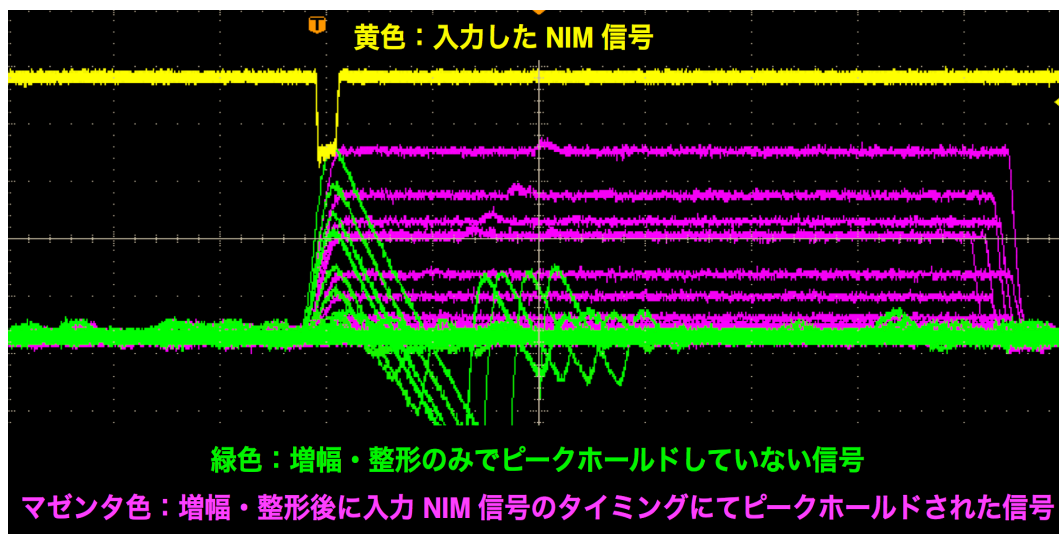


図 2.12: EASIROC からの出力信号。黄色が入力した NIM 信号、緑色が増幅・整形のみでピークホールドしていない信号、マゼンタ色が増幅・整形後に入力 NIM 信号のタイミングにてピークホールドされた信号。

## 2.5 筐体部

この章では、製作した筐体部について述べる。筐体は、シンチレーションファイバーと MPPC を固定する治具と遮光の役割を持っている。また、モバイル性のために筐体は軽くコンパクトである。これらについて以下で述べていく。

図 2.13 に、製作した筐体部の写真を示す。図面は Appendix に載せる。中央左下にはビームが通る穴があいている。ビームの向きを  $z$  軸とする。図の上方向に向かって  $y$  軸、右方向に向かって  $x$  軸を定義する。ビーム穴の周りにはファイバーを固定するための溝が 1mm 間隔で掘ってある。その  $x, y$  方向の延長線上には壁があり、 $yz$  面と  $zx$  面それぞれに縦に 4 つずつ穴が空いている。ここに EASIROC MODULE から伸びるフラットケーブル端のコネクタ (HIF3BB-64D-2.54R) を差し込んで接着剤で固定した。またそのコネクタの内側に MPPC の電極を挿入し、MPPC と EASIROC MODULE をつないだ。

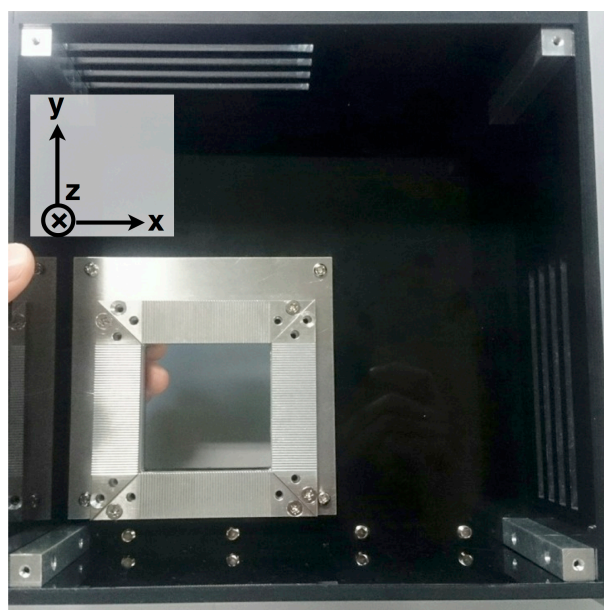


図 2.13: 筐体部の写真



## 2.5.1 ファイバーの固定

ファイバーは、2つの特別なアルミニウム板で固定した。図 2.14 に示す 1 つ目のアルミニウム板には 1mm 間隔で溝が掘られており、そこにファイバーをはわせた。

図 2.15 に、ファイバーを固定した状態の写真を示す。土台側 (1 つ目) と押さえつける側 (2 つ目) との 2 つのアルミニウム板で、ファイバーをはさみ、固定した。摩擦が加わりやすいように、2 つ目のアルミニウム板の内側にスポンジを付着した。



図 2.14: ファイバーを固定する 1mm 間隔の溝付きアルミニウム板 (土台側)



図 2.15: ファイバーを固定した状態

## 2.5.2 遮光

ここでは遮光性について述べる。1個の光子にも感度があるMPPCを用いるため「遮光」にこだわる構造になっている。

光の直進、反射性を利用し、土台、蓋、側面に溝を掘って段構造にすることによって遮光した。図2.16に示すように、土台・蓋の部分に側面が差し込めるような溝が掘ってある。

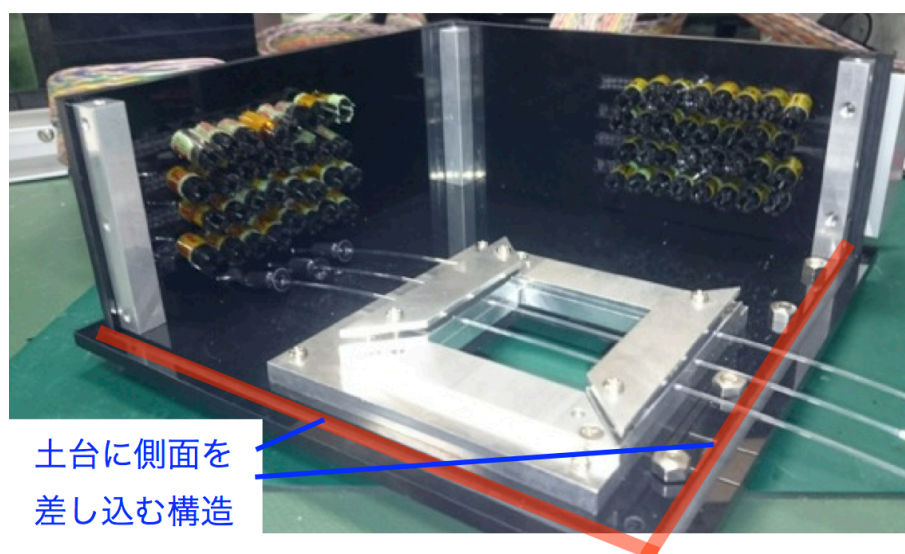


図 2.16: 筐体土台・蓋部における遮光の構造

側面も図2.17に示すように、x方向の壁にy方向の壁が差し込めるような溝が掘ってあり、組み合わせることで、遮光になる。

ビーム穴は、物質量の少ないブラックシートによって遮光した。また、フラットケーブルの端のコネクタと側面の壁の隙間を埋めて、遮光するために、黒い接着剤(コニシ ボンドウルトラ多用途SUプレミアムソフト 25ml ブラック・黒 05142-BK)を用いた。

## 2.5.3 モバイル性～軽量・コンパクト～

ここでは、モバイル性に関して述べる。様々なビームテストに持ち運びをすることから、筐体は軽量・コンパクト・壊れにくいことが要求される。筐体部の大部分に

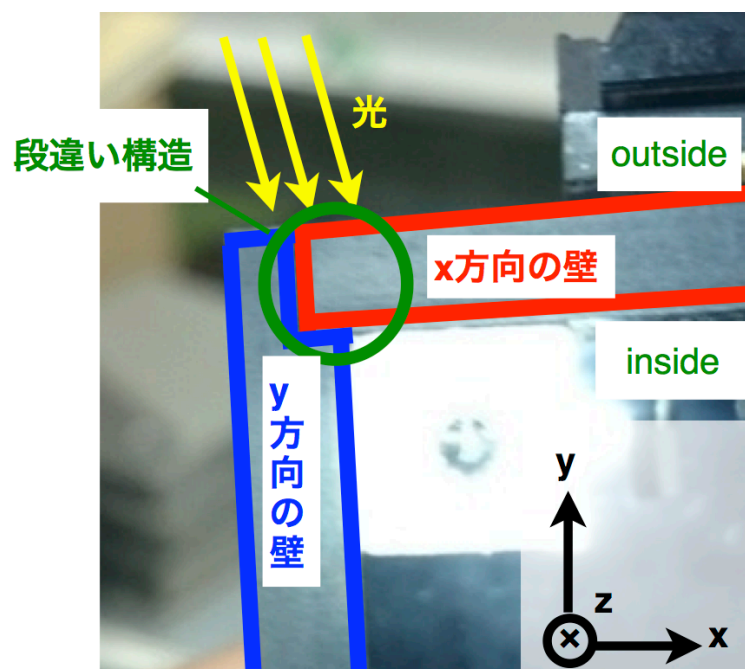


図 2.17: 筐体側面部における遮光の構造

は、ABS樹脂という物質を用いた。ABS樹脂の密度は、 $1.035[g/cm^3]$ (実測値)である。筐体部(ケーブル、EASIROCを除く)のファイバーMPPC込みの重量は、**995g**と**軽量**であり、大きさは $200mm \times 200mm \times 80mm$ である。

5章で述べるCERNにおけるビームテストではこのファイバートラッカーを用いた。そのために私自身がファイバートラッカーの輸送を行ったが、そのコンパクト性また軽さ故に、機内持ち込みができた。

## 第3章 レーザー光による基本試験

この章では、レーザーによる実験について述べる。レーザーを用いてMPPCに関連する基礎的な実験と、ビームレート耐性試験を行った。MPPCに関連する基礎的な実験では、MPPCとEASIROC MODULEを通しての出力と動作の確認をし、MPPC間の増幅率を一定に調節した。ビームレート耐性試験においては、レーザーをビームと見立ててレートを変え、重要な測定値であるペDESTALと光量の安定性を試験した。

### 3.1 実験セットアップ

実験で用いたレーザーであるピコ秒ライトパルサのコントローラ PLP-10 とレーザーヘッド PLP-10-044c の写真を図 3.1 に、レーザーコントローラ PLP-10 の仕様を表 3.1 に、レーザーヘッド PLP-10-044c の仕様を表 3.2 に示す。PLP-10 のコントローラに、NIM もしくは TTL 信号を入力するとレーザーのパルスが出力される。また水晶発振器が搭載されており、レーザーの発信と同期して NIM 規格のクロックを出力可能である。レーザー出力から NIM 出力までの時間差は、数 10ns である。レーザーの出力強度は強力であったが、光ファイバー経由の出力と照射対象の間にアクリル板をおいて、レーザー光を減衰させることにより、MPPC の出力信号が飽和しないようにした。

表 3.1: 使用したピコ秒ライトパルサのコントローラ PLP-10 の仕様 [6]

	パルス幅 [ps]
PLP-10	70



図 3.1: ピコ秒ライトパルサ PLP-10 の写真 [6]

表 3.2: 使用したピコ秒ライトパルサのレーザーヘッド PLP-10-044c の仕様 [6]

	放出波長 [nm]
PLP10-044c	445

## 3.2 増幅率の調整

**セットアップ** 図 3.2 に増幅率調整時のセットアップ概要図を載せる。EASIROC の入力トリガーには、Laser 内部にある Laser の位相と同期した CLOCK generator を用いた。

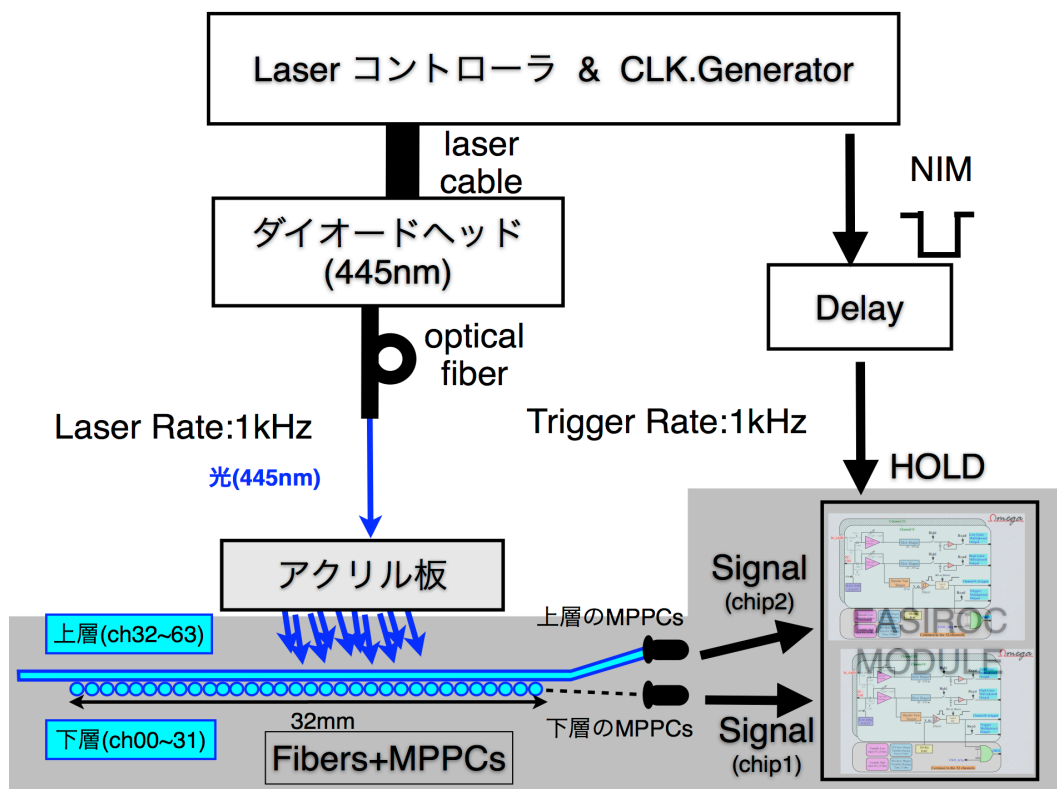


図 3.2: 増幅率の調整時のセットアップ概要図

**結果** 増幅率に関連するパラメータとして Peak Interval を用いる。Peak Interval は Laser を MPPC に照射した時、取得した ADC 分布の 1p.e.(光電子) とペDESTAL の対応するピークの差と定義する。図 3.3 に実際に得たチャンネルの ADC 分布を示す。

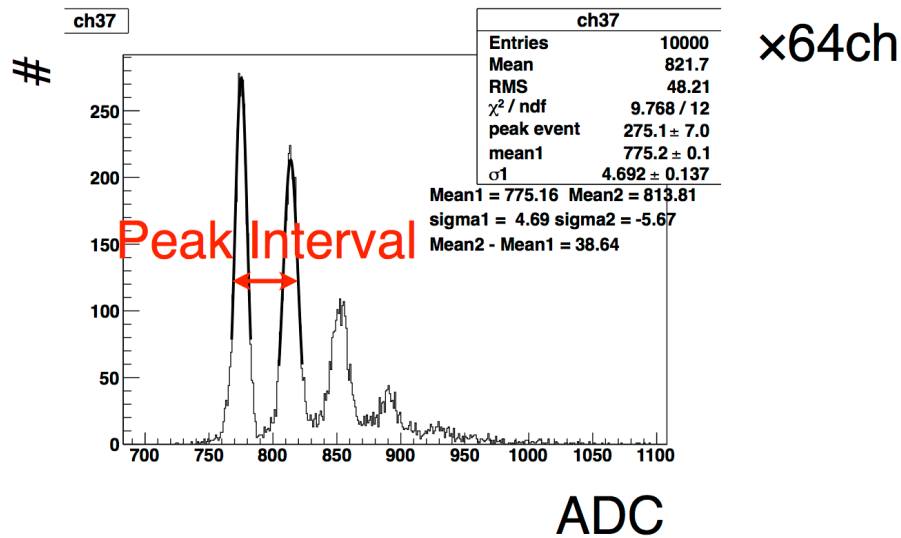


図 3.3: Laser を照射した時の MPPC の ADC 分布

図 3.4 に、増幅率を調整した後の Peak Interval を示す。後述する  $\beta$  線による実験において、2つの理由で 1p.e. が 40ADC[count] に対応するように増幅率を合わせた。1つ目は、信号の最大値が 12bit つまり 4095ADC[counts] を超えないようにしたい。2つ目は、印加電圧が低い場合、各ピークが確認できない。一方で印加電圧が高すぎる場合、アフターパルスの発生の増加を招く。アフターパルスはレーザー光に対応する信号の極大値以外のタイミングにてホールドされるので、ADC[counts] の分解能が悪くなる。

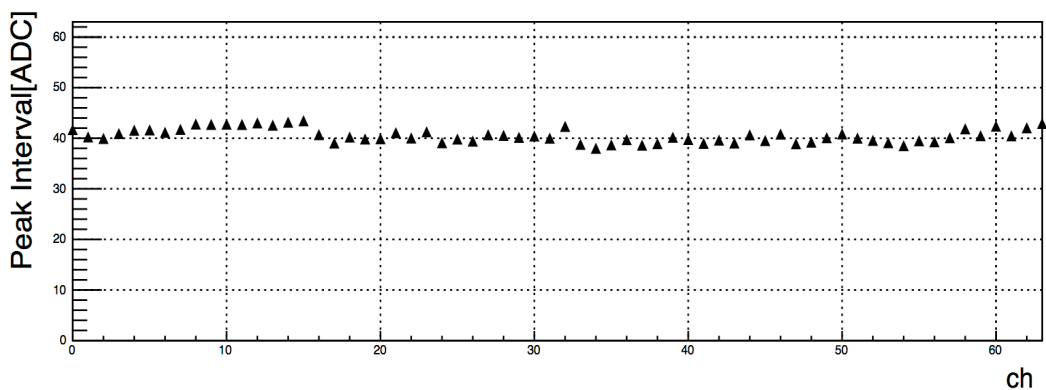


図 3.4: 増幅率を調整後の Peak Interval

### 3.3 ビームレート耐性試験

#### ペDESTALのビームレート依存性測定

**セットアップ** 図 3.5 に ADC のペDESTALのビームレート依存性測定時のセットアップ概要図を載せる。EASIROC の入力トリガーには、2つの同位相でありながら異なるレートを出力できる function generator を用いた。ペDESTALを測定するために、レーザーが発光していないタイミングを選んでホールドを行った。

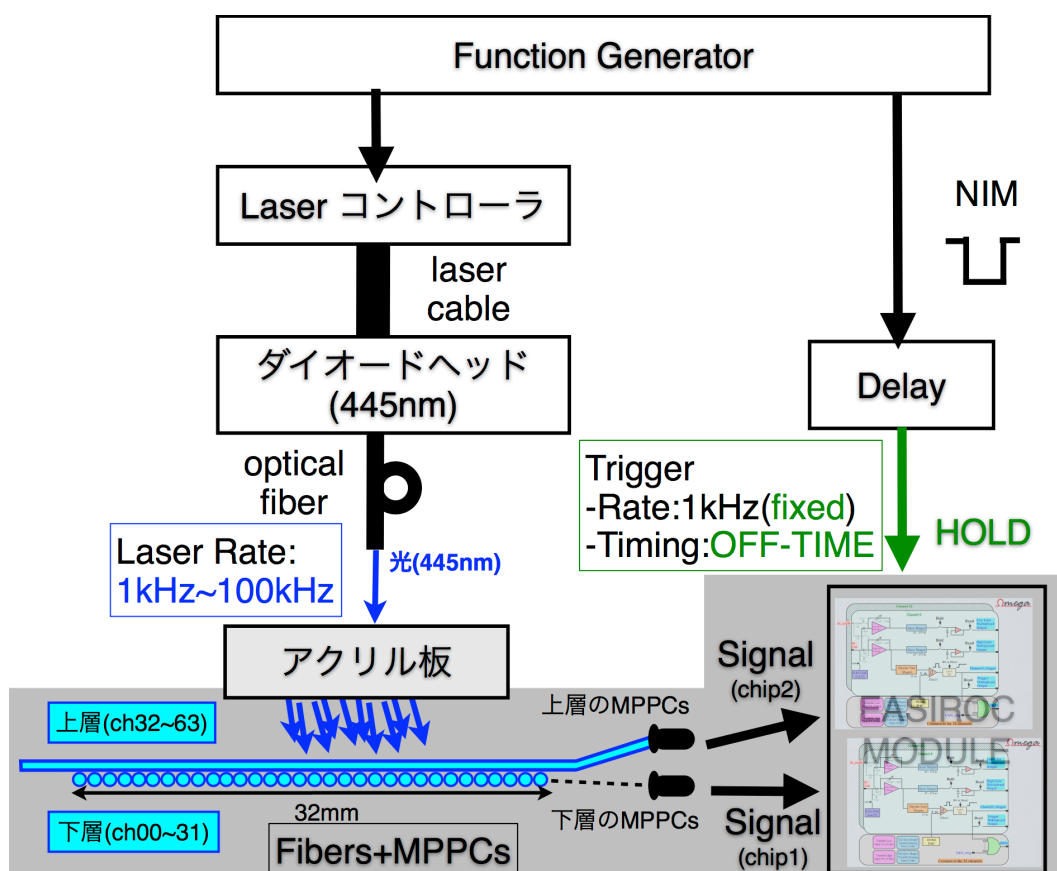


図 3.5: ペDESTALのビームレート依存性測定時のセットアップ概要図



結果 図 3.6 にペDESTALのビームレート依存性の測定結果を示す。100kHz まで変動が無い事がわかる。

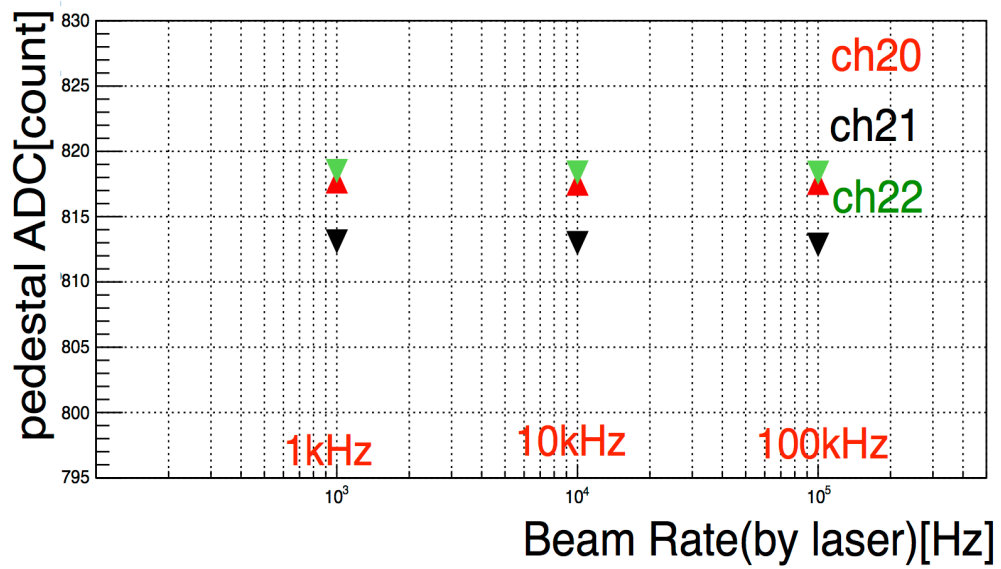


図 3.6: ペDESTALのビームレート依存性測定結果

## 光量の測定値のビームレート依存性測定

**セットアップ** 図 3.7 に光量の測定値のビームレート依存性測定時のセットアップ概要図を載せる。EASIROC の入力トリガーには、2つの同位相でありながら異なるレートを出力できる function generator を用いた。MPPC の光量変化を測定するために、MPPC の信号のピークであるタイミングを選んでホールドを行った。

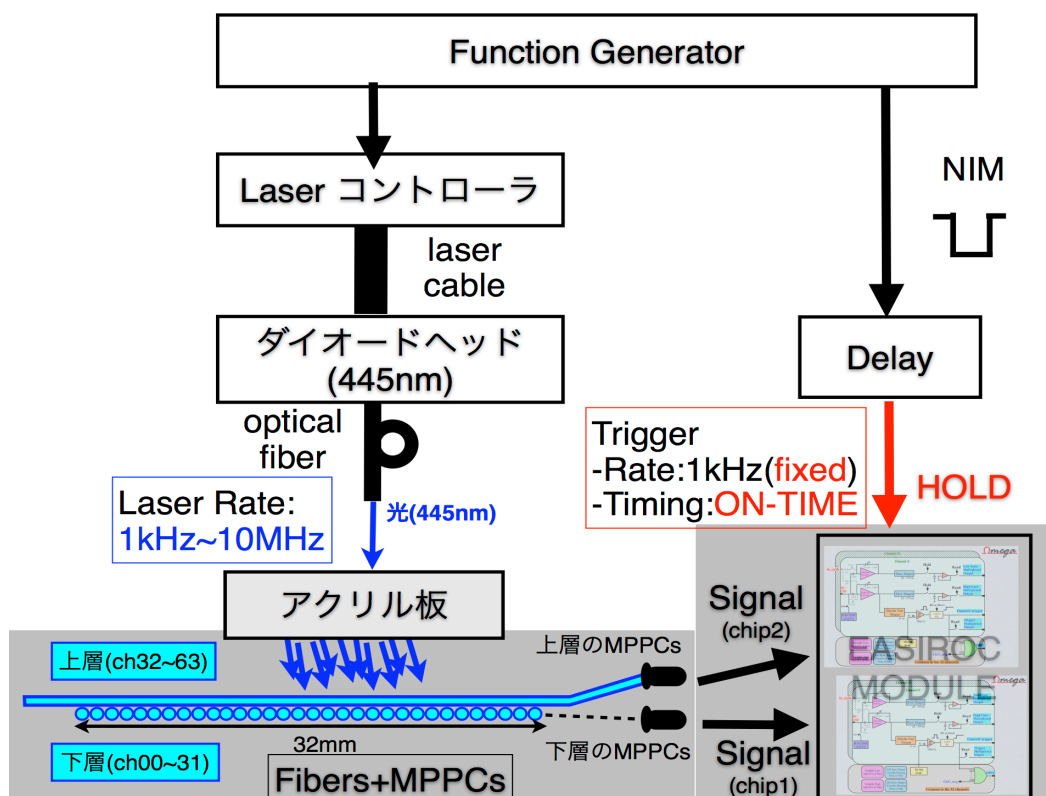


図 3.7: 光量の測定値のビームレート依存性測定時のセットアップ概要図

結果 図 3.8 に光量の測定値のビームレート依存性の測定結果を示す。

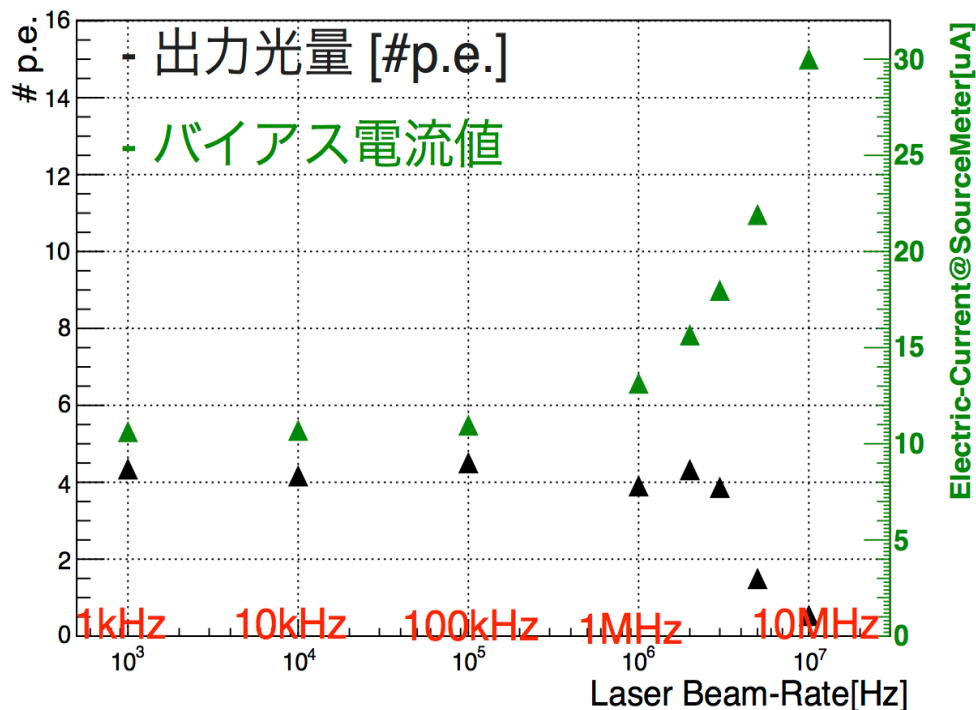


図 3.8: 光量の測定値のビームレート依存性測定結果

ビームレートが 100kHz までは光量測定値の変化はない。2MHz 以上では出力される光量が低くなる。この事に関して、考察する。EASIROC を用いた信号を図 3.9 に、EASIROC 使用せず PMamp を用いた信号を図 3.10 に示す。これらに示すように EASIROC 内の slow shaper が遅い事が原因である。

また、ビームレート毎にバイアス電流値も同時にモニタした。特にビームレートが 2MHz 以上のとき、光量測定値の減少にしたがい、バイアス電流値が増加する事が分かる。

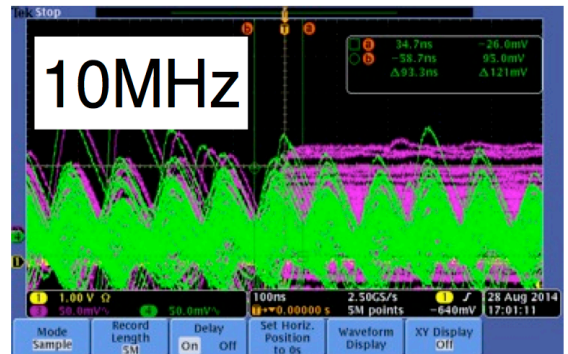
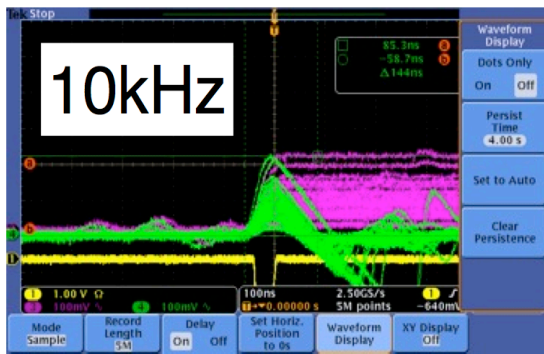


図 3.9: EASIROC を用いた信号の確認

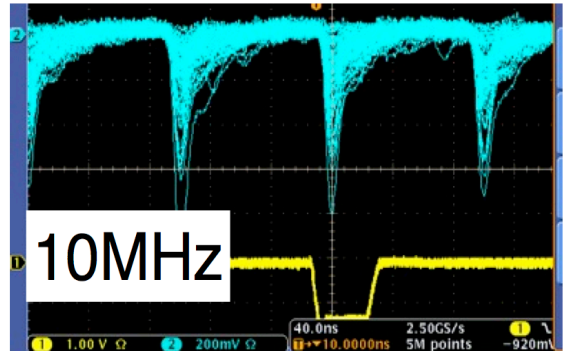
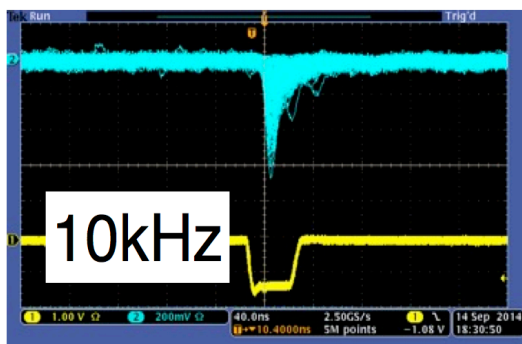


図 3.10: PMamp を用いた信号 (EASIROC 不使用) の確認

## 第4章 $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ による性能評価

この章では、 $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ による実験について述べる。目的は、ファイバートラッカーの基本的な性能を測定する事である。

### 4.1 実験セットアップ

図 4.1 に $\beta$ 線源による光量測定・検出効率測定共通のセットアップ概略図を示す。セットアップは、光量測定・検出効率測定実験で共通である。光量と検出効率の測定時には、外部トリガーを用いる。実験で用いた主な機材は、図 4.1 に示すように上側から順に

- $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$
- ファイバートラッカー
- 外部トリガーカウンター：幅 10mm × 厚さ 5mm × 長さ 60mm の角プラスチックシンチレータと PMT の組み合わせ

を配置した。具体的には、 $\beta$ 線源はファイバートラッカーのファイバー部分の上に直接置き、外部トリガーカウンターは、 $\beta$ 線源の真下にくるようにファイバートラッカーから下へ 30mm の地点に配置した。光量測定時、 $\beta$ 線源は、数 ch のファイバーの領域しかカバーしないので、 $\beta$ 線源の設置地点を数点において測定を行った。その際外部トリガーカウンターも $\beta$ 線源の真下になるよう適宜設置した。PMT 出力が電氣的なノイズよりも高い時のみ、EASIROC MODULE へトリガーを送った。

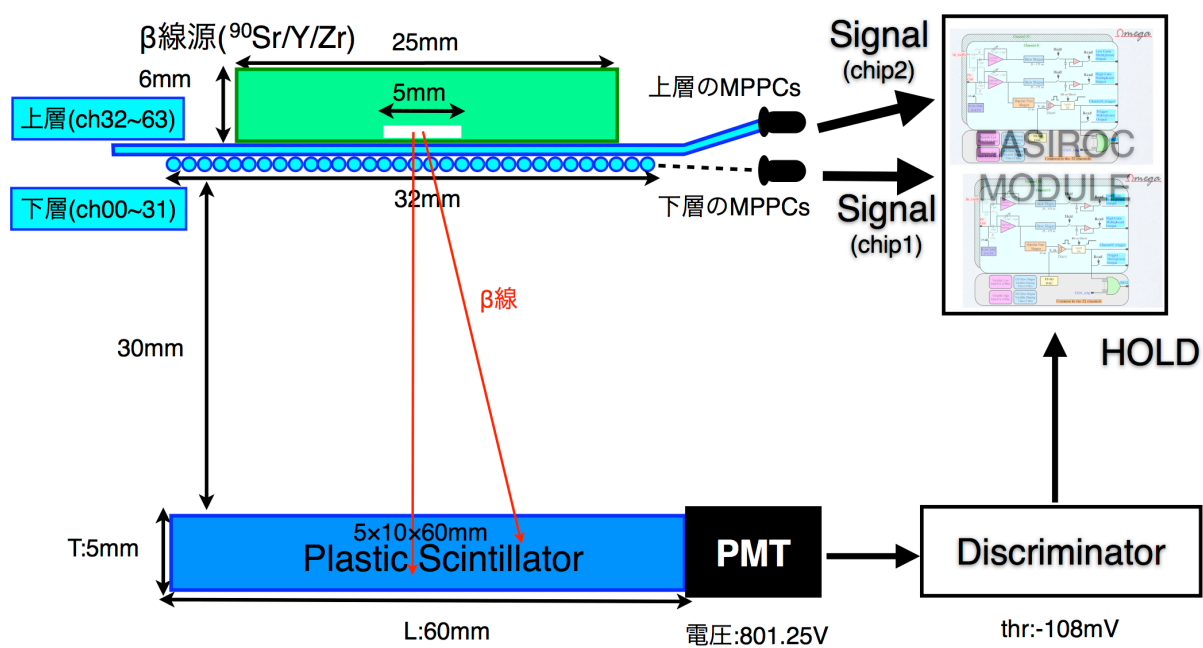


図 4.1: 外部トリガー使用時のセットアップ概略図

## 4.2 ファイバートラッカーの光量測定

例として、30チャンネル目に関して、 $\beta$ 線非照射時のADC分布を図4.2に、 $\beta$ 線照射時のADC分布を図4.3に示す。照射時のADC分布の光量が0や1p.e.程度の部

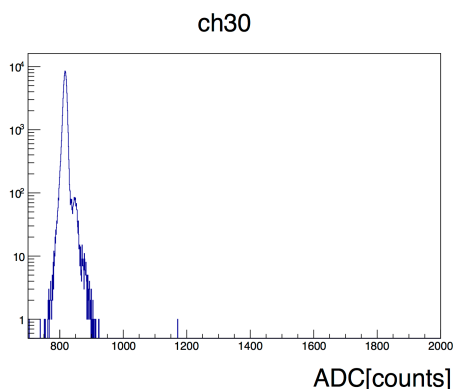


図 4.2:  $\beta$ 線非照射時のADC分布

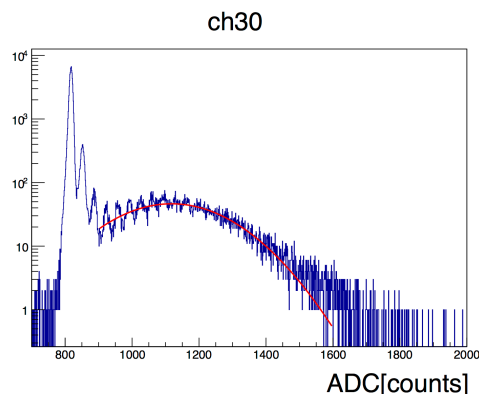


図 4.3:  $\beta$ 線照射時のADC分布

分は他のchに粒子が通過しているときの寄与である。その寄与のみが分布している非照射時のADC分布をみると、光量が高い領域にはしみ込みが十分小さく、照射時のADC分布の光量のMeanに影響を与えないことがわかる。

光量の定義について述べる。照射前にあらかじめペDESTALの位置を確認する。 $\beta$ 線照射時のADC分布の2p.e.以上の領域をガウス関数でフィットし、その中心とペDESTALの差の値を光量と定義する。図4.4にch毎の光量(ピーク値)[p.e.]の結果を示す。 $\beta$ 線照射時の光量(ピーク値)は53ch分の平均で**7.2p.e.**である。

結果の考察を行う。チャンネル毎の最大光量が揃っておらず、MPPCの増幅率のさらなる調整が必要である可能性がある。

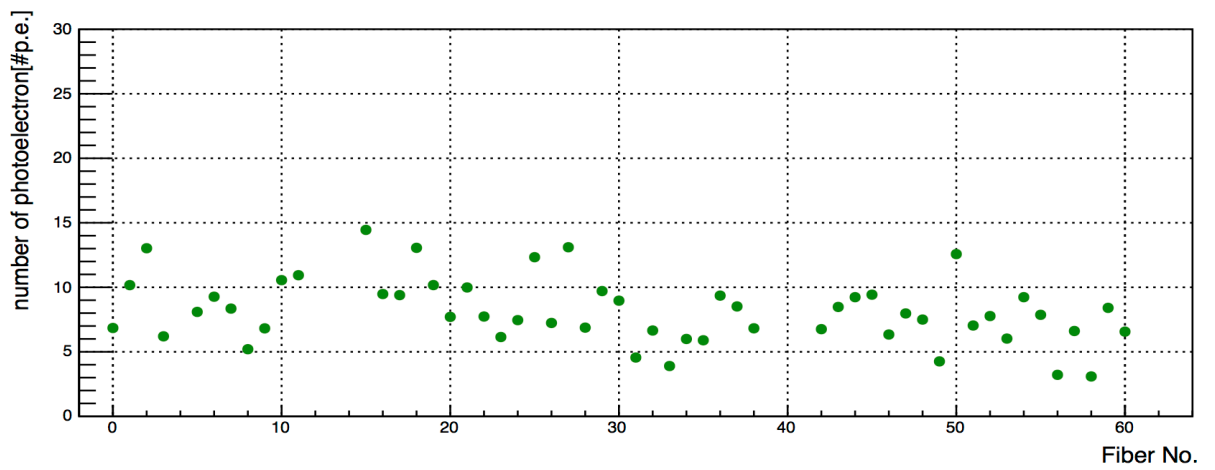


図 4.4: ch 毎の光量 (ピーク値)



### 4.3 ファイバートラッカーの検出効率測定

検出効率の定義について述べる。まず、ファイバートラッカーが検出したイベント数は、上下の層それぞれで同時に 2p.e. 以上の出力をもつファイバーがあるイベント数とする。次に、外部トリガーが検出したイベント数は、 $\beta$ 線がファイバートラッカーの下部に設置した外部トリガーカウンターが検出した数とする。ファイバートラッカーが検出したイベント数(前者)を外部トリガーカウンターが検出したイベント数(後者)で割ったものを検出効率と定義する。

図 4.5 に検出効率の測定結果を示す。外部トリガーカウンターが検出した 1 イベント

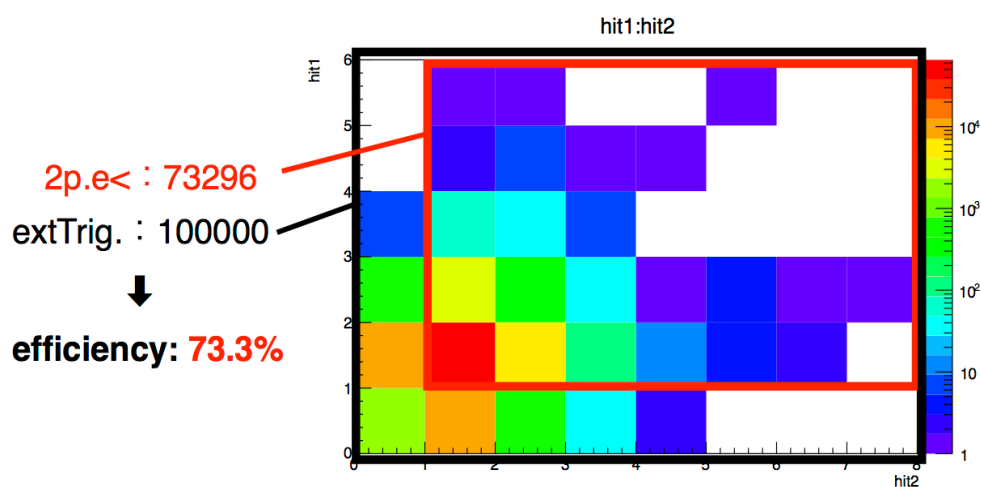


図 4.5: 外部トリガー使用時の検出効率

ト毎に、2p.e. 以上の光量がある下層のファイバーの数を x 軸に、2p.e. 以上の光量がある上層のファイバーの数を y 軸に示す。赤い線で囲った領域が、上下の層どちらも 2p.e. 以上の光量があるファイバーがそれぞれ 1 本以上あるイベントとなる。赤い線で囲った領域内には、73296 イベントある。黒い線で囲った領域が、外部トリガーが検出したイベントであり、その総数は 100000 である。したがって、検出効率の値は 73.3% である。

この検出効率が、前節で得られた光量で妥当か調べる。得られた光量である平均 7.2p.e. のポアソン分布を図 4.6 に示す。この分布の 2p.e. 以上を積分すると、99.41% となる。今回測定した検出効率はそれより低い。これは考察のところで後述する。

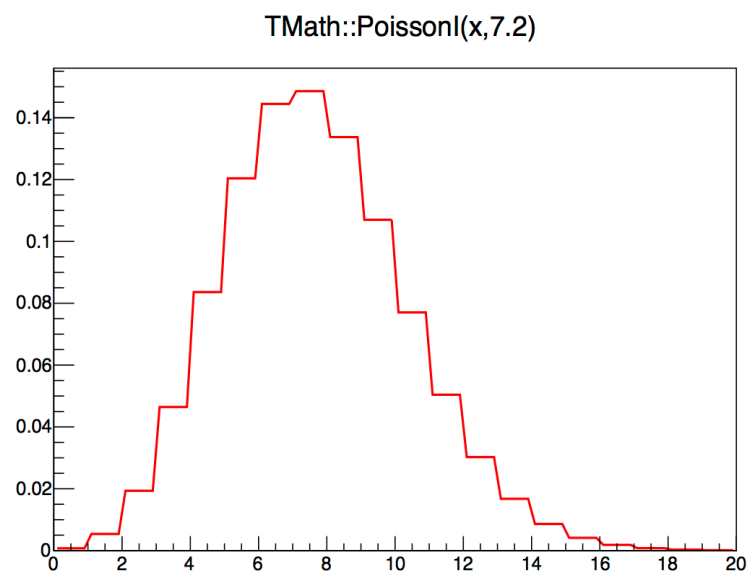


図 4.6: 平均 7.2.p.e. のポアソン分布

# 第5章 ビームテストによるトリガーおよびビームプロファイル測定

この章では、実際にビームラインにて荷電粒子によるビームテストを行った結果について述べる。具体的には、ファイバートラッカーによるビーム位置測定、またファイバートラッカーのトリガー機能の確認を行う。ビーム位置測定では、実際にファイバートラッカーによってビームの相対位置を確認する。またファイバートラッカーで使ったトリガーを実際にテレスコープ検出器の読み出し用い、トリガー機能を確認する。

## 5.1 実験セットアップ

10月下旬から11月上旬まで、CERNのSPSから出力されるおよそ数十kHzの $120\text{GeV}\pi^+$ ビーム(時には $\mu^+$ となる)を用い、トリガーの生成およびビームプロファイル測定を行った。図5.1に示のように、上流側から

- ファイバートラッカー
- テレスコープ検出器×2
- DUT
- テレスコープ検出器×2

という順番で設置した。ここでDUTとは、将来RUN4実験以降、実際にインストールされるシリコン検出器の候補である。“**テレスコープ検出器 (SVX4)**”とは、東野聡氏が設計開発したDUTに対するビームのヒット位置を詳細に調べるための、数 $\mu\text{m}$ の位置分解能をもつシリコン検出器である。[5, 7]。

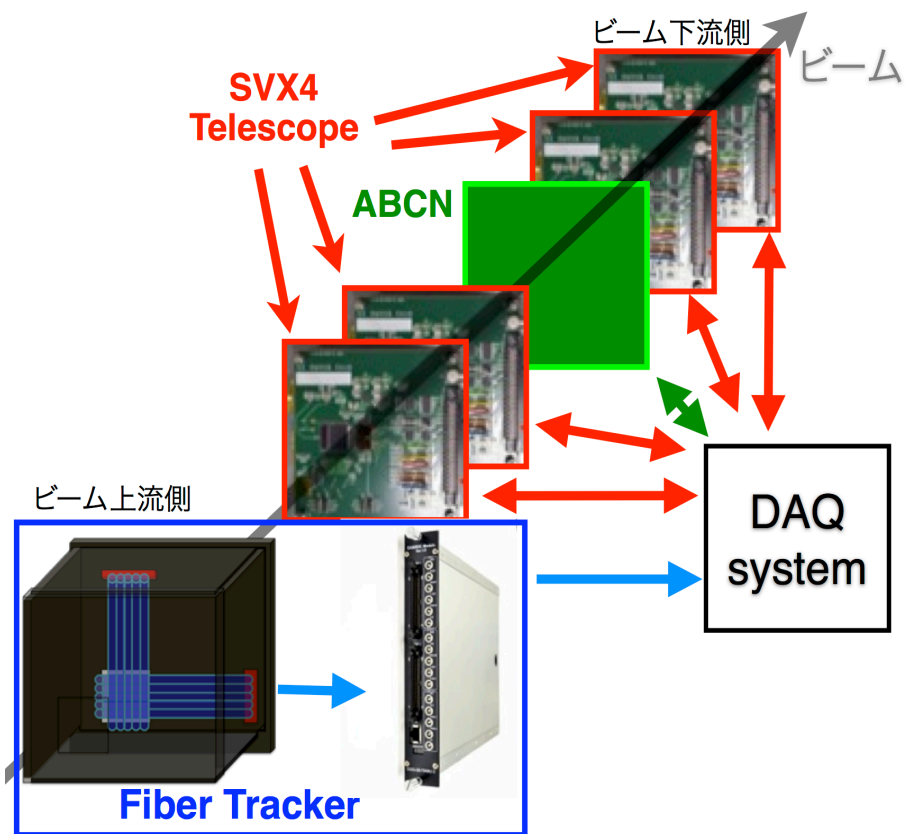


図 5.1: ビームテスト時のセットアップ概略 (全体図)

## テレスコープのトリガーレート耐性と DAC Threshold

ファイバートラッカーは、ビームプロファイルモニタだけでなくトリガー検出器としても利用され、EASIROC MODULE から出力されたトリガーは、テレスコープ・DAQ システムへ入力された。トリガー出力条件は、いずれかのファイバーが EASIROC 内のディスクリミネーターへ入力した 10bit-DAC threshold の閾値以上の出力をもつイベントが上下の層にて同時に起こった時である。図 5.2 にセルフトリガー使用時の論理回路を示す。

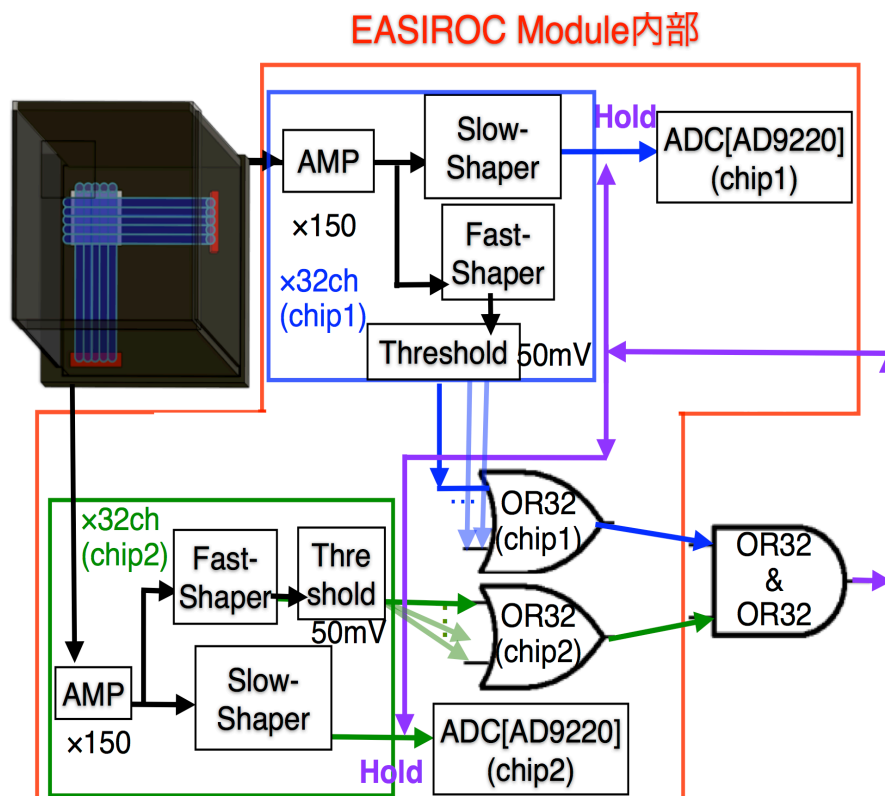


図 5.2: ビームテスト時のセットアップ (ファイバートラッカー内のセルフトリガー)

本来、トリガーレートの上限は 100kHz であるが、テレスコープの読み出し・DAQ システムが開発途中であったため、CERN での Beamtest 時のトリガーレートの上限は 30Hz であった。そのため、EASIROC 内の DAC threshold を高く設定し、さらにファイバートラッカーから出たトリガーをプリスケールすることにより、テレスコープへのトリガーレートを下げ、30Hz 以下にした。閾値は具体的にはパルス高の電圧値にして 50mV であり、10p.e. 相当である。

## 5.2 ビーム位置測定

ビーム位置測定のため、ビーム中心がファイバートラッカーに収まっているかどうかを確認した。以下ファイバートラッカーのヒットマップの図を数枚見せる。

ヒットマップの軸の定義は、縦軸が下流側の層、横軸が上流側の層における、イベント毎に閾値以上でかつ最大光量のチャンネルである。(下流からみて、下流側が0~31chでY[mm]方向を、上流側が32~63chでX方向[mm]を規定する。)

図 5.2 に、run005 でのパイオンビーム入射時のビームプロファイルを示す。ビームは上流側から見て Y 軸マイナス方向へ偏っている。図 5.2 に、run065 でのミュオンビーム入射時のビームプロファイルを示す。ビームは上流側から見て X 軸プラス方向へ偏っている。図 5.2 に、run026 でのパイオンビーム入射時のビームプロファイルを示す。ビームは上流側から見て Y 軸方向にはチャンネル 10 から 22、X 軸方向にはチャンネル 35 から 50 の間に強く分布している。この状態で、テレスコープ検出器によってもビーム位置を測定する事ができた。

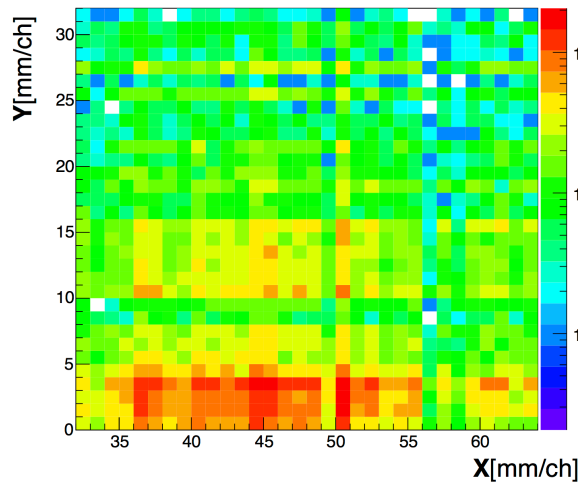


図 5.3: run005 におけるヒットマップ

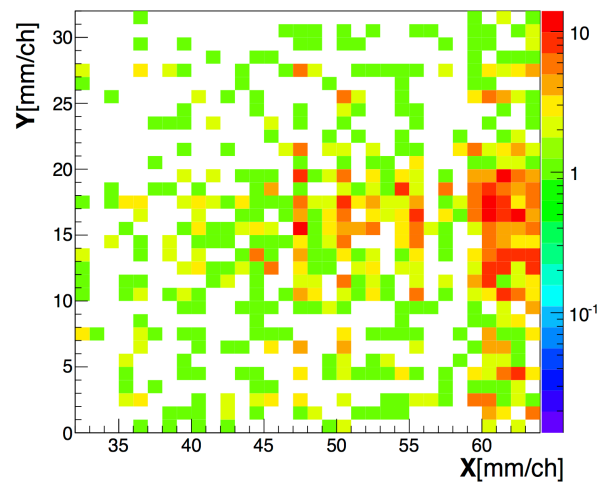


図 5.4: run065 におけるヒットマップ

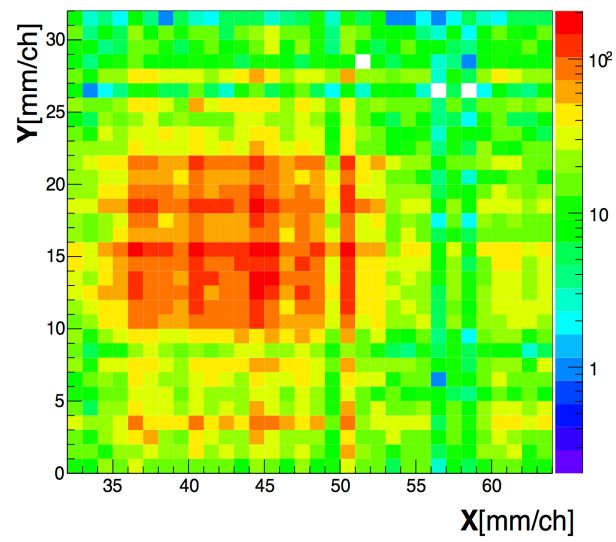


図 5.5: run026 におけるヒットマップ

### 5.3 トリガー機能

ビームがファイバートラッカーのいずれかのファイバーを通過したときにトリガーを出力して、そのトリガーで望遠鏡検出器がデータを取得すると、望遠鏡検出器の特定の位置のみにヒットがあるはずである。図 5.6 に、下流にあるビーム位置精密測定のための望遠鏡検出器のヒットプロファイルを載せる。

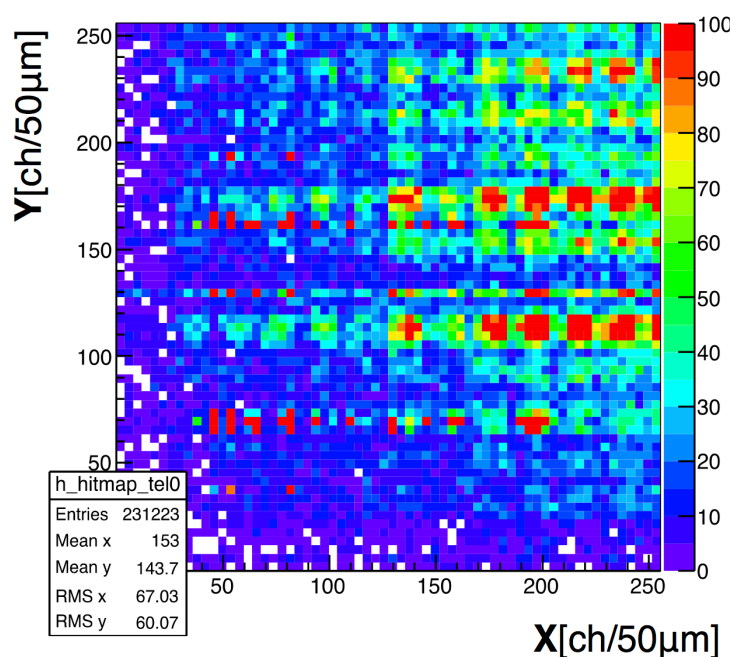


図 5.6: telescope 検出器のヒットマップ

ファイバートラッカーにヒットする粒子数の大小によって濃淡が出来ている。具体的には望遠鏡の X 軸 200 前後かつ Y 軸 120 前後を中心として赤い正方形に近いヒットパターンがある。これは 1 つの丸形ファイバーに注目したとき、中心から外にいくにつれて荷電粒子の通過距離が減少することで放出光量が少なくなり、さらに丸形ファイバーを交差するよう並べていることに起因する。よってファイバートラッカーはトリガー検出器として機能しているといえる。



## 5.4 ペDESTALのRun毎における安定性

図 5.7 には、例として 10 チャンネル目における、RUN47 から 83 におけるペDESTALをガウシアンフィットした Mean(ピーク) の ADC 値を示す。数 Run において大

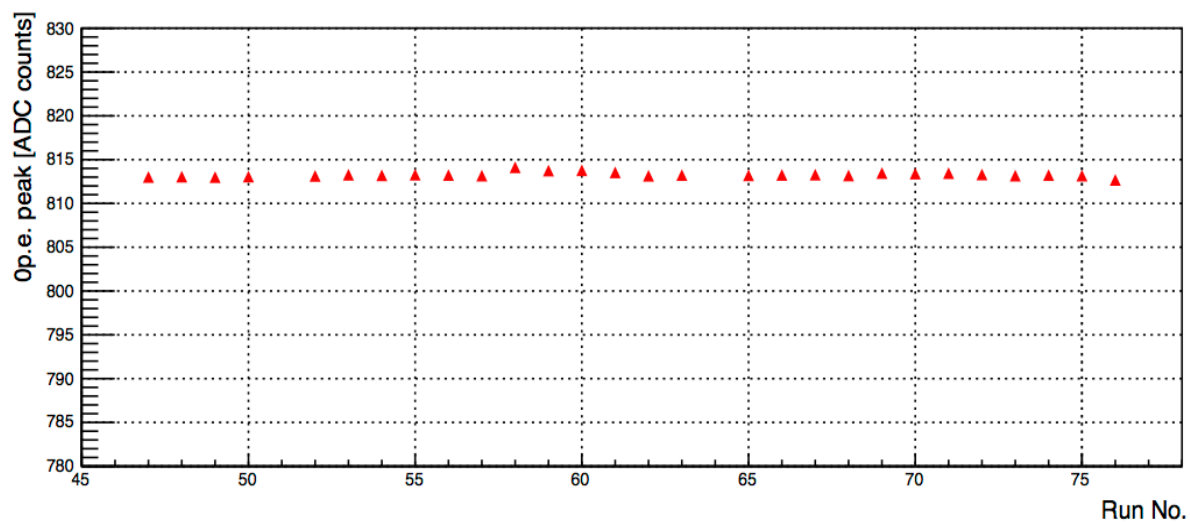


図 5.7: ペDESTALの安定性

きな変動は無く、ペDESTALは安定である。

## 第6章 考察と今後の課題

この章では、自明でない実験結果の考察、また今後の課題を述べる。

### 6.1 第5章ビームテスト結果の考察

#### (5.2) ファイバー間の最大光量と増幅率

第5章2節のビームプロファイルの考察を述べる。図5.2をみたとき、ビームの強度は中心を最強にして、外へいくにつれ連続的に弱くなる様に分布すると予想されるが、そうはなっていない。MPPCの増幅率の違いによってチャンネル毎の最大光量が揃っていないことが上げられる。よって、一層のMPPCの増幅率のさらなる調整が必要となる可能性がある。

#### (5.3) ファイバー通過距離による通過位置の光量依存性

第5章3節より、トリガー機能の考察を述べる。トリガーは設定した閾値より高い光量のファイバーのみ出力される。ファイバーの端に比べ、ファイバーの中心を粒子が通過する時は通過距離が長く、放出光量が多くなる。その結果、テレスコープ検出器のヒットマップには、丸形ファイバーの構造が見え、トリガーは通過距離に依存している事になる。今回はテレスコープ検出器のヒットマップへのヒットパターンが、トリガー機能の確認には役立った。しかし、トリガーがファイバー内の粒子の通過距離に依存するとヒット位置にばらつきが生じ、アライメントの過程が煩雑となることが予想される。これはトリガー検出器内の粒子の通過距離を一定にすることで解決する。具体的な解決策としては、ファイバートラッカーに加えてトリガー部分のみシンチ一枚を新たに使用することや、ファイバーの形状が角形のものを使うことも一つの手であると述べておく。

ただし丸形ファイバーによる依存性だけでなく、トリガーレートを下げる為に、thresholdを10p.e.程度と設定したことが原因である可能性も捨てきれない。よって、今後のビームテストでthreshold依存性があるか確かめる必要がある。

## 6.2 今後の課題

### ファイバー間の増幅率のより高精度の微調整

ビーム入射や機器の廃熱による温度上昇原因によって、増幅率の調節を行う事が出来なかった。対策としては、ドライアイスなどで冷却する事が挙げられる。

### 角形ファイバーへの変更

丸形ファイバーの通過距離依存を無くす為の1つの案に、角形ファイバーへの変更があると述べた。一つ留意すべきは、光量が減衰しにくいMulti Claddingタイプは丸形のみで、角形はSingle Claddingタイプのみであるので、光量の減少が予測される事である。光量の減少を抑えるため、使用するMPPCは開口率の大きいものを採用する。例えば、現状400pixのMPPCを100pixなどのMPPCに置換する。

具体的な移行プランとして以下に記述する。まず、Gomi connectorを用いず、MPPCに直接オプティカルセメントを用いて角形ファイバーを取り付ける。3~4本を束にして光量を測定し、今回の測定を上回れる光量であれば採用する。次に、1層16本の角形ファイバーを2層にして固定できるように、ファイバーの固定部分に若干の変更を行い、図6.1に示すように取り付ける。引っぱり試験にて固定を確認後、64本の角形ファイバー、MPPCのインストールを行う。最後にビームテストのテレスコープのヒットマップにて強度が均一化されれば、トリガーするチャンネル間に差異は見られないとし、変更を完了とする。

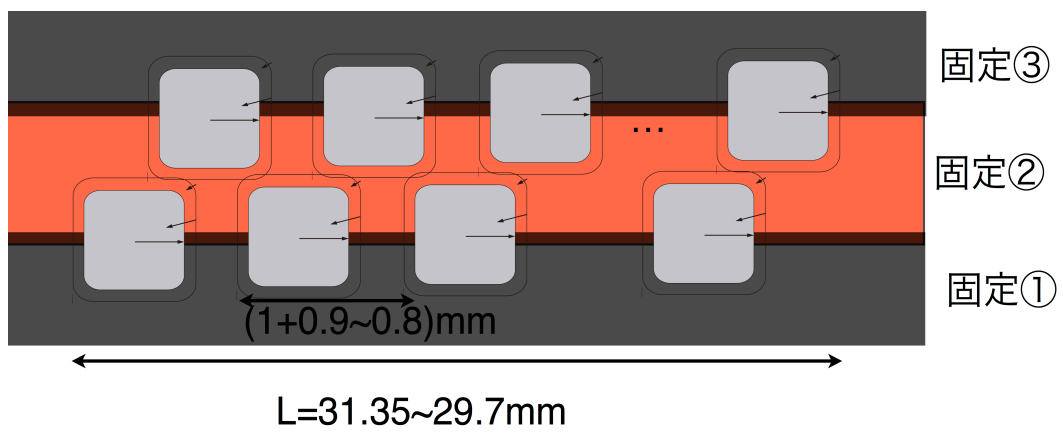


図 6.1: 新しいファイバー固定案

## 第7章 結論

本研究では、シリコン検出器用ビームプロファイルモニタ兼トリガー検出器として”ファイバートラッカー”の作成・開発を行った。

- 筐体部を含むファイバートラッカーの設計・製作を行った。
- Laser 光を用い、パラメータのビームレート耐性を確認した。
- $\beta$ 線源を用い、光量・検出効率を測定した。
- 実地テストとして、パイオンビームによって、ビームプロファイル機能・トリガー機能を確認した。

以上を以て、このファイバートラッカーがシリコン検出器用ビームプロファイルモニタ兼トリガー検出器として使える事を示した。

# 付録A 筐体部の図面

第2章の補足として、筐体部の図面、図A.1～図A.9をここに載せる。

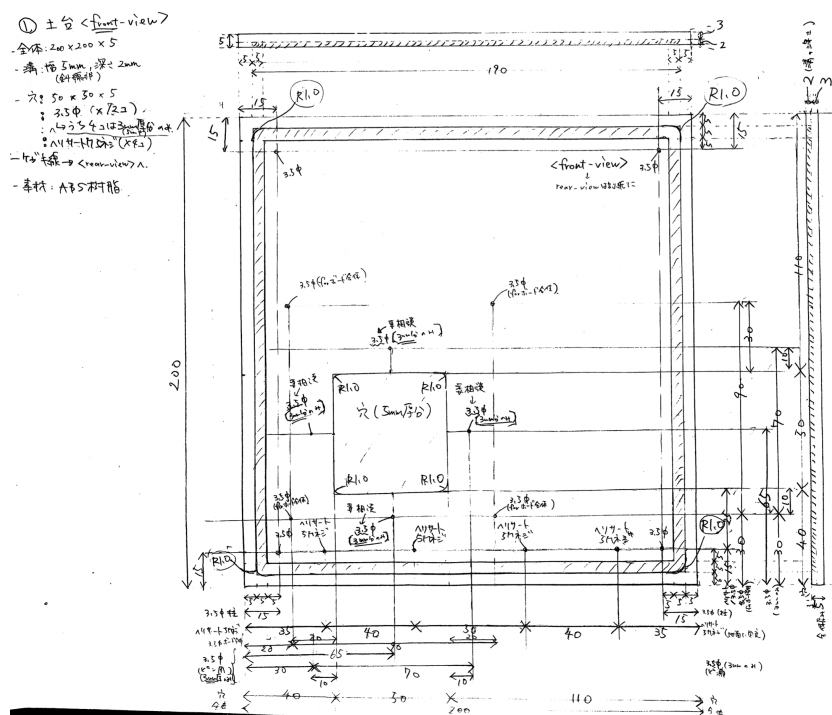


図 A.1: 筐体部の図面 1 表

① 土台 <rear-view>  
 40φ 半線 - 幅: 1mm  
 - 深: 1mm  
 - V字型  
 <front-view>と交差して 3箇所  
 全体: 200 x 200 x 5  
 穴: 30 x 30 x 5  
 : 33φ x 8  
 : 114-157穴 x 4

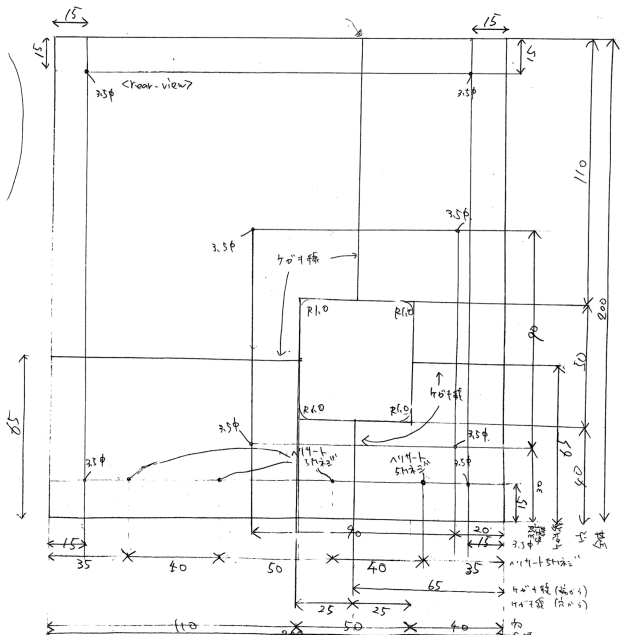


図 A.2: 筐体部の図面 1 裏

② 蓋 <front-view>  
 - 全体 200 x 200 x 5  
 - 溝 幅 5mm 深 2mm  
 - 穴: 50 x 50 x 5  
 : 33φ x 4  
 : 114-157穴 x 4  
 - 40φ 半線 → <rear-view>  
 - 素材: ABS樹脂

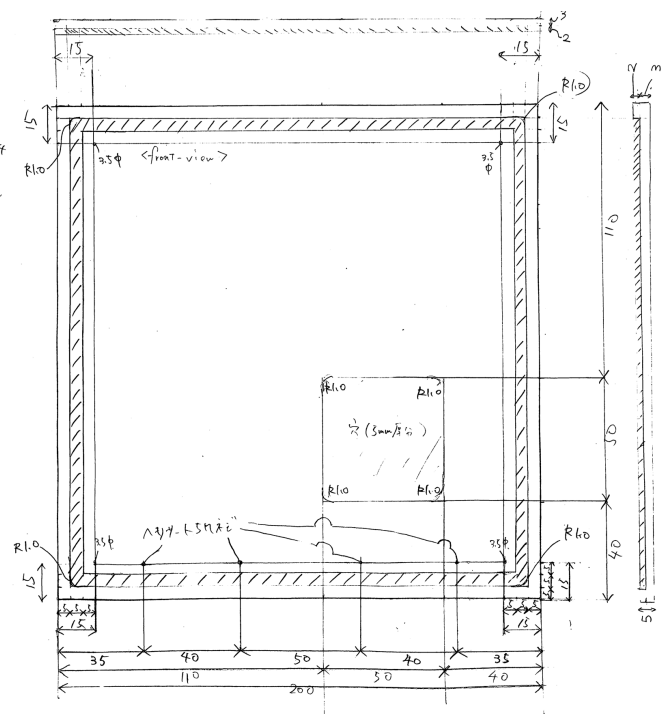


図 A.3: 筐体部の図面 2 表

② 蓋 <rear view>  
 ・寸法仕様 : 幅 1mm  
               : 深 1mm  
               : V字型  
 <front view> <共通箇所>  
 ・全体 : 200x200x5  
 ・穴 : 30x30x5  
       : 3.5φ x 4  
       : ハリコートH5穴 x 4

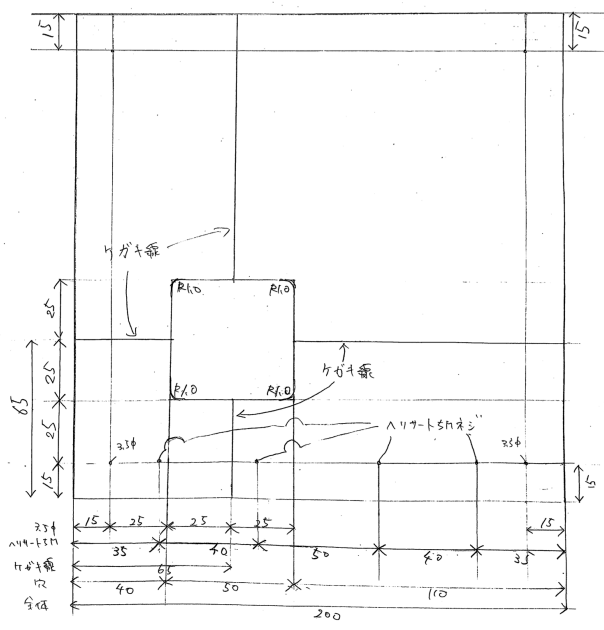


図 A.4: 筐体部の図面 2 裏

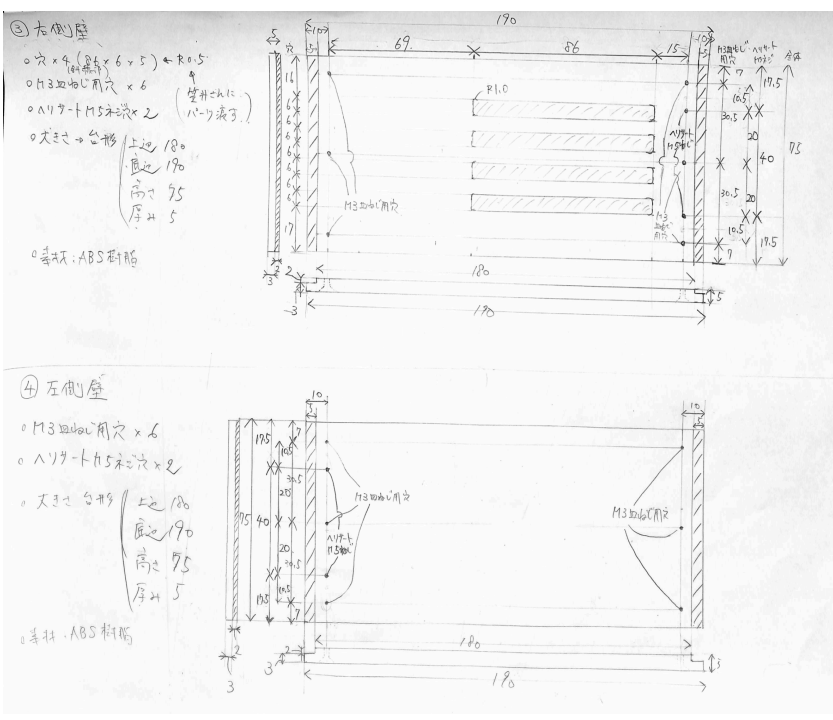
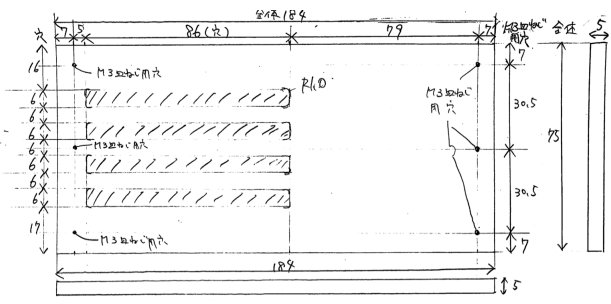


図 A.5: 筐体部の図面 3 - 4



- ⑤ 上側壁
- 穴  $\times 4$  (86 × 6 × 5)  
(斜挿挿)
- M3 皿ボルト穴  $\times 6$
- 大きさ  
: 184 × 75 × 5
- 素材: ABS樹脂



- ⑥ 下側壁
- M3 皿ボルト穴  $\times 6$
- 大きさ  
: 184 × 75 × 5
- 素材: ABS樹脂

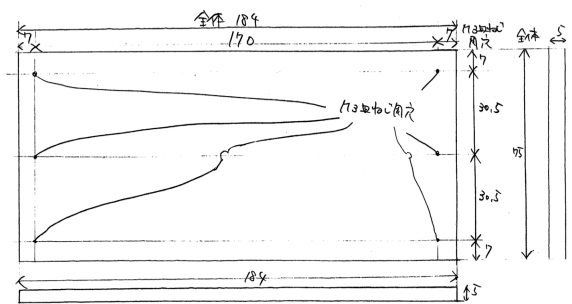


図 A.6: 筐体部の図面 5 - 6

- ⑦ (仕白) の補強 (ボコボコ)
- 素材 = AL
- 全体: 102 × 102 × 6
- 穴: 50 × 50 × 5
- ≠ 3.5φ × 8
- M3 スリ × 16

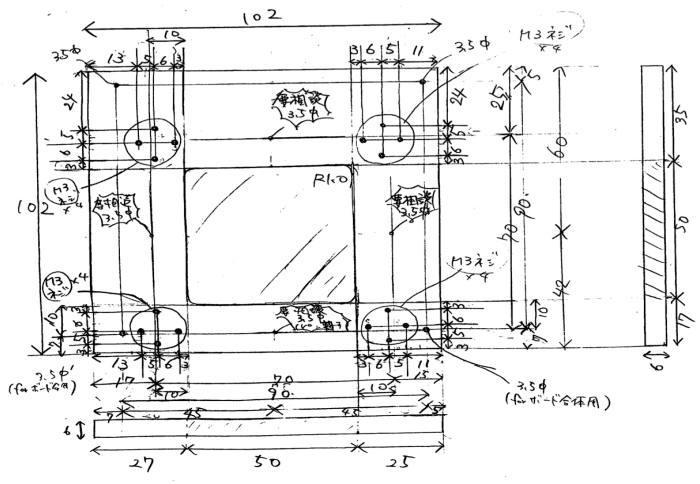
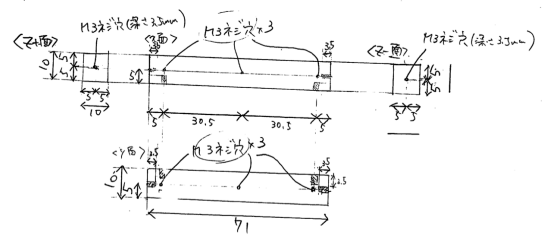


図 A.7: 筐体部の図面 7

⑧ ①(上台)の柱 (上)  
 材料: (A) 10  
 寸法: 10 x 10 x 71 (角柱)  
 ○ H3ネジ穴 8  
 (-Z面 x 1 / 2面 x 1)  
 (-X面 x 3  
 -Y面 x 3)  
 ○ コブシ: x 2



⑨ ①(上台)の柱 (下)  
 材料: (A) 10  
 寸法: 10 x 10 x 71  
 ○ H3ネジ穴 x 8 (-Z面 x 1 / 2面 x 1)  
 (-X面 x 3  
 -Y面 x 3)  
 ○ H5ネジ穴 x 2 (-Y面 x 2)  
 ○ コブシ: x 2

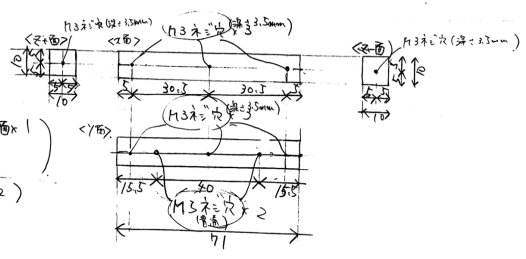
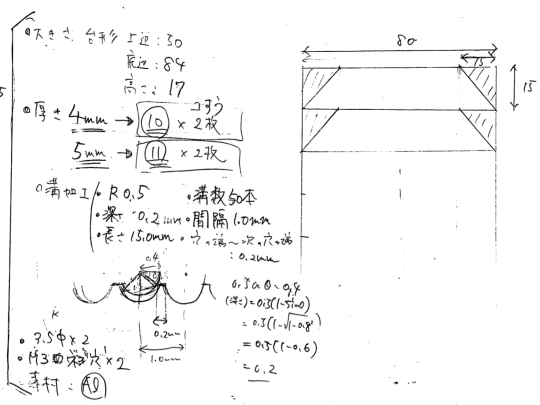
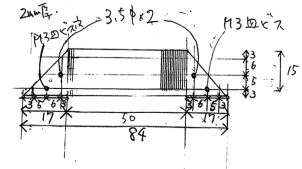


図 A.8: 筐体部の図面 8 - 9

⑩ ①(1)固定溝(下側) / 下側



⑪ ①(1)固定溝(上側) / 上側

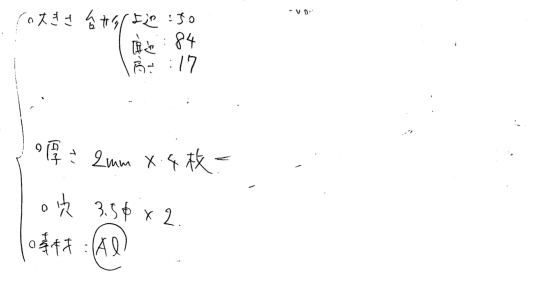
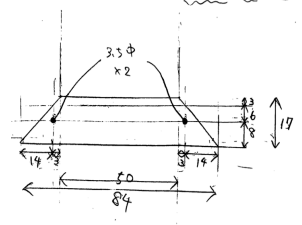


図 A.9: 筐体部の図面 10 - 11 - 12

# 謝辞

まずこの研究室という素晴らしい環境を与えてくださった山中卓教授に深く感謝いたします。また本研究において重要な構成要素の1つである筐体部について一緒に思案し、たくさんのアイデアを出していただきました。また本論文の文章の校正をしていただきました。物理という学問だけに限らず様々な問題に対して、考察し誰よりも率先して行動され、とことん答えを探求される姿には一生追いつくことはできません。本当に多くのことを学びました。ありがとうございました。

指導教官である花垣和則准教授には、ATLAS 実験に関わる機会をたくさん与えていただきました。講演会や研究室でのトークにおいては専門用語・難しい単語を使わず、なるべくシンプルにプレゼンテーションをすることが大事だと教わりました。ご多忙であるにもかかわらず、熱心にまた基礎的なところまで噛み砕いて指導・ご助言をいただきました。また本論文の内容の添削をしていただきました。そしてたくさんご迷惑をおかけしました。常に目的意識・疑問を持つ事、物事の流れ・プロセスについて研究を通じて少しは自発的に考えることができるようになりました。ありがとうございました。

現旧大阪大学 ATLAS グループの廣瀬穰さん、岡村航さん、遠藤理樹さん、TeohJiaJian さん、東野聡さん、辻嶺二さん、石島直樹君、荒井泰貴君、新谷知也君、山内洋子さん、矢島和希君には研究だけでなく様々な場面で本当にお世話になりました。石島君には他愛ない話によく付き合ってくださいました。ありがとうございました。

CERN での2週間もの間ビームテストでお世話になった KEK スタッフの池上さん、安さん、京都教育大学の高嶋さん、山本君には大変お世話になりました。また現在の私が少しでも ATLAS 実験に関わることができたのは、ATLAS グループがあり現旧メンバーがいたからこそ実現しました。ありがとうございました。

金工室の坂本道夫さんには、実験の道具作り、また重要な構成要素の1つである筐体部の製作に際して、金工具の扱い方・製作対象を傷つけないようアドバイスをいただき、製作を手伝っていただきました。また、物を作る面白さと物を大切にす

る事を学びました。ありがとうございました。

スタッフである外川学助教授、Jason Sang Hun Lee さん、塩見公志さん、また現旧 KOTO グループの先輩である岩井瑛人さん、佐藤和史さん、Lee Jong-won さん、村山理恵さん、杉山泰之さん、伴野真太郎さんには、研究また生活面に関するアドバイスをたくさんいただきました。ありがとうございました。現旧 KOTO グループの高島悠太君、豊田高士君、磯江麻衣さん、宮崎康一君には、他愛のない話につきあわせてしまいました。また B 4 の今坂俊博君、原口弘君、森哲平君、が熱心に実験を行っている姿には良い刺激を受けました。秘書の川原希恵さんには出張また、様々な連絡を行っていただきました。山中研究室を通して、特に組織の中でどうやって生きていくのかを考える機会が多かったです。個人あり方、仕事・責任をもつことを考えさせられました。非常に良い経験をさせていただきました。ありがとうございました。

阪大大学院の同期、岸本研究室の皆様、修士課程在籍中に相談に乗っていただいた方々、高エネルギー物理という業界に導いてくれた方々に感謝します。

最後に家族。大学院生活の最大の出資者であり、去年末闘病の末亡くなった祖父に感謝します。大学院に通う事を許可し、直接生活を支えてくれた親に感謝します。

## 参考文献

- [1] 第 2.2 章, Kuraray, “SCINTILLATION MATERIALS”.
- [2] 第 2.3 章, 五味 慎一, 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築”, 京都大学修士論文, 2007.
- [3] 第 2.3 章, 浜松ホトニクス株式会社 web サイト, 技術資料,  
”[http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc\\_kapd0002j.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd0002j.pdf)”.
- [4] 第 2.4 章, Omega group, [EASIROC DATA SHEET], (2011).
- [5] 第 2.4 章, 第 5.1 章, 石島 直樹, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用システムの開発”, 大阪大学修士論文, 2013.
- [6] 第 3.1 章, 浜松ホトニクス株式会社 web サイト, 技術資料  
”<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/1001/5003/PLP-10-044/index.html>”.
- [7] 第 5.1 章, 東野 聡, ”ATLAS 実験アップグレード用シリコン検出器試験のためのテレスコープ検出器開発”, 大阪大学修士論文, 2012.