

パルスビームラインのための  
ビームプロファイルスキャン装置の開発  
(Development of beam-profile scanning devices  
for a pulsed beamline)

理学研究科

数物系専攻

小向 倅平



## 概要

ミューオン・電子転換過程 ( $\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)$ ) は荷電レプトン・フレーバーを保存しない過程である (charged Lepton Flavor Violation, cLFV)。素粒子の標準模型では cLFV は禁止されているが、標準模型を超えたモデルの多くでは現在の実験による分岐比の上限値  $10^{-13}$  の数桁下に cLFV が存在すると予想されている。

ミューオン・電子転換過程探索実験 DeeMe (Direct emission of electron by Muon-electron conversion) は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質生命科学実験施設 (MLF) で計画されている実験であり、J-PARC 3 GeV 陽子シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS) からの大強度高純度パルス陽子ビームを活用することによって単一事象感度  $10^{-14}$  の実験を実現しようとしている。

DeeMe グループは MLF のビーム輸送ラインの一つである H-Line で実験を行う予定である。2021 年 1 月現在、H-Line は建設中である。完成後に向け、ビームチューニングを行うためのビームプロファイルスキャン装置の開発を進めている。2019 年にビームプロファイルスキャン装置に用いる 2 軸ロボットの動作試験を行った。PC から 2 軸ロボットへコマンドを送信し、2 軸ロボットから送信される動作完了通知を受信することができた。

ビームプロファイルスキャン装置に用いる FADC へ要求されるサンプリング周波数を評価した。ビームチューニングは 28 MeV/c の  $\mu^+$  と、105 MeV/c の電子で行うため、28 MeV/c においては陽電子と  $\mu^+$  を、105 MeV/c においては電子と  $\mu^-$  をそれぞれ分離しなければならない。プラスチックシンチレーターを用いた時、各粒子から得られる波形を、Width, 時間差, 波高比を計算することで予想した。その波形から FADC に必要なサンプリング周波数を求めた。

ビームプロファイルスキャン装置のカウンターにはプラスチックシンチレーターを用いる予定であったが、105 MeV/c においては電子と  $\mu^-$  を分離することができないことが分かった。そのため新たな検出器としてチェレンコフ検出器を開発した。輻射体はアクリルを用いる。Geant4 によるシミュレーションでアクリルの形状を決定し、加えて検出器の性能評価を行った。

チェレンコフ検出器を実際に作成し、2020 年 11 月に京都大学複合原子力研究所でビーム試験を行った。チェレンコフ検出器からの信号が確認でき、信号の位置依存性, HV 依存性, ビーム強度依存性, S/N 比のデータを取得した。



# 目次

<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	標準模型	1
1.2	荷電レプトン・フレーバー非保存過程	2
1.3	ミューオン・電子転換過程	3
1.4	ミューオン・電子転換過程のシグナルとバックグラウンド	4
<b>2</b>	<b>実験計画</b>	<b>8</b>
2.1	Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)	8
2.1.1	Linac	8
2.1.2	RCS	8
2.1.3	MR	9
2.1.4	MLF	9
2.2	DeeMe 実験	9
2.3	DeeMe 実験における物理解析とバックグラウンド	10
2.4	陽子標的兼ミューオン静止標的	11
2.5	H-Line	12
<b>3</b>	<b>ビームプロファイルスキャン装置の開発動機</b>	<b>21</b>
3.1	ビームプロファイルの取得方法	21
<b>4</b>	<b>ビームプロファイルモニタ</b>	<b>24</b>
4.1	2 軸ロボット	24
4.2	コントローラー	24
4.3	Flash Analog to Digital Converter (FADC)	25
4.4	PC	25
4.5	カウンター	25
<b>5</b>	<b>2 軸ロボット動作試験</b>	<b>32</b>
5.1	配線	32
5.2	通信パラメータの設定値と設定方法	32
5.2.1	通信パラメータの設定値	32
5.2.2	通信パラメータの設定方法	32
5.3	コマンドの送受信	33
5.3.1	コマンド一覧	33
5.3.2	Tera Term での試験	35
5.3.3	プログラミングでの試験	37
<b>6</b>	<b>FADC の選定</b>	<b>45</b>
6.1	評価の手順	45
6.2	要請 II 28 MeV/c	45
6.2.1	テンプレート波形の作成	46
6.2.2	結果	47

6.3	要請 III 105 MeV/c	47
6.3.1	テンプレート波形の作成	47
6.4	FADC の選定	47
<b>7</b>	<b>チェレンコフ検出器開発</b>	<b>54</b>
7.1	チェレンコフ光	54
7.2	チェレンコフ検出器の構成	54
7.3	輻射体の物質と形状	55
7.3.1	セットアップ	55
7.3.2	評価方法	55
7.3.3	結果	55
7.4	性能評価	56
7.4.1	効率	56
7.4.2	位置依存性	58
<b>8</b>	<b>チェレンコフ検出器作成</b>	<b>70</b>
8.1	アクリル	70
8.2	ライトガイド	70
8.3	光吸収用ボックス	70
<b>9</b>	<b>ビームを用いた性能評価</b>	<b>76</b>
9.1	セットアップ	76
9.2	各測定の設定	76
9.3	結果	77
9.3.1	位置依存性	77
9.3.2	ビーム強度依存性	77
9.3.3	HV 依存性	77
9.3.4	S/N 比	77
<b>10</b>	<b>結論</b>	<b>88</b>

## 目次

1.1	ニュートリノ振動を考慮したミューオン・電子転換過程のダイアグラム.	6
1.2	cLFV 過程のエネルギースケール $\Lambda$ とモデルパラメータ $\kappa$ に対する $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊とミューオン・電子転換過程の感度依存性.	6
1.3	Czarnecki らによる DIO 電子のエネルギースペクトル. Si (青), C (赤).	7
2.1	J-PARC 施設のレイアウト.	14
2.2	J-PARC MLF Beamline.	15
2.3	DeeMe 実験の全体図.	16
2.4	RCS からのパルス陽子ビームの構造と DeeMe 実験における信号探索時間.	16
2.5	G4beamline シミュレーションで得られる予想運動量スペクトル. SiC 標的, RCS 1 MW で $2 \times 10^7$ s (1 年間) のビームタイムと, $3 \times 10^{-14}$ のミューオン・電子転換分岐比, $R_{DP}=10^{-19}$ を仮定した.	17
2.6	グラファイト製回転標的.	17
2.7	ミューオンック Si 原子における原子核と $\mu^-$ の波動関数の重なり.	18
2.8	ミューオンック C 原子における原子核と $\mu^-$ の波動関数の重なり.	18
2.9	G4beamline で描かれた H-Line.	19
2.10	電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンス.	19
2.11	g-2/EDM 実験の概要.	20
2.12	MuSEUM 実験の概要.	20
3.1	DC ビーム.	22
3.2	パルスビーム.	22
3.3	パルスビームに対してストリップカウンター方式を用いた場合.	23
3.4	パルスビームに対してソロカウンター方式を用いた場合.	23
4.1	2 軸ロボット.	26
4.2	2 軸ロボットの腕.	27
4.3	コントローラー.	28
4.4	RPB プログラミングボックス.	29
4.5	PC とコントローラーを繋ぐ通信ケーブル.	29
4.6	波長変換ファイバーの発光・吸収波長スペクトラム.	30
4.7	接着剤 (左) 主剤, (右) 硬化剤.	30
4.8	プラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを接着したもの.	31
4.9	PMT.	31
5.1	コントローラーの各コネクタの名称.	39
5.2	RPB プログラミングボックスの画面とボタンの拡大図.	40
5.3	RPB プログラミングボックスの初期画面.	40
5.4	「MODE」を押したときの画面.	41
5.5	システムモードの初期画面.	41
5.6	通信パラメータ設定画面.	42
5.7	Tera Term のポート選択画面.	42
5.8	Tera Term のシリアルポート設定画面.	43

5.9	2 軸ロボットの座標定義.	43
5.10	Tera Term の端末設定画面.	44
6.1	評価手法のイメージ.	49
6.2	陽電子のエネルギー損失 [24].	50
6.3	$\mu^+$ のエネルギー損失 [25].	51
6.4	28 MeV/c の陽電子と $\mu^+$ のテンプレート波形.	51
6.5	サンプリング周波数と波形の積分値.	52
6.6	105 MeV/c の時の電子と $\mu^-$ のテンプレート波形.	52
6.7	Alazar Tech 社の ATS850-8 bit,50 MS/s.	53
7.1	チェレンコフ光発生の概要図.	59
7.2	電子と $\mu^-$ の $\beta n = 1$ のグラフ.	60
7.3	樹脂の透過率波長依存性.	60
7.4	電子由来のチェレンコフ光と $\mu^-$ 由来のチェレンコフ光の入射角.	61
7.5	セットアップ.	62
7.6	アクリルの形状一覧.	63
7.7	電子を照射した時のチェレンコフ光の様子.	64
7.8	$\mu^-$ を照射した時のチェレンコフ光の様子.	65
7.9	電子 1 イベントあたりに発生したチェレンコフ光の数.	66
7.10	アクリルの効率.	67
7.11	全体の効率.	67
7.12	$\mu^-$ 1 イベントあたりに発生したチェレンコフ光の数.	68
7.13	4 区画に分割したアクリル.	68
7.14	区画①の例.	69
7.15	応答の位置依存性.	69
8.1	四角錐のアクリル.	71
8.2	ライトガイド (全体).	71
8.3	ライトガイド (アクリル設置部分).	72
8.4	ライトガイド (PMT 部分).	72
8.5	ライトガイド内壁のアルミ平板 (アクリル設置部分).	73
8.6	ライトガイド内壁のアルミ平板 (中の様子).	73
8.7	黒く塗装した箱.	74
8.8	背面に取り付けた光吸収ボックス.	74
8.9	光吸収ボックスの完成.	75
9.1	実験の DAQ セットアップ.	79
9.2	チェレンコフ検出器の位置.	80
9.3	ビーム上流から見たチェレンコフ検出器.	80
9.4	チェレンコフ検出器設置の様子 (横から).	81
9.5	チェレンコフ検出器設置の様子 (上から).	81
9.6	照射位置の定義.	82
9.7	水平方向の位置依存性.	83
9.8	鉛直方向の位置依存性.	84
9.9	ビーム強度依存性.	85
9.10	ビーム強度で規格化した検出器応答のビーム強度依存性.	85



9.11 HV 依存性. . . . .	86
9.12 -1000 V, $6.5 \times 10^4$ electron/pulse での Response の推定. . . . .	87

# 表 目 次

1.1	クォークとレプトン (フェルミオン).	1
1.2	ゲージボソン.	1
1.5	代表的な $c\text{LFV}$ 過程探索実験における分岐比の上限値.	3
2.1	RCS パラメーター一覧.	9
2.5	C 製標的, SiC 製標的を用いた場合の統計量.	12
4.1	2 軸ロボットの性能.	24
4.2	PMT H3165-10 の仕様.	25
5.1	コネクタの機能.	32
5.2	通信パラメータ.	33
5.3	コマンド一覧.	34
5.4	動作試験の結果.	36
6.1	FADC の性能.	48
7.1	シミュレーション結果.	56
9.1	各測定の設定.	76

# 1 序章

## 1.1 標準模型

素粒子物理学は、物質の最小の構成要素である素粒子の性質やそれらの間の相互作用を調べ、自然の根本法則を明らかにしようとする学問である。素粒子の振る舞いを良く記述する理論として標準模型が確立されてきた。標準模型では、物質を構成するクォークとレプトン (表 1.1), それらの力を媒介するゲージボソン (表 1.2) が素粒子とされる。

表 1.1: クォークとレプトン (フェルミオン).

	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代	電荷 $Q/ e $	スピン
クォーク	$u$	$c$	$t$	+2/3	1/2
	$d$	$s$	$b$	-1/3	1/2
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	1/2
	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	-1	1/2

表 1.2: ゲージボソン.

ボソン	媒介する力	電荷 $Q/ e $	スピン
$\gamma$ (フォトン)	電磁相互作用	0	1
$g$ (グルーオン)	強い相互作用	0	1
$W^\pm$ (W ボソン)	弱い相互作用	$\pm 1$	1
$Z^0$ (Z ボソン)	弱い相互作用	0	1

標準模型で予測されながら唯一発見されていなかったヒッグス粒子が、2012年7月スイスにある欧州原子核合同研究機構 (CERN) の陽子陽子衝突加速器 LHC で実験しているグループ、ATLAS と CMS によって発見された。この発見により、標準模型を構成する素粒子は揃ったのだが、標準模型では説明できない現象がいくつか見ついている。例えば、ニュートリノが質量をもつことが挙げられる。ニュートリノ振動 (中性レプトンであるニュートリノが他の世代のニュートリノへ遷移する現象) が 1998 年神岡鉱山に設置されたスーパーカミオカンデにより発見されたことがニュートリノが質量を持つということの証明となっている。標準模型では、ニュートリノの質量は厳密に 0 であるため、ニュートリノ振動の発見は標準模型では説明できないものを示す証拠となっている。

このように、標準模型には不十分な点が存在するため、標準模型を越える新しい理論につながる発見が世界中の研究者によって探されている。その一つとして、荷電レプトンフレーバー非保存過程が挙げられる。本章では、標準模型では説明できないレプトンフレーバー保存を破る過程とミューオン・電子転換過程探索のための DeeMe 実験 [1] について述べていく。

## 1.2 荷電レプトン・フレーバー非保存過程

標準模型において物質を構成するクォークとレプトンについて、レプトンはそれぞれの世代で固有の量子数をもち、第一世代 ( $e, \nu_e$ ) は電子レプトン数  $L_e$ 、第二世代 ( $\mu, \nu_\mu$ ) はミューオンレプトン数  $L_\mu$ 、第三世代 ( $\tau, \nu_\tau$ ) はタウレプトン数  $L_\tau$  と定義され、それらはレプトンフレーバーと呼ばれる。それぞれのレプトンフレーバーに対して、粒子には +1 の量子数を、反粒子には -1 の量子数を、他の粒子には 0 の量子数を課す。標準模型では、全ての素粒子の相互作用において反応の前後でそれぞれのレプトンフレーバー量子数の総和は保存し、これはレプトンフレーバー数保存とよばれる。

(例) ミューオンの崩壊 (Michel 崩壊)

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.1)$$

式 (1.1) について考える。レプトン数は左辺は  $L_e$  が 0,  $L_\mu$  が +1, 右辺は  $L_e$  が +1 + (-1) = 0,  $L_\mu$  が +1 となり、レプトンフレーバー量子数が保存していることがわかる。一方で、クォークに関してはフレーバーは保存されない。標準模型では、素粒子はヒッグス粒子と湯川相互作用をすることで質量を獲得する。クォークの質量固有状態は左巻きの  $u$  クォークと  $d$  クォークについて質量行列を独立に対角化することで得られるが、標準模型ではこの状態は弱い相互作用を記述する SU(2) ゲージ群の二重項に統合されなければならない。このとき 2 つの状態の間をつなぐ相対的な回転自由度から、フレーバーの混合が生じる。レプトンについても同じことが言えるが、標準模型の枠内ではニュートリノの質量が 0 であるため、荷電レプトンの質量固有状態は SU(2) の二重項全体の回転で得られる。よって荷電レプトンではフレーバーの混合が生じず、レプトンフレーバー数が保存されるのである。しかしニュートリノ振動現象の観測により、ニュートリノの質量は 0 ではないことが分かり、弱い相互作用においてレプトンフレーバー数保存は成立しないことが確認された。

しかし、荷電レプトンにおいてレプトン・フレーバー非保存過程 (charged Lepton Flavor Violation, cLFV) は未だ発見されていない。標準模型の範囲で cLFV 過程を考えた時、ニュートリノ混合を考慮すると、ミューオンが仮想的に  $W$  ボソンを放出し  $\nu_\mu$  となる。 $\nu_\mu$  がニュートリノ混合によって  $\nu_e$  になり、 $W$  ボソンを吸収すれば  $\mu^-$  の稀崩壊  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$  になる。しかし、この過程 (図 1.1) の分岐比は、Maki-Nakagawa-Sakata (MNS) ニュートリノ混合行列成分  $U_{\mu i}$ ,  $U_{e i}$  とニュートリノの質量差  $\Delta m_{ij}$ ,  $W$  ボソンの質量  $M_W$  を用いて式 (1.2) であらわされ、ニュートリノの質量差が  $W$  ボソンの質量に比べ非常に小さいため、 $10^{-54}$  以下と非常に小さくなる。 $10^{-54}$  の分岐比の過程を観測するに至る実験は現在の技術では不可能である。

$$Br(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{e i} \frac{\Delta m_{il}^2}{M_W^2} \right|^2 < 10^{-54} \quad (1.2)$$

標準模型では、ニュートリノ混合を考慮した場合でも cLFV 過程は観測されないと言うことができ、cLFV 過程の観測はすなわち新しい物理の証拠になる。既に標準模型

を越える多くの新しい理論モデルでは cLFV 過程の発生確率は現在の上限値 (表 1.5) の数桁下であると予想している. cLFV は, 理論的に存在が十分に期待されており, 現在の実験技術で観測できる程度の分岐比であり, 実験結果の解釈もシンプルなため, 新しい物理を探索する方法として優れていると言える. cLFV 過程の分岐比と現在の実験上限値をまとめたものが表 1.5 である.

表 1.5: 代表的な cLFV 過程探索実験における分岐比の上限値.

崩壊モード	分岐比の上限値	実験
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	$< 5.7 \times 10^{-13}$	MEG [2]
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	SINDRUM [3]
$\mu^- + A_u \rightarrow e^- + A_u$	$< 7 \times 10^{-13}$	SINDRUMII [4]
$\mu^- + T_i \rightarrow e^- + T_i$	$< 4.3 \times 10^{-12}$	SINDRUMII [5]
$\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma$	$< 4.4 \times 10^{-8}$	Belle [6]
$Z^0 \rightarrow \mu^\pm \gamma$	$< 1.2 \times 10^{-5}$	DELPHI [7]
$K_L^0 \rightarrow e^\pm \mu^\pm$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	BNL E871 [8]
$B_S^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$< 2.0 \times 10^{-7}$	CDF [9]
$B^0 \rightarrow e^+ \mu^-$	$< 6.4 \times 10^{-8}$	CDF [10]

ミューオン・電子転換過程には光子を伴う過程 ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ) と伴わない過程 ( $\mu N \rightarrow eN$ ) がある. その有効ラグランジアンは以下の式 (1.3) で表される.

$$\mathcal{L} = \frac{m_\mu}{(\kappa + 1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\mu\nu} e_L F_{\mu\nu} + \frac{\kappa}{(\kappa + 1)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L (\tilde{q}_L \gamma_\mu q_L) \quad (1.3)$$

ここで  $\Lambda$  はエネルギースケールを表し,  $\kappa$  は二つの相互作用の比である. 式 (1.3) の右辺の第一項は光子を伴う過程を示しており, 実光子として放出されれば  $\mu \rightarrow e\gamma$  の崩壊に, 仮想光子として原子核に結合すればミューオン・電子転換過程  $\mu N \rightarrow eN$  となる. ミューオン・電子転換過程は  $\mu \rightarrow e\gamma$  を内包し, その分岐比は  $\mu \rightarrow e\gamma$  の数百分の 1 程度と小さい. また, 式 (1.3) の右辺の第二項は終状態に光子を伴わない過程を表し,  $\mu \rightarrow e\gamma$  では観測することができない.

2つのパラメータ,  $\Lambda$  と  $\kappa$  は説明するモデルによって変化し, 標準模型を超える新しい物理モデルの検証が可能となるため重要なパラメータである. モデルによる違いを図 1.2 に示す [11]. 同時に, 現在の  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$  やミューオン・電子転換過程の探索実験が与える実験上限値によって排除された領域と, DeeMe グループが目指すエネルギースケール  $\Lambda$  の目標値も表している. cLFV 過程の探索によって到達できるエネルギースケールは  $10^3$  TeV にもなり, 直接加速器で到達できない高エネルギーの物理現象の探索が可能であることが分かる.

### 1.3 ミューオン・電子転換過程

物質中で  $\mu^-$  が静止すると,  $\mu^-$  は物質中の原子核のクーロン場に束縛され, ミューオンニック原子が形成される. 束縛された  $\mu^-$  は X 線を放出しながら基底状態である  $1S$

軌道まで落ちていく。その後  $\mu^-$  は、標準模型の枠内では原子核軌道上で崩壊するか (式 (1.4)), 原子核に捕獲されるミュー粒子原子核捕獲反応 (式 (1.5)) の 2 つの過程のいずれかをたどる。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.4)$$

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1) \quad (1.5)$$

ここで  $A$  は  $\mu^-$  が束縛された物質の原子量,  $Z$  は原子番号を表す。式 (1.4) のような過程を Decay in Orbit (DIO), 式 (1.5) のような過程を, Muon Capture (MC) と呼ぶ。ミューオンの寿命  $\tau$  は次式のように表される。

$$N = N_0 e^{-(\alpha_f + \alpha_c)t} \quad (1.6)$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha_f + \alpha_c} \quad (1.7)$$

ここで,  $N$  は時間  $t$  に残っているミューオンの数,  $N_0$  は最初 ( $t=0$ ) にあったミューオンの数である。また,  $\alpha_f$  は DIO の崩壊定数であり, 自由空間でのミューオンの Michel 崩壊と同様で,  $\alpha_f = 0.452 \text{ s}^{-1}$  である。崩壊定数の逆数は自由空間でのミューオンの寿命であり,  $2.197 \times 10^{-6} \text{ s}$  である。 $\alpha_c$  は MC の崩壊定数であり, ミューオンと原子核の波動関数の重なりに依存するため, 物質の原子番号によって大きく異なる。炭素 (C) で  $\alpha_c = 0.0388 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , ケイ素 (Si) の場合  $\alpha_c = 0.8712 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  である。従って, C 原子に束縛されたミューオンの寿命は  $\tau = 2.02 \text{ } \mu\text{s}$ , Si 原子に束縛されたミューオンの寿命は  $\tau = 0.754 \text{ } \mu\text{s}$  となり, 物質中でのミューオンの寿命は自由空間でのそれよりも小さくなることがわかる。実験のデザインにおいて, ミューオニック原子の寿命は非常に重要である。ミューオン・電子転換過程はミューオンと原子核の重なりに依存する反応であるので, その分岐比はミューオン原子核捕獲の崩壊幅に対するミューオン・電子転換過程の崩壊幅を用いて, 次のように定義される。

$$Br(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)) \equiv \frac{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z))}{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1))} \quad (1.8)$$

#### 1.4 ミューオン・電子転換過程のシグナルとバックグラウンド

ミューオン・電子転換過程が起こった場合, 単色エネルギー  $E_{\mu e}$  をもつ電子が原子核から放出される。そのエネルギーは, ミューオンの質量  $m_\mu$  から, ミューオニック原子中での  $1S$  軌道における束縛エネルギー  $B_\mu$  と原子核の反跳エネルギー  $E_{rec}$  を引いたものになる。

原子核の反跳エネルギー  $E_{rec}$  は、原子核の質量  $M_A$  を用いて式 (1.9) のように近似できるが、反跳エネルギー  $E_{rec}$  は十分小さいため、無視することで式 (1.10) のように近似することが出来る。

$$E_{rec} \approx \frac{(m_\mu - B_\mu)^2}{2M_A} \quad (1.9)$$

$$E_{\mu e} = m_\mu - B_\mu - E_{rec} \approx m_\mu - B_\mu \quad (1.10)$$

1S 軌道の束縛エネルギー  $B_\mu$  はミューオン原子をつくる原子によって異なるため、実験に用いる標的物質によってミューオン・電子転換過程由来の電子のエネルギー  $E_{\mu e}$  の大きさも異なる。C 原子の場合では 105.06 MeV, Si 原子の場合では 104.91 MeV となる。ミューオン・電子転換探索実験において、前述の DIO は主なバックグラウンド源となる。図 1.3 に Czarnecki らが行った原子核の反跳の効果や、原子軌道に束縛されたミュー粒子の相対論的な効果等を考慮して計算された DIO 電子の予想運動量スペクトルを示す [10]。DIO で放出される電子のエネルギーは原子核の反跳により 105 MeV 付近まで加速される場合があり、主なバックグラウンドとなる。しかし、図のように Si 原子、C 原子の  $E_{\mu e}$  である 105 MeV 近傍で急激に減少しており、十分な運動量分解能を持った測定器を用いることによって、ミューオン・電子転換電子と DIO 電子の区別が可能であると考えられる。

他の主なバックグラウンドとして、即発電子が考えられる。即発電子バックグラウンドとは、一次陽子ビームが陽子標的に入射したとき生成される様々な即発二次粒子のうち、 $E_{\mu e}$  と同じエネルギーを持った電子の事である。陽子ビームが標的に入射したタイミングで発生するため、遅延して出てくるミューオン・電子転換の電子とを分ける事が出来る。ただし遅延タイミングに一次陽子が存在すると、遅れた一次陽子による即発電子をミューオン・電子転換の電子と間違える可能性が予想される。このようなパルス陽子ビームから遅れて陽子標的に入射する陽子を Delayed proton と呼ぶ。DeeMe 実験においてはこのような Delayed proton の少ない高純度なパルス陽子ビームを用いることが重要である。

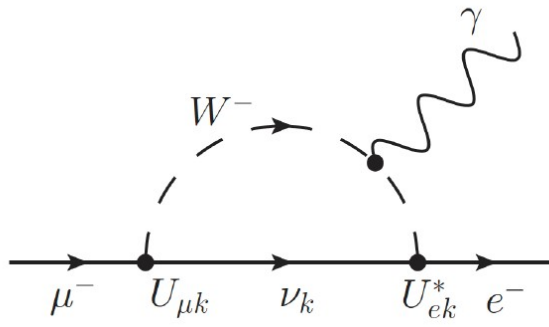


図 1.1: ニュートリノ振動を考慮したミューオン・電子転換過程のダイアグラム.

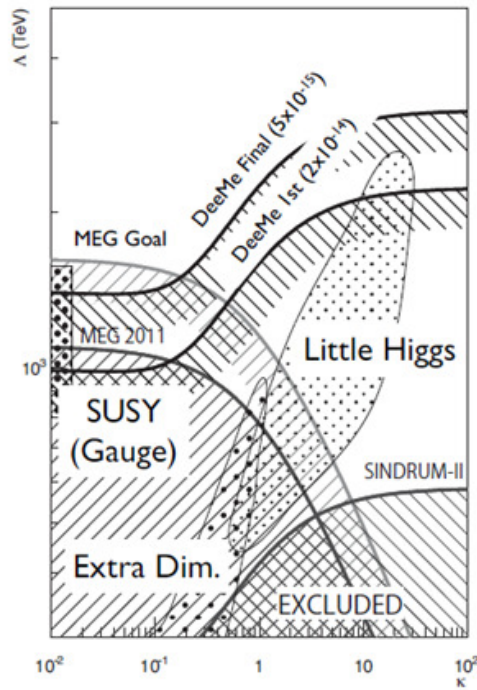


図 1.2: cLFV 過程のエネルギースケール  $\Lambda$  とモデルパラメータ  $\kappa$  に対する  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊とミューオン・電子転換過程の感度依存性.



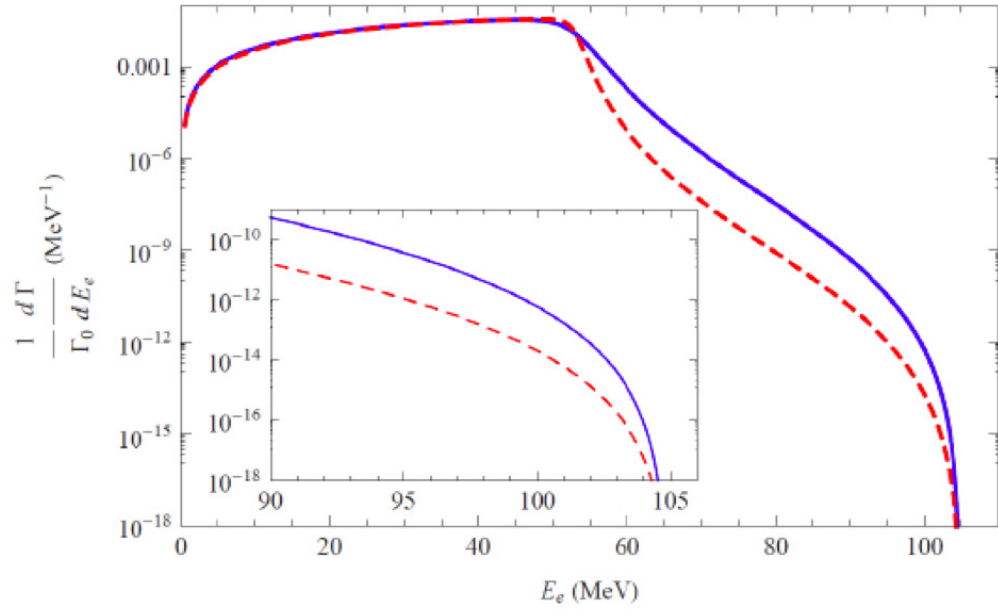


図 1.3: Czarnecki らによる DIO 電子のエネルギースペクトル. Si (青), C (赤).

## 2 実験計画

ミューオン・電子転換過程探索実験 (Direct electron emission from Muon – electron conversions, DeeMe) 実験は、茨城県東海村にある J-PARC の物質・生命科学実験施設 MLF でミューオン・電子転換過程の探索を目指す実験である。実験計画・方法と加速器施設の設備について述べていく。

### 2.1 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

J-PARC は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で運営している大型加速器施設である [12]。高強度の陽子ビームを標的に当てて生成させた様々な二次粒子 (中性子, ミューオン, K 中間子, ニュートリノなど) ビームを活用し, 素粒子物理, 原子核物理, 物質科学, 生命科学, 原子力工学などの多くの分野の基礎から応用まで広い範囲の研究が行われている。

J-PARC は, 3 台の加速器と 3 箇所の実験施設で構成されている。加速器の構成は, ビームエネルギー 400 MeV の線形加速器 Linac, ビームエネルギー 3 GeV の円形加速器 (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS), ビームエネルギー 30 GeV の円形加速器 (Slow-Cycling Main Ring Synchrotron, MR) である。実験施設は, RCS からの 3 GeV 陽子を利用する物質生命科学実験施設 (Material and Life Science Experimental Facility, MLF), MR からの 30 GeV 陽子を利用するハドロン実験施設とニュートリノビームラインが存在する。図 2.1 に J-PARC 施設のレイアウトを示す。

#### 2.1.1 Linac

Linac では, 負水素イオン源で負水素イオン  $H^-$  を発生させ, そのエネルギーを 600 MeV まで加速する。最大 50 Hz の繰り返しでパルス運転され, 400 MeV まで加速された時点で, RCS へのビームラインと, さらに加速する超伝導リニアックビームラインの 2 つにそれぞれ 25 Hz で振り分けられる。

#### 2.1.2 RCS

Linac から取り出された 400 MeV の負水素イオン  $H^-$  を, 荷電変換用炭素皮膜を用いて電子を 2 つ剥ぎ取り, 陽子  $H^+$  ビームに変換して入射する。その後, 約 20 ms で RCS を 15,000 回程度周回させる。  $H^+$  ビームは周回毎に高周波加速空洞で加速され, 最終的に 3 GeV まで加速される。そして下流にあるビーム輸送系を通じて MLF と MR へ輸送される。

RCS から MLF へは「速い取り出し」と呼ばれる方法で取り出される。原理的には取り出し後のリング内に陽子は残らず, Delayed proton によって生成される即発電子のバックグラウンドを抑えられると期待される。RCS は 3 GeV まで加速するのにわずか 20 ms しかかからないため, 1 秒間に 25 回もの新しいビームを加速することが

でき、平均電流  $333 \mu\text{A}$ 、電力  $1 \text{ MW}$  が可能となった。RCS の基本的なパラメータは表 2.1 に示す通りである。

表 2.1: RCS パラメータ一覧。

周長	348.3 m
入射エネルギー	400 MeV
出射エネルギー	3 GeV
繰り返し運転	25 Hz
バンチ数	2
ビーム強度	500 kW (2021 年 1 月現在)

### 2.1.3 MR

RCS から取り出されたビームの一部は、続けて MR に入射される。このビームは、1 周を約 2 秒かけて 32 万回ほど周回し、3 GeV から 30 GeV へと加速される。

### 2.1.4 MLF

MLF は図 2.1 のように MR の中央に位置する。MLF では、RCS からの 2 バンチパルス陽子ビームを標的に当て、ミューオンビームおよび中性子ビームを生成する。RCS からの陽子ビームのうち、92% が MLF で利用される。これらビームは物質科学・生命科学などの研究に活用されている。図 2.2 は、MLF のビームラインを示している。2021 年 1 月現在、建設中の H-Line で DeeMe 実験を行う予定である。

## 2.2 DeeMe 実験

DeeMe 実験の全体図を図 2.3 に示す [1]。RCS からのパルス陽子ビームを陽子標的に照射すると、標的近傍に  $\pi$  中間子が生成される。ここで、一般的なミューオン・電子転換過程を探索する実験では、 $\pi$  中間子を電磁石を用いて収集した後、 $\pi$  中間子は  $\mu$  に崩壊し、ミューオン静止標的に静止する。このように、陽子標的とミューオン静止標的の 2 枚の標的を使う一方、DeeMe 実験では、陽子標的と、ミューオン静止標的を 1 枚の標的に置き換えることが可能であるという事実を得ている [13]。これにより、コンパクトで低コストな実験が可能になる。DeeMe 実験の独創性はここにある。

一次陽子標的中の大量のミューオニック原子から放出された電子は二次ビームラインを用いて電子スペクトロメータまで輸送される。二次ビームラインによって低エネルギーのバックグラウンドは取り除かれる。さらに電子は磁気スペクトロメータまで輸送され、運動量が測定される。

DeeMe グループは、最初は炭素製標的を用いて実験を始め、 $1 \text{ MW}$  陽子ビーム、 $2 \times 10^7 \text{ s}$  のビームタイムで、 $1 \times 10^{-13}$  より小さい単一事象感度を目指す。その後、SiC

製標的に取り替え、 $2 \times 10^{-14}$  より小さい単一事象感度を目標とすることを検討している。図 2.4 にパルス陽子ビームの時間構造と DeeMe 実験における信号探索時間を示す。パルス陽子ビームは 2 バンチ構造となっており、ビーム間隔は 600 ns、繰り返し 40 ms で標的に入射する。前述のように、ミューオン・電子転換過程による電子は、ビーム入射後  $1 \mu\text{s}$  程度遅延して出てくる。そのため、信号探索領域は二バンチ目が入射してから 300 ns 後の  $2 \mu\text{s}$  に設定している。

## 2.3 DeeMe 実験における物理解析とバックグラウンド

DeeMe 実験におけるバックグラウンドについてまとめる。

### DIO 電子

DIO で放出される電子の運動量はシグナル領域まで到達する可能性があるが、 $105 \text{ MeV}/c$  のシグナルに対して  $1 \text{ MeV}/c$  以下の運動量分解能があればシグナルとの区別は可能である。

### DP バックグラウンド

Delayed Proton (DP) とは、RCS 加速器からの正規の取り出しタイミングより遅れて取り出されてしまう一次陽子によるバックグラウンドである。シグナル電子の遅延と同じタイミングで、DP から電子が発生するとバックグラウンドとなる。メイン陽子と信号探索時間領域  $2 \mu\text{s}$  の間の DP 数の比を Rate of Delayed Proton ( $R_{\text{DP}}$ ) と定義する。ビームロスモニターで DP を測定した結果、 $R_{\text{DP}} < 2.1 \times 10^{-19}$  となった。1 年間のビームタイムあたりの DP バックグラウンド数は  $N_{\text{DP}} < 0.004$  となり十分に小さいという結果が得られた [11]。

### 宇宙線起源によるもの

信号探索時間は RCS からのパルス陽子ビームの繰り返しである 40 ms 中の数  $\mu\text{s}$  であるため、宇宙線起源のバックグラウンドは約  $5 \times 10^{-5}$  に抑えられるとされている [1]。

物理感度を評価するため、Geant4[14] を用いて 3 GeV のエネルギーをもつ陽子からミューオン原子を生成するシミュレーションを行っている。なお、このシミュレーションが与えるミューオン原子の収量は、2009 年に D-Line で行ったテスト実験の結果とよく一致している。シミュレーションの結果、SiC 回転標的に生成されるミューオン Si 原子は  $1.1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、ミューオン C 原子は  $0.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$  である。このミューオン Si 原子から、ミューオン・電子転換の電子を発生させ、G4beamline (Geant4 をベースに作られたビームラインシミュレーションツール [15]) で輸送し、電子の飛跡再構成を行うことで、運動量スペクトルを得た。この運動量スペクトルは、現実的なミューオン原子の生成率、H-Line 輸送効率、多重散乱や位置分解能の効果も考慮されたものである。そのような運動量スペクトルを図 2.5 に示す。ミューオン・電子転換によるシグナルは単色であると先に述べたが、標的内でのエネルギー損失の影響のため、低運動量側にテールを引いている。信号領域を 102.0 - 105.6

MeV/c の範囲に設定することにより、1 年間のビームタイム  $2 \times 10^7$  s で、2015 年に行われた単一事象感度のモンテカルロシミュレーション評価では  $2 \times 10^{-14}$  の実験感度を達成することができるという結果が得られた [11].

## 2.4 陽子標的兼ミューオン静止標的

現在 MLF にて使用されているミューオン生成標的は、グラファイト製回転標的が用いられている (図 2.6). これは直径 33 cm, 厚さ 2 cm のドーナツ型円盤である. DeeMe 実験では、最初グラファイト製標的で物理測定を開始し、後に SiC 標的に置き換えて実験する. その理由として以下があげられる.

1. 図 2.7・2.8 に C 原子と SiC それぞれの、 $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりを示した.  $\mu^-$  との波動関数の重なりが Si 原子核のほうが C 原子核よりも多い. ミューオニック原子中の  $\mu^-$  が原子核と反応する (MC, またはミューオン・電子転換) 確率は、 $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりに依存するため、C 原子標的の場合、ミューオニック原子中の  $\mu^-$  の 8% しか原子核と反応しない. 一方、Si 原子核の場合、67% が反応する. 混合物に  $\mu^-$  が静止した場合、MC の比率は原子番号に比例することが知られており (Fermi-Teller Z 則) [16],  $\mu^-$  の 70% が Si 原子核 ( $Z=14$ ) と、30% が炭素原子核 ( $Z=6$ ) と反応する. つまり、SiC 標的中で原子核と反応するのは、 $70\% \times 67\% + 30\% \times 8\% = 49\%$  となり、グラファイト製標的に比べ、約 6 倍の改善が見込まれる. 表 2.5 に、C 製標的、SiC 製標的を用いた場合の統計量を示している.
2. ミューオニック原子中の  $\mu^-$  の寿命は、C 原子標的の中では  $2 \mu\text{s}$ , SiC 標的の中では  $0.76 \mu\text{s}$  である. DeeMe 実験の探索開始時間である二パルス目入射後の 300 ns 後の生存率を考えると、C 製標的のほうが SiC 製標的の場合よりも 1.5 倍統計量が多くなる. しかし、低エネルギーのミューオンの収量は C 製標的に対して SiC 製標的は 1.7 倍の統計量が得られる.
3. 陽子標的は陽子ビームによる熱流入や衝撃に耐える必要がある. SiC は核融合炉のブランケット材料としても有望視されている程の強靱な材料であり、高い融点、優れた耐熱衝撃性、高い放射線耐性をもつため、標的材料として C 原子よりも適している.

SiC 製回転標的については室蘭工業大学の環境・エネルギーシステム材料研究機構 (OASIS) によって開発が進められている [17].

表 2.5: C 製標的, SiC 製標的を用いた場合の統計量.

	C 製標的	SiC 製標的
300 ns カットによる生存率	1.5	1
低エネルギーのミュオンの収量	1	1.7
原子核との反応率	8%	49%

他のミュオンの cLFV 過程探索実験では, Ti ( $Z=22$ ) や, Au ( $Z=79$ ) が使用されている. しかし DeeMe 実験でこれらを使用しない理由として, 1 MW の陽子ビームに対する熱耐性がないことがあげられる. TiC 製標的も考えられるが, ミューオニック Ti 原子によるミュオニック原子内の  $\mu^-$  の寿命は 300 ns 程度になってしまい, 統計量が少なくなる. また, ミューオニック Ti 原子から出るミュオン・電子転換電子のシグナルのエネルギーは, 104.4 MeV 程度であり, シグナルが DIO 電子に埋もれてしまう. 以上の理由もあり, DeeMe グループでは将来的には SiC 製標的を導入を提案している.

## 2.5 H-Line

陽子標的からは,  $\mu^-$  の崩壊に伴い放出される低エネルギーの電子 ( $E_e < 52.5 \text{ MeV}/c$ ) やミュオン原子核捕獲に伴う高速中性子が大量に発生する. これらの粒子の瞬間的な計数率は  $10^{14} \text{ Hz}$  にも達する. これらのバックグラウンドから検出器を保護するために, ミューオン・電子転換過程で放出される電子の運動量 105 MeV/c 近傍の, 90 MeV/c から 120 MeV/c の運動量をもつ荷電粒子を選び輸送することができるビームラインの建設が必要になる. また, 高統計を達成し実験精度を向上するには, アクセプタンスを大きくしなければならない. 2021 年 1 月現在建設中であるこの二次ビームラインを High-momentum muon beamline (H-Line) と呼んでいる. 図 2.9 に G4beamline によって描かれた H-Line を示す [18]. 標的から磁気スペクトロメータまで, 大口径キャプチャーソレノイド HS1, 双極磁石 HB1・HB2, 輸送ソレノイド HS2・HS3, 四重極磁石 HQ1・HQ2・HQ3 からビームラインは構成されている. 図 2.10 に電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンスとの関係を示す [18]. 磁気スペクトロメータのアクセプタンスはおよそ  $120 \text{ msr}/(\text{MeV}/c)$  となる.

H-Line は DeeMe 実験の他にも, ミューオンについての基礎物理学研究への活用が期待されている. 前述のようにパルス陽子ビームが標的に照射されると  $\pi^+$  が生成されるが, これが崩壊することで surface muon ( $\mu^+$ , 約 28 MeV/c) となる. 105 MeV/c の電子を用いて実験を行う DeeMe に対し, 以下の実験はこの約 28 MeV/c の surface muon で実験を行う.

### g-2/EDM 実験

ミュオンの異常磁気能率 (g-2) と, 電気双極子能率 (EDM) の精密測定を目指している (図 2.11, [19]).

## MuSEUM 実験

ミュオニウム基底状態の超微細構造の精密測定を目指している (図 2.12, [20]).



図 2.1: J-PARC 施設のレイアウト.



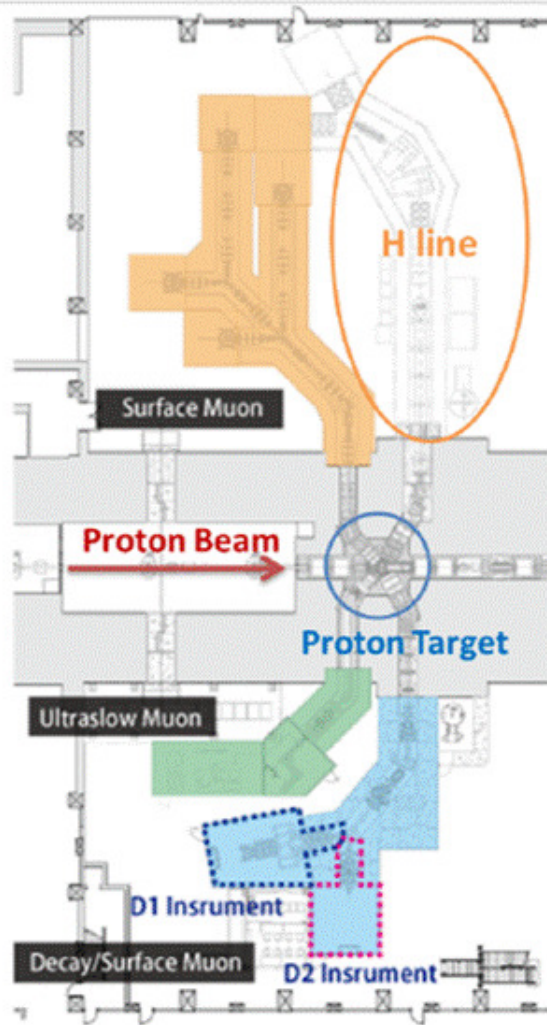


図 2.2: J-PARC MLF Beamline.

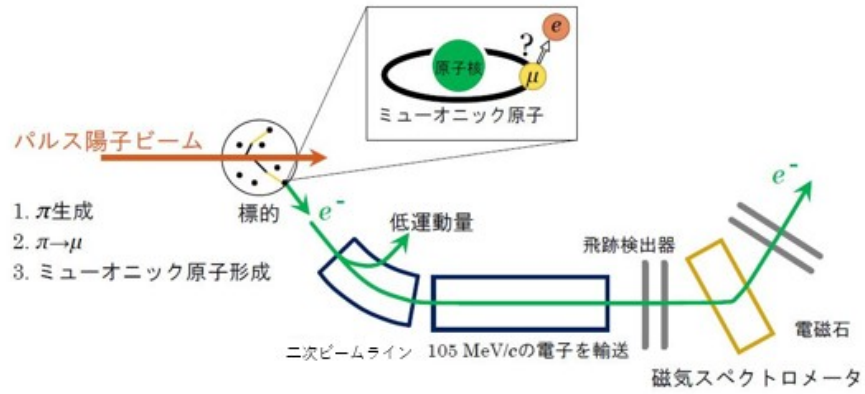


図 2.3: DeeMe 実験の全体図.

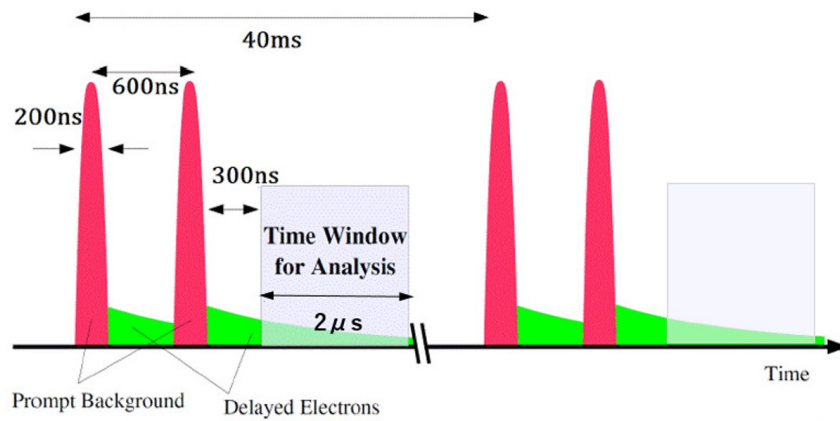


図 2.4: RCS からのパルス陽子ビームの構造と DeeMe 実験における信号探索時間.

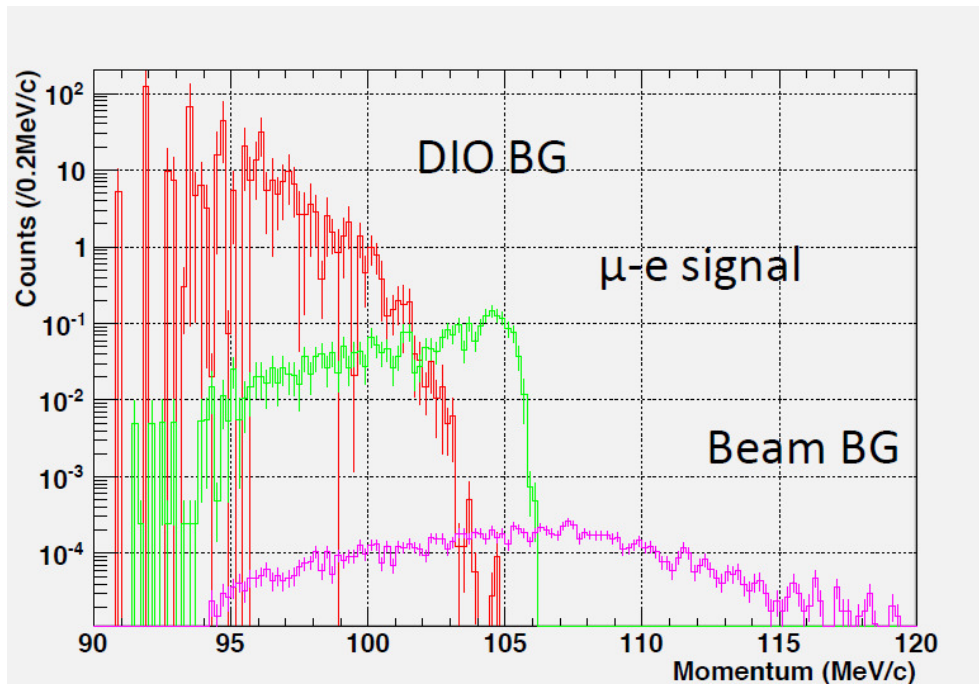


図 2.5: G4beamline シミュレーションで得られる予想運動量スペクトル. SiC 標的, RCS 1 MW で  $2 \times 10^7$  s (1 年間) のビームタイムと,  $3 \times 10^{-14}$  のミューオン・電子転換分岐比,  $R_{DP}=10^{-19}$  を仮定した.

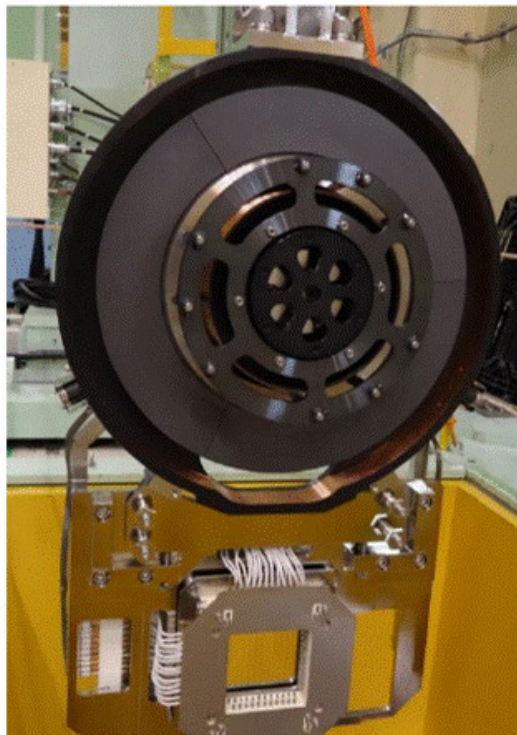


図 2.6: グラファイト製回転標的.

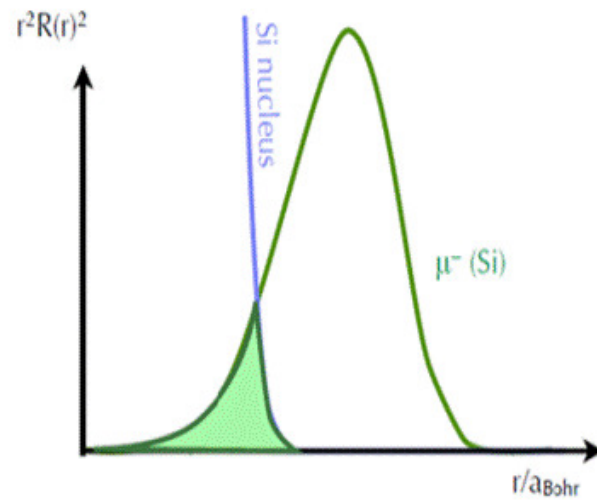


図 2.7: ミューオニック Si 原子における原子核と  $\mu^-$  の波動関数の重なり.

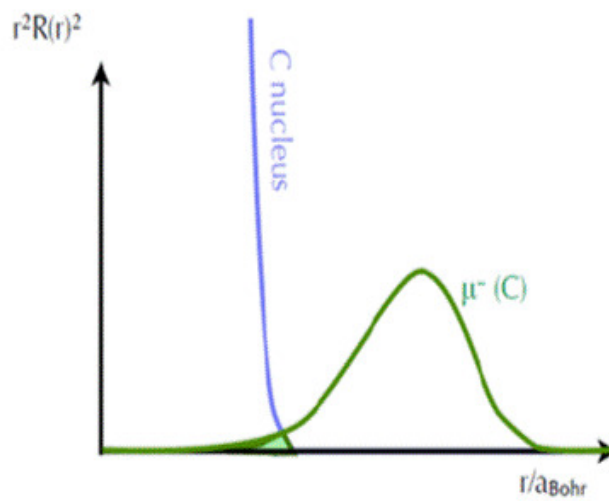


図 2.8: ミューオニック C 原子における原子核と  $\mu^-$  の波動関数の重なり.

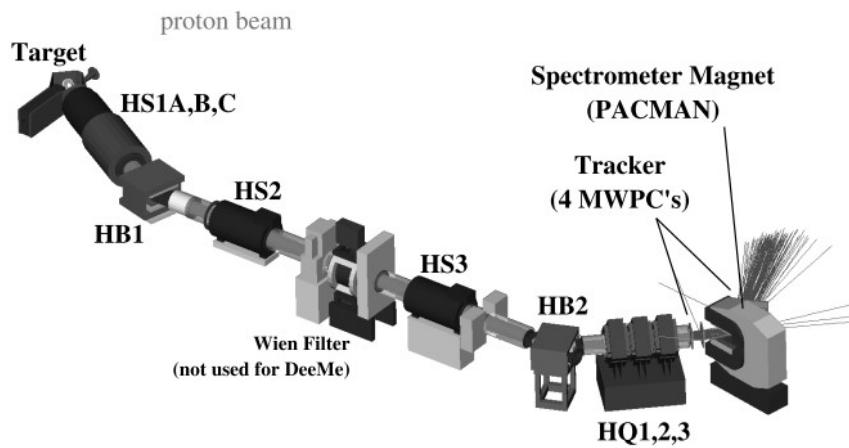


図 2.9: G4beamline で描かれた H-Line.

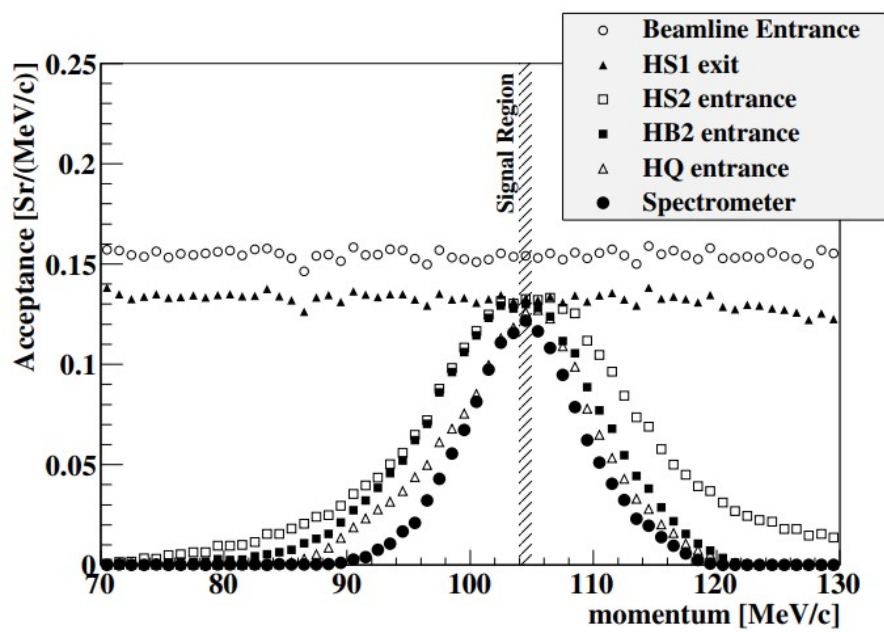


図 2.10: 電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンス.

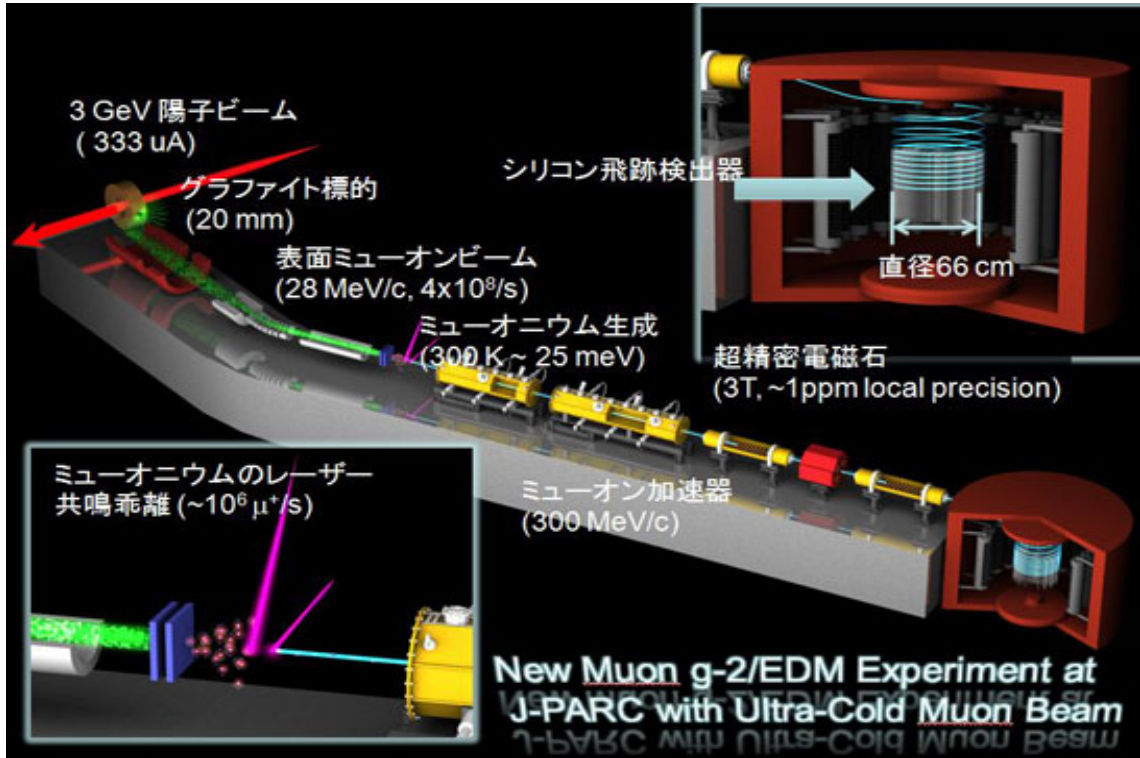


図 2.11: g-2/EDM 実験の概要.

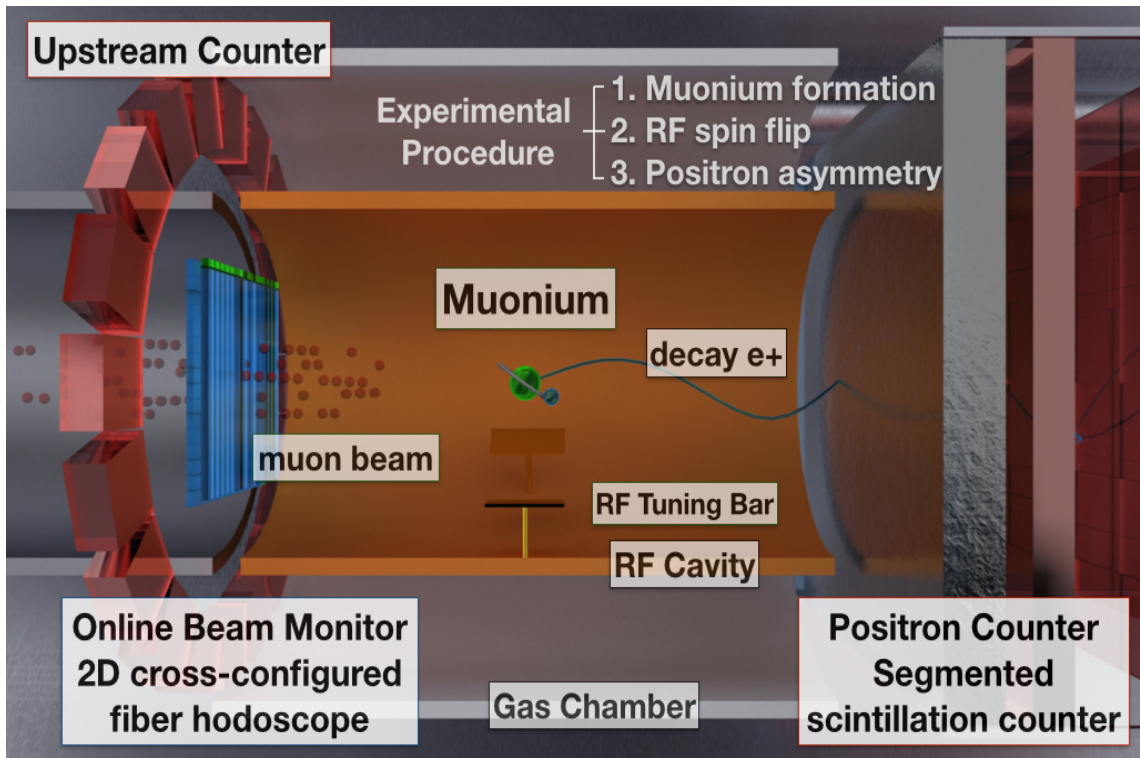


図 2.12: MuSEUM 実験の概要.

### 3 ビームプロファイルスキャン装置の開発動機

前章で述べたように、H-Line は建設中である。完成した後にはビームチューニングを行う必要がある。ビームチューニングでは、ビーム軌道の調整を行い、到達粒子数の最大化を行う。チューニングに用いる粒子は H-Line 利用予定のグループの実験内容から

- 28 MeV/c の  $\mu^+$
- 105 MeV/c の電子

の 2 つである。また、DeeMe は図 2.3 のように飛跡検出器を用いており、飛跡再構成を行う上で 2 次元のビームプロファイルが必要となる。これらの理由から、ビームプロファイルを取得する装置が必要となる。

#### 3.1 ビームプロファイルの取得方法

ビームプロファイルを取得する代表的な方法にストリップカウンター方式がある。これは短冊状のカウンターを複数個用意し、それらを格子状に組んだ方式である。この方式は DC ビーム (図 3.1) に対しては有効であるが、1 パルス当たり約  $10^8$  個の粒子が到来するようなパルスビーム (図 3.2) に対しては不向きである。X-Y 方向の射影は得られるが、2 次元プロファイルは得られないためである (図 3.3)。

そこで用いるのがソロカウンター方式である。これはカウンターを 1 つだけ使う方法である。カウンターを動かしてはビーム強度を測定し、またカウンターを動かして、と続ける。これにより 2 次元プロファイルが取得できる (図 3.4)。カウンターの大きさは数 cm 四方とする。これは H-Line のビーム出口でのビームの広がり  $\sigma_x = 60$  mm,  $\sigma_y = 30$  mm と十分大きいためである ([21])。ビームプロファイルのより細かな構造を見る必要があれば、小さいカウンターに取り替えるだけで対応可能である。

ソロカウンター方式の特徴は各測定点のビーム強度が得られることである。さらに、カウンターを複数個並べた場合では各検出器間の相対的なキャリブレーションが必要であるが、ソロカウンター方式は検出器が 1 つだけなのでその必要はない。しかし、カウンターを手動で動かすとビームスキャンに多大な時間を要する。カウンターを動かす度にビームを停止させる必要があるためである。これはビームコンディションの変化を誘発する可能性がある。また、時間を要することは、ビームチューニングの効率の悪化を意味する。これらの問題を解決するために 2 軸ロボットを導入する。2 軸ロボットにカウンターを設置し、自動で動かすことで、ビームを止めることなくビームスキャンを行うことが可能である。従って、ビームスキャンに要する時間を短くできる。2 軸ロボットを含めた装置全体をビームプロファイルモニタと呼ぶ。

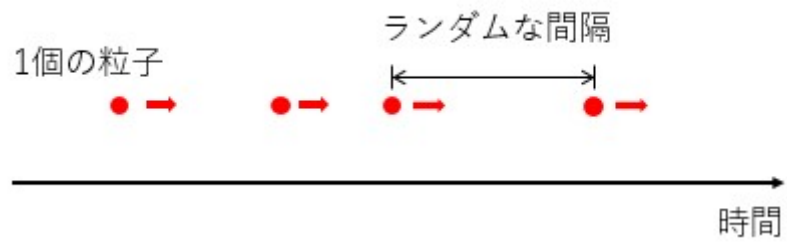


図 3.1: DC ビーム.

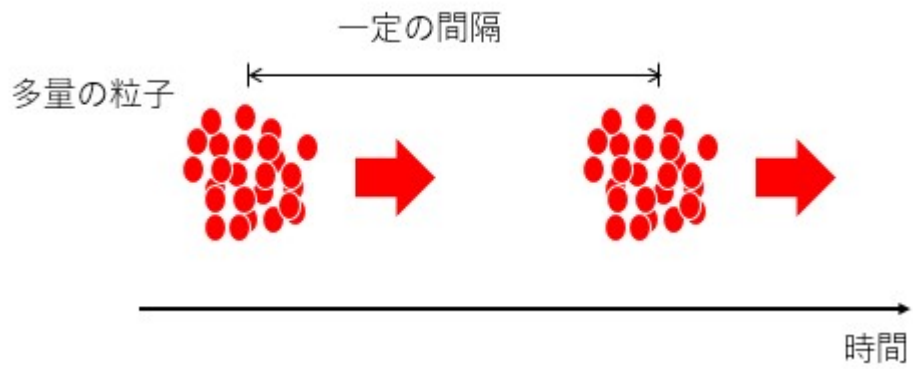


図 3.2: パルスビーム.



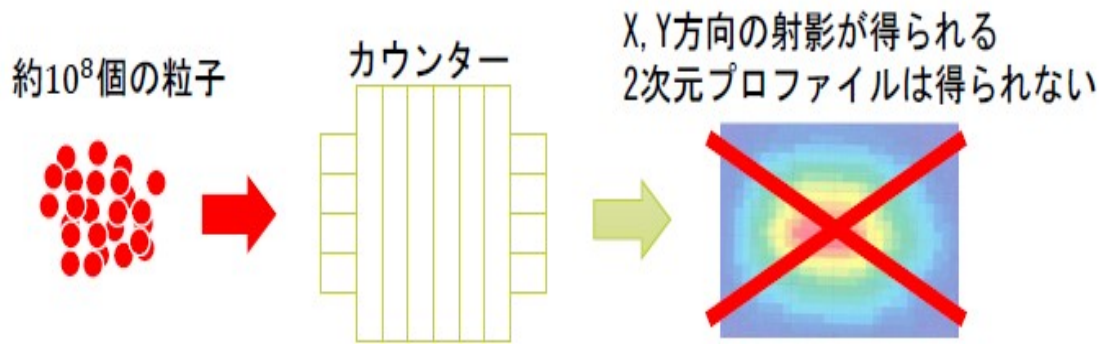


図 3.3: パルスビームに対してストリップカウンター方式を用いた場合.



図 3.4: パルスビームに対してソロカウンター方式を用いた場合.

## 4 ビームプロファイルモニタ

ビームプロファイルモニタは大きく分けて 2 軸ロボット、コントローラー、FADC、PC、カウンターから構成される。

### 4.1 2 軸ロボット

2 軸ロボットとは水平-鉛直方向に動かすことのできるロボットである。サーボ機構が用いられており、1 mm 以下の精度で動かすことが可能である。ここでサーボ機構とは、位置や速度などを制御量として高精度に追従するように作られたシステムである。サーボ機構には実際の動作を検出する機能が備わっており、得られた位置や速度をフィードバック信号としてコントローラーへ送る。サーボ機構内で用いられるモーターのことを特にサーボモーターと呼ぶ。前章で述べたように、2 軸ロボットはカウンターを自動で動かすために用いる。ヤマハ発動機の製品で、型番は SP-SXYX-C-F1-55-ZF-55-5L である。2 軸ロボットの性能を表 4.1 に、写真を図 4.1 に示す。図 4.1 内上部に 2 軸ロボット、下部に架台が写っている。このように 2 軸ロボットは架台に乗せて使用する。カウンターを設置するための腕は 30° 傾いている (図 4.2)。

表 4.1: 2 軸ロボットの性能.

可動範囲 (垂直方向)	550.0 mm
可動範囲 (水平方向)	550.0 mm
移動速度	0.1~1000 mm/s

### 4.2 コントローラー

2 軸ロボットは、コントローラーを介してコマンド送信用デバイスから送信されるコマンドによって制御される。コントローラーも 2 軸ロボットと同じヤマハ発動機の製品を用いる。型番は RCS222-CC である (図 4.3)。コマンド送信用デバイスとしてヤマハ発動機の RPB プログラミングボックス (図 4.4) を用いれば、手動操作、プログラムの入力や編集、パラメータ設定など全ての基本的な操作を行うことが可能である。しかし RPB プログラミングボックスでは、測定されたビーム強度に応じて移動箇所を自動で決めるなどのプログラミングを行うことはできない。よってコマンド送信用デバイスには PC を使用する。コントローラーと PC はシリアル通信で接続する。接続ケーブルはコントローラー側が RS232C、PC 側が USB となっている製品 (ヤマハ発動機、型番:KBG-M538F-00, 図 4.5) を用いる。

### 4.3 Flash Analog to Digital Converter (FADC)

FADC はカウンターからのアナログ信号をデジタルに変換し PC に取り込む。FADC の選定は 6 章で述べる。

### 4.4 PC

Windows 上の仮想 Linux システムの Windows Subsystem for Linux (WSL) を用いてプログラミングを行う。ビーム強度のデータ解析には ROOT を使用するのでプログラミングは C++ で記述する。

### 4.5 カウンター

カウンターにはプラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを接着したものと光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) を用いる。プラスチックシンチレーターはプラスチック中に有機発光物質を溶かし込んだ板状のシンチレーターである。放射線により励起されシンチレーション光を発する。大きさは 23.8 mm×22.7 mm で、厚みは 3 mm である。波長変換ファイバーはクラレ社製のファイバーで、型番は Y11(200)M である。波長変換ファイバーの発光・吸収波長スペクトラムを図 4.6 に示す。プラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを接着する際に用いた接着剤は Eljen Technology 社の EJ-500 Optical Cement Part A-Resin と EJ-500 Optical Cement Part B-Hardener である (図 4.7)。Part A が主剤、Part B が硬化剤である。質量比で、主剤 : 硬化剤 = 4 : 1 で混ぜて用いる。プラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを接着したものが図 4.8 である。なお、波長変換ファイバーはゴムチューブで遮光されている。PMT の型番は H3165-10 である。表 4.2 に PMT の仕様を [22], 図 4.9 に写真を示す。

表 4.2: PMT H3165-10 の仕様。

項目		単位
受光面形状	円形	-
受光面サイズ	$\phi 10$	mm
感度波長範囲	300~650	nm
最大感度波長	420	nm
光電面 種類	バイアルカリ	-
窓材質	ホウ硅酸ガラス	-
ダイノード構造	ラインフォーカス 10 段	-
陽極-陰極間 印加電圧	-1000	V
[絶対最大定格] 陽極-陰極間電圧	-1250	V
ゲイン (Typ.)	$1.4 \times 10^6$	-

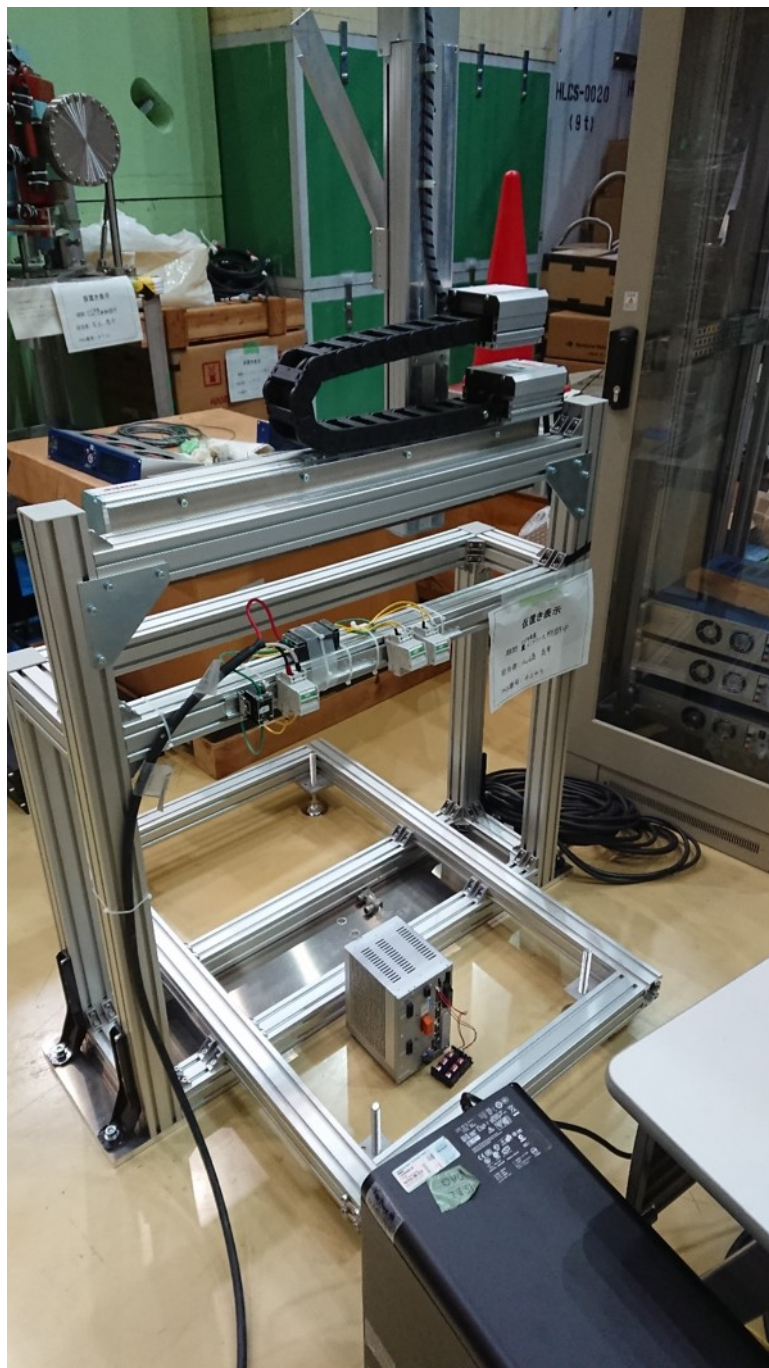


図 4.1: 2 軸ロボット.



図 4.2: 2 軸ロボットの腕.

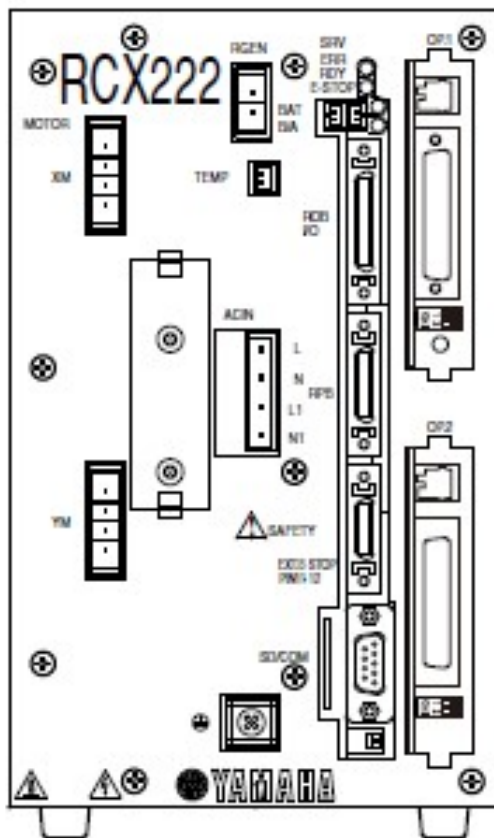


図 4.3: コントローラー.



図 4.4: RPB プログラミングボックス.



図 4.5: PC とコントローラーを繋ぐ通信ケーブル.

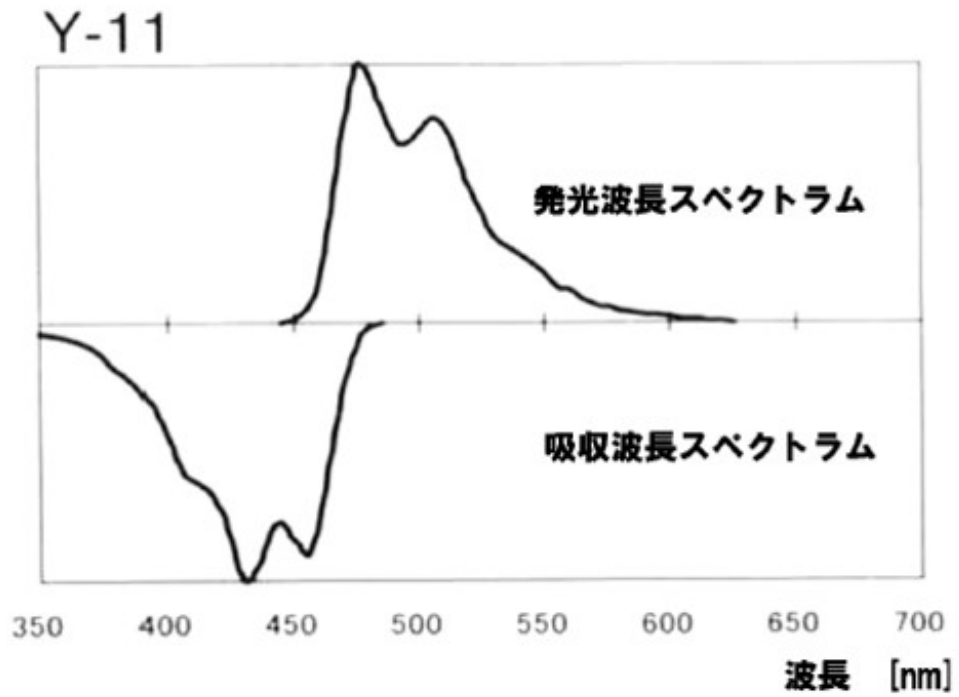


図 4.6: 波長変換ファイバーの発光・吸収波長スペクトラム。



図 4.7: 接着剤 (左) 主剤, (右) 硬化剤。





図 4.8: プラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを接着したもの.



図 4.9: PMT.

## 5 2 軸ロボット動作試験

2019 年に 2 軸ロボットの動作試験を行った。試験内容を以下に示す。

- プログラミングによるコマンドでロボットを操作できるか
- 動作完了通知やエラーなどのロボットからの返信をプログラミングで読み取れるか

### 5.1 配線

図 5.1 にコントローラーの各コネクタの名称を示す。各コネクタの機能は図 5.1 の通りである。2 軸ロボットは「XM」,「YM」,「ROB I/O」コネクタと接続する。電源は「ACIN」コネクタ, RPB プログラミングボックスは「RPB」コネクタ, PC は「COM」コネクタと接続する。

表 5.1: コネクタの機能。

番号	コネクタ名称	機能
①	XM/YM	サーボモータ駆動用のコネクタ
②	ROB I/O	サーボモータのフィードバック信号のためのコネクタ
③	ACIN	制御電源, 主電源 (モータ駆動用電源)
④	RPB	RPB プログラミングボックス接続用のコネクタ
⑤	COM	RS-232C インターフェース用のコネクタ

### 5.2 通信パラメータの設定値と設定方法

#### 5.2.1 通信パラメータの設定値

通信を行う際の各種パラメータは以下のように設定した (表 5.2)。

#### 5.2.2 通信パラメータの設定方法

プログラミングによるコマンド送信で通信パラメータの設定は可能であるが, RPB プログラミングボックスやターミナルエミュレーター「Tera Term[23]」を用いる方が容易である。

表 5.2: 通信パラメータ.

ボーレート [bps]	9600
キャラクタ長 [bit]	8
ストップビット [bit]	1
パリティ	奇数 (Odd)
ターミネーションコード	CRLF
フロー制御	XON/XOFF

### RPB プログラミングボックスの場合

RPB プログラミングボックスの画面やボタンを拡大したものが図 5.2 である。コントローラーの電源をオンにすると、図 5.3 のような初期画面になる。「MODE」ボタンを押すと図 5.4 のように最下行にモード一覧が表示される。画面外下の「F1」～「F4」ボタンが各モードに対応している。通信パラメータの設定を行うにはシステムモードにする必要があるため、「F4」ボタンを押す。

システムモードに切り替わると図 5.5 のような初期画面となる。システムモードでは様々なパラメータを設定することができる。通信パラメータの設定は「ツウシン」を選択する（「F2」ボタン）。

通信パラメータ設定画面を図 5.6 に示す。「F1」ボタンから「ヘンシュウ」を選択し、カーソルキー（↑/↓）で各項目を表 5.2 で述べた数値に変更する。なお、「1. ツウシンモード」は「オンライン」にする。設定完了後は「ESC」ボタンで終了する。

### Tera Term の場合

Tera Term を起動させるとまず図 5.7 で示した画面が現れる。「シリアル」をチェックし、ポートを指定する。ポートはデバイスマネージャーから確認できる。ウィンドウ上部、[設定]→[シリアルポート]から通信パラメータの設定ができるので（図 5.8）、表 5.2 で述べた数値に変更する。

## 5.3 コマンドの送受信

### 5.3.1 コマンド一覧

動作試験で用いたコマンドの一覧を表 5.3 にまとめる。なお、表中のオプション  $S_n$  の  $n$  はシフト座標の番号であり、 $k$  は軸番号を表す。 $k=1$  は X 軸、 $k=2$  は Y 軸である。

表 5.3: コマンド一覧.

コマンド	オプション	説明
?	MOD	モードを取得する
	SERVO	サーボが ON か OFF かを取得する
	SHIFT	選択されているシフト状態を取得する
	WHRXY	現在位置 (X-Y 座標) を取得する
	Sn	指定したシフト座標の原点を取得する
DATE		日付の確認, 設定
MANUAL		手動モードに変更
SERVO	ON または OFF	サーボを ON または OFF にする
ABSRESET	k	指定した軸の原点に移動する
SHIFT	Sn	指定したシフト座標に切り替える
MOVE	P, X, Y, Z, R, A, B, S=1~100	指定した座標 (X, Y, Z) [mm], (R, A, B)[°] に プログラム移動速度 1~100% で絶対位置移動する

ここで、R, A, B は X, Y, Z 軸の回転角度である。今回用いる 2 軸ロボットは X-Y 軸しか動かすことができないので、Z, R, A, B は 0 とする。なお、2 軸ロボットの X-Y 軸は図 5.9 のように定義されている。

コントローラーに送信する際は、コマンドの先頭には「@」を、最後には「CRLF」を付加する。例えば、

```
@MOVE P, 50.0, 50.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, S=10 CRLF
```

とすると、X=50.0 mm, Y=50.0 mm の位置にプログラム移動速度 10% で移動する。また、シフト座標とは原点を任意の点に移動させた座標系である。現在、2 つのシフト座標 S1, S2 が設定されており、原点はそれぞれ

S1 : (0.0 mm, 0.0 mm)

S2 : (277.14 mm, 280.65 mm)

となっている。

### 5.3.2 Tera Term での試験

まずは Tera Term で接続・動作確認を行った。Tera Term でコマンドの送受信を行う場合、まず [設定]→[端末] から端末の設定を行う。図 5.10 のように、改行コードは受信・送信ともに「CR+LF」に、漢字-受信・送信ともに「JIS」を選ぶ。さらにローカルエコーにチェックを入れる。ローカルエコーにチェックを入れることで、自身が送信した内容を見ることができる。

設定が完了すれば、コマンドを直接ターミナルに入力するだけで送受信ができる。送信したコマンド、またそれに対するロボットからの返信と動作を表 5.4 にまとめた。ロボットは指示通りに動作し、送受信も問題なく行うことができた。

表 5.4: 動作試験の結果.

送信コマンド	返信	動作の様子
DATE	ゲンザイノヒツケ 19/09/05	-
? MOD	システム	-
MANUAL	OK	-
? MOD	シュドウ	-
SERVO ON	OK	-
? SERVO	ON 99999911	-
ABSRESET 1	OK	X=277.14 に移動
ABSRESET 2	OK	Y=280.65 に移動
? S2	277.14 , 280.65 , 0.00 , 0.00	-
? SHIFT	2	-
SHIFT S1	OK	-
? SHIFT	1	-
MOVE P, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0	OK	X=0, Y=0 に移動
SHIFT S2	OK	-
MOVE P, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0	OK	X=277.14, Y=280.65 に移動
? WHRXY	0.0, 0.0	-

### 5.3.3 プログラミングでの試験

Tera Term を用いて簡単な動作確認ができたので、プログラミングによるコマンド送受信が可能か試験した。実際に用いたコードの一部抜粋を以下に示す。

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#define device ‘‘/dev/ttyS6  ’’// 送信先のポートを記入する
#define CR ‘‘\x0D’’
#define LF ‘‘\x0A’’
using namespace std;

void RobotScanner::ps_move(double x, double y){
    ofstream* fout = new ofstream(device);
    *fout << ‘‘@MOVE P, ‘‘ << x << ‘‘ ‘‘ << y
        << ‘‘ 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0’’ << CR << LF;
    ifstream* fin = new ifstream(device);
    string st;
    if(getline(*fin, st)) cout << st << endl;
    delete fout;
    delete fin;
}
```

RobotScanner というクラスを作成し、そのメンバ関数として ps\_move を定義している。移動先の X-Y 座標を引数に入力すると、その点に移動する。ここでは getline 関数を用いて 返信を読んでいるが、これはコントローラーから End Of File (EOF) が送信されないためである。stringstream クラスや stringstream クラスを用いた方法でも読むことが可能であるが、これらは EOF により処理を終えるため不適である。getline 関数は EOF ではなく CR で処理を終了するため、EOF が送信されてこなくとも処理を終了することができる。同様の理由で read 関数も有効である。上記の ps\_move 関数を用いて 2 軸ロボットが蛇行移動するように作成したシェルスクリプトが以下である。

```

#!/bin/bash -f
root -b -l <<EOF
RobotScanner robo;
double x,y;
for(int i=0; i<11; i++){
    x = 55 * i;
    if(i%2 == 0){
        for(int j=0; j<11; j++){
            y = 55 * j;
            robo.ps_move(x,y);
        }
    }
    if(i%2 == 1){
        for(int j=10; j>-1; j--){
            y = 55 * j;
            robo.ps_move(x,y);
        }
    }
}
EOF

```

このシェルスクリプトを実行すると、ロボットは点 (0 mm, 0 mm) から点 (0 mm, 550 mm) へ移動し、次に点 (55 mm, 550 mm) から点 (55 mm, 0 mm) へ、点 (110 mm, 0 mm) から点 (110 mm, 550 mm) へ、と蛇行移動した。また、各点に移動するごとに「OK」と端末上に表示された。これは2軸ロボットからの返信である。以上から、プログラミングにより2軸ロボットの操作および返信の読み取りができることが確認できた。



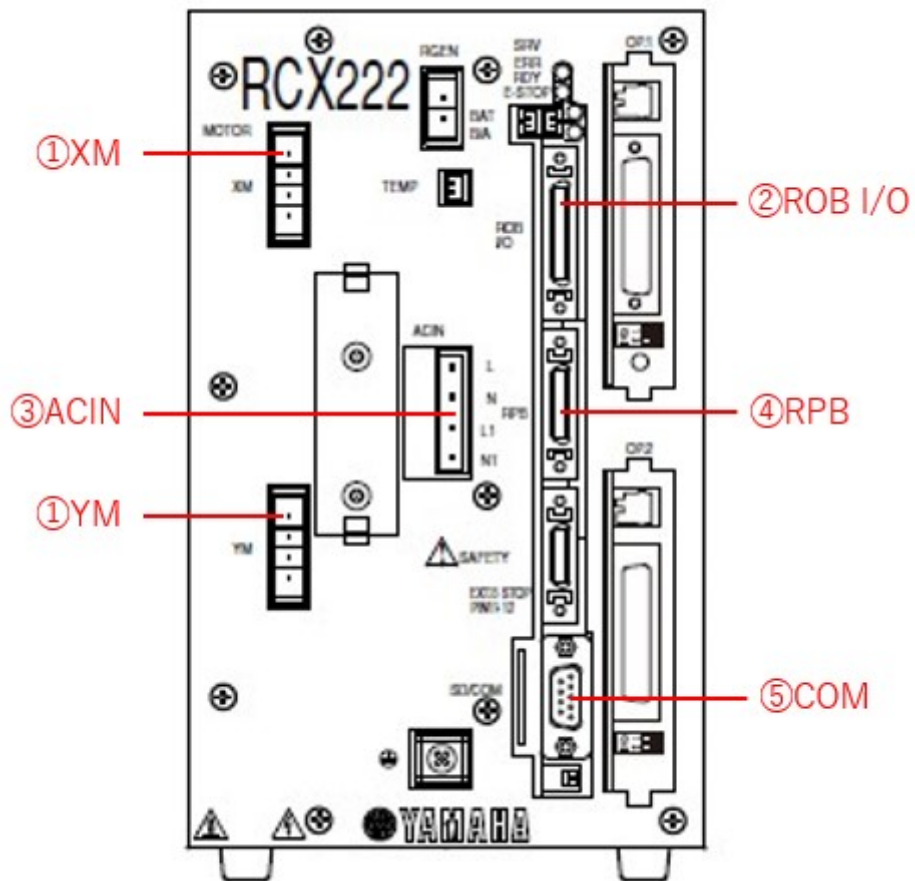


図 5.1: コントローラーの各コネクタの名称.

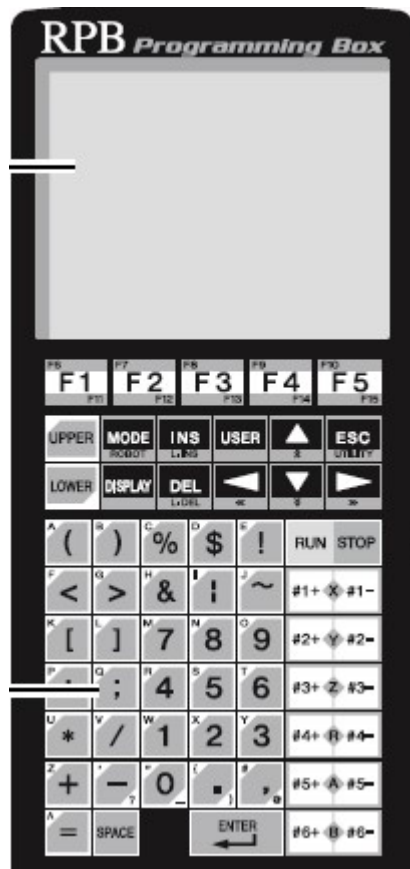


図 5.2: RPB プログラミングボックスの画面とボタンの拡大図.



図 5.3: RPB プログラミングボックスの初期画面.

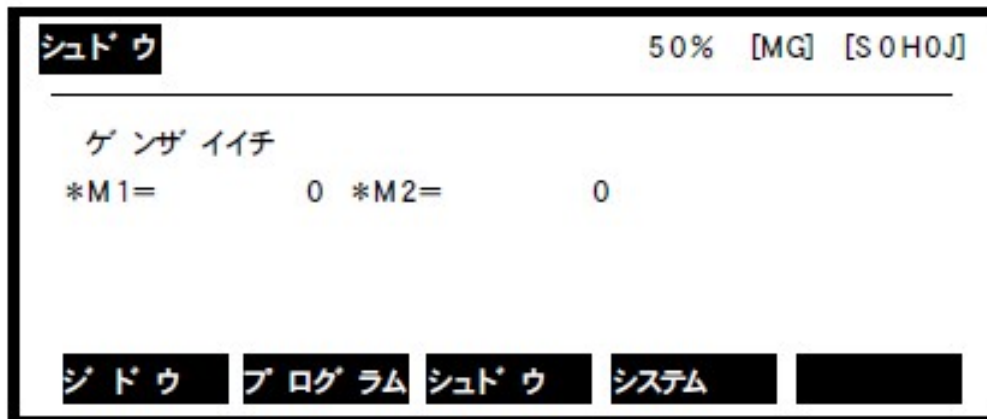


図 5.4: 「MODE」を押したときの画面.



図 5.5: システムモードの初期画面.

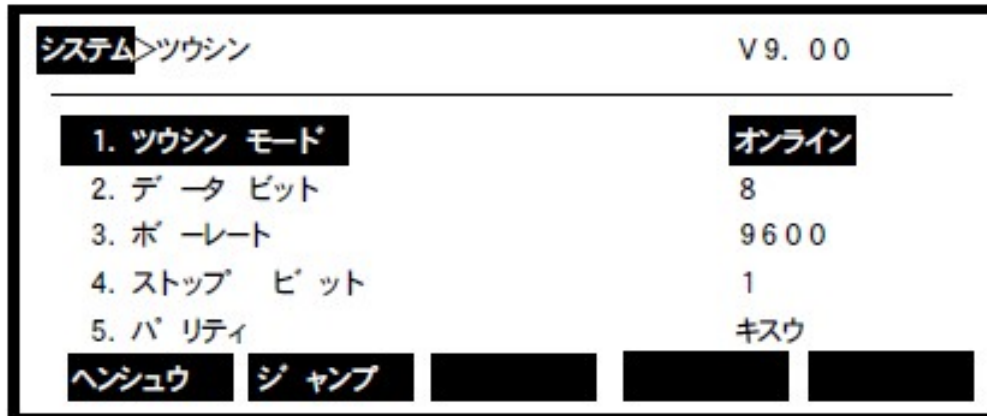


図 5.6: 通信パラメータ設定画面.



図 5.7: Tera Term のポート選択画面.

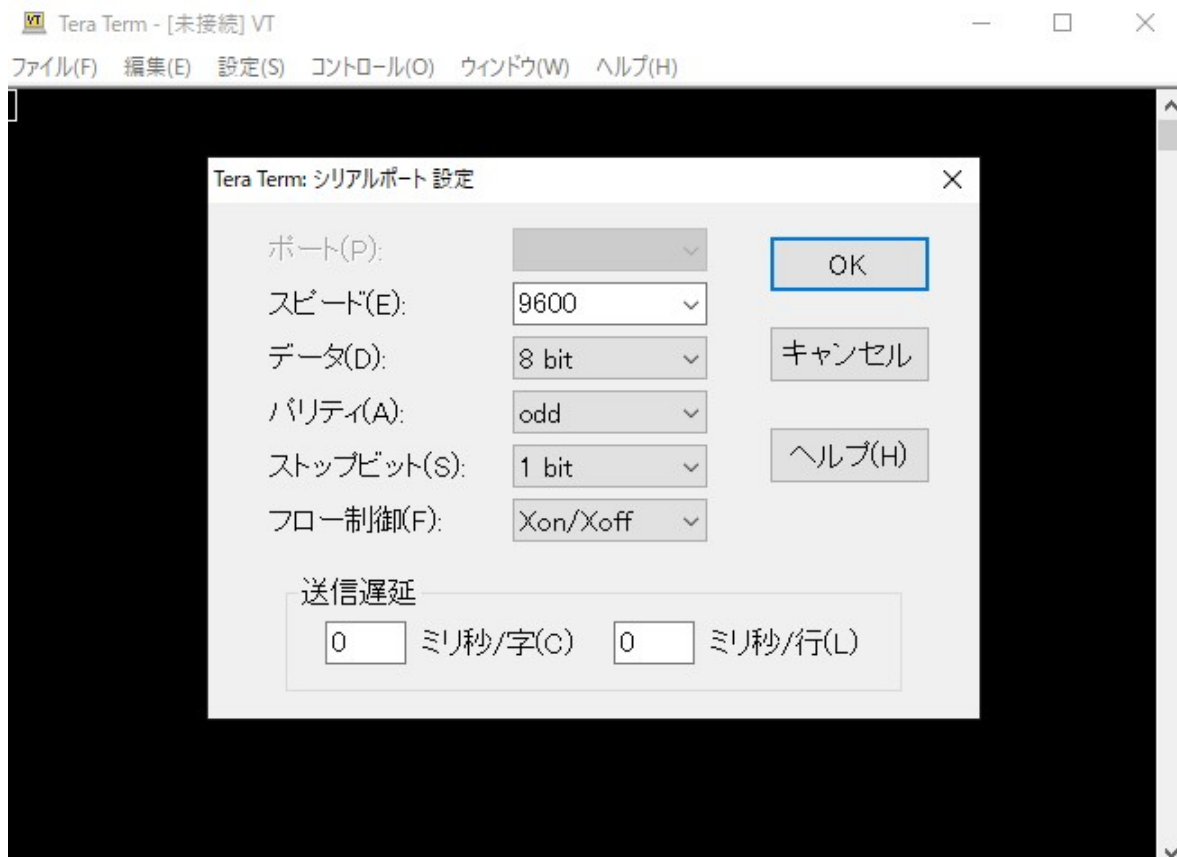


図 5.8: Tera Term のシリアルポート設定画面.

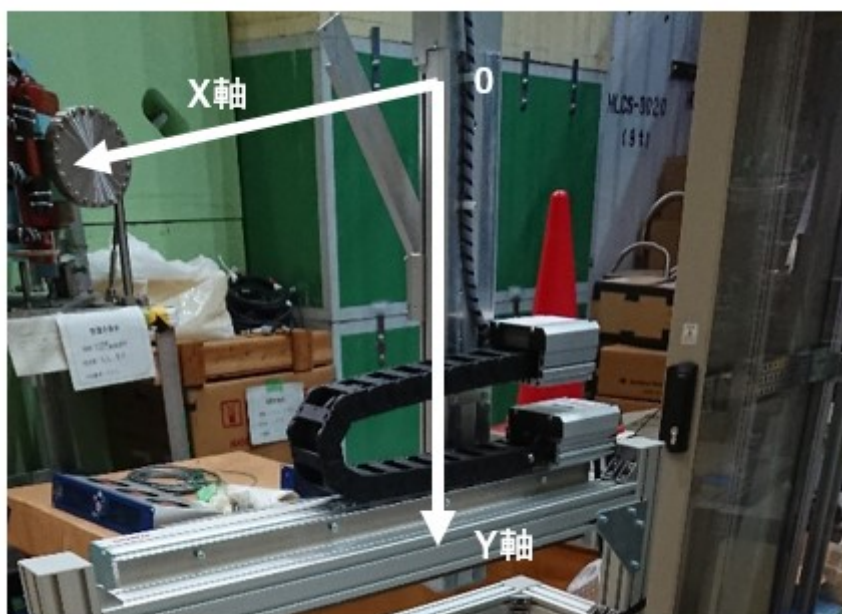


図 5.9: 2 軸ロボットの座標定義.

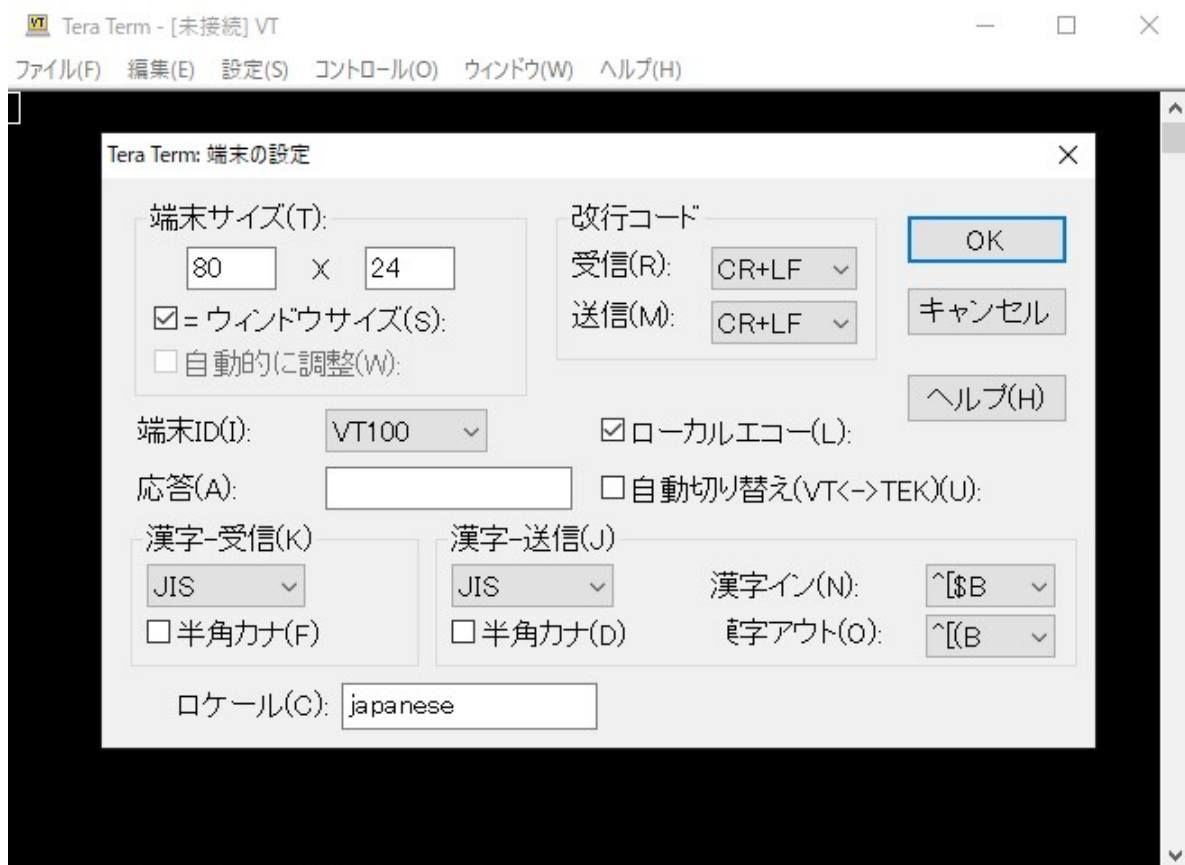


図 5.10: Tera Term の端末設定画面.

## 6 FADC の選定

FADC を新しく選定するために、ビームプロファイル取得に必要な FADC の性能をシミュレーションにより評価する。評価する性能はサンプリング周波数である。サンプリング周波数とは単位時間あたりに取得するデータの数である。サンプリング周波数への要請を以下に示す。

- I ビームタイミングと非同期でもパルスの積分が正確に行えること
- II 28 MeV/c において陽電子と  $\mu^+$  のパルスを安定して積分できること
- III 105 MeV/c の電子と  $\mu^-$  のパルスを安定して積分できること

### 6.1 評価の手順

評価は以下の手順で行う。図示すると図 6.1 となる。

1. テンプレート波形を作成する
2. サンプリング周波数を設定する
3. サンプリングのスタート点を乱数で決める
4. サンプリングを行う
5. 作成した点を繋ぎ、積分する
6. 積分値をヒストグラムに詰める
7. 3~6 を繰り返し行う (25 回)
8. ヒストグラムから平均値と標準偏差を取得する
9. 2 に戻る

ここでテンプレート波形とは、H-Line での信号を推測した波形である。サンプリングのスタート点を乱数にしている理由は、要請 I を満たすためである。

### 6.2 要請 II 28 MeV/c

要請 II を満たすサンプリング周波数を評価する。

### 6.2.1 テンプレート波形の作成

評価の手順に従い、テンプレート波形を作成する。テンプレート波形を作成するには、波形の Width, 陽電子と  $\mu^+$  の時間差, 波高比が必要である。

#### Width

Width は RCS 陽子ビームの時間幅に依存すると考えられるため陽電子・ $\mu^+$  共に  $\sim 250$  ns とする。

#### 陽電子と $\mu^+$ の時間差

時間差は H-Line の長さから粒子の速度から算出可能である。H-Line の長さは 21.756 m, 28 MeV/c の陽電子の  $\beta$  は約 1,  $\mu^+$  の  $\beta$  は約 0.25 である。よって時間差は 211 ns となる。

#### 波高比

プラスチックシンチレーターを使用した場合の波高比を求める。波高比は単位時間当たりの粒子数とプラスチックシンチレーターでのエネルギー損失から算出可能である。単位時間当たりの粒子数は陽電子が  $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $\mu^+$  が  $1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  である。28 MeV/c の陽電子の運動エネルギーは 27.5 MeV なので、図 6.2 から単位面密度あたりのエネルギー損失は  $2.02 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$  となる。プラスチックシンチレーターの厚みは 3 mm, 密度は  $1.06 \text{ g/cm}^3$  なので、陽電子のエネルギー損失は

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{e^+} &= 2.02 \times 0.3 \times 1.06 \\ &= 0.64 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{6.1}$$

となる。また、28 MeV/c の  $\mu^+$  の運動エネルギーは 3.65 MeV なので、図 6.3 から単位面密度あたりのエネルギー損失は  $17.5 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$  となる。よって、 $\mu^+$  のエネルギー損失は

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\mu^+} &= 17.5 \times 0.3 \times 1.06 \\ &= 5.57 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{6.2}$$

となる。しかし、 $\mu^+$  の運動エネルギーは 3.65 MeV ( $< 5.57 \text{ MeV}$ ) であるため、 $\mu^+$  は静止すると考えられる。よって  $\mu^+$  のエネルギー損失は 3.65 MeV である。従って波高比は、

$$\begin{aligned} \text{陽電子の波高} : \mu^+\text{の波高} &= 4.5 \times 10^9 \times 0.64 : 1 \times 10^8 \times 3.65 \\ &= 8.16 : 1 \end{aligned} \tag{6.3}$$

と求まる。



## テンプレート波形

以上から 28 MeV/c でのテンプレート波形を作成すると、図 6.4 となる。

### 6.2.2 結果

28 MeV/c のテンプレート波形に対し、サンプリング周波数を 2,5,10,20,50,100,200,500 MHz と変え、手順に従い評価を行った。その結果をまとめたものが図 6.5 である。この図から要請 II を満たすためには 20 MHz 以上のサンプリング周波数が必要であると分かる。

## 6.3 要請 III 105 MeV/c

次に要請 III を満たすサンプリング周波数を評価する。

### 6.3.1 テンプレート波形の作成

要請 II の場合と同様の手順で Width, 時間差, 波高比を求める。Width は電子・ $\mu^-$  共に  $\sim 250$  ns とする。105 MeV/c の電子の  $\beta$  は約 1,  $\mu^-$  の  $\beta$  は約 0.7 であるため時間差は 30 ns となる。粒子数は電子が  $2.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $\mu^-$  が  $1.6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  である [26]。プラスチックシンチレーターでのエネルギー損失は電子が 0.56 MeV,  $\mu^-$  が 0.95 MeV である。従って波高比は、

$$\begin{aligned} \text{電子の波高} : \mu^- \text{の波高} &= 2.6 \times 10^9 \times 0.56 : 1.6 \times 10^8 \times 0.95 \\ &= 9.58 : 1 \end{aligned} \tag{6.4}$$

と求まる。以上から 105 MeV/c でのテンプレート波形を作成すると、図 6.6 となる。図 6.6 から、105 MeV/c においてはどのようなサンプリング周波数を用いても、電子と  $\mu^-$  が分離していないため別々に積分することが不可能であることが分かる。従って 105 MeV/c においてはプラスチックシンチレーターではなく別の検出器を用いなければならない。別の検出器については 7 章で詳しく述べる。

## 6.4 FADC の選定

上記の評価から FADC のサンプリング周波数は 20 MHz 以上でなければならないことが分かった。この条件を満たすものとして AlazarTech 社の ATS850-8 bit, 50 MS/s を選んだ (図 6.7)。仕様は表 6.1 にまとめた [27]。

表 6.1: FADC の性能.

バス	PCI
OS	32-bit/64-bit Windows & 64-bit Linux
チャンネル数	2
最大サンプリング周波数	50 MS/s
1 チャンネルあたりのメモリー	256 K
分解能	8 bits

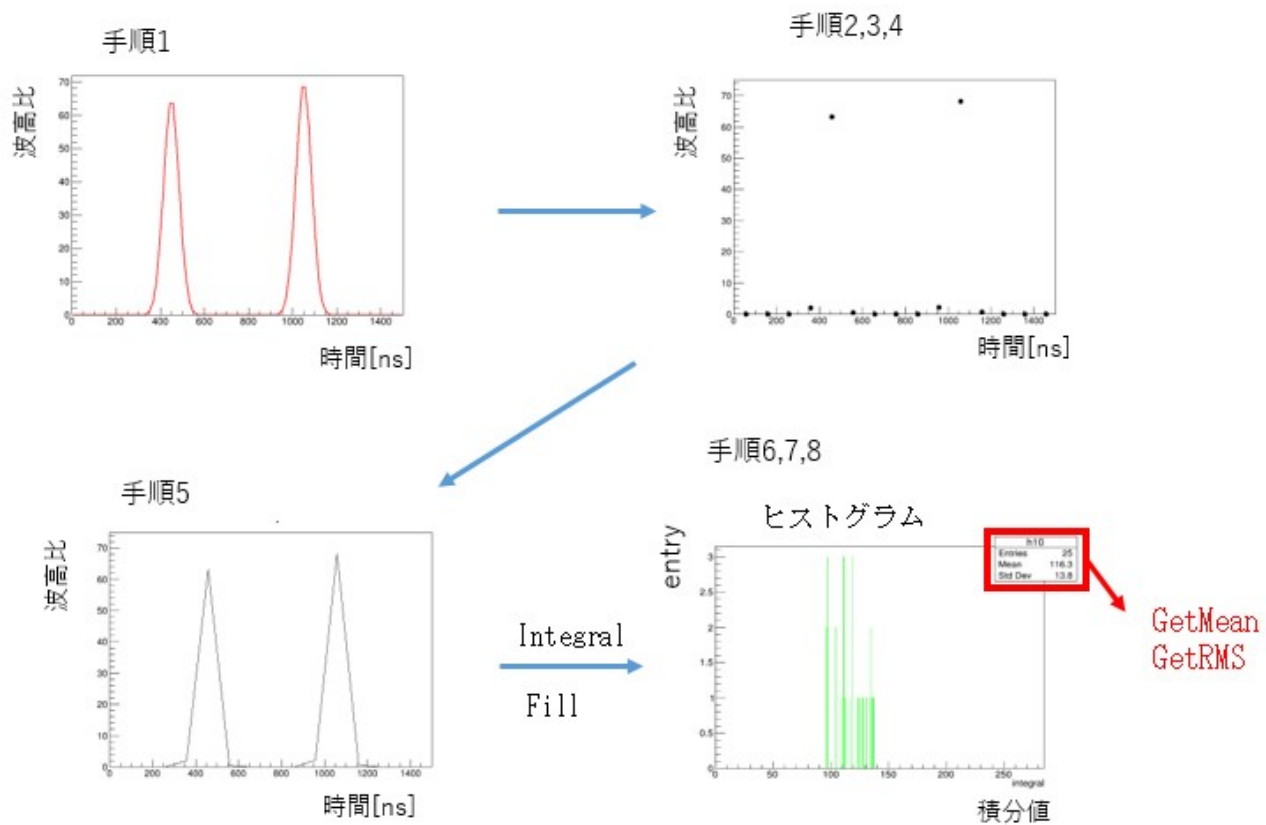


図 6.1: 評価手法のイメージ.

## POLYSTYRENE

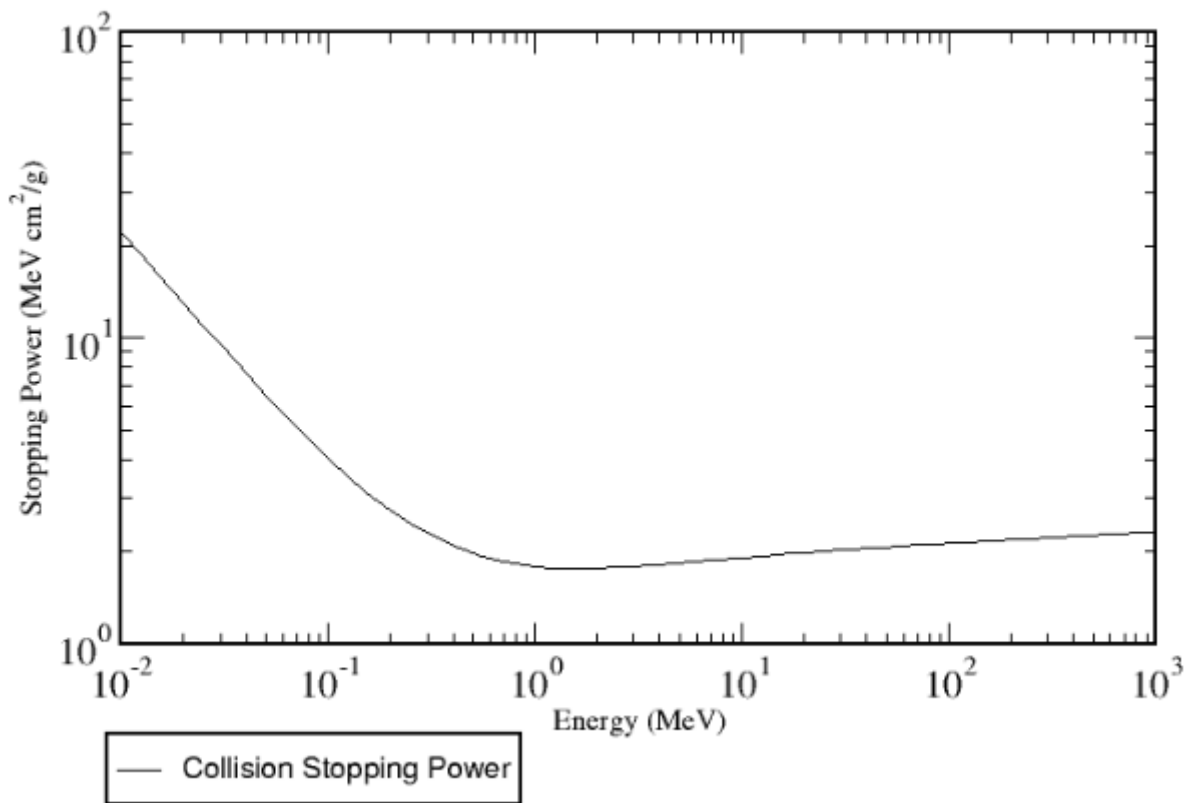


図 6.2: 陽電子のエネルギー損失 [24].

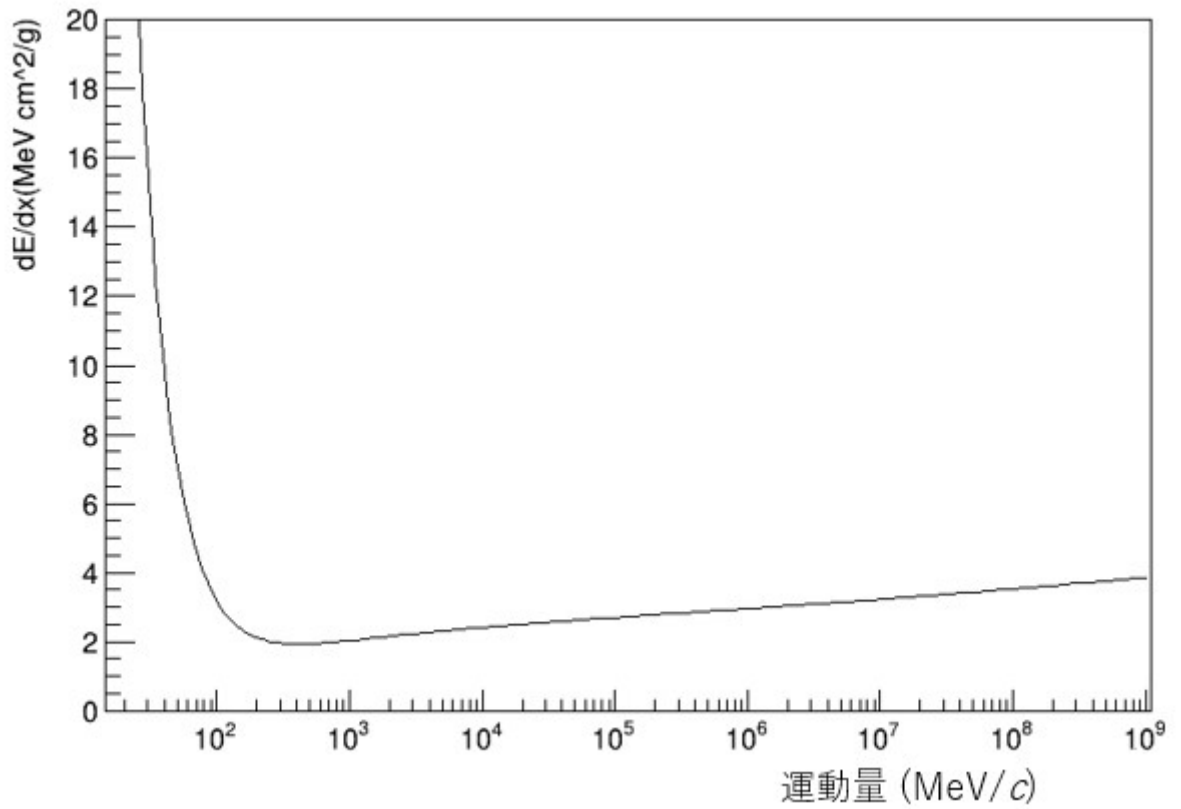


図 6.3:  $\mu^+$  のエネルギー損失 [25].

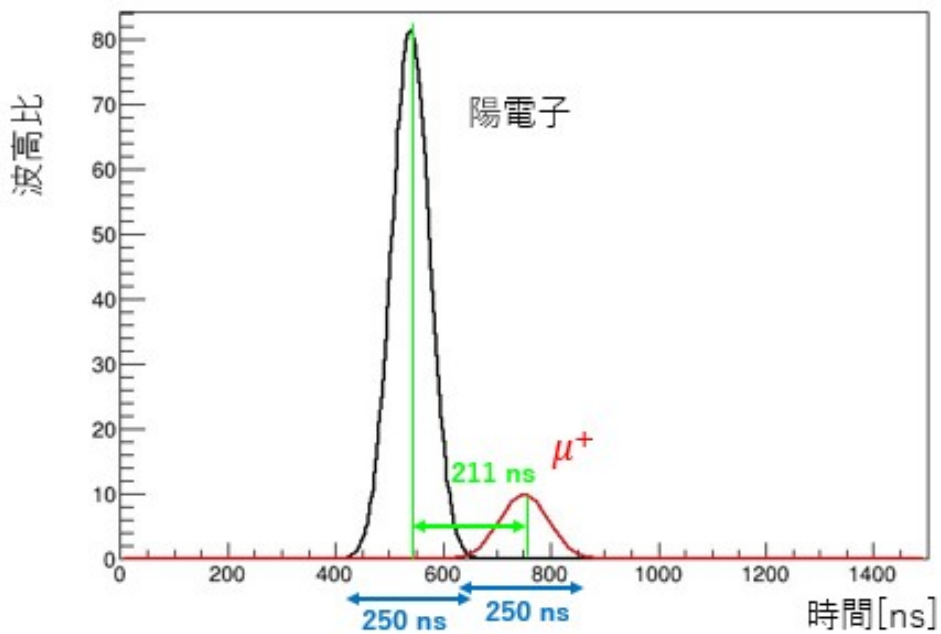


図 6.4: 28 MeV/c の陽電子と  $\mu^+$  のテンプレート波形.

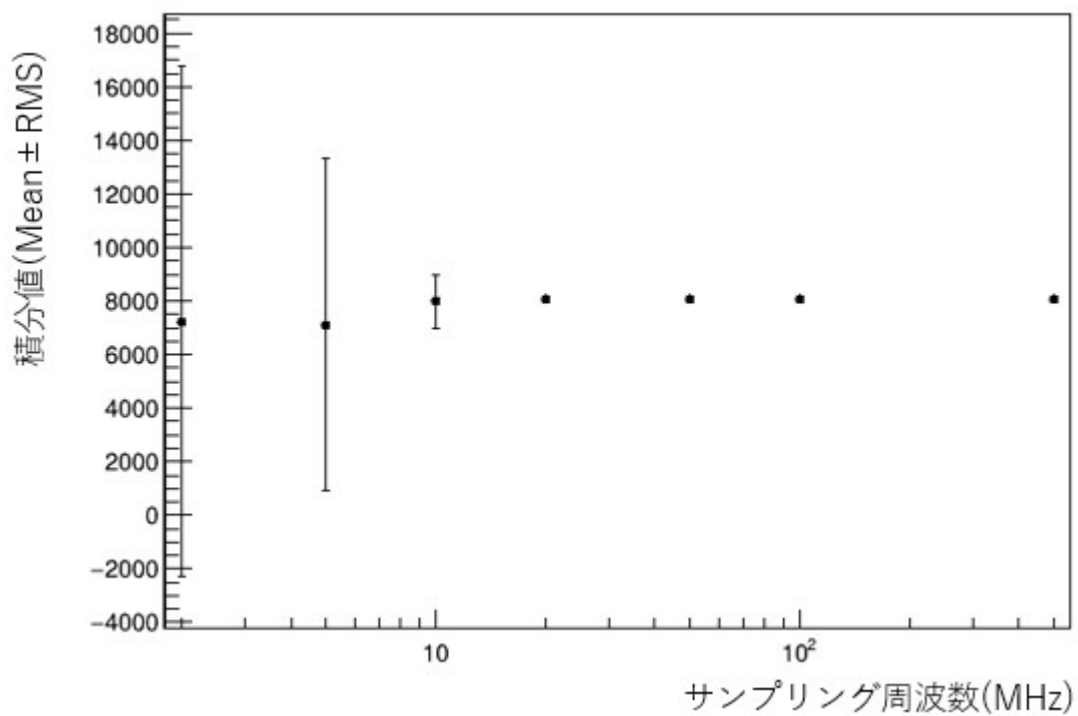


図 6.5: サンプリング周波数と波形の積分値.

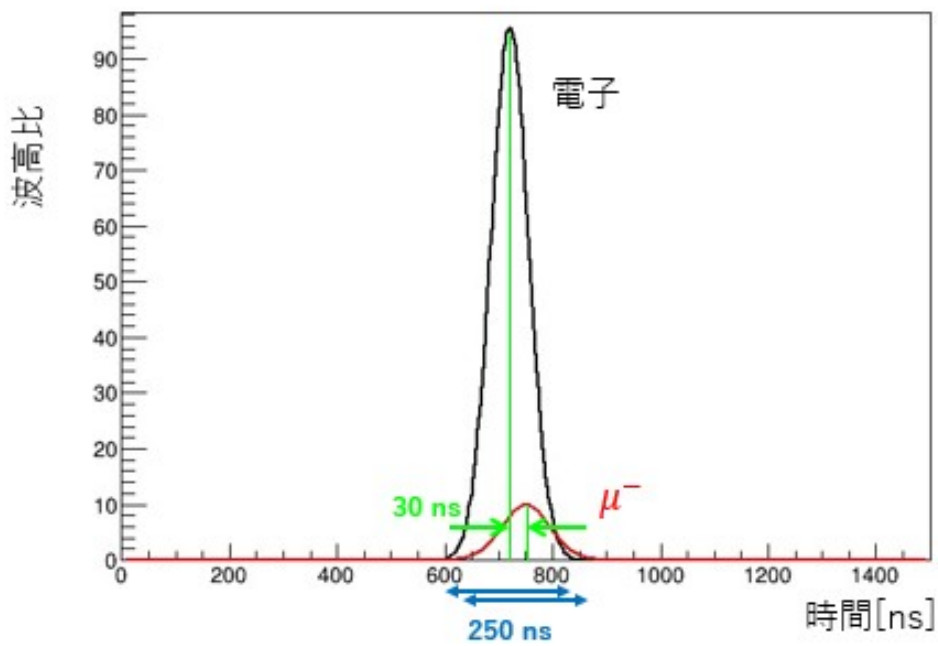


図 6.6: 105 MeV/c の時の電子と  $\mu^-$  のテンプレート波形.



図 6.7: Alazar Tech 社の ATS850-8 bit,50 MS/s.

## 7 チェレンコフ検出器開発

前章で述べたように、プラスチックシンチレーターを用いると 105 MeV/c においては電子と  $\mu^-$  を分離していないことが分かった。そこで新たにチェレンコフ検出器を開発する。適切な屈折率の輻射体を用いれば電子と  $\mu^-$  の両方を検出することが可能である。さらにチェレンコフ光は粒子の速度によって放射角度が異なるため、二者を分離することも可能だと推測される。本修士論文では扱わないが、 $\mu^-$  のビームプロファイルも取得する必要があるため、電子のみがチェレンコフ光を発するような閾値型検出器ではなく、 $\mu^-$  からのチェレンコフ光も取得する前提での検出器開発を行う。まずチェレンコフ光の原理についてに説明する。

### 7.1 チェレンコフ光

チェレンコフ光とは、荷電粒子が輻射体を通過する際にその粒子の速度が輻射体中の光速を超える場合に発生する光である。屈折率  $n$  の輻射体中の光速は  $c/n$  である。つまり、チェレンコフ光の発生条件は、粒子の速度を  $v$  とすると、

$$\begin{aligned} v &> \frac{c}{n} \\ \therefore \beta n &> 1 \end{aligned} \quad (7.1)$$

と表される。荷電粒子は  $t$  秒間に  $vt = \beta ct$  移動し、チェレンコフ光は  $ct/n$  移動する。よってチェレンコフ光が放射される角度  $\theta_c$  は、

$$\begin{aligned} \cos \theta_c &= \frac{ct/n}{\beta ct} \\ &= \frac{1}{\beta n} \end{aligned} \quad (7.2)$$

となる (図 7.1)。なお、速さ  $\beta$  の荷電粒子が物質中を  $L$  [cm] 通過する時、波長が  $\lambda_{\min}$  と  $\lambda_{\max}$  の間となるチェレンコフ光の数  $N$  は式 (7.3) で与えられる。ここで  $\alpha$  は微細構造定数、 $z$  は粒子の電荷である。

$$N = 2\pi\alpha Lz^2 \left( \frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \left( 1 - \frac{1}{(\beta n)^2} \right) \quad (7.3)$$

### 7.2 チェレンコフ検出器の構成

今回開発するチェレンコフ検出器は輻射体、ライトガイド、PMT から構成される。ライトガイドとは輻射体から発生したチェレンコフ光を PMT まで導くためのものである。ライトガイドは PMT にビームが当たらないよう十分長く設計する必要がある。



## 7.3 輻射体の物質と形状

105 MeV/c の電子と  $\mu^-$  の  $\beta n = 1$  のグラフを作成すると図 7.2 となる。この図から、105 MeV/c においては屈折率が 1.41 以上で電子も  $\mu^-$  もチェレンコフ光を発生させることが分かる。従って、輻射体は屈折率が 1.41 以上の物質でなければならない。屈折率が 1.41 以上の物質は多数存在するが、その中でも比較的安価で入手しやすいアクリルを用いることにした。アクリルの屈折率は約 1.49 である。厚さ 3 mm の樹脂の透過率波長依存性を図 7.3 に示す [28]。図中、ZEONOR はシクロオレフィンポリマー、PC はポリスチレン、PMMA はアクリルである。アクリルを用いた場合、式 (7.2) より 105 MeV/c の電子と  $\mu^-$  の放射角度はそれぞれ、約  $48^\circ$ 、約  $18^\circ$  と求められる。また、アクリルと空気の境界面では入射角が約  $42^\circ$  以上で全反射を起こす。図 7.4 のように、ビームに対して垂直になる面では、電子からのチェレンコフ光は入射角が  $48^\circ$  となるため全反射を起こし、 $\mu^-$  からのチェレンコフ光は入射角が  $18^\circ$  となるため透過していく。これを利用し電子と  $\mu^-$  が分離するようアクリルの形状を決める。Geant4 を用いて、いくつかの形状に対して電子と  $\mu^-$  を照射し、その分離性能を調べた。

### 7.3.1 セットアップ

セットアップを図 7.5 に示した。大きい長方形がライトガイド、小さい正方形がアクリルである。ライトガイドの大きさは 50.0 mm × 300.0 mm × 30.0 mm で、中が空洞の細長い直方体である。材質はアルミニウムである。検出器全体は 2 軸ロボットの腕に合わせて  $30^\circ$  傾いているが、簡単のためアクリルは図 7.5 のように傾けずに設置した。また、アクリルを設置する部分に窓を設けている。これは  $\mu^-$  由来のチェレンコフ光をライトガイドの外に出すためである。PMT を設置する場所 (図中赤四角) には反射率を 0 に設定した物質を置いた。これによりチェレンコフ光がその物質表面で吸収されるため、PMT 部分に到来するチェレンコフ光の数を数えることができる。検討したアクリルの形状一覧を図 7.6 にまとめた。なお図中の座標はシミュレーション内での座標であり、図 5.9 で示した座標とは別である。

### 7.3.2 評価方法

各形状のアクリルに対し、105 MeV/c の電子と  $\mu^-$  を 100 イベントずつアクリルに照射し、発生したチェレンコフ光が何個 PMT 部分に到来するか記録した。ビームはアクリル全体に当たるよう 20 mm × 20 mm で一様に発生させた。形状番号⑤に電子と  $\mu^-$  を照射した時のチェレンコフ光発生の様子を図 7.7・7.8 に示す。赤色の線が電子および  $\mu^-$  で、緑色の線がチェレンコフ光である。なお、この 2 つの図は可視化の都合上 10 イベントとしている。

### 7.3.3 結果

シミュレーションの結果を表 7.1 にまとめた。表中の  $\mu^-$  の割合とは

$$\mu^- \text{の割合} = \frac{(\mu^- \text{由来のチェレンコフ光の数})}{16 \times (\text{電子由来のチェレンコフ光の数})} \quad (7.4)$$

の計算値である。105 MeV/c の時、電子の数が  $\mu^-$  の数より約 16 倍多いため、電子由来のチェレンコフ光の数を 16 倍にしている。この表から⑤の四角錐の形状が最も分離性能が良いと推測される。よってアクリルの形状は底面 20 mm × 20 mm、高さ 10 mm の四角錐と決定した。四角錐を用いた場合についてのみ、イベント数を増やして同様の評価を行った。電子は 8000、 $\mu^-$  は 500 イベントに増やし、それぞれ 10 セット行った。その結果、 $\mu^-$  の割合は  $(0.096 \pm 0.006)\%$  となった。

表 7.1: シミュレーション結果.

形状番号	電子由来のチェレンコフ光の数	$\mu^-$ 由来のチェレンコフ光の数	$\mu^-$ の割合
①	1066	57	0.33%
②	965	59	0.38%
③	2134	133	0.39%
④	1657	68	0.26%
⑤	977	0	0
⑥	1106	16	0.09%
⑦	1391	14	0.06%
⑧	1104	67	0.38%

## 7.4 性能評価

四角錐のアクリルを使用した場合について、Geant4 で性能評価を行った。評価した項目は効率と位置依存性である。セットアップは先程と同じである。

### 7.4.1 効率

アクリルの効率、ライトガイドの効率、全体の効率について評価を行った。まず電子を用いた場合の評価結果を述べる。電子を 1000 イベント発生させ、発生したチェレンコフ光の数、アクリルの外 (ライトガイド内) に出た数、PMT 部分に到達した数を記録した。電子 1 イベント当たりが発生したチェレンコフ光の数のヒストグラムを図 7.9 に示す。エン트리数が 1000 ではなく 991 となっているが、これは電子が空気中の原子核と相互作用し、アクリルに到達しなかったことが原因だと考えられる。

アクリルの効率  $Eff_{acr}$  を

$$Eff_{acr} = \frac{\text{アクリルの外 (ライトガイド内) に出た数}}{\text{発生したチェレンコフ光の数}} \quad (7.5)$$

と定義する. 1 イベントごとに  $Eff_{acr}$  を計算しヒストグラムを作成すると図 7.10 が得られる. このヒストグラムは先のシミュレーションとは別のデータを用いているため同じエントリー数ではない. Mean と Std Dev から

$$Eff_{acr} = (25.3 \pm 0.3)\% \quad (7.6)$$

となる. 図 7.3 で示したように, アクリルの透過率は 100% ではない. 発生したチェレンコフ光の内, 一部はアクリルに吸収され, 一部はライトガイド外へ出たと考えられる. 次に検出器全体の効率  $Eff_{tot}$  を

$$Eff_{tot} = \frac{\text{PMT 部分に到達した数}}{\text{発生したチェレンコフ光の数}} \quad (7.7)$$

と定義する. 同様にヒストグラムを作成すると図 7.11 が得られる. よって同様に,

$$Eff_{tot} = (5.5 \pm 0.1)\% \quad (7.8)$$

となる. 最後にライトガイドの効率  $Eff_{lig}$  を

$$Eff_{lig} = \frac{\text{PMT 部分に到達した数}}{\text{アクリルの外 (ライトガイド内) に出た数}} \quad (7.9)$$

と定義すると, これは式 (7.5), (7.7) から計算できるので,

$$\begin{aligned} Eff_{lig} &= \frac{\text{PMT 部分に到達した数}}{\text{アクリルの外 (ライトガイド内) に出た数}} \\ &= \frac{Eff_{tot}}{Eff_{acr}} \\ &= (21.7 \pm 0.5)\% \end{aligned} \quad (7.10)$$

となる. まとめると, アクリルで発生したチェレンコフ光のうち, 約 25.3% がライトガイドに入り, そのうちの約 21.7% が PMT に到達する.

同様に  $\mu^-$  を用いた場合についても効率を評価した.  $\mu^-$  1 イベント当たり発生したチェレンコフ光の数のヒストグラムを図 7.12 に示す. 評価した効率の結果は以下に示す. アクリルの効率や全体の効率が電子より低い数値である理由はアクリルの形状を電子と  $\mu^-$  が分離するよう設計しているためである. また, ライトガイドの効率は電子よりも良い効率となった. これはチェレンコフ光の放射角度が違うためだと思われる.

- アクリルの効率

$$Eff_{acr} = (0.9 \pm 0.1)\% \quad (7.11)$$

- 全体の効率

$$Eff_{tot} = (0.31 \pm 0.04)\% \quad (7.12)$$

- ライトガイドの効率

$$Eff_{lig} = (34.4 \pm 5.9)\% \quad (7.13)$$

#### 7.4.2 位置依存性

PMT までの距離の差から、アクリルのどの位置にビームが当たるかによって取得されるチェレンコフ光の数に違いがあると考えられる。図 7.13 のようにアクリルを 4 区画に分割し、1 電子あたり PMT に到達するチェレンコフ光の数を比較した。PMT の位置は図 7.5 と同じである。各区画には電子を 10000 イベントずつ照射した。区画①に照射した際の例を図 7.14 に示す。このヒストグラムから Mean と Std Dev を取得する。区画②～④に対しても同様に行い、Mean と Std Dev を取得し、全区画についてまとめたものが図 7.15 である。このプロットから最大で約 8% の応答の違いがあることが分かった。

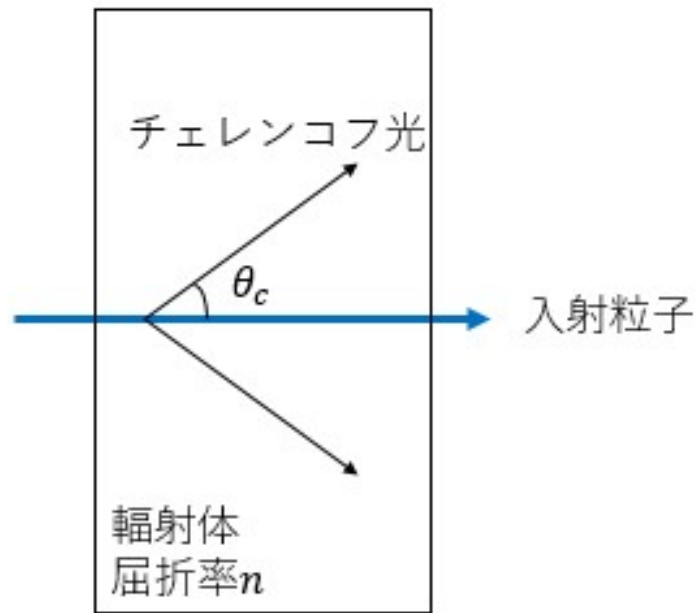


図 7.1: チェレンコフ光発生 の 概要図.

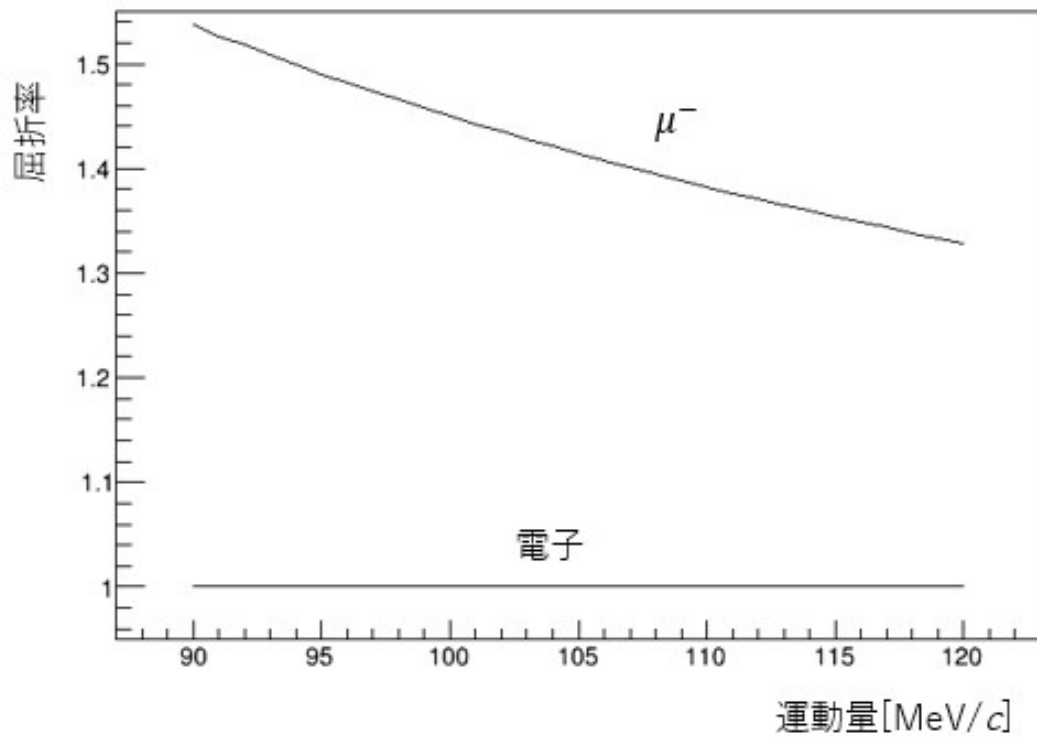


図 7.2: 電子と  $\mu^-$  の  $\beta n = 1$  のグラフ.

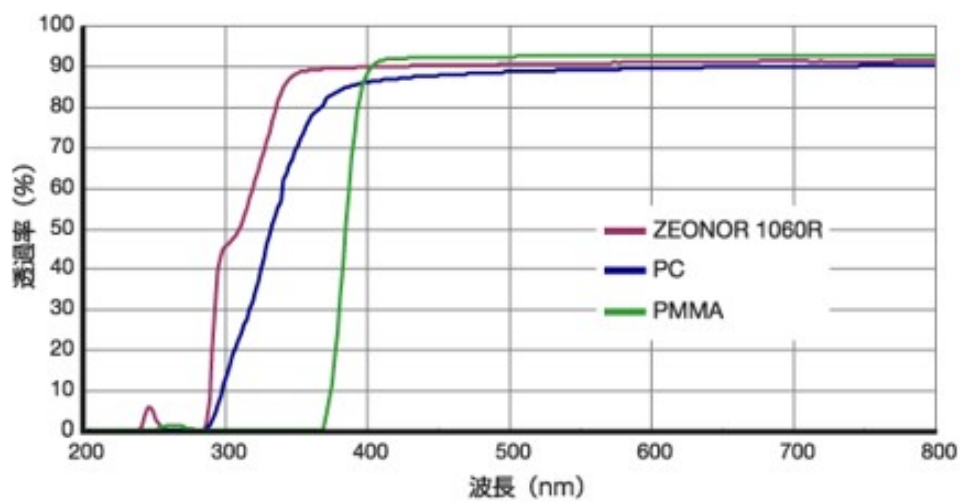


図 7.3: 樹脂の透過率波長依存性.

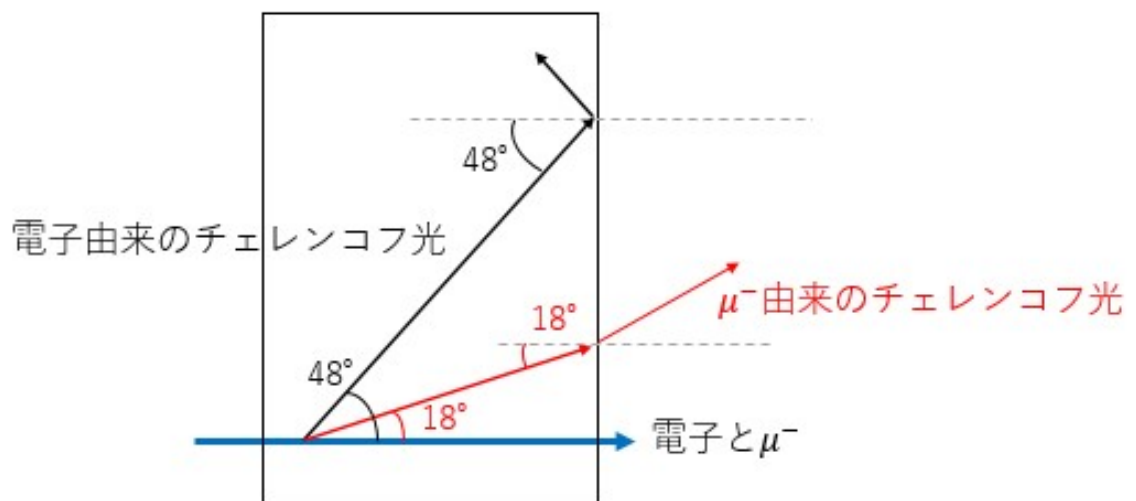


図 7.4: 電子由来のチェレンコフ光と  $\mu^-$  由来のチェレンコフ光の入射角.

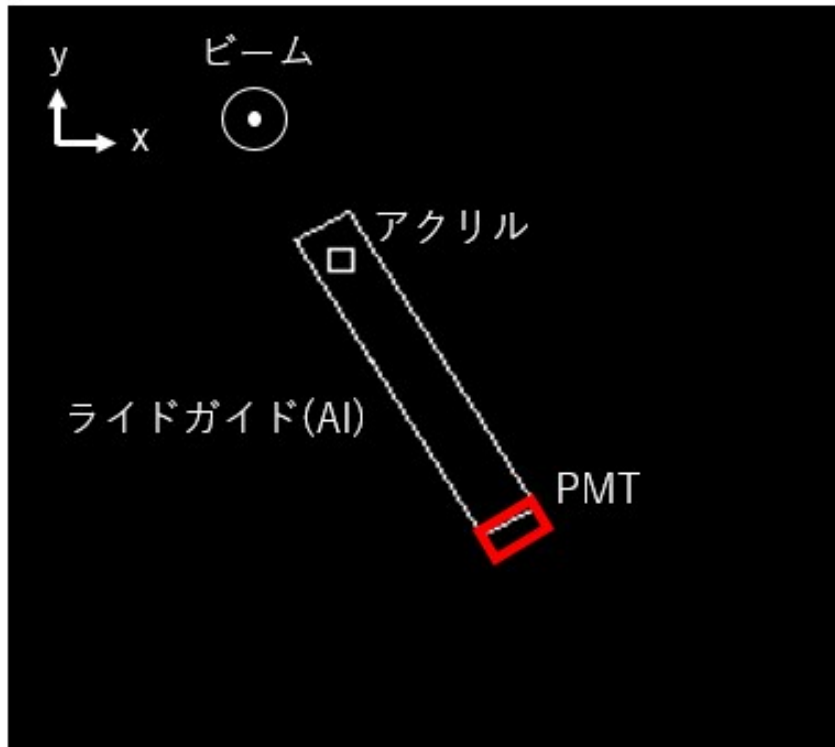

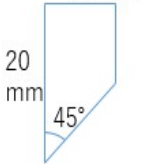

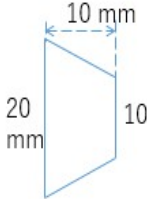




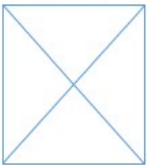
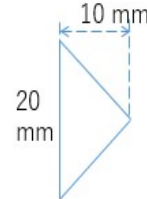
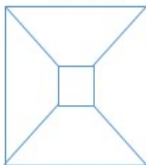
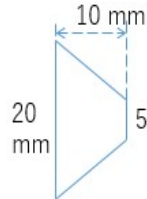


図 7.5: セットアップ.



①		②	
top	side	top	side
			

③		④	
top	side	top	side
			

⑤		⑥	
top	side	top	side
			

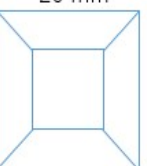
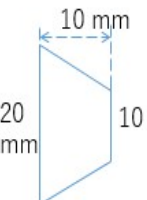
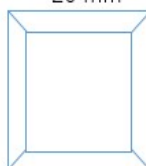
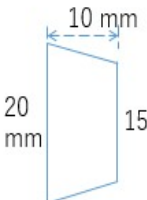
⑦		⑧	
top	side	top	side
			

図 7.6: アクリルの形状一覧.

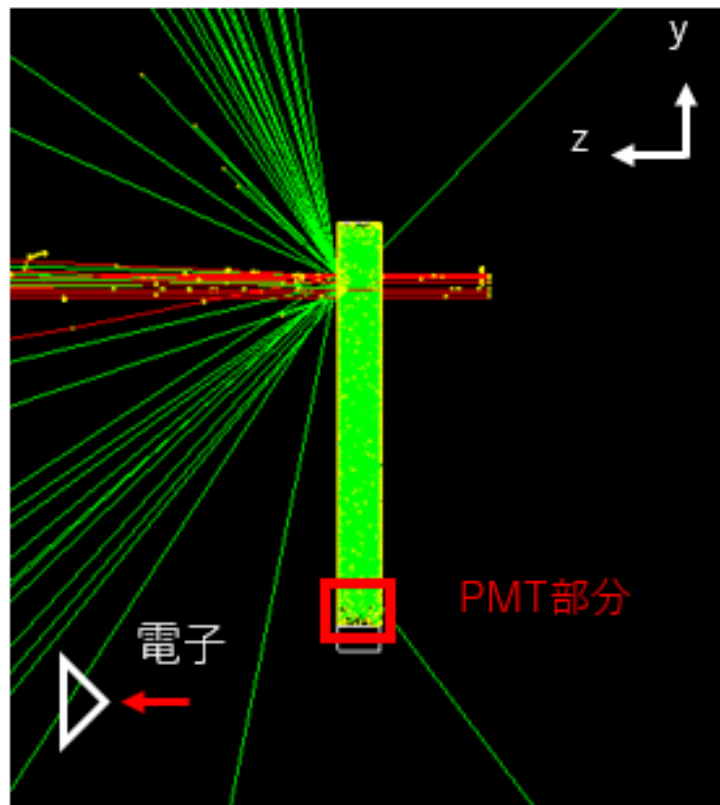


図 7.7: 電子を照射した時のチェレンコフ光の様子.

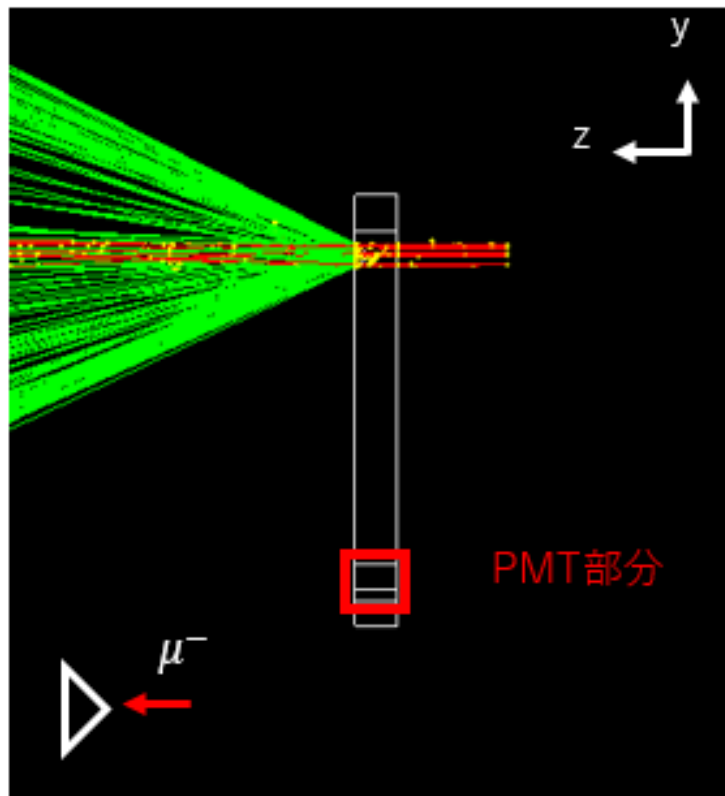


図 7.8:  $\mu^-$  を照射した時のチェレンコフ光の様子.

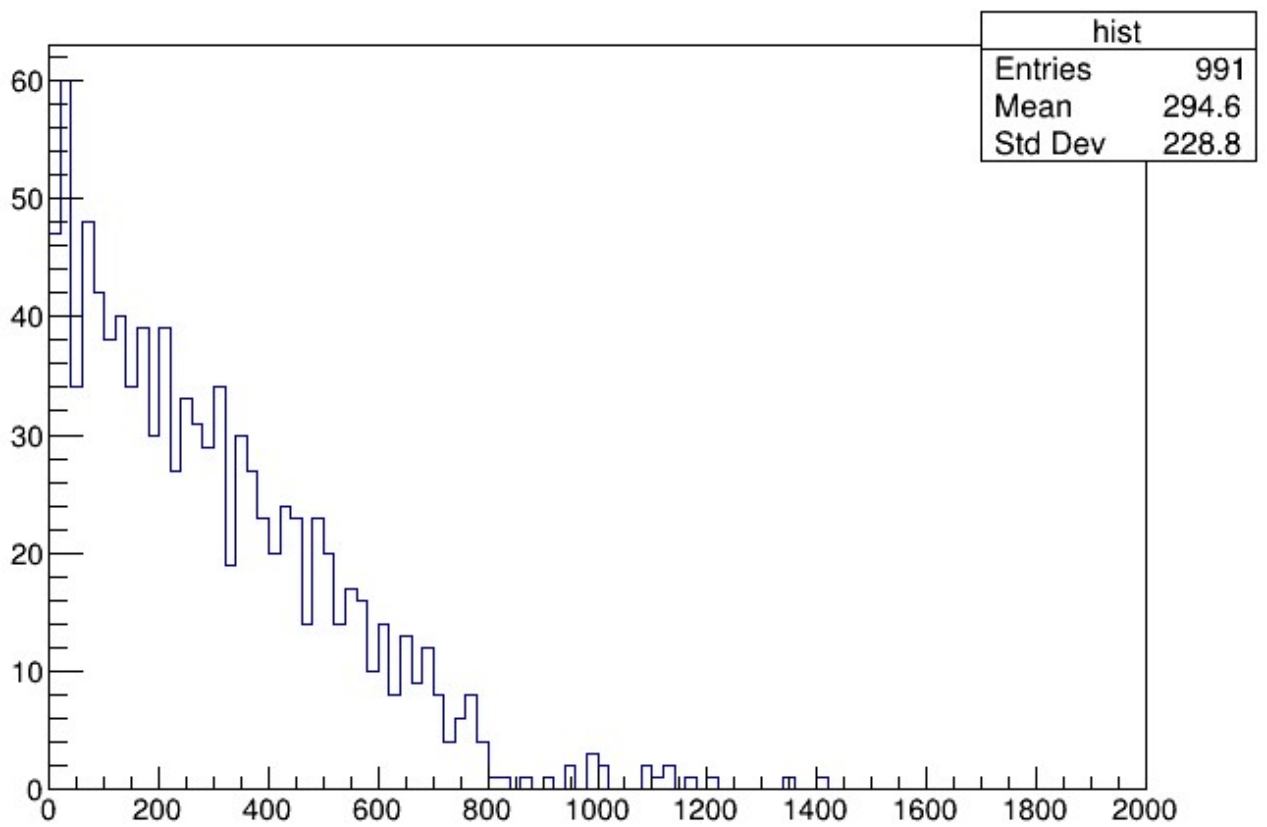


図 7.9: 電子 1 イベントあたりに発生したチェレンコフ光の数.

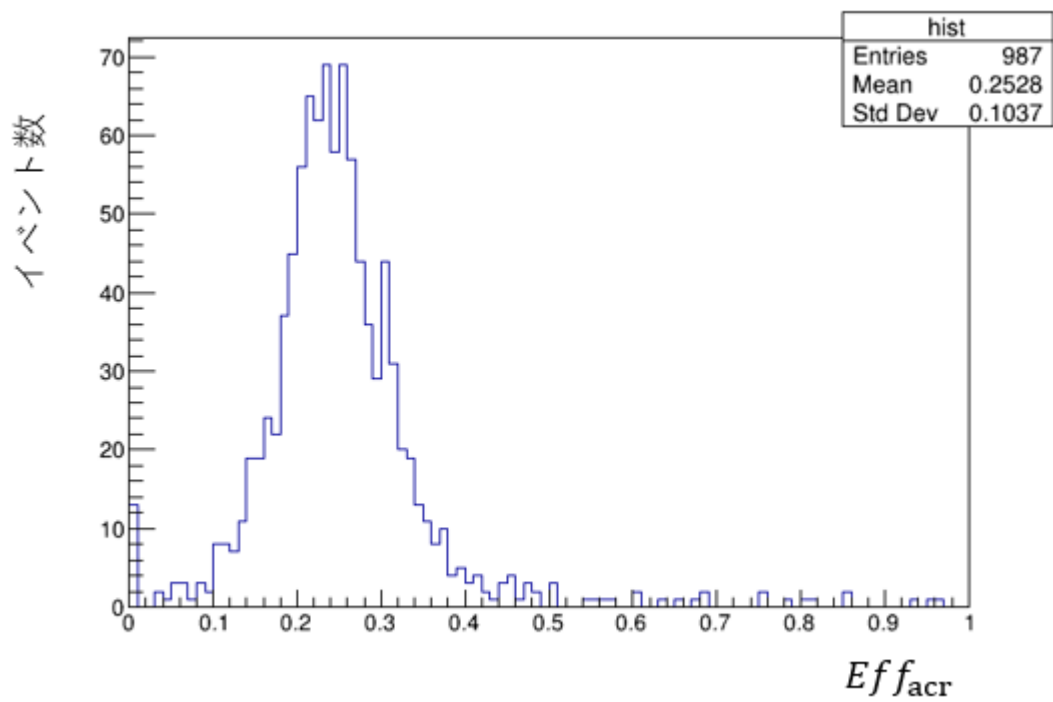


図 7.10: アクリルの効率.

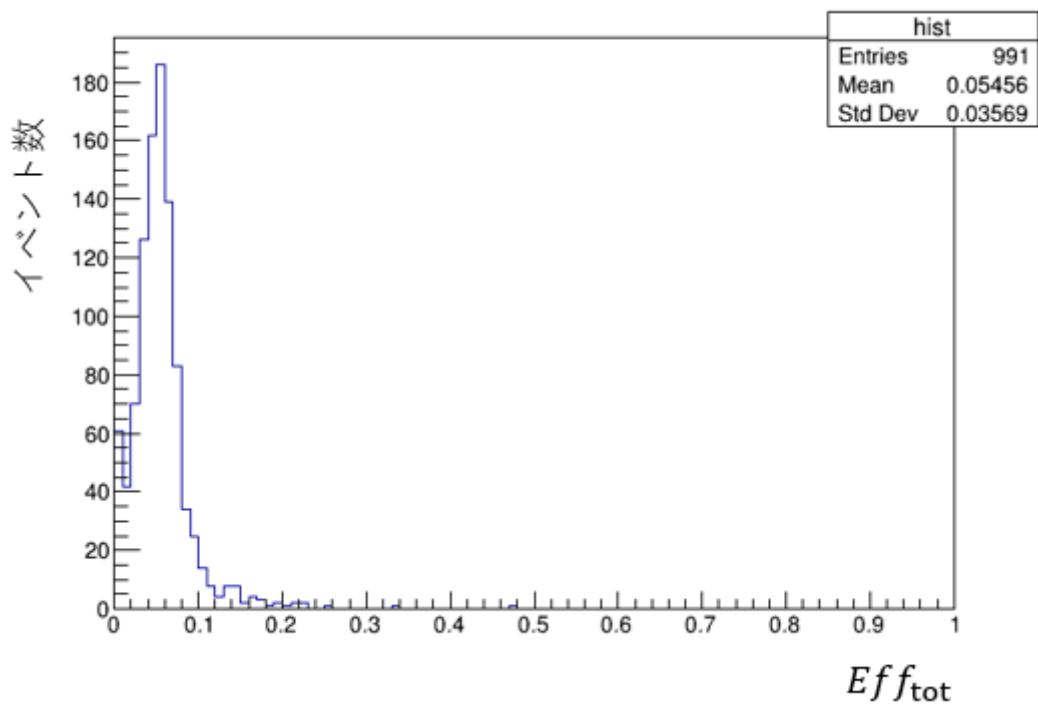


図 7.11: 全体の効率.

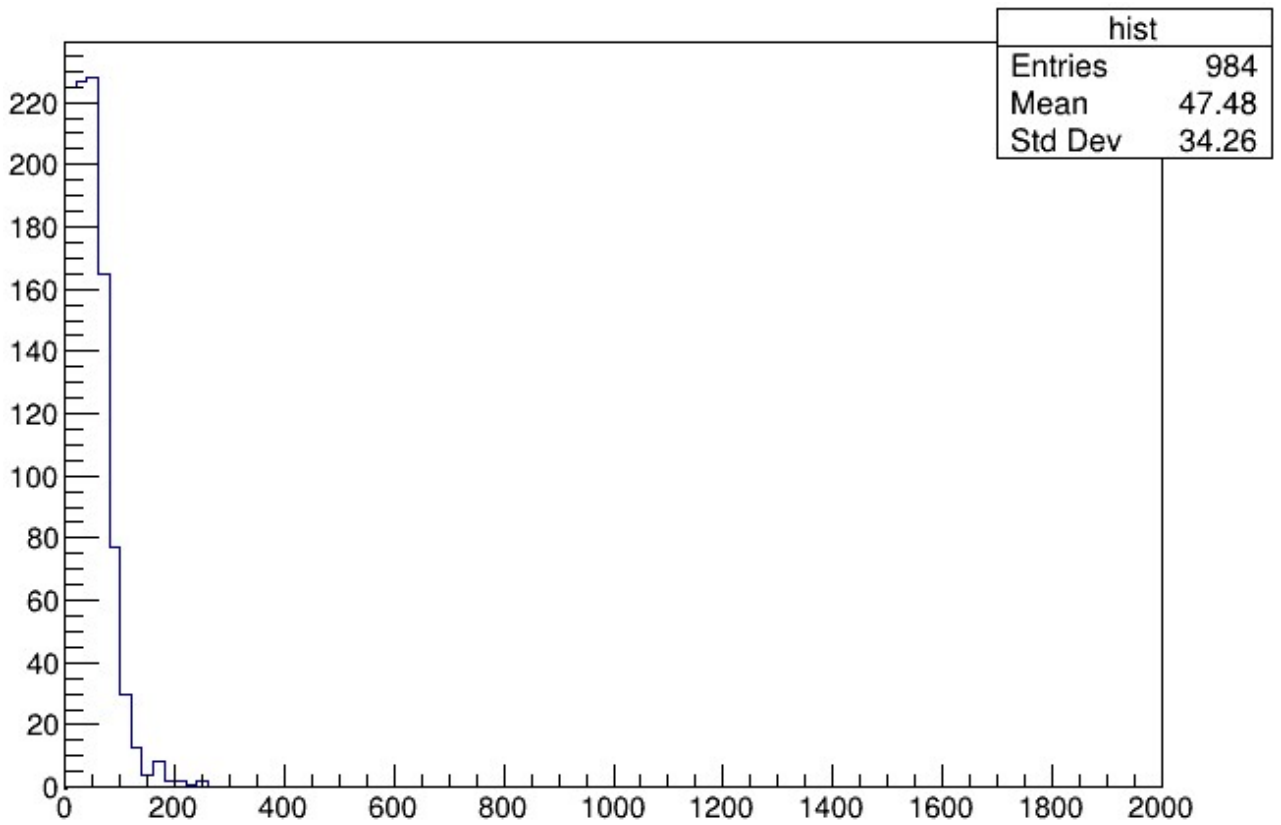


図 7.12:  $\mu^-$  1 イベントあたりに発生したチェレンコフ光の数.

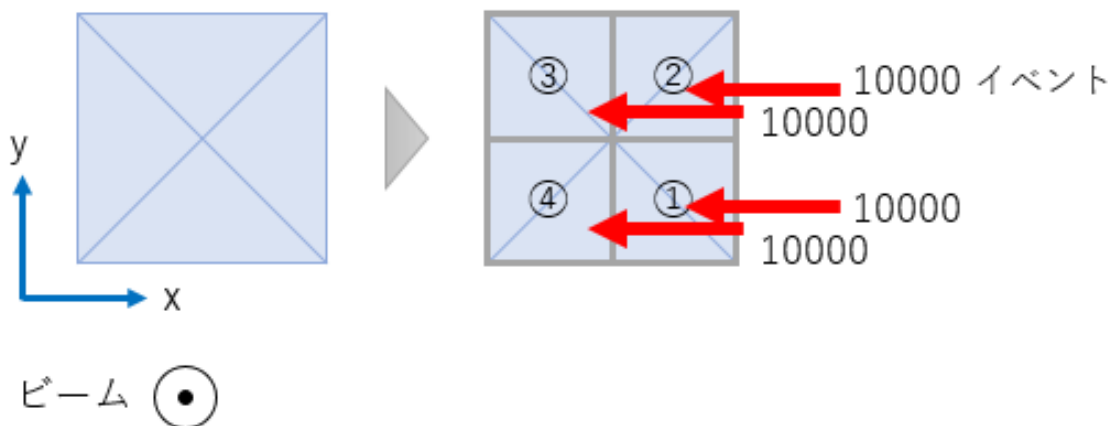


図 7.13: 4 区画に分割したアクリル.

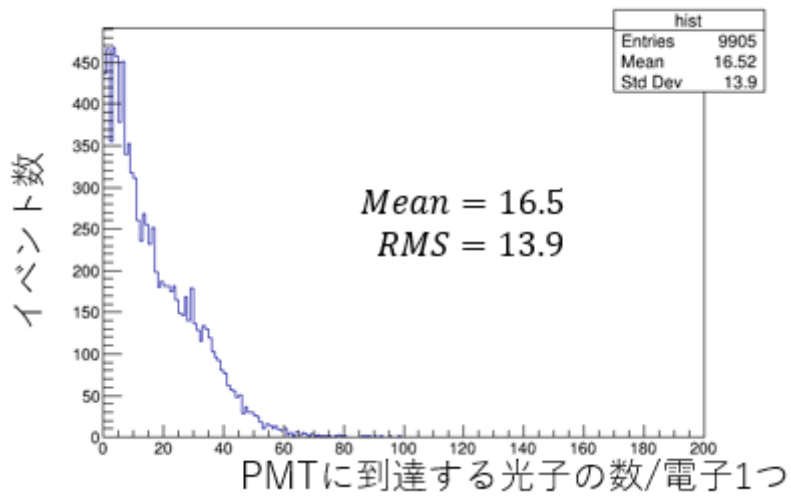


図 7.14: 区画①の例.

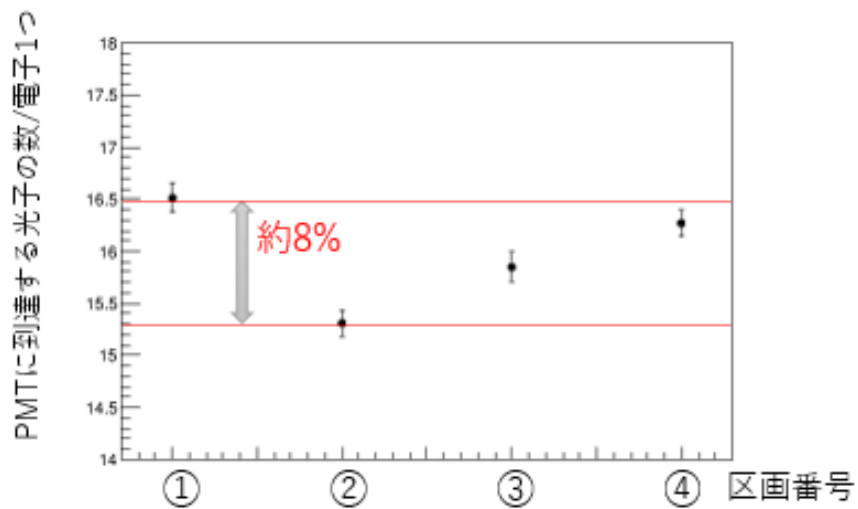


図 7.15: 応答の位置依存性.

## 8 チェレンコフ検出器作成

2020年11月に行われるビーム試験に向け、チェレンコフ検出器の作成を行った。

### 8.1 アクリル

前章よりアクリルの形状は20 mm × 20 mm、高さ10 mmの四角錐と決まった。アクリルの作成はアクリ屋ドットコム(株式会社さくら樹脂)に依頼した。完成品が図8.1である。

### 8.2 ライトガイド

ライトガイドの作成は大阪市立大学工作技術センターに依頼した。完成品が図8.2～8.4である。ライトガイドの内壁は光を反射させるため高光沢のアルミニウムを用いる。しかしアルミニウムをミラーとして用いる際は、酸化による反射率の低下を防ぐために表面にコーティングを行う必要がある。コーティング剤にはSiO<sub>2</sub>やMgF<sub>2</sub>などが用いられるが、このコーティング剤からチェレンコフ光が発生する恐れがあるため使用できない。これらの問題を解決するためにアルミニウムの平板を用いる。平板であれば酸化しても何度でも貼り替えることが可能である。また平板を貼るための接着材はアルミチャンネルと平板の間に挟まれるのでチェレンコフ光が発生したとしても信号にはならない。アルミニウムの平板には東洋アルミニウム株式会社のLUXAL<sup>®</sup>(ラクサル<sup>®</sup>)を用いる。ライトガイドに平板を貼ったものが図8.5・8.6である。なお、接着材にはニチバン株式会社の両面テープを用いた。

### 8.3 光吸収用ボックス

アクリルの背面部分には窓から出たチェレンコフ光がライトガイド内に戻ってこないように光吸収用のボックスを設置する。ダンボールで箱を作成し、内壁は株式会社カンペハピオの黒色水性シリコンカラスプレー(以下、黒色スプレー)で塗装した。箱型にした理由は、黒色スプレーの光吸収率や反射率等のデータがないためである。光吸収率が不明であるため、内壁で反射することを考慮し、複数回内壁に当たる可能性のある箱型とした。これにより窓から出たチェレンコフ光を吸収する。箱の外壁には遮光シートを貼り、外部からの光を遮断する。光吸収用ボックス作成の様子を図8.7～8.9に示す。





図 8.1: 四角錐の亚克力.



図 8.2: ライトガイド (全体).



図 8.3: ライトガイド (アクリル設置部分).

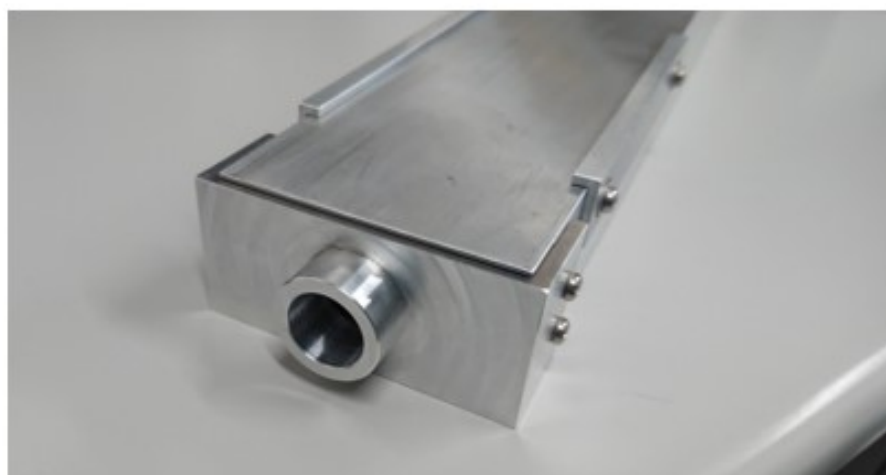


図 8.4: ライトガイド (PMT 部分).



図 8.5: ライトガイド内壁のアルミ平板 (アクリル設置部分).



図 8.6: ライトガイド内壁のアルミ平板 (中の様子).



図 8.7: 黒く塗装した箱.



図 8.8: 背面に取り付けた光吸収ボックス.



図 8.9: 光吸収ボックスの完成.

## 9 ビームを用いた性能評価

2020年11月に京都大学複合原子力研究所の電子線型加速器を使用し、チェレンコフ検出器の性能評価を行った。測定は、位置依存性、HV依存性、ビーム強度依存性、S/N比の4種類行った。

### 9.1 セットアップ

図9.1は、チェレンコフ検出器の信号取得の流れを示したブロック図である。図中のFADC(500MHz, 8bit)とはサンプリング周波数500MHz, 8bitのFADCであり、6章で述べたFADCとは別である。本修士論文ではCOMmon Pipelined Platform for Electronics Readout(COPPER)と呼ぶこととする。また、チェレンコフ検出器は図9.2のように設置した。チェレンコフ検出器をビーム上流から見ると図9.3のようにになっている。アクリルは反時計回りに30°傾いている。チェレンコフ検出器を実際に設置した写真を図9.4・9.5に示す。

### 9.2 各測定の設定

各測定の設定を表9.1にまとめた。ここで、照射位置の水平-鉛直方向の座標の定義は図9.6となっている。

表 9.1: 各測定の設定。

測定項目	ビーム強度 [electron/pulse]	HV [V]	照射位置
位置依存性	$\sim 10^4$	-1000	水平位置 [mm]: -24 ~ +24 鉛直位置 [mm]: -12 ~ +26
HV 依存性	$\sim 7 \times 10^6$	-1000 ~ 0	アクリルの中心
ビーム強度依存性	$3.67 \times 10^3 \sim 7.53 \times 10^6$ $6.23 \times 10^2 \sim 2.02 \times 10^7$	-700 -1000	アクリルの中心
S/N 比	$\sim 10^4$	-1000	アクリルの中心 (アクリルなし)

## 9.3 結果

### 9.3.1 位置依存性

水平方向の位置依存性のプロットを図 9.7 に、鉛直方向の位置依存性のプロットを図 9.8 に示す。図 9.7 を見ると、水平照射位置が負よりも正の方が Response が大きいことが分かる。これはビーム上流から見て右側に（すなわち水平照射位置の正の方向に）PMT があるためである。また、図 9.8 を見ると、鉛直照射位置が正より負の方が Response が大きい。これはアクリルが 30° 傾いていることが原因だと思われる。鉛直方向の -12 mm 以下のデータが存在しない理由は、ラボジャッキの高さの限界で測定不可能だったためである。なお、図 9.7・9.8 の両プロットの照射位置 0 mm で 4 点の Response プロットされているが、Response が 0 ADC count (厳密には 1.2 ADC count) の点は、ビームを照射していない時のデータで、ペDESTALを確認した。他の 3 点は、0 mm から正方向へ、0 mm から負方向へ、最後にもう一度 0 mm の Response を取得するという測定手順により、再現性を確認したためである。

### 9.3.2 ビーム強度依存性

ビーム強度依存性のプロットを図 9.9 に示す。また、ビーム強度で規格化した検出器応答のビーム強度依存性のプロットを作成すると図 9.10 となる。この図から -700 V ではビーム強度が  $10^5$  electron/pulse 付近で、-1000 V では  $10^4$  electron/pulse 付近で Response が飽和していると分かる。H-Line のビーム強度は  $\sim 10^7$  electron/pulse 付近であるため、さらに HV を下げるか、ND フィルター等を用いて減光する必要がある。

### 9.3.3 HV 依存性

HV 依存性のプロットを図 9.11 に示す。9.3.2 節ビーム強度依存性でも述べたように、-1000 V とした比較的高い電圧では、 $10^4$  electron/pulse 付近のビーム強度で飽和するため、より大きなビーム強度で動作させるには HV を下げる必要がある。しかし HV を下げすぎると PMT の動作が不安定になる恐れがある。従って、PMT のベンチテストを行い、動作に適した HV を知る必要がある。今回のビーム試験により、PMT の応答とビーム強度の関係が得られたので、各電圧で PMT の線形性が保たれるビーム強度の範囲を調べるのが今後の課題となる。

### 9.3.4 S/N 比

アクリルを設置しなかった際のデータを取得した。アクリルが設置されていないので、この Response はノイズ (N) と言え、その値は式 (9.1) である。

$$N = 101.2 \pm 1.5 \text{ ADC count} \quad (9.1)$$

S/N 比を計算するには、同じ設定 (ビーム強度 :  $6.51 \times 10^4$ , HV : -1000 V, 照射位置 : アクリルの中心) で、アクリルを設置した時の Response を推定する必要がある。図 9.12 に示したように、 $6.5 \times 10^4$  electron/pulse のビーム強度で、-1000 V ではすでに Response は飽和しているが、飽和しなかった場合の Response を推定することも可能である。線形が保たれ飽和していない場合、-1000 V での  $10^3 \sim 10^4$  electron/pulse 付近のプロットのように Response/Intensity は一定の値をとる。 $10^4$  electron/pulse 以下の 6 点を用いて平均値を求めると  $0.49 \pm 0.01$  となる。これに  $6.5 \times 10^4$  electron/pulse をかけることで Response を推定することができる (式 (9.2))。これにはノイズも含まれているため差し引くと、チェレンコフ検出器からの信号のみの Response (S) が得られる (式 (9.3))。

$$\begin{aligned} \text{Response} &= (0.49 \pm 0.01) \times (6.5 \times 10^4) \\ &= (3.19 \pm 0.07) \times 10^4 \text{ ADC count} \end{aligned} \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} S &= (3.19 \pm 0.07) \times 10^4 - (101.2 \pm 1.5) \\ &= (3.18 \pm 0.07) \times 10^4 \text{ ADC count} \end{aligned} \quad (9.3)$$

N と S の比から、信号に比べてノイズが約 0.3% 存在することが分かった。ノイズの原因は不明で今後明らかにする必要がある。



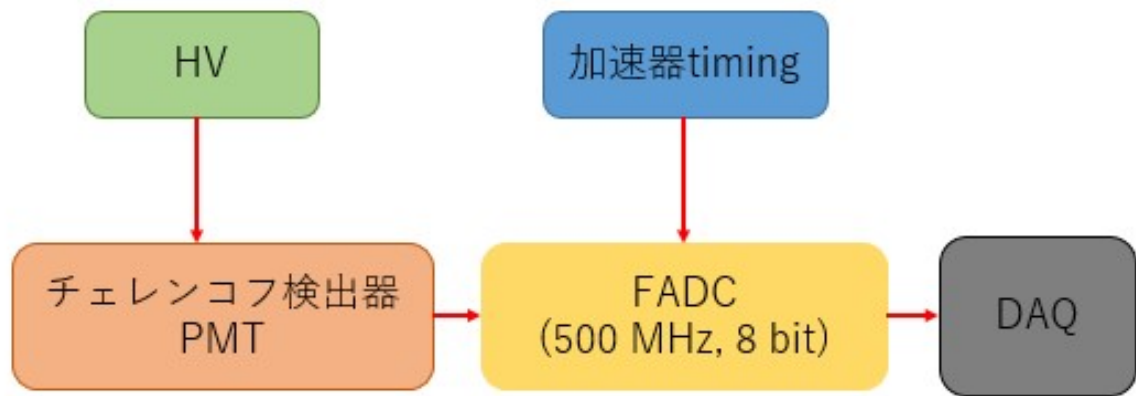


図 9.1: 実験の DAQ セットアップ.

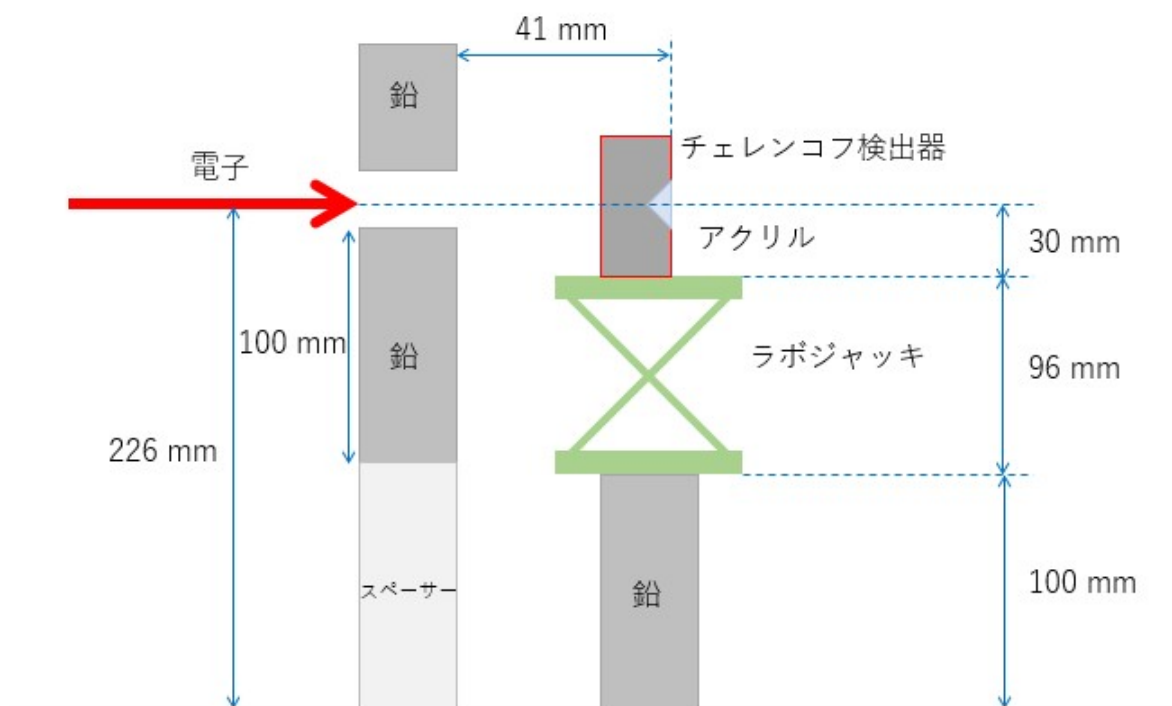


図 9.2: チェレンコフ検出器の位置.

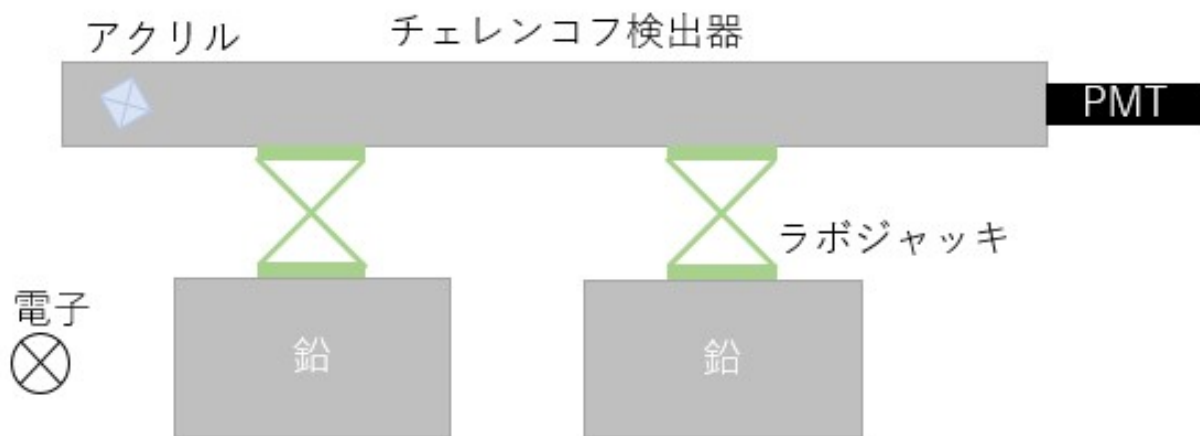


図 9.3: ビーム上流から見たチェレンコフ検出器.

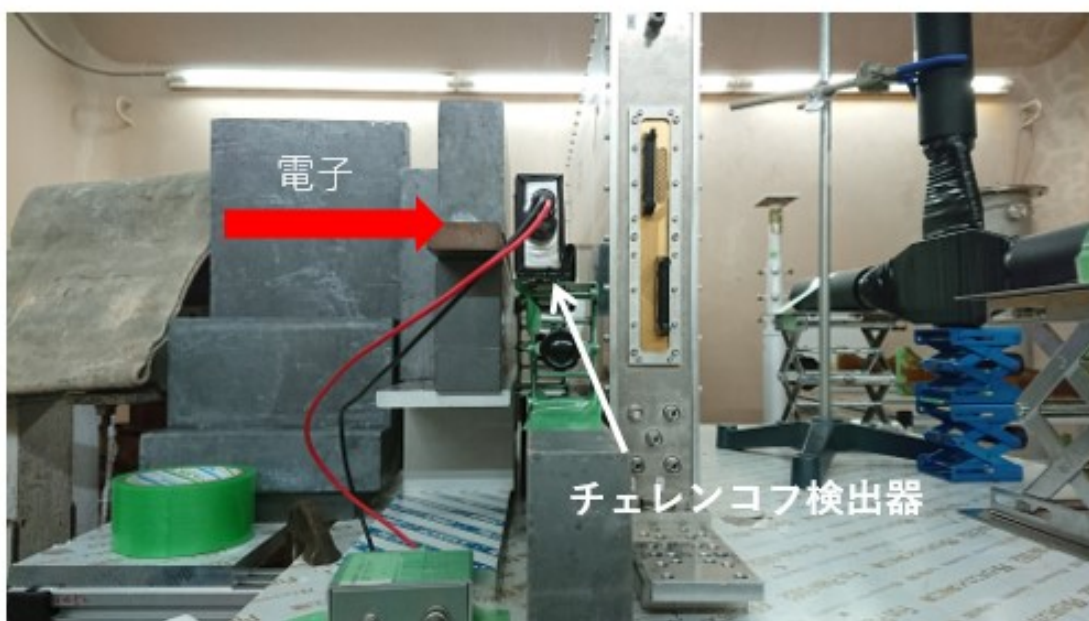


図 9.4: チェレンコフ検出器設置の様子 (横から).

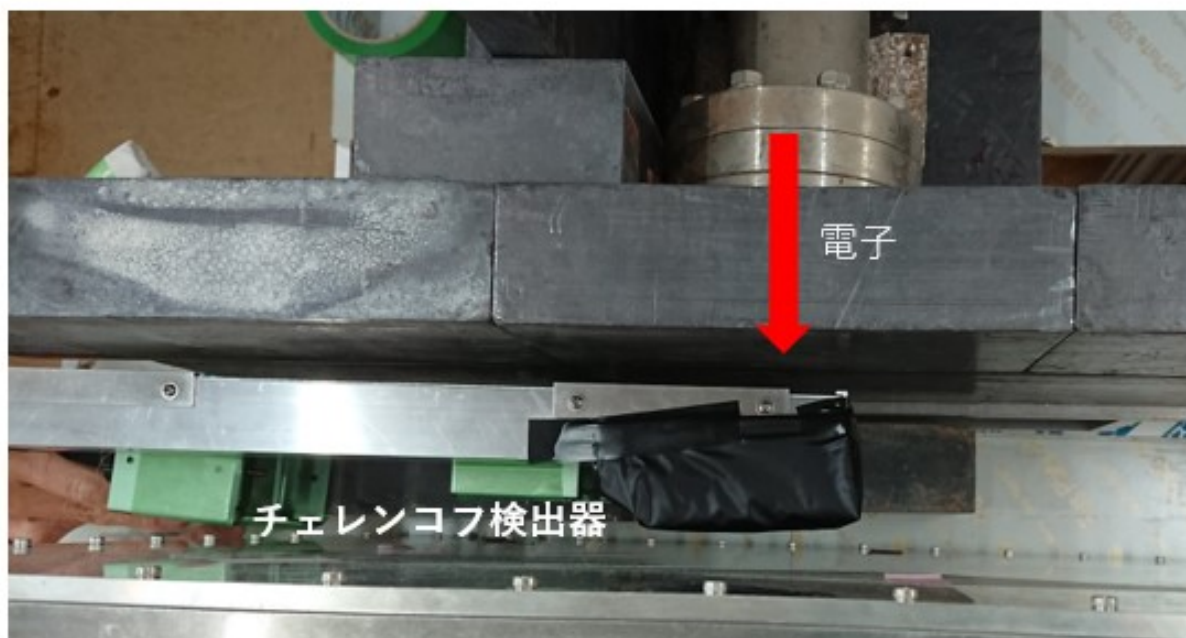


図 9.5: チェレンコフ検出器設置の様子 (上から).

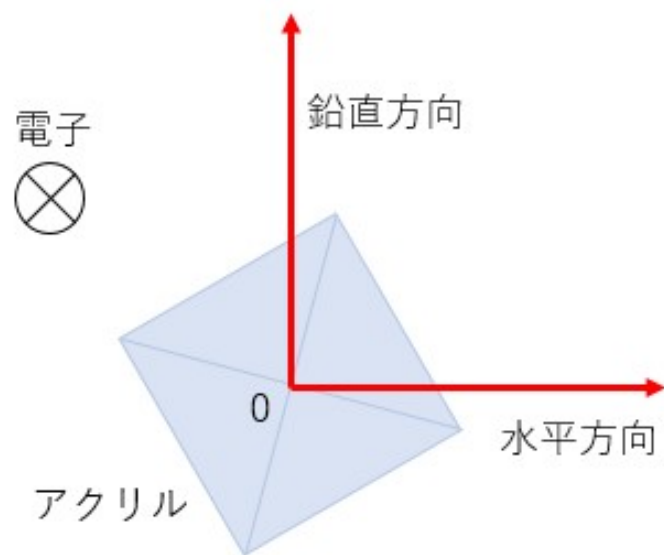


図 9.6: 照射位置の定義.

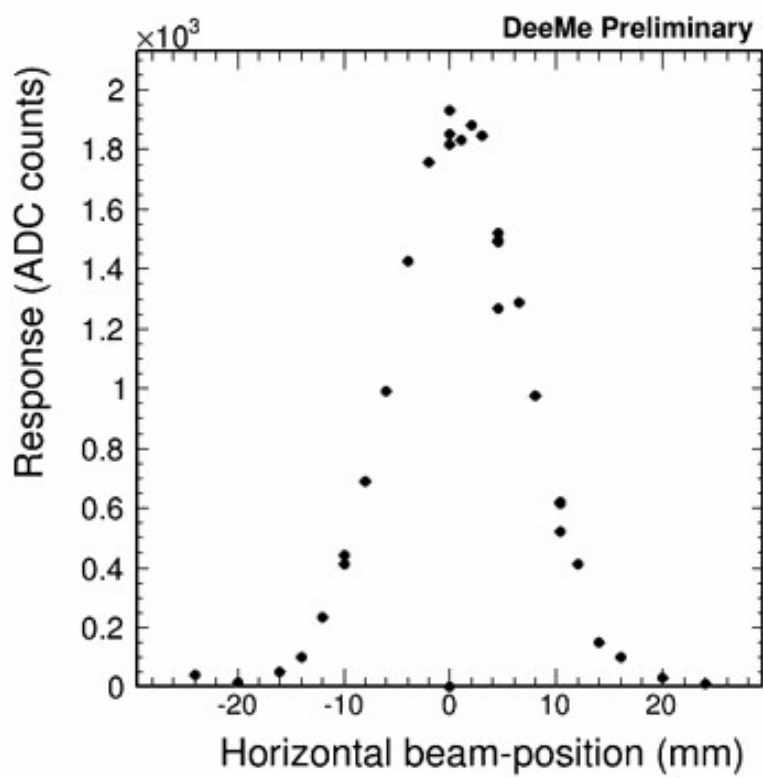


図 9.7: 水平方向の位置依存性.

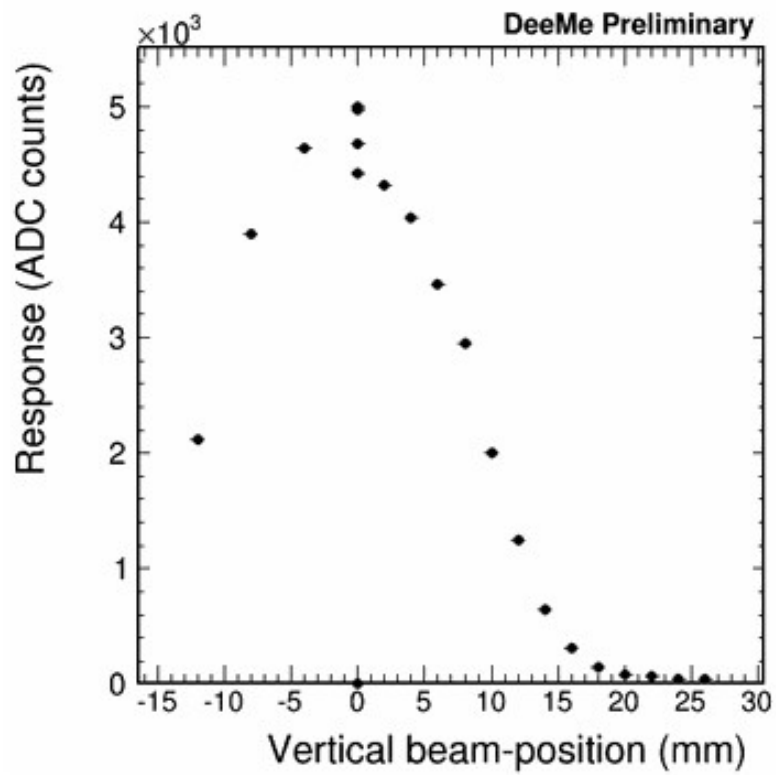


図 9.8: 鉛直方向の位置依存性.

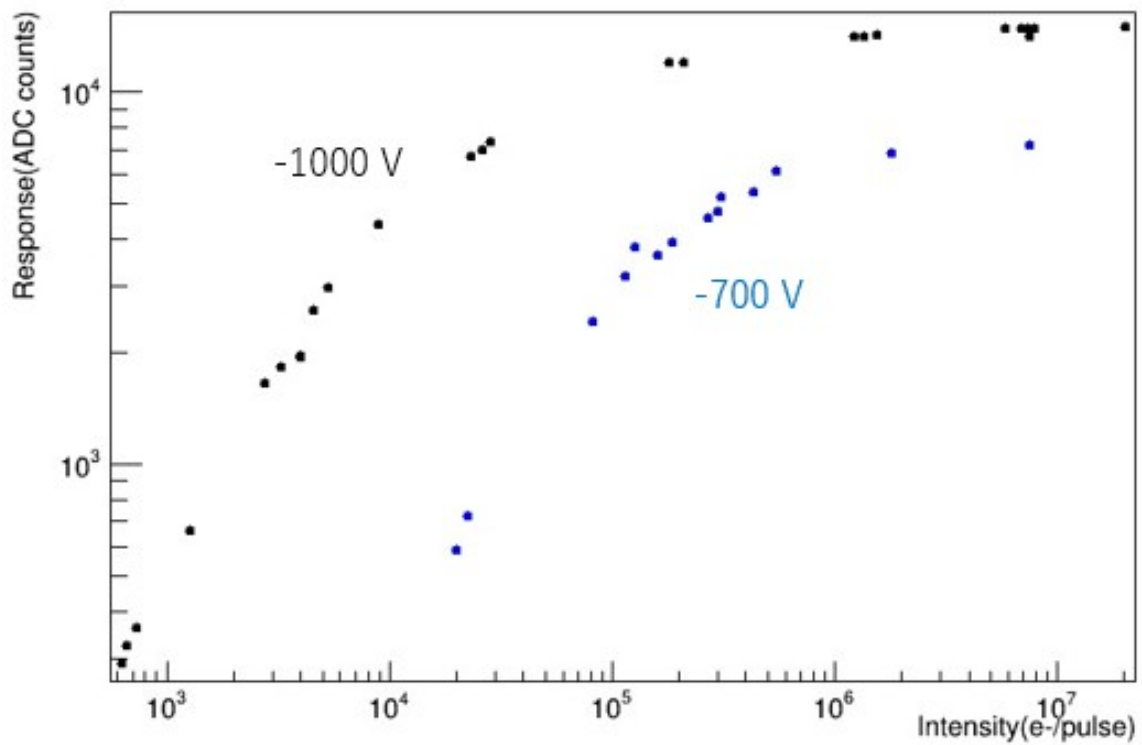


図 9.9: ビーム強度依存性.

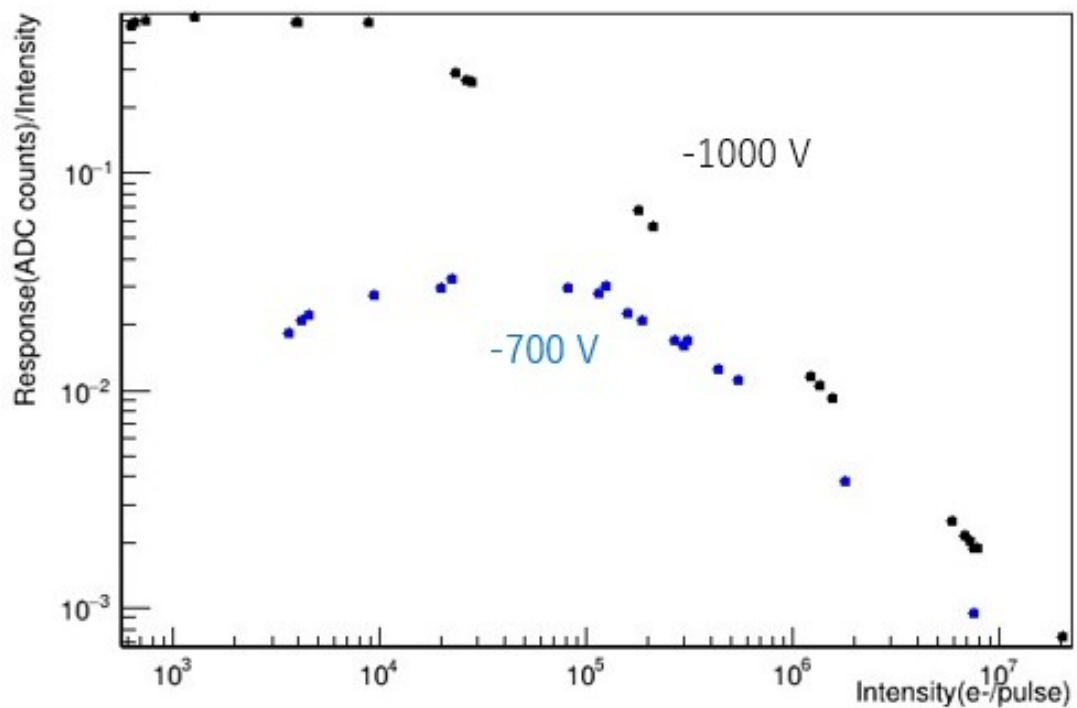


図 9.10: ビーム強度で規格化した検出器応答のビーム強度依存性.

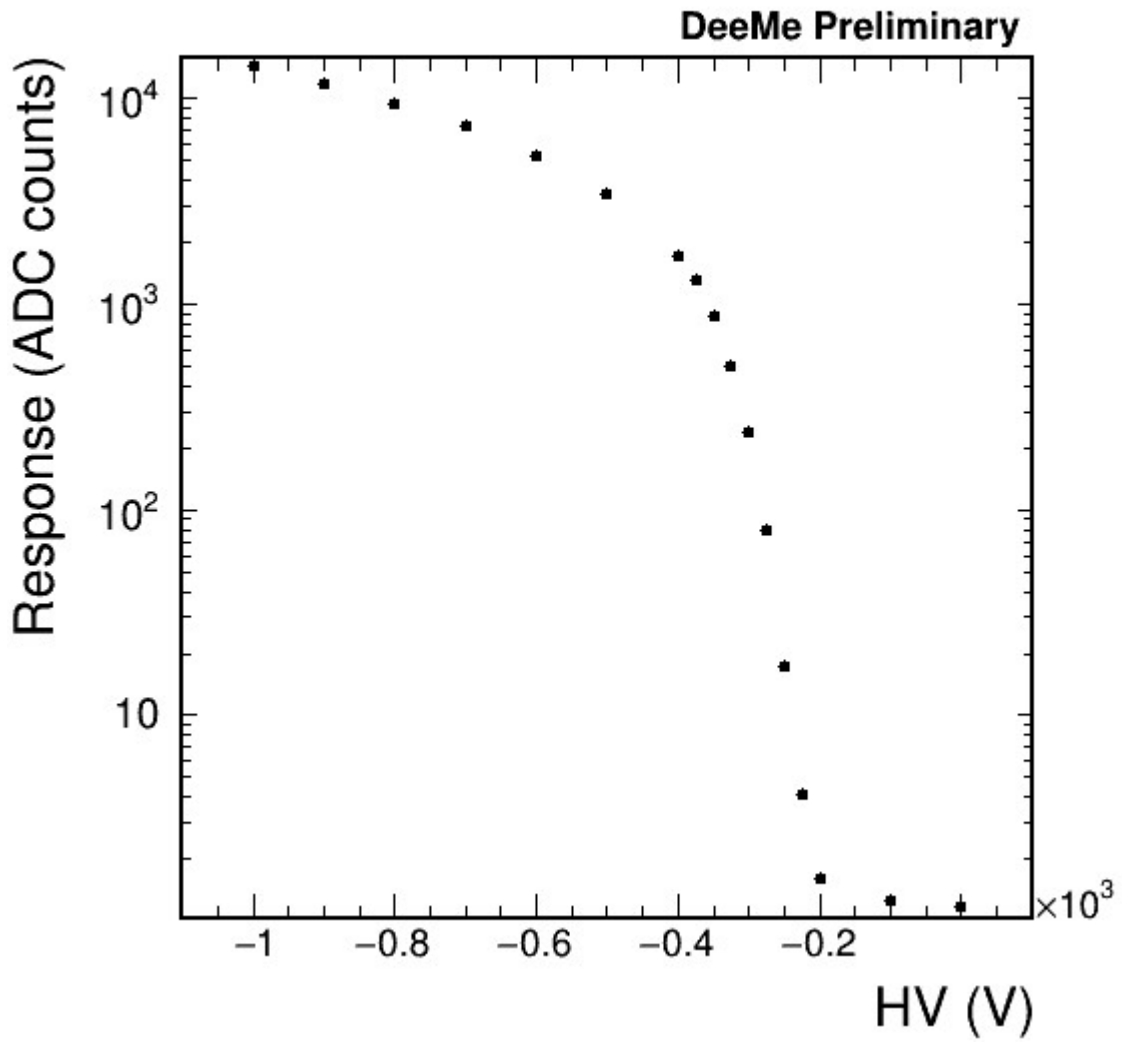


图 9.11: HV 依存性.



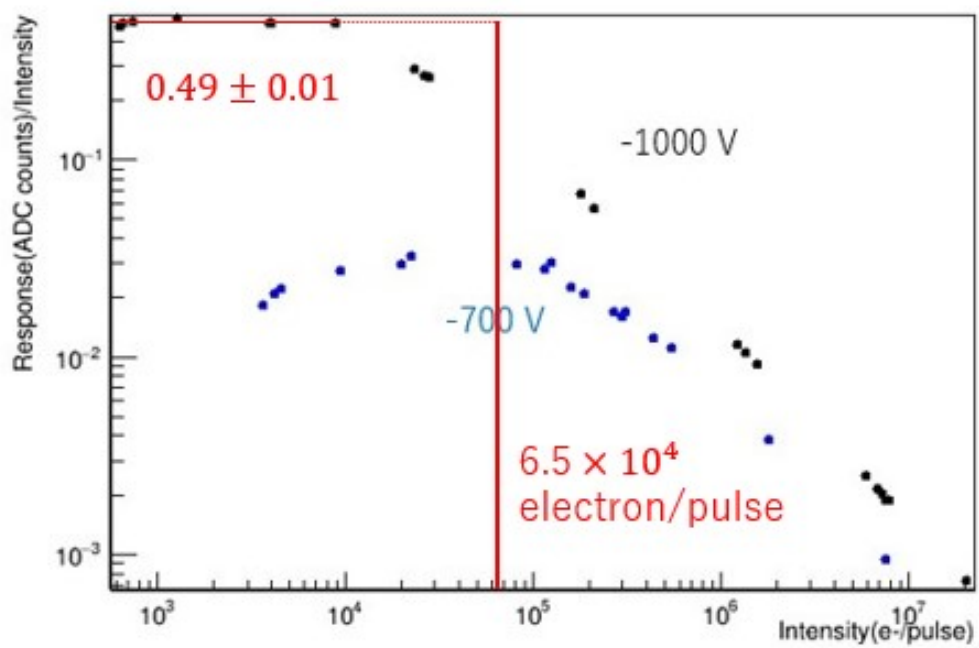


図 9.12:  $-1000\text{ V}$ ,  $6.5 \times 10^4$  electron/pulse での Response の推定.

## 10 結論

DeeMe 実験は cLFV 過程の一つであるミューオン・電子転換過程を、現在の実験による分岐比の上限を改善し、 $10^{-14}$  の単一事象感度で探索する実験である。H-Line の完成に向けビームプロファイルモニタの開発を進めている。

ビームプロファイルモニタに用いる 2 軸ロボットの動作試験を 2019 年に行った。RPB プログラミングボックスと Tera Term で通信パラメータの設定を行うことができた。また、Tera Term と RPB プログラミングによるコマンド送信・受信も成功した。

プラスチックシンチレーターを用いた場合の、 $28 \text{ MeV}/c$  の陽電子と  $\mu^+$ 、 $105 \text{ MeV}/c$  の電子と  $\mu^-$  のテンプレート波形を作成した。その波形からビームプロファイルをスキャンするために必要なサンプリング周波数が  $20 \text{ MHz}$  以上であると決定した。要請を満たす FADC を選定した。

プラスチックシンチレーターでは、 $105 \text{ MeV}/c$  の電子と  $\mu^-$  が分離できないため、新たにチェレンコフ検出器を開発した。チェレンコフ検出器の輻射体はアクリルを用いる。アクリルの形状は Geant4 によるシミュレーションにより、底面が  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、高さが  $10 \text{ mm}$  の四角錐と決定した。電子を  $8000$  イベント、 $\mu^-$  を  $500$  イベント照射するシミュレーションを  $10$  セット行った結果、電子由来のチェレンコフ光に対する  $\mu^-$  由来のチェレンコフ光の割合は  $(0.096 \pm 0.006)\%$  と求まった。

四角錐のアクリルを用いた場合について、Geant4 で性能評価を行った。検出器の全体の効率も電子で  $(5.5 \pm 0.1)\%$ 、 $\mu^-$  で  $(0.31 \pm 0.04)\%$  となった。位置依存性については電子でのみシミュレーションを行い、照射位置により最大約  $8\%$  の応答差があるという結果になった。

2020 年 11 月に京都大学複合原子力研究所でビーム試験を行った。電子に対する信号が確認でき、位置依存性、HV 依存性、ビーム強度依存性、S/N 比のデータを取得した。PMT から見てアクリルが非対称になっているため、位置依存性も非対称となった。傾ける角度を  $30^\circ$  から  $45^\circ$  にすると対称なプロットが得られると推測される。HV 依存性については PMT の性能評価が今後の課題となる。ビーム強度依存性のプロットから、 $-700 \text{ V}$  ではビーム強度が  $10^5 \text{ electron/pulse}$  付近で、 $-1000 \text{ V}$  では  $10^4 \text{ electron/pulse}$  付近で Response が飽和することが分かった。H-Line でビームチューニングする際はさらに  $2 \sim 3$  桁多く照射されるため、印加電圧をより低くするか、チェレンコフ光を抑制する必要がある。S/N 比のデータから、チェレンコフ光の信号に対して約  $0.3\%$  のノイズが存在することが分かった。ノイズの原因は不明で、究明する必要がある。

## 謝辞

本修士論文の執筆にあたり、多くの方々のお力添えを頂きました。ここに感謝の意を述べたいと思います。

清矢 良浩教授には本研究について多くの助言をいただきました。お忙しい中でも、私の質問に対し丁寧に答えてくださいました。研究以外におきましても、様々なアドバイスを教壇いただきました。私の大学院生活が大変豊かなものになりました。これからは清矢教授からいただいたものを忘れることなく、日々精進していきたいと思います。本当にありがとうございました。山本 和弘准教授にはミーティングや授業で多くのことを学ばせていただきました。また、研究室のコンピュータ環境でも大変お世話になりました。pukiwiki や plone の復活など、深く感謝しています。豊田 博俊氏には研究に関することから政治経済に至るまで、ありとあらゆることを教えていただきました。いつも気さくに話しかけていただきありがとうございました。手島 菜月特任助教には何度もお力を貸していただきました。東海二号館、ビーム試験中、いつも優しく丁寧に教えていただいたこと大変感謝しています。

大阪大学の青木 正治准教授には、本研究を進める指針を示していただきました。修士課程の2年間とてもお世話になり、貴重な経験をさせていただきました。大変感謝しています。大阪大学の長尾 大樹氏には2019年 MLF でのビームタイムで大変お世話になりました。測量をご一緒させていただいたこと、今でも覚えています。初めてだった私に丁寧に教えていただきありがとうございました。同じく大阪大学の東野 祐太氏は DeeMe の同期として本当に感謝しています。池内氏と自転車をこいでホームセンターまでドリルを買いに行ったこと、忘れません。本実験の共同研究者の皆様には、様々な場面で大変お世話になりました。実験グループの方々の研究に対する姿勢・考え方は大変勉強になりました。

本学高エネルギー物理学研究室の方々には大変感謝しています。吉中 晴香先輩には私が初めて J-PARC MLF に訪れた際、実験のことから施設のことまで丁寧に教えてくださいました。高橋 拓也先輩にはビーム試験の際に検出器のことや実験内容のことなど DeeMe に関する様々なことを教えていただきました。足立 真尋先輩には実験器具の使い方などを教えていただきました。金 賢一博士、久木田 直哉先輩、田中 慎也先輩は私が困っている時に一緒に考えてくださったり、意見をいただいたり、大変助かりました。池内 響輝氏、小幡 拓也氏、本條 貴司氏には同じ研究室で過ごした仲間として心から感謝しています。分からないことを議論したり、雑談したり、私の大学院生活を大変楽しいものとしていただきました。ありがとうございました。

最後に私の支えとなってくださった家族と友人の皆様には、心から感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 青木正治, 「J-PARC RCS からのパルス陽子ビームを活用したミューオン・電子転換過程探索実験 (DeeMe)」, 高エネルギーニュース Volume31 Number3, pp.228-237, (2012).
- [2] Gianluca Cavoto, "Searching for the  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$  decay with MEG and MEG- II", arXiv:1407.8327 (2014).
- [3] U.Bellgardt et al. (SINDRUM collaboration), "Search for the decay  $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ ", Nucl.Phys. B299, 1 (1988).
- [4] W. Betrl et al. (SINDRUM collaboration), "A Search for muon to electron conversion in muonic gold", Euro. Phys, Vol. 31, No. C47, pp. 337-346 (2006).
- [5] C. Dohmen et al. (SINDRUM collaboration), "Test of lepton- avour conservation in  $\mu - e$  conversion on titanium", Phys. Lett. B317, 631 (1933).
- [6] K. Hayasaka, "Tau lepton physics at Belle", Nucl. Phys. B299, 1 (1988).
- [7] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) Z. Phys. C 73, 243 (1997).
- [8] D. Ambrose et al. (BNL E871 Collaboration), "New Limit on Muon and Electron Lepton Number Violation from  $K_L^0 \rightarrow \mu^{pm}e^{mp}$  Decay", Phys. Rev. Lett. 81, 5734 (1988).
- [9] CLARK, Allan Geoffrey, et al. (CDF Collaboration) "Search for the Decays  $B_S^0 \rightarrow e^+\mu^-$  and  $B_S^0 \rightarrow e^+e^-$  in CDF Run II" Phys. Rev. Lett. 102.201801 (2010).
- [10] A. Czarnecki, X.G. Tormo, W.J. Marciano, "Muon decay in orbit spectra for  $\mu^- - e$  conversion experiments", Hyperfine Interact.210, 19-23 (2012).
- [11] 清水宏祐, 「ミュー粒子・電子転換過程探索実験 DeeMe におけるアフタープロトン背景事象および単一事象感度の評価」, 大阪市立大学理学研究科高エネルギー物理学研究室 修士論文 (2015).
- [12] 「J-PARC 大強度陽子加速器施設」  
<https://j-parc/ja/jparc.html>
- [13] 青木正治, 「RCS からのパルス陽子ビームを活用したミューオン電子転換過程の探索実験」, ミューオン共同利用 S1/S2 型実験課題平成 28 年度研究計画書.
- [14] 「Geant4」  
<https://geant4.web.cern.ch/>
- [15] 「G4beamline」  
<http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline>

- [16] E. Fermi and E. Teller, "The Capture of Negative Mesotrons in Matter", Phys. Rev. 72, 399 (1947).
- [17] 「環境・エネルギーシステム材料研究機構 — 教育・研究 — センター等 — 国立大学法人 室蘭工業大学」  
[https://www.muroran-it.ac.jp/academic/research/ed\\_re/oasis.html](https://www.muroran-it.ac.jp/academic/research/ed_re/oasis.html)
- [18] Y.Nakatsugawa, "Search for muon to electron conversion at J-PARC MLF:Recent status on DeeMe" , PoS NUFACT2014 (2015) 093.
- [19] 「g-2 - Experimental Particle Physics, Kyushu University」  
<http://epp.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php?g-2>
- [20] 「Laboratory for Particle Properties」  
<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp/research/museum.html>
- [21] 森本史明, 「ミューオン・電子転換過程探索実験 DeeM における単一事象感度およびミューオン decay-in-orbit バックグラウンドの評価」, 大阪市立大学理学研究科高エネルギー物理学研究室 修士論文 (2018).
- [22] 「Untitled-Hamamatsu」  
[http://www.hamamatsu.com/sp/hq/mktg-LP/201707\\_pmt/PDF/PMT\\_handbook\\_v4J.pdf](http://www.hamamatsu.com/sp/hq/mktg-LP/201707_pmt/PDF/PMT_handbook_v4J.pdf)
- [23] 「Tera Term Open Source Project」  
<http://ttssh2.osdn.jp/>
- [24] 「NIST estar」  
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [25] 「AtomicNuclearProperties」  
<https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/index.html>
- [26] 青木正治, 「105 MeV/c 電子に対する H1 エリアの遮蔽について」
- [27] 「ATS850 - 8 bit, 50 MS/s - AlazarTech PCI Digitizers. PC Oscilloscope PC Scope Card and Systems」  
<https://www.alazartech.com/en/product/ats850/25/>
- [28] 「光学用樹脂「ZEONOR ゼオノア」 — 日本ゼオン — エンプラネット」  
<https://www.enplanet.com/Company/00000012/Ja/Data/p005.html>