修士論文

高エネルギー光子・電子ビーム プロファイルモニタの開発と加速器研究への応用

Development of high-energy photon and electron beam profile monitor and application to accelerator research

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻
原子核物理研究室

木野 量子

令和 4 年

概要

加速器技術の発達と、そのビームを用いた物理実験には、精細で信頼できるビーム測定が欠かせない。ビームのパラメータは、加速器の特性に直結するものであるため、ビームを高精度に測定することにより、加速器そのものに対する理解に繋がり、加速器運転時の高品質なビーム提供に役立つ。また、ビームを用いた物理実験では、ビームのプロファイルが最終的な物理結果に影響を及ぼすため、ユーザー側にとってもビームプロファイルの測定は重要である。

東北大学電子光理学研究センターの BM4 光子ビームラインでは、電子シンクロトロン BST リングによって 1.3 GeV に加速された周回電子に、ϕ 11 μm の炭素ファイバーの輻射体（ラジエータ）を挿入することで制動放射光子ビームを取り出す。この光子ビームを用いた様々な実験が展開されており、ビームプロファイルを知ることは実験を行う上で非常に重要である。中でも、近年ハイパー核物理分野で注目を集めている「ハイパートライトンパズル」解決に向けた「三重水素ラムダハイパー核直接寿命測定実験」では、標的位置における光子ビーム位置を誤差 300 μm 以下の精度で知る必要がある。しかしこれまで BM4 光子ビームラインには、物理実験で用いる標的やスペクトロメータを設置している位置で光子ビームを定量的に測定するシステムが無かった。本研究では、BM4 光子ビームラインにおいて光子ビームを高精度かつ即時的に測定するための検出器「ビームプロファイルモニタ (BPM)」の開発を行った。

BPM はプラスチックシンチレーションファイバー (kuraray SCSF-78, ϕ 0.5 mm) と SiPM(浜松ホトニクス社 MPPC S13360-1350PE) から構成される検出器である。データ収集にはストリーミング型 TDC を導入し、1 GeV 領域のエネルギーを持ち、計数率が数 10 MHz に及ぶ高強度な光子ビームの検出を可能にした。BPM は 1 秒間のプロファイリングに対して 10 μm を超える位置精度を達成した。

本研究では BPM を用いた高精度な光子ビームプロファイリングにより、加速器のパラメータ測定や BST リング中の周回電子ビーム強度分布測定も可能になった。以上の成果は今後の加速器運転とビームを用いた物理実験のどちらにも重要である。

目次

第 1 章　序論 15
1.1 各加速器施設におけるビーム測定手法 15
1.1.1 写真乾板の原理によるビームプロファイル 17
1.1.2 HSBPM による光子ビームプロファイル 18
1.2 ビーム測定の加速器研究への応用 21
1.2.1 ELPH BST リングと光子ビームライン 21
電子円形加速器（シンクロトロン） BST リング 21
ラジエータ 24
光子標識化装置 Tagger 25
BM4 光子ビームライン 27
1.2.2 BST リングにおける粒子検出器を用いた加速器研究 28
加速器の粒子分布と Twiss parameter 28
Tagger の計数率を用いた電子ビームプロファイル 33
1.3 本研究の目的 35
1.3.1 BM4 光子ビームラインにおけるビームプロファイル 35
1.3.2 BM4 光子ビームラインにおける ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験 35
ハイパートライトンパズル 36
${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験の原理とデザイン 36
1.3.3 本研究の目的 38

第 2 章　ビームプロファイルモニタ (BPM) の基本設計 41
2.1 要求性能 41
2.2 光子ビームの検出機構 42
2.2.1 荷電粒子除去のための Charged VETO カウンタ 43
2.2.2 光子コンバータ 46
2.2.3 粒子位置決定のためのファイバー層 46

2.2.4 イベント ID のための Trigger カウンタ 47
2.2.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) 49
動作原理 49
2.3 筐体デザインと組み立て 51
2.4 信号処理回路の開発 56
2.4.1 MPPC 信号読み出し回路 56
2.4.2 信号増幅回路とデジタル変換回路 59
2.5 データ収集システム 63
2.5.1 Hadron Universal Logic (HUL) と Streaming TDC (StrTDC) 63
2.5.2 データ収集系の全容 64

第 3 章 ビームプロファイルモニタ (BPM) で測定したビームプロファイル 67
3.1 BPM による光子ビームプロファイル測定実験 67
3.2 解析方法 72
3.3 光子ビームプロファイルの測定結果 74
3.3.1 エネルギー依存性 74
StrTDC の TDC 較正 74
光子ビームプロファイルのエネルギー依存性 78
3.3.2 ビーム強度依存性 80
3.3.3 スピル内時間依存性 82
3.3.4 ラジエータ位置依存性 84

第 4 章 結果の考察と加速器研究への応用 87
4.1 ビーム方向とラジエータ位置の相関 87
4.1.1 測定結果の定量的評価 89
水平方向 89
重力方向 92
4.2 光子ビームサイズについての考察 95
4.2.1 ラジエータ位置依存性 95
4.2.2 ラジエータからの距離依存性と理論的予測 100
4.3 電子ビームサイズの見積もり 106
4.3.1 HUL の総計数率から得られた電子ビームサイズ 106

第 5 章 まとめと今後の展望 109
5.1 本研究のまとめ 109
5.2 今後の展望と課題 110

付録 A　各チャンネルの利得と検出効率による影響 115

付録 B　ビームハローに関する考察 121

付録 C　光子ビームプロファイルのまとめ 123

C.1　ビームエネルギー依存性 123

C.2　ビーム強度依存性 128

C.3　スピル内時間依存性 131

C.4　ラジエータ位置依存性 135

付録 D　アクシデンタル背景事象の影響 139

参考文献 143

図目次

1.1 ワイヤースキャナモニタ 16
1.2 光子ビームプロファイルに用いてきたフィルムカメラと実際の写真 . . . 17
1.3 HSBPM の検出部分概要図 18
1.4 HSBPM の実物写真 19
1.5 典型的な光子ビームプロファイルの様子 20
1.6 ビーム位置、サイズのスピル内時間依存性 20
1.7 ELPH 第 2 実験室内の BST リングおよび光子ビームライン 22
1.8 ビーム DCCT の模式図と実際の記録 23
1.9 ラジエータの模式図 24
1.10 通常運転時のラジエータ位置 25
1.11 BM4 偏向磁石内の Tagger の配置概要図 26
1.12 BM4 光子ビームライン 27
1.13 水平方向の位相平面 29
1.14 位相空間の楕円と α の関係 30
1.15 BM5 の水平方向の位相平面 31
1.16 ビーム位置、サイズのラジエータ位置依存性 32
1.17 周回電子ビームの強度分布と減衰定数の概念図 33
1.18 計数率の減衰定数とラジエータ位置の相関 34
1.19 ${}^{3}_{\Lambda}$H 寿命測定実験原理の概念図 37
1.20 ${}^{3}_{\Lambda}$H 寿命測定実験のセットアップ 38

2.1 BPM の外観と内観 42
2.2 検出部分の概念図 43
2.3 各物質における光子の変換確率 44
2.4 俵積み構造の概念図 45
2.5 Charged VETO カウンタ 45

2.6 適切なセグメント幅と統計量の見積もり 47
2.7 x 層、y 層のファイバー固定の様子 47
2.8 トリガーカウンタの模式図 48
2.9 MPPC の構成 49
2.10 実際の BPM の MPPC の出力信号 50
2.11 BPM 筐体の図面概要 52
2.12 ファイバー固定治具 53
2.13 ファイバー・MPPC 固定用治具の概要 53
2.14 ファイバー固定の様子 54
2.15 ファイバー固定の様子 2 54
2.16 ファイバー固定の様子 3 55
2.17 BPM における信号処理回路の概要 56
2.18 MPPC 信号読み出し回路の概観 57
2.19 MPPC board の配線・配置案 57
2.20 実際の MPPC board 58
2.21 実際の Relay board 58
2.22 信号増幅回路の概要 59
2.23 ToT 法の概念図 60
2.24 β 線源を照射した時のアナログ出力信号 (緑) とデジタル出力信号 (青) . . 61
2.25 LTspice による回路シミュレーション 62
2.26 信号増幅・デジタル処理回路 62
2.27 Hadron Universal Logic 64
2.28 データ収集系の概要図 65

3.1 光子ビームプロファイル測定実験のセットアップ 68
3.2 各 BPM の設置状況 69
3.3 データ収集系の概念図 70
3.4 タイムウィンドウの評価 72
3.5 1 秒あたりの $x-y$ ヒット分布 73
3.6 フィッティングの例 73
3.7 TDC 較正前後の TagB と BPM1 の TDC 差 75
3.8 RF のイベント間の TDC 差分とフィッティング 75
3.9 TagB ch30 と BPM1 Trigger の TDC 差分のスピル内時間依存性 77
3.10 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM1 78
3.11 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM1 79

3.12 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM1 80
3.13 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM1 81
3.14 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM2 81
3.15 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM1 82
3.16 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM1 83
3.17 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM1 84
3.18 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1 85

4.1 BM4 の水平方向の位相平面 88
4.2 ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM1 89
4.3 ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM2 90
4.4 ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM3 90
4.5 測定結果と計算値の比較 91
4.6 ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM1 92
4.7 ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM2 93
4.8 ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM3 93
4.9 傾きとラジエータからの距離の相関 94
4.10 BM4 偏向磁石・ラジエータ近辺の模式図 95
4.11 光子ビームサイズ (水平方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 96
4.12 光子ビームサイズ (水平方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 96
4.13 光子ビームサイズ (垂直方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 97
4.14 光子ビームサイズ (垂直方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 97
4.15 ラジエータ位置と削り出す電子分布の概念図 98
4.16 ラジエータ挿入によるエミッタンスの変化 (BM5 ラジエータ地点) 99
4.17 ラジエータのワイヤーに当たる電子のエミッタンスと電子ビーム全体のエミッタンスの比較 100
4.18 各距離 z_{bpm} における光子ビームサイズの概念図 101
4.19 シミュレーションによる光子ビームサイズの計算結果 102
4.20 光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性 103
4.21 重力方向光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性 105
4.22 各ラジエータ位置 x_{rad} における HUL1 の総カウント数の減衰率 107
4.23 測定した電子ビームプロファイル 108

5.1 BPM 運用のための GUI 110

A.1 1 光子あたりの各 MPPC 利得 115

A.2 各チャンネル毎の MPPC 利得の線形性 116
A.3 プロトタイプのアナログ出力信号 117
A.4 BPM プロトタイプの内部写真 118
A.5 平均値 11 p.e. のポアソン分布 119
A.6 検出効率のずれが位置精度に与える影響の見積もり 119

B.1 光子イベントと荷電粒子背景事象のプロファイルの比較 122

C.1 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM1 123
C.2 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM2 124
C.3 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM3 125
C.4 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM1 126
C.5 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM2 126
C.6 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM3 127
C.7 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM1 128
C.8 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM3 129
C.9 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM1 130
C.10 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM2 130
C.11 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM1 131
C.12 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM2 132
C.13 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM3 132
C.14 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM1 133
C.15 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM2 133
C.16 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM2 134
C.17 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM1 135
C.18 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM2 136
C.19 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM3 136
C.20 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1, 水平方向 137
C.21 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1, 重力方向 137
C.22 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM2, 水平方向 138
C.23 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM2, 重力方向 138

D.1 BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分 139
D.2 BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分へのフィット結果 140

表目次

1.1 BST リングの性能値 22
1.2 BST-Ring のパラメータ@BM5 29
1.3 電子ビームプロファイル 34

2.1 各物質の放射長 44
2.2 使用した MPPC の性能値 51
2.3 信号増幅回路に用いた抵抗 60

3.1 実験セットアップ 71

4.1 BST-Ring のパラメータ@BM4 88
4.2 傾き $(1-(\alpha_x/\beta_x)z_{\mathrm{BPM}})$ のフィッティング結果と計算値 91
4.3 フィッティング結果 94
4.4 フィッティング結果 98
4.5 光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性に対するフィッティング結果 105
4.6 電子ビームプロファイルの測定値 106

A.1 検出効率が位置精度に与える影響 120

B.1 光子イベントと荷電粒子背景事象のフィッティング結果比較 122

D.1 各カット条件における光子ビームサイズ 140
D.2 各領域毎のビームサイズと面積比 141

第 1 章

序論

本論文は、東北大学電子光理学研究センターの BM4 光子ビームラインのための光子ビームプロファイルモニタ (BPM) の開発と、BPM を用いた光子ビーム測定、更にその測定結果に基づいた加速器パラメータ測定について論じるものである。物理実験に必要なビーム位置やサイズの情報を得るだけでなく、加速器固有のパラメータ測定を行うことにより、BST リング運用のためのフィードバックをかけることなど加速器への応用も目的とする。

本章では、初めに加速器研究におけるビーム測定の意義、実際に行われているビーム測定について述べる。次にビーム測定に基づいた加速器研究の例を紹介する。また、BM4 光子ビームラインにおけるビーム測定の現状と、本研究の目的の一つとなった BM4 光子ビームラインで行う物理実験からのビーム測定への要請に触れた後、最後に本研究の目的を述べる。

1.1 各加速器施設におけるビーム測定手法

1950 年代以降、粒子加速器の発達は現代物理学の飛躍的な進歩を支えてきた。この加速器技術の発達には、信頼できるビーム測定技術が欠かせない要素である。加速器から取り出されるビーム、または加速器リング中に蓄積されるビームは、加速器そのものの特性を表す情報を含んでいる。例として、そのレートやエミッタンスなどが挙げられる。これらの情報は、物理実験に要求されるビームの品質を保証し、提供するために、加速器設計段階における想定を再現すべき（少なくとも、再現しているか否かを知る必要がある）である。従って、これらビームの持つパラメータのより高精度な測定は、加速器全体の理解や調整、および改善に最も役立ち、加速器設計上の最高のパフォーマンスの実現に繋がる。

この目的のため、世界各地の加速器施設では、加速器やビームの特性に応じたビームプロファイルが行われている。代表的な例として、大強度ビームを提供する J-PARC(Japan

Proton Accelerator Research Complex) やアメリカの JLab(Jefferson Lab) において用いられるワイヤースキャナモニタを用いた手法が挙げられる。J-PARC の LINAC で用いられる手法では、ワイヤーを枠内に水平方向と垂直方向に V 字状に張り (図 1.1)、ワイヤーに当たった負水素イオン (H^-)[*1]中の電子がはがれてワイヤー中を流れる電流信号を、電圧に変換することで負水素イオンを検出する。この枠自体をビームを横切る方向に動かしながら検出することで、ビーム中の負水素イオンの分布を得る。このワイヤーの素材には、高い熱負荷に耐えうるワイヤーとしてカーボンナノチューブを採用している [1, 2]。また、連続電子ビームを供給する JLab では、タングステンと鉄の合金ワイヤーを用い、ワイヤーに当たった散乱電子の数をシンチレータと光電子増倍管を組み合わせた検出器によってシンチレーション光として検出し、ビームプロファイルを得るという手法を用いている [3]。

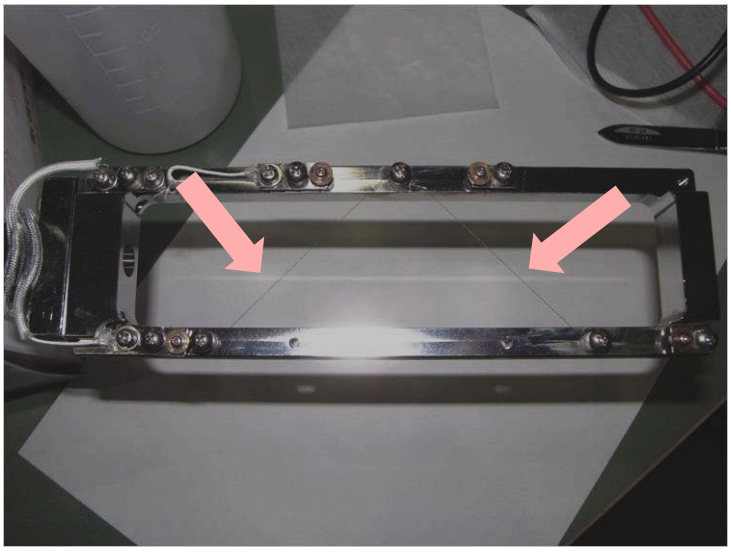


図 1.1: J-PARC で用いられているワイヤースキャナモニタ。黒い V 字状に張られた線がカーボンナノチューブワイヤーである [4]。

我々のグループが原子核実験を行う東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の光子ビームラインでは、写真乾板の原理を応用したインスタントカメラのフィルムを用いたビームモニタリング、およびプラスチックシンチレーションファイバーと光検出器を基本構造としたビームプロファイルモニタ HSBPM(High-Speed Beam Position Moniter) によるビーム測定を行なっている。

[*1] J-PARC の LINAC では、負水素イオンを加速し、続く 3GeV 陽子シンクロトロン (RCS) で 2 個の電子をはぎとり、陽子に変える。

1.1.1 写真乾板の原理によるビームプロファイル

東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の光子ビームラインでは、インスタントカメラ用のフィルム (富士フィルム Instax) を用いたビームモニタリングを行なっている。図 1.2 に現像に用いるフィルムカメラのイメージと実際のビームプロファイル写真を示す。この方法では、ビームライン上にフィルムのみを置き、フィルムに 1 スピル分の光子ビームを当てた後、インスタントカメラを用いて現像する。スピルとは加速器リング中に電子ビームを入射し、光子ビームを取り出してから次に電子ビームを入射するまでの 1 サイクルのことを指す (1.2.1 節)。

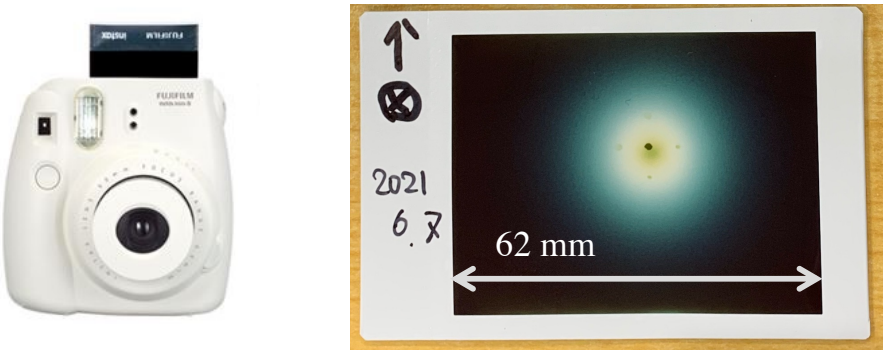


図 1.2: 光子ビームプロファイルに用いてきたフィルムカメラと実際の写真。測定時にはフィルムのみをビームライン上に設置し、ビームを当てた後にインスタントカメラ (左) を用いて現像する。

1.1.2 HSBPM による光子ビームプロファイル

図 1.3 に HSBPM の概要を、図 1.4 に実物写真を示す。検出機構には荷電粒子 VETO 用のプラスチックシンチレータ (charge PS)、トリガー用のプラスチックシンチレータ (trigger PS)、0.5 mm 厚のアルミニウム板製の光子コンバータ、2 層のシンチレーションファイバーのホドスコープを含む。charge PS、trigger PS はそれぞれ厚さ 5 mm である。2 層のホドスコープはビーム上流側から順番に y 層、x 層であり、それぞれ 3×3 mm^2 の断面積を持つ 16 本のファイバーを含む。データ収集のトリガー条件は次式 1.1.1 で表される。

$$[\overline{\text{charge PS}}] \otimes [\text{trigger PS}] \tag{1.1.1}$$

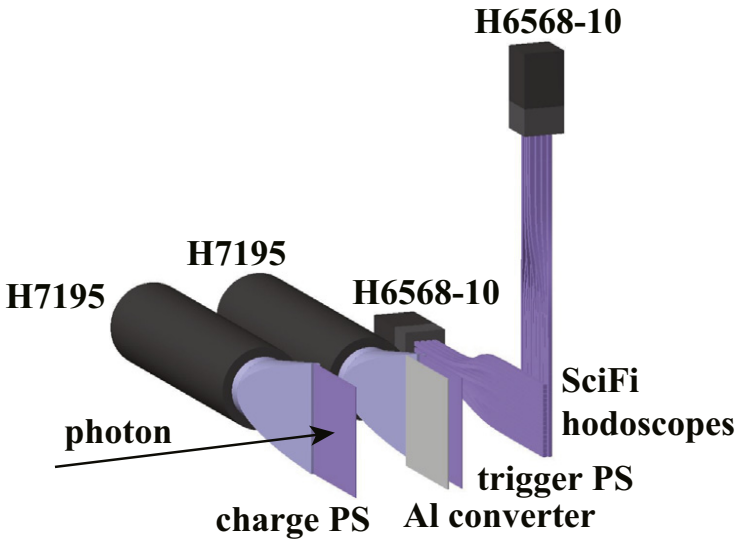


図 1.3: HSBPM の検出部分概要図 [5]。紫色で示した部分はプラスチックシンチレータである。黒色で示した部分が光検出器 (光電子増倍管) であり、各々の型番を表記した。

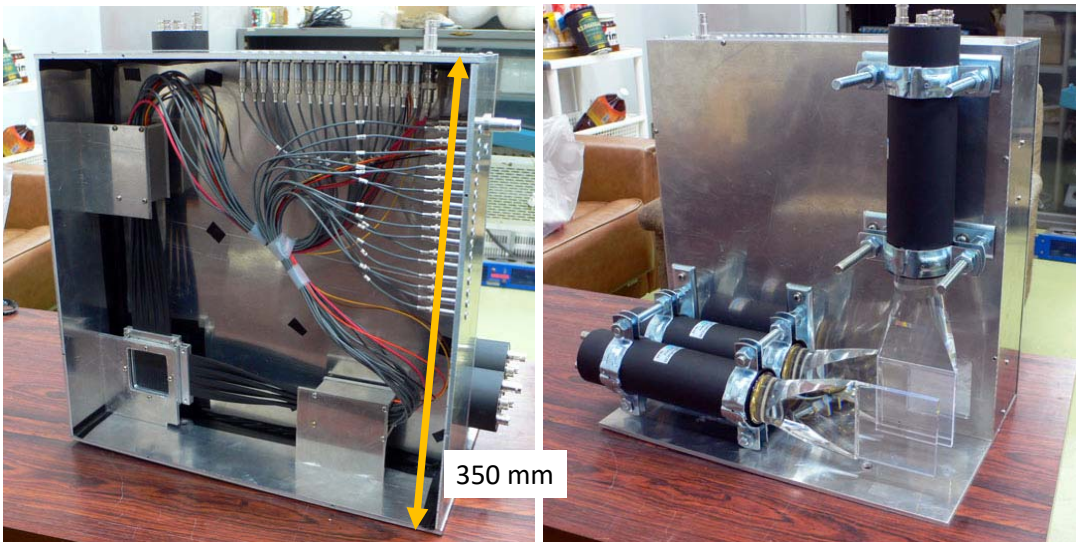


図 1.4: HSBPM の実物写真 [6]。左図はビーム下流側から見た筐体内部の写真、右図はビーム上流側から見た筐体外部と charge PS、trigger PS 用のプラスチックシンチレータ、光電子増倍管である。trigger PS は粒子入射位置に依る検出効率を均一化するため、垂直方向にも光電子増倍管を接続し、2 台の光電子増倍管を用いて読み出す。

charge PS、trigger PS はそれぞれ光電子増倍管 (浜松ホトニクス H7195MOD) に、y 層、x 層のホドスコープはそれぞれ 4×4 チャンネルのマルチアノード・メタルパック光電子増倍管 (浜松ホトニクス H6568-10MOD) に接続され、シンチレーション光を読み出す。ビーム強度 10 MHz の光子ビームに対して、charge PS、trigger PS のシングルレートは約 0.6 MHz である [5]。

図 1.5 に典型的な光子ビームプロファイルの様子を示す。y 層、x 層のホドスコープで検出した光子ビームのヒット分布に対し、図のようにガウス関数をフィッティングすることで、ビーム中心位置 (μ) と幅 (σ) を求める。

図 1.6 には HSBPM の測定によって得られたビーム中心位置とビームサイズのスピル内時間依存性を示す。図では 1.25 秒毎のプロファイルの結果がプロットされており、その位置精度は約 ± 0.2 mm である。この測定は BM5 光子ビームラインのラジエータから約 20.8 m 下流の位置で行われ、スピル内構造を見ることに成功している。この HSBPM は現在 BM4 光子ビームライン上でラジエータから約 10.5 m 下流 (ビームライン最下流) の位置に設置されている。

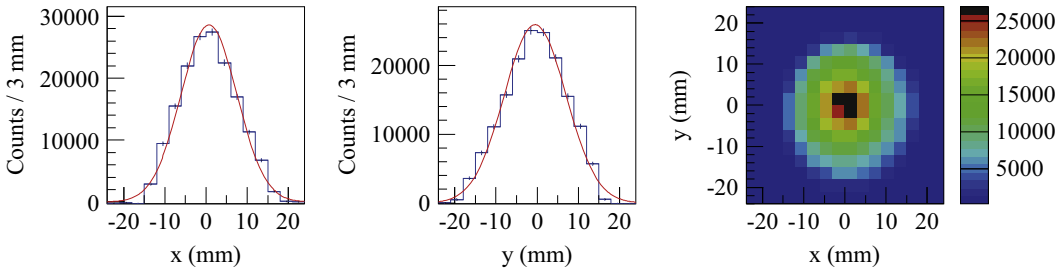


図 1.5: 典型的な光子ビームプロファイルの様子 [5]。左図は水平方向、中央は重力方向のビーム強度分布である。右図はこれらの 2 次元プロットである。この図は GeV-γ(BM5) 光子ビームの測定結果であり、ビームエネルギーが同定された標識化光子 (1.2.1 節) のプロファイルである。周回電子ビームのエネルギーは 1.3 GeV。

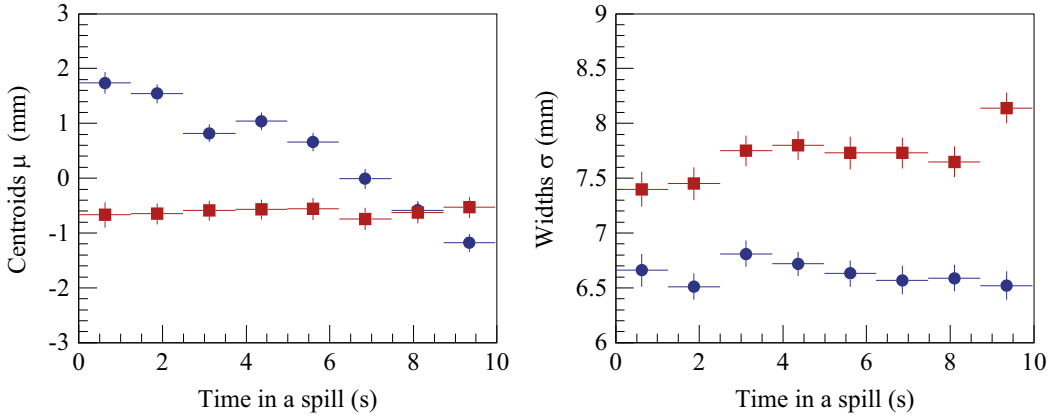


図 1.6: ビーム位置、サイズのスピル内時間依存性 [5]。横軸はスピル内時間であり、左図はビーム中心位置、右図はビームサイズの時間内推移を示している。青丸は水平方向、赤四角は垂直方向 (重力方向) を示す。

1.2 ビーム測定の加速器研究への応用

これらのようなビーム測定により得られるパラメータ情報は、前述の通り加速器そのものの理解と調査のために非常に重要である。本節ではその一例として、ELPH の電子シンクロトロンが提供する光子ビームの測定を用いて行われた加速器調査に関する先行研究を紹介する。これに先立ち、ELPH の電子シンクロトロンと光子ビームの特性について説明する。

1.2.1 ELPH BST リングと光子ビームライン

東北大学電子光理学研究センター (ELPH) では 2 つの光子ビームラインと 1 つの電子・陽電子ビームラインでビームを提供し、様々な物理実験が行われる。本節で紹介する光子ビームラインでは、電子シンクロトロン中に貯蔵した電子ビーム内に輻射体を挿入し、制動放射によって生成した光子をビームとして取り出している。次節より、この光子ビームについて順を追って解説する。

電子円形加速器（シンクロトロン） BST リング

電子シンクロトロン BST リング (Booster STorage Ring) は、電子線形加速器から入射された約 90 MeV の電子ビームを最大 1.3 GeV まで加速してリング中に貯蔵する。ビームの加速や貯蔵に必要なエネルギーは、共振周波数 500 MHz の高周波加速空洞 (以下、加速器 RF と呼称) により供給されている。図 1.7 に BST リングの概観を示す。図中左上の入射部分から電子を入射する [7]。

リング内に貯蔵した周回電子ビームの軌道上に、非常に細い炭素の輻射体、ラジエータ (1.2.1 節) を挿入することで、制動放射により高エネルギーのガンマ線を発生させ、光子ビームとして取り出している。BST リングには 2 つの光子ビームラインが用意されており、1 つ目が電磁スペクトロメータ NKS2[8] が設置された BM4 光子ビームライン、2 つ目が電磁カロリメーター FOREST[9] が設置された BM5 光子ビームラインである。両方のビームラインには光子標識化装置 Tagger([10][11], 1.2.1 節) が設置されており、取り出した光子ビームのエネルギーとタイミングを同定することが可能である。

代表的な運転パターンでは、約 0.2 秒で入射ビームを加速し、約 10 秒程度の時間をかけて 1 – 30 mA の電子ビームを少しずつ削りながら光子ビームを発生させ、その後 5 秒程度で再び次の電子ビームを入射する。この 1 つのサイクルを 1 スピルと呼ぶ。図 1.8 にリング内の周回電子ビーム電流を測定するビーム DCCT(DC Current Transformer) の模式図と実際の記録を示す。縦軸はビーム電流、横軸は時間であり、リング中の粒子数を

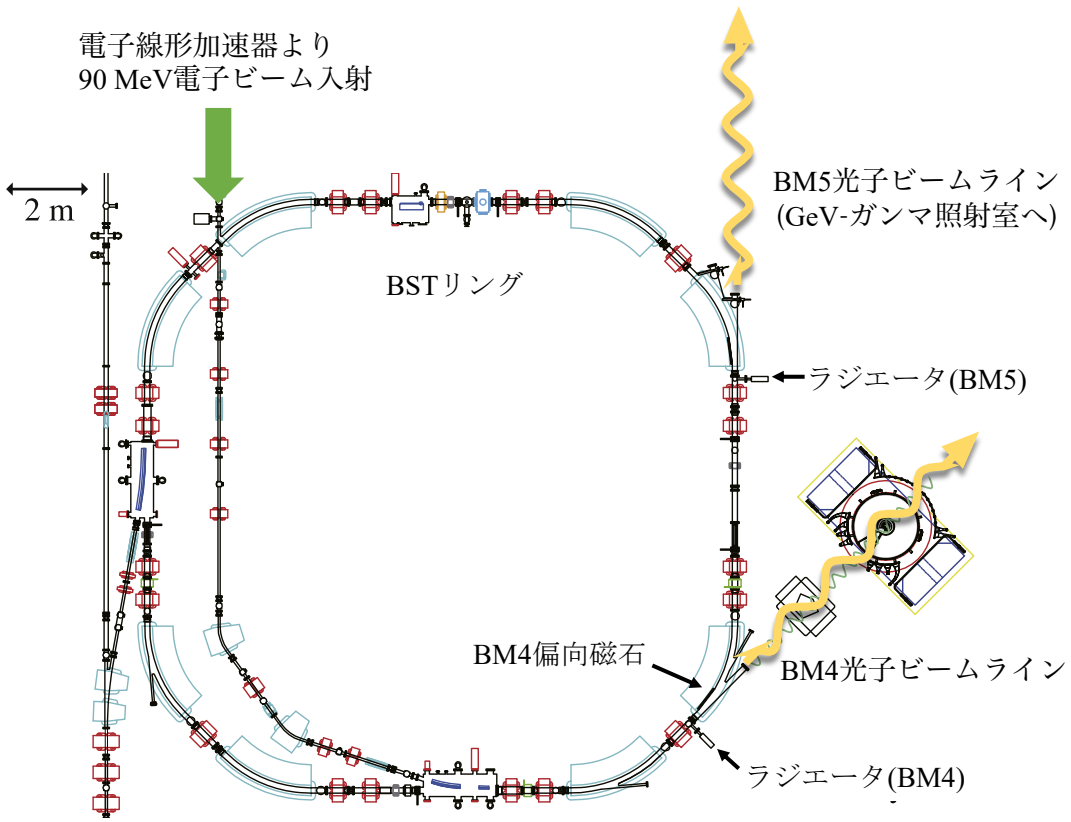


図 1.7: ELPH 第 2 実験室内の BST リングおよび光子ビームライン [8]。図中左上の入射部分から電子線形加速器により 90 MeV に加速した電子ビームを入射する。リングの周長は約 50 m である。

モニタリングすることができる。スピルのうち、電子ビームがリング中に貯蔵されている時間をフラットトップといい、ラジエータを挿入していない時には上図のような振る舞いが見える。フラットトップの間にラジエータを挿入し光子ビームを取り出すと、下図のようにリング中に貯蔵されている電子が段々と削られていく様子が分かる。通常運転時、1 スピルは約 20 秒であり、うち約 10 – 15 秒がフラットトップである。1 スピルのうちフラットトップが占める割合を duty factor という。

典型的な BST リングのビーム性能を表 1.1 に示す。

表 1.1: BST リングの性能値 [7]

入射ビームエネルギー	90 MeV
入射レート	∼ 0.05 Hz (typ.)
リング最大エネルギー	0.8 – 1.3 GeV
ストレージビームカレント	∼ 30 mA

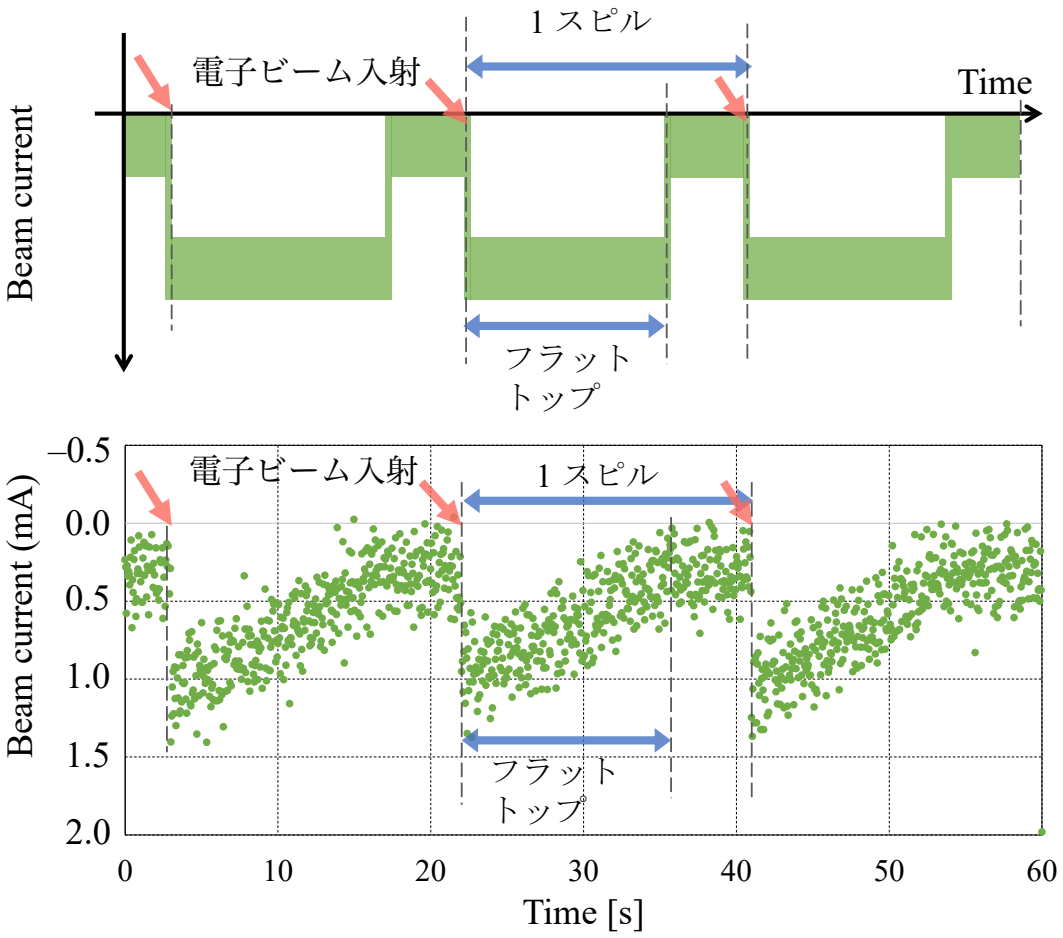


図 1.8: ビーム DCCT の模式図と実際の記録。縦軸はリング内の周回電子ビーム電流、横軸は時間である。上図はラジエータを挿入しない場合の模式図、下図は実際にラジエータを挿入し光子ビームを取り出している時の記録である。ラジエータを徐々に挿入し光子ビームを取り出すと、電子ビームが少しずつ削られていく様子が分かる。スピルが終わるとリング内に残った電子ビームをビームダンプへと送り、次の電子ビームを入射し即座に加速する。

ラジエータ

ラジエータは直径 11 μm(電子ビームの約 1/100 の大きさ) の非常に細い炭素ファイバーであり、図 1.7 中の BM4 偏向磁石の入口から 32.5 cm の位置に配置されている。図 1.9 に示すようにフォーク状のアルミニウムフレームに y 方向（重力方向）に取り付けられており、このフレームを x 方向（水平方向）に移動させることで電子ビームへ挿入または取り出しを行なっている。この移動はステッピングモーターで行い、コンピュータコントロールにより制御する。ステッピングモーターの最小ステップは 2 μm、最大速度は 80 mm/s である。その精度は誤差 10 μm 以内であり、光子強度の制御には十分である。ステッピングモーターの動作は BST リングの電子ビーム入射、貯蔵のタイミングと同期させ、挿入時と取出時には最大速度で動作する [10]。

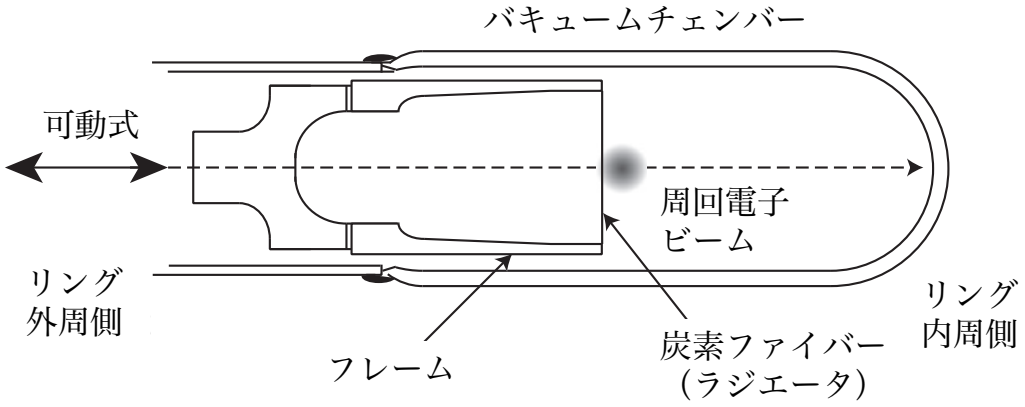


図 1.9: ラジエータの模式図 [12]。

このラジエータシステムは次の 5 つの要件を満たすよう設計されている: (1) 光子標識化装置 (1.2.1 節) のマルチヒットイベントを数 % 以下に抑えるため、標識化光子数が 10 MHz を超えない、(2) 光子強度を一定に保つため、光子強度は電子ビームと独立に制御可能、(3) 周回電子との電子衝突による熱に対して耐性を持ち、長期間の使用に十分な強度を持つ、 (4) 電子ビームを加速している間はラジエータと電子の衝突を避けるため、電子軌道外へ移動可能、 (5) 光子強度を制御するため、ラジエータの位置を数 10 μm 以内で調整可能、の 5 点を満たす [10]。

BST リング内で入射電子が約 1.3 GeV に加速するまでの間、ラジエータは周回電子軌道から十分に離れた初期位置で待機する。BST リングが加速モードから貯蔵モードに切り替わるとビーム中心方向にゆっくりと動き始める。制動放射光子ビーム強度がある程度一定に保たれるよう、ラジエータの速度は一定ではなく位置によって速度を変えながら動く [10]。通常運転時には、ラジエータ位置はスピル内で次式 1.2.1 のような 4 次関数に

従って移動する (図 1.10)。

$$\text{Radiator position} = (0 + 0.1766t + 0.1868t^2 + 0.1388t^3 + 0.5033t^4) \times 900 + 30820 \tag{1.2.1}$$

ここで、Radiator position、スピル内時刻 t の単位はそれぞれ mm、秒である。各項の係数であるパラメータや初期位置の値は、リングの運転状況やビームプロファイルの測定結果などに応じて調整する。

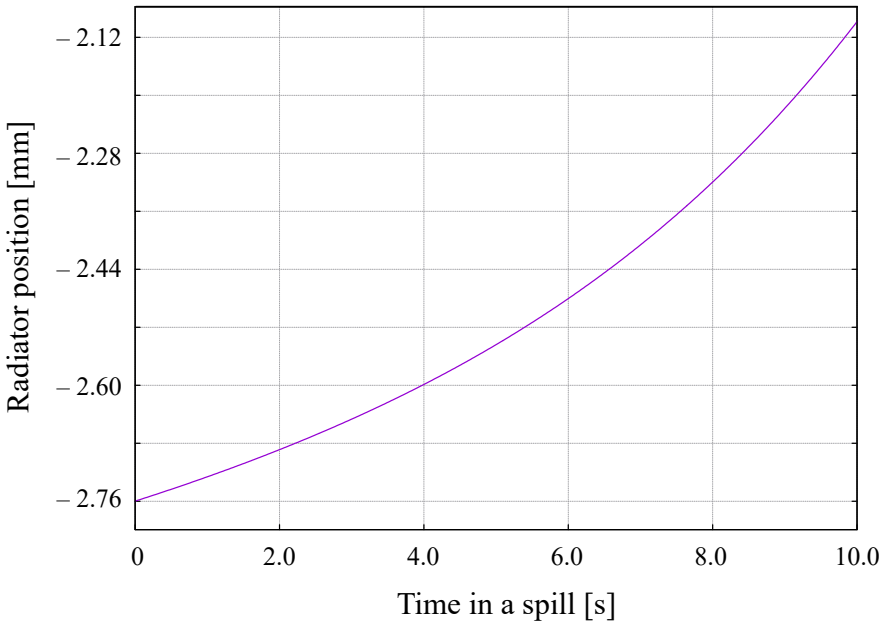


図 1.10: 通常運転時のラジエータ位置。典型的な例を示す。時間が経つほど周回電子ビーム量が減っていくため、ビーム強度を一定に保つよう徐々に加速するよう設定する。

光子標識化装置 Tagger

光子標識化装置 Tagger は、BM4 偏向電磁内に設置された光子エネルギーを測定する検出器である。光子を直接検出しようとすると、光子は検出器との反応により消えてしまうため、ビームとして実験に用いることができない。このため、Tagger は制動放射の際の散乱電子のエネルギーを測定することで光子のエネルギーを同定する。これにより光子の情報を非破壊で取り出すことができる。

Tagger には散乱電子通過位置を測定する TagF(105 セグメント) と散乱電子通過時

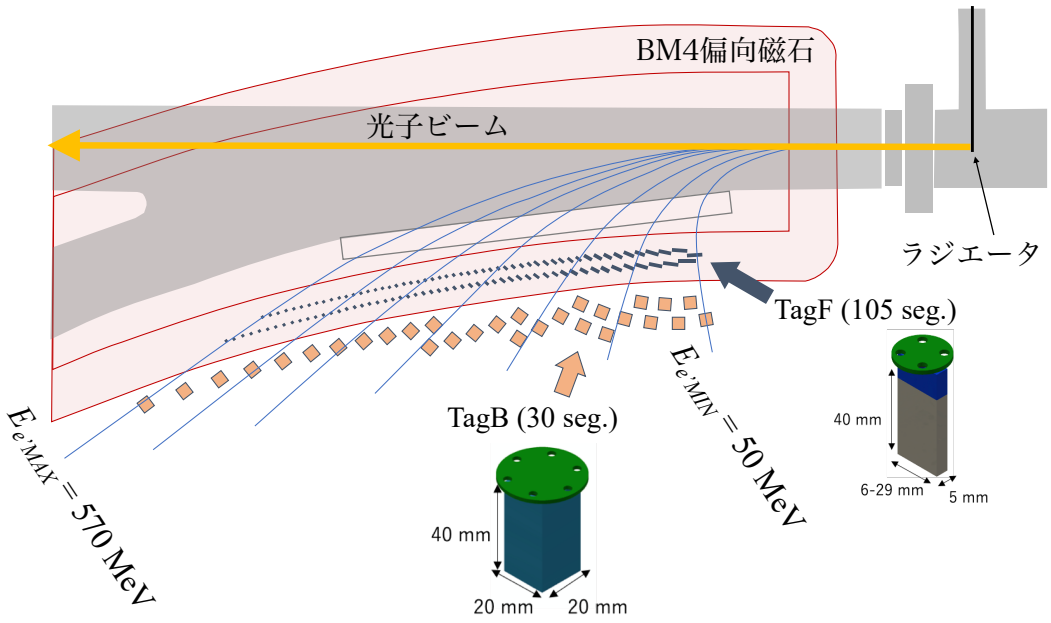


図 1.11: BM4 偏向磁石内の Tagger の配置概要図と TagF、TagB のイメージ図 [13]。青の四角形は 105 セグメントの TagF、橙の四角形は 30 セグメントの TagB を示している。制動放射によってエネルギーを失った散乱電子は、そのエネルギーに応じて偏向磁石内の磁場で周回軌道より内側へと曲げられる。図中の青線はその散乱電子軌道を表す。Tagger の各セグメント配置は、通過位置とエネルギーが対応付けられるようシミュレーションにより決定している。

間を測定する TagB(30 セグメント) の 2 種類の検出器が含まれる (図 1.11)。各セグメントはプラスチックシンチレータ (Eljen EJ-204) と光検出器 SiPM(浜松ホトニクス MPPC(2.2.2 節)) で構成される。散乱電子は、偏向磁石の磁場により制動放射の際に失ったエネルギーに応じて本来の周回電子軌道より内側方向に曲げられる。その軌道位置は磁場分布が既知である場合に電子のエネルギーと対応付けることができる。Tagger はこの原理を利用し、セグメントの配置とエネルギーを対応付けることで電子のエネルギーを決定する。各セグメントの配置位置は物理モンテカルロシミュレーション (GEANT4[14]) により磁場分布や周回電子の空間的な広がりを考慮して決定した。TagF は各セグメントの横幅がエネルギー幅 5 MeV をカバーし、更に数え落としを防ぐため互い違いに 2 層に配置している。エネルギーアクセプタンスは 50 – 570 MeV である [13]。

実光子ビームのエネルギー E_γ は、Tagger で測定した散乱電子のエネルギー $E_{e'}$ を用いて次式により同定する。

$$E_\gamma = E_e - E_{e'} \tag{1.2.2}$$

ここで E_e は周回電子のエネルギーを表す。このとき、電子の質量および炭素ファイバー（輻射標的）中の炭素原子への運動量移行は十分に小さいものとして無視している。

BM4 光子ビームライン

図 1.12 に BM4 光子ビームラインのセットアップを示す。ラジエータ地点で生成した光子ビームは 1.95 m 先のアルミニウム製のフランジ窓 (厚さ 1 mm) を通過する。光子の一部はこのようなフランジ窓や空気などの物質と相互作用し、電子・陽電子対生成を起こす。電子・陽電子は物理実験において背景事象となり得るため、Sweep 電磁石によって除去する。また、ビームの焦点を絞る目的で、Sweep 電磁石入口には鉛やタングステン合金 (日本タングステン ヘビーアロイ) 製のコリメータを設置する。下流の磁気スペクトロメータ NKS2(Neutral Kaon Spectrometer 2[8]) は双極電磁石 680 マグネットの中央に標的セルを持ち、標的を円筒形に取り囲むようにして 2 種類の粒子飛跡検出器 (Vertex Drift Chamber, Cylindrical Drift Chamber)、2 層の飛行時間測定用プラスチックシンチレータ (Inner Hodoscope, Outer Hodoscope) から成る。本来 $n\gamma \to K^0\Lambda$ というストレンジネス光生成チャンネルの研究を目的として設計されたが、BM4 ビームラインで行う物理実験毎に構成検出器の組み合わせを変えることで様々な実験に応用可能である。

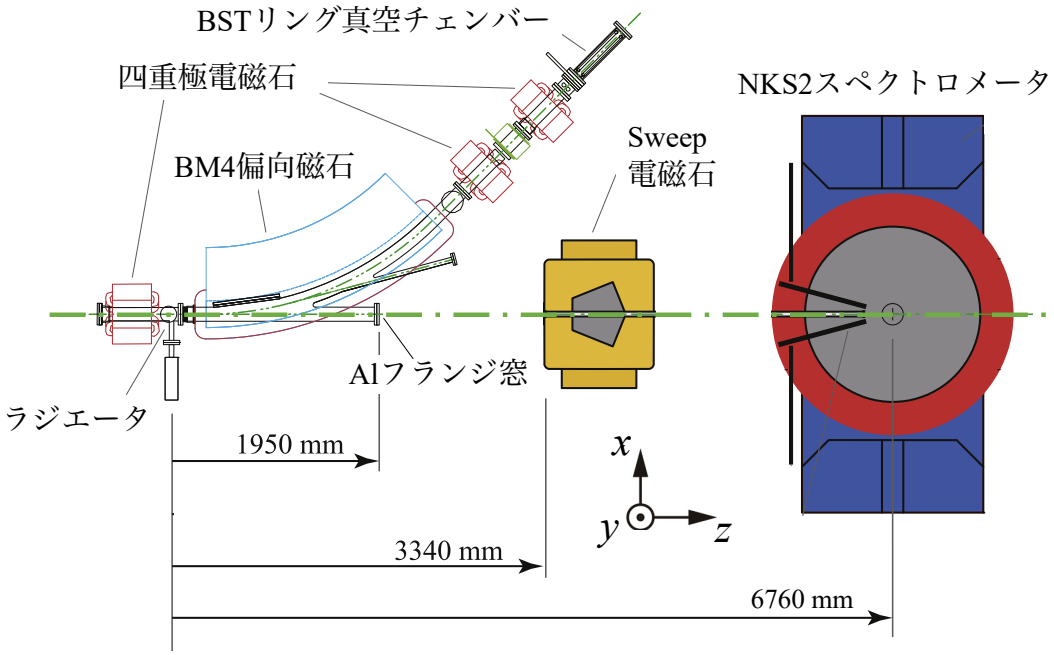


図 1.12: BM4 光子ビームライン [8]

1.2.2 BST リングにおける粒子検出器を用いた加速器研究

図 1.6 に見られる光子ビーム位置の時間依存性は、スピル内でラジエータ位置が変化することに起因する。ビーム下流において測定された光子ビーム位置、すなわち光子ビーム発生時のビーム方向は制動放射を起こす電子が持っていた角度方向を保持している。このため、光子ビーム方向とラジエータ位置との相関を調べることで、周回電子ビームの持つ分布の位置 x と角度 $x' = dp_x/dp_z$ の相関、$x - x'$ 位相空間の粒子分布を調べることができる。

まず初めに、次節より $x - x'$ 位相空間について説明する。

加速器の粒子分布と Twiss parameter

加速器中の粒子分布はエミッタンス ε という保存量を用いて表すことができる。このエミッタンス ε は、ビームの粒子が位相空間を占める面積を π で割ったもの

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \iint dx dx' \tag{1.2.3}$$

として定義される。ビーム内の粒子が図 1.13 のように位相平面 (x, x') 内に楕円に分布しているとすると、この楕円の面積がエミッタンス ε であり、その形と傾きを決めるパラメータを Twiss parameter (β, α, γ) という。Twiss parameter は加速器毎に固有の値であり、加速器のデザイン値として決まっている。一般に、2 次元位相平面 (x, x') において分布した粒子を x 軸へ射影すると、x 軸方向の粒子分布が得られる。同様に、x' 軸へ射影すると x' 軸方向の角度分布が得られる。

加速器中のある位置 s における位相平面内の楕円は Twiss parameter を用いて

$$\gamma(s) \cdot (x(s))^2 + 2\alpha(s) \cdot x(s)x'(s) + \beta(s) \cdot (x'(s))^2 = \varepsilon \tag{1.2.4}$$

と表される。このとき、s の位置での x 軸方向の粒子の広がりの半幅 σ_x、および角度の広がりの半幅 $\sigma_{x'}$ はそれぞれ図 1.13 で示すように

$$\begin{aligned} \sigma_x(s) &= \sqrt{\beta(s)\varepsilon} \\ \sigma_{x'}(s) &= \sqrt{\gamma(s)\varepsilon} \end{aligned} \tag{1.2.5}$$

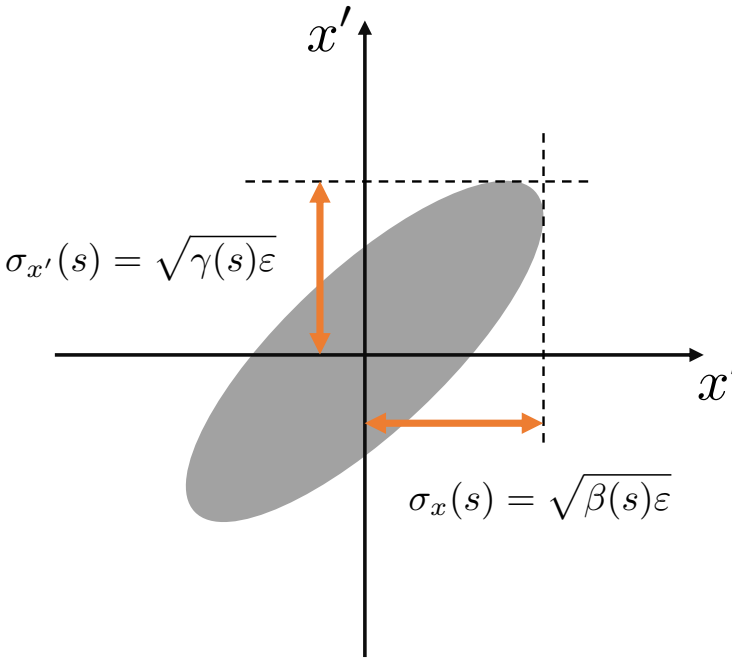


図 1.13: 水平方向の位相平面。この楕円の内部に電子が分布している。実空間のビームの横幅、角度の広がりの幅はそれぞれの座標軸へ射影した分布の幅になる。

表 1.2: BST-Ring のパラメータ@BM5[15]

パラメータ		値
Twiss parameter	α_x	1.60 ± 0.09
	β_x	3.70 ± 0.15 m
	γ_x	0.96 ± 0.06 m^{-1}
エミッタンス ε_x		$(13.75 \pm 0.09) \times 10^{-8}$ m
運動量広がり $\Delta p/p$		$(6.3 \pm 0.0) \times 10^{-4}$
分散 (η_x, η_y)		0.45 ± 0.02 m

で与えられる。従って、Twiss parameter の β はビームサイズ、γ は発散角に関係した量になっている。α はビームが収束していくときに $\alpha > 0$、発散していくときに $\alpha < 0$ となる。焦点では $\alpha = 0$ となる (図 1.14)。

表 1.2 に BST リングの BM5 ラジエータ地点における各パラメータ値を示す。$\alpha_x > 0$ なので、BM5 ラジエータ地点における位相空間は図 1.15 に示す概念図のような x、x' が逆相関を持つ形になる。即ちラジエータ位置 x_{rad} を $+x$ 方向に動かすと、削られる電子

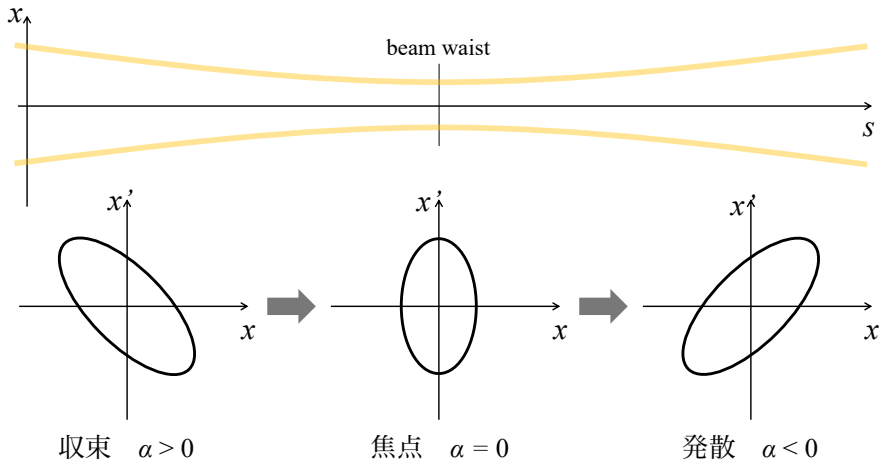


図 1.14: 位相空間の楕円と α の関係。加速器中の位置 s が進んでいくに従って、楕円は時計回りに回転するように変化する。楕円の面積 (ε) すなわちエミッタンスは一定である。

ビームの角度方向は $-x'$ 方向に動く。図 1.15 中の青線で示した直線は、ラジエータが各位置 x_{rad} で削り出す電子の角度分布の平均を結んだ線であり、

$$x' = -\frac{\alpha}{\beta}x \tag{1.2.6}$$

と書ける。従って、ラジエータと HSBPM のような光子ビーム検出器の間の距離 z_{BPM} が分かっている場合には、HSBPM 上で測定される光子ビーム位置 x_{BPM} とラジエータ位置 x_{rad} の間に次式が成り立つ。

$$x_{\mathrm{BPM}} = x_{\mathrm{rad}} + \left(-\frac{\alpha_x}{\beta_x}x_{\mathrm{rad}}\right) z_{\mathrm{BPM}} = \left(1 - \frac{\alpha_x}{\beta_x}z_{\mathrm{BPM}}\right) x_{\mathrm{rad}} \tag{1.2.7}$$

実際に式 1.2.7 を再現することを確認した測定結果を図 1.16 に示す [15]。これは光子ビームプロファイルのラジエータ位置依存性である。この測定ではラジエータをスピル内で動かさず、ある点 x_{rad} に固定した状態で HSBPM によって各ラジエータ位置における光子ビームの測定を行った。図中左上図は水平方向のビーム中心位置 μ_x^{BPM} のラジエータ位置依存性である。この測定ではラジエータと HSBPM の距離 z_{BPM} の値が不明のため、$\mu_x^{\mathrm{BPM}} = 0$ 点を $x = -3$ mm と基準を決めている。測定結果から、式 1.2.7 のような 1 次関数に従う振る舞いが確認できる。

またこの測定では同時に垂直方向 (重力方向) のビーム位置と、ビームサイズを測定し

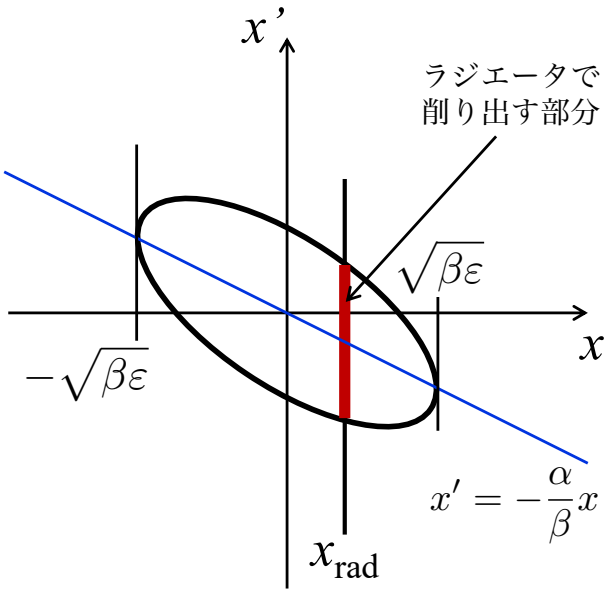


図 1.15: BM5 の水平方向の位相平面。BST リング固有の Twiss parameter が表す楕円は x と x' が負の相関を持っている。

ている。左下図は重力方向のビーム中心位置 μ_y^{BPM} のラジエータ位置依存性である。ラジエータ位置 x_{rad} の増加とともにビーム中心位置 μ_y^{BPM} の値は減少しており、ラジエータ地点における周回電子の強度分布が水平線より傾いている様子が分かる。右上図は水平方向のビームサイズ σ_x^{BPM} のラジエータ位置依存性である。ビームサイズ σ_x^{BPM} はラジエータ位置の変化に対しておおよそ一定である。右下図は重力方向のビームサイズ σ_y^{BPM} のラジエータ位置依存性であり、ラジエータが周回電子ビームの中心に近づくにつれビームサイズ σ_y^{BPM} が増加していくことが分かる [15]。このように、光子ビームのプロファイリングにより、加速器のパラメータを測定することが可能である。しかしこの測定では、検出器のレート耐性による制限から、測定されたラジエータ位置の範囲が電子ビームの $2.5-5\,\sigma$ 程度の位置にのみ限られている。また、ELPH BST リングの BM4 光子ビームラインにおける測定はこれまで行われておらず、BM4 における光子ビームの振る舞いを定量的に評価できていない。

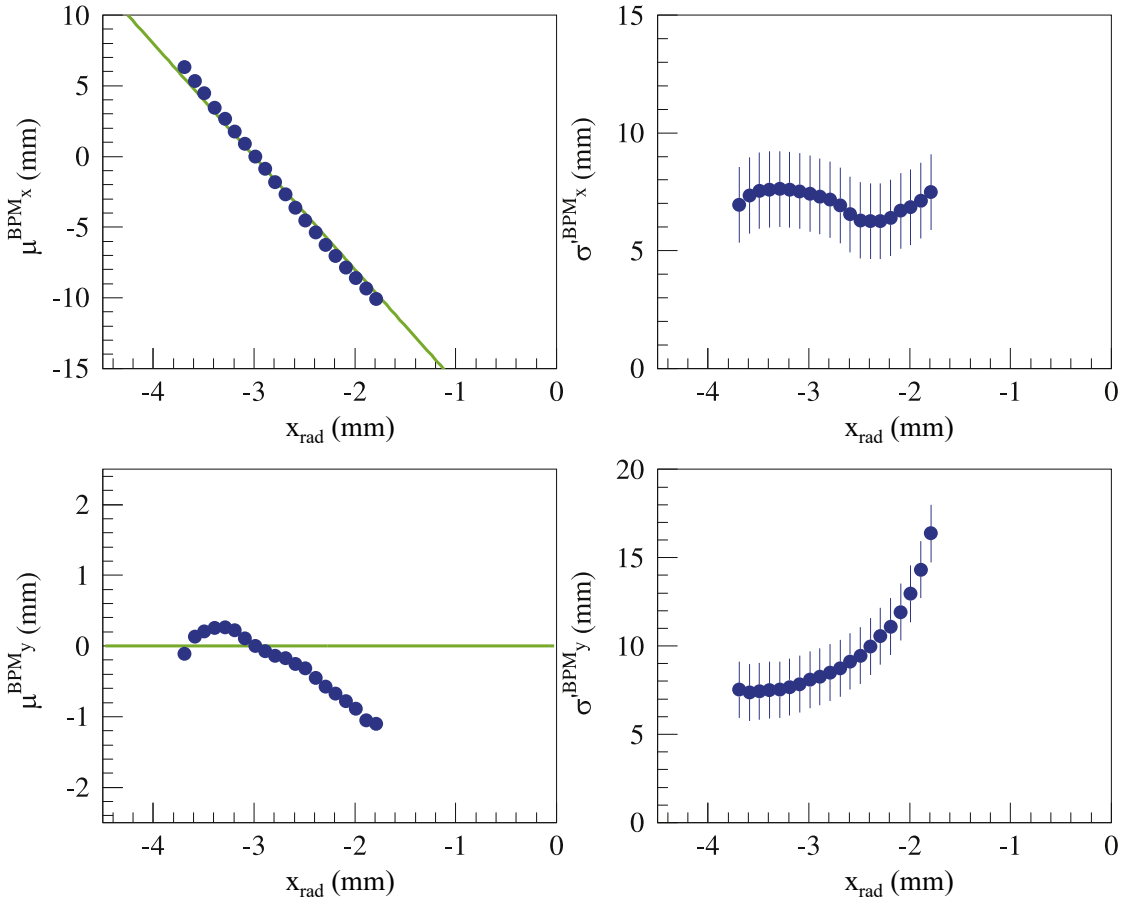


図 1.16: HSBPM を用いたビーム位置、サイズのラジエータ位置依存性の測定結果 [15]。それぞれ縦軸は左上図：水平方向のビーム中心位置 μ_x^{BPM}、左下図：重力方向のビーム中心位置 μ_y^{BPM}、右上図：水平方向のビームサイズ σ_x^{BPM}、右下図：重力方向のビームサイズ σ_y^{BPM} であり、横軸は BST リング中のラジエータ位置 x_{rad} である。$x_{\mathrm{rad}} = 0$ の点は周回電子ビームの中心に相当する。ビームサイズのエラーバーには荷電粒子の多重散乱の効果を含む。

Tagger の計数率を用いた電子ビームプロファイル

また、ELPH BM5 光子ビームラインでは、ラジエータと Tagger を用いた電子ビーム強度分布測定も行われている。周回電子ビーム中のラジエータ位置が変化すると、電子ビームを削る速度が変化することを利用して、ラジエータ地点での電子ビーム強度分布を得ることができる。

図 1.17 に示すのは、加速器リング内における電子ビームの水平方向の強度分布である。ある時間における電子ビームのうち、ラジエータに当たる電子数を S、全電子数を N とすると、制動放射光子ビーム強度 I の単位時間あたりの変化量は次式 1.2.8 で表すことができる。

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{S}{N}\alpha I \tag{1.2.8}$$

ここで、α はある定数の係数である。式中の $(S/N)\alpha$ は時間に対する定数であるため、これを各ラジエータ位置 x_{rad} における減衰定数 $\Gamma(x_{\mathrm{rad}}) = (S/N)\alpha$ と置くと、光子ビーム強度 $I(t, x_{\mathrm{rad}})$ は経過時間の関数として次式 1.2.9 のように表せる。

$$I(t, x_{\mathrm{rad}}) = I_0 \exp\{-\Gamma(x_{\mathrm{rad}})t\} \tag{1.2.9}$$

従って、 各ラジエータ位置 x_{rad} における減衰定数 $\Gamma(x_{\mathrm{rad}})$ を測定することで、電子ビー

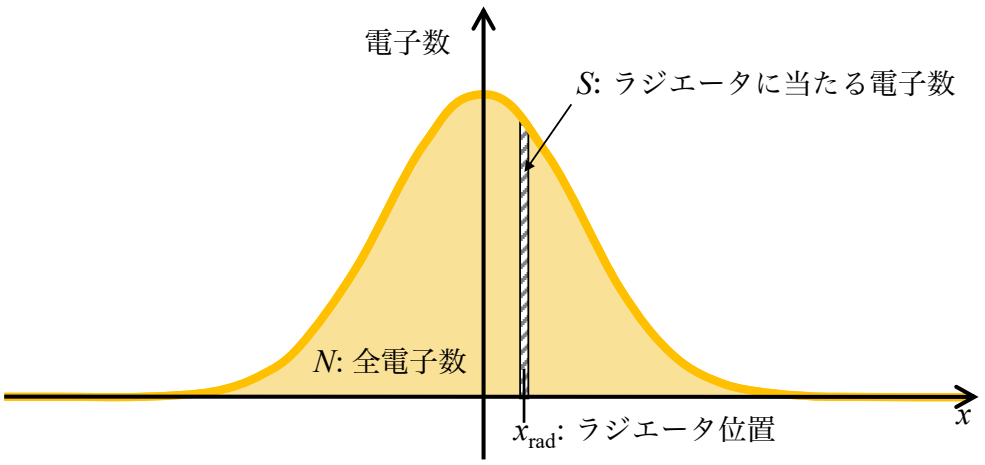


図 1.17: 周回電子ビームの強度分布と減衰定数の概念図。加速器リング内における電子ビームの水平方向強度分布を表す。全電子数 N のうちラジエータに当たる電子数を S とする。

ムの水平方向の強度分布を得ることができる。得られた強度分布を適切な関数でフィッティングすることにより、電子ビームの中心位置と幅を見積もる。

ラジエータの x 位置をスピル内で固定し、各ラジエータ位置 x に対する光子標識化装置 Tagger の計数率の減衰定数をプロットしたものを図 1.18 に示す。この測定では、Tagger のデータ収集モジュールとして、NIM 規格信号を収集する FPGA モジュール MPLM4X[16] が用いられた。電子ビーム強度分布がガウス分布に従うと仮定し、フィッティングにより得られた周回電子ビーム中心位置 μ_x とサイズ σ_x を表 1.3 に示す。

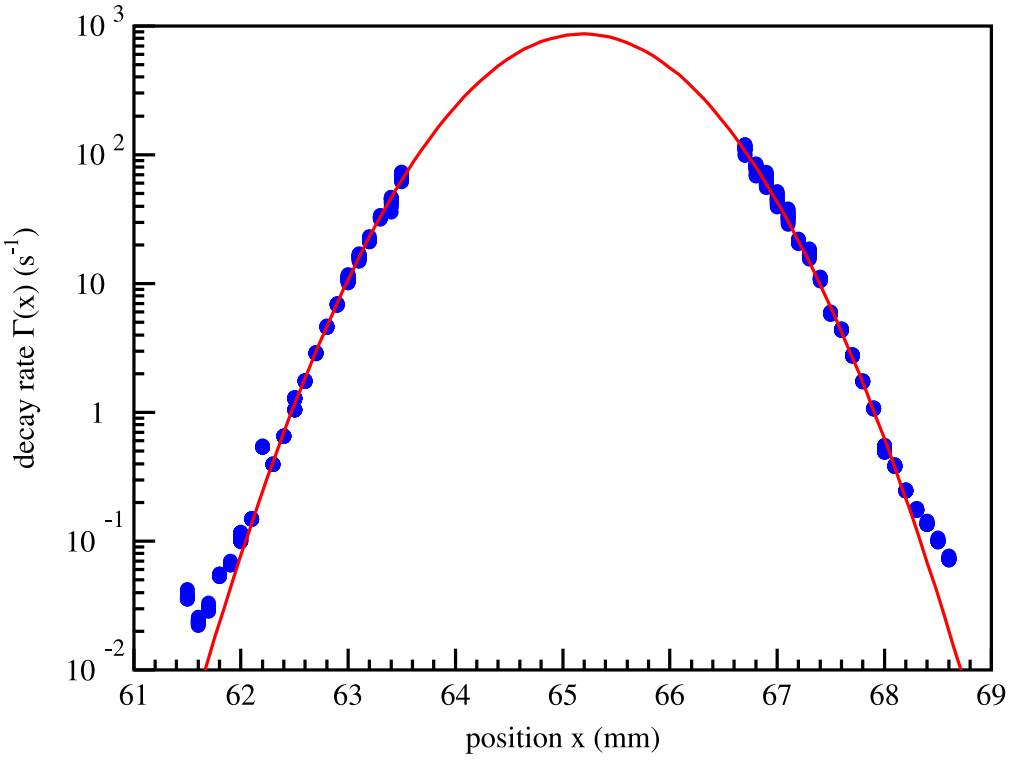


図 1.18: 計数率の減衰定数とラジエータ位置の相関 [15]。赤線で示す関数はガウス関数であり、このフィッティングから電子ビーム中心位置と電子ビーム強度分布の幅を得ることができる。

表 1.3: 電子ビームプロファイル [17][18]

周回電子ビーム中心位置	μ_x	65.19 mm
周回電子ビームサイズ	σ_x	0.74 mm

周回電子ビームのサイズは理論値と加速器のデザイン値から計算することができる。式 1.2.5 で表される x 軸方向の粒子の広がり σ_x は、実際には分散 η_x によるビームの運動量広がり $\Delta p/p$ の効果を含む。

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + \left(\eta_x \frac{\Delta p}{p}\right)^2} \tag{1.2.10}$$

表 1.2 の値を用いて式 1.2.10 を計算すると、電子ビームサイズは $\sigma_x = 0.77 \pm 0.01$ mm と予想される。従って、この計算値は表 1.3 に示した測定値をほぼ再現している。しかしこの測定で用いられた FPGA データ収集モジュールのサンプリングレートは 0.1 秒であり、高レートの電子ビーム中心付近ではデータ取得が不可能であった。

1.3 本研究の目的

1.3.1 BM4 光子ビームラインにおけるビームプロファイル

従来、BM4 光子ビームラインでは、光子ビームプロファイル手法としてフィルムカメラを用いた方法と、HSBPM を採用してきた。HSBPM は実際に光子ビームの定量的な測定に成功しているが、本来 BM5 光子ビームライン上での運用を想定して開発されたものであるため、ラジエータから $10 - 15$ m 程度離れた場所におけるプロファイルに適している。BM4 光子ビームラインでは前述の通りラジエータから約 3 m の位置にコリメータ、約 5.5 m の位置に物理実験の標的を設置するため、ビームライン上〜中流における光子ビームプロファイルが必要である。そこで採用されてきた手法がインスタントカメラ用のフィルムを用いた方法である。しかしこの手法では写真を現像するまでにタイムラグが生じる上、ビーム像を確認するために一度ビームの取り出しを止めて実験ホールまでアクセスする必要がある。このため、加速器パラメータを調整しながら、または物理実験を行いながらリアルタイムにビームの場所を特定できない。更に画像解析から定量的かつ精細にビーム中心位置や幅を求めることは極めて困難であり、画像の明るさとビーム強度のリニアリティも不明である。当然、これらの時間依存性を調べることも不可能である。

1.3.2 BM4 光子ビームラインにおける ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験

従って、現状の BM4 光子ビームラインでは、ビームライン上〜中流における定量的な光子ビーム測定手法が確立されていない。これは加速器を運用する上で必要なフィードバックがかけられないという問題だけでなく、実際に BM4 光子ビームを用いた物理実験

を行うにあたり、その要請をクリアできないという問題を孕んでいる。BM4 光子ビームラインでは様々な物理実験を行なっているが、ここでは、本研究の目的の一つとなった三重水素ラムダハイパー核 ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 直接寿命測定実験について紹介する。

ハイパートライトンパズル

${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$(ハイパートライトン) は質量数 $A = 3$ で陽子、中性子、Λ粒子[*2]を 1 つずつ含む最も基本的なΛハイパー核[*3]であり、これまで多くの理論計算の基礎データとして用いられてきた。この ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ のΛ粒子の束縛エネルギー B_Λ については、過去に原子核乾板 (エマルジョン) による測定結果が複数報告されており、Juric によってまとめられた。その値は

$$B_\Lambda({}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}) = 0.13 \pm 0.05 \text{ MeV} \tag{1.3.1}$$

であるとされている [19]。Λ粒子は非常に弱く束縛していることから、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の半径はそのコア核である重水素の約 5 倍大きく、Λハロー核のような形状をとると考えられる。そのため、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命は自由空間のΛ粒子の寿命に近い ($\tau \simeq 0.97\tau_\Lambda$) と理論的に予想されてきた [20, 21]。しかし 2010 年以降、複数の重イオン衝突実験グループ (STAR, ALICE) から、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命は自由空間のΛ粒子の寿命より $20 - 30\%$ 程度短いとする実験データが報告された [22, 23, 24, 25]。この弱い束縛と短い寿命の間の矛盾は“ハイパートライトンパズル”として大きな注目を集めている。

近年、同じ重イオン衝突実験グループ、ALICE collaboration から ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命がより自由空間のΛ粒子に近いとする実験データが報告された [26, 27]。過去の STAR collaboration を含め、これらは「重イオン衝突実験で生成したハイパー核崩壊時の娘粒子の飛跡測定」という同じ実験手法を用いていながら、一貫した理解が得られないという問題を抱えている。我々はこの状況を受け、これまでとは全く異なる手法によるΛハイパー核直接寿命測定実験を ELPH において行うことを計画している。

${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験の原理とデザイン

図 1.19 に ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験原理の概念図を示す。この実験では BM4 光子ビームと液体 ${}^{3}\mathrm{He}$ 標的を用い、${}^{3}\mathrm{He}(\gamma, K^+){}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 反応によって ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ を生成する。この時に同時に生成する K^+ 中間子の生成時刻と、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ が弱い相互作用によって 2 体崩壊する際に放出する π^- 中間子の検出時刻をハイパー核崩壊時刻として測定し、その差分を取ることによって ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命を“直接”測定する。

[*2] u, d, s クォークを 1 つずつ含むバリオン。質量：1116 MeV/c^2

[*3] ハイペロンを束縛した原子核

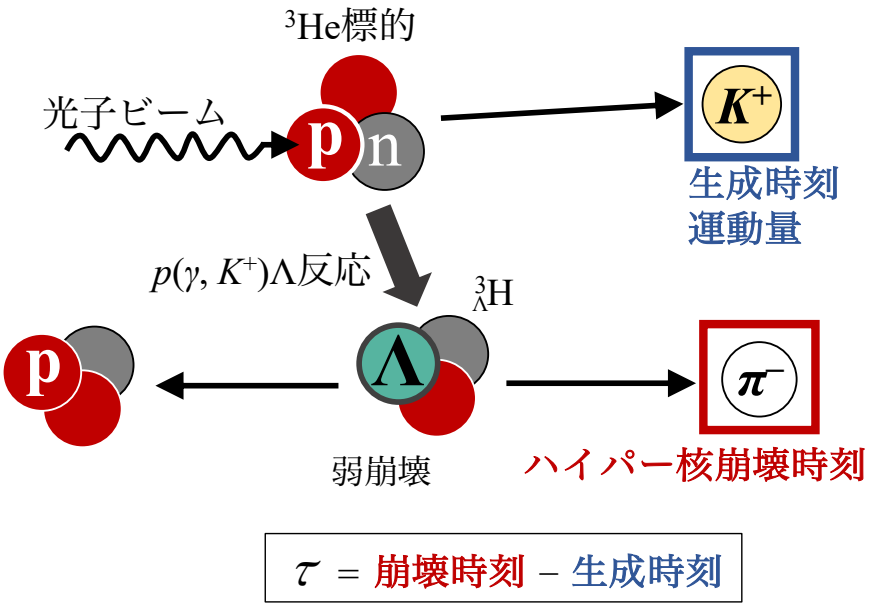


図 1.19: ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験原理の概念図。

図 1.20 に実験セットアップの概観を示す。液体 ${}^{3}\mathrm{He}$ 標的は Sweep 電磁石後方に設置する。図中緑色の四角で示した部分には、中心部に標的を設置し、その周りを円筒形に囲むようにして内側から順番に飛行時間測定器、飛跡測定器、飛程検出器を設置する。これらの検出器群で ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 崩壊時の π^- 中間子を検出する。寿命の決定は、次式 1.3.2 で表される崩壊時間を用いて行う。

$$t_d = (t_{\pi^-} - \mathrm{TOF}_{\pi^-}) - (t_{K^+} - \mathrm{TOF}_{K^+}) \tag{1.3.2}$$

ここで、t_{π^-} は π^- 中間子が飛行時間測定器を通過する時刻、t_{K^+} は K^+ 中間子が図中 TOF1 検出器を通過する時刻である。また、標的内のハイパー核崩壊位置から π^- 中間子の飛行時間測定器までの飛行時間が TOF_{π^-}、K^+ 中間子の標的での生成位置から TOF1 検出器までの飛行時間が TOF_{K^+} である。この t_d をイベント毎に算出し、得られた t_d の分布に対して、崩壊分布を表す指数関数に検出器の反応を表すガウス関数をたたみ込んだ関数でフィッティングすることで、寿命を決定する。

実験セットアップのうち、NKS2 スペクトロメータ内部にはハイパー核生成点計測のための K^+ 中間子飛跡検出器を含む。またこの他、背景事象除去、ストレンジネス生成事象の同定を目的として、エアロジェルチェレンコフ検出器 (AC)、飛行時間測定器 (TOF2) を設置する。更に、標的周りの検出器群の位置較正とハイパー核崩壊点計測の

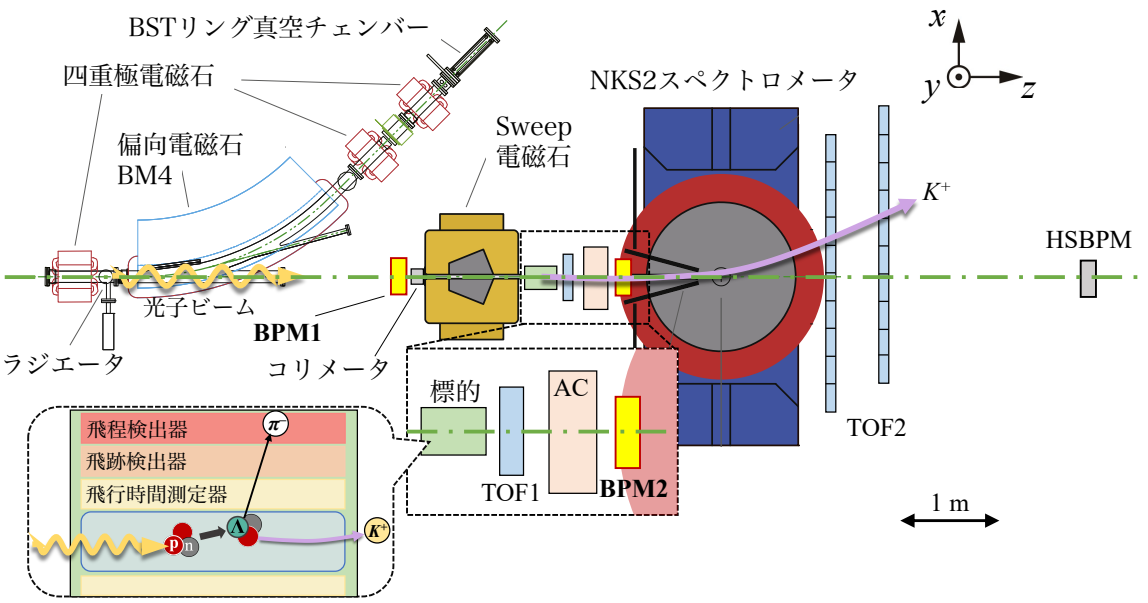


図 1.20: ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 寿命測定実験のセットアップ。Sweep 電磁石と NKS2 スペクトロメータの間には、標的セルを含んだ検出器群 (緑四角)、飛行時間測定器 TOF1、エアロジェルチェレンコフ検出器 (AC) を設置する。標的は液体 ${}^{3}\mathrm{He}$ であり、その周りを円筒形に囲む検出器群は飛行時間測定器、飛跡測定器、飛程検出器で構成される。

ため、本研究で開発したビーム位置モニタ (BPM1, BPM2)、既存のビーム位置モニタ (HSBPM)(1.1.2 節) を設置する。

ハイパー核崩壊点計測には、K^+ 中間子飛跡検出器 (位置分解能：$\sigma = 350$ μm)、π^- 中間子飛跡検出器 (位置分解能：$\sigma = 450$ μm) の計測結果と光子ビームの中心位置を用いる。この寿命測定実験では、10 ps オーダーの精度 (先行研究の 2 倍以上の精度) で ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命を測定することを目指している。従って、ハイパー核生成・崩壊点の位置精度は光速換算で 0.3 mm を達成する必要がある。このため、K^+ 中間子・π^- 中間子飛跡検出器の位置分解能と同程度の精度でビーム中心位置を測定することを要求しているが、前述の通り標的位置付近 (ラジエータから約 3 m 地点) で行える測定はインスタントカメラによる手法のみであり、新たに定量的かつ十分な精度を持つビームプロファイルシステムを導入する必要がある。

1.3.3 本研究の目的

ビームの位置や大きさを精細かつ正確に測定することは、加速器の理解と運用のためだけではなく、そのビームを用いた物理実験を遂行する上で非常に重要である。特に 1.3.2 節で紹介した ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 直接寿命測定実験では、標的周囲の検出器群の位置較正とハイパー核

生成崩壊点計測のために位置分解能 0.3 mm の精度でビームプロファイルを知る必要がある。BM4 光子ビームラインの標的周辺にて従来用いてきたフィルムカメラによるプロファイルは、非定量的かつリアルタイム測定が不可能であるという問題がある。また、既存のビーム位置モニタ HSBPM は既に定量的なビームプロファイルに成功しているが、この HSBPM は標的周辺のビーム測定に応用することができない。標的周辺 (ラジエータからの距離 3 – 5 m) の光子ビームサイズはフィルムカメラの測定から約 ϕ1 cm と予想されるが、HSBPM の x 層、y 層に用いられているセグメントの幅は 3 mm であり、ビームのプロファイルを決定するためにはセグメント幅を小さくする必要がある。更に、光電子増倍管を用いていることによる筐体サイズの制限から、標的周辺に設置することができない。

そこで本研究では、ビーム上流側の光子ビームプロファイルに適したビームプロファイルモニタ (BPM) の開発を行なった。数 10 MHz に及ぶ高強度光子ビーム測定のため、高サンプリングレートを有するデータ収集システムを導入した。また、開発した BPM を用いて、前節で紹介した BST リング周回電子ビームの研究への応用も試みた。Tagger の計数率を用いた電子ビームの強度分布測定 [15] では、ビームの中心付近のデータがない。これは信号読み出し速度とデータ収集モジュールのレート耐性の限界に起因する。新たに導入したデータ収集システムと高速信号読み出し回路により、ビーム中心付近を含むより高精度な測定が期待される。また、BM4 ラジエータ地点では本研究が初めての測定である。

本研究の目的は、次章に挙げる要求性能を達成するビームプロファイルモニタを開発・製作し、実際に BM4 光子ビームラインにおいてビームプロファイリングを行うことで、物理実験を行う際の情報提供、また加速器運転のためのフィードバックに繋がるデータを取得することである。

第 2 章

ビームプロファイルモニタ (BPM) の基本設計

本章では、BPM に対する要求性能を挙げ、これらを達成する基本設計について述べる。更に、実際の組立の過程や筐体・回路デザインについて説明する。

2.1 要求性能

次の 5 点を BPM の要求性能として挙げる。

1. **誤差 0.1 mm 以下の位置分解能**

   前章で挙げた物理実験では、0.3 mm の精度でビーム位置測定を行うことを要求している。BPM の要求性能として、目標のビーム位置測定精度を 0.1 mm とする。なお、測定する光子ビームは従来のカメラ用フィルムと HSBPM によるプロファイルの結果より、ビームライン上流 (Sweep 電磁石手前) で約 $\sigma \sim 1.5$ mm、ビームライン中流 (NKS2 スペクトロメータ入口) で約 $\sigma \sim 2.5$ mm 程度であると予想される。

2. **荷電粒子背景事象の除去**

   高エネルギーの光子ビームはラジエータ地点で生成された後、アルミニウム製フランジ窓や空気などの物質と相互作用し電子・陽電子を対生成する。これらの荷電粒子は光子ビーム測定における背景事象となる。従って BPM では正確な光子ビーム測定のため、電子・陽電子背景事象と光子の分離を可能にする必要がある。

3. **少ない物質量**

   光子ビームは検出器の物質内とも相互作用する。検出器内で余分な電子・陽電子対生成を避けるため、ビーム上流に用いる物質量は可能な限り抑える必要がある。

4. **磁場中での安定した動作**

   実験室には加速器の電磁石や荷電粒子除去用の Sweep 電磁石、電磁石を有する NKS2 スペクトロメータがあり、これらの漏れ磁場 (0.3 T 程度) 中で安定して動作可能である必要がある。

5. **数 MHz の高強度光子ビーム測定**

   光子ビーム強度は標識化されていないものを含めると数 10 MHz に及ぶ。このため、可能な限り deadtime less なシステムが必要である。

6. **ビームのスピルサイクルと同期したリアルタイムモニタリング**

   前述 (1.2.1 節) の通り、BST リングではスピル毎に周回電子ビームを入れ替え、ラジエータの挿入を行なっている。従ってスピル毎にデータを区別できるデータ収集が望ましい。更に、スピル時間内変動をモニタリング可能なデータ収集システムの構築が必要である。

2.2　光子ビームの検出機構

図 2.1 が製作した BPM の外観と内観である。$120.0^{H} \times 128.5^{W} \times 34.5^{T}$ mm^3 の筐体の内部に粒子検出のためのプラスチックシンチレーションファイバー (Kuraray SCSF-78) や、光検出器 SiPM を搭載した回路基板を固定した。検出部分の有効面積は $22.5^{H} \times 22.5^{W}$ mm^2 であり、約 $\sigma \sim 2.5$ mm の光子ビームを十分カバーしている。

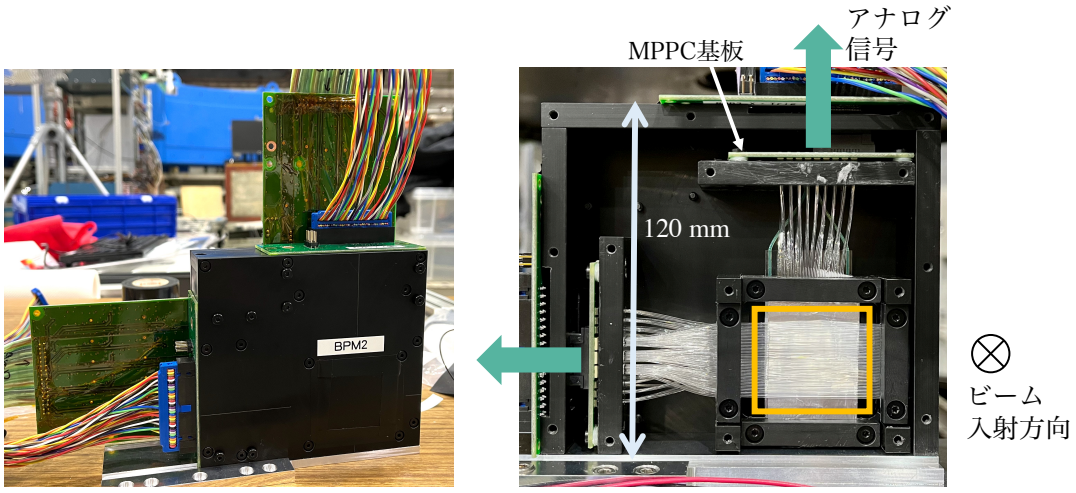


図 2.1: BPM の外観 (左) と内観 (右)。筐体の素材は加工がしやすく耐衝撃性に優れた ABS 樹脂であり、遮光のため黒色を採用した。検出部分は右図の橙の四角で囲まれた部分である。各ファイバーの端面に SiPM を 1 つずつ接触するように固定した。SiPM のアナログ出力信号は筐体外側の信号処理回路へと送られる。

図 2.2 に検出部分の概念図を示した。検出器の基本構造はプラスチックシンチレーションファイバーと SiPM を組み合わせたものであり、光子ビームを荷電粒子に変換し、その位置を検出する。次節より各層の役割について解説する。

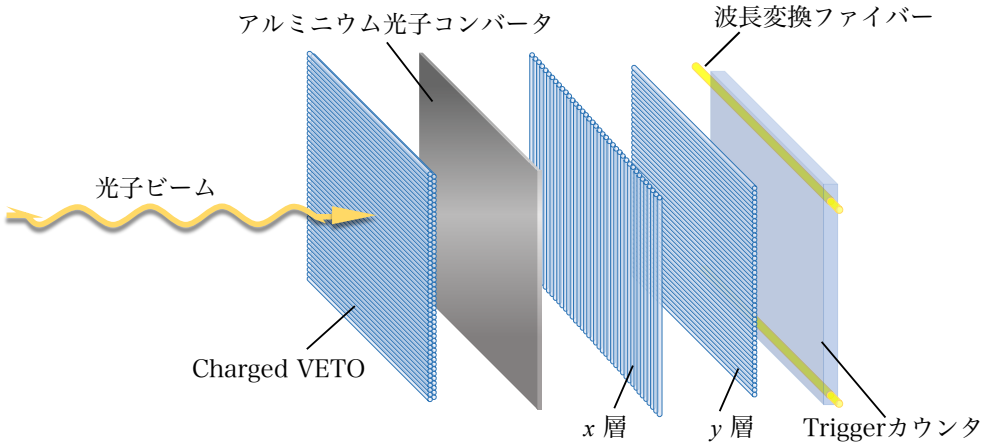


図 2.2: 検出部分の概念図。ビーム上流側から順番に、荷電粒子背景事象を検出する Charged VETO カウンタ、光子の一部から電子・陽電子対を生成するためのアルミニウム光子コンバータ、重力方向、水平方向に並べた粒子位置検出のための 2 層のファイバー層 (x 層・y 層)、イベント選択に用いる Trigger カウンタである。実際には、各カウンタ同士の間隔は 2 mm 以下である。

2.2.1　荷電粒子除去のための Charged VETO カウンタ

ビーム最上流には背景事象である荷電粒子を検出し、除去するための Charged VETO カウンタを設置した。光子ビームの一部はラジエータ位置で生成した後、実験室内の空気やその他の物質との相互作用により電子・陽電子対生成を起こす。光子ビームの精細なプロファイリングのため、この電子または陽電子の背景事象を Charged VETO カウンタによって効率的に除去する必要がある。

一方、ビーム最上流に設置する検出器であるため、物質厚に注意する必要がある。 物質厚が大きいと、更なる不要な電子・陽電子対生成を起こす可能性が高くなるためである。ここで適切な物質厚を見積る上で重要な、物質の変換長について述べる。

変換長 X_p とは γ 線が物質中を通過した時に光子フラックスが $1/e$ になる距離であり、放射長 X_0 との関係は次のように表せることが知られている。

$$X_p = \frac{9}{7} X_0 \tag{2.2.1}$$

従って光子ビームがある厚さ x_t の物質を通過した時に電子・陽電子対生成を起こす確率は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \text{Conversion probability}(\%) &= \left(1 - \exp\left(-\frac{x_t}{X_p}\right)\right) \times 100 \\ &= \left(1 - \exp\left(-\frac{x_t}{\frac{9}{7}X_0}\right)\right) \times 100 \end{aligned} \tag{2.2.2}$$

BPM の検出部分で用いる物質の放射長は表 2.1 にまとめた。この値を用いた式 2.2.2 の計算結果を図 2.3 に示す。

表 2.1: 各物質の放射長 [17][18]

物質	[g/cm^2]	[cm]
プラスチックシンチレータ	43.8	42.4
アルミニウム	24.01	8.89

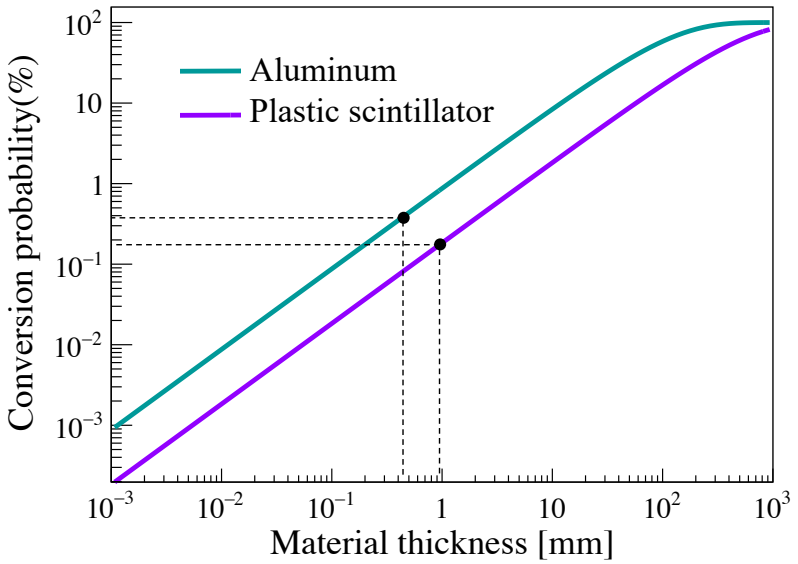


図 2.3: 各物質における光子の変換確率。図中の黒点は本実験で用いた厚さである。

以上の計算から、厚さ 1 mm のプラスチックシンチレータを用いた場合、0.18% の光子フラックスが電子・陽電子対生成を起こすことが分かる。VETO カウンタの場合その検出効率も重要な要素であるため、ϕ 0.5 mm のプラスチックシンチレーションファイバー (Kuraray SCSF-78) を 99 本使用し、隙間をなくすよう俵積み構造で並べた (図 2.4)。俵積み構造の場合、 z 軸方向の厚みを図のように 0.93 mm と概算すると、光子の変換確率は約 0.17% である。これにより、材料の厚みを抑えながら荷電粒子の背景事象を効率的に検出することを可能にした。シンチレーションファイバーは端で 33 本ずつを 1 つに束ね、並列接続した 3 個の MPPC (浜松ホトニクス S13360-3050PE(2.2.5 節)) にそれぞれ接触させた (図 2.5)。

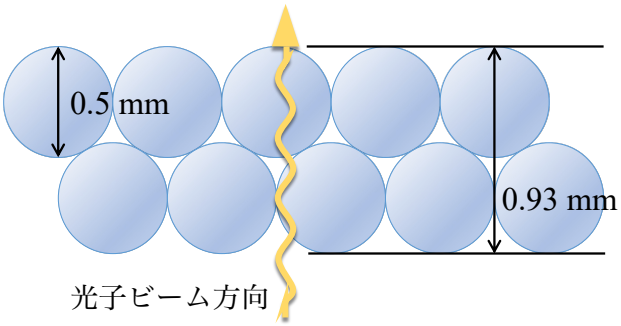


図 2.4: 俵積み構造の概念図。ファイバーの断面図である。

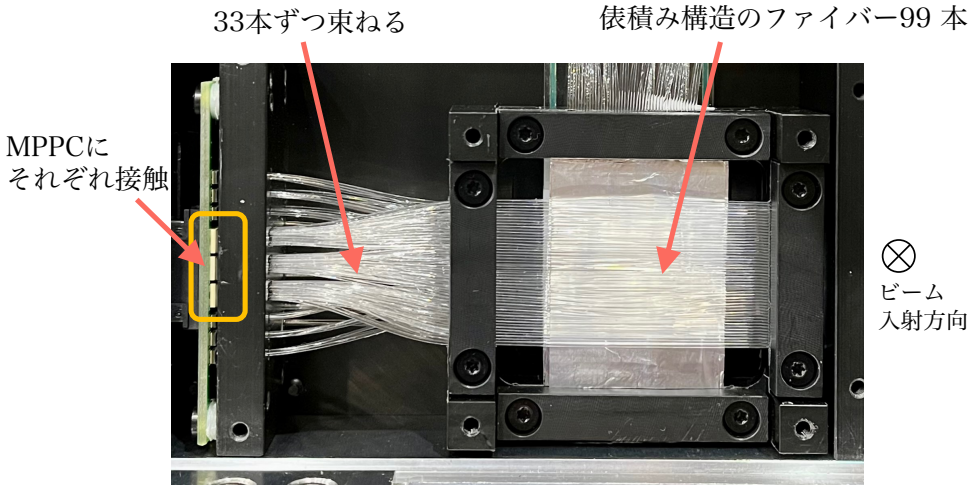


図 2.5: Charged VETO カウンタのファイバーと MPPC の接続。光子ビームの検出部分では 99 本のファイバーを俵積み構造で並べ、33 本ずつ束ねて 3 個の MPPC に接触させた。

2.2.2 光子コンバータ

2 層目の光子コンバータは光子ビームの一部から電子陽電子対生成を起こす役割を持つ。素材にはアルミニウムの薄膜を採用した。前節の計算 (式 2.2.2, 図 2.3) より、厚さ 500 μm のアルミニウム箔の場合 0.43% の光子フラックスが電子・陽電子対生成を起こす。実験の際には $48 - 432$ μm の厚さのアルミニウム箔を用意し、その厚さを変えながら適切な計数率のスタディを行った。

2.2.3 粒子位置決定のためのファイバー層

3 層目、4 層目は粒子通過位置を検出するファイバー層である。アルミニウム箔を通過した光子ビームの一部は電子・陽電子対に変化する。この対が広がってしまうことによるマルチヒットイベントの生成や、光子コンバータとファイバー層間での更なる散乱等の物理現象を防ぐため、光子コンバータとファイバー層の距離は 0.1 mm 以下の限界まで近づくよう設計した。

BPM に対する最も重要な要求性能は位置分解能である。誤差 0.1 mm 以下を達成するために必要なセグメントの幅は次のように見積もった。ここで、ビームのプロファイリングの方法として、縦横方向のファイバーのヒット分布に対し適切な関数をフィッティングし、その中心値と幅を得るという方法を想定している。フリー解析ライブラリ ROOT(CERN [28]) を用いてガウス分布をランダム生成し、その統計量とセグメントの幅のそれぞれに対して必要な条件を調べた。図 2.6 に結果を示す。ここで、フィットしているガウス関数の平均 μ をビーム中心、σ をビーム幅として評価している。フィットの決定精度として、それぞれの誤差を $\Delta\mu$、$\Delta\sigma$ とした。

この結果から、セグメント幅 ϕ=1.5 mm×15 channels のファイバーを用いた場合、σ ∼1.5 mm の光子ビームに対しては 1,000 イベント、σ ∼2.5 mm の光子ビームに対しては 2,500 イベントの測定で要求性能を達成できることが分かった。

先に述べたように、余分な電子・陽電子対生成を起こす可能性はできる限り抑える必要がある。このため、z 軸方向の厚みを抑える目的で、ϕ 1.5 mm のファイバー 15 本ではなく、ϕ 0.5 mm のプラスチックシンチレーションファイバー (Kuraray SCSF-78) を 1 層あたり 45 本使用し、3 本を 1 セグメントとしてまとめた (図 2.7)。ファイバーの端面は、1 セグメントずつそれぞれ 1 つの MPPC (浜松ホトニクス S13360-1350PE(2.2.5 節)) に接触させた。従って、1 セグメントは 1.5 mm の幅を持ち、重力方向、水平方向にそれぞれ 15 セグメントずつ用意した。以下、重力方向に並べたファイバー層は x 方向に位置分解能を持つので x 層、同様に水平方向に並べたファイバー層は y 層とする。

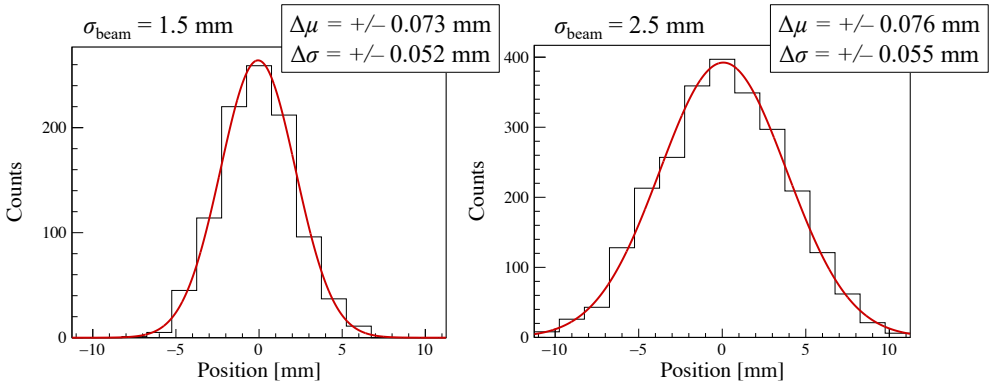


図 2.6: 適切なセグメント幅と統計量の見積もり。左図は光子ビームの幅 (σ) が 1.5 mm、イベント数 1,000 イベントの場合、右図は 2.5 mm、2,500 イベントの場合の結果である。

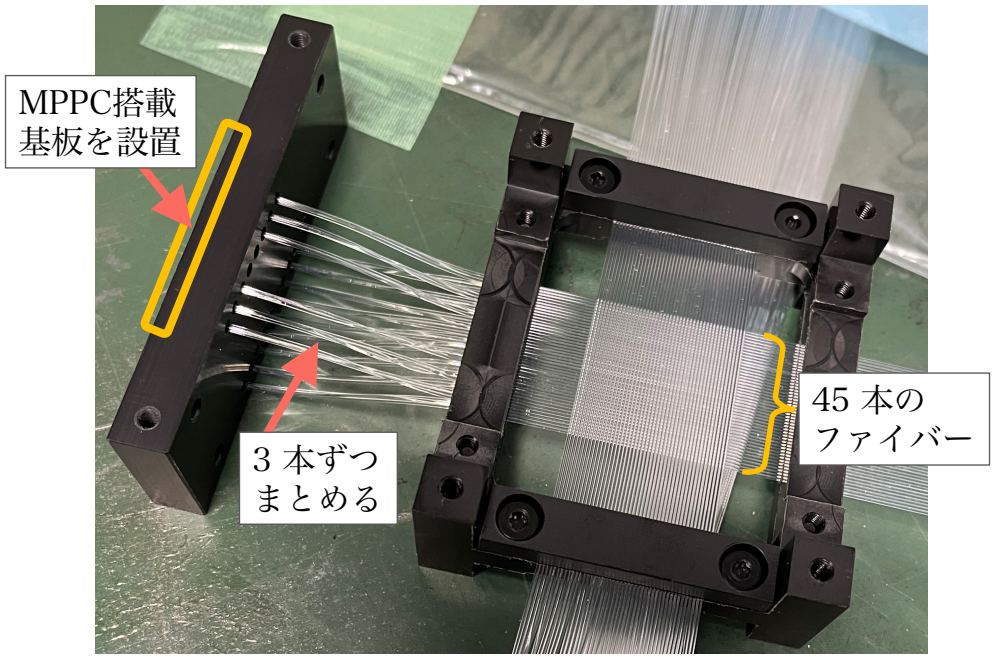


図 2.7: x 層、y 層のファイバー固定の様子。45 本のファイバーを並べ、3 本ずつ束ねて 1 セグメントとし、それぞれ MPPC と接触するよう固定した。

2.2.4　イベント ID のための Trigger カウンタ

BPM で用いたデータ収集システムでは各カウンタのヒット情報を全て記録し、オフライン解析上でイベントを選択する。データ収集システムについては 2.5 節で詳しく解説する。

光子のイベント選択は、次式の条件で行う。

$$\text{Photon event} = [\overline{\text{Charged VETO}}] \otimes [x \text{ 層}] \otimes [y \text{ 層}] \otimes [\text{Trigger}] \tag{2.2.3}$$

即ち、光子として選択されるイベントは、Charged VETO カウンタにはヒットが無く、x 層、y 層とトリガーの 3 つのカウンタをあるタイムウィンドウ内で同時にヒットしたものである。一方、「全てのカウンタでヒットがあったイベント」を選ぶと、検出器上流で発生した荷電粒子背景事象を選ぶことができる。トリガーカウンタはカウンタ同士のタイムウインドウを決める役割と、検出された粒子が全てのカウンタを通過したことを保証する役割を持つ。

トリガーカウンタには厚さ 2 mm のプラスチックシンチレータのプレート (Eljen EJ-212) を用いた (図 2.8)。シンチレーション光は両端に埋め込んだ波長変換ファイバー (kuraray Y-11 ϕ1 mm) によって MPPC (浜松ホトニクス S13360-1350PE(2.2.5 節)) へ送る。2 本の波長変換ファイバーそれぞれに MPPC を 1 つずつ接触させ、2 つの MPPC は並列接続した。

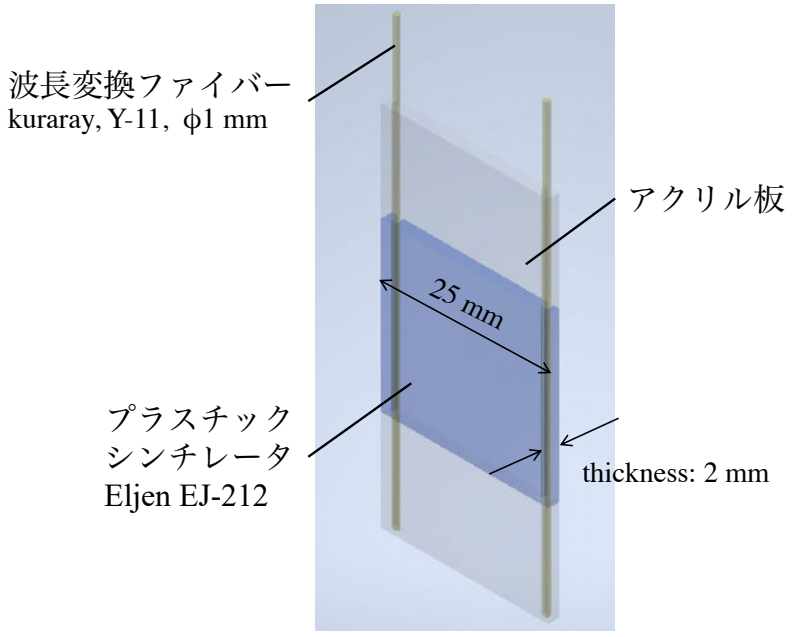


図 2.8: トリガーカウンタの模式図。中央部分の青色で示した部分がプラスチックシンチレータであり、有効面積は $25^H \times 25^W$ mm^2 である。両端に波長変換ファイバーを埋め込んだ。

2.2.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

各カウンタを荷電粒子が通過すると、シンチレーション光を発光する。このシンチレーション光を検出する光検出器として、浜松ホトニクス製の MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を用いた。MPPC は SiPM(Silicon Photomultiplier) の 1 種で、複数のガイガーモード Si APD(Silicon Abaranche Photo Diode) のピクセルから成るフォトンカウンティングデバイスである。優れた光子計測能力を持つ光半導体素子で、1 光子レベルの微弱光を検出する様々な用途に対し現在では広く用いられている。

動作原理 [29]

MPPC の構造を図 2.9 に示す。MPPC はガイガーモード Si APD と電圧降下のためのクエンチング抵抗の組み合わせを基本単位 (1 ピクセル) とし、多数のピクセルを二次元に電気的に並列接続した構造を持つ。Si APD のフォトダイオードにバンドギャップ以上のエネルギーをもった光が入射すると、そのエネルギーにより電子 – 正孔対が発生する。この電子 – 正孔対が連鎖的に新たに電子 – 正孔対を発生させ、APD はその内部で発生したキャリアを増倍する (アバランシェ増倍)。このとき、Si APD は一定の飽和した信号を出力する。この状態をガイガーモードと呼び、ガイガーモードに達する逆電圧を降状電圧 V_{BR} という。ガイガーモード下では入射光子数によらず一定の出力が得られる。MPPC のピクセルはこの特性を利用し、光子を検出する毎に同じパルスを出力する。複

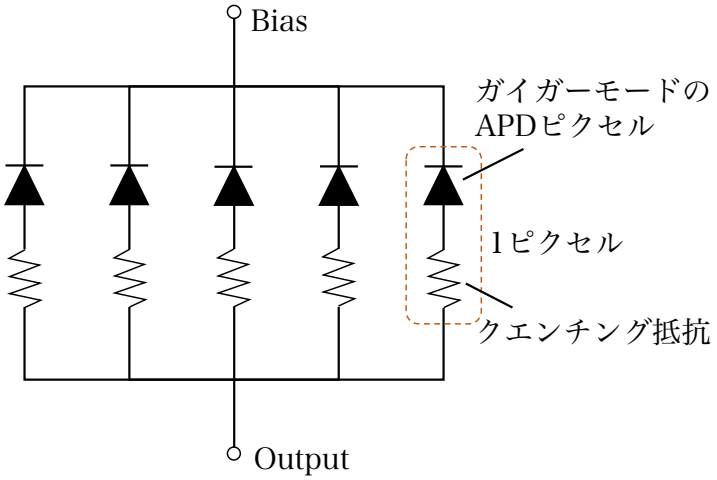


図 2.9: MPPC の構成。Si APD とクエンチング抵抗を直列接続したピクセルを、並列接続した構成になっている。

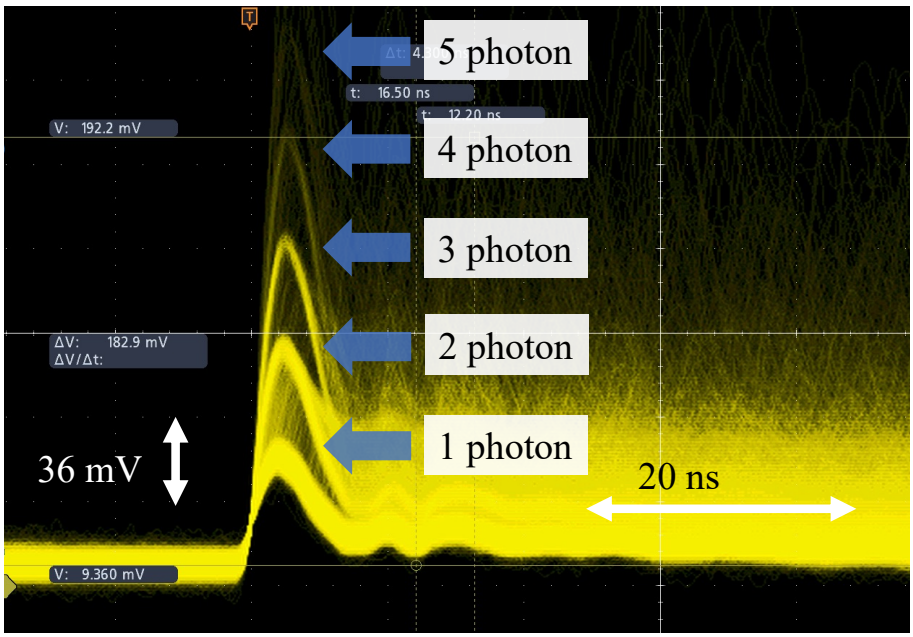


図 2.10: 実際の BPM の MPPC の出力信号 (後述の信号増幅回路からの出力信号の様子)。1 ピクセルに相当するパルスは約 45 mV のゲインを持ち、2 ピクセル、3 ピクセルと検出したピクセル数に比例してパルス高が大きくなる。

数のピクセルで発生したパルスは、重ね合わせて出力される (図 2.10)。各ピクセルからの出力パルスは 1 つであり、入射光子数によって変化しない。MPPC によって得られる電荷量 Q_{MPPC} は次式のように記述できる。

$$Q_{\mathrm{MPPC}} = C_{\mathrm{MPPC}}(V_{\mathrm{bias}} - V_{\mathrm{BR}}) = \frac{M}{e}(V_{\mathrm{bias}} - V_{\mathrm{BR}}) \tag{2.2.4}$$

ここで、V_{bias} は印加電圧、C_{MPPC} は検出器容量であり、C_{MPPC} に素電化 e を掛けた値 M をゲイン (倍増率) という。

各 APD に直列接続されたクエンチング抵抗は、ガイガー放電 (ガイガーモード下で電荷が出力されること) が生じる際に流れる電流によって電圧降下を生じさせ、自ずとガイガーモードを停止する。これは、APD に逆電圧を印加し続ける状態では一度ガイガーモードに達するとその状態が維持されるため、次に入射する光子を検出できないという問題を解決する役割を担っている。

BPM に採用した 2 種の MPPC の概要を表 2.2 にまとめる。2 種の違いはその有効受光面サイズであり、降状電圧 V_{BR} はどちらも 53±5 V、推奨動作電圧 V_{op} は V_{BR}+3 V である。

表 2.2: 使用した MPPC の性能値 [29]

型名	ピクセルピッチ	有効受光面サイズ	ピクセル数	感度波長範囲
S13360-1350PE	50 μm	1.3×1.3 mm^2	667	$320 - 900$ nm
S13360-3050PE	50 μm	3.0×3.0 mm^2	3600	$320 - 900$ nm

2.3 筐体デザインと組み立て

検出器筐体のデザインと設計は、オートデスク株式会社が提供する CAD(Computer-Aided Design) ソフトウェア“Autodesk Inventor”を用いて行った (図 2.11)。BPM はコリメータの前後をリモート制御により移動させて用いることを想定しており (実験セットアップについては 3.1 章で述べる。)、限られたスペースの中を移動できるよう可能な限り小型化する必要があったため、ファイバーを支える強度を保ちながら可能な範囲で小型化できるよう設計した。

図 2.12 に示す治具は、前節で説明した検出部分のファイバーを固定する治具である。マルチヒットイベントの生成を抑制するため、ビーム上流側の VETO カウンタや光子コンバータによって生成した電子・陽電子対を即座に検出できるよう、光子コンバータと x 層の距離は 0.1 mm 以下、x 層と y 層の距離は 2 mm になるよう設計した。治具の溝にファイバーを並べ、ラッチをネジ留めして固定する構造になっている。

図 2.13 にファイバー・MPPC 固定用治具の概要を示す。全てのファイバーをこの治具の貫通穴にチャンネル番号順に固定した (図 2.16)。治具の裏面に MPPC の読み出し回路基板を固定することにより、各ファイバーの端面が対応する各 MPPC に接触する。検出器全体の小型化のため、セグメント間の間隔は 3 mm とし、その間隔内に 1.3×1.3 mm^2 の MPPC と抵抗、コンデンサが並ぶよう基板をデザインした (2.4 節)。

筐体には加工しやすく耐衝撃性に優れた ABS 樹脂を採用した。これは、約 200 本に及ぶファイバーを正確に固定し動かないようにするためであり、削り出し加工は株式会社ジーテックに外注した。樹脂の色は遮光の目的で黒色を採用した。

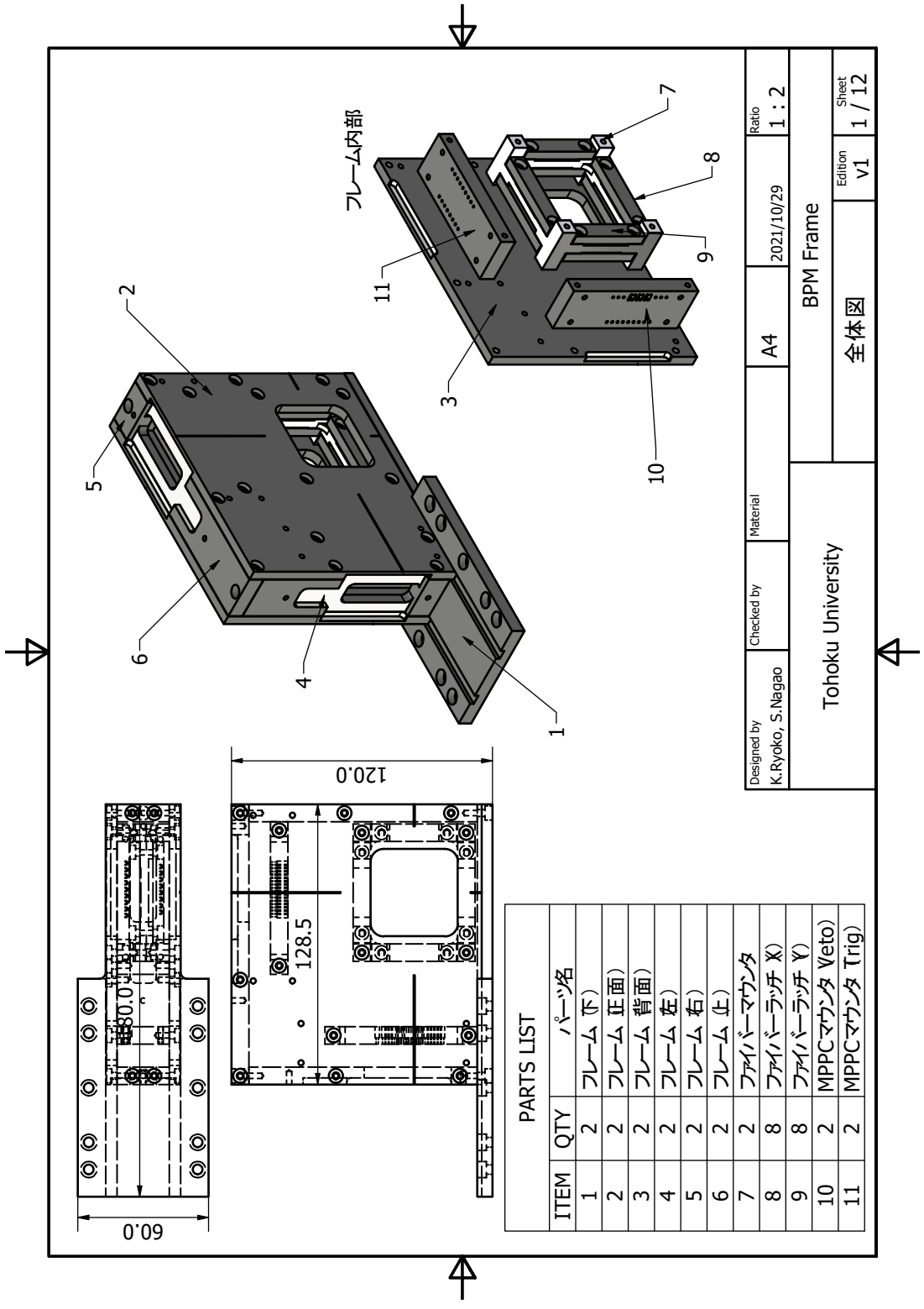


図 2.11: 実際の BPM 筐体の図面概要。図中のスケールの単位は mm である。

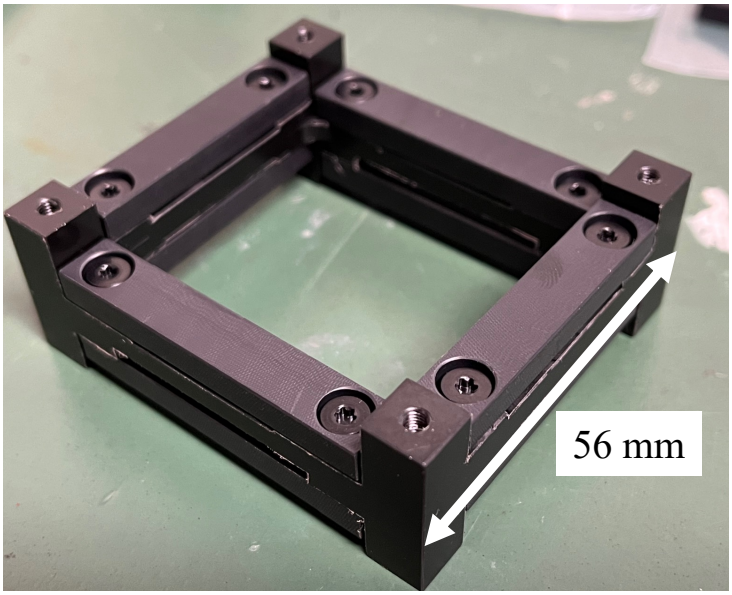


図 2.12: ファイバー固定治具。

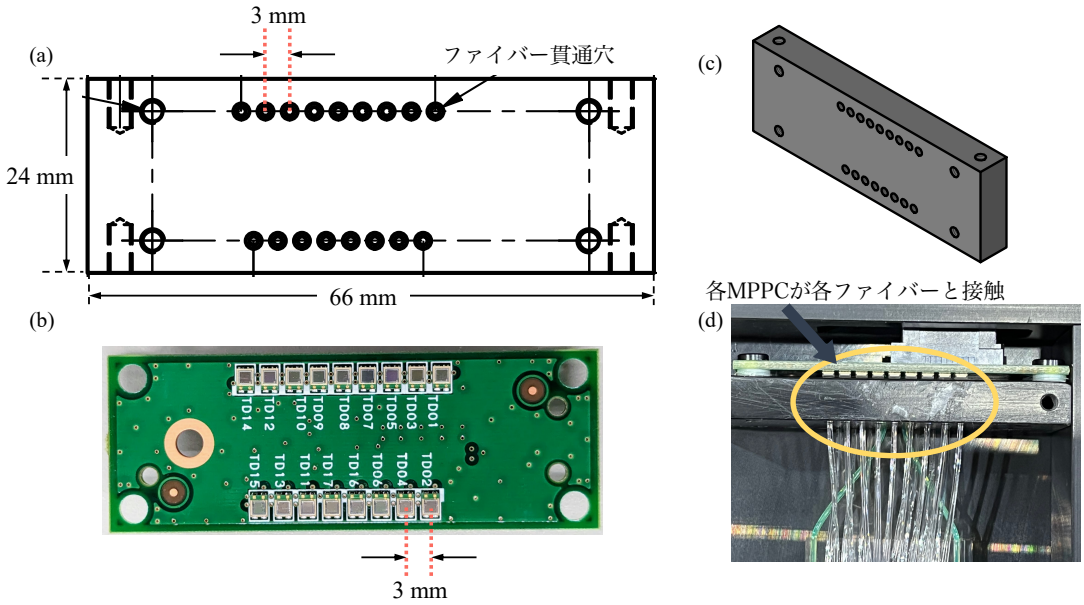


図 2.13: ファイバー・MPPC 固定用治具の概要。(a) 設計図の一部、(b)MPPC 読み出し回路基板 (2.4 節)、(c) 治具のイメージ図、(d) 実際にファイバーと回路基板を固定した様子。ファイバーの貫通穴と MPPC の配置が一致するよう設計した。

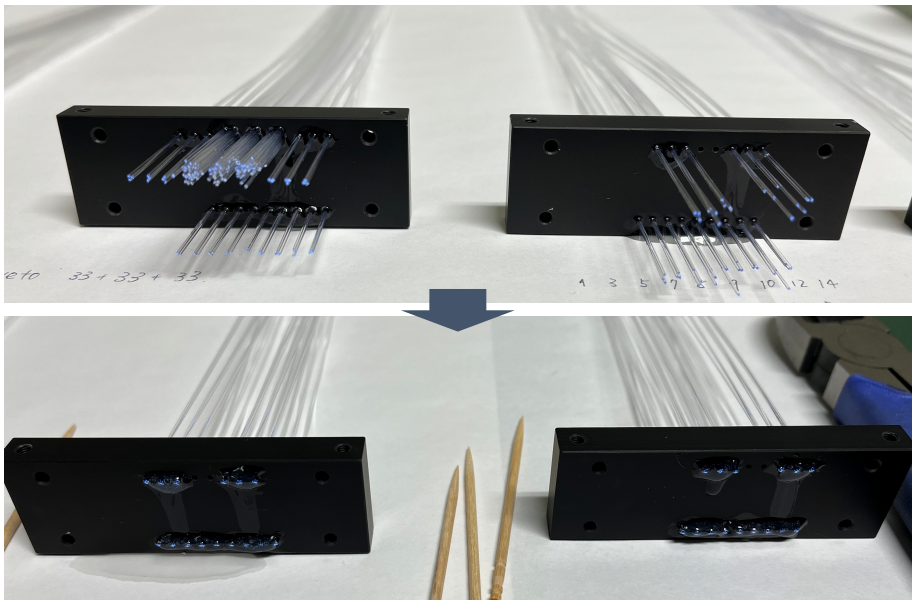


図 2.14: ファイバー固定の様子。オプティカルセメントを用いて各穴に通したファイバーを固定し (上図)、エポキシ接着剤によってファイバーが割れないよう更に補強する (下図)。エポキシ接着剤が乾いたら、ファイバーの端面を紙やすりや布やすりなどを用いてよく磨く。

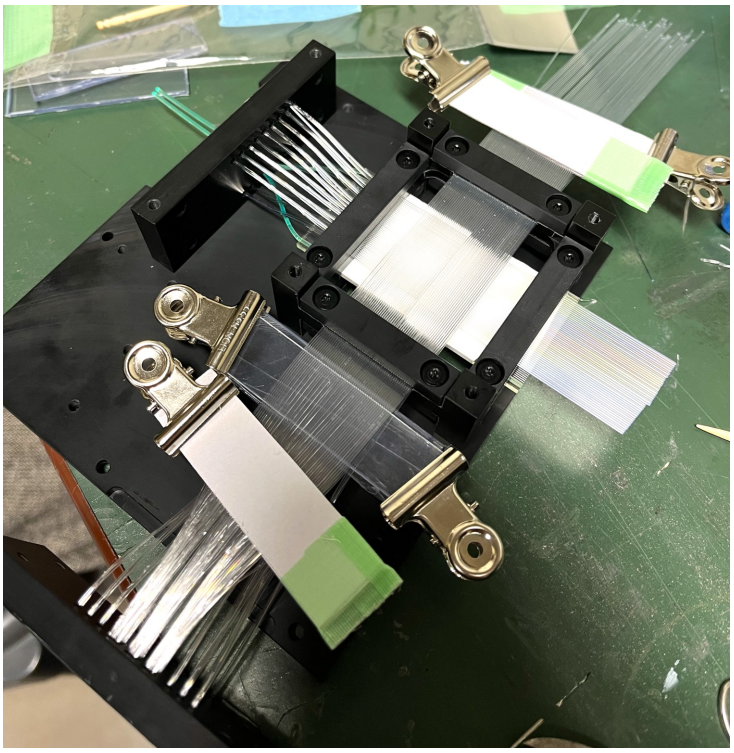


図 2.15: ファイバー固定の様子 (2)。ファイバーは手作業で並べ固定した。

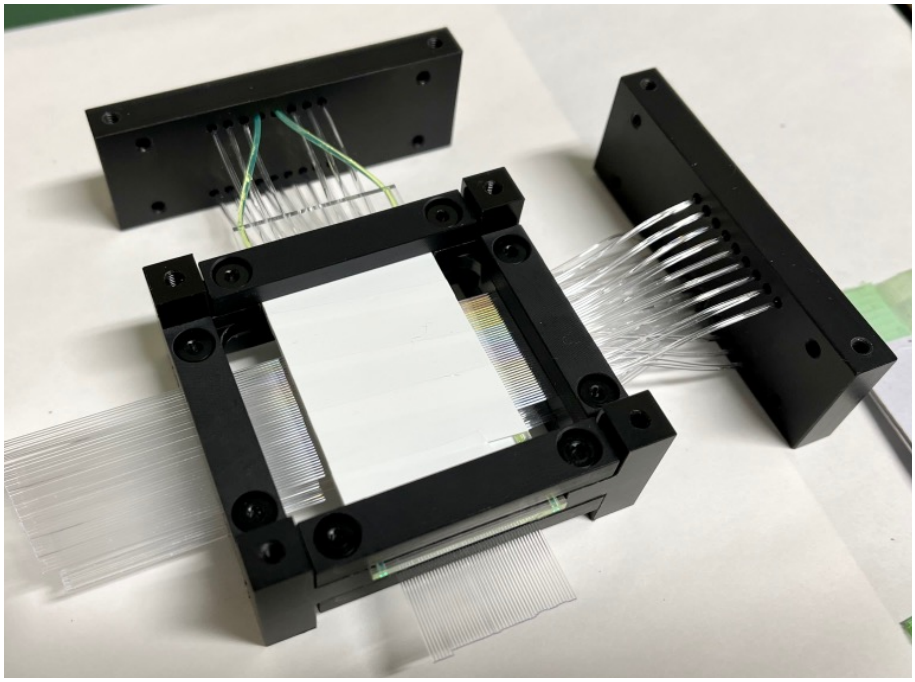


図 2.16: ファイバー固定の様子 (ビーム下流側)。トリガーカウンタのシンチレータには検出効率を上げるため、反射材としてテフロンテープを巻いた。

2.4　信号処理回路の開発

本節では、開発した信号読み出し回路と処理回路について説明する。図 2.17 に BPM の信号読み出し回路の概要を示す。図中の MPPC board に MPPC をファイバーのセグメント数分マウントした。本来、MPPC とアンプは出来る限り近くに設置することが望ましいが、BPM では省スペースのためアンプを搭載した回路を別に用意した。図中の Relay board は MPPC へのバイアス電源供給ラインと MPPC からのアナログ信号出力ラインを持つ。出力したアナログ信号はアンプとコンパレータを搭載した高速信号処理回路 (Amp&ToT circuit, 2.4.2 節) によって差動伝送規格 LVDS 信号 (Low Voltage Differential Signaling) に変換し、データ収集モジュール (図中 HUL, 2.5 節) に伝送する。

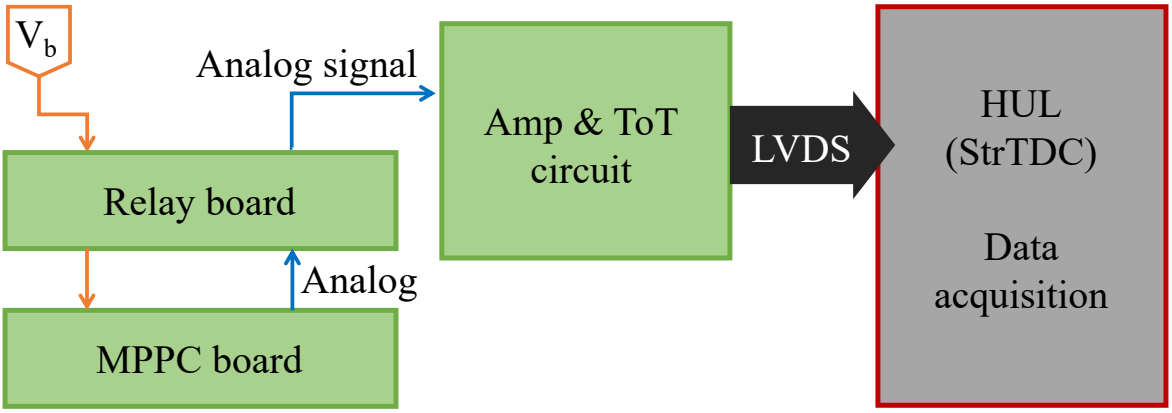


図 2.17: BPM における信号処理回路の概要

開発した信号処理回路はプリント基板として製作した。プリント基板のデザインは CADLUS X と呼ばれるソフトウェア (株式会社ニソールが開発、販売する基板設計用 CAD) を用いて行った。

2.4.1　MPPC 信号読み出し回路

BPM の筐体サイズとファイバーの間隔に適合するよう、MPPC 信号読み出し回路の開発を行った。図 2.18 に MPPC 信号読み出し回路の概観を示す。前述の通り、Relay board は筐体外部から内部の MPPC へバイアス電源を供給するラインと、筐体内部の MPPC から外部へアナログ信号を出力するラインを持つ。Relay board と MPPC board の接続には 40 ピンコネクタ (ヒロセ電機 FX20-40S-0.5SV/FX20-40P-0.5SV15(10)) を用い、省スペースと取り外しを可能にした。MPPC board にはファイバーの間隔に適合す

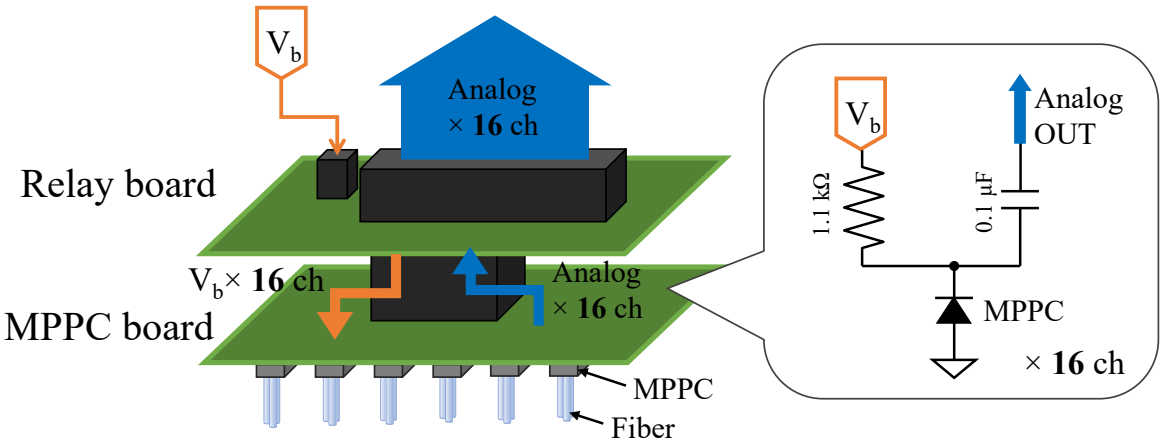


図 2.18: MPPC 信号読み出し回路の概観

るよう、MPPC を搭載した。図 2.18 に示すように各 MPPC には電源の高周波ノイズを取り除くローパスフィルタを構成するため、∼1 kΩ の抵抗 (KOA RK73H1JTTD10R0F) と 0.1 μF のコンデンサ (KOA GRM155B11A104K) が必要である。これらの抵抗とコンデンサは、スペースを省くため MPPC を搭載した面の裏側に設置した。図 2.19 に CADLUS X を用いてデザインした配線・配置案、図 2.20、2.21 にそれぞれ実際の MPPC board、Relay board の写真を示す。

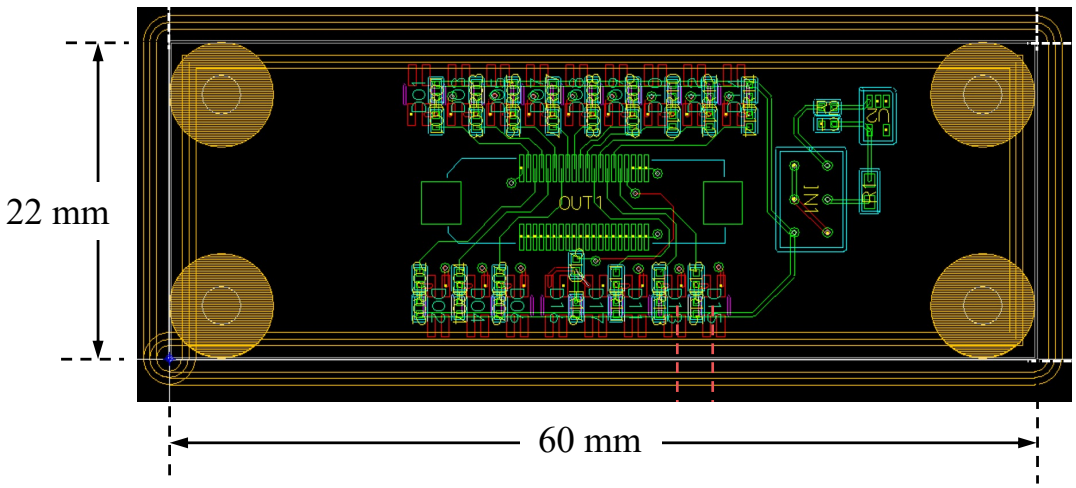


図 2.19: MPPC board の配線・配置案

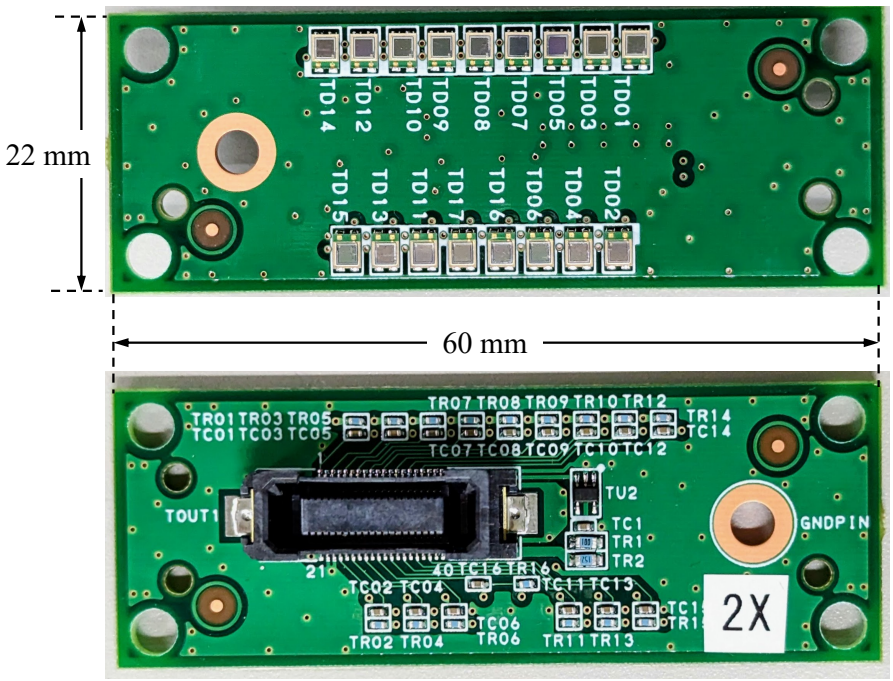


図 2.20: 実際の MPPC board。上図の表面には MPPC を等間隔に並べた。下図の裏面には抵抗、コンデンサとコネクタを配置した。

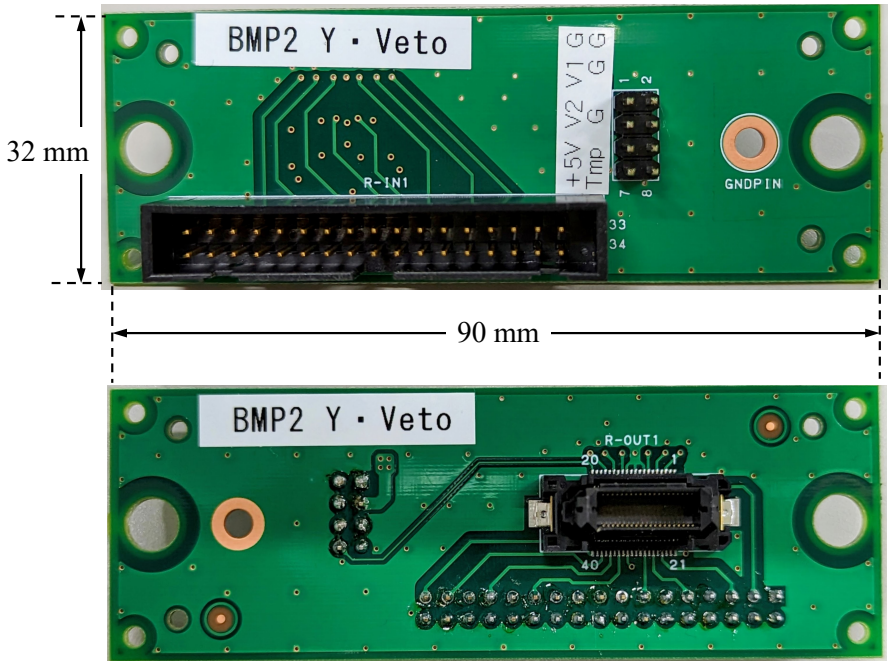


図 2.21: 実際の Relay board。上図の表面には 32 ピンコネクタ、電源供給用の 8 ピンを配置し、下図の裏面には MPPC board と接続するための 40 ピンコネクタを配置した。

2.4.2 信号増幅回路とデジタル変換回路

MPPC が出力するアナログ信号は、後述のデータ収集モジュール Hadron Universal Logic(HUL, 2.5 節) に入力するために LVDS 規格 (Low Voltage Defferential Signaling) に変換する必要がある。LVDS 信号は、CMOS や TTL などシングルエンドの伝送方式と比較すると、低消費電力で、ノイズに強く、高いデータレートが実現可能、という特徴を持つ。BPM ではアナログ信号を LVDS 信号へ高速に変換する信号処理回路を新たに開発した。図 2.22 に作成した信号増幅回路図を示す。MPPC のアナログ出力信号を反転増幅回路を通して増幅し、コンパレータを介してデジタル変換する。

反転増幅回路に用いたオペアンプは高速オペアンプ AD8000(Analog Devices

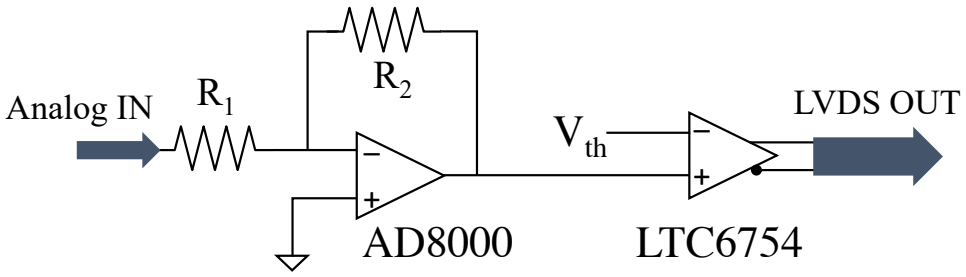


図 2.22: 信号増幅回路の概要。反転増幅回路には高速オペアンプ AD8000、比較回路にはコンパレータ LTC6754 を採用した。LTC6754 は LVDS 互換出力が可能。

AD8000YRDZ) である。このオペアンプはプラスチックシンチレータと MPPC を組み合わせた検出器開発の先行研究 [30] において使用実績がある。反転増幅回路では次式

$$V_{\mathrm{OUT}} = -\frac{R_2}{R_1} V_{\mathrm{IN}} \tag{2.4.1}$$

の関係式に従って信号の正負が反転し、増幅される。この抵抗値は波高が約 20 倍程度に増幅されるよう決定した。用いた抵抗値を表 2.3 に示す。

デジタル変換の方法には波高情報を時間情報に変換して計測する ToT 法 (Time over Threshold method) を用いた (図 2.23)。 この方法では入力信号のパルスに対してある閾値電圧 V_{th} を設定し、V_{th} を超えている時間は H(1)、下回っている時間は L(0) を出力する。従って、デジタル出力はその立ち上がりエッジに時間情報、パルス幅に波高に対応するエネルギー情報を持つ。この手法は時間情報とエネルギー情報を 1 つの信号線で同時に取得可能であり、データ収集系の回路規模を縮小しシンプルに構成できるため全体の

表 2.3: 信号増幅回路に用いた抵抗

抵抗	抵抗値 [Ω]	メーカー	型番
R_1	51	KOA	RK73H1ETTP51R0F
R_2	1101	KOA	RK73H1JTTD1101F

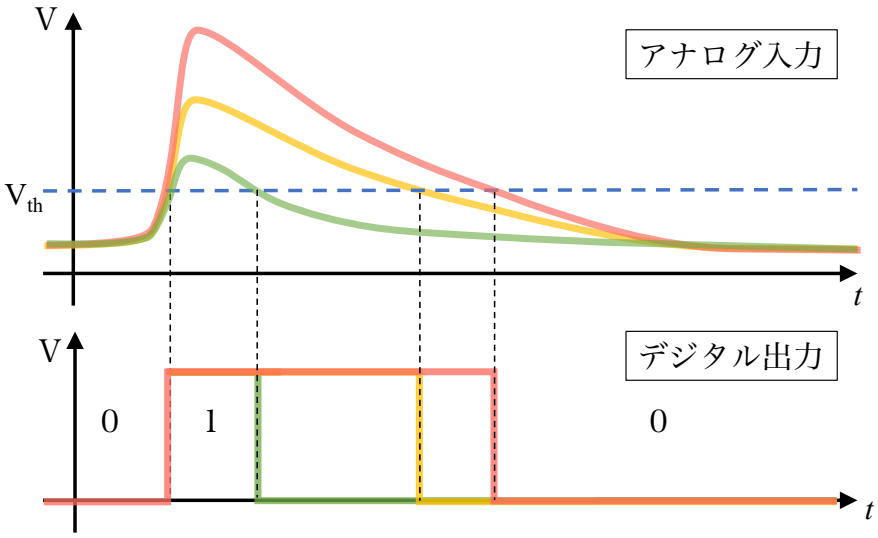


図 2.23: ToT 法の概念図。設定したある閾値電圧 V_{th} をアナログ入力信号 (上図) のパルスが超えている間、デジタル信号 (下図) を 1 として出力する。

コストを下げることができる。今回データ収集モジュールとして用いた HUL(2.5 節) のファームウェアは 1 イベントの時間幅を 4 – 150 ns 以内で受け付ける。このタイムレンジを効率よく使うため、パルス幅の中央値が大まかに約 80 ns になるようアナログ信号の整形を行った。デジタル変換を行うコンパレータには LTC6754(Linear Technology[31]) を採用した。LTC6754 は、内部ヒステリシスを持つコンパレータ[*1]であり、接続する外部抵抗の値に応じて 0 – 40 mV の範囲でヒステリシスの値を変えることができる。開発した変換回路ではヒステリシスを 40 mV に設定した。図 2.24 に、BPM のファイバー層を貫通するように $^{90}\mathrm{Sr}/^{90}\mathrm{Y}\beta$ 線源を照射した時のアナログ出力信号 (緑) とデジタル出力信号 (青) を示す。アナログ信号は回路図上のオペアンプ AD8000 の出力を示す。1

[*1] ヒステリシスコンパレータ：出力の状態 (1(h) または 0(l)) によって 2 つの閾値電圧を持ち、信号の不安定性を最小限に抑えることができる。用いた LTC6754 は正帰還を使用して更にヒステリシスの値を上げることが可能である。

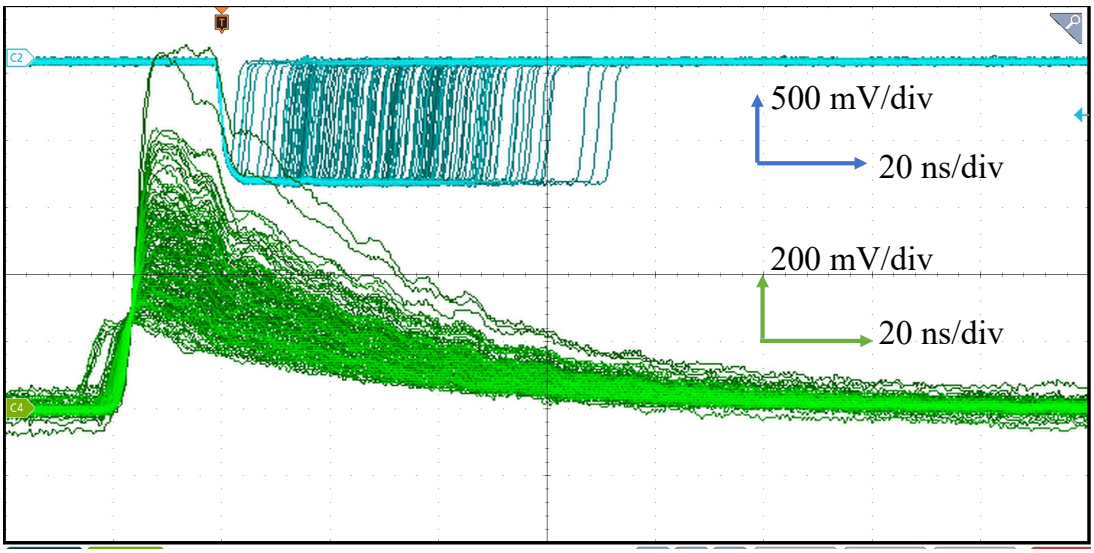


図 2.24: β 線源を照射した時のアナログ出力信号 (緑) とデジタル出力信号 (青)。

p.e.(MPPC の 1 ピクセル) に相当する出力は約 45 mV であり (図 2.10)、β 線源を照射した場合には約 10 p.e. 程度の出力が見られる。

アナログ信号の整形のための抵抗値決定や信号増幅に用いる回路の選択は、電子回路シミュレータ LTspice[32] を用いたシミュレーションと、実際の抵抗値評価による信号テストの結果をもとに行なった (図 2.25)。信号増幅・処理回路も MPPC 読み出し回路と同様に CADLUS を用いてプリント基板のデザインを行なった。図 2.26 に実際の信号増幅・デジタル処理回路を示す。

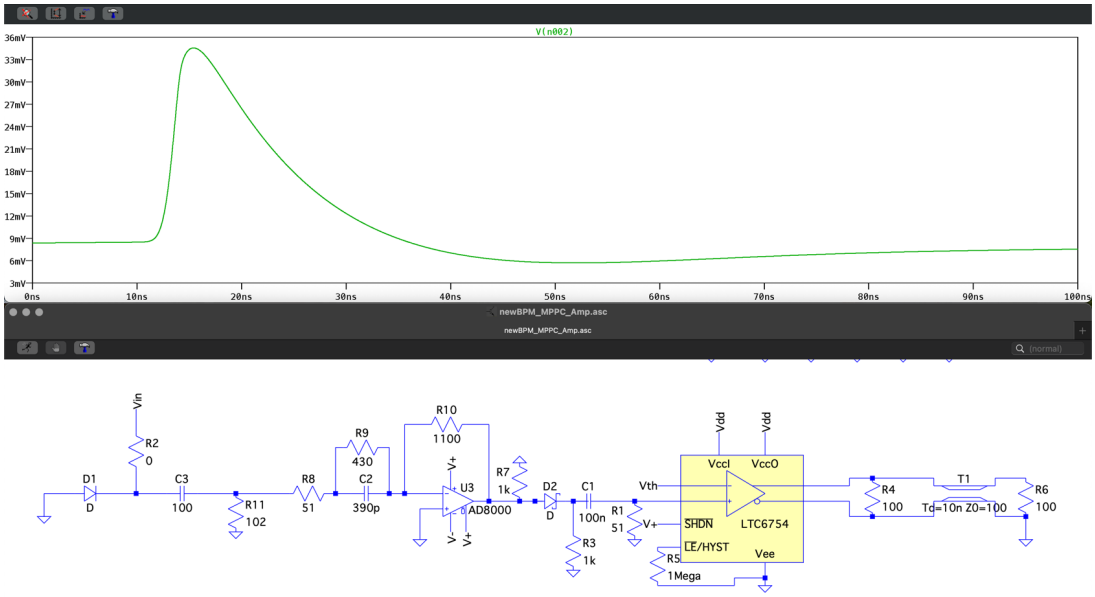


図 2.25: LTspice[32] による回路シミュレーションの例。入力信号には推奨印加電圧を印加した MPPC の 1 ピクセル分の出力信号モデル [29] を用いた。図中の信号はアンプを介して増幅後の出力信号である。

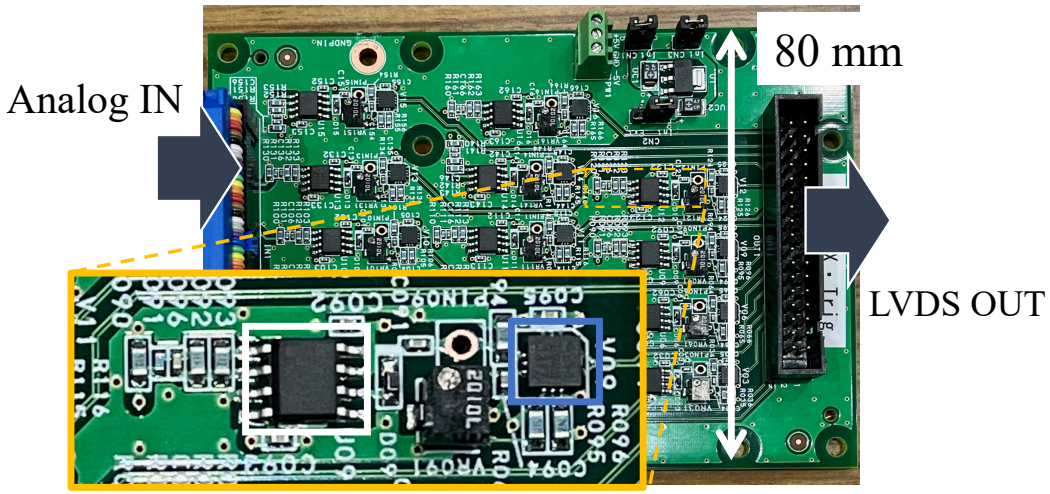


図 2.26: 信号増幅・デジタル処理回路。16 チャンネル分 (VETO+x 層または Trigger+y 層) を一枚の基板に搭載した。拡大部分が 1 チャンネルに相当し、白い四角部分がオペアンプ AD8000、水色の四角部分がコンパレータ LTC6754 である。デジタル変換閾値電圧は可変抵抗によって調整可能である。

2.5 データ収集システム

BPM のデータ収集には高エネルギー加速器研究機構の本多氏らによって新たに開発されたストリーミング型 Time-to-Digital Converter(StrTDC, [33]) を導入した。この TDC は FPGA を搭載した汎用ロジックモジュール Hadron Universal Logic[34] にファームウェアの一種として実装したものである。

2.5.1 Hadron Universal Logic (HUL) と Streaming TDC (StrTDC)

Hadron Universal Logic (HUL) モジュールは、ハドロン実験のために開発された汎用ロジックモジュールであり、VME 6U 規格の回路基板である。FPGA (Xilinx Kintex 7[35]) を搭載し、実験目的に応じたファームウェアをインストールすることで、様々なハドロン実験に応用することが可能である。図 2.27 に HUL の実物写真を示す。入力ポートには 64 ペアの差動入力 (KEL 8831E コネクタ) を有し、LVDS、ECL、PECL、LVPECL 等の規格をサポートしている。また NIM 規格の入力ポートを 4 つ、出力ポートを 4 つ持つ。大きな特徴は、ギガビットイーサネット (GbE) によるデータ通信インターフェースを有し、PC との通信を SiTCP (Silicon Transmission Control Protocol, [36]) によって行うことができる点である。SiTCP とは高エネルギー加速器研究機構の内田氏らによって開発された技術であり、FPGA をイーサネットに接続する TCP/IP 通信を、CPU を使わずにハードウェアのみで実現した。膨大な数のチャンネルで高速なデータ収集が求められるハドロン実験や高エネルギー物理実験において、安定した高速データ転送を汎用性の高いイーサネットで行うことができる画期的な技術である [34]。

StrTDC は trigger-less DAQ 用に開発された、外部トリガー無しに連続的に時間測定を行う TDC である。フロントエンド回路上でイベント選別を行わず、全てのイベント入力信号を PC へ転送し続ける。TDC の 1 チャンネルは 0.97 ns であり [33]、強度が数 10 MHz に及ぶ光子ビームの即時測定を可能にする。また、33 秒までデータ収集を行うことができ [33]、1 スピルが約 10 秒に相当する光子ビームの測定には最適である。トリガーレスデータ収集のため、イベントはオフライン解析上で選択する。このため、例えば光子イベントのみではなく、背景事象荷電粒子の分布を調べるなど、より多くの情報を得ることができる。

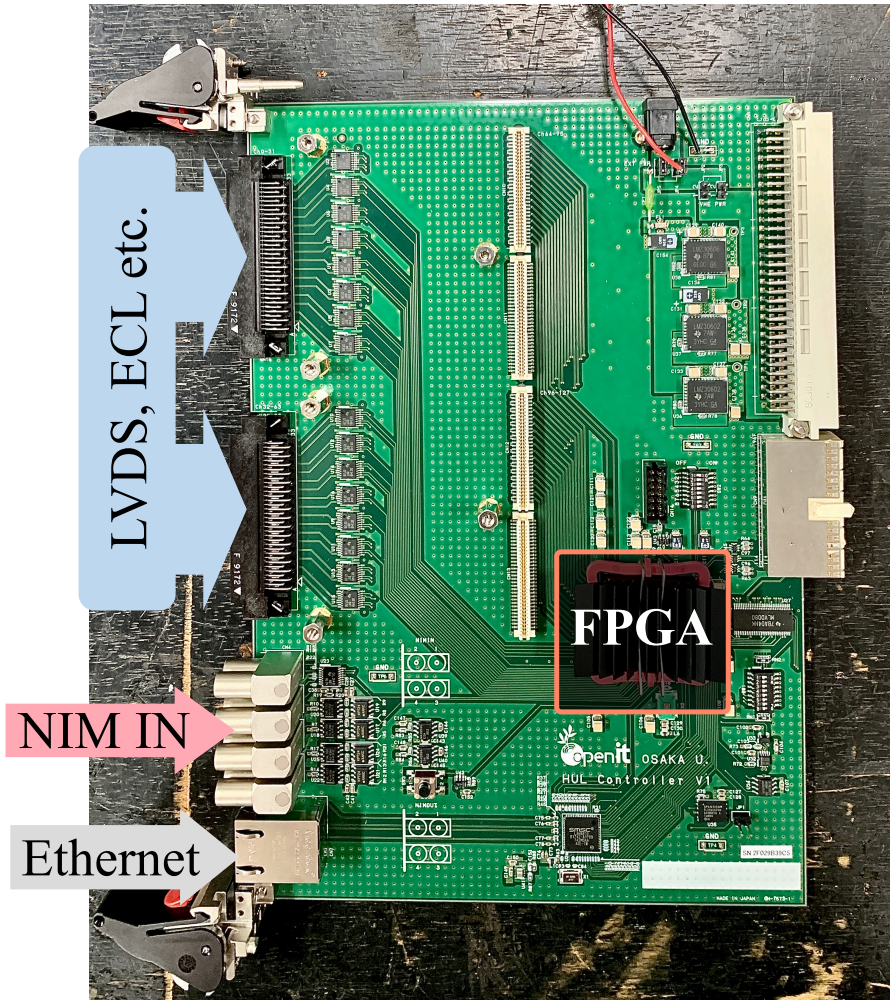


図 2.27: Hadron Universal Logic

2.5.2　データ収集系の全容

図 2.28 にデータ収集系の概要図を示す。BPM1 台あたり 32 ch の信号をそれぞれの MPPC から出力し、アンプ回路を通して LVDS 規格信号にデジタル変換する。32 ch の LVDS 信号は HUL の差動入力ポートに入力する (StrTDC の入力信号は 32 ch のみ)。データ信号とは独立に NIM 規格入力ポートへゲート信号を入力する。StrTDC は入力されたゲート信号がアクティブ (1) の間データ収集を続け、パッシブ (0) の間はデータを収集しない。このゲート信号を、ラジエータを周回電子へ挿入・取り出しするための自動ステージのスローコントロールと同期させた。これにより、スピルと同期したデータ収集を可能にした。データ収集用のコントロールマシン (DAQ PC) と HUL はイーサネット接続し、SiTCP を介して通信を行なった。

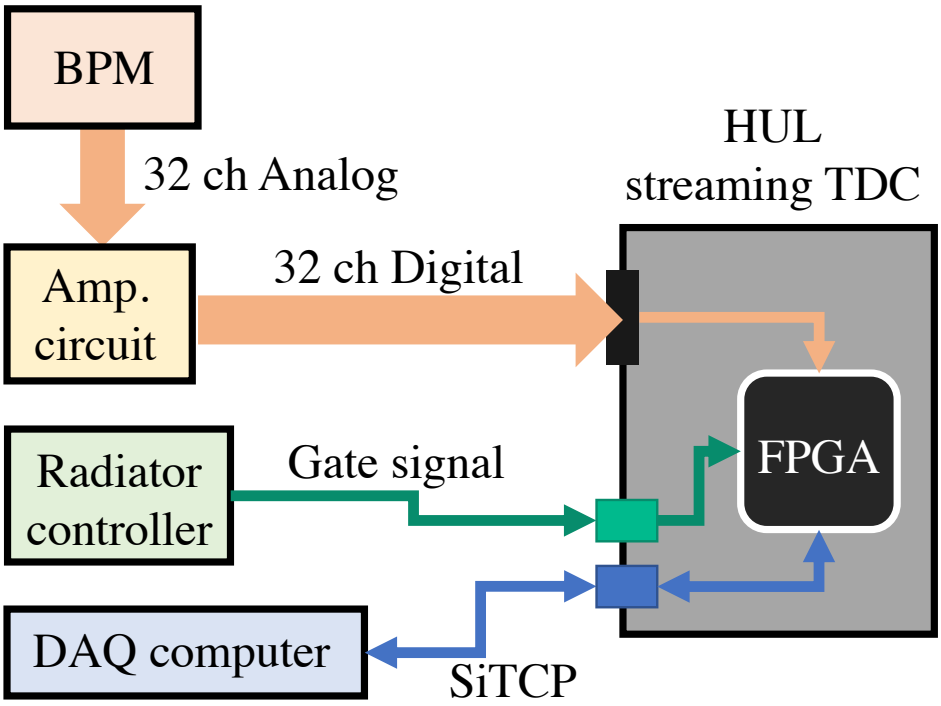


図 2.28: データ収集系の概要図。BPM からのデータ信号 (32 ch LVDS 信号)、ゲート信号 (NIM 規格) をそれぞれ入力ポートに入力し FPGA 上のファームウェア StrTDC で収集する。HUL と DAQ 用のコンピュータはイーサネット接続し、SiTCP を介して通信する。

第 3 章

ビームプロファイルモニタ (BPM) で測定したビームプロファイル

ELPH 第 2 実験室内の BST リング BM4 光子ビームラインにおいて光子ビームのプロファイリングを行なった。本章では様々な条件下における光子ビームのプロファイルの測定結果を述べる。

3.1 BPM による光子ビームプロファイル測定実験

ELPH 第 2 実験室内の BST リング BM4 光子ビームライン上に BPM を設置し、光子ビームのプロファイリングを行なった。本研究で新たに開発した BPM は同じものを 2 台製作し、それぞれ BPM1、BPM2 としてビーム上流側 (Sweep 電磁石手前) とビーム中流 (NKS2 スペクトロメータ入口) に設置した。また、本測定では先行研究にて開発された既存の HSBPM を BPM3 としてビーム最下流に設置し、3 点でのプロファイリングを行なった。図 3.1 に本実験のセットアップを示す。

BM4 光子ビームラインにおける座標系は図に示すように、重力方向と逆向きに y 方向、ビーム方向と同じ向きに z 方向、y・z 方向と垂直かつ BST リングの外側から内側に向かう方向に x 方向 (右手系) と定めている。Sweep 電磁石手前にはコリメータを設置している。コリメータの前後でビームプロファイルを即時測定するため、BPM1 を自動ステージ (シグマ光機, 高剛性・精密型自動ステージ / OSMS26-100(X)) 上に設置した。ステージは 2 台用い、x 方向、z 方向に移動できるよう設置した (図 3.2)。

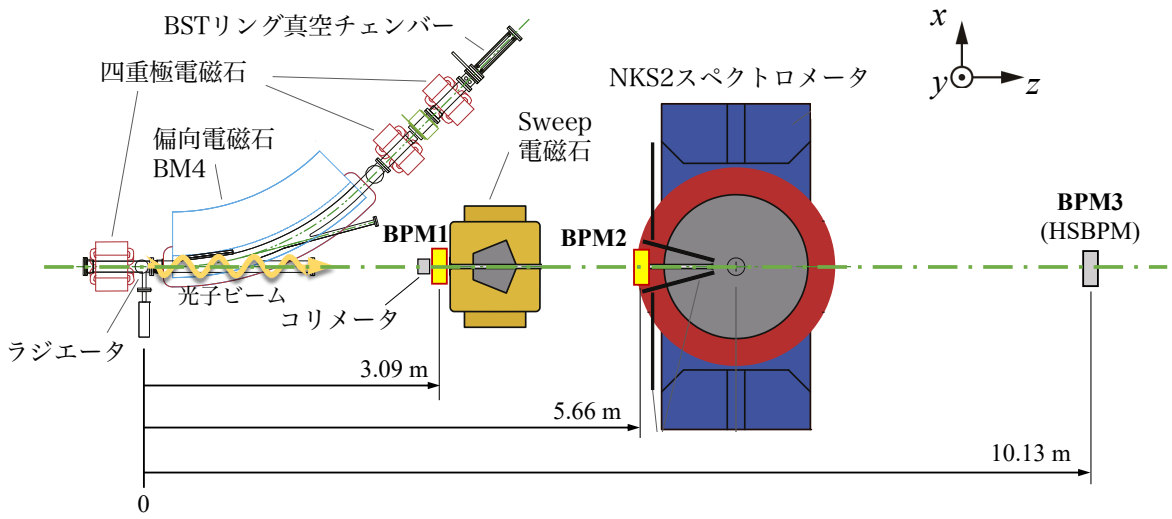


図 3.1: 光子ビームプロファイル測定実験のセットアップ。BM4 光子ビームライン上に 3 台の BPM を設置した。上流側から順番に BPM1, BPM2, BPM3(HSBPM) である。図に示すラジエータからの距離はそれぞれの検出器の x 層までの距離であり、レーザー距離計 (BOSCH, 距離測定誤差 ± 1.5 mm) を用いて測定した。BPM1 をコリメータの前に設置した場合の距離は 2.99 m である。

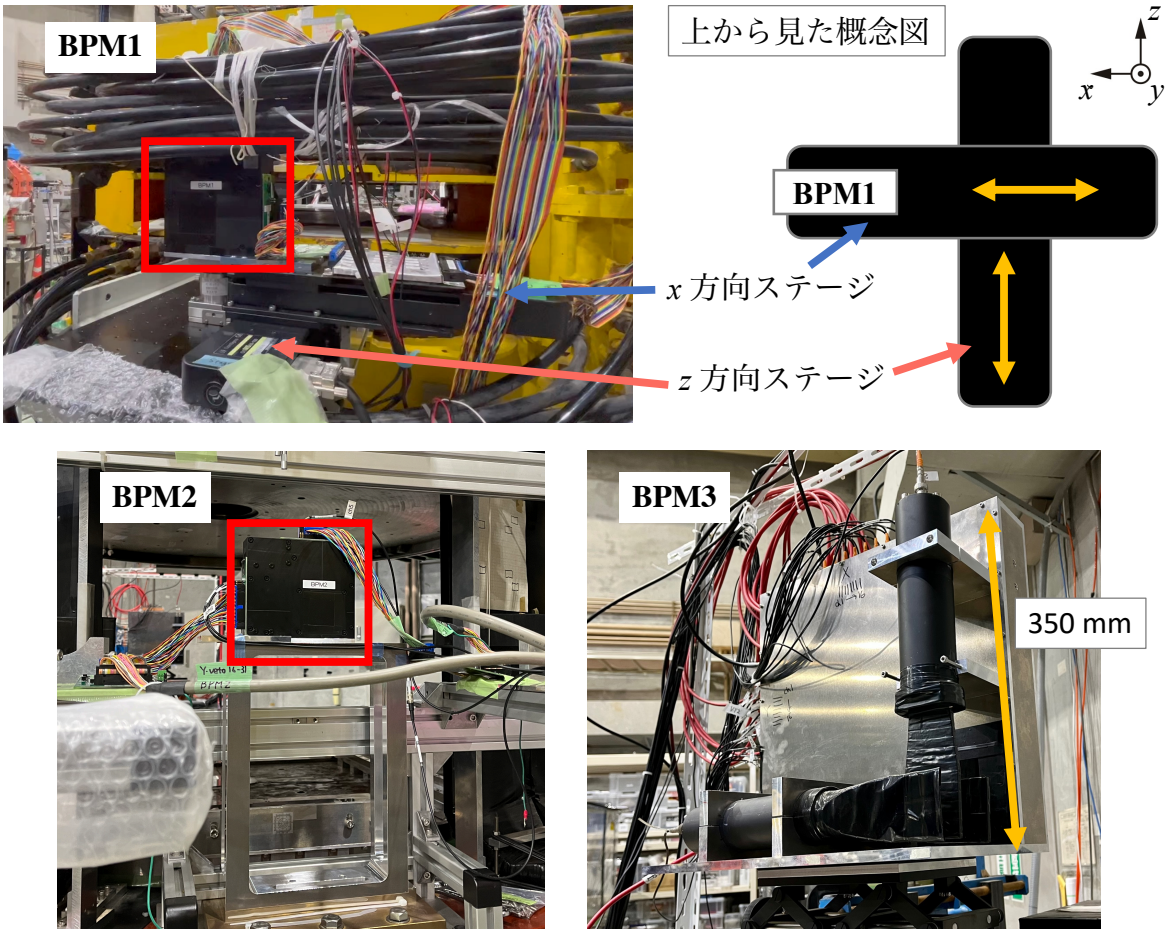


図 3.2: 各 BPM の設置状況。(上図：BPM1)Sweep 電磁石の手前に設置。コリメータの前後をリモート制御により移動できるよう、x 方向、z 方向に自動ステージ (シグマ光機) を設置した。(左下：BPM2)NKS2 スペクトロメータ入口に設置。ビームラインの高さに合わせるため専用のステージ (ジーテック、ジュラルミン製) を製作した。(右下：BPM3) 既存の HSBPM を BPM3 として最下流に設置。

図 3.3 に実験時のデータ収集系の概念図を示す。StrTDC をインストールした HUL を 4 台用い、それぞれ 32 チャンネルずつ読み出しを行なった。BPM3 の読み出し、データ収集回路は、従来の HSBPM で用いられていた回路を一新した。マルチアノード PMT からのアナログ出力信号を NIM 規格ディスクリミネーター (GeVγ-1380) によって ECL(Emitter Coupled Logic) 信号へ変換し、BPM1、BPM2 と同様に HUL でデータ収集を行った。以下、BPM1、BPM2、BPM3 に対応する HUL をそれぞれ HUL1、HUL2、HUL3 とする。また、標識化光子のプロファイリングを調べるため、TagB(1.2.1 節) のデータ、さらに TDC 較正のため加速器 RF のデータの収集も行なった。TagB、加速器 RF に対応する HUL を HUL0 とする。ラジエータの動きと同期したゲート信号は全ての HUL に同時入力した。全ての HUL は SiTCP を介して 1 台のデータ収集用コンピュータ DAQ PC で制御した。また、同じ DAQ PC でラジエータコントロールの制御、BPM1 のステージコントロールも行なった。

各 HUL の典型的なデータサイズは、HUL0(RF と TagB): ~200 MB/spill、HUL1(BPM1): ~75 MB/spill、HUL2(BPM2): ~55 MB/spill、HUL3(BPM3): ~400 MB/spill(周回電子ビームカレント約 1 mA) である。

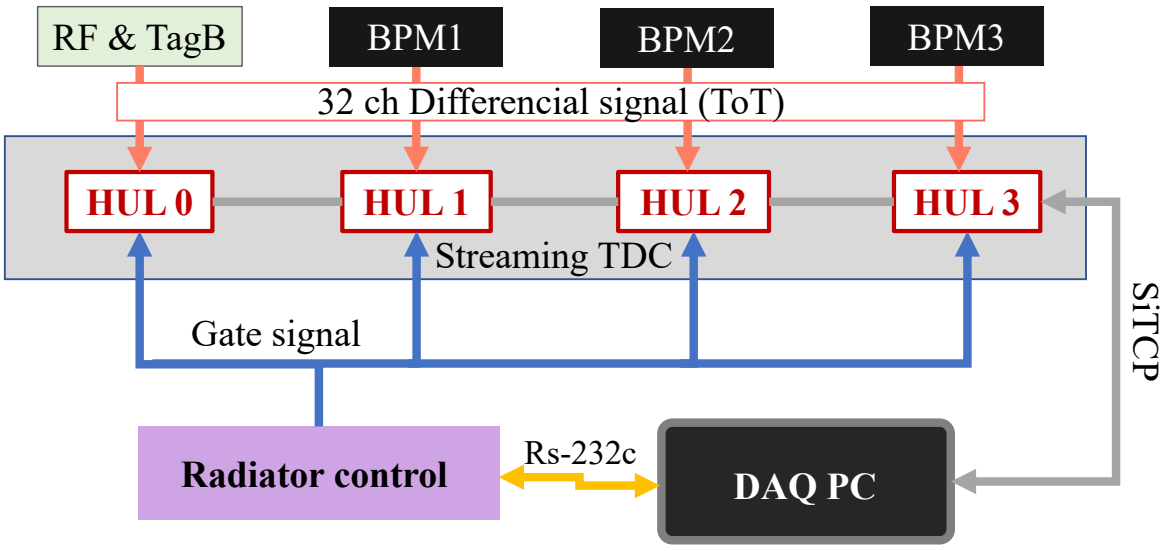


図 3.3: データ収集系の概念図。検出器 BPM1、BPM2、BPM3 と TagB、加速器 RF のデータはそれぞれ 4 台の HUL で収集した。全ての HUL は 1 台の DAQ 用 PC で SiTCP を介して制御した。また、全ての HUL に対し、ラジエータの動作と同期したゲート信号を同時入力した。

表 3.1 に実験時の各セットアップをまとめる。BPM1、BPM2 の x・y 層では、デジタル変換閾値電圧 V_{th} を $5-6$ p.e. に相当する 280 mV とした。これは、平均光子数の約半数である。Charged VETO、Trigger はノイズで発振することの無いよう V_{th} を決定した。BPM3 に対しては、一般的なプラスチックシンチレータの最小エネルギー損失 (Minimum Ionization Particle; MIP) に対応する信号ゲインの約 1/5 となる 40 mV に設定した。

表 3.1: 実験セットアップ

BPM1, BPM2	プリアンプ供給電源	±6.5 V	
	MPPC バイアス電圧	x 層	60.0 V
		y 層	60.0 V
		Charged VETO	54.5 V
		Trigger	54.5 V
	デジタル変換閾値電圧	x 層	280 mV
		y 層	280 mV
		Charged VETO	70 mV
		Trigger	90 mV
	光子コンバータ厚	$0-480$ μm	
BPM3	プリアンプ供給電源	x 層	−935 V
		y 層	−935 V
		VETO	−1,605 V
		trigger	−1,675 V
	デジタル変換閾値電圧		40 mV
周回電子ビーム電流		$0.1-6.0$ mA	

3.2　解析方法

前述 (2.2.4 節、2.2.3 式) のように、光子イベントをオフライン解析で選択する。その際、同時発生事象であることの同定は、図 3.4 に示すようなトリガーカウンタと各層のタイムスタンプの差分から、ピークを十分にカバーする ±48 ns とした。

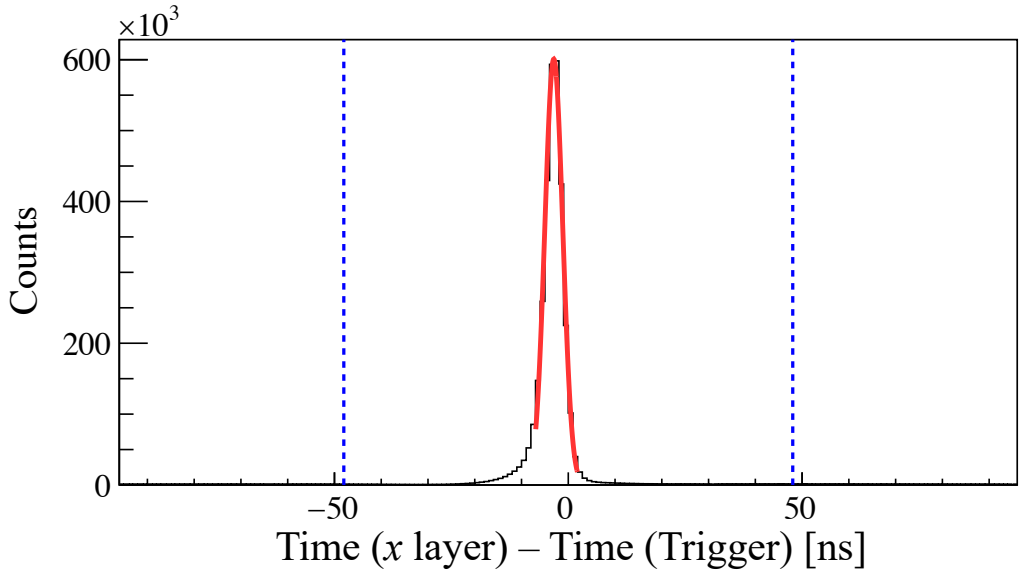


図 3.4: タイムウィンドウの評価。トリガーカウンタと x 層の TDC の差分をプロットした。ピークに対するガウスフィットより、BPM の時間分解能は $\sigma \simeq 2$ ns である。

選択した光子イベントのヒット分布を図 3.5 に示す。x 層 (水平方向) と y 層 (重力方向) のヒット分布の 2 次元プロットから、実際に光子ビームのプロファイルを視覚的に見ることができる。

光子ビームの定量的なプロファイリングは、このヒット分布に対するフィッティングにより行なった (図 3.6)。実際のビーム構造とハロー構造を考慮し、用いた関数は 2 つのガウス関数の重ね合わせである。実際のビーム構造を表すガウス関数のフィッティング結果から、ビーム中心位置 (μ) とビームサイズ (σ) を評価した。なお、各チャンネル毎の MPPC 出力信号利得は 10% の精度で一定であり、検出効率に与える影響は約 1% である。このふらつきが最終的なプロファイル結果に与える影響は数 μm であり、本論文で報告する値に大きな影響はない (付録 A)。また、ここで見られるハロー構造の起源についての考察は付録 B にまとめた。

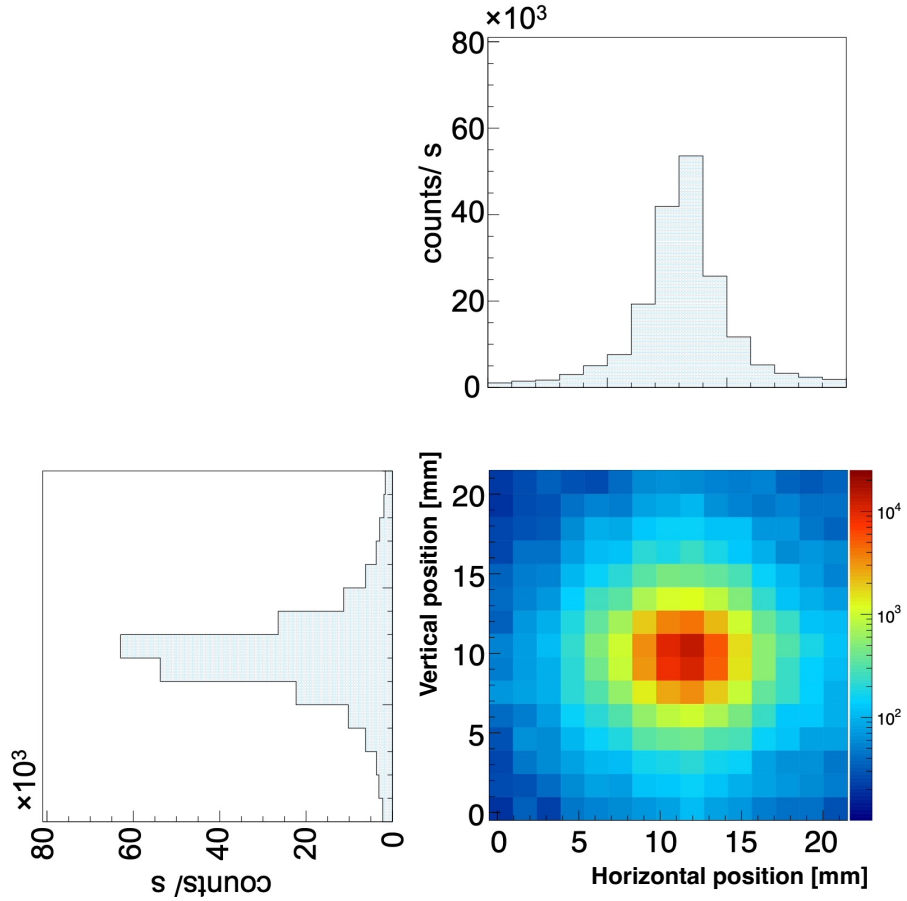


図 3.5: 1 秒あたりの $x-y$ ヒット分布。x 層 (水平方向) と y 層 (重力方向) それぞれのヒットを 1 秒間積分しプロットした。

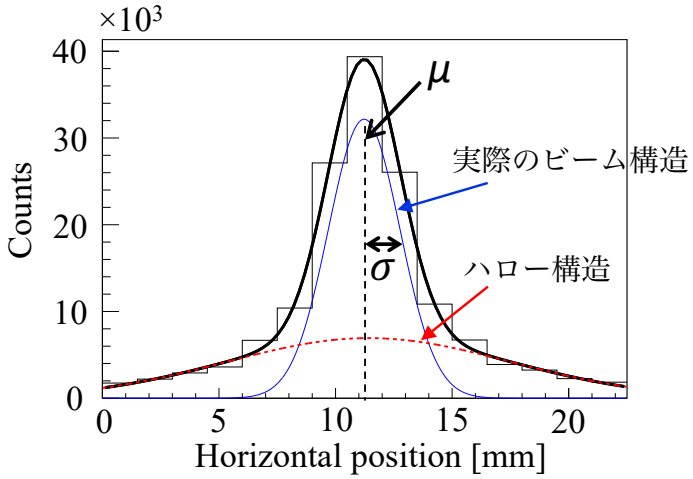


図 3.6: フィッティングの例。青の実線は実際のビーム構造、赤の破線はビームハロー構造に相当するガウス関数である。

3.3　光子ビームプロファイルの測定結果

本節では条件に応じた光子ビームプロファイル (ビーム中心位置 (μ) とビームサイズ (σ)) の解析結果を報告する。以下の結果では全て赤丸点が水平方向 (Horizontal)、青四角点が重力方向 (Vertical) を示す。またここでは代表的な結果を示すが、BPM1、BPM2、BPM3 による全ての測定結果は付録 C にまとめた。

3.3.1　エネルギー依存性

Tagger の TagB のヒットイベントと各 BPM のコインシデンスイベントを選択することにより、エネルギーが同定された標識化光子のプロファイルを調べることができる。前述 (3.1 節) のように、TagB と BPM は独立した別の HUL モジュールによってデータ収集を行っている。各 HUL に載っている内部クロックソースは 50 MHz LVCMOS[*1]であり、その周波数許容差は ±50 ppm、即ち 5×10^{-5} である [34]。BPM による光子ビーム測定では、1 スピル分 (実際には、1 スピルのうち光子ビームを取り出している時間なので約 10 秒に相当) 毎にデータ収集を行うため、複数台の HUL 上で StrTDC を動作させる場合には、コインシデンスイベントを選択するために ∼5 ns/10 s の精度、すなわち $10^{-9} - 10^{-10}$ の精度が必要である。従って、更に $4 - 5$ 桁の精度が必要になるため、高精度の加速器 RF のデータを用いて TDC 較正を行った。

StrTDC の TDC 較正

実際に行った TDC 較正の手順を解説する。図 3.7 に示すのは、1 スピル分のデータに対する、TagB ch 30 と BPM1 Trigger の TDC の差分である。上図が TDC 較正を行う前、下図が較正後であり、TDC 較正によってコインシデンスピークが見えるようになる。

StrTDC の 1 ch は、1 ns/0.96 に相当する。この変換ファクター 0.96 を ∼5 ns/10 s の精度、すなわち $10^{-9} - 10^{-10}$ の精度で調整することで TDC 較正を行う。TagB のデータを収集した HUL0 では、同時に加速器の RF のタイミングデータを収集した。HUL0 の TDC 較正はこの RF のデータを用いて行った。RF の共振周波数は 500.173 MHz であり、データ収集時にはプリスケーラーを用いて 41,500 (= 83 bunches × 500 cycles) 回毎に 1 回タイミングを記録するよう設定した。図 3.8 に示すのは、ある RF イベントの TDC とその次の RF イベントの TDC 差分である。この TDC 差分の理想値は (1/500.173 MHz)×41500=82971.3 ns である。

[*1] Low Voltage CMOS. 低電圧版の CMOS と、そのインターフェイス規格であり、電源電圧を 3.3 V 以下とした CMOS のことを指す。

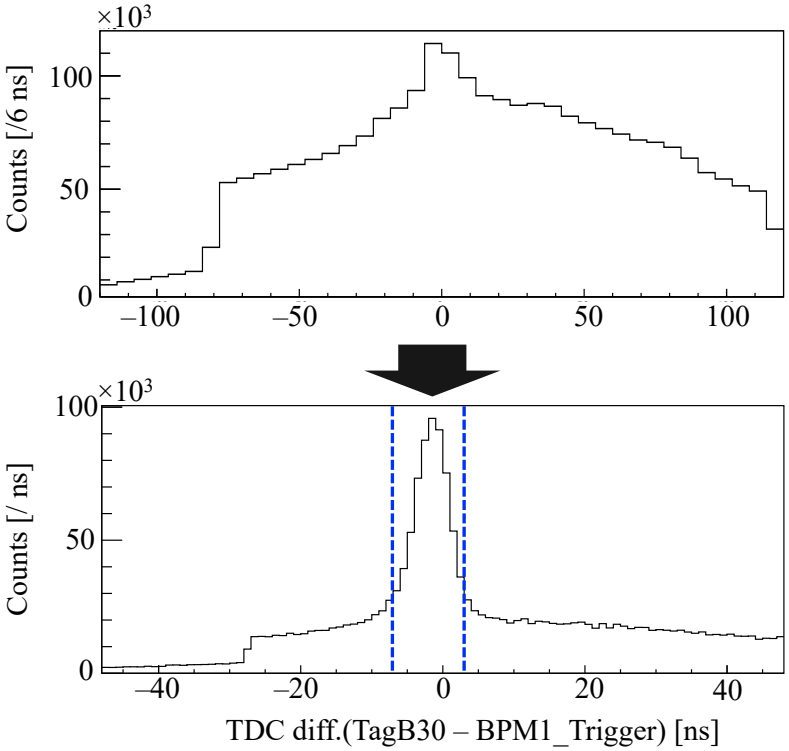


図 3.7: TDC 較正前後の TagB と BPM1 の TDC 差

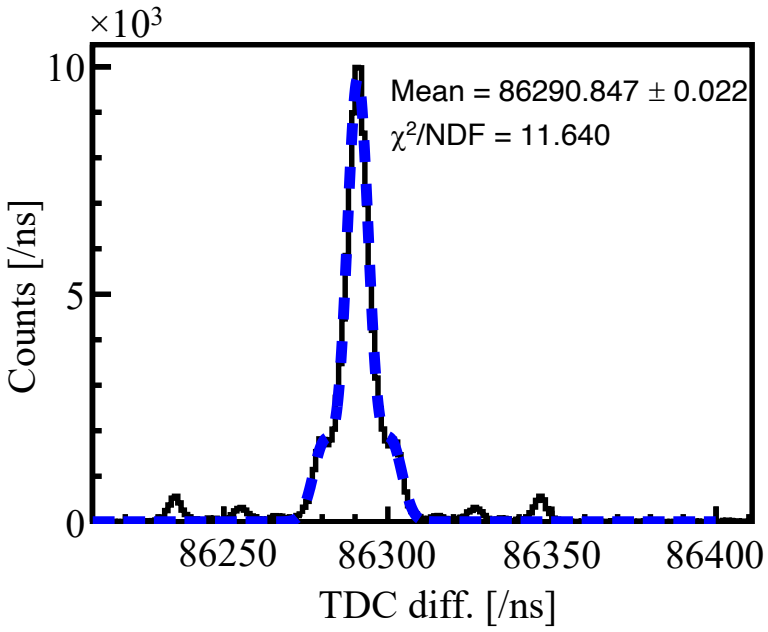


図 3.8: RF のイベント間の TDC 差分とフィッティング

データに対して 3 つのガウス関数を重ね合わせた関数でフィッティングを行い、得た平均値 Mean を理想値 82971.3 ns で割った値を HUL0 の変換ファクターとした。

次に、HUL1 の TDC 較正を行う。まず、3.2 節で説明したタイムウィンドウを ±2,000 ns 程度に広く取った状態でイベント選択を行う。図 3.9 は、縦軸が TagB のあるチャンネル (ch 30) と BPM1 Trigger の TDC の差分、横軸はスピル内時間である。上段は TDC 較正前の状態であり、約 7.5 秒の間にコインシデンスピークが約 −1,100 ns 遷移する様子が見える。HUL1 に対する変換ファクターを $-1{,}100\ \text{ns}/7.5\ \text{s} = -1.467 \times 10^{-7}$ だけ調整する。次に、調整した変換ファクターを用いて再度イベント選択を行う。この時、タイムウィンドウを縮める。徐々にタイムウィンドウを縮めていきながら、この一連の作業を繰り返し行い、最終的に ±48 ns まで縮める (図 3.9 下段)。HUL2、HUL3 に対しても同様に TagB のあるチャンネルの TDC を基準に TDC 較正を行う。

以上の手順により各 HUL、各スピル毎に TDC 較正を行うと、図 3.7 の下図のようにコインシデンスピークを見ることができる。

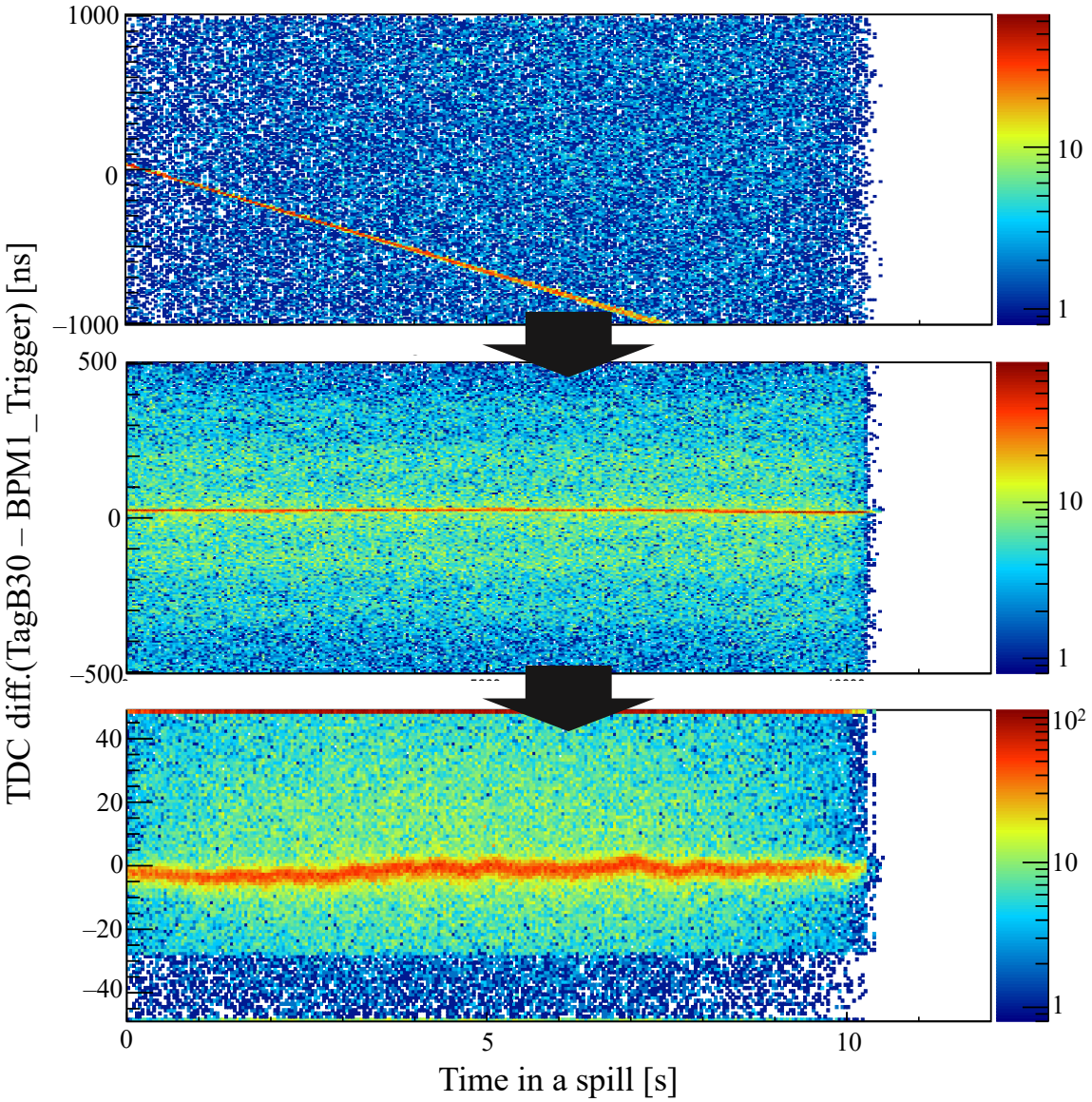


図 3.9: TagB ch30 と BPM1 Trigger の TDC 差分のスピル内時間依存性

光子ビームプロファイルのエネルギー依存性

TagB と BPM のコインシデンスピークを、図 3.7 の下図に示すようにスピル毎に ±5 ns の範囲で選択し、ビームプロファイルを調べた。以下、図 3.10、3.11 に光子ビームプロファイルの光子ビームエネルギー依存性を示す。ビーム位置、サイズともにエネルギー依存性は無いことが分かる。

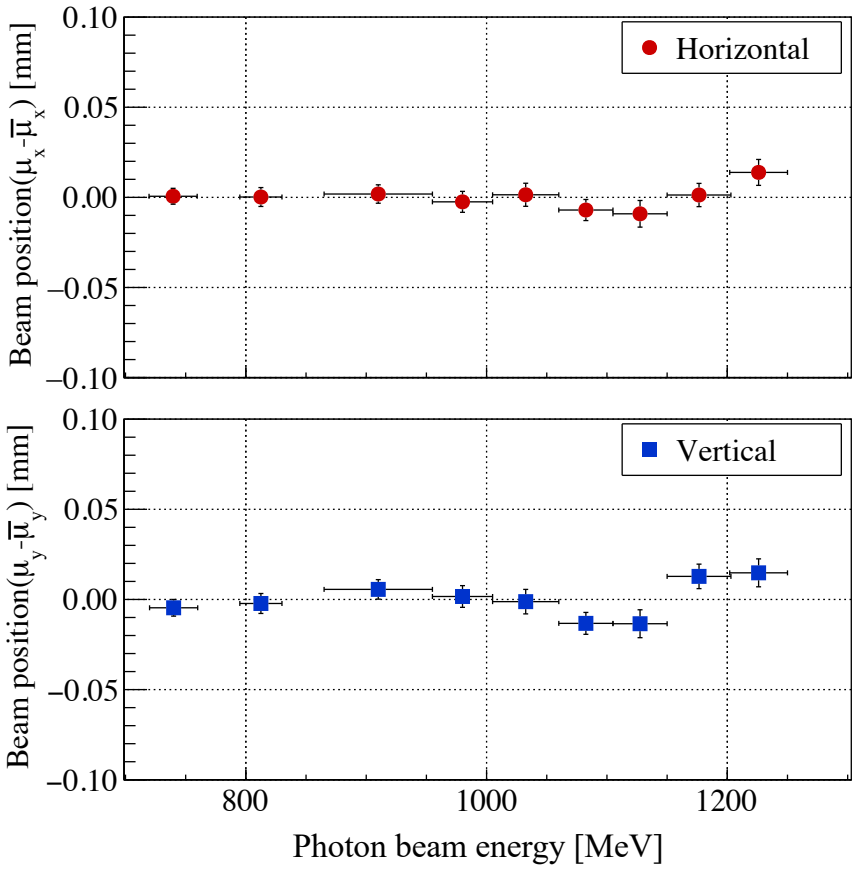


図 3.10: 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM1

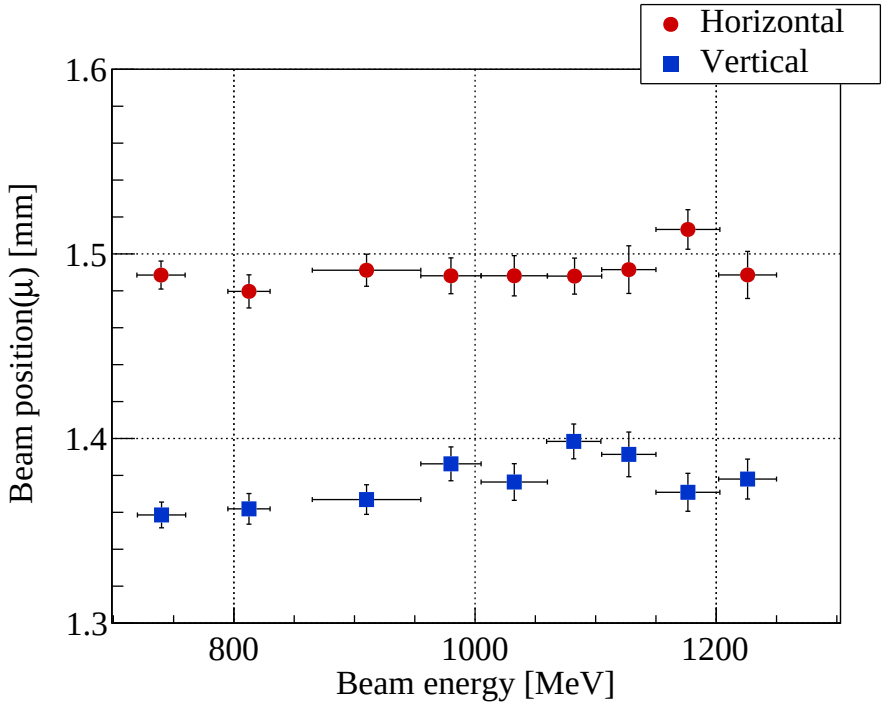


図 3.11: 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM1

3.3.2　ビーム強度依存性

BST リング内周回電子ビームカレントを 0.1 – 5.5 mA で変化させ、それぞれのカレントにおけるプロファイリングを評価した。周回電子ビームカレントはビーム DCCT を用いて測定した。

図 3.12 に光子ビーム中心位置のビーム強度依存性を示す。ビーム強度依存性は見られない。

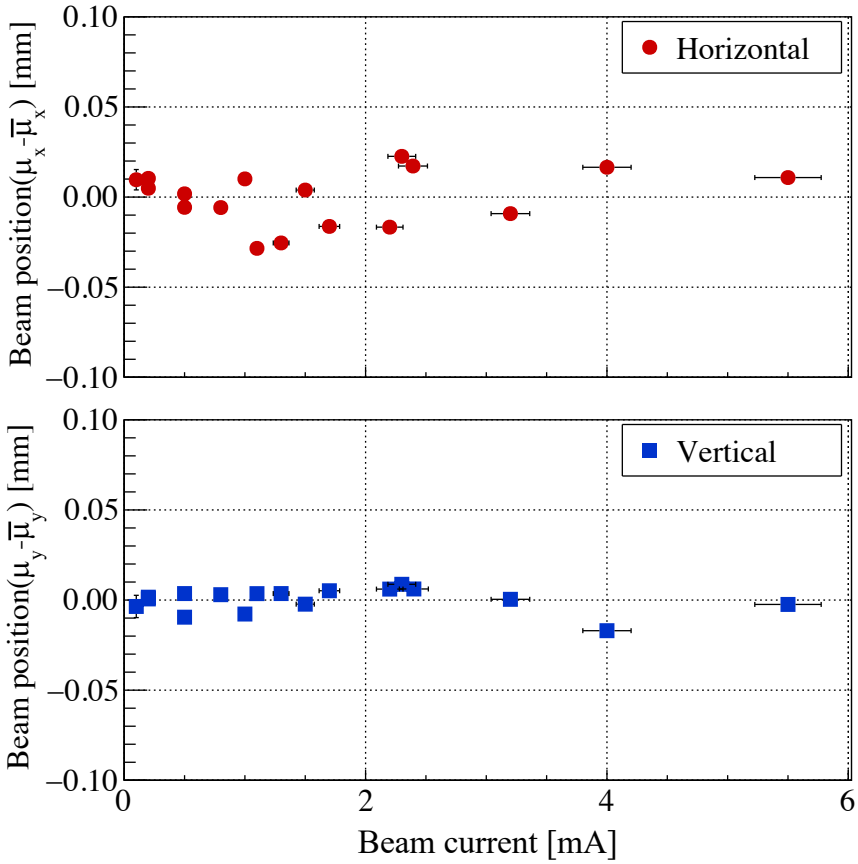


図 3.12: 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM1

図 3.13 には光子ビームサイズのビーム強度依存性を示す。わずかではあるが、ビーム強度の増加とともにビームサイズも広がっているように見える。ビーム強度の増加に伴うアクシデンタルイベントの増加の影響は 2% 程度に留まることが分かっており (付録 D)、このことを考慮してもビームサイズは広がるという結果を得た。

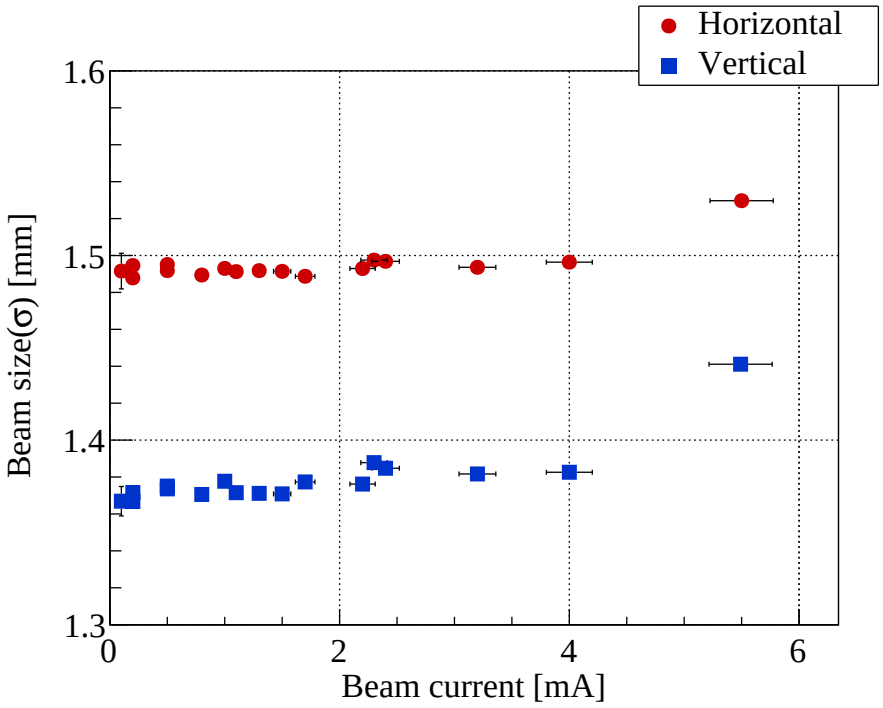


図 3.13: 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM1

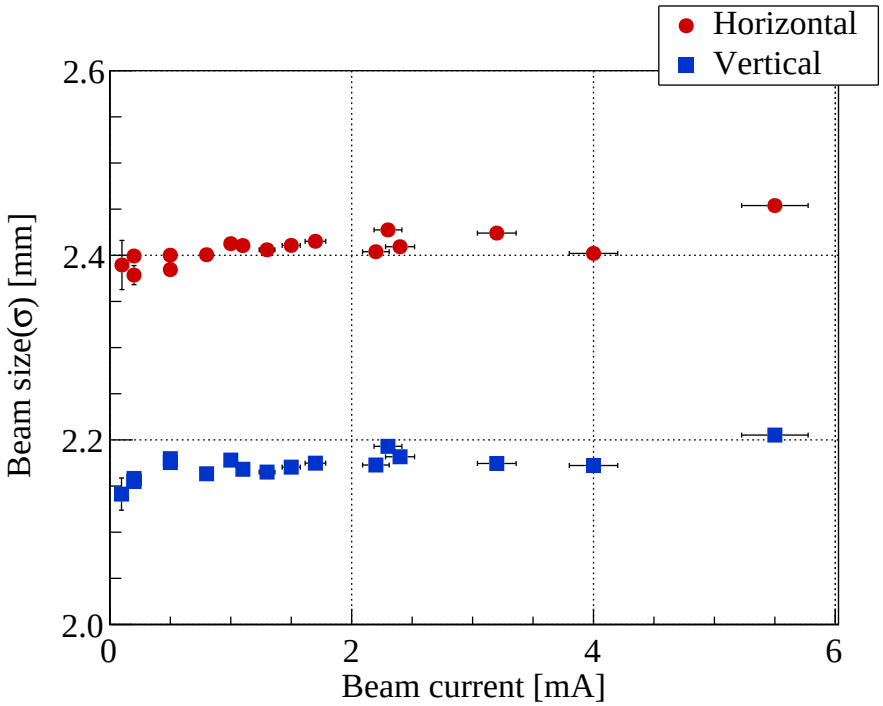


図 3.14: 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM2

3.3.3　スピル内時間依存性

光子ビームプロファイルが 1 スピル内 (約 10 秒間) でどのように変化するのか、その時間依存性を調べた。解析では 1 秒毎にデータを積分し、それぞれフィッティングを行なった。

図 3.15 にビーム中心位置のスピル内時間依存性を示す。スピル内で光子ビームは水平方向に BPM1 地点で約 0.3 mm ビーム外周方向に移動していることが分かる。また、重力方向にも各地点で 0.05 mm 程度推移している。これらの性質は、ラジエータの動作と電子ビームの角度分布との関係から説明することができる (4.1.1 節)。

図 3.16 には光子ビームサイズのスピル内時間依存性を示す。ラジエータの動作によって、スピル内でビームサイズは有意に増大していることが分かる。

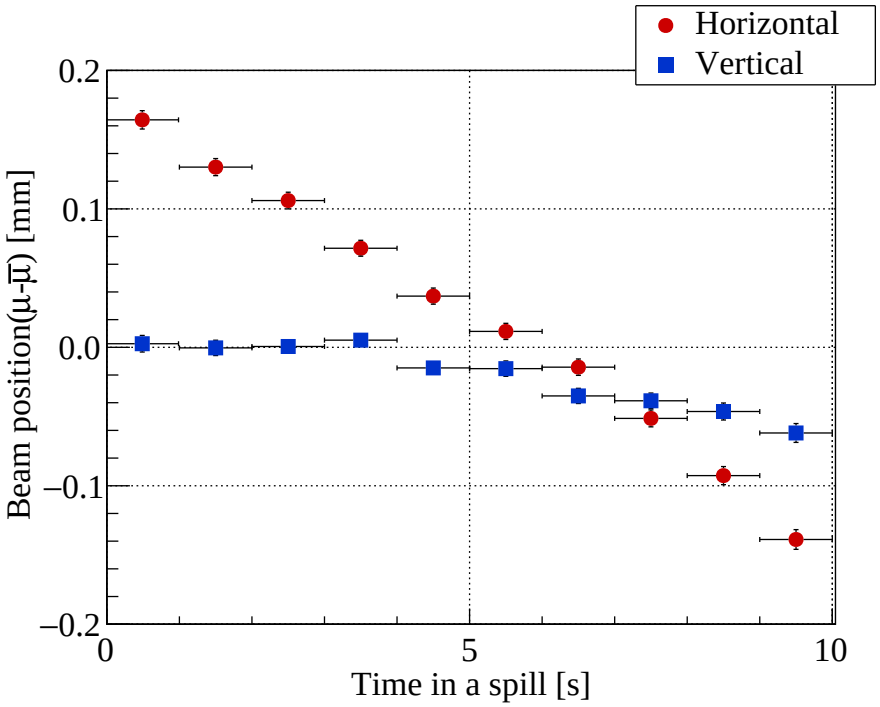


図 3.15: 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM1

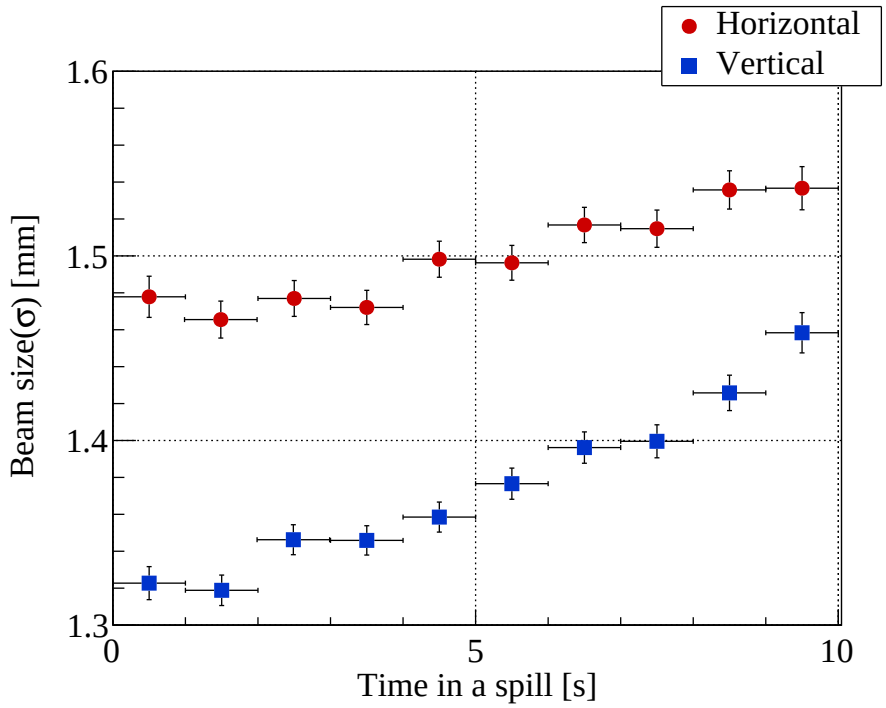


図 3.16: 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM1

3.3.4　ラジエータ位置依存性

BST リングの通常運転時に光子ビームを使用するときには、スピル内でラジエータは絶えず動作している。この測定では電子ビームの加速後、即座にラジエータを任意の点 x_{rad} まで挿入しラジエータ位置を固定してデータを取得した。ラジエータの初期位置は、リングの外周側のパターンと内周側のパターンの両方を記録した。リングの内周側から挿入した場合の記録は、図中白塗りの点で示した。ビーム位置、サイズともにどちらのパターンにおいても同じ結果を再現している。以下の結果で示す図中の横軸は、0 点が電子ビーム中心に相当する。

図 3.17 にビーム中心位置のラジエータ位置依存性の結果を示す。ラジエータ位置と光子ビームの向きは明確に相関を持つことが分かる。

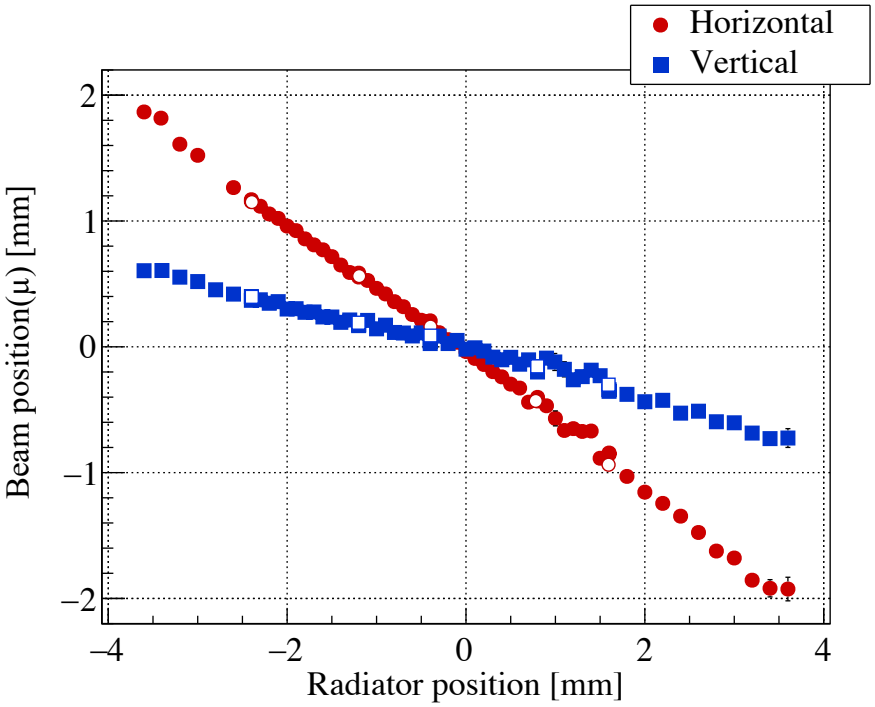


図 3.17: 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM1

図 3.18 に光子ビームサイズのラジエータ位置依存性の結果を示す。この結果では、ラジエータが電子ビームの中心付近に近づくと光子ビームサイズは有意に広がっている。ラジエータ位置が正の領域でエラーバーが大きいのは、ラジエータを BST リングの外周側から挿入しているためである。外周側から挿入すると、任意の点 x_{rad} に到達するまでに大部分の電子ビームを削ってしまうために、統計量が少なくなり、誤差の増大の原因となる。

図 1.10 に示したように、通常運転時にはラジエータは $-2.8 - -2.1$ mm の範囲をリングの外周側から内周側に向かって移動するため、この結果は先のスピル内時間依存性の結果と一致する。

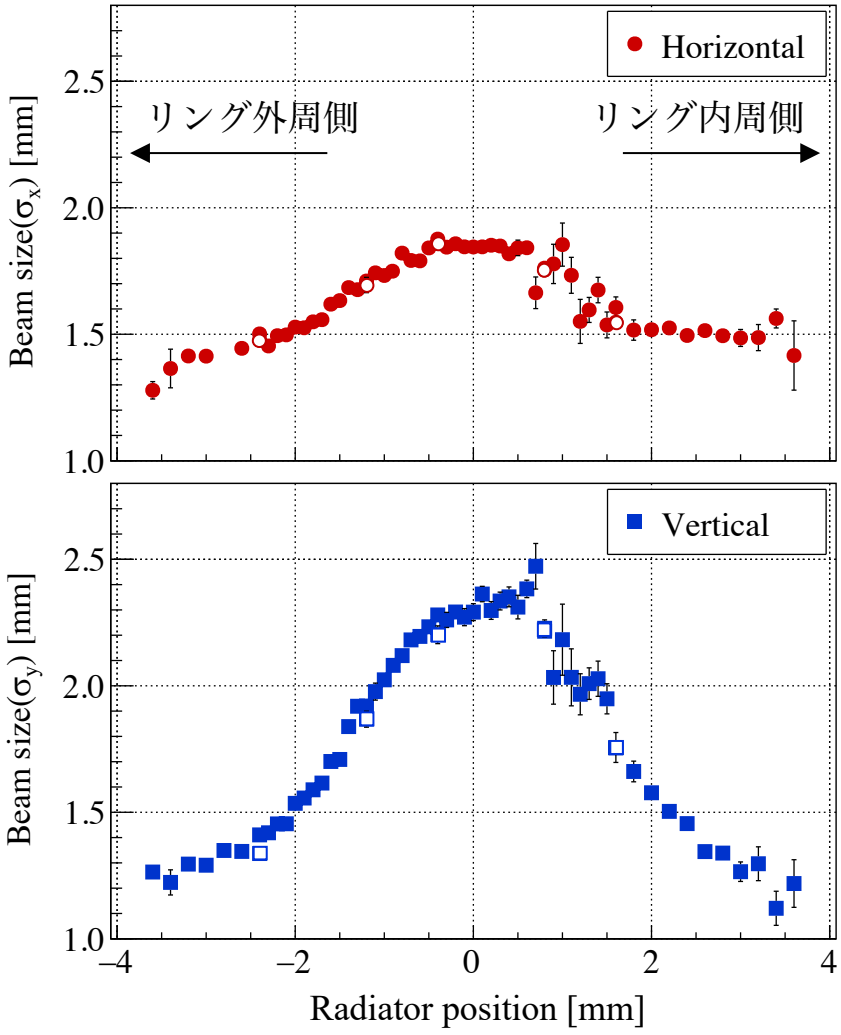


図 3.18: 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1

第 4 章

結果の考察と加速器研究への応用

前章の結果から、光子ビームプロファイルに有意に変化を与えるものはビームエネルギーや強度ではなく、ラジエータ位置であることが分かった。スピル内時間における変化も、ラジエータ位置が時間内で変化することに起因している。このようなラジエータ位置に依存した変化の要因は、光子ビームのソースである BST リング内の電子ビームが持つ特性であると言える。ラジエータ位置によって、削り出す電子ビームが持つ角度方向やその強度が変化するためである。即ち、光子ビームのプロファイルをより定量的に評価することで、BST リング内の周回電子ビームの情報を引き出すことができる。

本章では、得られた光子ビームプロファイルを定量的に評価し、その振る舞いについて考察すると共に、BPM を用いた測定によって加速器 BST リングと周回電子ビームの持つ情報へのアプローチを試みる。

4.1 ビーム方向とラジエータ位置の相関

前章 (3.3.4 節) で示した光子ビーム位置のラジエータ位置依存性の結果について考察する。光子ビーム位置、すなわち光子ビームの方向は制動放射を起こす電子が持っていた角度方向を保持している。このため、光子ビーム方向とラジエータ位置との相関を調べることで、周回電子ビームの持つ $x - x'$ 位相空間の分布を調べることができる。

表 4.1 に BST リングの BM4 ラジエータ地点における各パラメータ値を示す。ここで α、β は加速器のデザイン値、γ は α、β を用いて求めた計算値である。$\alpha_x > 0$ なので、BM4 ラジエータ地点においても BST リングの持つ位相空間では図 4.1 に示すように x、x' が逆相関を持つ (図 1.14)。

表 4.1: BST-Ring のパラメータ@BM4[37, 38]

パラメータ		値
Twiss parameter	(α_x, α_y)	$(1.18, -1.31)$
	(β_x, β_y)	$(2.30, 2.57)$ m
	(γ_x, γ_y)	$(1.04, 1.06)$ m^{-1}
エミッタンス ε_x		$(13.75 \pm 0.09) \times 10^{-8}$ m
運動量広がり $\Delta p/p$		6.28×10^{-4}
分散 (η_x, η_y)		$(0.786, 0)$ m

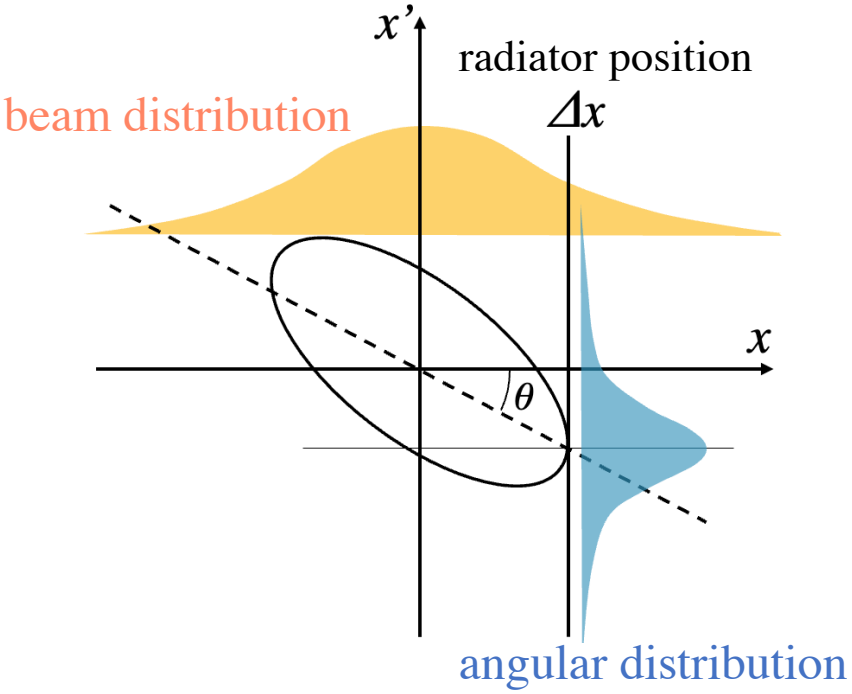


図 4.1:　BM4 の水平方向の位相平面。BST リング固有の Twiss parameter が表す楕円は x と x' が負の相関を持っている。

4.1.1　測定結果の定量的評価

水平方向

BM4 ラジエータ地点における水平方向の位相空間 (図 4.1) から、前章に示した結果 (図 3.17) の物理的意味を評価する。

ラジエータ位置 x_{rad} と BPM で測定したビーム位置 x_{BPM} は、前述 1.2.2 節の通り、次の関係式を満たす。

$$x_{\mathrm{BPM}} = \left(1 - \frac{\alpha_x}{\beta_x} z_{\mathrm{BPM}}\right) x_{\mathrm{rad}} \tag{4.1.1}$$

実際に前章に示した結果 (図 3.17) と併せて BPM2、BPM3 の測定結果に対して、式 4.1.1 をどの程度再現しているかをフィッティングにより評価した。測定結果に対し、傾き $(1 - (\alpha_x/\beta_x) z_{\mathrm{BPM}})$ をフィッティングパラメータとしてフィッティングを行なった。結果を図 4.2、4.3、4.4、表 4.2 に示す。

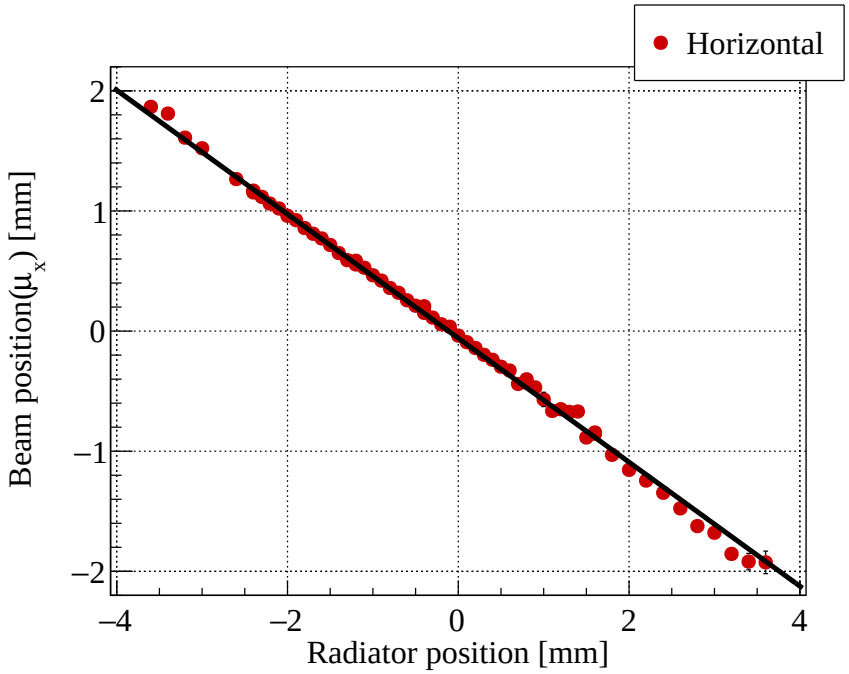


図 4.2: ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM1($z_{\mathrm{BPM}} = 2.99$ m)

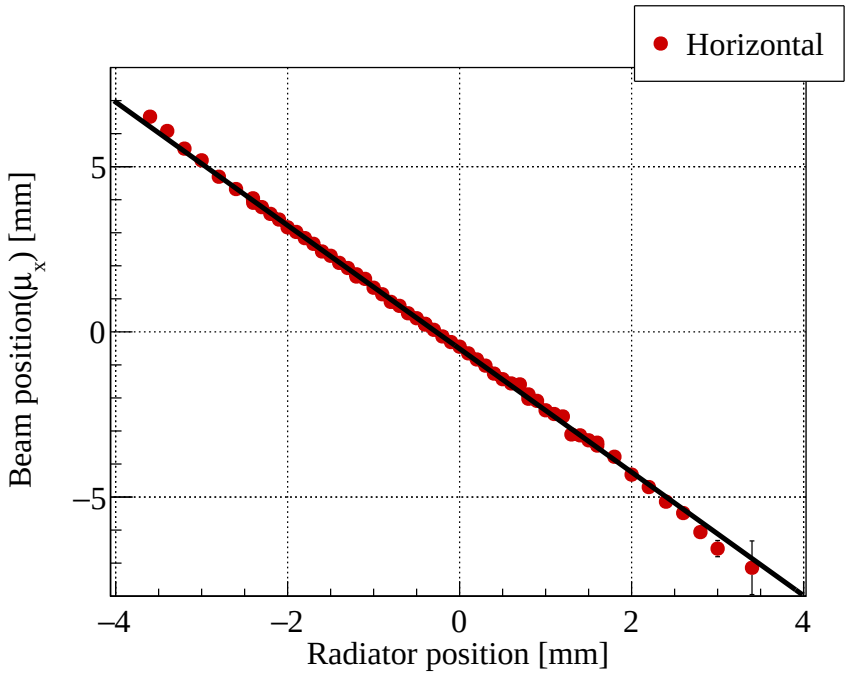


図 4.3: ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM2($z_{\mathrm{BPM}} = 5.66$ m)

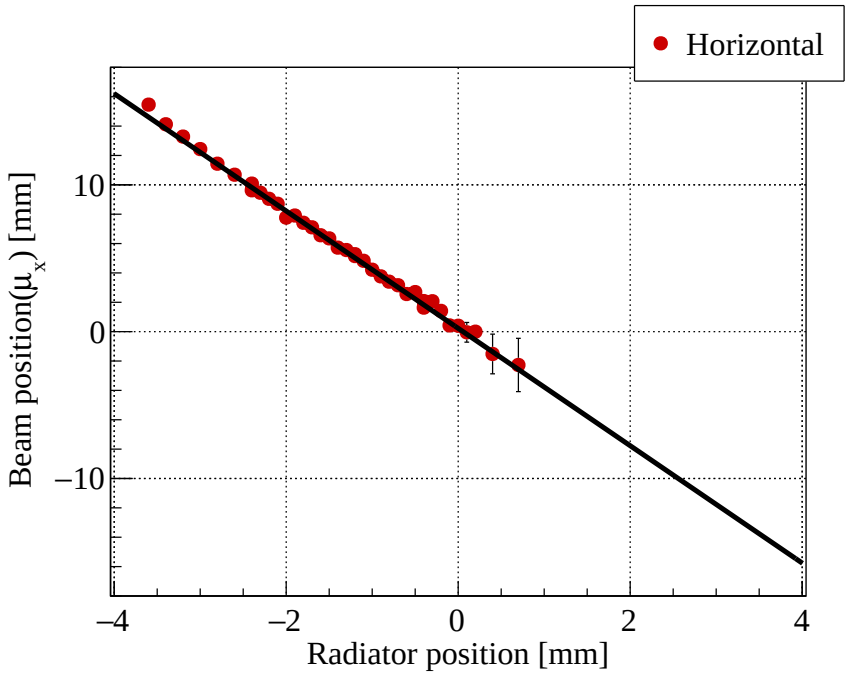


図 4.4: ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM3($z_{\mathrm{BPM}} = 10.13$ m)

表 4.2: 傾き $(1-(\alpha_x/\beta_x)z_{\mathrm{BPM}})$ のフィッティング結果と計算値

BPM1 ($z_{\mathrm{BPM}} = 2.99$ m)	フィット結果	-0.52 ± 0.00
	計算値	-0.53
BPM2 ($z_{\mathrm{BPM}} = 5.66$ m)	フィット結果	-1.87 ± 0.00
	計算値	-1.88
BPM3 ($z_{\mathrm{BPM}} = 10.13$ m)	フィット結果	-4.00 ± 0.02
	計算値	-4.17

表中の計算値は、以下のように式 4.1.1 の傾きに Twiss parameter のデザイン値、z_{BPM} の測定値を代入して計算した。

$$1 - \frac{\alpha_x}{\beta_x} z_{\mathrm{BPM}} = 1 - \frac{1.18}{2.30} \times 2.99 = -0.53 \qquad \text{(BPM1)}$$

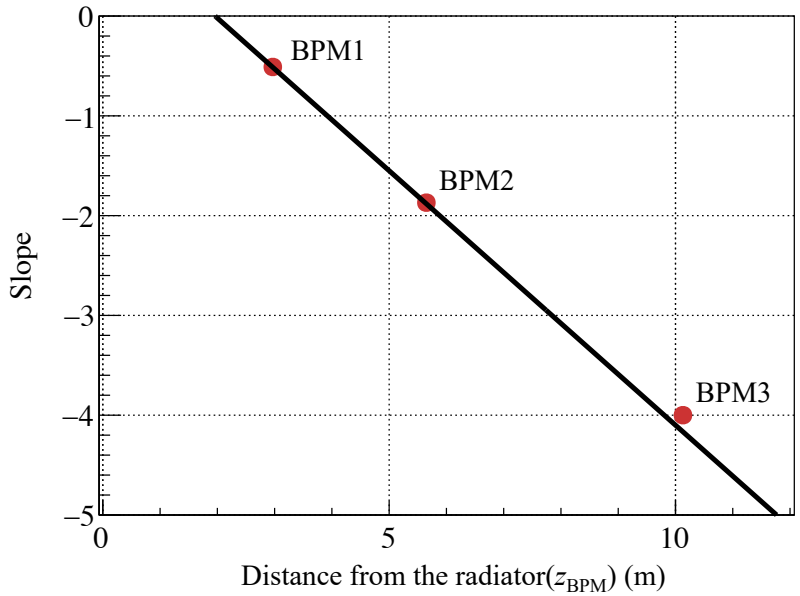


図 4.5: 測定結果と計算値の比較。それぞれ各 BPM 毎にフィッティングにより得られた傾き (三角点) と、Twiss parameter を用いた計算値 (青線) を示す。

図 4.5 に示すのは、各 BPM のフィッティングにより得られた傾きと、Twiss parameter を用いた計算値との比較である。測定結果は計算値を再現していることが分かる。この結果は、BPM による光子ビーム位置測定から加速器の Twiss parameter を測定することが可能であることを示す。また、本結果は BST リングが Twiss parameter のデザイン値を再現していることを、BM4 光子ビームラインにおいて初めて測定により確認したものである。

重力方向

3.3.4 節に示す結果の通り、光子ビーム方向とラジエータ位置は重力方向にも相関を持つことが分かる。光子ビーム重力方向のラジエータ位置依存性の結果に対してもフィッティングを行った。結果を図 4.6、4.7、4.8、表 4.3 に示す。 なお、図に示すように電子ビーム中心付近 ($|x_{\mathrm{rad}}| \simeq 2$ mm 以下) ではビームが上向きになるような振る舞いが見られるため、フィット関数は「ガウシアン + 一次関数」とした。

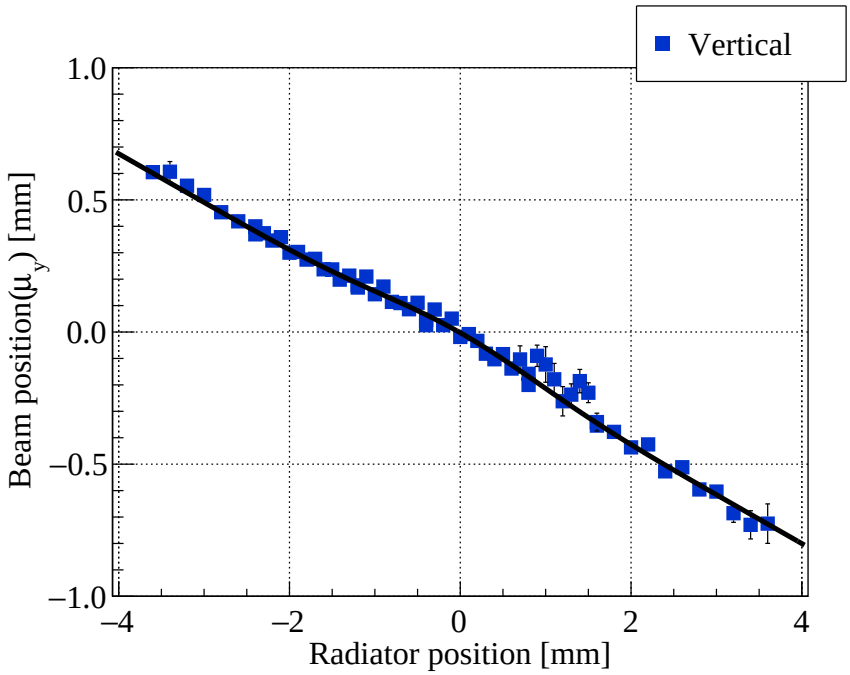


図 4.6: ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM1($z_{\mathrm{BPM}} = 2.99$ m)

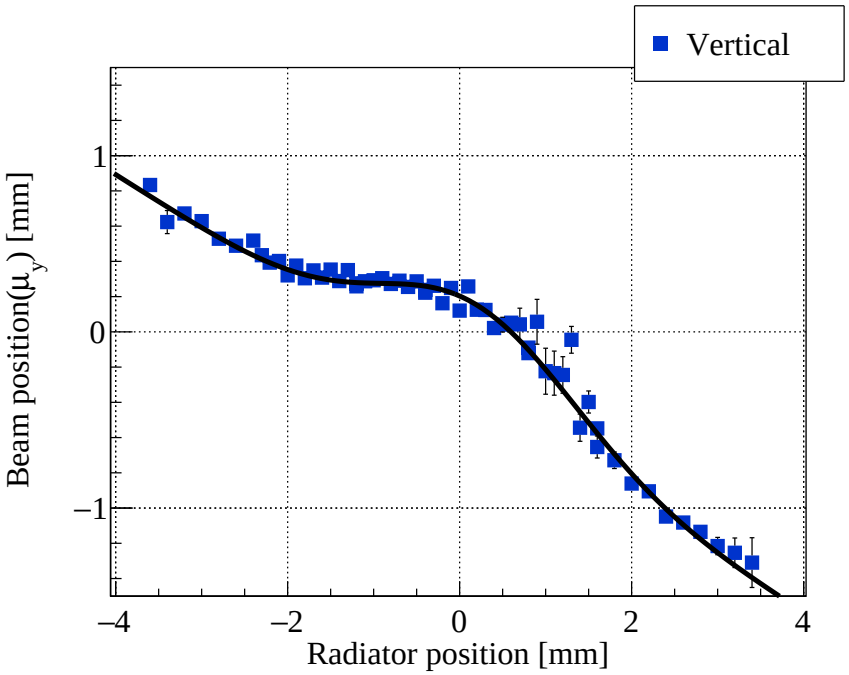


図 4.7: ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM2($z_{\mathrm{BPM}} = 5.66$ m)

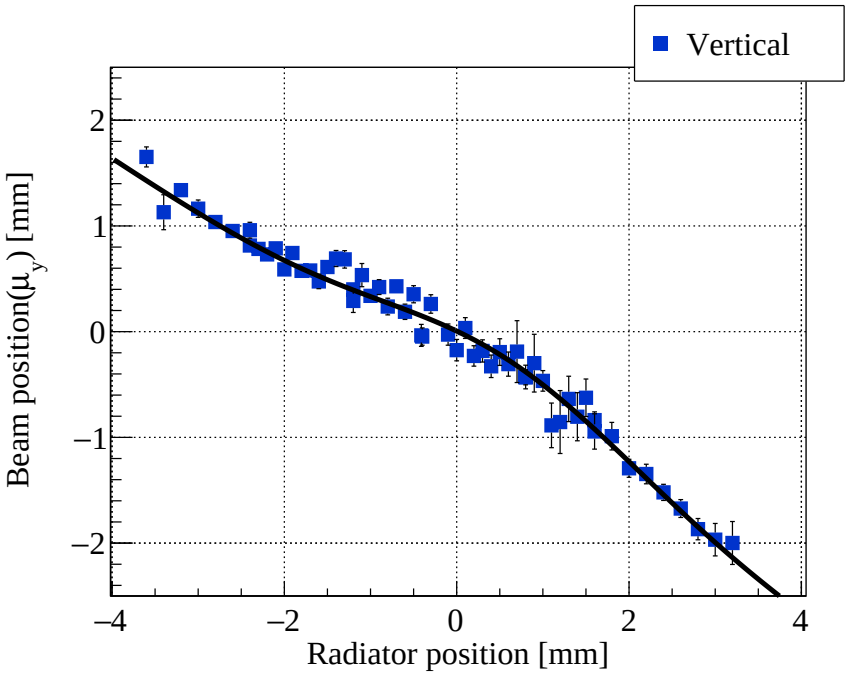


図 4.8: ビーム垂直位置とラジエータ位置の相関へのフィッティング結果: BPM3($z_{\mathrm{BPM}} = 10.13$ m)

表 4.3: フィッティング結果

BPM	z_{BPM} [m]	一次関数傾き
BPM1	2.99	-0.184 ± 0.001
BPM2	5.66	-0.311 ± 0.004
BPM3	10.13	-0.543 ± 0.035

得られた一次関数の傾きと各 BPM のラジエータ地点からの距離との相関をプロットし、更に一次関数をフィットした結果を図 4.9 に示す。この傾きの絶対値はラジエータからの距離と共に増大する様子が分かる。従って、BM4 ラジエータ地点における重力方向の角度分布は、水平位置によって変化するような $x-y$ カップリングを持っていることを示している。BST リング中の電磁石のアラインメントにより、このようなカップリングが生じている可能性がある。どの電磁石がこのカップリングの原因かは、今回得られた情報だけからは特定できないが、要因の一つとなり得る四重極電磁石は BM4 ラジエータの直前に設置されている (図 4.10)。

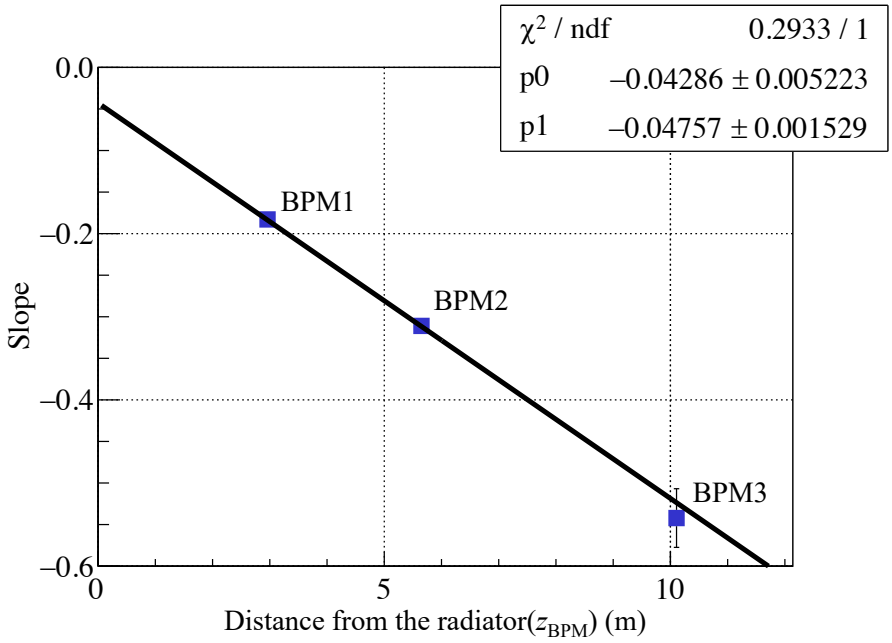


図 4.9: 傾きとラジエータからの距離の相関

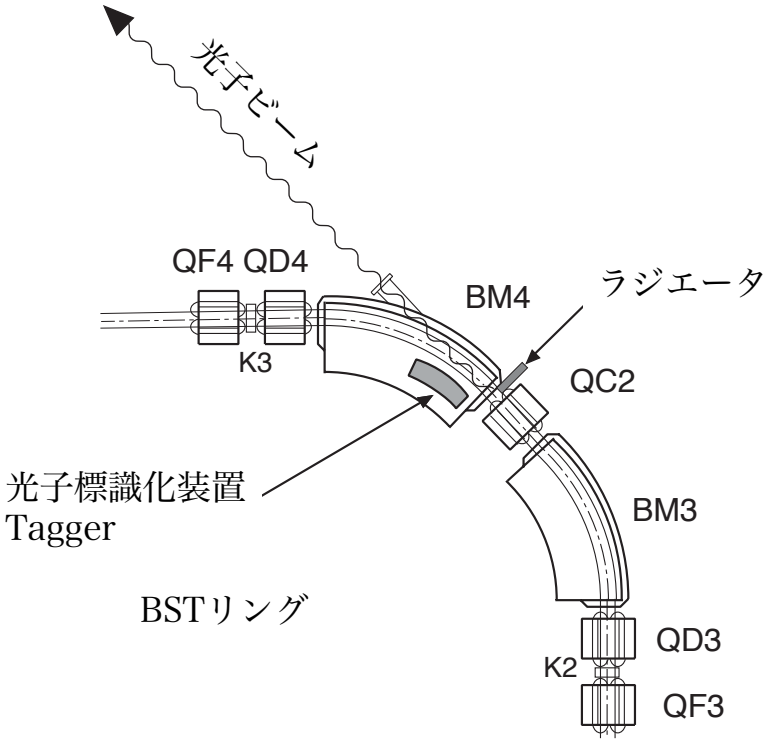


図 4.10: BM4 偏向磁石・ラジエータ近辺の模式図 [10]。双極偏向電磁石 BM3、BM4 の間には四重極電磁石 QC2 が設置されている。この QC2 の直後で BM4 光子ビームライン用のラジエータを挿入し、制動放射により光子ビームを取り出している。

4.2 光子ビームサイズについての考察

光子ビームプロファイルのラジエータ位置依存性について、ビームサイズについても考察する。

4.2.1 ラジエータ位置依存性

光子ビームサイズは 3.3.4 節で示したようにラジエータの位置に大きく依存して変化する。スピル内時間での変化で見えていたビームサイズの増加も、ラジエータ位置の変化によるものである。光子ビームサイズとラジエータ位置の相関に対し、ガウシアン + constant でフィッティングすると、次の図 4.11−4.14 に示すようにビームサイズの広がり方は正規分布に従う様子が見られる。

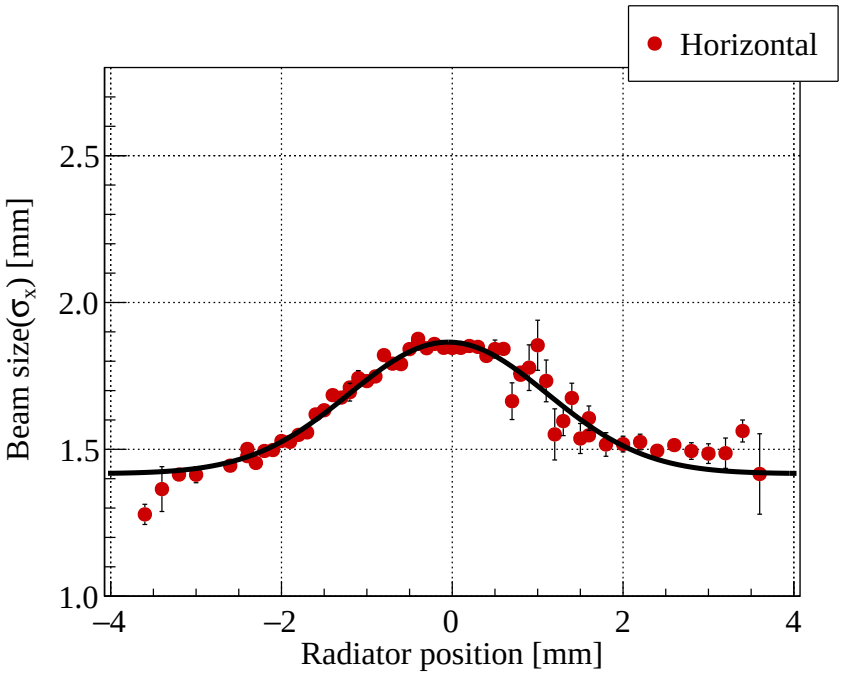


図 4.11: 光子ビームサイズ (水平方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 ($z_{\mathrm{BPM}} = 2.99$ m)

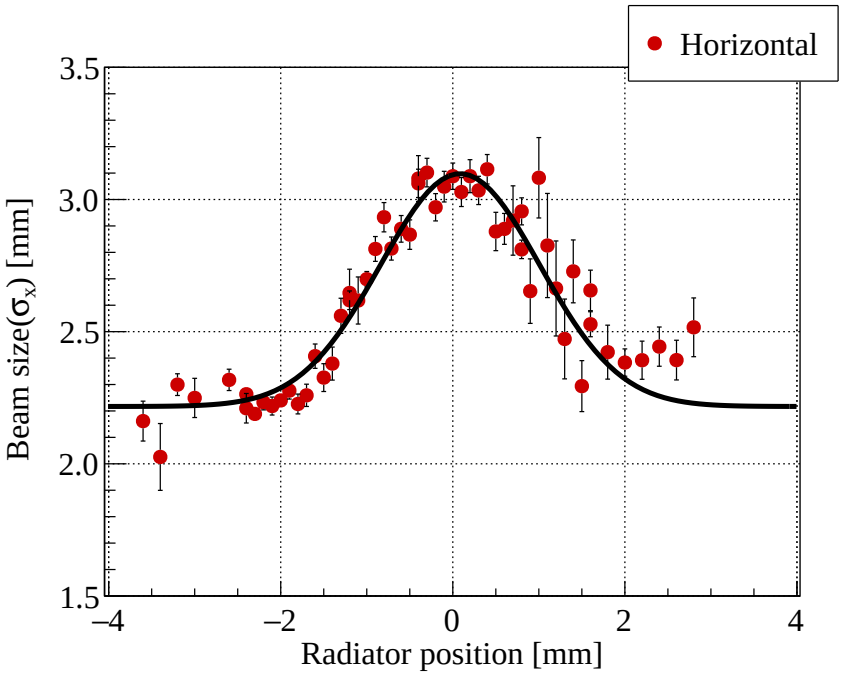


図 4.12: 光子ビームサイズ (水平方向) のラジエータ位置依存性: BPM2 ($z_{\mathrm{BPM}} = 5.66$ m)

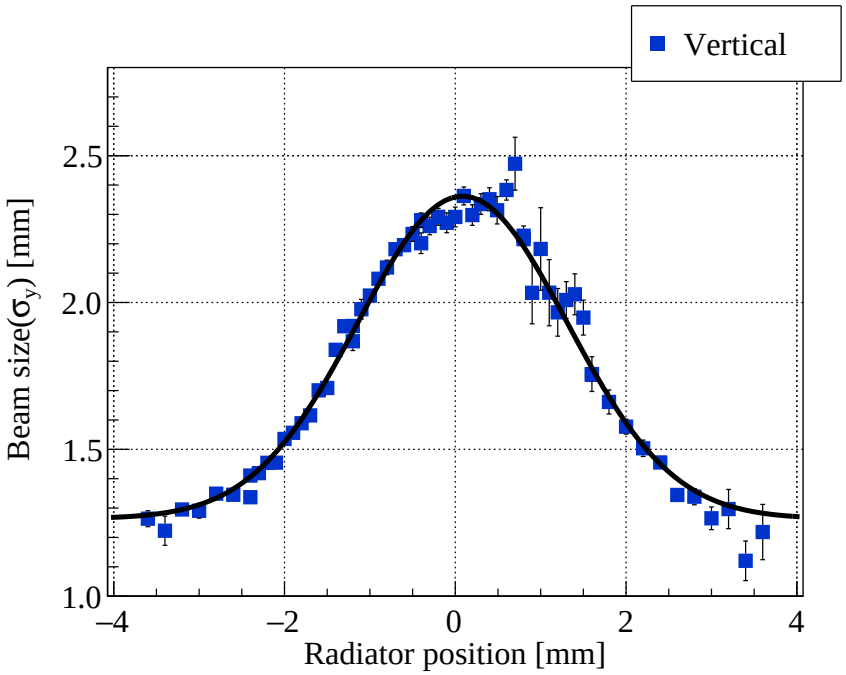


図 4.13: 光子ビームサイズ (垂直方向) のラジエータ位置依存性: BPM1 ($z_{\mathrm{BPM}} = 2.99$ m)

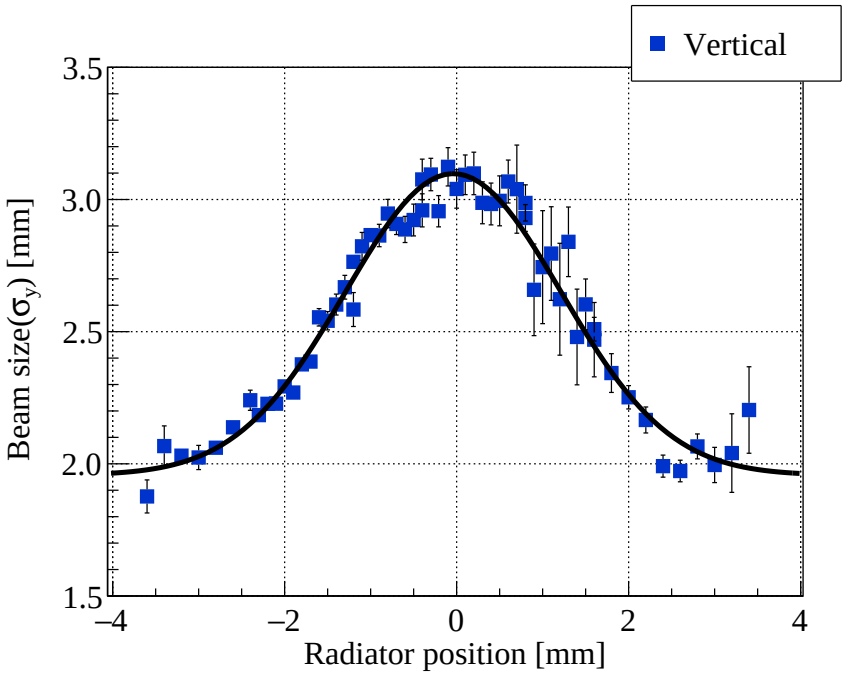


図 4.14: 光子ビームサイズ (垂直方向) のラジエータ位置依存性: BPM2 ($z_{\mathrm{BPM}} = 5.66$ m)

表 4.4: フィッティング結果

BPM	z_{BPM} [m]		ガウシアン面積 [mm^2]
BPM1	2.99	水平方向	1.305
		垂直方向	3.378
BPM2	5.66	水平方向	2.047
		垂直方向	3.587

ラジエータ位置の変化によって光子ビームサイズが変化する理由の一つに、ラジエータによって削り出される電子が持つ角度分布の広がり方が、ラジエータ位置によって変化することが挙げられる。図 4.14 に周回電子分布の $x - x'$ 位相空間と、ラジエータ位置と削り出す電子分布の概念図を示す。赤線で示す部分がラジエータによって削り出される電子分布であり、ラジエータが周回電子ビームの中心付近に近づくほど、削り出される電子ビームの持つ運動量の角度方向の広がりが大きくなる。

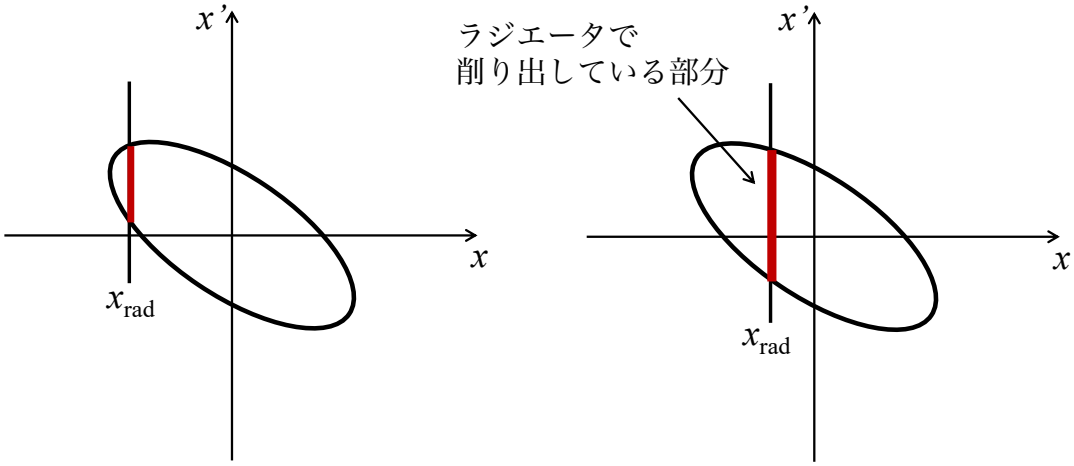


図 4.15: ラジエータ位置と削り出す電子分布の概念図。リング内の周回電子分布の $x - x'$ 位相空間とラジエータ位置 x_{rad} を示した。赤線で示した部分がラジエータによって削り出されている電子分布である。ラジエータが周回電子の端の方にいる時 (左図) と中心部付近にいる時 (右図) では削り出している電子の角度分布の広がりが異なる。中心付近に近いほど広い角度領域の電子ビームを削り出す。

この他に考えられる要因に、ラジエータの挿入によるエミッタンスの悪化 (楕円の面積が広がる現象) が挙げられる。エミッタンスの悪化は周回電子ビームとラジエータの衝突回数に従って大きくなると考えられるため、ラジエータ位置が内側に近づくほど大きくな

る可能性がある。図 4.16 に BM5 ラジエータ地点において、ラジエータを $x_{\mathrm{rad}} = 1.5$ mm の位置に挿入した場合のエミッタンスの変化の計算結果を示す [38]。この計算は ELPH の武藤氏によるものである。この計算結果では、ラジエータの挿入によって水平方向では大きな変化は見られないが、重力方向にはエミッタンスが増大している。この時、ラジエータのワイヤーに当たった電子が持つエミッタンスと、電子ビーム全体が持っていたエミッタンスを比較した結果を図 4.17 に示す。この結果は、光子ビームサイズは単純に電子ビームの持つエミッタンスから想定されるビームサイズよりも大きくなることを示している。この効果は水平方向と重力方向で現れ方が異なる。これは水平方向と重力方向で、エミッタンスの元の大きさが異なるためである。BM5 における水平方向のエミッタンスは $\varepsilon_x = ((13.75 \pm 0.09) \times 10^{-8})$ m[15] であるが、重力方向のエミッタンスは理想的には 0 になるよう設計されている [39]。実際には有限の値を持つが、水平方向と比較すると十分小さい値である。従って、ラジエータの挿入によるエミッタンスの悪化の効果は水平方向よりも重力方向の方が大きい。同様の振る舞いが BM4 においても起こり得ると考えられる。実際の測定結果 (図 4.11–4.14) に対するフィッティングの結果でも、ガウシアンの面積は各 BPM 地点において重力方向の方が水平方向よりも大きい値を示していることが確認できる (表 4.4)。

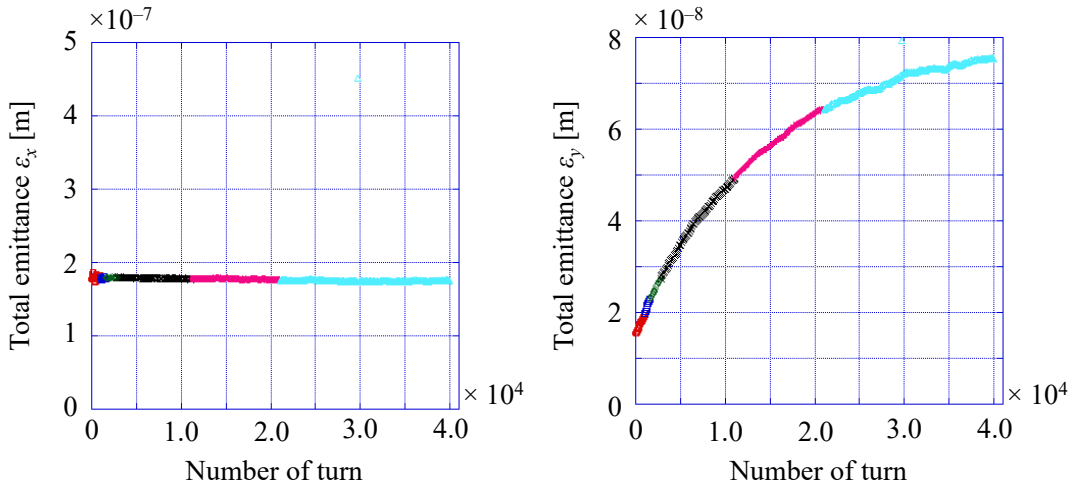


図 4.16: ラジエータ挿入によるエミッタンスの変化 (BM5 ラジエータ地点)[38]。ラジエータ位置 $x_{\mathrm{rad}} = 1.5$ mm の時のエミッタンスである。左図が水平方向エミッタンス ε_x、右図が重力方向エミッタンス ε_y であり、横軸は周回電子のターン数である。また、プロット点の色の違いはシミュレーション時の出力ファイルの違いであり、物理的意味の違いは無い。

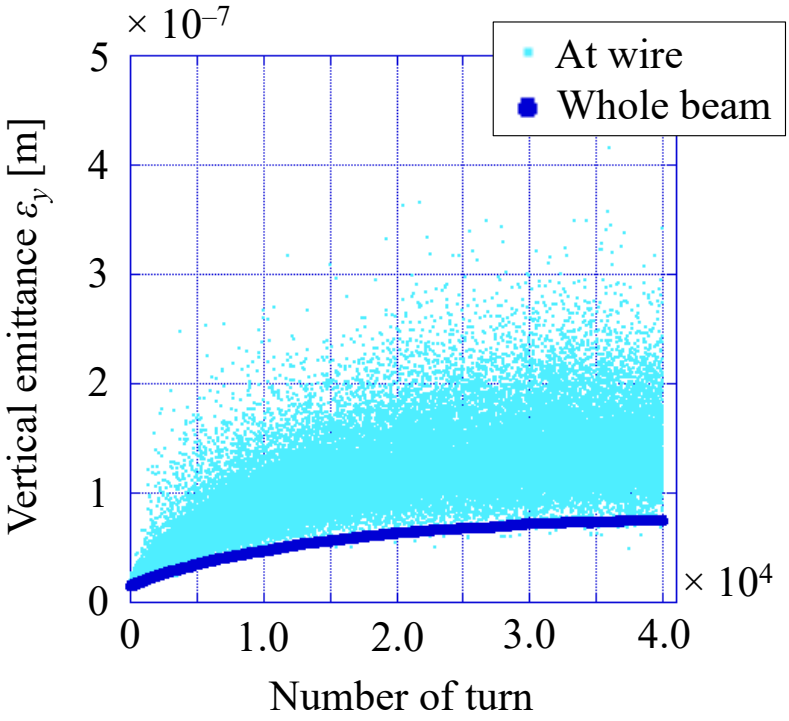


図 4.17: ラジエータのワイヤーに当たる電子のエミッタンスと電子ビーム全体のエミッタンスの比較 [38]。水色点がラジエータのワイヤーに当たった電子のエミッタンス (重力方向)、紺色点が電子ビームが持つエミッタンス (重力方向) を示す。

4.2.2　ラジエータからの距離依存性と理論的予測

光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性について、各 BPM で測定した値 (スピル内平均値) と武藤氏のシミュレーションに基づいた理論計算を比較した。このシミュレーションはラジエータの挿入時に起こる電子散乱が光子ビームサイズに与える効果を見積もるためのものである。シミュレーションでは以下の手順で光子ビームサイズの計算を行う [38]。

1. リングの光学系から BM4 ラジエータ地点における twiss パラメータと水平方向のエミッタンス ε_x を求める。
2. 1. の計算結果を用いて、周回電子ビームのうちラジエータワイヤーに当たる電子を N_e 個発生させる。この時、重力方向のエミッタンスは $\varepsilon_y = 0.1\varepsilon_x$ と仮定。
3. 生成した Ne 個の電子全てが大角度 (> 0.124 mrad) の Mott 散乱をすると仮定し、Mott 散乱の式に応じたキックを乱数で各電子に与える。

4. 3. の電子をリング 1 周でトラッキングする。
5. 4. の電子のうちラジエータに当たる電子を記録する。
6. 3. - 4. を 1,000 回行い、記録された全ての電子 N_{record} がガンマ線を作ると考える。
7. N_{record} に制動放射の角度分布からなる乱数でキックを与え、ガンマ線を生成する。
8. 作られたガンマ線を自由空間内で必要な距離飛ばす。

手順 8 では以下の式 4.2.1 に基づいて光子ビームサイズ σ_x、σ_y を得ることができる (図 4.18)。

$$\begin{aligned}\sigma_x(z_{\mathrm{bpm}}) =& \sigma_{x0} + \sigma_{x'0} \cdot z_{\mathrm{bpm}} \\ \sigma_y(z_{\mathrm{bpm}}) =& \sqrt{\sigma_{y0}^2 + (\sigma_{y'0}(z_{\mathrm{bpm}} - z_0))^2}\end{aligned} \tag{4.2.1}$$

ここで、σ_{x0}、σ_{y0} は $z = 0$ における光子ビームサイズ、$\sigma_{x'0}$、$\sigma_{y'0}$ は $z = 0$ における光子ビームの角度広がりである。また、z_0 は収束点 (σ_y の極小値、即ち $\alpha = 0$ をとる点) をとる z の位置である。σ_{x0} はラジエータワイヤーの幅 (11 μm) とする。図 4.19 にシミュレーションによる光子ビームサイズの計算結果を示す。この図で示すのは $z_{\mathrm{rad}} = 3.09$ m

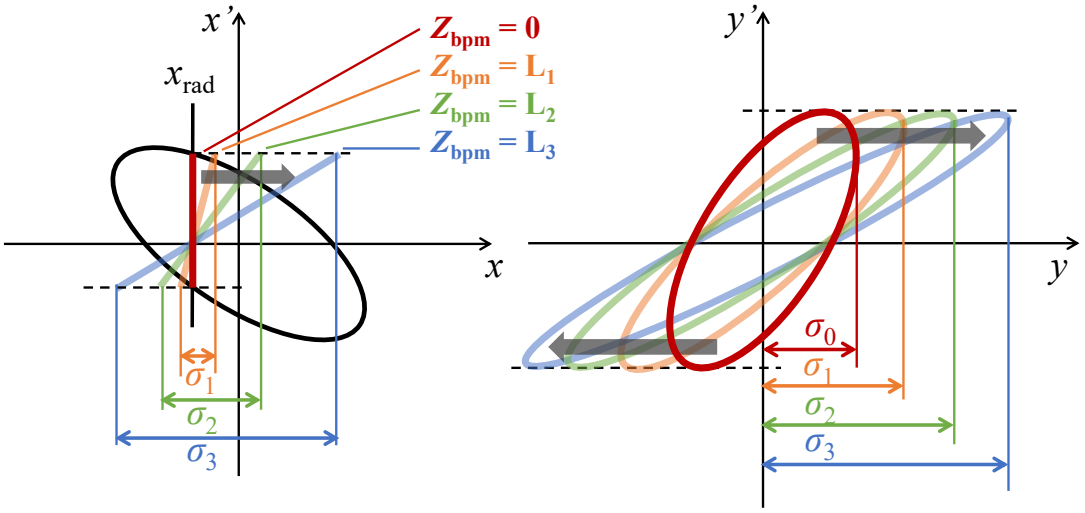


図 4.18: 各距離 z_{bpm} における光子ビームサイズの概念図。左図は水平方向、右図は垂直方向の位相空間である。ある位置 x_{rad} にラジエータが挿入された時、削り出される電子ビームは図中の赤線で示される。この時生成された光子ビームは z_{bpm} の増加 ($z_{\mathrm{bpm}} = L_1 \to L_2 \to L_3$) に伴って変化する。このため、水平方向ビームサイズ σ_x は 1 次関数に従って増大し、重力方向ビームサイズ σ_y は式 4.2.1 に従って増大する。

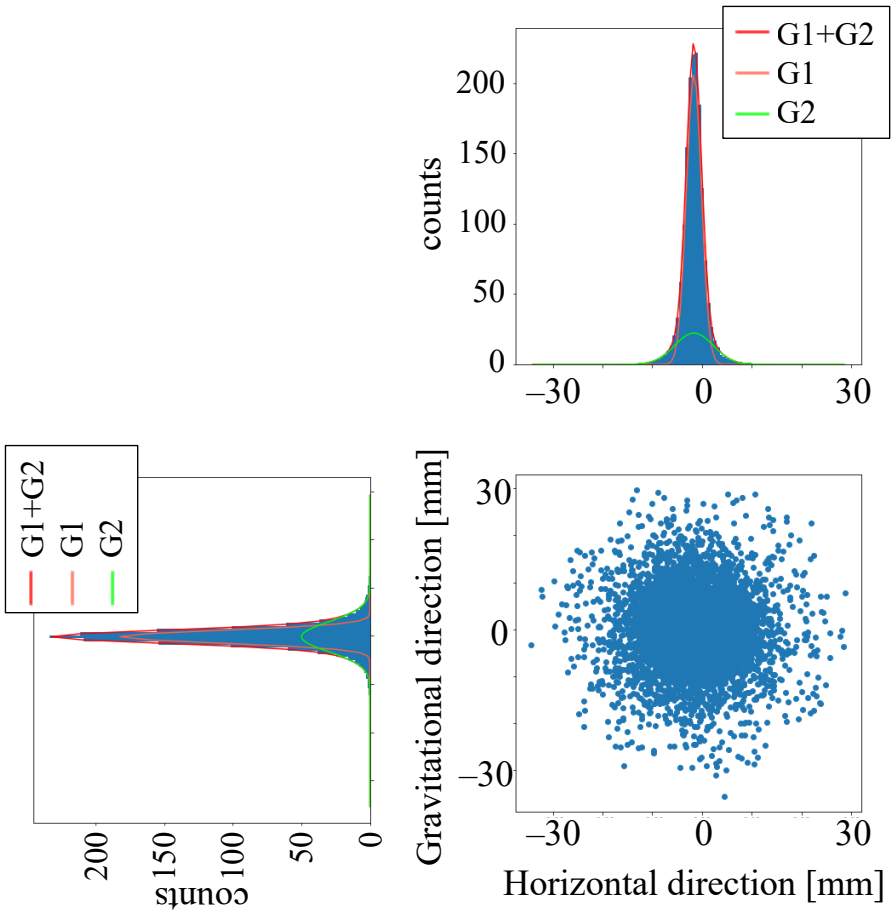


図 4.19: シミュレーションによる光子ビームサイズの計算結果 [38]

地点での光子ビームサイズである。シミュレーションの結果でもガウス関数を 2 つ重ねた関数でフィットできている。以下、図中の G1 で示すガウス関数の σ をビームサイズとして評価に用いる。

図 4.20 に BM4 光子ビームにおけるビームサイズのラジエータからの距離 z_{bpm} 依存性の計算結果と測定結果を示す。図中赤線、青線で示しているのがシミュレーションに基づく計算結果であり、赤丸点、青四角点が各地点における光子ビームサイズの測定結果である。赤色は水平方向、青色は重力方向を表す。シミュレーションと測定結果を比較すると、水平、重力方向ともに完全には一致していないが、測定した領域 ($z_{\mathrm{bpm}} > 2.5$ m) において水平方向の方が重力方向より大きく段々とその差が広がっていく様子が、測定結果でも確認できる。重力方向はシミュレーションと比較してビームサイズの増え方が小さいため、測定結果の妥当性をフィッティングにより確かめた。フィッティング関数は式 4.2.1 とし、σ_{y0}、$\sigma_{y'0}$ の 2 つの変数をフィッティングパラメータとした。また、収束点 z_0 は次のように計算から求めた。

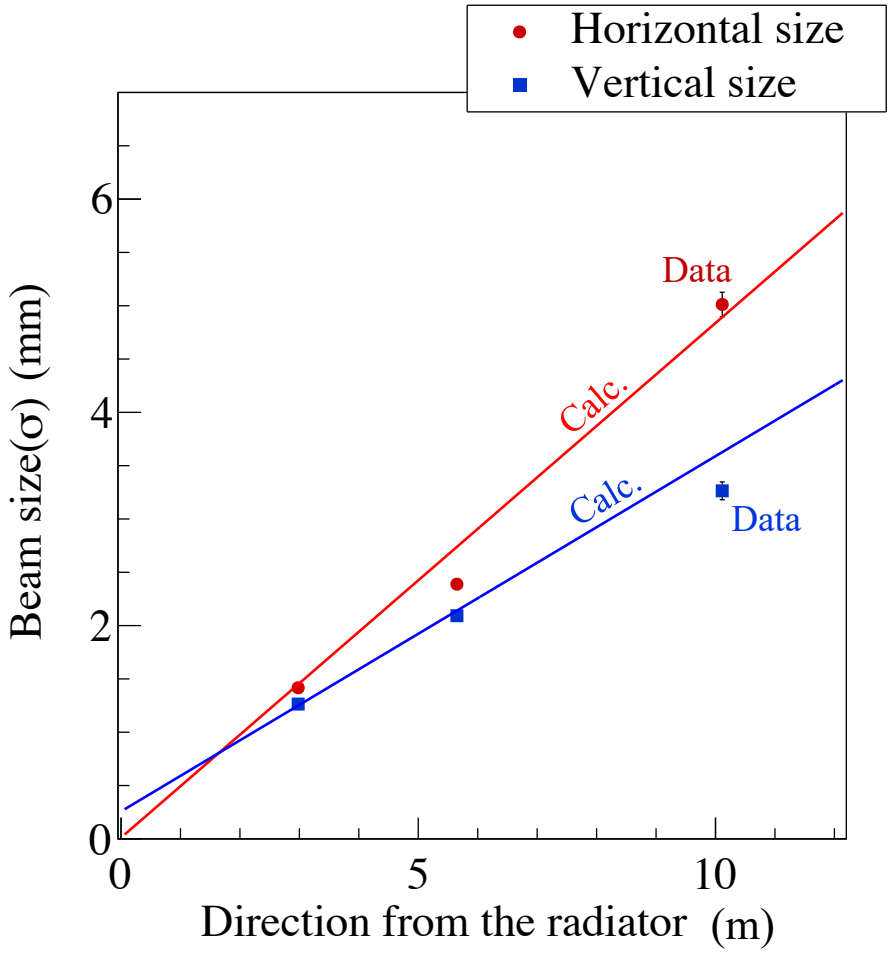


図 4.20: 光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性。赤線は水平方向の、青線は重力方向のビームサイズのシミュレーションによる計算値を示す。赤丸点、青四角点がそれぞれ水平方向、重力方向の測定結果である。

$z = 0$ から $z = z'$ までの転送行列 M_1 は自由空間なので

$$M_1 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4.2.2}$$

と書くことができる。従って、$z = 0$ における Twiss parameter を $(\beta_0, \alpha_0, \gamma_0)$ とすると $z = z'$ における (β, α, γ) は z の関数として

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix}\beta(z)\\ \alpha(z)\\ \gamma(z)\end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{11}m_{21} & m_{11}m_{22}+m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ m_{21}^2 & -2m_{21}m_{22} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix}\beta_0\\ \alpha_0\\ \gamma_0\end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & -2z' & z'^2 \\ 0 & 1 & -z' \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix}\beta_0\\ \alpha_0\\ \gamma_0\end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \beta_0 - 2z'\alpha_0 + z'^2\gamma_0 \\ \alpha_0 - \gamma_0 z \\ \gamma_0 \end{pmatrix}\end{aligned} \tag{4.2.3}$$

と記述できる。Twiss parameter の関係式

$$\gamma = \frac{1+\alpha^2}{\beta} \tag{4.2.4}$$

を代入し、$\alpha(z_0) = 0$ を解くと、

$$z_0 = \frac{\alpha_0\beta_0}{1+\alpha_0^2} \tag{4.2.5}$$

と書くことができる。BM4 における Twiss parameter$(\beta_0, \alpha_0) = (2.34, -1.16)$ を代入すると、

$$z_0 = \frac{\alpha_0\beta_0}{1+\alpha_0^2} = -1.157 \text{ m} \tag{4.2.6}$$

と求められる。式 4.2.1 に $z_0 = -1.157$ を代入し、フィッティングを行った結果を図 4.21、表 4.5 に示す。 角度広がり $\sigma_{y'0}$ は、エミッタンスの式 1.2.4 とビームサイズの式 1.2.5 から計算することができる。今、シミュレーションでは重力方向のエミッタンス ε_y を水平方向のエミッタンス ε_x より十分小さいとして $\varepsilon_y = 0.1\varepsilon_x$ としている。同様に $\varepsilon_y = 0.1\varepsilon_x = 0.0135$ mm·mrad の場合を仮定すると

$$\sigma_{y'0} = \sqrt{\gamma_y\varepsilon_y} = \sqrt{1.06 \cdot 0.0135} = 0.120 \text{ mrad} \tag{4.2.7}$$

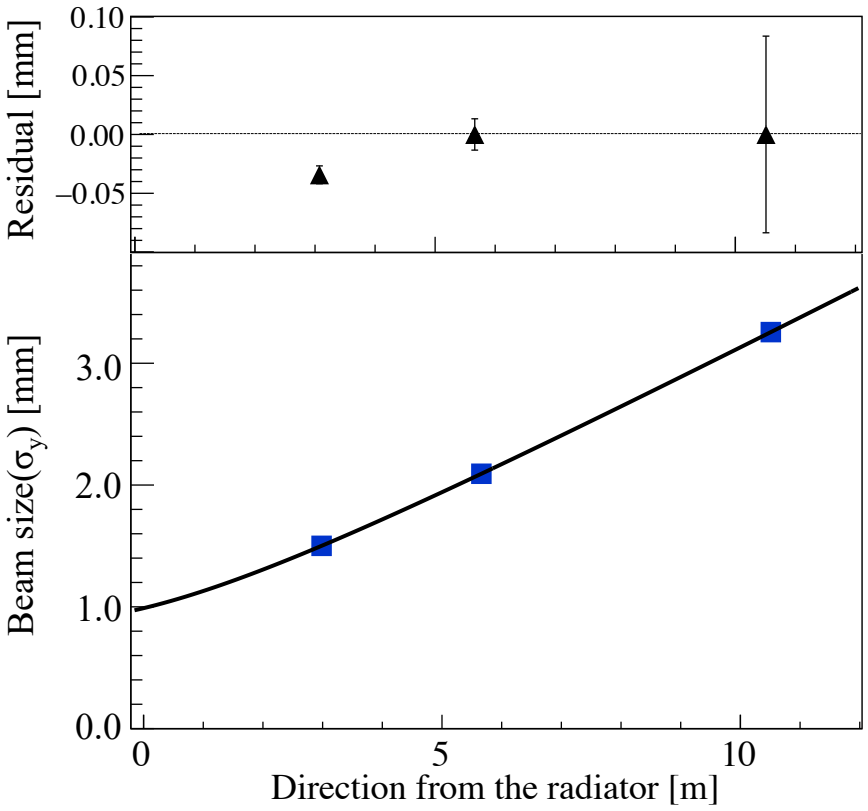


図 4.21: 重力方向光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性。重力方向の測定結果 (青四角点) に対し式 4.2.1 をフィッティングした。

と求められる。フィット結果 $\sigma_{y'0} = 0.271$ mrad より小さい値である。この角度広がり $\sigma_{y'0}$ の値は式 4.2.1 から分かるように、$z_{\mathrm{bpm}} \gg z_0$ の時、図 4.20、4.21 における傾きを表す量である。従って、ラジエータからの距離が大きくなるに従って光子ビームの大きさを広げる要因に、制動放射による角度広がりや電子散乱によるエミッタンス悪化の効果が含まれていることが考えられる。

表 4.5: 光子ビームサイズのラジエータからの距離依存性に対するフィッティング結果

フィットパラメータ	結果	
σ_{y0}	0.980 ± 0.023	[mm]
$\sigma_{y'0}$	0.271 ± 0.003	[mrad]

4.3　電子ビームサイズの見積もり

BPM を用いた測定により、光子ビームの提供源である BST リング中の周回電子ビームサイズを見積もった。前述 1.2.2 の通り、ラジエータの位置 $x_{\rm rad}$ が変化すると、単位時間あたりに削り出す電子ビームの量も変化する。各ラジエータ位置における光子ビーム強度 $I(t, x_{\rm rad})$ の経過時間の関数

$$I(t, x_{\rm rad}) = I_0 \exp\{-\Gamma(x_{\rm rad})t\} \tag{4.3.1}$$

から、減衰定数 Γ を測定した。

減衰定数 $\Gamma(x_{\rm rad})$ として、各ラジエータ位置 $x_{\rm rad}$ における HUL1 の総カウント数の減衰率を用いた。図 4.22 に各ラジエータ位置 $x_{\rm rad}$ 毎の総カウント数の時間推移を示す。この時間推移に対し、$\Gamma(x_{\rm rad})$ をフィッティングパラメータとして式 4.3.1 をフィットした。

4.3.1　HUL の総計数率から得られた電子ビームサイズ

フィッティングより得られた各ラジエータ位置 $x_{\rm rad}$ における減衰定数 $\Gamma(x)$ を、次の図 4.23 に示す。

得られた電子ビームの強度分布をガウス分布と仮定し、フィッティングを行なった (図 4.23)。ただし、フィット範囲は図中に示すガウス関数のうち赤線で示した範囲である。表 4.6 にフィッティング結果を示す。

表 4.6: 電子ビームプロファイルの測定値

中心位置	μ_{ex}:	-0.066 ± 0.002 mm
幅	σ_{ex}:	0.803 ± 0.001 mm

フィッティング結果の妥当性を評価する。式 1.2.5 で表される x 軸方向の粒子の広がり σ_x は、実際には分散 η_x によるビームの運動量広がり $\Delta p/p$ の効果を含む。

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + \left(\eta_x \frac{\Delta p}{p}\right)^2} \tag{4.3.2}$$

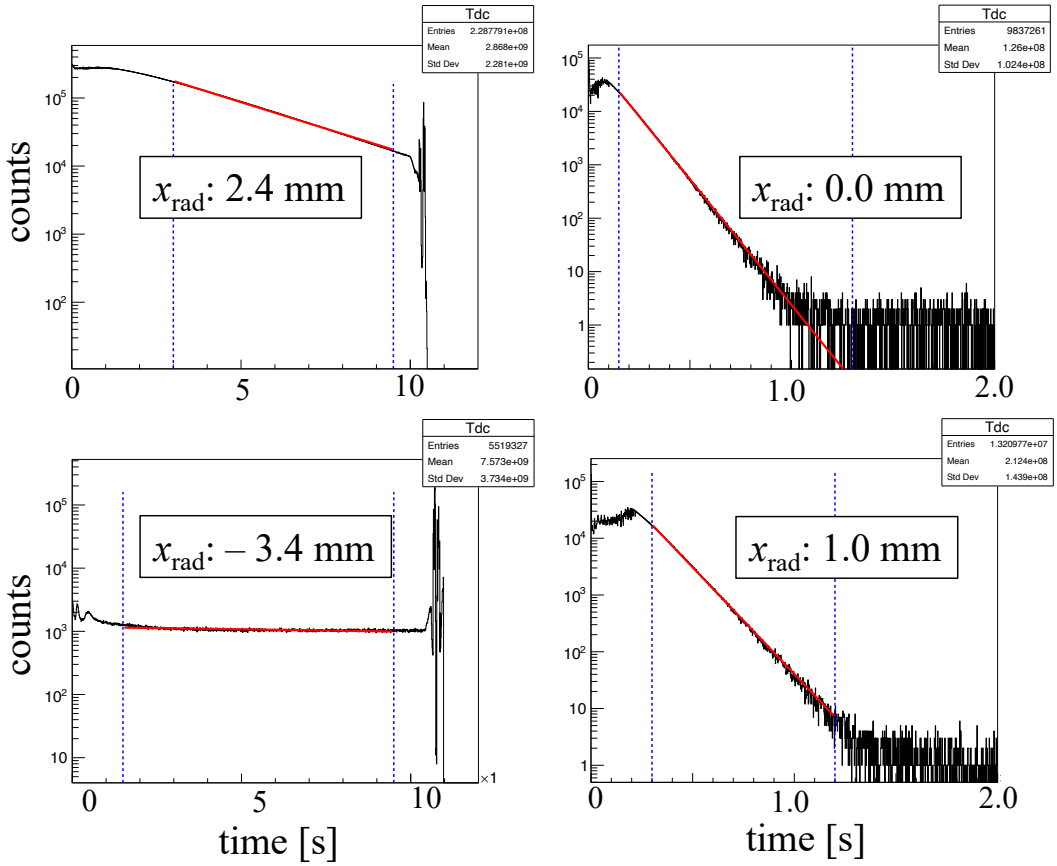


図 4.22: 各ラジエータ位置 x_{rad} における HUL1 の総カウント数の減衰率。x_{rad} が 3 mm を超えるような地点では電子の存在確率が低く減衰率は 0 に近づく。一方で、電子ビームの中心付近では約 1 秒で全ての電子ビームが削り出される。約 1 ns の高サンプリングレートを持つ StrTDC はこの測定を可能にした。初めの数秒間に見られる構造に関してその起源は分かっていないが、BST リングが電子を加速し貯蔵の過程に移ってから安定するまでに時間がかかる可能性などが挙げられる。

表 4.1 の値を用いて式 4.3.2 を計算すると、電子ビームサイズは $\sigma_x \simeq 0.76$ mm と予想される。従って、得られた測定値 ($\sigma_{ex} = 0.803 \pm 0.001$ mm) はこの計算値と 0.1 mm の精度で一致する。一般に、電子ビームはリングに入射されたのち、加速の過程と減衰の過程の間に複数回の確率過程を仮定を繰り返すために、ガウス分布に従うことが予想される。しかし、図 4.23 から分かるように、ビーム中心付近ではフィッティング関数であるガウス関数と測定値が合っていない。原因として、データ収集系の数え落としによる影響が挙げられるが、図 4.22 の様子から、StrTDC 上での数え落としは生じていないと考えられる。この結果から、電子ビームの粒子分布が実際にはガウス分布には従わない可能性があると言える。または、ラジエータを電子ビーム中心付近に挿入したことにより、電子散乱

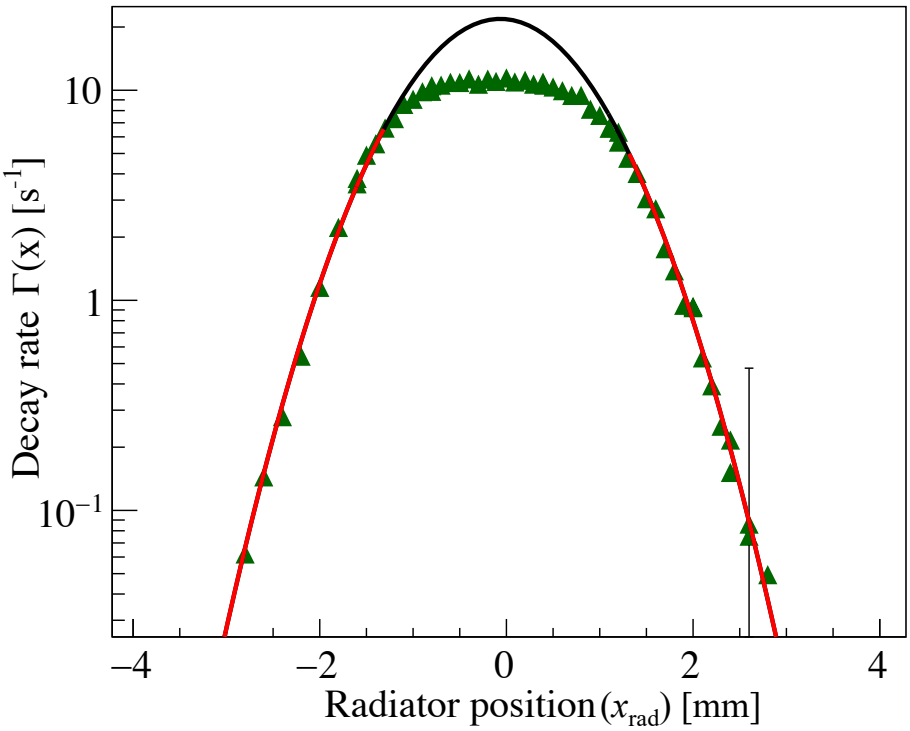


図 4.23: 測定した電子ビームプロファイル。各ラジエータ位置 x_{rad} における計数率の減衰定数を測定し、プロットした。フィッティング関数はガウス関数であり、フィット範囲は図中の赤線部分である。

の効果でエミッタンスが悪くなる可能性が挙げられる。これにより電子ビームの強度分布が広がると、S/N の値は小さくなる。本測定結果はこの効果に起因する可能性もある。

第 5 章

まとめと今後の展望

本章では最後に、これまで述べてきた本研究の結果をまとめ、今後の展望と課題を述べる。

5.1 本研究のまとめ

本研究では ELPH BM4 光子ビームラインにおいて、光子ビームのプロファイリングを定量的かつ即時的に行うため、新たにビームプロファイルモニタ (BPM) を開発した。BPM はプラスチックシンチレーションファイバーと SiPM を基本構造とする検出器であり、荷電粒子除去のための VETO カウンタと光子コンバータを組み合わせることにより、中性粒子である光子ビームのプロファイルを可能にしている。更にトリガーレス DAQ システム、Streaming TDC の導入により、数 10 MHz を超える高強度な光子ビームの検出を可能にした。その位置を 1 秒間のビームプロファイルに対して 10 μm を超える精度で測定可能である。

光子ビームのプロファイリングを定量的かつ高精度に行えるようになったことで、加速器が持つ特性にもアプローチすることが可能になった。本研究ではビームプロファイルのラジエータ位置依存性の振る舞いを用いた、BST リングの固有パラメータである Twiss parameter の測定や、計数率の減衰定数を用いた電子ビームのプロファイリングを行なった。これらの結果から、今後 ELPH BM4 光子ビームラインにて物理実験を行うにあたり、複数の偏向電磁石や四重極電磁石の調整や、ラジエータ移動速度等を含む加速器調整のために重要なパラメータを提供することが可能である。

5.2　今後の展望と課題

本研究で開発した BPM は、今後の ELPH BM4 光子ビームラインにおける物理実験時のビーム位置較正のために継続的に運用していく予定である。現在は GUI(Graphic User Interface) によるビーム位置即時測定システムの開発も進めており (図 5.1)、実際に BM4 光子ビームラインのユーザーが誰でも光子ビーム位置とサイズを即時に測定できるようなシステムを導入する。また、光子ビームのプロファイルに留まらず、本研究で示したような加速器研究の結果を、今後も加速器調整へのフィードバックとして提供していくことが期待される。

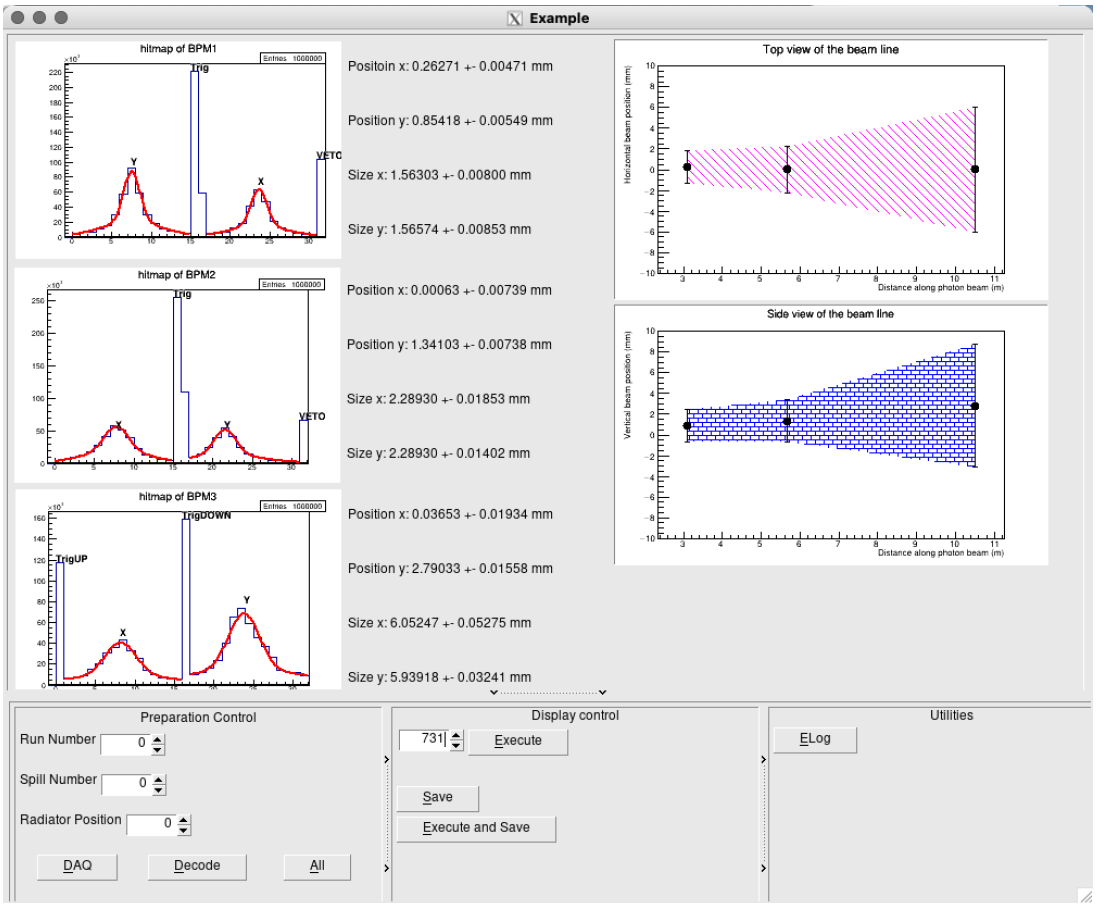


図 5.1: BPM 運用のための GUI。3 台の BPM をボタン一つで一度に運用し、即時にビーム位置とサイズを表示する。左側に表示している図は全チャンネルのヒットマップと x, y 方向に対するフィッティングの結果である。右側の図はラジエータからの距離と、測定したビーム中心位置・ビームサイズ (1σ) を視覚的に分かりやすく表示している。

今後の課題として、次の 3 つが挙げられる。

1. **VETO カウンタの検出効率向上**

   現状の VETO カウンタはシンチレーションファイバーを俵積みに設置したものであるが、構造上の問題により十分な検出効率を確保できていない可能性がある。VETO カウンタの検出効率と背景事象が光子ビームプロファイルに与える影響については現在調査を進めている。今後、より高検出効率を持つ形状の VETO カウンタへの置き換えを検討する必要がある。

2. **標識化光子プロファイルのためのデータ収集システムの改善**

   標識化光子のプロファイルを調べるためには、本論文でも説明したように、Tagger と BPM のコインシデンスイベントを選択する必要がある。本研究では Tagger と BPM にそれぞれ独立した HUL を用いてデータ収集を行ったために、コインシデンスイベントを選択するにあたり TDC 較正を $10^{-9} - 10^{-10}$ の精度で行う必要があった。本来、HUL を複数台同時に運用する場合には、共通の外部クロックを用いる。導入した StrTDC では、ファームウェア上に外部クロックを用いるオプションが無かったため今回はオフラインでの TDC 較正を行ったが、今後は Tagger と BPM のコインシデンスイベントをより効率的かつ即時的に選択できるようにするため、外部クロックの導入を検討する必要がある。

3. **読み出し回路における信号整形の向上**

   MPPC の出力信号読み出し回路については、将来的に BPM のデータ収集に適した信号整形を行う ASIC 基板に置き換えることを検討している。本研究の段階では TOT 回路を採用しているものの、電荷情報と TOT の線形性は保証しておらず、検出したタイミング (Leading edge のタイミング) のみを解析に用いるに留まっている。専用 ASIC 基板の開発により、電荷情報と TOT の線形性を保証した信号整形を行うことで、エネルギー損失量の測定が可能になるだけでなく、より安定した信号伝送を可能にすることが期待される。

本研究で開発したプラスチックシンチレータと SiPM、トリガーレス DAQ を組み合わせた荷電粒子位置検出器の技術を、今後はビーム測定だけでなく、スペクトロメータ較正のための粒子位置検出器へ応用することも検討している。我々のグループが推進している、米国ジェファーソン研究所におけるハイパー核質量分光実験では、スペクトロメータの角度較正が最終的なハイパー核質量の分解能を決める上で重要な情報を持つ。タングステン合金製コリメータを用いた従来のスペクトロメータ角度較正方法に、この粒子位置検出器技術を組み合わせることによって、より高精度な角度較正を可能にすることが期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援頂きました。ここに感謝申し上げます。

指導教員である中村哲教授には、日頃から大変お世話になりました。大学院入学前から毎週の物理数学のご指導に始まり、入学後も毎週のミーティングや、毎回の研究会のための発表練習、学振特別研究員申請書や修士論文執筆に関する相談に対して、常に大変丁寧に、熱心にご指導くださいました。また、中村教授には多くの研究発表の機会や、海外出張の機会を頂き、何ものにも代え難い経験を積ませて頂きました。ここに最大限の感謝を申し上げます。この２年間で特に印象深いのは、独マインツ大学への出張です。ご一緒できたのは１週間と短い間でしたが、限られた時間の中で国際共同実験をいかにしてリーダーシップをとって進めていくか、研究者として持つべき知識や姿勢、心構えを教えて頂きました。中村教授は私の遠い目標です。今後もより一層精進致しますので、ご指導ご鞭撻よろしくお願い申し上げます。

永尾翔助教には、本論文の研究テーマを提案して頂きました。本研究はもちろんのこと、入学以来、研究生活の全てにおいて手厚く丁寧なご指導、サポートをして頂きました。理論研究室出身で、オシロスコープの使い方も分からなかった私に対し、研究、実験に必要な全ての知識や技術を一つ一つ丁寧に教えて頂きました。ミーティング以外の時間にも、日頃から解析の進捗や検出器開発の準備状況に対して細かくアドバイスを頂きました。私が分からないなりに出したアイデアや意見も常に快く聞いてくださり、実現するためにはどうすれば良いか指針を示してくださったり、研究会、学会への参加や発表に対して背中を押してくださったりしたことが、研究を進める一番の原動力になりました。これからも大変お世話になるかと思いますが、どうぞよろしくお願い申し上げます。

本研究では同グループ、他研究グループの多くの方々にもご助力頂きました。金田雅司助教には、日頃から解析方法や道具の使い方など研究でつまづいた時に、何度も助けて頂きました。また、ビームタイムや授業の TA、毎週のミーティングなどを通して研究、特に実験に必要な知識を教えて頂き、本研究についても多くのご助言を頂きました。東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の武藤俊哉助教には、ミーティングやメールにて議論の機会を設けて頂き、本研究で得た結果についての考察に関して議論させて頂きました。

更にシミュレーション計算の結果も提供して頂きました。より深い考察と理解に繋げることができました。同 ELPH の日出富士雄准教授、石川貴嗣教授（現 RCNP 教授）には、本研究で必要なパラメータの提供、そして本研究を進める上でアドバイスを頂きました。またビームタイムの際には、大変お世話になりました。原子核物理研究室の梶川俊介氏には、ストリーミング TDC の導入の際にご協力頂きました。同研究室の大浦文也君には、検出器組み立ての過程で最も大変な作業であるファイバー張りを手伝って頂きました。石毛達大君には、BPM 運用とデータ収集のための GUI の作成においてその大部分の開発を行なって頂きました。そして、ELPH におけるビームタイムでは、同グループの外山裕一氏 (現 中部大学特任助教)、板橋浩介氏 (現 QUP 研究員)、上原圭太氏、秋山タケル氏、奥山和樹氏、中村雄紀氏、水野柾哉氏、藤原友正氏 (現 日本原燃)、橘昂我君、永野慎太郎君、石毛達大君、渡辺大護君、東京大学中村研究室の宇治知哉君、西幸太郎君、西田賢君に準備段階から実験運営まで多大なご協力を頂きました。加速器実験には、多くの技量と知識だけでなく、チームワークが何より大切であることを学びました。本研究も、皆様のご協力なしには成し遂げることはできませんでした。ここに最大限の感謝を申し上げます。

本研究とは直接関係はありませんが、同研究室の田村裕和教授、三輪浩司准教授、早川修平助教、京都大学の後神利志助教にもミーティングや、セミナーを通して大変お世話になりました。また、研究生活全般において日頃より支えて頂きました、技術職員の梅津裕生氏、事務職員の高橋あゆみ氏、佐々木幸恵氏、東京大学事務職員の柚木茉璃奈氏に感謝申し上げます。

最後に、これまで私の学生生活を支えてくださり、全力で応援してくださった家族と周りの方々に感謝いたします。来年度から始まる博士課程 3 年間は、一人前の研究者を目指し日々の勉強と研究に一層励みたいと思います。これからもどうぞよろしくお願いいたします。

付録 A

各チャンネルの利得と検出効率による影響

各チャンネル毎の MPPC の出力信号の利得と検出効率を調査し、これらのふらつきが最終的なプロファイルの精度に与える影響を見積もった。図 A.1 に示すのは、各 MPPC の 1 p.e. あたりの利得である。図 A.2 に光子数に対応する各チャンネル毎の MPPC 利得を示す。記録した利得は、信号増幅回路を介した後のオペアンプ AD8000 の出力信号である。それぞれ一次関数でフィッテングを行い、得られた傾きを図 A.1 にまとめている。

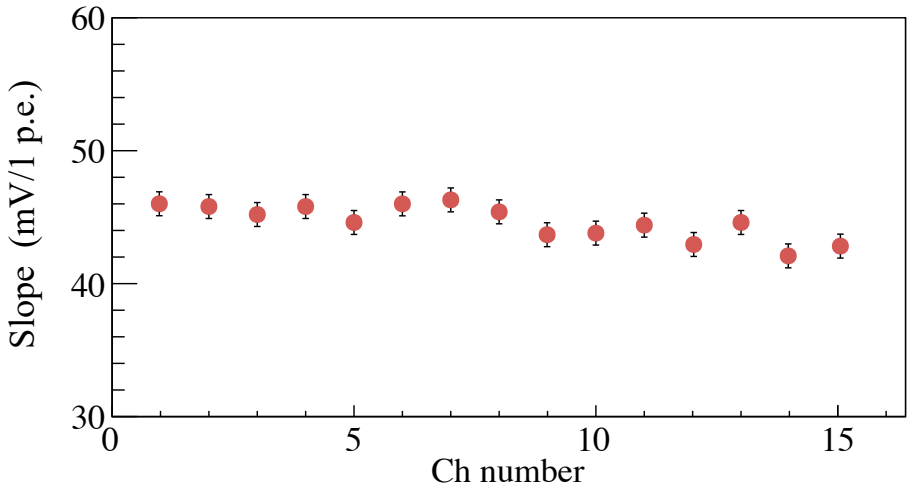


図 A.1: 1 光子あたりの各 MPPC 利得。図 A.2 に示す一次関数のフィッティングから得た傾きをプロットした。

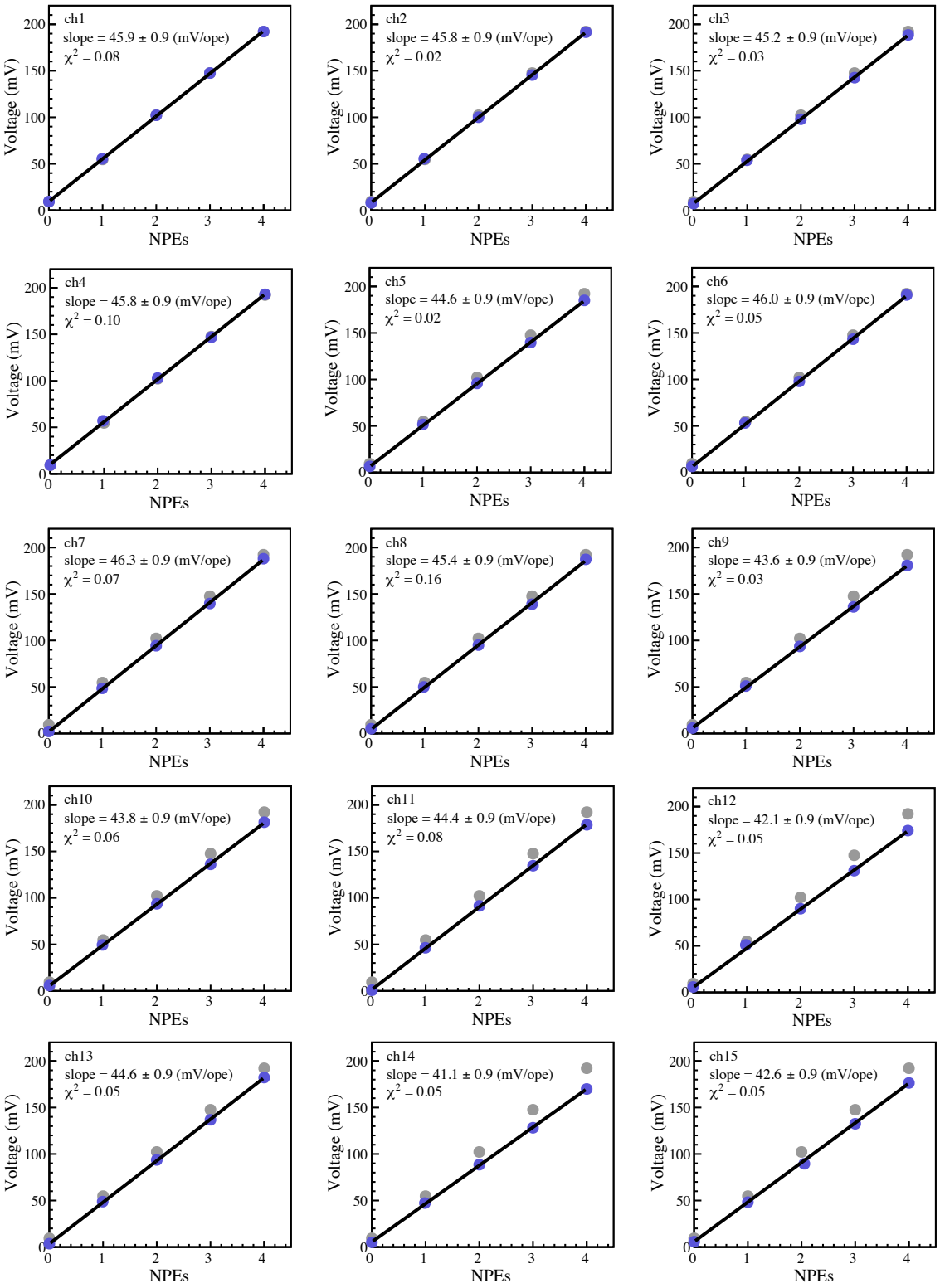


図 A.2: 各チャンネル毎の MPPC 利得の線形性。BPM のそれぞれのチャンネルにおいて光子数に対応する信号利得をプロットし、一次関数でフィッティングを行なった。図中の灰色の点は比較のため ch 1 の利得を同時プロットしている。

以上の結果から、デジタル変換閾値電圧として設定した 280 mV~6 p.e. (46.7 mV/1 p.e.) における各チャンネルの MPPC 利得は 10% 以下の精度で一定である。

次に MPPC の出力信号利得に 10% のずれがある場合に、各チャンネルの検出効率に与える影響を見積もった。図 A.3 にプロトタイプ (図 A.4) によるテスト実験時のアナログ出力信号を示す。上図は増幅後の 1 p.e. に相当する信号であり、下図は周回電子ビーム電流が約 1 mA の際に光子ビームを照射した時の出力信号である。プロトタイプでは実機と同じ型番のプラスチックシンチレーションファイバー (Kuraray SCSF-78) を用いているが、そのファイバー径は $\phi = 1.5$ mm である。また、MPPC は実機と同様の S13360-1350PE である。これらの情報から、実機に光子ビームを照射した際の平均光子数は $10 - 13$ p.e. 程度であることが予想される。

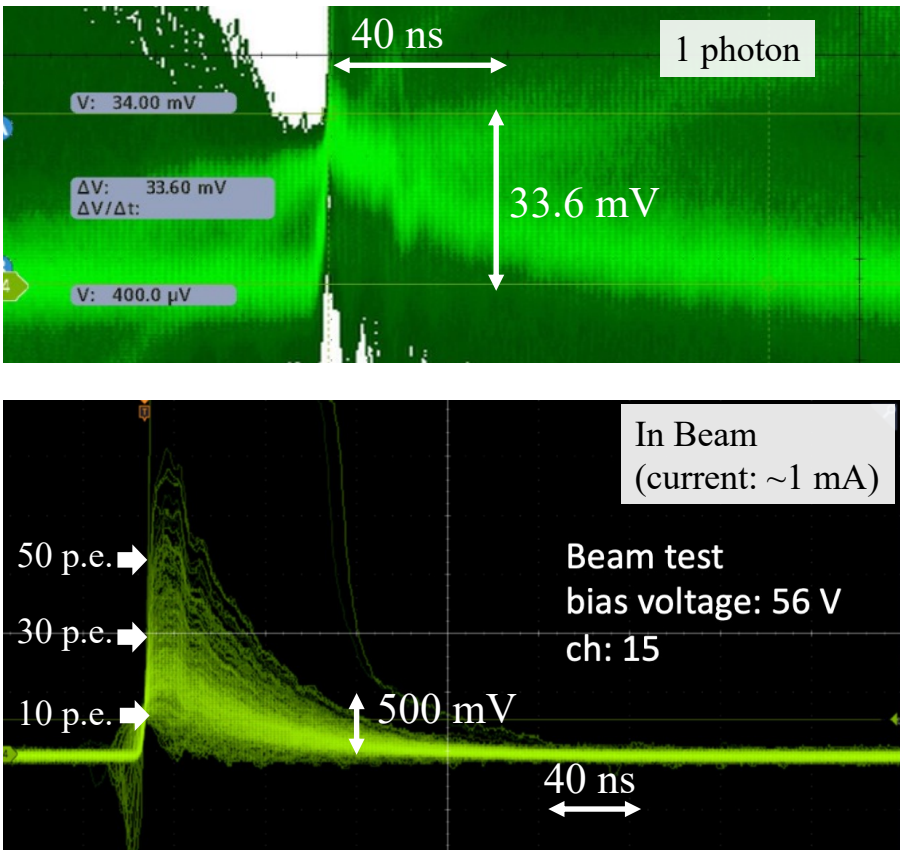


図 A.3: プロトタイプのアナログ出力信号。上図は 1 p.e. に相当する信号であり、下図は周回電子ビーム電流約 1 mA の際の光子ビーム中におけるアナログ出力信号である。

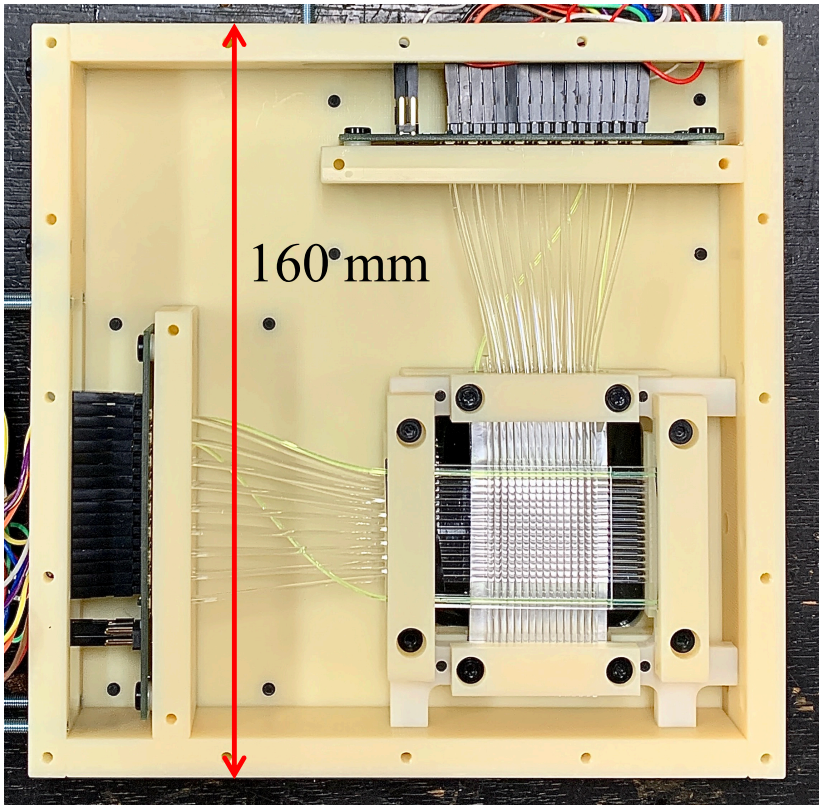


図 A.4: BPM プロトタイプの内部写真

図 A.5 に平均値が 11 のポアソン分布を示す。BPM では、デジタル変換閾値電圧 V_{th} を超えた信号の数を記録する。V_{th} は約 6 p.e. に相当する。従って各チャンネル毎の平均光子数を 11 p.e. と仮定し、MPPC の出力利得の一様性が 10% の精度であるとすると、各チャンネルの検出効率に与える影響（= 本来は 6 p.e. を超えているが鳴らなった事象の確率）は約 1% である。

最後に、検出効率のずれが最終的なプロファイルの精度に与える影響を ROOT を用いたモンテカルロシミュレーションにより見積もった。チャンネル毎の検出効率が 2% の精度で一定であると仮定し、実測のようなビーム構造のガウス分布とハロー構造のガウス分布を 3×10^6 イベント分ランダム生成した。生成した分布に対して実際の解析と同様のフィッテングを行い、得たビーム中心値とサイズの理想値との差分を記録する。この過程を 10,000 回繰り返した結果を図 A.6 に示す。この時、ビームサイズの理想値は 1.5 mm とした。

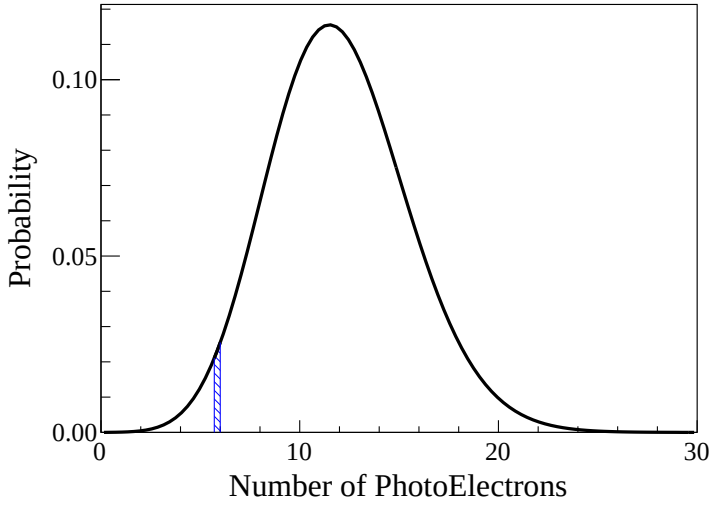


図 A.5: 平均値 11 p.e. のポアソン分布。図中の斜線部が $V_{th}(\sim 10\%)$ に相当する領域である。

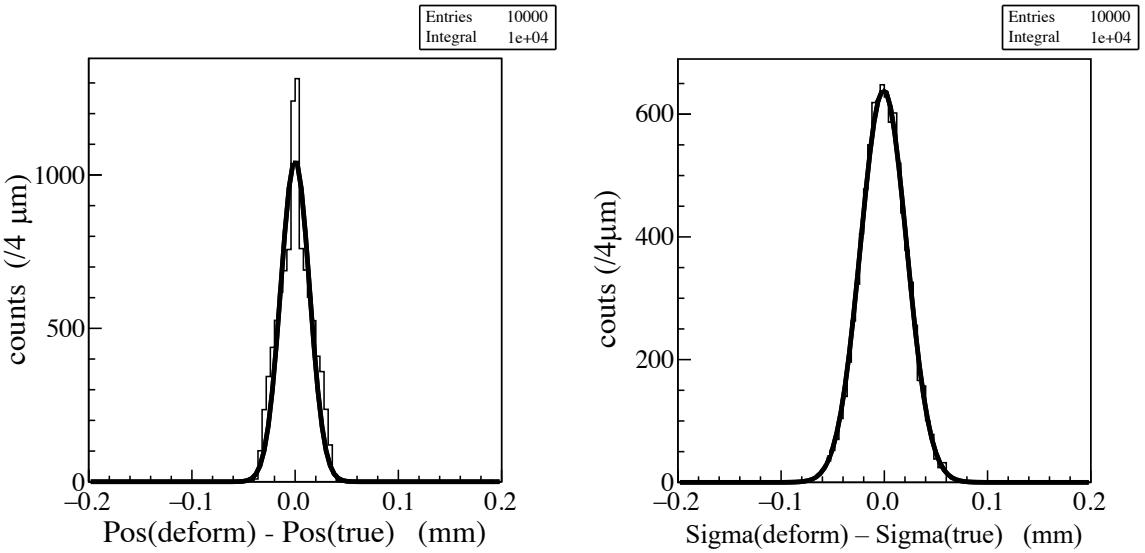


図 A.6: 検出効率のずれが位置精度に与える影響の見積もり。左図はフィッティングにより得たビーム中心値と理想値との差分、右図は同様にビームサイズの理想値との差分である。

図 A.6 では理想値との差分を記録したヒストグラムに対して、ガウス関数でフィッテングを行なっている。表 A.1 にフィッティングの結果をまとめる。この結果より、検出効率に数 % のずれがある場合、最終的なプロファイルの精度に与える影響は数 10μm であることが分かった。従って、BPM による測定は MPPC の利得のずれを考慮した場合に

おいても、絶対位置精度に対する要求性能 < 0.3 mm を達成している。なお、本論文でまとめたビームプロファイルの測定結果にはこのような系統誤差の評価は含んでいない。また、相対位置については自動ステージ[*1]を用いた調査を行なった。自動ステージを任意の距離だけ動かした場合のプロファイル結果は、誤差 10 μm 以下の精度で自動ステージの移動距離を再現することを確認している。

表 A.1: 検出効率が位置精度に与える影響

	平均 μ [mm]	σ [mm]
ビーム中心位置	-0.029 ± 0.015	0.014 ± 0.000
ビームサイズ	-0.717 ± 0.237	0.022 ± 0.000

[*1] 自動ステージの繰り返し公差は 3 μm である [40]。

付録 B

ビームハローに関する考察

BPM で測定した光子ビームプロファイルには、図 3.6(3.2 節) に示すように実際のビーム構造に加えビームハローのような構造が見られる。このハロー構造の起源について考察した。

図 4.19(4.2.2 節) に示すシミュレーション結果から、光子ビームのみのプロファイルも 2 つのガウス関数を重ね合わせた関数でフィッティングができている。このテール部分は、ガンマ線のエネルギー依存性が無いことから [38]、制動放射の角分布が作っていることが考えられる。

しかし測定されたビームプロファイルのテール部分の面積が占める割合は、シミュレーションによる光子ビームプロファイルの結果より大きい。ここで、光子イベントと背景事象のプロファイルの比較を行なった。図 B.1 にその結果を示す。左図が光子イベント、右図が背景事象のイベントである。光子イベントは条件式 2.2.3

$$\text{Photon event} = [\overline{\text{Charged VETO}}] \otimes [x \text{ 層}] \otimes [y \text{ 層}] \otimes [\text{Trigger}]$$

に従って選択されたイベントであり、背景事象は

$$\text{BG event} = [\text{Charged VETO}] \otimes [x \text{ 層}] \otimes [y \text{ 層}] \otimes [\text{Trigger}] \tag{B.0.1}$$

に従って選択されたイベントである。すなわち、Charged VETO カウンタにヒットがあったイベントのみを選択している。図中に赤線で示すハロー構造は、背景事象を選択すると増大している様子が見える。フィッテング結果は表 B.1 にまとめた。

従って、ビームハロー構造は荷電粒子背景事象、すなわちビームライン上流で生成した電子陽電子が広がって作られるものであることが考えられる。Charged VETO カウンタ

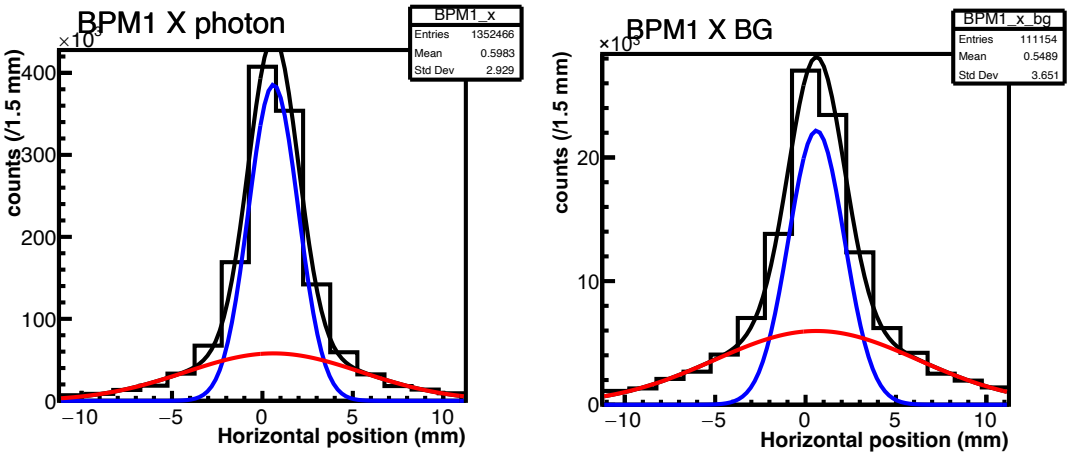


図 B.1: 光子イベントと荷電粒子背景事象のプロファイルの比較。左図が光子イベント、右図が背景事象のイベントである。

表 B.1: 光子イベントと荷電粒子背景事象のフィッティング結果比較

	光子イベント	荷電粒子背景事象
中心位置 (μ_x) [mm]	0.611 ± 0.002	0.603 ± 0.008
ビームサイズ (σ_x) [mm]	1.475 ± 0.003	1.643 ± 0.014
true/halo 面積比	1.886	1.016
1 スピル内イベント数	1.35×10^6	111×10^3

にはシンチレーションファイバーを用いているため、その検出効率によって選択した光子イベントの中にこのような背景事象が含まれる可能性がある。ここで、Charged VETO カウンタの検出効率が 50% であると仮定すると、表 B.1 にまとめた結果から、本来の光子ビームサイズは $\sim$ 1.45 mm となり $\sim$ 2%、ビームハロー面積は $\sim$ 9% 程度、それぞれ本測定結果より減少する。製作した Charged VETO カウンタの検出効率については、Trigger カウンタと同様のプラスチックシンチレータを用いた調査を現在進めている。

付録 C

光子ビームプロファイルのまとめ

C.1 ビームエネルギー依存性

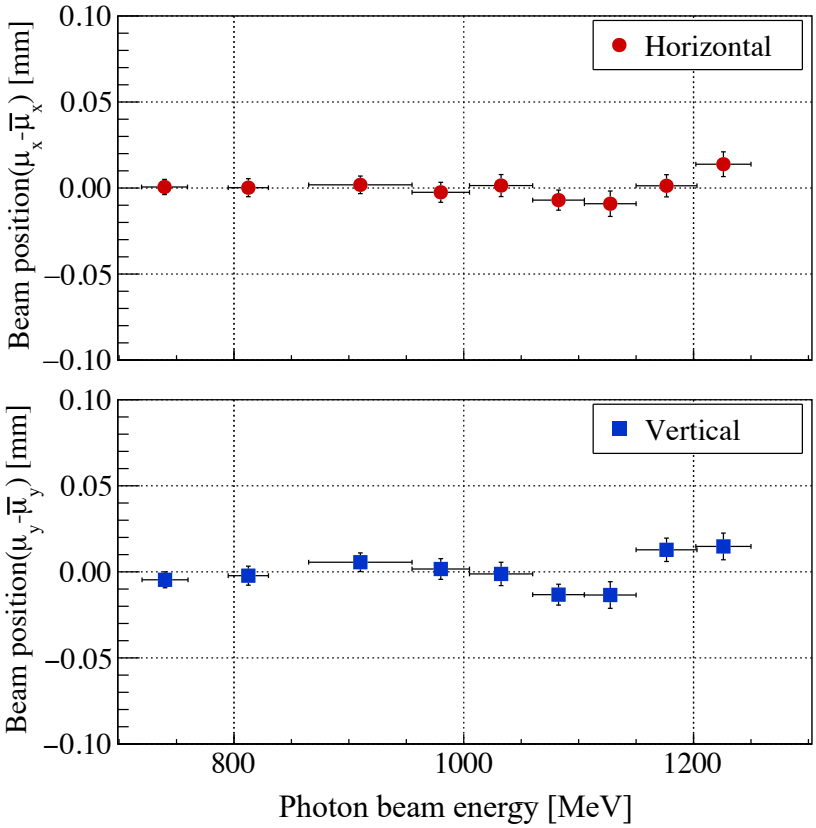


図 C.1: 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM1

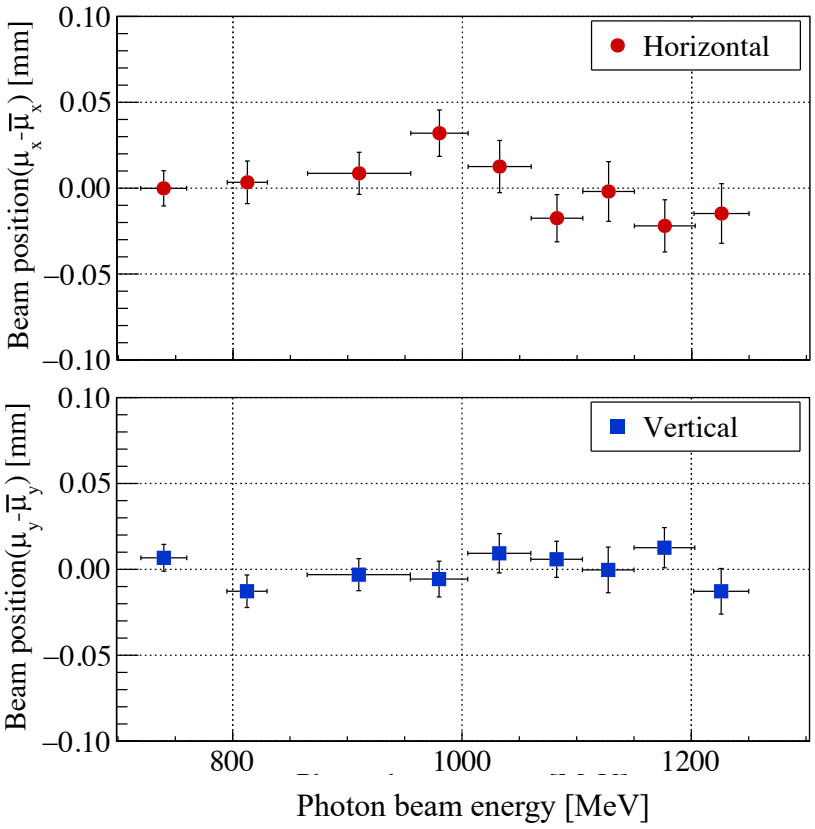


図 C.2: 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM2

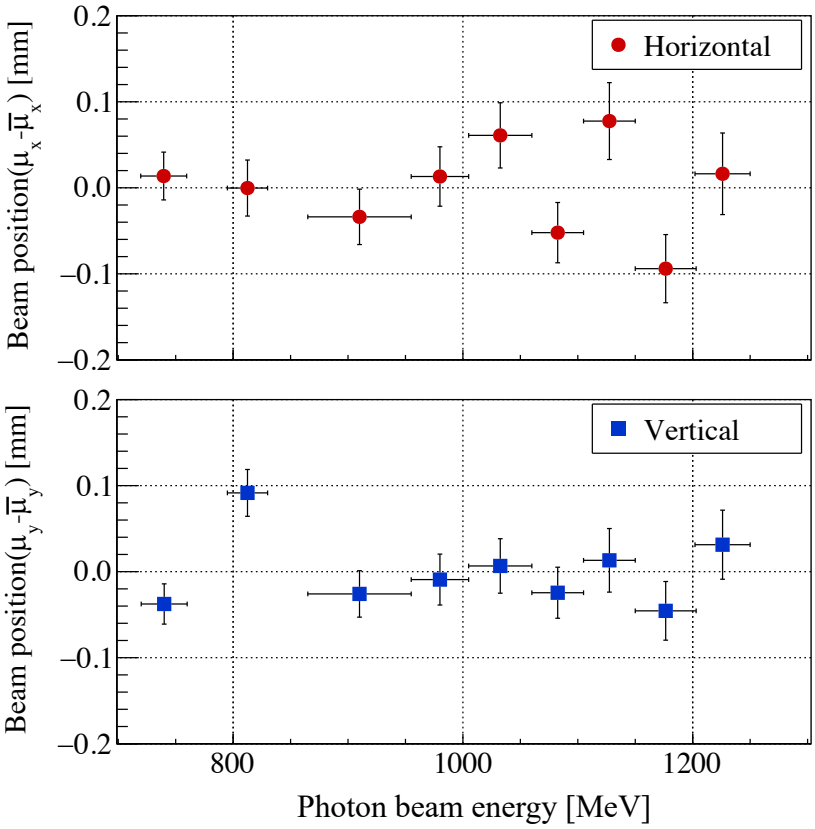


図 C.3: 光子ビーム位置のビームエネルギー依存性: BPM3

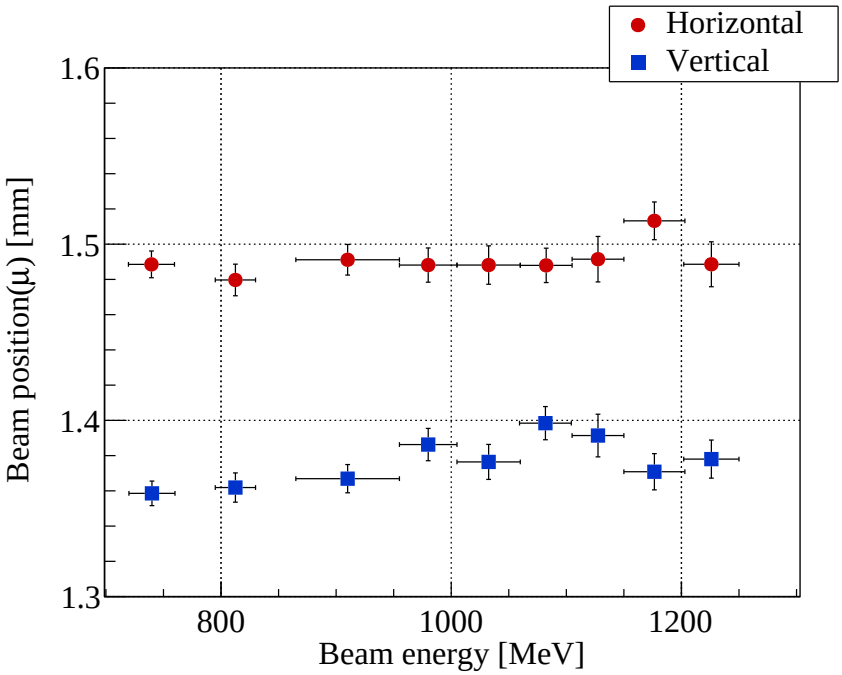


図 C.4: 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM1

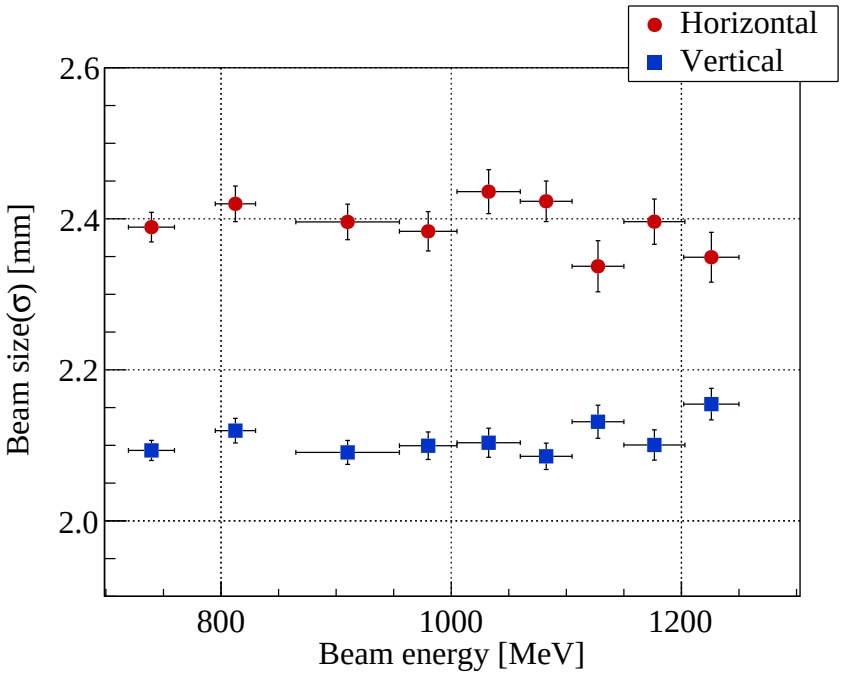


図 C.5: 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM2

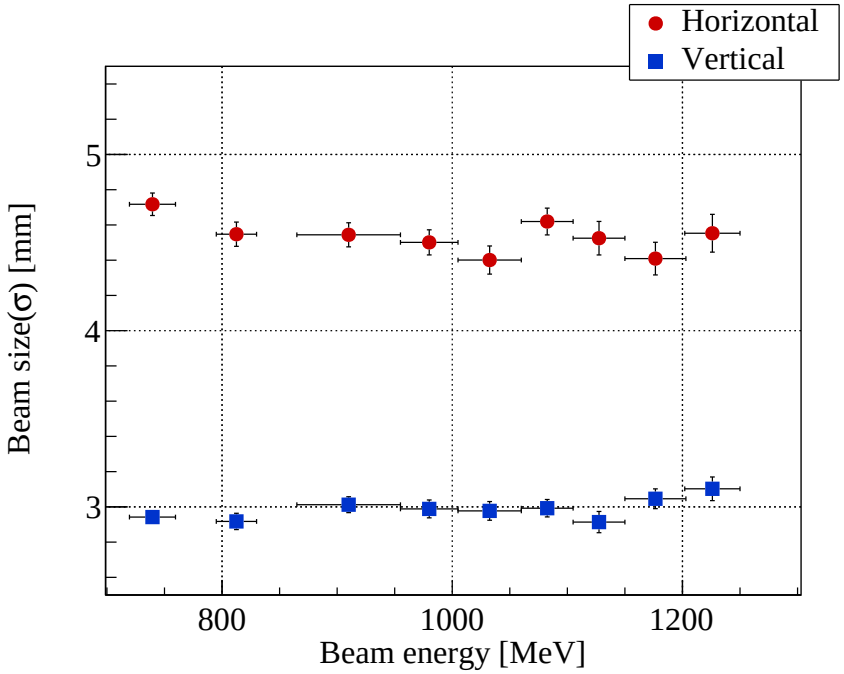


図 C.6: 光子ビームサイズのビームエネルギー依存性: BPM3

C.2　ビーム強度依存性

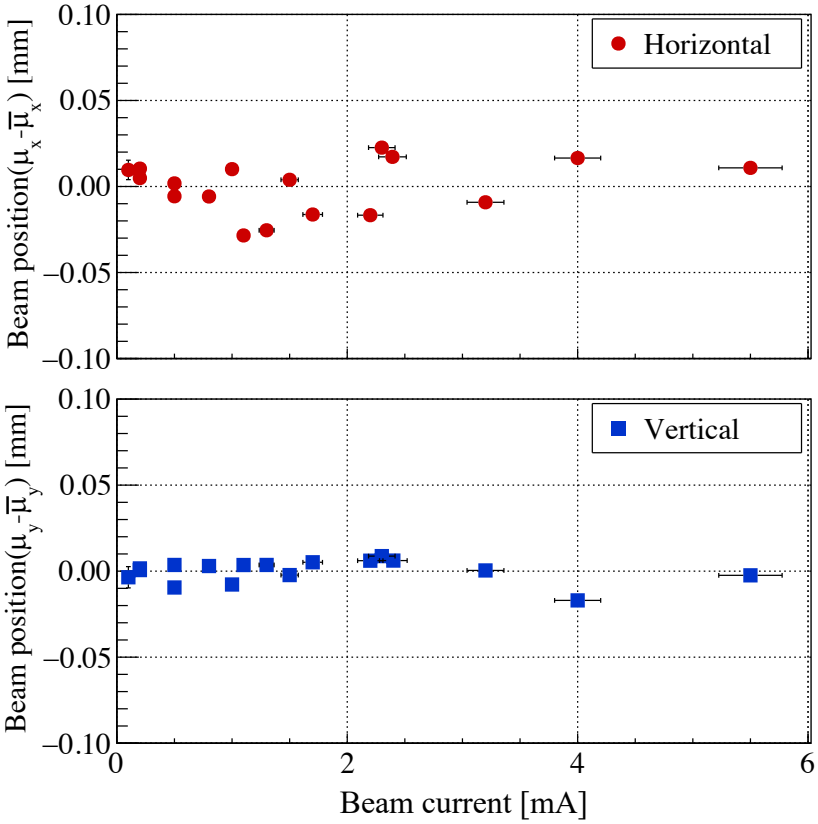


図 C.7: 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM1

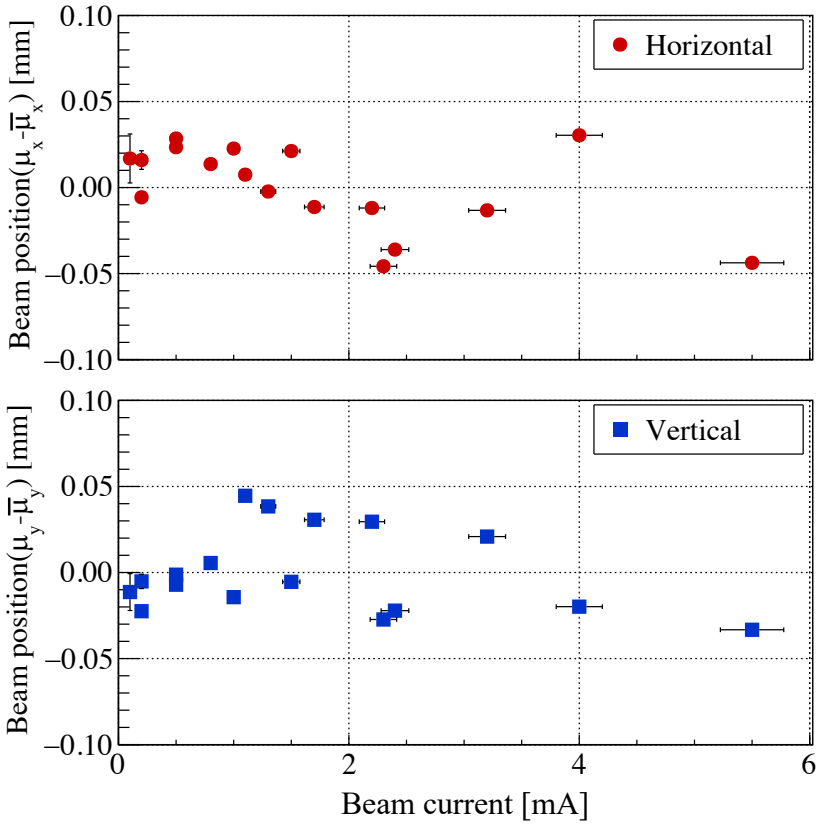


図 C.8: 光子ビーム位置のビーム強度依存性: BPM2

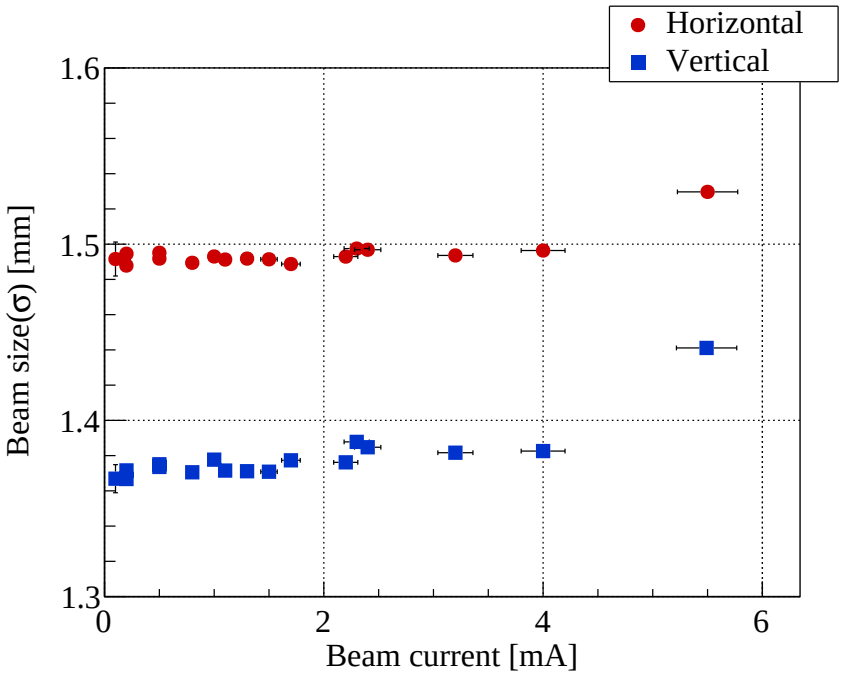


図 C.9: 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM1

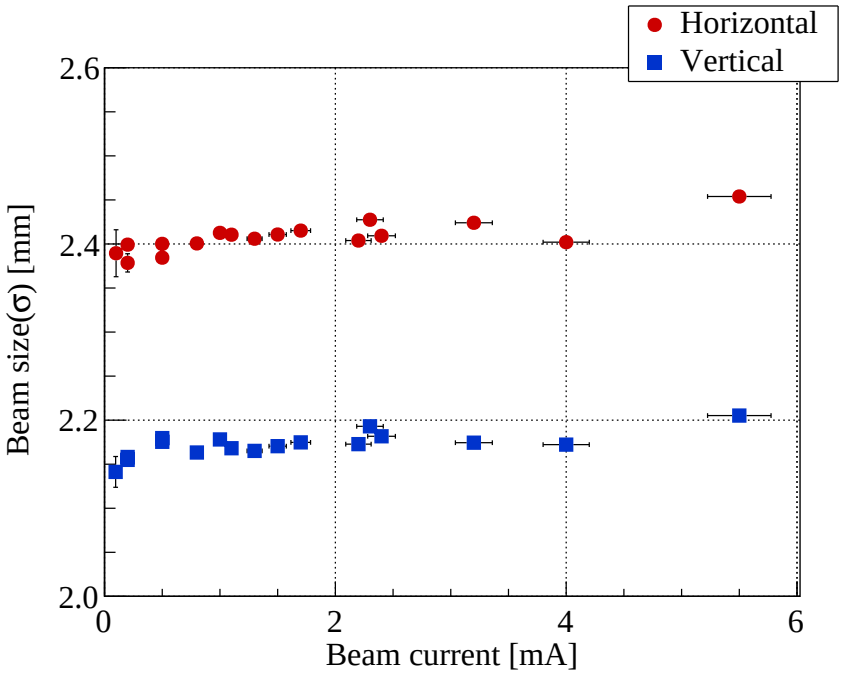


図 C.10: 光子ビームサイズのビーム強度依存性: BPM2

C.3　スピル内時間依存性

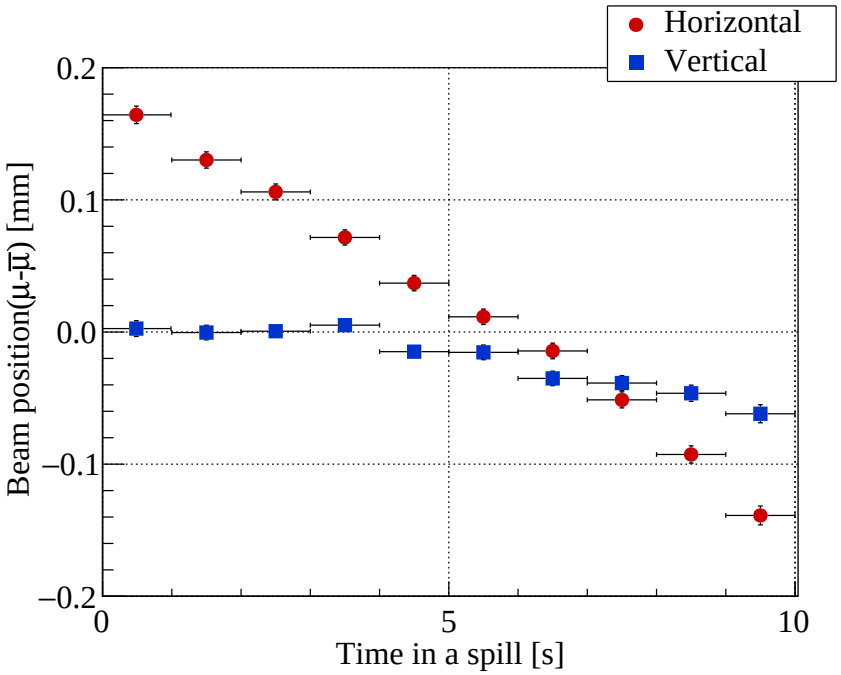


図 C.11: 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM1

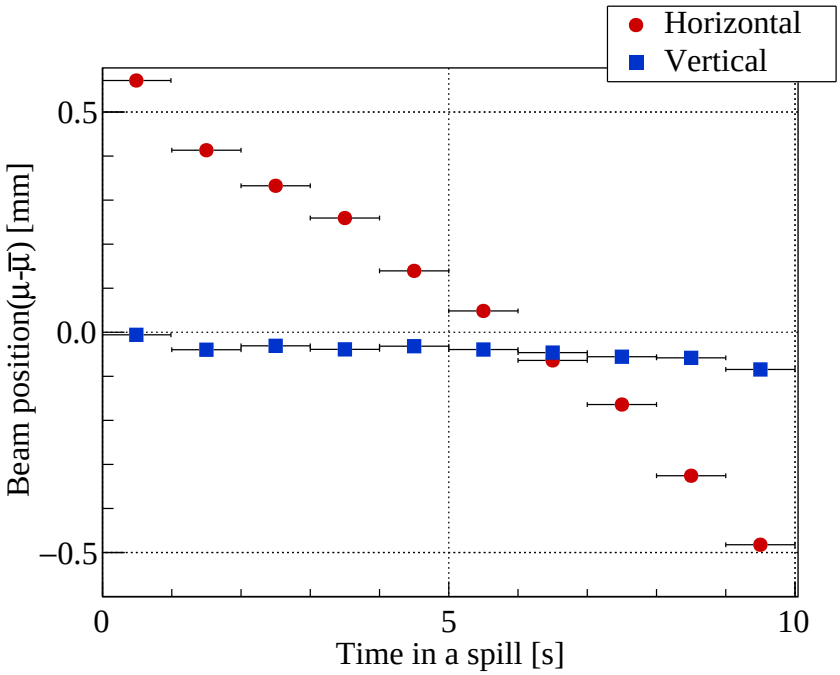


図 C.12: 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM2

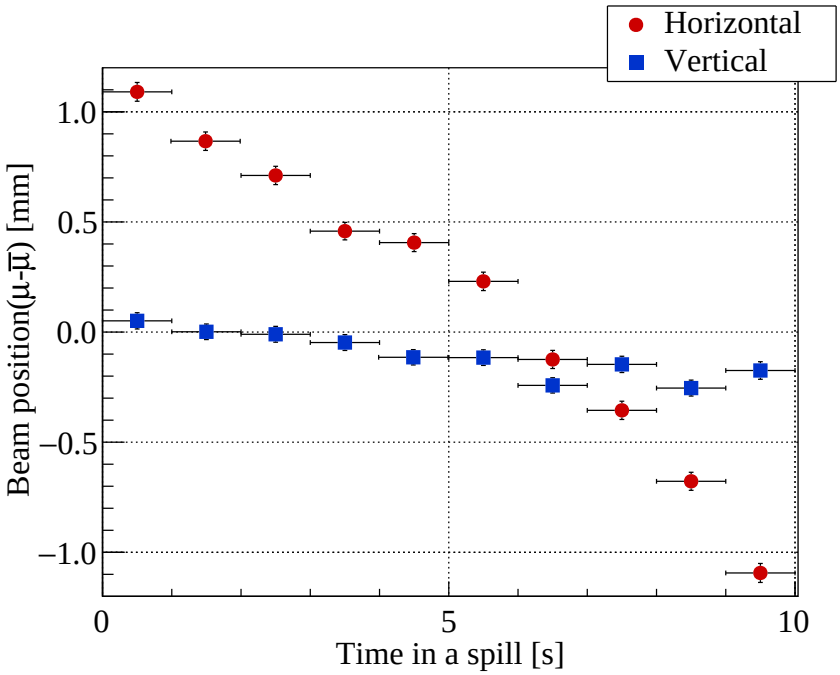


図 C.13: 光子ビーム位置のスピル内時間依存性: BPM3

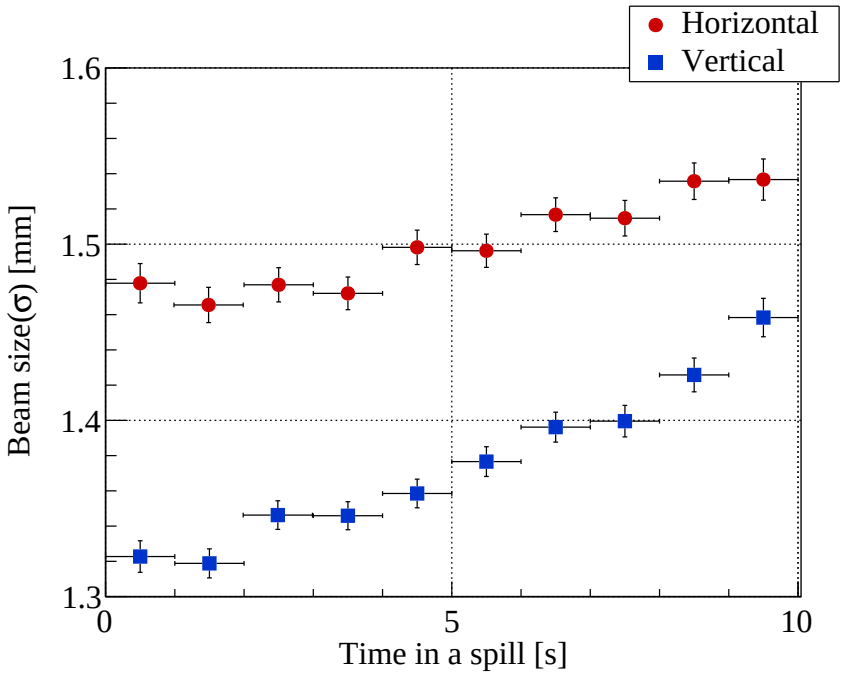


図 C.14: 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM1

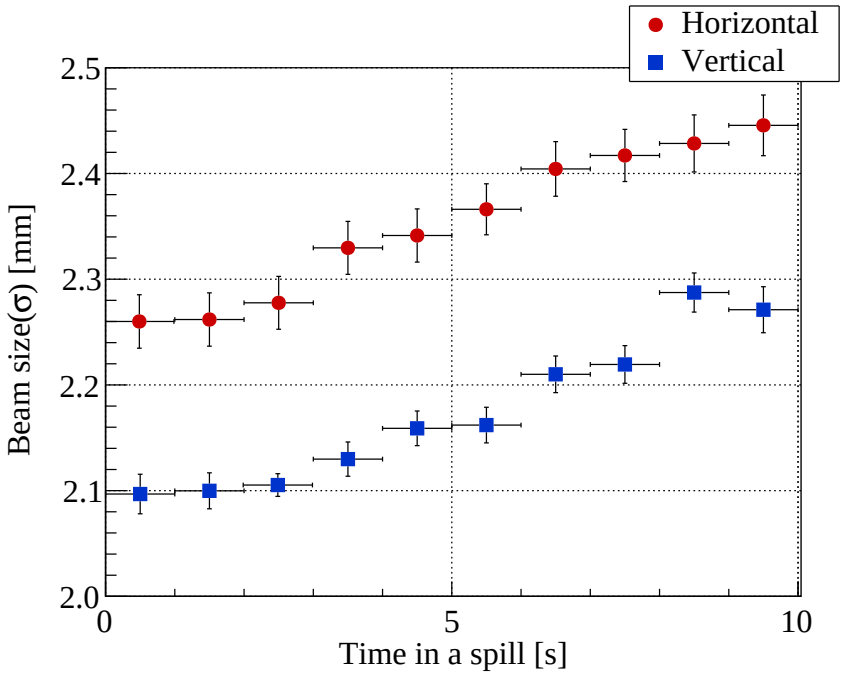


図 C.15: 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM2

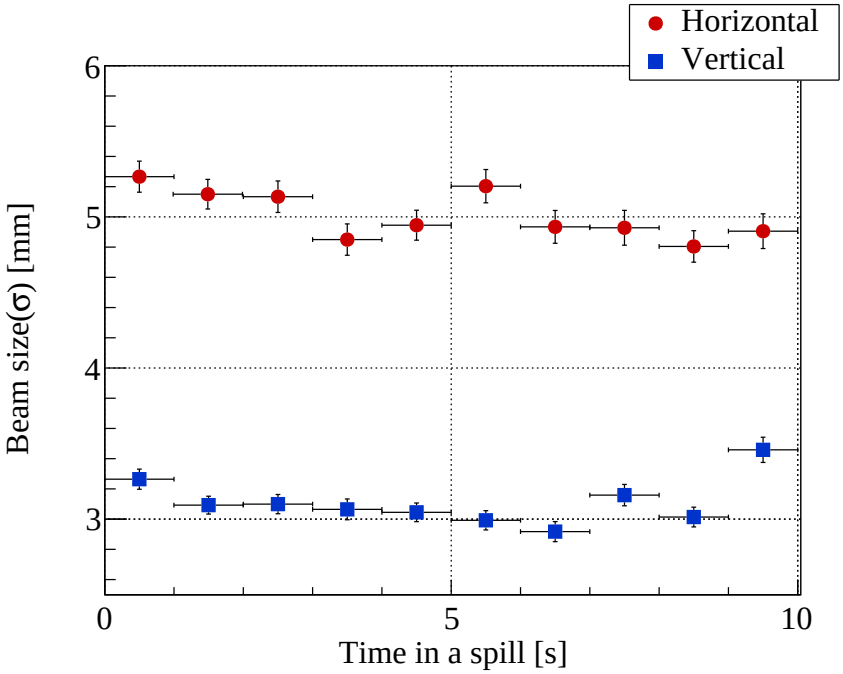


図 C.16: 光子ビームサイズのスピル内時間依存性: BPM3

C.4　ラジエータ位置依存性

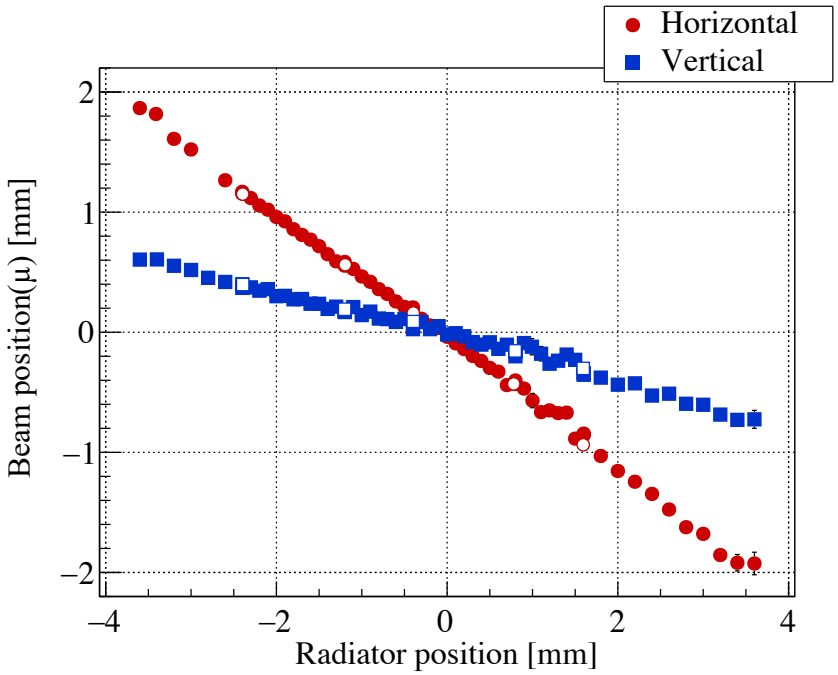


図 C.17: 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM1

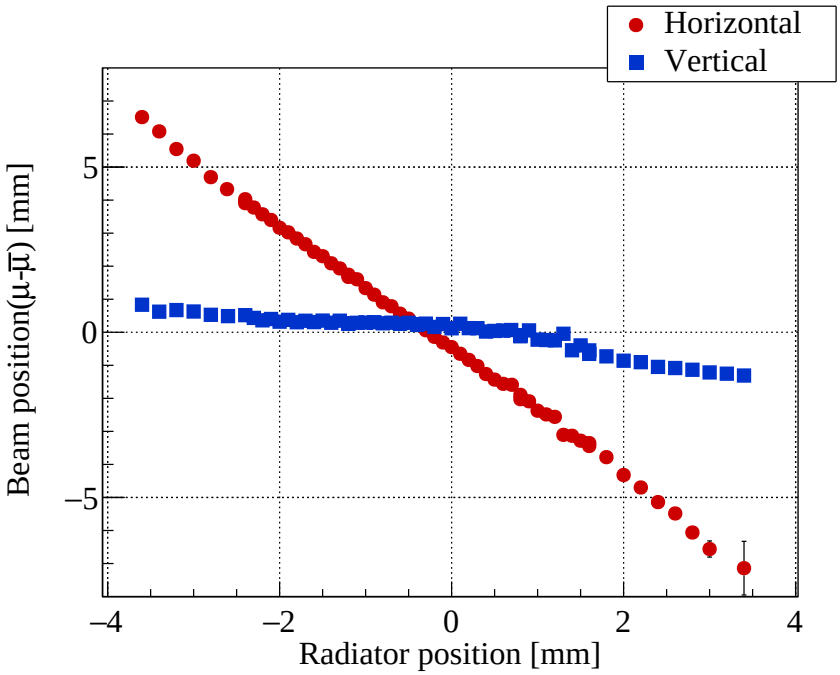


図 C.18: 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM2

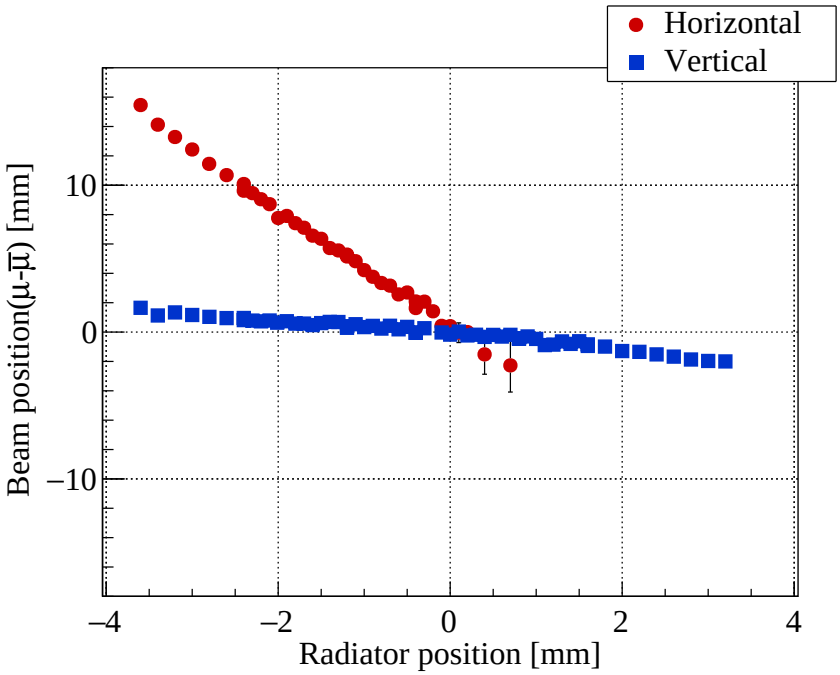


図 C.19: 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性: BPM3

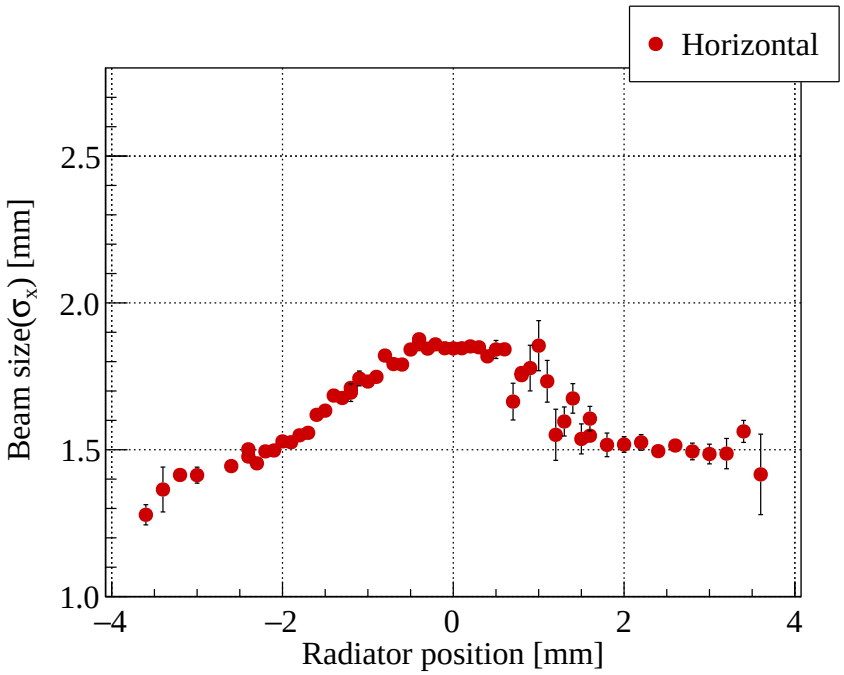


図 C.20: 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1, 水平方向

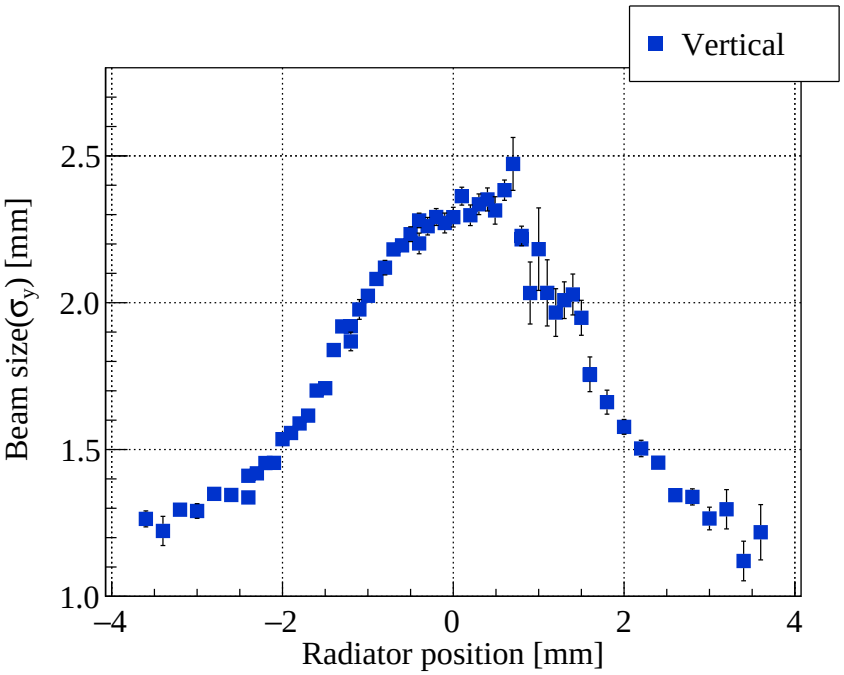


図 C.21: 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM1, 重力方向

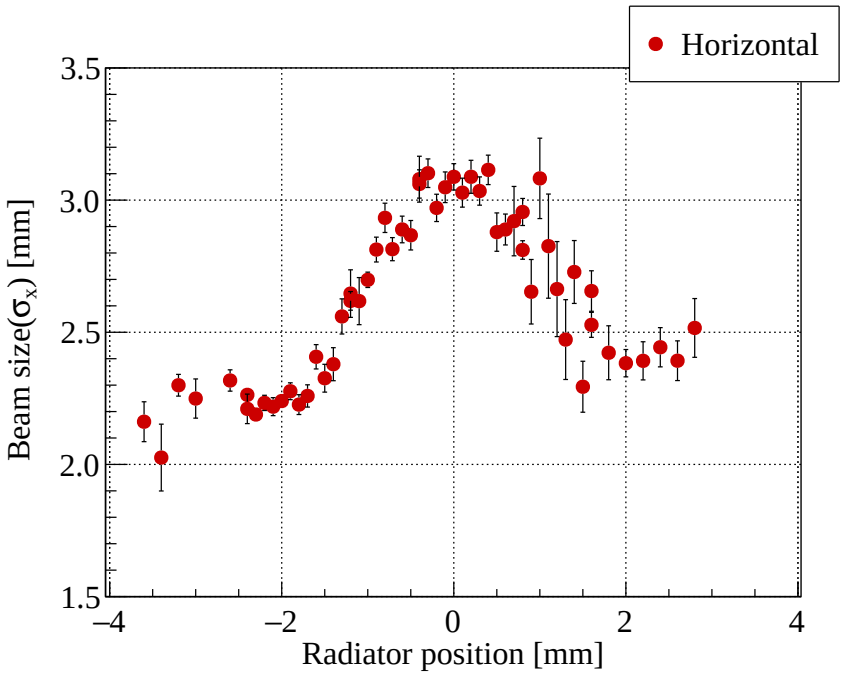


図 C.22: 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM2, 水平方向

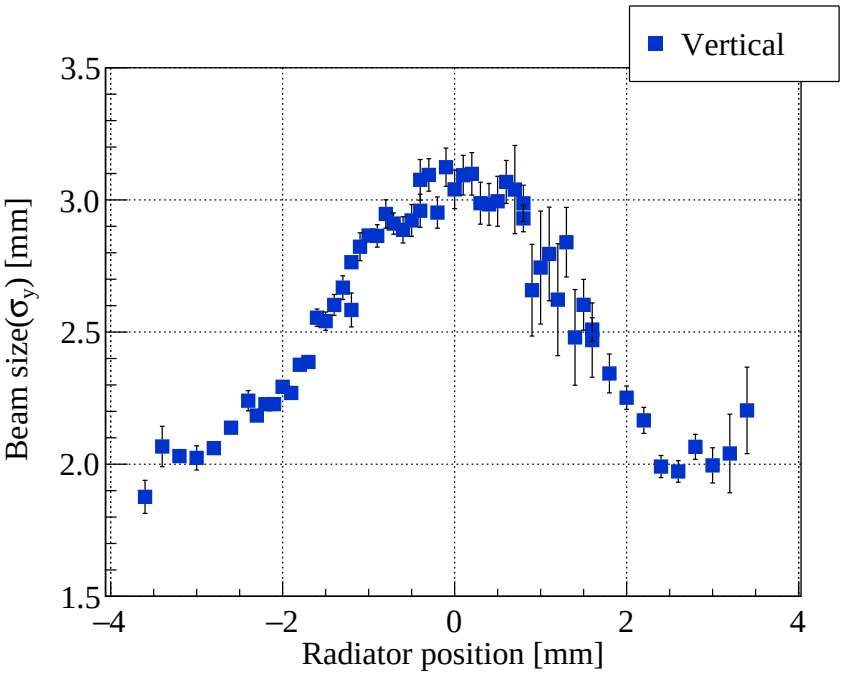


図 C.23: 光子ビームサイズのラジエータ位置依存性: BPM2, 重力方向

付録 D

アクシデンタル背景事象の影響

3.3.2 節で報告した光子ビームサイズのビーム強度依存性の結果では、ビームサイズがビーム強度の増加とともに増大する様子が確認された。ビーム強度の増加に伴うアクシデンタル背景事象が、ビームサイズに与える影響を見積もった。

図 D.1 に示すのは、BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分である。周回電子

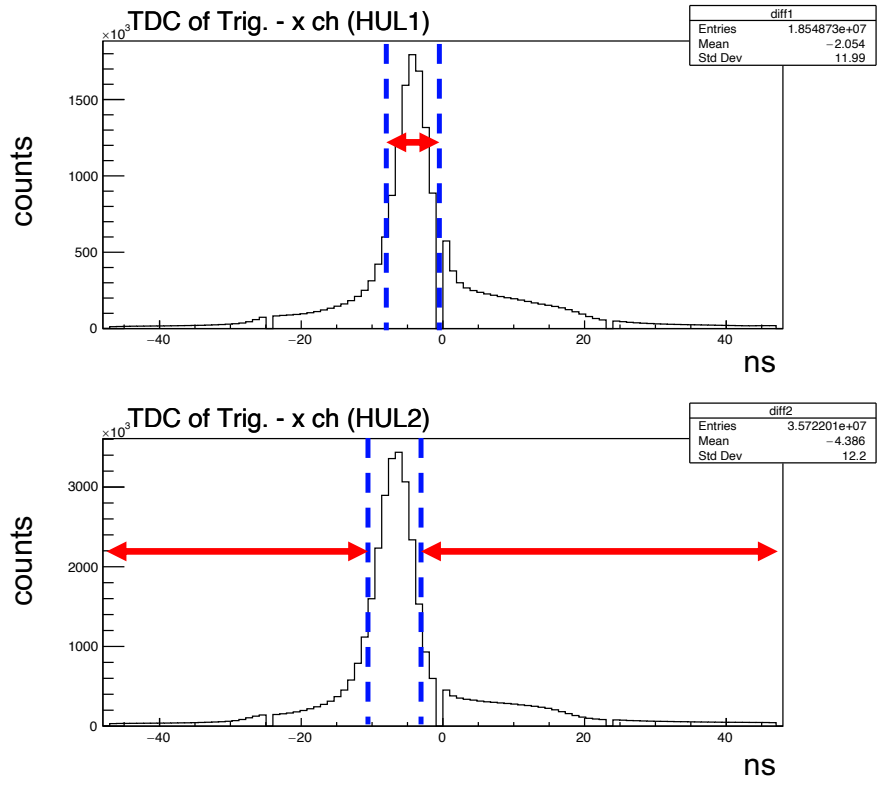


図 D.1: BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分

ビームが ∼ 5.5 mA の時の光子ビームプロファイルを、タイムウィンドウ (±48 ns) 内の全領域、TDC 差分のピーク ±4 ns、ピーク ±4 ns 以外の領域のそれぞれのカット条件毎に調べた。この結果を表 D.1 に示す。全領域のイベントを選んだ場合と、ピーク ±4 ns

表 D.1: 各カット条件における光子ビームサイズ

	Z_{BPM} [m]	ビームサイズ (σ) [mm]			
			全領域	ピーク ±4 ns	ピーク ±4 ns 以外
BPM1	3.09	Horizontal	1.60	1.60	1.67
		Vertical	1.52	1.51	1.59
BPM2	5.66	Horizontal	2.45	2.45	2.50
		Vertical	2.20	2.20	2.35

の領域を選んだ場合ではほぼ違いは見られない。しかし、ピーク ±4 ns 以外の領域では、ビームサイズが広がっていることが分かる。表 D.1 の結果のうち、BPM1 Vertical の結果を用いて、このアクシデンタル背景事象の影響を次のように概算した。

図 D.2 に示すのは、図 D.1 と同じ BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分に対して、true イベントの領域と accidental イベントの領域を仮定した 2 つのガウス関数を重ねた関数でフィットした結果である。このフィット結果を用いて、各領域毎に面積比

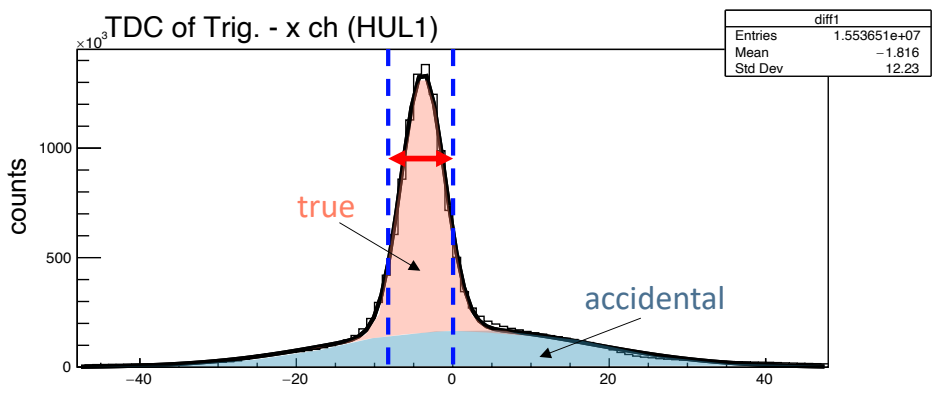


図 D.2: BPM の Trigger カウンタと x 層の TDC の差分へのフィット結果。赤く示した領域が true イベント、青く示した領域が accidental イベントである。

を概算した。各領域毎のビームサイズ σ_y(BPM1 の重力方向ビームサイズ) と面積比を表 D.2 にまとめる。全領域、ピーク ±4 ns、ピーク ±4 ns 以外のビームサイズをそれぞれ a、b、c と置き、概算した面積比を用いて true イベントのビームサイズ σ_{true} を次のよう

表 D.2: 各領域毎のビームサイズと面積比

	BPM1: σ_y [mm]	true:accidental の面積比
全領域	$a = 1.52$	0.55 : 0.45
ピーク ±4 ns	$b = 1.51$	0.84 : 0.16
ピーク ±4 ns 以外	$c = 1.59$	0 : 1

に計算した。

$$\begin{aligned} \sigma_{\rm true} \times 0.55 + c \times 0.45 &= a \\ \sigma_{\rm true} \times 0.84 + c \times 0.16 &= b \\ \therefore \sigma_{\rm true} \sim & 1.49 \text{ mm} \end{aligned} \tag{D.0.1}$$

$a/\sigma_{\rm true} \sim 1.02$ なので、アクシデンタル背景事象によってビームサイズは 2% 程度増加することが分かる。従って、ビーム強度の増加に伴うビームサイズの増加にはアクシデンタル背景事象の影響以外にも原因があると考えられる。

参考文献

[1] T. Miyao. Proc. of the 17th Annual Meeting of Pmisc Accelerator Society of Japan (2020).

[2] J-PARC. (URL: https://j-parc.jp/c/index.html).

[3] P. Freyberger. Proc. of DIPAC 2005, Lyon, France.

[4] T. Miyao. Proc. of the 14th Annual Meeting of Pmisc Accelerator Society of Japan (2017).

[5] T. Ishikawa *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **811** (2016) 124-132.

[6] 大串尚永. 修士論文 東北大学 (2009).

[7] 東北大学電子光理学研究センター. (url: https://www.lns.tohoku.ac.jp).

[8] M. Kaneta *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **886** (2018) 88103.

[9] T. Ishikawa. Proc. the XV Int'l Conf. Hadron Spectroscopy (PoS Hadron 2013).

[10] H. Yamazaki *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **536** (2005) 70.

[11] T. Nishizawa *et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. **61** (2014) 1278-1283.

[12] T. Ishikawa *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **622** (2010) 1.

[13] 水野柾哉. 修士論文, 東北大学 (2021).

[14] Cern Geant4. (url: https://geant4.web.cern.ch).

[15] Y. Obara *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **922** (2019) 108-113.

[16] Y. Matsumura and T. Ishikawa. Nucl. Instrum. Meth. A **902** (2018) 103.

[17] PDG WWW page Phys. Lett. B ¥bf667 (2008) 1. (url: http://pdg.lbl.gov).

[18] W. R. Leo. "techniques for nuclear and pmisc physics experiments".

[19] M. Juric *et al.* Nucl. Phys. B **52** (1973) 1-30.

[20] H. Kamada *et al.* Phys. Rev. C **57** (1998) 1595.

[21] W. Glockle *et al.* Nucl. Phys. A **639** (1998) 297c.

[22] C. Rappold *et al.* Nucl. Phys. A **913** (2013) 170-184.

[23] ALICE Collaboration. Phys. Lett. B **754** (2016) 360-372.

[24] The STAR Collaboration. Science **328** (2010) 58-62.

[25] L. Adamczyk for The STAR Collaboration. Phys. Rev. C **97**(2018), 054909.
[26] ALICE Collaboration. Phys. Lett. B **797** (2019) 134905.
[27] E. Bartsch for the ALICE Collaboration. Nucl. Phys. A **1005** (2021) 121791.
[28] CERN ROOT. (url: https://root.cern.ch/doc/v608/classTSpline.html).
[29] 浜松ホトニクス. (url:https://www.hamamatsu.com).
[30] 藤原友正. 修士論文, 東北大学 (2021).
[31] Linear Technology. LTC6754.
[32] LTspice Analog Devices One Technology Way P. O. Box 9106 Norwood MA 02062-9106. (url: https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html).
[33] R. Honda *et al.* Prog. Theor. Exp. Phys. (2021)123H01.
[34] Hadron Universal Logic Module. (url: http://openit.kek.jp/project/HUL).
[35] Xilinx Inc. (url: https://www.xilinx.com).
[36] T. Uchida. IEEE Trans. Nucl. Sci. **55**, 1631 (2008).
[37] H. Hinode. Private communication.
[38] T. Muto. Private communication.
[39] T. Muto *et al.* Proc. of the 12th Annual Meeting of Pmisc Accelerator Society of Japan (2015).
[40] シグマ光機 高剛性・精密型自動ステージ. (url:https://jp.optosigma.com).