

「測定器開発室優秀修士論文賞」 概要

2023 年 2 月 25 日

<p>著者</p>	<p>ふりがな 氏名</p>	<p>きの りょうこ 木野 量子</p>
<p>表題</p>	<p>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</p>	

論文概要 (全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません)

粒子加速器を用いた物理実験を行う上で、加速器から供給されるビームの性質を理解することはより良い物理データを収集するために重要である。特にビームプロファイルは最終的な物理結果に影響を与えるため、実験をデザインする際やデータを解析する際に必要な情報となる。更に、このようなユーザー側の要請だけではなく、ビームプロファイリングは加速器技術の発展においても欠かせない要素である。ビームの持つパラメータを正確に測定することにより、加速器調整や改善のための理解に繋がり、設計上最高のパフォーマンスでビームを提供することが可能になる。

東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)の BM4 光子ビームラインでは、1 GeV 領域の制動放射光子ビームを提供している。電子シンクロトン(BST リング) によって 1.3 GeV に加速した周回電子に、 $\phi 11 \mu\text{m}$  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物理実験が展開されており、このためにビームプロファイリングを高精度に行うことが非常に重要である。特に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」の解決に向け、BM4 光子ビームラインで計画されている「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(ビームライン上流)における光子ビーム位置を誤差 0.3 mm 以下の精度で知る必要がある。しかしこれまで、BM4 光子ビームライン上～中流には、光子ビームを定量的かつ即時的に測定するシステムが無く、写真乾板の原理によるインスタントカメラのフィルムにビームを照射する方法で大まかな位置とサイズを把握するに留まっていた[1]。

この状況を受け、本研究では、新たに BM4 光子ビームライン上～中流における定量的かつ即時的なビームプロファイルを行うための検出器「ビームプロファイルモニタ(BPM)」を開発した。BPM は荷電粒子を VETO するファイバー層、光子ビームを電子陽電子対に変換するアルミニウムコンバータを構成要素に持ち、その電子陽電子対の位置を測定することで、中性粒子である光子ビームの検出を可能にした。また、BST リングから供給される光子ビームは計数率が数 10 MHz に及ぶ高強度なものであり、従来型のトリガーと同期したデータ収集系では即時測定が難しい。そこで、プラスチックシンチレーションファイバーと SiPM を基本構造とし、信号処理回路に ToT 回路、データ収集にはストリーミング型 TDC を導入し、高速応答可能でコンパクトなシステムを構築することで高強度ビームプロファイルの即時測定を実現した。BPM は 1 秒間の測定で  $10 \mu\text{m}$  より良い位置精度を達成し、従来の BM4 光子ビームラインにおけるビーム測定システムを大きく進展させた。

BPM による高精度なビーム測定の実現により、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や周回電子ビームの情報を得ることが可能になった。本研究ではラジエータ位置とビーム位置の相関や計数率の減衰速度を詳細に調査することで、BST リングの Twiss parameter、周回電子ビームサイズの高精度測定を行なった。これにより、これまで設計値のみで議論されてきた加速器に関する情報を、初めて測定によって得ることに成功した。このように、本研究では BPM を原子核実験・加速器研究どちらにも資する、分野を跨いだ検出器として開発することができた。

## アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で4ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

## ビームプロファイルモニタ BPM の基本設計

BPM の要求性能は次の6点である。

1. 誤差 0.3 mm 以下の位置測定
2. 可能な限り少ない物質厚
3. 荷電粒子背景事象の除去が可能
4. 磁場中での安定した動作
5. 数 MHz の高強度光子ビーム測定が可能
6. ビームサイクルと同期した即時モニタリングが可能

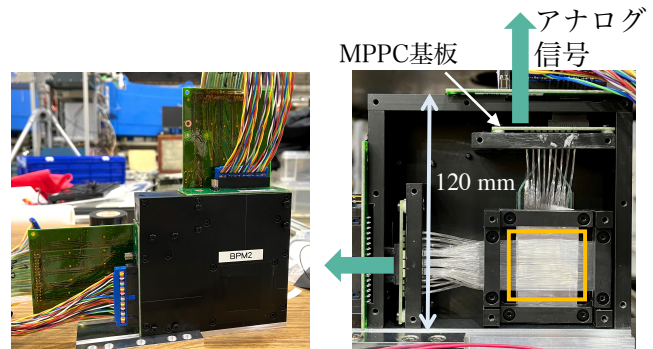


図 1. BPM の外観(左)と内観(右)

測定対象である光子ビームは、その強度が数 10 MHz に及ぶため、従来型のデータ収集系では即時測定が難しいという問題があった。そこで、高速応答が可能なプラスチックシンチレーションファイバーと SiPM を基本構造とし、信号処理回路に ToT(Time-over-Threshold)回路、データ収集にはストリーミング型 TDC を導入することで、高強度ビームプロファイルの即時測定を実現することができると考えた。

実際に開発・製作した BPM の外・内観を図 1 に、図 2 に検出部分の概念図を示す。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・陽電子対を生成させ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

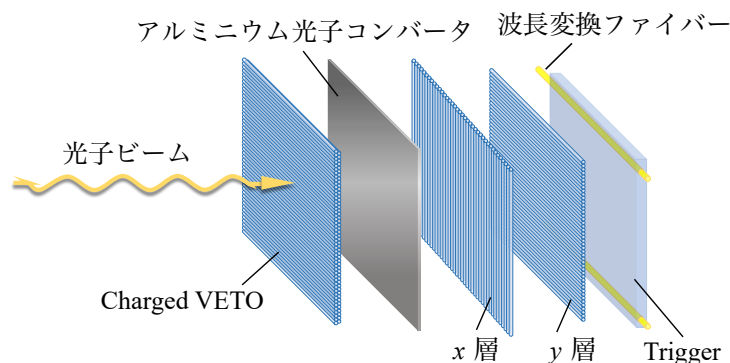


図 2. 検出部分の概念図

の2層のファイバー層(x層・y層(Kuraray SCSF-78,  $\phi 5$  mm))、イベント選択に用いる Trigger カウンタ(Eljen EJ-212, 2 mm 厚)である。各ファイバーは1セグメント毎に SiPM(浜松ホトニクス MPPC[2])に接触させた。

各カウンタと MPPC を載せた基板を固定する筐体には、十分な強度を持ち耐衝撃性に優れた ABS 樹脂を用いた。ファイバーの固定位置精度をより高くす

るため、削り出し加工により製作した。MPPC の信号読み出し回路と、信号増幅変換回路の開発も行った。MPPC のアナログ信号は高速オペアンプ AD8000 による増幅回路で約 20 倍に増幅したのち、コンパレータ LTC6754 を介して LVDS 信号へ変換する。

これらの基本設計は、光子ビームとプロトタイプを用いた性能評価実験を行った上で、この結果を反映するように行った。用いるファイバーの選定においては、余分な電子陽電子対生成を避けるため、z 方向の物質厚を可能な限り抑えるよう工夫した。筐体デザインと回路開発は CAD ソフトウェアを用いて行い、各ファイバーが対応する MPPC に確実に接触するよう注意を払うだけでなく、コリメータやその他の実験器具が並ぶ限られたスペースで用いることができるよう、小型化を実現した。

BPM における高強度光子ビームの高精度即時測定を可能にした鍵は、データ収集にトリガーレスデータ収集モジュールであるストリーミング型 TDC(StrTDC[3])を導入したことである。ToT 法によってタイミングデータと電荷情報を1つのモジュールで記録した。前述の通り、BPM によるビーム測定はその計数率が数 10 MHz に及ぶことが予想され、オンライン上にトリガーを持つ従来のデータ収集系では即時測定が難しい。StrTDC は 1 ch が 0.97 ns で 33 秒までデータ収集が可能であり、この StrTDC の導入および即時解析システムにより、データ取得から約 10 秒後には 1 秒間毎に 10  $\mu$ m 以上の精度でビームプロファイル結果を得ることが可能となった。BPM では図 2 に示す全ての

カウンタでヒットタイミングを記録した後に、オフライン解析上で以下の条件に従って光子イベント選択を行なった。

$$\text{Photon event} = [\text{Charged VETO}] \otimes [x \text{ layer}] \otimes [y \text{ layer}] \otimes [\text{trig.}] \quad (1)$$

### 測定したビームプロファイル

BPM を用いて様々な条件下におけるビームプロファイルを調べた。水平方向、重力方向それぞれのヒット分布に対して2つのガウス関数を重ね合わせた関数でフィットした。ガウス関数の平均 $\mu$ をビーム中心、幅 $\sigma$ をビームサイズとしてビームプロファイルの評価を行った(図3)。StrTDCの導入により十分な統計量を確保することができ、フィッティングの精度は1秒間のプロファイルに対して10 $\mu\text{m}$ 以上を達成した。また、データ取得から約10秒で即時解析が可能である[4,5,6]。

測定の結果、ビーム取り出しの1スピルの中で、ビームプロファイルは時間依存性を持つことが分かった。通常の制動放射光子ビーム取り出しの場合、輻射体であるラジエータはBSTリング中の周回電子ビームの中を絶えず移動する。図4に示す時間に依存したプロファイルの変化は、このラジエータ位置に起因するものであることが分かった。一方、ビームプロファイルはビームエネルギー、周回電子ビームカレントに依って変化しないことが分かった。

これらの定量的なビームプロファイルの測定、評価はELPH BM4光子ビームラインにおける初めての測定である。これまで明らかになっていなかった光子ビームの特性について理解できるようになった。これにより、実際の物理実験の際には、即時測定の結果を用いてその場で加速器調整を行うことが、物理データの解析時には、反応点の計算等を行う際により信頼性の高い測定結果を使用することが可能となった。

### 加速器研究への応用

ラジエータ位置に依存したプロファイルの変化の要因は、光子ビームのソースであるBSTリング中の周回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定量的に評価することで、BSTリング、周回電子ビームの特性にアプローチすることができる。

光子ビーム位置( $\mu_x$ )とラジエータ位置( $x_{\text{rad}}$ )の間には次式の関係が成り立つ。

$$\mu_x = \left(1 - \frac{\alpha}{\beta} z_{\text{bpm}}\right) x_{\text{rad}} \quad (2)$$

ここで $\alpha$ 、 $\beta$ がTwiss parameter、 $z_{\text{bpm}}$ はラジエータとBPMの距離である。 $z_{\text{bpm}}$ は既知量であるため、ラジエータ位置 $x_{\text{rad}}$ を変えながらBPMを用いて光子ビーム位置 $\mu_x$ を高精度に測定することで、BSTリングのTwiss parameter、 $\alpha/\beta$ を得ることができると考えた。実施に光子ビームプロファイルのラジエータ位置依存性を詳細に調査した結果を図5に示す。測定結果に対して1次関数でフィッテ

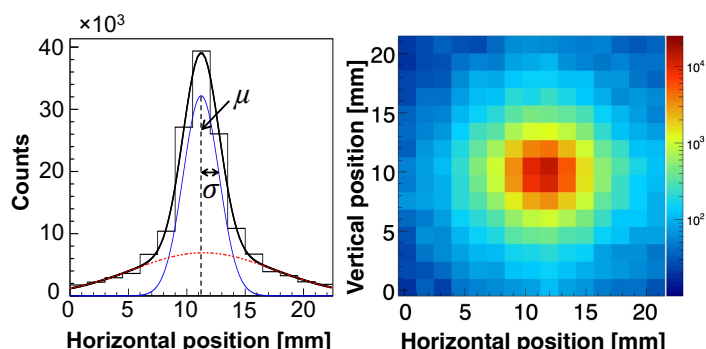


図3. 水平方向のヒット分布(左)とビームプロファイルの二次元ヒストグラム(右)

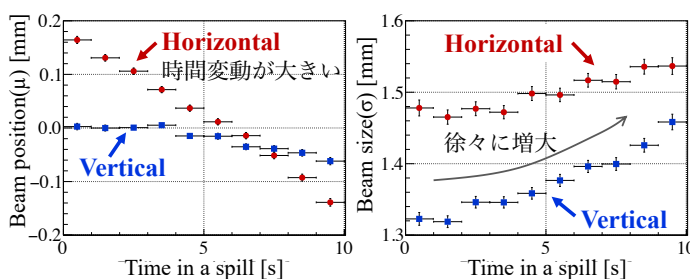


図4. 光子ビームプロファイル(ビーム中心位置(左)とサイズ(右))のスピル内時間依存性

ィングを行い(図 5)、 $\alpha/\beta = -0.510 \pm 0.001$  を得た。設計値は  $\alpha/\beta = -0.51$  であり、初めて測定によって BST リングの動作が設計値を再現することを確認した。このように、光子ビームの測定によって、高精度のもと加速器パラメータに関する情報を得ることを可能にした[7, 8]。

さらに本研究では、BST リング中の周回電子ビームの強度分布の測定も行なった。ラジエータ位置  $x_{\text{rad}}$  が変化すると、ラジエータと周回電子ビームとの重なり具合が変化するため、単位時間あたりに削り出す電子ビームの量も変化する。すなわち、各ラジエータ位置における光子ビーム強度  $I(t, x_{\text{rad}})$  は経過時間の関数として

$$I(t, x_{\text{rad}}) = I_0 \exp(-\Gamma(x_{\text{rad}})t) \quad (3)$$

と書ける。この原理から、各位置  $x_{\text{rad}}$  にラジエータを固定した時の BPM の計数率の減衰定数  $\Gamma(x_{\text{rad}})$  を測定することで、BST リング中の周回電子ビームの強度分布を測定可能であると考えた。実際の測定結果に対し、電子ビームの強度がガウス分布に従うと仮定し、フィッティングを行なった。この結果により得られた電子ビームサイズ( $\sigma$ )は  $0.803 \pm 0.002$  mm であった。計算による予想値は 0.76 mm であり、0.1 mm の精度で一致する結果を得た[7, 8]。

以上のように、開発した BPM を用いて光子ビームを高精度に測定することで、光子ビームの供給源である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が可能になった。

## まとめと今後の展望

BM4 光子ビームラインにおいて即時かつ安定的に光子ビームプロファイルを高精度に行うシステムを構築した。将来的な継続した運用を見据え、ユーザーが誰でも使うことができるよう GUI の開発も進めている。また、開発した粒子位置検出のシステムを、高計数率が想定される米国・JLab におけるハイパー核実験 [JLab E12-15-008] に応用することも検討している。

本研究では、本来原子核実験のための検出器として開発した BPM による測定を、パラメータ測定などの加速器研究に応用した。このような分野横断的な研究により、加速器グループ、物理実験グループで相互にフィードバックを掛け合いながら、加速器運転効率や性能の向上をはかり、より良いパフォーマンスのもとで実験を進めることが今後可能になると期待できる。

## 参考文献

- [1] 木野量子 他, 「ハイパー核電磁生成実験のためのスペクトロメータ較正用粒子位置検出器」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 (口頭発表)
- [2] 浜松ホトニクス (URL: <https://www.hamamatsu.com>)
- [3] R. Honda *et al.*, PTEP (2021) Volume 2021, Issue 12, December 2021, 123H01.
- [4] R. Kino, “First measurement of time-dependent photon beam profile at ELPH BM4 beamline”, 第 7 回クラスター階層領域研究会, 2021 年 12 月 (ポスター発表)
- [5] 木野量子, 「MPPC を用いた ELPH 標識化光子ビームのモニタリング検出器の開発」, ELPH symposium 2022, 2022 年 3 月 (ポスター発表)
- [6] 木野量子 他, 「ELPH 標識化光子ビームのオンラインモニタシステムの開発」, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2022)
- [7] 木野量子 他, 「ELPH BST リングにおける GeV 領域光子ビームプロファイル」 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 (口頭発表)
- [8] R. Kino, “Realtime imaging of high energy gamma-ray beams from 1.3 GeV electron synchrotron accelerator at ELPH Tohoku”, Workshop QBI2022, 2022 年 9 月 (口頭発表)

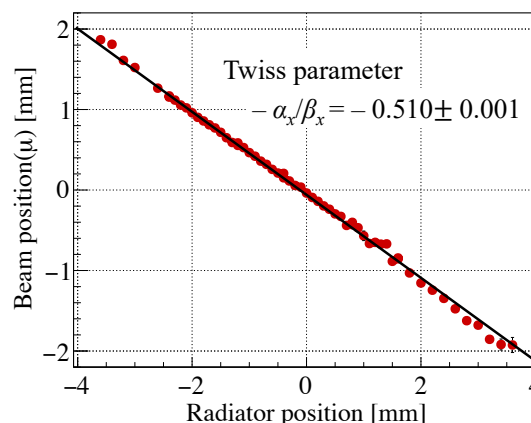


図 5. 光子ビーム位置のラジエータ位置依存性