

ビーム位置モニタを利用したレーザー駆動イオン加速ビーム診断 BEAM DIAGNOSTICS FOR LASER-DRIVEN ION ACCELERATION USING A BEAM POSITION MONITOR

青木宣篤^{#,A,B}, 諏訪田剛^C, 榊泰直^{A,B}, 小島完興^B, 大石沙也加^{B,D}, Dinh Thanh-Hung^B, 山本洋一^B,
伊東富由美^B, 松本悠椰^{A,B}, 錦野将元^B, 白井敏之^B, 近藤公伯^B
Nobuatsu Aoki^{#,A,B}, Tsuyoshi Suwada^C, Hironao Sakaki^{A,B}, Sadaoki Kojima^B, Sayaka Oishi^{B,D},
Thanh-Hung Dinh^B, Yoichi Yamamoto^B, Huyumi Itou^B, Haruya Matsumoto^{A,B}, Masaharu Nishikino^B,
Toshiyuki Shirai^B and Kiminori Kondo^B

^{A)} Kyushu University

^{B)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{D)} Nara Women's University

Abstract

In general-purpose accelerators, increasing the beam-flux of ions is more difficult than that of electrons, making non-destructive diagnostics using the electric field induced by the beam is highly challenging. However, laser-driven ion beams, which have been progressing toward practical application in recent years, exhibit a beam flux approximately 100 times greater over short durations. This substantial increase makes beam diagnostics using induced electric fields increasingly feasible. Against this background, we performed non-destructive ion beams position diagnostics using a beam position monitor (BPM), aiming to support the practical use of high-flux ion beams. In our experiment, a proton beam accelerated by a laser was bunched using a phase-rotation cavity, deflected by a steering magnet, and its position was measured using the BPM.

1. はじめに

イオンに静止質量以上の加速エネルギーを与える $>10^{18}$ W/cm² 以上の高強度レーザーと、数 μm 厚さの薄膜標的とのプラズマ相互作用による高エネルギーイオン加速現象[1](レーザー駆動イオン加速)は、従来の加速器と比較して小型化が可能であり、高エネルギーの重粒子線を得るための加速器を小型化することが期待できる。このことは、特に小型重粒子線がん治療用加速器の実現に不可欠な技術であり、量研(QST)では、量子メスプロジェクト[2]としてその実現を目指した開発を進めている。患者の安全性の観点から治療用ビームは、加速器入射するビーム仕様(進行方向長さ、ビーム径方向形状、ビーム重心位置、総電荷量)を高精度に制御・管理することが求められる。そのため、実時間診断可能な非破壊型ビームモニタの開発が不可欠になる。特に、レーザー駆動イオン加速によるビームは、MeV級エネルギーかつ数ナノ秒の極短パルスであり、既存加速器にはない極短パルス性能をもつため、ビームの特徴に最適化した非破壊型モニタの設計が求められる。

本報告では、非破壊ストリップライン型ビーム位置モニタ(SBPM)を用いた、レーザー駆動イオン加速ビーム重心位置の計測結果を報告する。

2. 多極ストリップ型モニタ

Figure 1 に示すような電子ビーム計測で使われた実績のある四電極 SBPM[3]を用いたビーム診断を検討し

た。ビーム電荷の偏心位置に対する電極 i ($i = 1\sim 4$)に誘起される電流密度は以下の式で表される。

$$j_i(r, \varphi, R, \theta_i) = \frac{I(r, \varphi)}{2\pi R} \frac{(R^2 - r^2)}{R^2 + r^2 - 2rR\cos(\varphi - \theta_i)} \quad (1)$$

ここで、 r はパイプ中心からビーム位置までの距離であり、 R はパイプ径 R_1 と電極外径 R_2 の平均的な半径を用いる。 φ, θ_i はそれぞれビーム位置および電極と x 軸とのなす角である。また、四電極すべてが同一のインピーダンス Z であるとすれば $j_i = V_i/Z$ である。ここで、対向する電極の電流密度の差 Δ と和 Σ の比を計算すると、以下のようにビーム電荷変位 $x(y)$ に対し線形に従う測定量を得ることができる。

$$\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} = \frac{V_1 - V_3}{V_1 + V_3} = \frac{2\sin\alpha}{R\alpha} r\cos\varphi = \frac{x}{S_b} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} = \frac{V_2 - V_4}{V_2 + V_4} = \frac{2\sin\alpha}{R\alpha} r\sin\varphi = \frac{y}{S_b} \quad (3)$$

ここで、 S_b は感度係数と呼ばれ、電極の開口角 α とパイプ半径 R によって変化する。ノイズを考慮した電圧の計測誤差を δV とすると変位 x について位置分解能 δ_x は以下のように示される。

$$\delta_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial V_1}\right)^2 \delta V_1^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial V_3}\right)^2 \delta V_3^2} \quad (4)$$

aoki.nobuatsu.072@s.kyushu-u.ac.jp

$x, y \ll 1$ として $V \sim V_1 \sim V_3$ とすると、式(2),(4)より実際のビーム位置と検出ビーム位置との位置分解能 δ_x は以下のように表される。

$$\delta_x = \frac{\sqrt{2}}{2} S_b \frac{\delta V}{V} \quad (5)$$

現状の最小ビーム径は 0.50 mm であり、 $\delta_x \sim 0.50$ mm を目指す場合、実際のモニタサイズ ($\alpha = 50^\circ, R = 18$ mm) から、電圧の相対変化は以下ようになる。

$$\frac{\delta V}{V} \sim 0.069 \quad (6)$$

よって、許容される電圧の揺らぎは 6.9 % となる。これまで QST では Wall Current Monitor (WCM) を利用しビームの非破壊モニタにおける予備実験を行った。その中で、12 ビット分解能の ADC により WCM を系統誤差 0.1 mV 程度での計測実績があり、6.9 % 以下のノイズがこの系統誤差に対応するとすれば、ビームの測定電圧が 1.5 mV 以上であればこの位置分解能が実現できる。

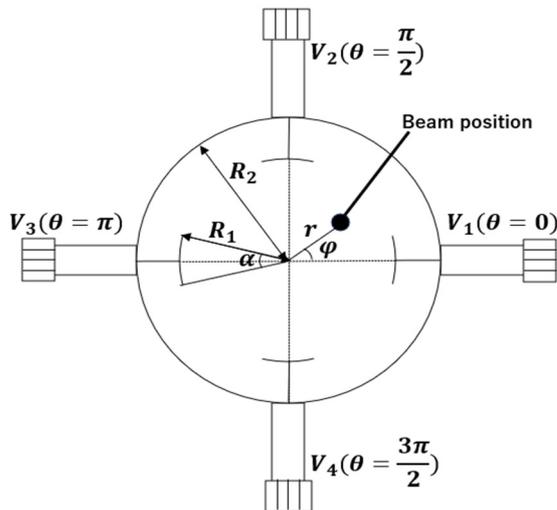


Figure 1: Current Measurement Using a BPM.

3. ビーム重心位置計測

2 章で述べた多極ストリップライン型 BPM を用いて、量子メス原型機におけるレーザー駆動イオン加速ビームが金属パイプ中を通過する際の重心位置を計測した。

3.1 実験用ビームライン

量子メス原型機は、Fig. 2 に示すように Q 磁石及び位相回転空洞 (RF) を用いてイオンビームを径方向および時間的に収束させビーム輸送を行う。収束されたビームは BPM 内部を通過し、最終的に Faraday Cup (FC) に到達する。ここで、FC 前にはスクリーンを設置しており、それを用いてビームの非破壊計測を行っている。また、ビームライン上で RF の奥に設置されたステア磁石により、

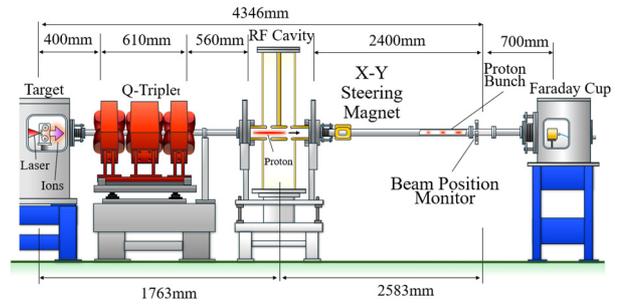


Figure 2: Prototype of a Quantum Scalpel.

ビーム軌道の水平-垂直方向への偏向が可能である。

3.2 ビーム位置計測

ステア磁石の磁場を変化させて、各点で 5 ショットのイオンビームを計測した結果を Fig. 3 に示す。ここでは、磁場の値をある間隔で変化させ、BPM 内におけるビーム重心通過位置を地面と水平に言移動するように計測を行った。横軸はステア磁場 (mT) であり、縦軸は水平方向変位量 (mm) である。5 ショットの平均計測位置を青丸で示し、5 ショットすべてを用いて rms 値を算出しエラーバーとした。赤点線は、計測点に対して線形フィッティングした結果である。ここで、ステア磁場量の変化に対して検出位置は線形に変位しており、BPM を用いたビーム重心通過位置計測の妥当性が確認できた。

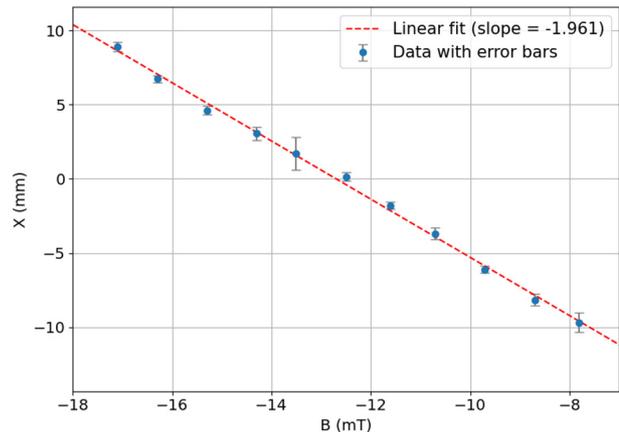


Figure 3: Displacement of Beam Position.

次に、FC 前に設置されたスクリーンにおける、ビーム検出位置と BPM 検出位置を比較した。FC 前スクリーンから検出位置を計測し、ビームの X 方向広がりにおける rms 値をエラーバーとした。ここで、ビームライン上の相似比を用いてスクリーン上の検出位置を BPM 内における検出位置に換算してプロットした。スクリーン上のビーム重心検出位置推移と BPM におけるビーム重心検出位置推移のグラフは傾きの差がわずか 1.6% となっており、統計誤差を考慮すると傾きは一致していると考えられる。両者グラフが完全に一致しない原因は、スクリーン中心と BPM 中心が完全に一致していないためであると考えられる。また、スクリーンの中央には、FC にイオンビー

ムが入るために直径 1 cm の穴があげられており、Fig. 4 中の磁場-14 mT~-10 mT の範囲においてスクリーン上でのビーム検出位置は表示されていない。が、その他の screen 検出位置のプロット点を用いて BPM の検出精度が評価できた。

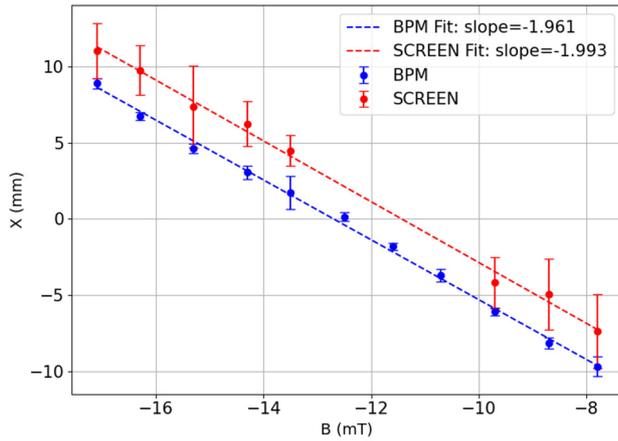


Figure 4: Comparison Between Non-Destructive (BPM) and Destructive (Screen) Measurements.

4. まとめ

SBPM を用いてイオンビーム仕様を実時間計測するための診断モニタ開発を行った。第一段階として、四電極 SBPM を用いて、ビーム重心位置の計測を行い妥当性が確認できた。また、ノイズ低減対策を行うことで SBPM を系統誤差 0.1 mV 程度での計測を達成した。さらに、ビーム電圧を 1.5 mV 以上で計測できたため、2 章で開発指標としていた位置分解能を実現することができた。今後は電極の数を 8 つまで増設し、非破壊でさらに多くのイオンビームの仕様が実時間にて得られる「多目的型ストリップラインモニタ」の開発を目指す。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 の支援を受けて実施された

参考文献

- [1] S. P. Hatchett *et.al*, Phys. Plasmas 7, 2076 (2000).
- [2] Y. Iwata *et.al*, Nucl. Inst. 1053, 168312 (2023).
- [3] T. Suwada, KEK report 2024-2, KEK (2024).