

ストリップライン型ビームポジションモニターの研究 ビームパルス内におけるビーム位置変動

石渡 謙一郎^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、
諏訪田 剛^{C)}、境 武志^{A)}、菅野 浩一^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}

^{A)} 日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{B)} 日本大学 量子科学研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

加速器を運転中にビームを遮ることなくビーム位置を知るためにストリップライン型ビームポジションモニターを製作した。製作した BPM の較正を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のテストベンチを用いて行い、ビームテストは LEBRA の FEL 用ビームラインのアンジュレーターの入口・出口および加速器出口付近に設置した。これにより実験中にビームを遮ることなく常時モニターが可能になる。今回、125MeV 電子線形加速器の電子ビームを使用して、各 BPM の 4 つの電極から出力される RF をクリスタル検波器で検波し、オシロスコープで電圧を測定し、RF 電力に換算し較正曲線よりビーム位置を求めた。電子ビームのパルス幅が長く 20 μ s ある特徴から、ビームパルス内におけるビーム位置変動の測定と FEL ビームラインにおけるビーム軌道の測定を同時に行った。

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では、KEK との共同研究により、赤外線自由電子レーザー (FEL) 用アンジュレーターによって、2001 年 5 月に 1.5 μ m 赤外線 FEL の発振に成功し^[1]、波長領域 0.8~5 μ m の FEL 実用化に向けて大強度・波長可変の自由電子レーザーを発生させるために 125MeV 電子線形加速器の高性能化を進めている。また、パラメトリック X 線放射 (PXR) 用ビームラインが完成し実用化に向けて基礎実験を開始した。

FEL を効率よく発生させるには光共振器中を通過する電子ビーム軌道の高精度の制御が重要になる。FEL ビームラインで以前に使用していた破壊型のビームプロファイルモニターでは、強い放射線が生じアンジュレーターの永久磁石の磁場を劣化させた。そのため、破壊型のモニターの使用をやめたため、FEL 用ビームラインにはビーム位置をモニターできるものがなかった^[2]。そこで、電子ビームが誘起する RF をダクト中に挿入したアンテナで検波する、電子

ビームを遮ることのない非破壊型の BPM を 3 台製作し破壊型のかわりに使うことにした^[3]。この BPM の較正を KEK のテストベンチを用いて行なった。そして BPM をアンジュレーターの入口と出口および加速器出口付近に設置し (図 1 参照)、パルスビーム内におけるビーム位置変動の測定と FEL ビームラインにおけるビーム軌道の測定を同時に行ったので、その報告をする。

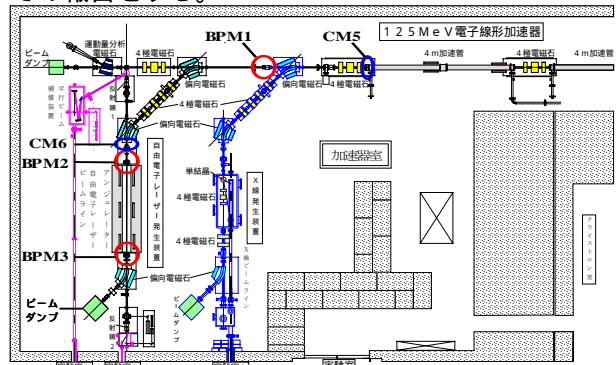


図 1 . BPM1,2,3 と CM5,6 の設置箇所

2. BPM の構造

LEBRA の電子線形加速器は加速周波数 2856MHz の RF と同周期でバンチしたビームが BPM を通過する際、誘起された 2856MHz のマイクロ波が電極とビームの距離に依存した強度で検出される。BPM の電極はストリップライン型で、同軸ケーブルの特性インピーダンス 50 Ω に一致するようにつくられている。また、電極の長さは 26.25mm としてある^[3]。

3. BPM の較正

BPM の較正は Signal Generator から周波数 2856MHz, CW, 5dBm の RF を RF アンプを用いて増幅し、約 25dBm の RF を直径 0.5mm のタングステンワイヤーに伝送させることにより擬似ビームを作り、各電極から出力される RF をクリスタル検波器で検

¹ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

波し、ワイヤーの位置と検波信号をオシロスコープで測定することにより行なった。また、BPMの各電極に取り付けた長さ12mのRG-55/U高周波同軸ケーブルの減衰量を含め較正係数 k_{xij}, k_{yij} を求めた^[4]。このとき、較正係数の次数を3次までとると、BPMの中心から半径4mm以内の範囲で較正曲線からビーム位置に変換した値とワイヤー位置との差が0.1mm以内で較正ができた。

4. ビームパルス内におけるビーム位置の検出

4.1 測定方法

BPMの各電極からの信号は、長さ12mのRG-55/U高周波同軸ケーブルを用いて、加速器本体室から実験室まで運び、クリスタル検波器（Agilent Technologies製, 423B, 0.01~12.4GHz）で検波し、オシロスコープで検波電圧を読み取った。

この電圧をRF電力に換算し(1)式の較正曲線よりビーム位置を導出する^[4]。

$$X = \sum_{i,j=0}^3 k_{xij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i,j=0}^3 k_{yij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j$$

$$\Delta_x = \sqrt{P_1} - \sqrt{P_3}, \quad \Sigma_x = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_3}$$

$$\Delta_y = \sqrt{P_2} - \sqrt{P_4}, \quad \Sigma_y = \sqrt{P_2} + \sqrt{P_4}$$

ここで、 X : BPM中心から水平方向のビーム位置、
 Y : BPM中心から垂直方向のビーム位置、
 k_{xij}, k_{yij} は較正係数、 P_1, P_2, P_3, P_4 はそれぞれ+X側、+Y側、-X側、-Y側の各電極からのケーブル減衰量を含めたRF出力電力である。

4.2 測定結果

測定は、ビームエネルギー86.8MeV、パルス幅20 μ s、繰り返し2Hzで行った。このときBPM電極出力の検波波形を図2に示す。また、ビーム電流の波形を図3に示す。各モニターの設定箇所は図1に示した。

4.3 ビーム位置の評価

得られたデータから式(1)を用いてビーム位置を求めた。オシロスコープで取り込んだデータはS/N比が30倍程度あり、ノイズによりビームが0.2mm程度の変動してみえるため、80nsごとにデータ20個の平均を取り、S/N比が120倍程度にしノイズを除去した。ノイズ除去後のパルス内におけるビーム位置の変動を図4に示す。加速器出口付近のBPM1のX,Y方向ともに、パルス内におけるビーム位置変動が0.1mm程度で安定しているが、45°偏向電磁石で2回曲げられたFELビームラインのBPM3のX,Y方向

ともにパルス内においてビーム変動が0.3mm程度起きていることがわかった。

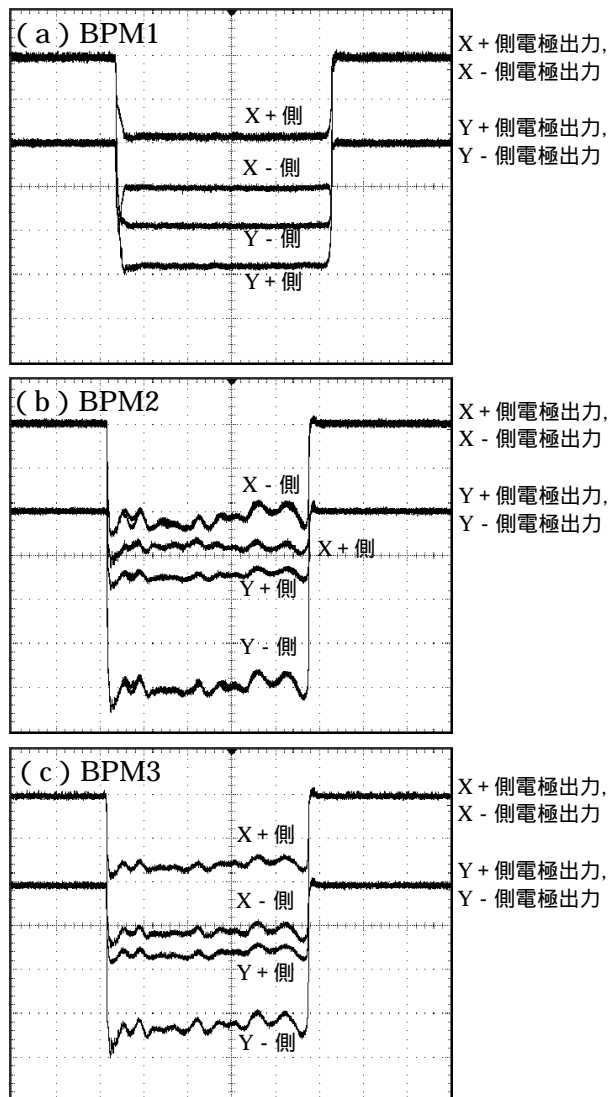


図2 . BPMの電極出力の検波波形

(a),(b),(c) : BPM1,2,3の電極出力の検波波形

(a),(b),(c)ともに、縦軸：20mV/div 横軸：4 μ s/div

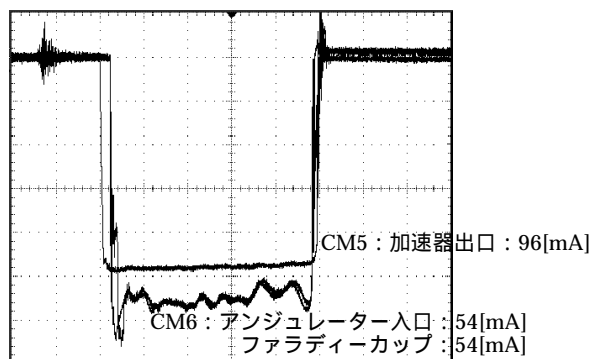


図3 . CM5,CM6,FCの出力波形

縦軸 CM5: 20mA/div, CM6: 10mA/div, FC: 10mA/div
 横軸 : 4 μ s/div

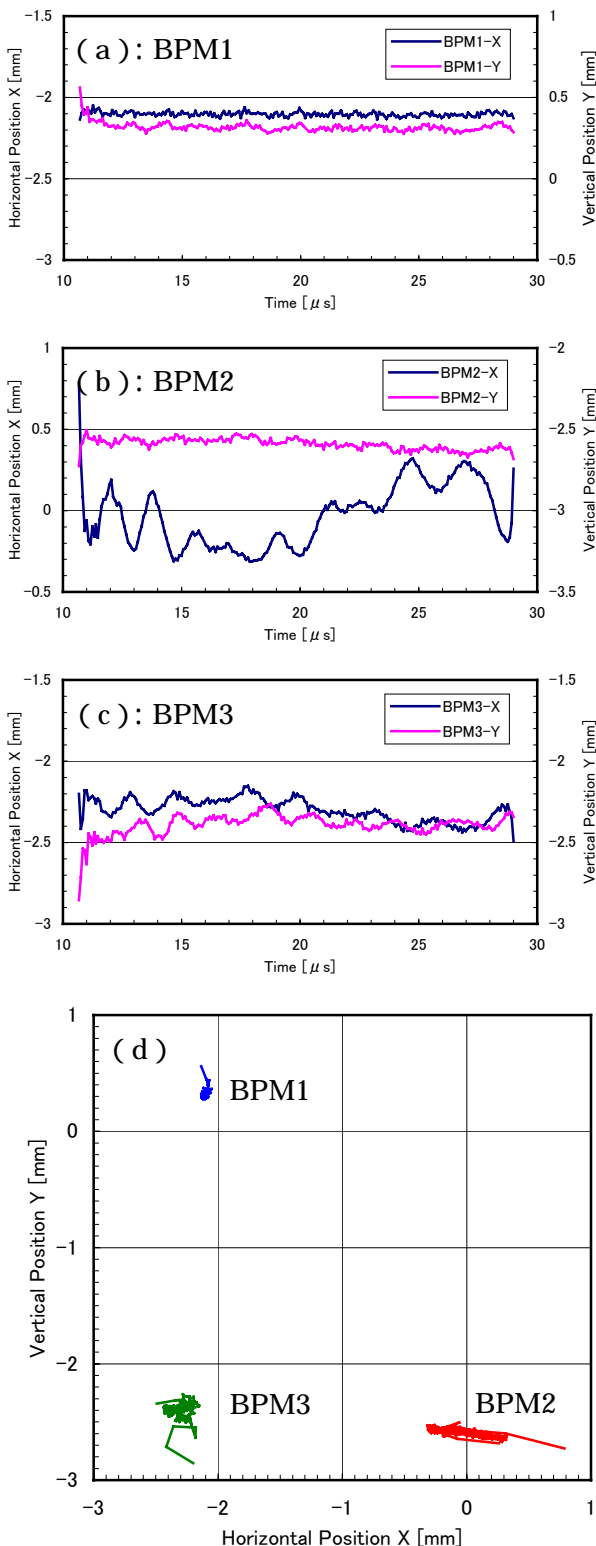


図4．パルス内におけるビーム位置の変動
 (a),(b),(c) : BPM1,2,3 のパルス幅20 μ s における時間とビーム位置 X,Y の位置変動。
 (d) : パルス内において 80ns 間隔でビーム位置 X-Y をプロットしたものを線で結んだ。プロットの塊から伸びた線はビームの立ち上がりと終わりである。

しかし、BPM2 の X 方向のビーム位置は最大 0.65mm 変動している。この波形はビーム電流の波形 (図3の CM6) の形が顕著に表れていることから、図2の X+側電極出力波形と X-側電極出力波形を比較すると、X+側波形の方が出力が大きいにもかかわらず、波形が平坦になっており、異常な信号出力だと考えられる。原因としては、まず、検波器の特性が考えられるが Signal Generator の出力を加速周波数 2856MHz で測定したときには検波器の出力電圧 120mV 以下の範囲で検波出力の飽和は起こらなかった。また、45° 偏向電磁石直後に設置してあり水平方向のビーム進行方向右側の電極であり、ビームによる影響などが考えられるが、原因は不明である。

また、BPM2 の信号に異常があるが、図4(d)において BPM2 と BPM3 を比べると FEL ビームラインでビーム軌道はダクトに対して斜めに通過していると考えられる。

5．まとめと今後の課題

パルスビーム内におけるビーム位置の変動が BPM3 台中アンジュレーター出口に取り付けた BPM2 で確認できた。しかし、アンジュレーター入口に取り付けた BPM では電極の1つに異常な信号出力が検出されたので、今後原因を追求する。

今回、FEL の発振実験を BPM 取り付け後行なっていないので、FEL 発振時のビーム軌道のデータを取り、FEL 発振とビーム軌道の関係を追及していく。

現在この BPM により実験中にビームを遮ることなくビーム位置がオシロスコープを使用してモニターが可能になった。しかし、各電極の出力を同じ電圧にすればビームがダクトの中心を通過することになるわけではない。これではビーム位置の変化とおおよその位置は確認できるが、運転時にビームの正確な位置が知ることができない。今後の課題として、クリスタル検波器で検波した電圧を 10bitADC で AD 変換しパソコンに読み込み、ビーム位置に換算を行い、随時正確なビーム位置を表示できるようにする。位置検出を 0.1mm の精度で行う予定なので S/N 比を今回の測定から推測すると 100 倍以上にすることが必要と考えられるのでノイズ対策も必要となると考えられる。

参考文献

- [1] 佐藤勇 他, “日本大学電子線形加速器の高度化と自由電子レーザーについて”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p30-33
- [2] I.Sato, et al., “Advanced Status at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p24-28
- [3] 石渡謙一郎, “非破壊型ビームポジションモニターの開発研究”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p270-272
- [4] T.Suwada and H.Kobayashi “Test-Bench Calibration System of Stripline-Type Beam-Position Monitors for The KEKB Injector Linac”, Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, September.16-18, 1998, p175-177