

KEK 電子陽電子入射器のビーム形状測定高性能化と 8 電極 BPM を用いたエネルギー広がり測定

DEVELOPMENT OF BEAM PROFILE MONITOR AND ENERGY SPREAD MONITOR USING 8 ELECTRODES BPM AT KEK e+/e- INJECTOR LINAC

宮原房史^{#, A)}, 佐藤政則^{A)}, 諏訪田剛^{A)}, 古川和朗^{A)}, 早乙女秀樹^{B)}

Fusashi Miyahara^{#, A)}, Masanori Satoh^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Hideki Saotome^{B)}

^{A)} High energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Kanto Information Service (KIS)

Abstract

To measure beam profiles of the low emittance e+/e- beams in the KEK e+/e- Linac, new high resolution screen monitor systems were installed. The resolution of the optical system is 9 μm (FWHM) that is much smaller than the beam sizes of the e+/e- beams. A new monitoring system of the quadrupole moment of the beam using an 8 electrodes stripline BPM and a resolution readout system were installed. To confirm the response of the quadrupole moment to the beam distribution, synchronous measurement of the quadrupole moment and beam profile has been performed. The results of the beam tests are described in this paper.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は SuperKEKB HER, PF, PF-AR に電子ビーム, SuperKEKB LER に陽電子ビームを供給している。現在, SuperKEKB は Phase-III の初期段階にあり, 電子ビームに対する要求は電荷量 1-3 nC/bunch, 規格化エミッタンス $\varepsilon_{n,x}=40$, $\varepsilon_{n,y}=20$ mm mrad である。陽電子ビームでは 1-4 nC/bunch, $\varepsilon_{n,x}=100$, $\varepsilon_{n,y}=15$ mm mrad が要求されている。低エミッタンス電子ビームはフォトカソード RF-gun で生成し, 電磁シャワーで生成した陽電子ビームはダンピングリングで低エミッタンス化するが, これらのビームを HER, LER までエミッタンス増大を抑制しながら輸送する必要がある。

エミッタンス増大の原因にはビーム生成時のカソード面でのレーザーの位置や形状, タイミング変化にともなうビーム形状の変化, 加速管中で生じるウェイク場やビームのエネルギー広がりや分散関数の漏れなどがある。エミッタンス増大の原因の推定にはビーム形状分布の詳細な測定が有効であり, 入射器ではビーム形状測定にワイヤスキャナーとスクリーンモニターを用いている。ワイヤスキャナーはシングルショットの測定が出来ず, 測定可能なのは 1 次元の形状のみであるため, スクリーンモニターによるシングルショットの 2 次元形状測定も必要である。

入射器既設のスクリーンモニターはスクリーンの材質にデマルケスト(焼結で成形したアルミナセラミックに酸化クロムをドーブ), 光学系は市販の C マウントレンズを用いた簡易的な構成でビーム形状測定に十分な分解能が無かった。そこで, 高分解能の光学系とスクリーンの材質に YAG:Ce 結晶または OTR プレートを用いた新しいスクリーンモニターのシステムを導入した。

また, エネルギー広がりの変化を測定するため, 入射器の 180 度アーク部($E_e=1.5$ GeV) 中央の分散関数の大きな($\eta\sim 0.85$ m) 位置に 8 電極のストリップライン型

BPM が設置してある。ビームのエネルギー広がり測定するにはスクリーンモニターで分布を測定する必要があるが, 8 電極の信号強度からビームの四重極モーメントを評価することで, エネルギー広がりの変化の監視が可能であり, KEKB 運転時にはエネルギー広がりフィードバックシステムに利用していた[1]。入射器の BPM の読み出しシステムは 2018 年にオシロスコープを用いたシステム[2]から VME ベースの高分解能のシステム[3, 4]に完全に置き換わり, 8 電極 BPM を使ったビームの四重極モーメントもより精度良く評価出来る様になった。エネルギー広がりの変化にともなうビーム形状の変化に対する四重極モーメントの応答を調べるため, 8 電極 BPM と直近のスクリーンモニターの同時測定を行った。

2. 高分解能スクリーンモニター

入射器既設のスクリーンモニターで用いているデマルケストは焼結によって成形しているため, 材質内での散乱が起こることと, 非常に長い減衰時間[5]を持つため前のパルスの残光により分解能が悪化する(露光時間の調整で光量を調整出来るメリットがあるため, 一部のスクリーンは厚さ 100 μm のデマルケストを使用)。また, 光学系はスクリーンからミラーを介して約 1 m の位置に焦点距離 50 mm のレンズと 2 倍のエクステンションチューブを接続した CCD カメラで構成されており, 分解能は 80 μm (FWHM) 程度である。ダンピングリング出射後の陽電子ビームの縦方向のサイズは 50 μm 程度(σ), 電子ビームのサイズも 100 μm 程度となるため, 従来のシステムでは分解能が不足している。そこで, スクリーンの材質を交換し新しい光学系を用意した。スクリーンの材質は厚さ 100 μm の YAG:Ce 結晶に帯電防止用に 30 \AA のアルミをコーティングしたシンチレータと厚さ 70 μm のシリコンウェハに 40 nm のアルミコーティングを施した OTR スクリーンを用意した。入射器上流側 3 カ所に YAG スクリーン, ダンピングリング出射路直後の合流部に YAG スクリーンと OTR スクリーンを備えた 2 段式のス

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

クリーンモニター、入射器最下流の 5 セクターに OTR スクリーンを設置した。

2.1 スクリーンモニターの光学系の構成

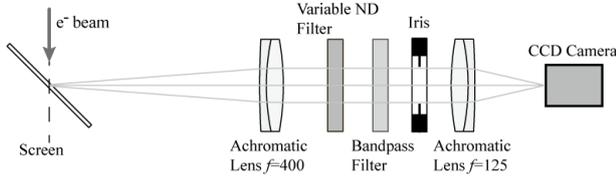


Figure 1: Layout of the optical system of the new screen monitor.

スクリーンモニターの光学系の概略を Fig. 1 に示す。光学系は 2 枚のアクロマティックレンズ、バンドパスフィルターと可変の ND フィルター、アイリス、CCD カメラで構成される。また、スクリーンモニターのビューポートが下向きのスクリーンモニターではミラーを設置している。ビームダクトと加速管近傍は放射線による CCD センサーの損傷が問題となるため、CCD カメラはスクリーンから約 1 m 離れた位置に設置し、鉛シールドを設置している。CCD カメラはセンサーサイズ 1/3 inch、画素数 659x493 または 1024x768 の外部トリガー付きカメラを使用している。十分な視野を確保するため、2枚のアクロマティックレンズの焦点距離は 400, 125 mm の 1/3.2 倍の光学系とした。YAG スクリーンは中心から±8, ±11 mm の位置にφ1.0 mm の穴、OTR スクリーンは±5, ±7 mm の位置にレーザーマーキングがあり、これらを用いてピント調整を行っている。バンドパスフィルターは YAG スクリーンでは波長 550±8 nm、OTR スクリーンでは 400-700 nm を用いた。ビームの電荷量はビームモードによって異なり、PF 入射の 0.3 nC/bunch と陽電子生成用の電子ビーム~10 nC/bunch で 30 倍以上ひらきがある事と Q-scan 測定による電流密度の変化に対応するため、可変 (最大 6 段階) の ND フィルターを設置した。

2.2 光学系の分解能評価

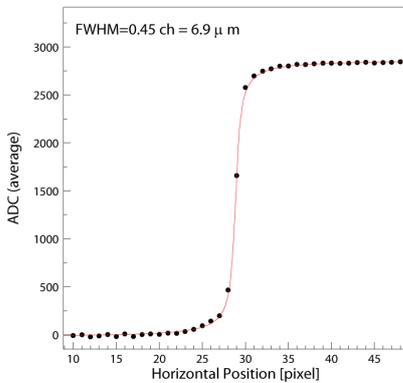


Figure 2: Projection of the rectangle pattern, around the edge, on the 1951 USAF resolution test target. The red line represents the fitting function.

光学系の分解能は USAF1951 分解能テストターゲットを観察し、矩形模様のエッジ周辺 (約 1.5 mm x 0.5 mm

の範囲) をトリミングし、水平方向への射影した分布の広がりを利用して評価した。Figure 2 はエッジ周辺を射影した分布であるが、光学系の分解能で境界付近が緩やかに変化している様子が分かる。観測される画像は光の干渉があるため、エッジ部分にコーシー分布 $g(x)$ を重ね合わせた関数

$$f(x) = a \int_{-\infty}^x g(t) dt + c$$

$$= \frac{a}{\pi} \arctan\left(\frac{x-u}{\Gamma}\right) + c \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma}{(x-u)^2 + \Gamma^2} \quad (2)$$

をフィットした。ここで Γ は FWHM を表す。フィッティングから光学系の分解能は画素数 1024x768, 659x493 のカメラを使用した場合、焦点の位置でそれぞれ約 7 μm 、9 μm (FHHM) であることが分かった。USAF1951 ターゲットでは 32.0, 20.16 lp/mm まで識別可能であった。入射器では HER 入射の電子ビームのサイズが約 100 μm 以上、ダンピングリング出口での陽電子ビームで約 50 μm 以上あるため、光学系の分解能はビームサイズに比べて十分小さい。

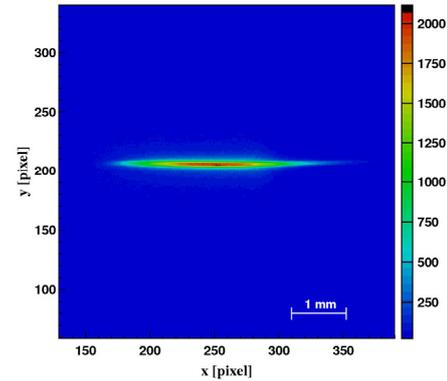


Figure 3: Positron beam profile at the Linac end (5-sector) measured by OTR screen.

入射器終端部 (5-sector) の近接するスクリーンモニター (OTR) とワイヤースキャナー (距離 85 mm) でビーム形状の測定と比較を行った。スクリーンモニターで測定した陽電子ビームの形状を Fig. 3 に示す。陽電子ビームはダンピングリング [6] で低エミッタンス化され、3-sector 先頭から入射器直線部に合流する。ダンピングリングと入射器間の輸送路で水平方向の分散関数の漏れがあるため、水平方向のビームサイズが大きくなっている。スクリーンモニターとワイヤースキャナーで測定した水平方向の分布を Fig. 4 に示す。ビームサイズはガウス分布をフィットして評価した。ワイヤースキャナー測定ではワイヤー径 (半径 $r=50 \mu\text{m}$) による広がりを差し引いたビームサイズ ($\sigma_x^2 = \sigma_{\text{fit}}^2 - (r/2)^2$) としてある。スクリーンモニターで測定した y 方向の分布はビームの裾付近のデータがフィットしたガウス分布よりもわずかに高くなっており、その差は射影分布を作る際の加算範囲を広げると増加することが分かった。この原因は光学的な性質による分布の広がりの可能性がある。一方、ワイヤースキャナー

測定は複数回の測定であるため、ビーム位置と電荷量の変動によってビームサイズが y 方向で数ミクロン大きくなる。2つの測定は $10 \mu\text{m}$ 程度の差があるが、光学系の分解能とシングルショットとマルチショット測定の違いを考慮すると矛盾のない結果となった。また、電子ビームの場合、ビームが2つのコアに分離することがあり、高性能のクリーンモニターの導入でその様な状況の判断が可能となった。

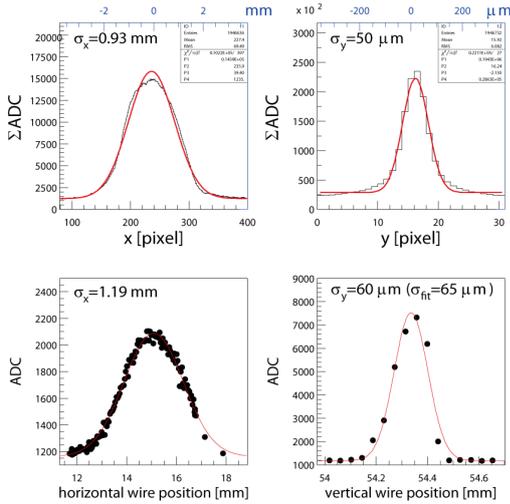


Figure 4: Horizontal and vertical positron beam profile at the Linac end (5-sector) measured by OTR screen (upper) and wire scanner (lower). The data is fitted with sum of a Gaussian with an offset shown by red line.

3. ビームの四重極モーメント測定

入射器ではビームの四重極モーメント測定を利用したエネルギー広がり監視とフィードバックのため、J-ARC 中央、入射器直下流の HER, LTR ビーム輸送路に8電極のストリップライン型 BPM を設置してある。J-ARC の8電極 BPM と高分解能 BPM 読み出しシステムを用いたビームの四重極モーメント測定とスクリーンモニターの測定を同時に行い、四重極モーメントとビーム形状を直接比較した。

3.1 四重極モーメントとビーム形状

ビームの四重極モーメントは電極の内径 R とビームの位置 x, y を用いて

$$J_q = \frac{1}{R^2} (\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2) \quad (3)$$

で与えられ、電極の設置角度 θ と各電極に誘起された電圧 V_i を用いて

$$J_q \approx \frac{\sum_i V_i \cos 2\theta}{\sum_i V_i} \quad (4)$$

と近似出来る。エネルギー広がり変化するとき、水平方向のビームサイズ (Eq. (3) の第1項) が変化するため、四重極モーメントを測定することでエネルギー広がり

変化を監視できる。Equation (3)には位置の二乗に依存する項もあるため、はじめに J-ARC 上流のステアリング磁石を変化させ、位置依存測定を行い、補正関数 (x の二次式) を用意した。次に、J-ARC 上流のクライストロン (A セクター途中~B セクター) の位相を変化させて電子ビーム (HER 入射用 1 nC/bunch) のエネルギー広がりを変えながら四重極モーメントとビーム形状の同時測定を行った。運転の範囲のパラメータでは鉛直方向の位置、サイズ、四重極モーメントの変化は水平方向に比べて十分小さいため、補正は水平方向のみ行った。Figure 5(A) にスクリーンで測定したビームサイズと8電極 BPM で測定した位置依存補正後の四重極モーメントを示す。四重極モーメントがビームサイズの2次に比例して変化している様子が分かる。また、位相変化の符号が異なると同じビームサイズでも四重極モーメントの大きさが異なることが分かる。これは運転値 (0°) を境に、ビーム形状変化の様子が異なることが原因である。Figure 5 の(1)~(3)は (A) の矢印で示した位置に対応したビーム形状を表す。この測定条件では位相を運転値よりも小さくする方向に変化させるとビームが2つのコアに分離していき、大きくすると幅の狭いコアの左側 (低エネルギー側) に裾が広がる。四重極モーメントの大きさが同じでも位相変化の符号の違いでビームサイズが異なるため、四重極モーメントからビームサイズを評価することは出来ないことが分かる。

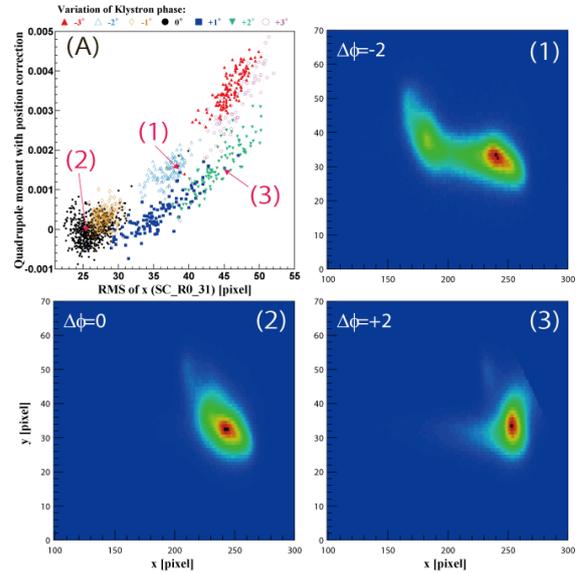


Figure 5: Quadrupole moment of the electron beam estimated by the 8-electrodes BPM and beamsize measured by the screen monitor is shown in the fig. (A). Figure (1)-(3) are beam profiles that correspond to the arrowed data points in Fig. (A).

クライストロンの位相ごとに平均した四重極モーメントを Fig. 6 に示す。四重極モーメントはショットごとのばらつきは大きいですが、平均をとることでクライストロンの位相に対応して精度良く決まる事が分かる。電子ビームのエネルギー広がりや、ビーム形状はビームに対する RF 位相やレーザーのタイミング、形状、カソードへの照射位置な

どで変化するが、これらは時間的に緩やかに変化する場合が多いため、これらのパラメータに対する四重極モーメント(とビーム形状)の応答をあらかじめ測定することでビーム非破壊なフィードバックシステムが構築可能となる。

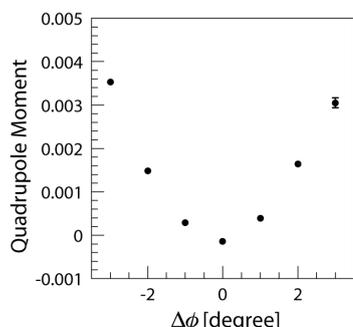


Figure 6: Klystron phase (variation from an operation set value) and average (~70-180 shots) of the quadrupole moment.

3.2 HER 入射効率と四重極モーメント

四重極モーメントと HER の入射効率の関係を調べた。Figure 7 に四重極モーメントと HER の入射効率の1分ごとの平均値を示す。入射効率は入射の RF 位相など様々な要因で変化するが、エネルギー広がりに対応する四重極モーメントも明らかに相関を持つことが分かる。四重極モーメントの変化の原因は明らかではないが、今後、変化の原因を調査しフィードバックシステムを構築する予定である。

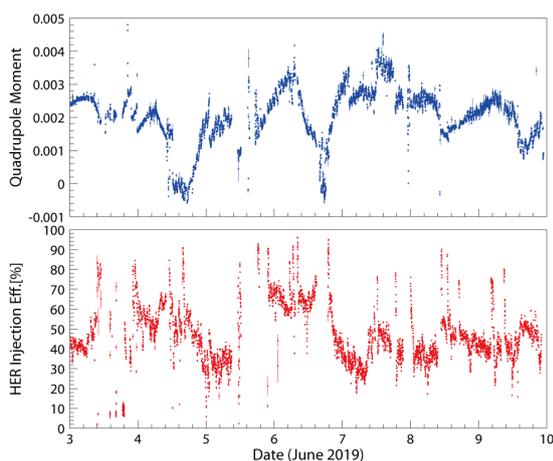


Figure 7: Quadrupole moment of the electron beam and HER injection efficiency (average of 1 minute) in a week.

4. まとめと今後の予定

KEK 電子陽電子入射器では低エミッタンス電子/陽電子ビームの形状を詳細に測定するために YAG:Ce 結晶または OTR プレートと高分解能光学系を用いた新しいスクリーンモニターを導入した。光学系は入射器での電子/陽電子ビームのサイズ($\sigma_e > 100$, $\sigma_{e^+} > 50 \mu\text{m}$)に比べ

て十分小さい $10 \mu\text{m}$ (FWHM) 以下の分解能を持つ。新規に導入したスクリーンモニターとワイヤースキャナーの測定は矛盾のない結果であった。分解能の評価は YAG:Ce 結晶の場合は結晶の厚みによる効果や発光の飽和なども影響するため、分解能に寄与する他の要因も定量的に評価する必要がある。

水平方向の分散関数の大きな入射器アーク部に設置した8電極のストリップライン型 BPM と高分解能の BPM 信号読み出しシステムを用いてビームの四重極モーメントの測定を行った。スクリーンモニターで同時に測定したビーム形状との比較から四重極モーメント測定はエネルギー分布に対応するビーム形状の変化の監視に十分有用であることが分かった。今後、四重極モーメントと RF やレーザーに関わるパラメータとの相関を明らかにし、安定したビーム運転のためのフィードバックシステムの開発を行う。

謝辞

スクリーンモニターの光学系の設計では JASRI 柳田謙一氏に有益な情報とアドバイスを頂いた。KEK 高井良太氏には YAG:Ce 結晶と OTR プレートに関する情報を提供していただいた。深く感謝します。

参考文献

- [1] T. Suwada, M. Satoh and K. Furukawa, “New energy-spread-feedback control system using nondestructive energy-spread monitors”, *Phys. Rev. ST Accel. Beam* **8**, 112802, 2005.
<http://www.jacow.org/index.php?n=Authors.MSWord>
- [2] M. Satoh *et al.*, “Fast BPM DAQ System Using Windows Oscilloscope-based EPICS IOC”, *Proceedings of ICALEPCS2007*, Knoxville, USA, Oct. 15-19, 2007, pp. 469-471.
- [3] R. Ichimiya *et al.*, “High Position Resolution and High Dynamic Range Stripline Beam Position Monitor Readout System for the KEKB Injector Linac Towards the SuperKEKB”, *Proceedings of IBIC2014*, Monterey, USA, Sep. 15-19, 2014, pp. 637-641.
- [4] F. Miyahara *et al.*, “High Position Resolution BPM Readout System with Calibration Pulse Generators for KEK e+/e-Linac”, *Proceedings of IBIC2015*, Melbourne, Australia, Sep. 13-17, 2015, pp. 369-372.
- [5] Y. Hosono *et al.*, “Characteristics of a Ruby Scintillator”, *Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan*, Tosu, Japan, July 20-22, 2005.
- [6] M. Kikuchi *et al.*, “Design of Positron Damping Ring for SuperKEKB”, *Proceedings of IPAC'10*, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, pp. 1641-1643.