

ナノテラスにおける電子ビームエネルギー分散の推定 ESTIMATION OF ENERGY SPREAD PARAMETER AT NanoTerasu

小原脩平 ^{*,A)}, 保坂勇志 ^{A)}, 齋田涼太 ^{A,B)}

Shuhei Obara ^{*,A)}, Yuji Hosaka ^{A)}, Ryota Saida ^{A,B)}

^{A)} National Institute for Quantum Science and Technology (QST) NanoTerasu Center

^{B)} NAT Corporation

Abstract

NanoTerasu, a new 3-GeV synchrotron facility in Japan, performed accelerator commissioning in 2023 and started user operation in 2024. Most of the storage ring beam dynamics was optimized to be consistent with the designed model, but the beam size was slightly fat. The beam size monitor, which consists of a 3-pole wiggler and an X-ray pinhole camera at the dispersion short straight section, cannot distinguish between the reasons for emittance and energy spread. To independently verify the energy spread, we attempted to measure the betatron and synchrotron frequency spectrum sidebands, changing the storage ring chromaticity. The obtained value is 0.057–0.068%, which is slightly smaller than the designed value of 0.0843%.

1. はじめに

軟 X 線領域をカバーする 3 GeV 高輝度放射光施設 (NanoTerasu) は 2023 年度に加速器コミッショニングを実施し、2024 年度にユーザー運転を開始した [1,2]。2024 年度のユーザー運転では蓄積電流 160–200 mA での放射光提供を行い、光源稼働率 99.6%、平均故障間隔 (MTBF) 323.2h、平均修復時間 (MTTR) 1.2h を達成した。高信頼度で安定した運転を継続するにあたり、電子ビーム応答が計算モデルと一致しているほどに普段の加速器運転を御しやすい。

加速器コミッショニングでは電子ビーム応答がよく、ベータ関数及びディスパージョン関数などが高精度で一致していたものの、3 極ウィグラーと X 線ピンホールカメラで撮像されたビームサイズは設計値よりもわずかに太かった [2]。この撮像システムはアンジュレータの挿入されるディスパージョンフリーな長直線部ではなく、 $\eta_x = 0.05\text{ m}$ のディスパージョンを持つ短直線部に設置されているため、エミッタンス又はエネルギー分散のいずれかが原因であるかを特定ができない。撮像されたことによって見えるビームサイズ (σ_b) は、エミッタンス (ε)、エネルギー分散 ($\Delta\sigma_E/E$)、ベータ関数 (β)、ディスパージョン関数 (η) を用いて

$$\sigma_b = \sqrt{\left(\eta \cdot \frac{\Delta\sigma_E}{E}\right)^2 + \beta \cdot \varepsilon} \quad (1)$$

と表される。デザインモデルにおけるエネルギー分散値は 0.0843% であり、コミッショニングによる結果ではエミッタンスを設計値である 1.14 nm rad を仮定して導出すると $0.0972 \pm 0.0161\%$ であった [2]。本稿では、このエネルギー分散を上記ビームサイズ測定とは独立な手法によって推定し、検証する。

2. 測定手法

先行研究として、ベータトロン周波数に対するシンクロトロン周波数だけ離れたサイドバンドのピーク比

を測定することで、エネルギー分散を推定できることが分かっている [3]。蓄積リングのクロマティシティを大きくすることでサイドバンドピークが高くなり観測がしやすくなる。ベータトロン周波数に対する $m (\neq 0)$ 番目のサイドバンドピーク比 (R_m) は

$$R_m(y) = \frac{1}{y^2} \int_0^\infty J_m^2(x) e^{-\frac{x^2}{2y^2}} x dx, \quad (2)$$

$$y \equiv \left(\frac{\omega_\beta \alpha}{\omega_s} + \frac{\omega_0 \xi}{\omega_s} \right) \left(\frac{\Delta\sigma_E}{E} \right) \quad (3)$$

と表される [3]。ここで ω_β はベータトロン角周波数、 ω_s はシンクロトロン角周波数、 ω_0 周回角周波数、 J_m は第一種ベッセル関数、 ξ はクロマティシティである (デザイン値及びコミッショニング後の調整値としてのパラメータは文献 [2] を参照いただきたい)。Figure 1 にエネルギー分散とパラメータ y の関係を示す。式からも明らかなように一次線形であり、特定のクロマティシティでパラメータ y が決定されれば、対応するエネルギー分散が推定できる。

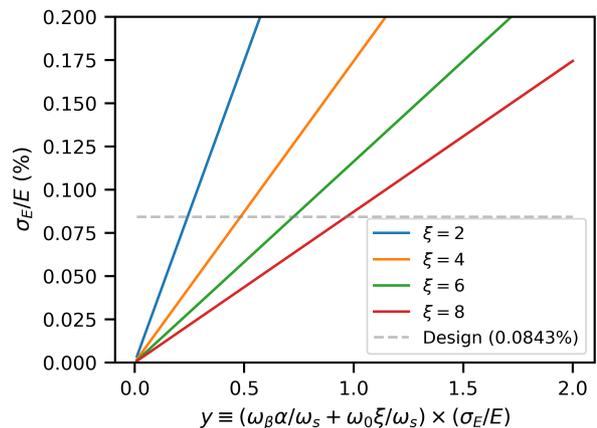


Figure 1: Energy spread and parameter y for variable chromaticities.

* obara.shuhei@qst.go.jp

Figure 2 には Eq. (2) のサイドバンドピーク比とパラメータ y の関係を示す。NanoTerasu 加速器の条件では、Fig. 1 から $\xi = 2 \rightarrow 8$ としても、設計エネルギー分散値のときには $y \sim 1$ であり、Fig. 2 から $m = \pm 2, \pm 3$ のサイドバンドピーク比が小さく、観測が難しいことが予想される。一方で $m = \pm 1$ サイドバンドピーク比は $m = 0$ に対して相対的に 40% 程度になると見込まれ、これよりもピーク比が低ければエネルギー分散が設計値よりも小さく、ピーク比が高ければエネルギー分散が設計値よりも大きいことが示唆される。

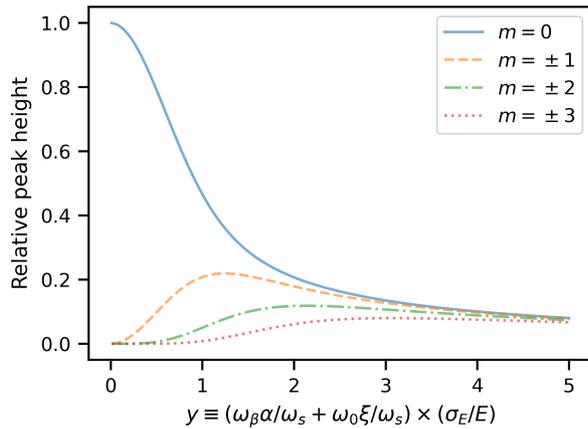


Figure 2: Frequency spectrum relative height and parameter y .

3. 測定結果

Bunch-by-bunch feedback (BBF) system [4] で蓄積ビームの周波数スペクトルを計測した結果のうち、クロマティシティを 4 に調整していた時のものを Fig. 3 に示す。なお測定データは蓄積電流 2 mA で取得したものであり、クロマティシティ変更後にベータトロンチューン及び COD は調整してある。水平ベータトロンチューン小数部は 0.17 であり、周波数にして 146.1 kHz である。シンクロトロン周波数は設計値では 5.97 kHz であるが、加速器コミッショニング時から加速空洞電圧を設計値である 3.6 MV から 2.9 MV に下げて運転しているため、ここでは 5.34 kHz になっている。測定時の実際の周回周波数を用いて図中横軸を規格化すべきではあるが、ここでは簡単のためにデザイン値の周回周波数を用いて導出したため、図中の周波数ピーク位置は計算値とわずかに異なっている。また同条件で複数回測定しての平均化処理は施していないため、このスペクトル及びピーク比は統計的フラつきを加味していない。クロマティシティを通常運転時の $\xi = 2$ から 4 および 6 へ変更を行って測定をしているが、 $\xi = 8$ 以上は電磁石電源の出力定格の都合から設定ができなかった。

クロマティシティ 4 および 6 の時の $m = \pm 1$ のサイドバンドピーク比を求め、Eq. (2) からエネルギー分散を推定する。事前推定の通り $m = \pm 2, \pm 3$ のサイドバンドピーク比は低すぎたために測定ができなかった。Figure 4 に測定結果をまとめる。本測定から推定される

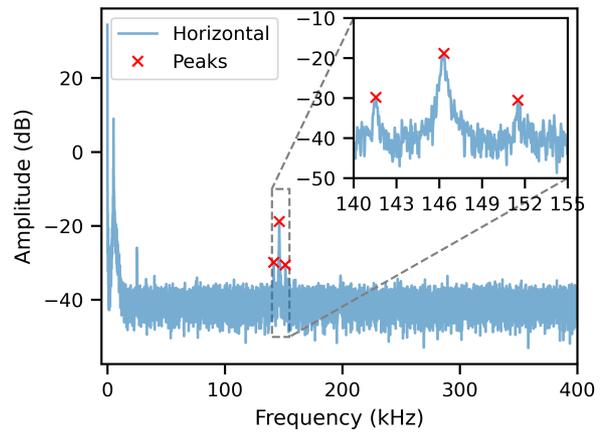


Figure 3: Frequency spectrum with chromaticity 4.

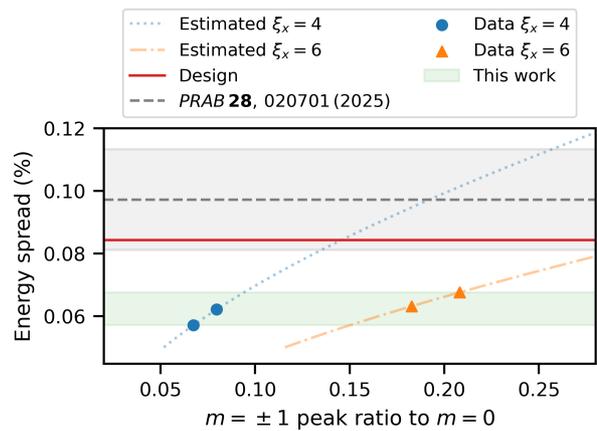


Figure 4: Obtained energy spread region.

エネルギー分散値は 0.057–0.068% の範囲であった。赤線で示す設計値の 0.0843% に対して少し小さい値を好む結果となったものの、大きく外れてはなかった。本測定では統計誤差及び系統誤差の見積りは行っていないため、上記推定範囲は不定性を含むものではないことに注意する。

4. まとめ

コミッショニング時に観測した電子ビームサイズが設計値よりもわずかに太かったため、独立な検証手法として、周波数スペクトルのサイドバンドピーク比を用いたエネルギー分散推定を行った。NanoTerasu 加速器ではクロマティシティを大きく変えないとサイドバンドピークが高くならず測定が難しいことが予想されたが、 $m = \pm 1$ については観測することができ、エネルギー分散 0.057–0.068% の値を得た。デザイン値よりも少し小さい値を好む結果であり、独立検証とするには感度が不足した測定ではあったものの、大きく外れた値ではないことが確認された。

感度改善のためには、周波数スペクトルを取得した瞬間の周回周波数も取得しておき横軸を較正する、複

数回測定して統計的フラツキの評価等を行うことなどが挙げられる。また別手段として、放射光の高次光まで含めたスペクトル形状を用いてエミッタンスとエネルギー分散を推定することも検討していきたい。

謝辞

測定のアイディアについては、高エネルギー加速器研究開発機構 (KEK) の中村剛氏よりご助言をいただきました。感謝の意を表します。なお本研究は、3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の加速器マシンスタディ MS24-174 の一部を利用した成果であり、加速器の運転調整業務を行っている量子科学技術研究開発機構 (QST) NanoTerasu センター及び株式会社 NAT のメンバー、施設建屋の維持管理をいただいている一般財団法人光科学イノベーションセンター (PhoSIC)、また NanoTerasu 加速器にかかわられた全ての関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] https://nanoterasu.jp/users/operation_status/
- [2] S. Obara *et al.*, “Commissioning of a compact multibend achromat lattice NanoTerasu: A new 3 GeV synchrotron radiation facility”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 28, p. 020701, 2025. doi:10.1103/physrevaccelbeams.28.020701
- [3] T. Nakamura *et al.*, “Chromaticity for Energy Spread Measurement and for Cure of Transverse Multi-Bunch Instability in the SPring-8 Storage Ring”, Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (PACS2001), Chicago, USA, vol. 3, pp. 1972 - 1974. doi:10.1109/PAC.2001.987246
- [4] K. Ueshima *et al.*, “COMMISSIONING OF THE STORED BEAM MONITOR SYSTEM IN NanoTerasu”, 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, July 31 - August 3, 2024, WEOP03, pp. 5-9. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/WEOP/WEOP03.pdf