

SuperKEKB でのチューンシフトが及ぼす影響

IMPACT OF TUNE SHIFT AT SuperKEKB

照井真司^{#, A)}, 石橋拓弥^{A)}, 大見和史^{B)}, 周徳民^{A)}, 大西幸喜^{A)}, 池田仁美^{A)}, 中村剛^{A)}, 古賀太一朗^{A)}

Shinji Terui^{#, A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Kazuhito Ohmi^{A)}, Demin Zhou^{A)},

Yukiyoishi Ohnishi^{A)}, Hitomi Ikeda^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Taichiro Koga^{A)}

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

Abstract

The change of aperture according to the change of optics for squeezing the beam size in the vertical direction at the collision point and the increase of the bunch current for increasing beam current means a change of the amount of tune shift. If the tune touches the resonance line and mode coupling occur as a result of a tune shift, it will have an effect such as a large beam loss and a beam size blow-up. Beam loss in high current accelerators such as SuperKEKB can damage vacuum equipment and particle detectors. In addition, a beam size blow-up in a collider is an event that must be prevented because it directly leads to a decrease in luminosity. Understanding the tune shift is very important to avoid the above-mentioned events and realize stable accelerator operation.

1. はじめに

蓄積型リング加速器では、加速器を構成する加速空洞やビームパイプなどの機器からのインピーダンスの影響を繰り返し受けることになる。そして、チューンシフトは、スペースチャージやインピーダンスが原因で、引き起こされることが知られている。

蓄積型リング加速器の SuperKEKB は、世界最高ルミノシティを記録した KEKB の後継機であり、衝突点の垂直方向 β 関数(β_y^*)を極限まで絞り込むナノビームスキームを採用している。SuperKEKB メインリングは電子リング(7GeV, High Energy Ring: HER)と陽電子リング(4GeV, Low Energy Ring: LER)から成り立っている[1]。

現在、SuperKEKB は、HERで2.6 A、LERで3.6 Aという高いビーム電流への到達過程で、日々の調整でビーム電流の増加を目指している。ルミノシティ増加のためのバンチ電流の増加や、 β_y^* を絞り込むためのオペティクス変更に伴うアパーチャーの変化は、チューンシフト量の変化を意味する。このチューンが共鳴線に触れた場合、大きなビームロスやビームサイズの増大などの影響がでてくる可能性がある。SuperKEKB のような大電流加速器でのビームロスは、素粒子検出器等を損傷させる危険性がある。また、ビームサイズの増大は、ルミノシティ減少に直結するため防がなければならない事象である。上で挙げた事象を避けて、安定な加速器運転を実現するためにはチューンシフトの理解は非常に重要である。

2. SuperKEKB でチューンシフト増大の原因

先述のように、SuperEKKB ではナノビームスキームを採用している。LERの β_y^* のデザイン値は、0.27 mmであり、2021年までに0.8 mmを成し遂げている[2]。 $\beta_y^* = 0.8$ mmは、実用している加速器では世界最小である。どの加速器も到達してこなかった領域ということもあり、SuperEKKBは現在、想定外や想定より早く出現した問題に直面している。その問題の一つに、コリメータからの

インピーダンスが挙げられる。

理論式(1)からチューンシフトは、キックファクターと、その場所での β 関数の掛け算の総量と、バンチ電流に比例することがわかる。ここで ν はチューン、 T_0 は周回周波数、 E/e はビームエネルギー(eV)、ここでの β は問題となる機器のある場所のベータ関数、 k_{Li} は問題がある場所でのキックファクター(バンチ長 σ_z の関数)、 I_b はバンチ電流である[3]。ここから先では、コリメータの設置した場所の垂直方向 β 関数とコリメータの垂直方向キックファクターの総量を $\text{Sum}(B * k)$ と記述する。

$$\Delta\nu = \frac{T_0 I_b}{4\pi E/e} \sum_i \beta_i k_{Li} \quad (1)$$

β_y^* を小さくしていったとき、最終収束超電導マグネット(QCS)の垂直方向 β 関数が大きくなる(この垂直方向 β 関数が大きくなるポイントは、QC1と呼ばれる)。Figure 1に、衝突点付近のロスの状況を示す。赤丸に囲まれたQC1付近のロスが、衝突点のBackground noise(BG)が増大の一因となっていることがわかる。

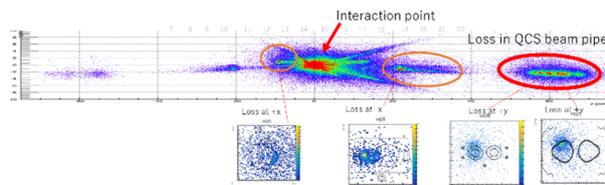


Figure 1: Loss distribution at interaction region [4].

QC1付近で発生したロスに起因するBG小さくすることと、QCSのクエンチを防ぐために、 β_y^* を絞る度に、QC1の垂直方向 β 関数に反比例するように、垂直方向コリメータのギャップを狭くしている。垂直方向コリメータのギャップを狭くしていった時には、垂直方向キックファクターが指数的に増えていくので、垂直方向の $\text{Sum}(B * k)$ が大きくなり、垂直方向チューン(ν_y)シフトが大きくなる。コリメータのインピーダンスを低減する方法を考えているが、金属をビームに近づける今の方式では、原理的に大幅な低減は難しい。現状は、QC1とできるだけ位相があった場所に垂直方向コリメータを配置することで、垂

[#] sterui@mail.kek.jp

直方向コリメータのギャップをできるだけ狭くせずに、BGを減らすという方針をとっている。

ここから先では SuperKEKB の LER の垂直方向に焦点を当ててチューンやビームサイズ等について報告する。パラメータについて特に断りのない場合は、LER 垂直方向についての記述である。垂直方向に焦点を当てた理由は、SuperKEKB メインリングのビームは、垂直方向が小さい扁平な形になっていて、水平方向より垂直方向の方が厳しい状況であることと、残留ガスなどでできるビームハロー削減のため、垂直方向コリメータのギャップを狭くする必要があるため、垂直方向のインピーダンスが厳しい状況であるからである。また、HER の垂直方向についても調査を行ったが、測定時に HER のバンチパイバンチフィードバックの回路の方に、ノイズが入り込んだことで、正確な解析が難しかったので、今回は衝突状態について記述した7章以外では HER の結果には触れない。また、垂直方向ビームサイズはモニター場所での値である。

3. チューンスシフト

キックファクターは σ_z の関数なので、バンチ長の測定を行った。ストリークカメラを用いたバンチ長測定の結果について、Fig. 2 に示す。コリメータのギャップを変化させて、いくつかのデータをとった。コリメータのギャップを変化させても、バンチ長は変わらず、バンチ電流に比例していることがわかる。SuperKEKB メインリングのコリメータの配置は、参考文献[5]を参照願いたい。

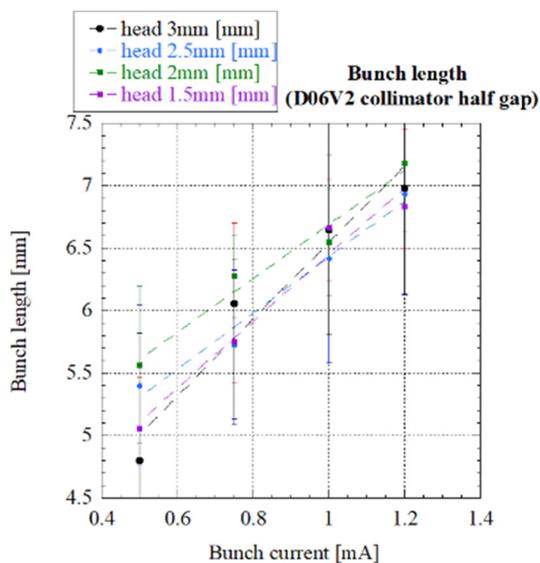


Figure 2: Measurement value of bunch length in SuperKEKB LER.

β_y 毎の v_y シフト量を調査した結果を Fig.3 に示す。Figure 3 は、バンチ電流を横軸にとり、縦軸に v_y シフト量をとったものである。 β_y 毎に、垂直方向の $Sum(B * k)$ が少し違うが、似たような値のものを選択した。Figure 3 から、コリメータがビームに当たって損傷したものは、他の測定より v_y のシフト量が大きくなっていることがわかる。このコリメータが損傷したときを除くと、 β_y が異なっても、バンチ電流 1 mA 以下では LER v_y のシフト量は、概ね理論値と

合っていることがわかる。また、バンチ電流が高い値のときは、理論値より v_y のシフト量が小さくなっていることがわかる。これは、バンチ長が長くなったことが原因だと考えられる。 $Sum(B * k)$ は、バンチ長は 6 mm を仮定して GdfidL を用いて計算したものをを用いた。

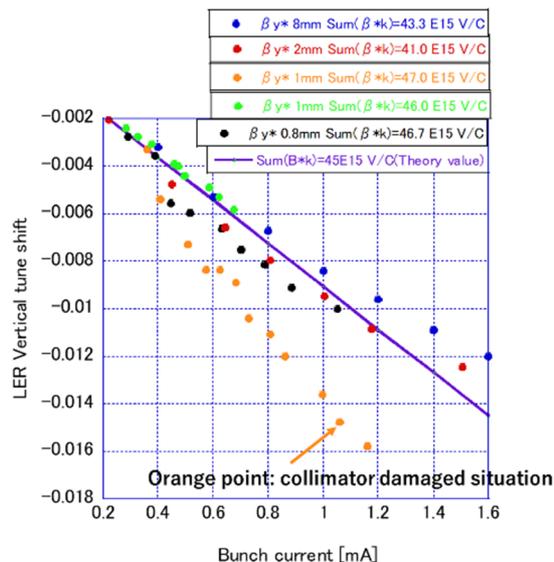


Figure 3: LER vertical tune shift versus bunch current.

2020c run(2020/10/19~2020/12/18)中に、通常使われている先端がタンタルでできているコリメータの他に、先端がカーボンでできている low-Z collimator をインストールした。カーボン融点が高く、密度も小さいので low-Z collimator はアブノーマルな軌道を通ったビームが、コリメータにぶつかり損傷してしまう事例へ対応するための試験機であった。タンタルとカーボンの放射長の違いから、low-Z collimator の先端は通常のもの(先端長 10 mm)と比べて長く(先端長 60 mm)、インピーダンスが高い[6]。Low-Z collimator を使用した垂直方向の $Sum(B * k)$ が大きい状態でのスタディ結果を、Fig. 4 に示す。Figure 4 は、運転中にチューンを測定するために使用しているパイロットバンチのチューンスpektrumである(上が水平方向、下が垂直方向)。Figure 4 右(バンチ電流 0.95 mA)のメインのpektrum(0 mode)に黒線、サイドバンド(-1 mode)に黒破線を、Fig. 4 中央(バンチ電流 1.24 mA)の 0 mode に紫線、-1 mode に紫破線を引いた。ここから、バンチ電流が増えていったときに、-1 mode が大きくなっていくことと、0 mode がシフトしていき、0 mode と-1 mode と結合しそうな状況になっていることがわかる。この 0 mode と-1 mode が結合する現象は、横方向インピーダンスが原因で起こり、Transverse Mode Coupling Instability (TMCI) [7]と呼ばれている。TMCI が起きると、振動が原因でバンチ電流が増加できなくなる。Figure 5 は、 v_y のシフト量のシミュレーションの値(赤丸)と測定値(黒丸)を比べたものである。ここから、バンチ電流が増えていくと、シミュレーションの値と測定値が乖離していき、それがわかる。これも、バンチ電流が増えた際に、バンチ長が伸びた影響が見えているものと考えられる。Figure 6 は、横軸に垂直方向の $Sum(B * k)$ をとって、縦軸に垂直方向のビームサイズをとったものである。測定時の条件は、

バンチ電流は 0.49 mA、 ν_y は 0.585 である。これは、垂直方向の $\text{Sum}(B * k)$ が増えていくと、ビームの振動が増えつつあったからだと推測されている。

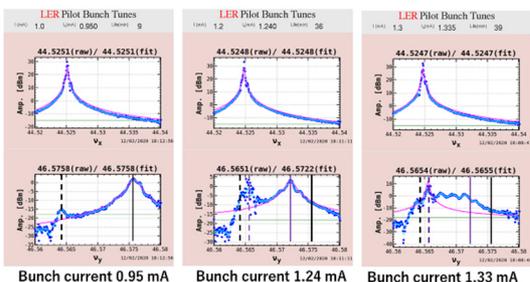


Figure 4: Tune spectrum of LER pilot bunch.

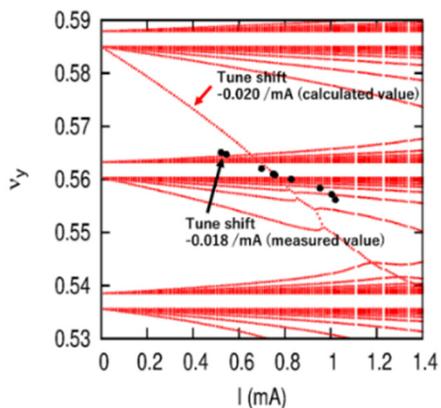


Figure 5: LER Vertical tune shift in case of using low-Z collimator.

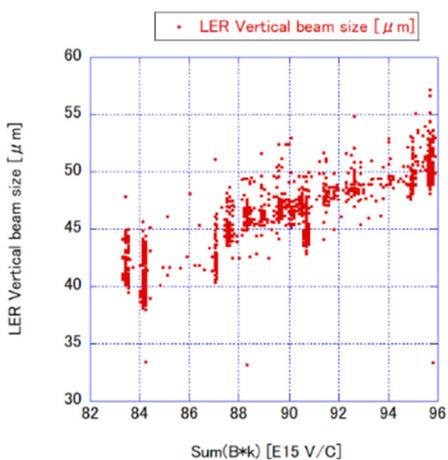


Figure 6: LER Vertical beam size versus $\text{Sum}(B * k)$.

4. チューンスキャン

非線形磁場がある場合の現象の1つとして、共鳴が知られている。リング加速器において磁場が二極および四極のみしかない場合、加速器中の粒子の運動は完全に線形であり、この共鳴現象が悪影響することはない。しかし、実際の加速器では、理想的なマグネットや、完璧な

アライメントではないため線形磁場のみしか存在しないことはありえず、非線形磁場が存在する。共鳴線付近では、この非線形磁場の影響が指数的に増大してビームサイズ増大やビームロスを引き起こすことがある。中でも整数共鳴は非常に強い共鳴現象であり、一般に次数が上がるほど共鳴としては弱くなると言われている。共鳴条件を式で表すと、式(2)となる。ここで、 $\nu_{x,y}$ は水平方向と垂直方向のチューン、 ν_s はシンクロトロン周波数、 i, j, k, q は整数である。共鳴の時数 q は、式(3)で示される [8]。

$$i\nu_x + j\nu_y + k\nu_s = q/2 \quad (2)$$

$$|i| + |j| + |k| = q \quad (3)$$

Figure 7 は、横軸に ν_x を、縦軸に ν_y をとったグラフである。黒系統が水平方向、青系統が垂直方向、赤系統が水平-垂直方向の LER の共鳴線である。色の濃さと線の太さが太いほど、次数が少なく共鳴現象が強いものである。 ν_y のスキャンした範囲を、Fig. 7 中の黄緑線で示す。

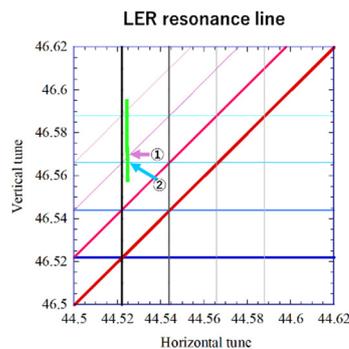


Figure 7: History of LER vertical tune scan.

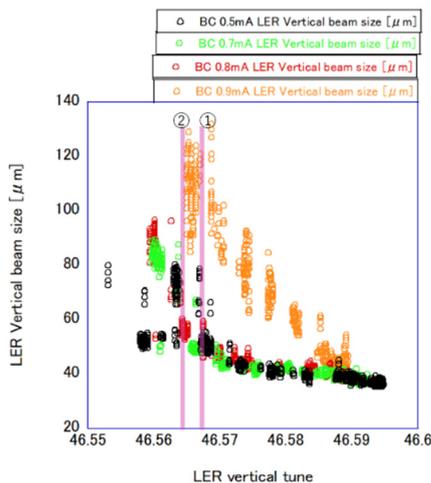


Figure 8: LER Vertical beam size versus vertical tune scan.

LER の ν_y スキャンは、バンチ電流 0.5、0.7、0.8、0.9 mA で行った。測定条件は垂直方向の $\text{Sum}(B * k) = 39.0E15$ [V/C] である。横軸を ν_y で、縦軸を垂直方向ビームサイズでプロットしたものを、Fig. 8 に示す。Figure 8 中の紫の線は、Fig. 7 の①と②はチューンの共鳴線の位置を示したものである。バンチ電流 0.5 mA のときは、共鳴線の上付近でビームサイズが急激に増大して

いることがわかる。バンチ電流 0.7, 0.8 mA のとき、バンチ電流 0.9 mA を比べた時、ビームサイズ増大の挙動が違ってくる。チューンの違いによる挙動の変化は、ローカライズドインピーダンスの影響で、ビームがキックされる場所異なることが原因だと考えられる。

5. クロマティシテスキャンとバンチバイバンチフィードバックのゲイン

TMCI でバンチ電流がリミットされる場合、クロマティシテシを上げて、重心振動を安定化させる方法や、クロマティシテシをネガティブにすることで、ヘッドテイル振動を安定化させ、不安定化した重心振動に対しては、バンチバイバンチフィードバックのゲイン(FB gain)を上げることで、対処する方法などが試されている[9, 10]。このような方法が運転に採用可能かどうかは、加速器ごとで異なる。異なる理由は、当たり前だが衝突型加速器と放射光加速器では求められている部分が違うことや、放射光加速器でもリングのオプティクスが違うことや、クロマティシテシを上げていくとダイナミックアパーチャーが減少してきて入射効率に影響を及ぼすので、入射方式や入射ビームのクオリティが違うことなどが挙げられる。どのような方法が、SuperKEKB で採用可能かを、調べてみたので、その結果を報告する。

垂直方向クロマティシテシ(ξ_y)を変化させた際のビームサイズの変化について、Fig. 9(a)に示す。Figure 9(a)から、 ξ_y を上げた時には、ビームサイズが小さくなっているのがわかる。Figure 9(b)は、横軸に垂直方向チューンをとって、縦軸にビームライフタイムを考慮しない生の入射効率を示したものである。 ξ_y を上げて、垂直方向チューンが高い場合には、入射効率が低いことがわかる。このときの条件はバンチ電流 0.95 mA で、 $Sum(B * k) = 47.46E15 [V/C]$ である。

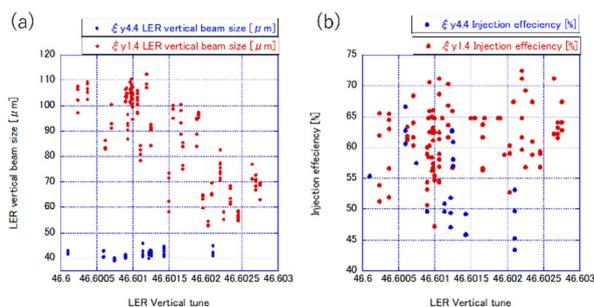


Figure 9: (a) LER Vertical beam size versus vertical tune scan and (b) LER injection efficiency versus vertical tune scan, when ξ_y was changed.

次に、 ξ_y をあげた状態で、FB gain を変化させたときの、ビームサイズの変化を、Fig. 10 に示す。Figure 10 から、一番垂直方向 FB gain を上げたとき(赤丸)と、FB gain を変えていない(黒丸)を比べた時に、赤丸のものは高いバンチ電流でもビームサイズ増大が抑制されていることがわかる。

ξ_y をネガティブにしたときの観測結果を、Fig. 11 に示す。 ξ_y をネガティブにしたときは、パイロットバンチはバンチバイバンチフィードバックが効いていないため、電流を

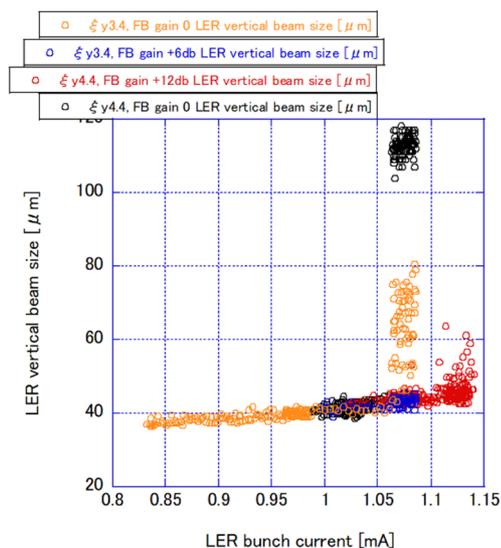


Figure 10: The change of vertical beam size versus bunch current, when the gain of bunch by bunch feedback kicker was changed.

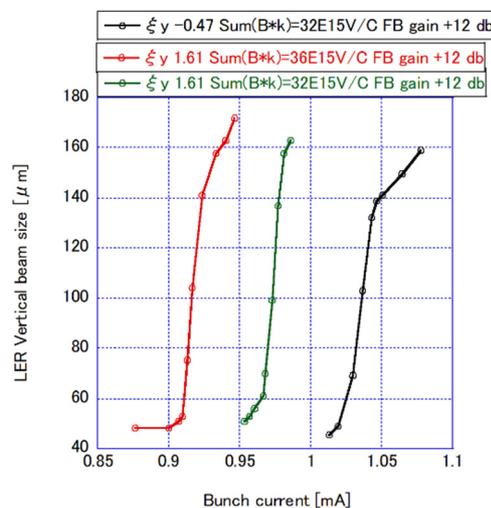


Figure 11: A threshold of a beam size blow-up changes, when ξ_y changes from positive to negative.

高くすることができない。つまり、バンチ電流毎のチューンを測定することは難しいということである。Figure 11 では、横軸にバンチ電流をとって、縦軸に垂直方向ビームサイズをとったもので、 ξ_y がネガティブとポジティブのものを比べた。Figure 11 から、 ξ_y がネガティブの方が、ビームサイズ増大する閾値が高いバンチ電流であることがわかる。また、 ξ_y がポジティブの時に、垂直方向 FB gain が+12 db の状態でも、 $Sum(B * k)$ が大きい場合の方が、ビームサイズ増大の閾値が下がっているということがわかる。この測定の際の、 ξ_y の設定値は 0.590 である。

6. チューンと duration time

SuperKEKB の運転では、素粒子検出器への BG を減らすことも重要な課題である。SuperKEKB は、積分ルミノシテシを貯めるために、連続入射運転を行っている。この

入射のタイミングは、入射ビームの振動や、入射キッカーでストレージビームが振動させられるため素粒子検出器への BG が非常に多い。この現象に対応して、データ検出システムを守るために、入射のタイミングにはデータをとらない時間 (duration time) を設けている。現在 LER で問題になっているのは、この duration time が非常に長く、積分ルミノシティを貯める際の障害になっていることである。垂直方向チューンをスキャンしていったときの duration time と垂直方向チューンの関係についての観測結果を Fig. 12 に示す。Figure 12 は、横軸に時間 (msec) を、縦軸にヒットレートをとったものである。水平-垂直方向の共鳴線の付近 (Fig. 3 の①の線) で、duration time が 2.1 msec から 12.2 msec へ長くなるのが観測された。この水平-垂直方向の共鳴線の影響は、水平方向の入射振動が、垂直にまわりこみ、垂直方向のアーチャーが小さい QC1 付近でロスを引き起こすことが原因だと推察される。

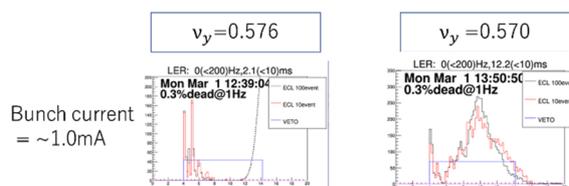


Figure 12: The duration time change during LER vertical tune scan.

7. 衝突時のビームサイズ増大の原因

衝突状態で、高いバンチ電流のスタディを行った。測定時の最初の条件は、バンチ数は 393、LER の v_y と ξ_y は 0.590 と 1.4 である。LER バンチ電流が 0.9 mA、HER バンチ電流が 0.72 mA のときに、LER の ξ_y を +2 したり、垂直方向 FB gain を +12 db するなどを行ったが、LER 垂直方向ビームサイズとルミノシティに劇的な変化は起きなかった。

次に、LER のバンチ電流を 0.9 mA に固定して、HER のバンチ電流を変化させたときの、スペシフィックルミノシティと垂直方向ビームサイズを、Fig. 13 に示す。Figure 13 から、HER のバンチ電流を 0.72 mA から下げていくと、スペシフィックルミノシティ (緑色) が上がり 0.6 mA あたりでピークをむかえていることがわかり、LER 垂直方向ビームサイズ (赤色) は、徐々に減少していき、HER 垂直方向ビームサイズ (青色) は徐々に増加しているのがわかる。ここから、衝突時の LER の垂直方向ビーム増大は beam-beam の影響であることがわかった。この現象を避けるためには、シミュレーションでは、LER の v_y を 0.570 付近で運転する必要があることがわかってきている。現在は、LER の v_y を 0.570 付近は 4 節で示したように、LER のバンチ電流が 0.9 mA 以上では、インピーダンスの問題でビームサイズ増大が観測されている。したがって、これ以上の高いバンチ電流での運転を行うためには、コリメータからのインピーダンスの影響を下げる努力を行うことと、 ξ_y や垂直方向 FB gain を調整する 2通りの対策が現在考えられる。

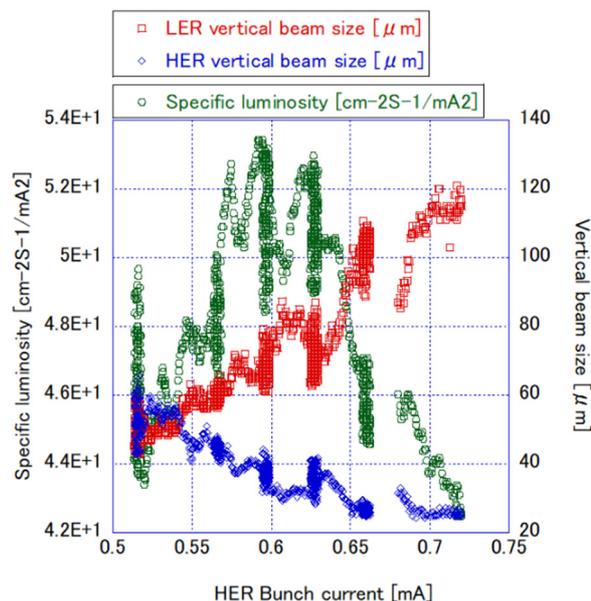


Figure 13: The result of high bunch study during collision situation.

8. 結論

主な観測結果の結論を以下である

- LER の v_y シフトは、バンチ電流が低いときは β_y^* によらず垂直方向コリメータのみを考慮した場合の理論式と、ほぼ一致している。
- コリメータのギャップを狭めていき、インピーダンスの影響を大きくしたとき、同じバンチ電流でも垂直方向ビームサイズの増大が観測された。
- ξ_y を変化させると垂直方向 FB gain を上げることで、垂直方向ビームサイズ増大の閾値が変化することを観測した。
- Duration time は、共鳴線の影響を大きく受けるということを観測した。
- LER の v_y と ξ_y は 0.590 と 1.4 の条件での衝突時の測定では、beam-beam の影響での垂直方向ビームサイズ増大が支配的であることがわかった。

謝辞

SuperKEKB 加速器の方々や、Belle II 検出器の方々のお力添えがありました。感謝します。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Accelerator design at SuperKEKB. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013(3), 2013.
- [2] Y. Ohnishi, "Highlights from SuperKEKB commissioning for early stage of nano-beam scheme and crab waist scheme", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 909-914.
- [3] T. Ieiri *et al.*, "Measurement of wake effects by means of tune shift in KEKB low-energy ring", Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland. 2101-2103.
- [4] T. Konno *et al.*, "The Slow Control and Data Quality

- Monitoring System for the Belle II Experiment”, IEEE Transactions on Nuclear Science Volume: 62 Issue: 3; <https://ieeexplore.ieee.org/document/7102790/references#references>
- [5] T. Ishibashi *et al.*, “Movable collimator system for SuperKEKB”, PRAB 23, 053501 (2020).
 - [6] S. Terui *et al.*, “Development of low-Z collimator for SuperKEKB”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 197-201.
 - [7] A. Chao *et al.*, “Handbook of Accelerator Physics and Engineering”, pp. 136.
 - [8] M. Shirakata, “Beam Intensity Upgrade and Chromaticity”, 「加速器」Vol. 1, No. 3, 2004 (211–215).
 - [9] V. Smaluk *et al.*, “Combined effect of chromaticity and feedback on transverse head-tail instability”, PRAB 24, 054401 (2021).
 - [10] T. Nakamura, “Beam instability and cure”, 2016-11-26 ビーム物理研究会 若手の会 ; http://accweb.spring8.or.jp/%7Enakamura/papers/BeamPhysics2016/BeamInstabilities_BeamPhysics16_trans_by_Shin.pdf