

SuperKEKB 低電力高周波制御における運動量アクセプタンス評価のための 加速位相変調機能の導入

IMPLEMENTATION OF ACCELERATION PHASE MODULATION FUNCTION FOR EVALUATION OF MOMENTUM ACCEPTANCE IN SuperKEKB LLRF CONTROL

小林鉄也*, 赤井和憲, 大西幸喜, 小笠原舜斗, 岡田貴文, 梶裕志, 西脇みちる, 山口孝明

Tetsuya Kobayashi*, Kazunori Akai, Yuki Yoshi Ohnishi, Shunto Ogasawara, Takafumi Okada, Hiroshi Kaji,
Michiru Nishiwaki, Takaaki Yamaguchi
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

For the SuperKEKB commissioning, in order to evaluate momentum acceptance of the accelerator rings, new function, which forces phase modulation in acceleration field, was implemented into the zero-mode damper (ZMD) of the LLRF control system. The ZMD, which has been applied since the KEKB operation, is a kind of feedback control to suppress longitudinal coherent bunch oscillation. By utilizing the ZMD, this new function modulates RF phase forcibly at synchrotron oscillation frequency for acceleration cavities: it gives longitudinal kicks to bunches and makes growth of the synchrotron oscillation; accordingly, the momentum acceptance can be observed with dispersion property of the beam orbit. The timing of the phase modulation is synchronized with the turn-by-turn beam position monitor to observe the beam orbit at a dispersion point. In the spring operation this year, it was demonstrated that this new function was quite useful as a method to evaluate momentum acceptance easily and directly. This method is also expected to be applied frequently in the future commissioning for optics evaluation. This paper gives details of the new function for the RF phase modulation. Additionally, the bunch motion due to forced longitudinal oscillation by RF phase kick is discussed with comparison between analytical calculation and observation.

1. はじめに

SuperKEKB は電子陽電子非対称衝突型円形加速器で、世界初となる衝突方式（ナノビーム・スキーム）を採用し、前身である KEKB 加速器が達成した当時世界最高ルミノシティを更に 10 倍以上にすることを目指している [1]。2018 年から衝突実験が始まり、以来、性能向上が続けられ、2022 年にはルミノシティが KEKB の 2 倍を大きく超えて世界最高記録を更新した [2]。その後 1 年以上の長期シャットダウンがあり、衝突点周辺など様々な改善やアップグレードが行われ、今年ビーム運転が再開された。

本件は低電力高周波加速制御（LLRF 制御）システムに関する報告であり、運動量アクセプタンスを評価するために今年の運転（RUN2024ab）で新たに導入された機能について紹介する。

SuperKEKB の LLRF 制御システムでは、コヒーレントな縦方向バンチ振動（ゼロモード）を抑制するためにゼロモードダンパー（ZMD）が KEKB から引き継がれ運用されている。ZMD はビーム pickup 信号をモニターし、RF 基準信号（全空洞の加速位相）に変調を与えることでバンチ振動を抑える一種の縦方向フィードバック（FB）系である。このシステムを利用して、任意のタイミングで（本件ではビームモニターと同期して）強制的に加速位相を変調する機能を新たに導入した。この位相変調をシンクトロン振動周波数（ f_s ）に合わせることで縦方向（エネルギー）振動が増大され、軌道の分散特性から運動量アクセプタンスが測定・評価される。これまで SuperKEKB では直接的に運動量ア

クセプタンスを測定する手段がなかったが、本機能によって容易に測定・評価できるようになり、リングの光学系を評価する手段の一つとして非常に有効であることが確認された。我々の間では本機能は単純に“RF Kick”と呼ばれており、本稿でもこの呼称を使用する。

本稿では、上記 ZMD および RF Kick について紹介した上で、加速位相の変調を続けた時のバンチ振動の応答特性について解析（測定結果と比較）する。なお、運動量アクセプタンス（リング光学系、衝突性能）の評価に関する議論は本件には含まれない。

2. RF システム概要

まず SuperKEKB および RF システムの構成を簡単に紹介する。SuperKEKB 加速器は電子陽電子非対称衝突型円形加速器であり、メインリング（MR）は 7GeV 電子リング（High Energy Ring, HER）と 4GeV 陽電子リング（Low Energy Ring, LER）とで構成される。SuperKEKB リングと現在の RF システムの構成を Fig. 1 に示す。デザイン蓄積ビーム電流値は HER, LER それぞれ 2.6A, 3.6A であり、今後更なる増強が必要となる [3]。

現在、MR は両リング併せて全 38 台の加速空洞があり、約 30 式の RF（クライストロン）ステーションで構成される。RF 周波数は 508.9MHz で、空洞を含む多くの装置が KEKB の RF システム [4, 5] の再利用となる。加速空洞は常伝導空洞と超伝導空洞（SCC）[6] の 2 種類があり、常伝導空洞は ARES 空洞と呼ばれるためのユニークな構造を持つ [7, 8]。これらは各リングそれぞれ 3ヶ所ある加速セクション（直線部）に配置され、HER は ARES 空洞と SCC を併用し、LER は ARES 空洞のみとなる。

LLRF 制御システムについては、近年のデジタル技術

* tetsuya.kobayashi@kek.jp

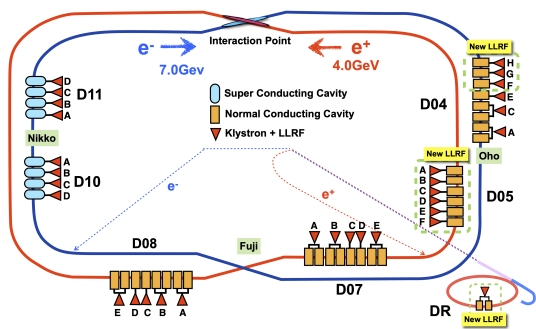


Figure 1: RF system arrangement in SuperKEKB rings at present state.

(FPAG) を用いた高精度な制御システム [9] が導入されているが、デジタル系の適用は全体の約 1/3 のステーション (ARES 空洞用) だけであり、SCC を含む残りのステーションおよび ZMD 系では KEKB から引き続きアナログ方式の制御システムで運転されている。その他の詳細 (運転パラメータおよび運転状況など) は過去の報告 (文献 [10] 等) を参照のこと。

3. RF KICK と運動量アクセプタンス測定

今年、長期シャットダウン (アップグレード) からの再開にあたり、運動量アクセプタンスを評価したい、という要望があった。これまで運動量アクセプタンスは直接的に評価されていなかったため、ビームを縦方向に強制的に振る (エネルギー変調を与える) ことで直接的にビームが削られる境界を見たい、というものである。そこで、LLRF 制御システムですでに運用されているゼロモードダンパー (ZMD) を利用して、加速位相に強制的な変調を与えることを試みた。その結果、期待通り運動量アクセプタンスを容易に評価できることが分かった。今回行ったことは割と単純ではあるが、リング光学系の評価に非常に有効であることが確認されたので、これについて紹介する。

3.1 ゼロモードダンパー

ZMD を含む LLRF 制御システムのブロック図を Fig. 2 に示す。ここでは後述する強制的な位相変調機能も図示している。図の緑色枠の中は、加速空洞電圧を制御する FB ループを表す (D11A ステーションを代表として示している)。RF 基準信号は中央制御室から各ステーションに分配されて、その経路において加速セクション毎に移相器が挿入されている。青色部分が ZMD 系を表し、各リングにおいてビーム pickup 信号をモニターし、コヒーレントなバンチ振動 (ゼロモード振動) を抑制するように RF 基準信号の移相器 (加速位相) に変調をかける FB 系である。図では HER の例を示し、現在は D10, D11 の 2ヶ所の加速セクション (SCC 区間=リング全加速電圧の約 83%) に適用している。LER も同様で、D7, D8 の加速セクション (全加速電圧の約 71%) に適用している。

なお本題から少し逸れるが、SuperKEKB のように蓄積ビーム電流が非常に大きい場合、ビームのコヒーレント振動によりシンクロトロン振動の復元力 (位相安

定性の原理) が失われ、いわゆる static Robison 不安定が大きな問題になることが知られている。この不安定性の抑制にも ZMD が重要な役割を果たすと期待されている [11]。

3.2 強制加速位相変調: RF Kick

ここから本題となる。今回行ったのは Fig. 2 に示すように、単純に任意波形発生器 (Arbitrary Waveform Generator: AWG) を用いて ZMD 制御に変調信号を合成できるように変更したことである。アクセプタンスを評価する時はシングルバンチのみで行うため、ZMD は機能せず (ビーム電流が ZMD が働く閾値より低く)、AWG による強制変調だけとなる (将来的にはリモートで両者を切替可能にする予定)。ここで重要なのが、強制振動させた時の分散軌道を測定するために、Turn-by-Turn ビーム位置モニター (TxT BPM) [12, 13] とタイミングを同期させることである。そのため AWG はイベントシステムにより TxT BPM と同期した信号に従って変調信号を出力する。ここで、変調の継続時間も重要なパラメータのひとつで、この時間幅もイベントシステムにより任意に変更できるようゲート信号として受け取っている。これらタイミング同期 (ゲート信号) のための信号配線を ZMD に新たに追加した。実際の測定の際はアクセプタンス領域を観測しやすいように、振動の成長率に応じて変調の継続時間を調整する。また後述するスタディにおいては、位相変調の継続時間を長くしてビーム応答を観測し解析を行っている。

また他に重要なパラメータとして、AWG 出力信号、すなわち強制変調の周波数 (f_m) と波形振幅 (変調の大きさ) がある。基本的に周波数はシンクロトロン振動周波数 ($f_m = f_s$) とし、位相変調振幅はビームロスが発生するまで徐々に大きくしていく。これらパラメータは EPICS によりリモート制御される。また図には示し

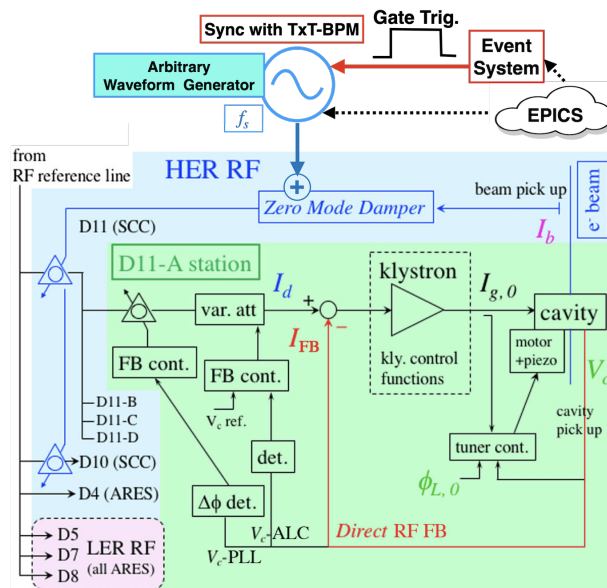


Figure 2: Functional block diagram of the LLRF control system of SuperKEKB including the zero-mode damper with function of forcing acc.-phase modulation.

ていないが、RF 基準信号の移相器を制御する信号をオシロで（リモートで）モニターできるようにしている。

3.3 運動量アクセプタンス測定

RF Kick (ZMD 系) において RF 基準信号の移相器を制御する信号波形の例を Fig. 3 に示す。黄色が移相器への制御信号で、紫色が変調時間幅のゲート信号である。位相変調の周波数は f_s (LER: 2.36kHz, HER: 2.73kHz) として、約 4.2ms 間 (約 420 ターン) 継続して変調を与えている (周回周期が約 $10\mu s$)。この例では変調振幅が約 200mV(pk-pk) で、位相にして約 4° (pk-pk) に相当する。変調の中心 (ベースバンド) が少し歪んでいるのは、過渡的な信号に対して、ZMD 系の構成装置 (図に詳細はないがループフィルター等も含まれる) の特性であると考えられる (長く続けば一定になる)。

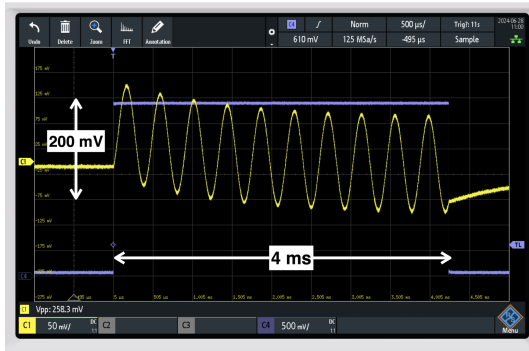


Figure 3: Waveform of control signal for the phase shifter of the RF reference for the RF kick (yellow), and the gate signal (purple) for the RF-kick duration.

次に、上記の RF 位相変調に対して、ビーム (シングルバンチ) の応答を TxT BPM で測定した結果を Fig. 4 に示す。これは LER の例で、図の左側は、横軸はトリガからのターン数で、上から水平方向の位置 (エネルギー分散による軌道変化)、垂直方向の位置、電荷量である。右側は TxT BPM データの FFT 結果 (データ長は 4000 ターン) で、一番下がシンクロトロン振動数 (ν_s) を表す。位相変調の周波数が f_s からずれると、この FFT のピークに 2 つの山 (f_m と f_s) が現れるので、ひとつのピーク ($f_m = f_s$) になるように AWG 出力の周波数を調整している。

Figure 4 に示すような結果から、電荷量が減り始める時のビーム位置 (x) と分散の値 (η_x) を考慮して、運動

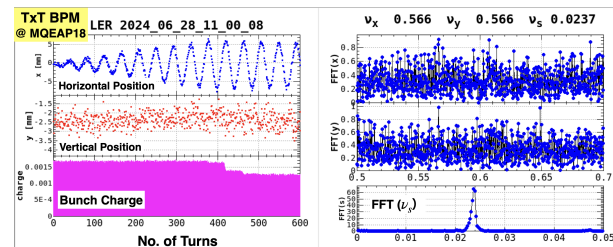


Figure 4: An example of the beam response results to the RF phase modulation (RF kick) measured by TxT BPM in LER.

量アクセプタンス ($\Delta p/p_0$) を評価する。この LER の例では $x = 6.3$ mm, $\eta_x = 0.684$ m から、 $\Delta p/p_0 = 0.92\%$ ($12.4\sigma_\delta$) と評価される (σ_δ はバンチの運動量拡がり)。こうした測定を光学系 (特に衝突点の β 関数など) を変えた時に何度か評価され、両リングとも概ねデザイン通りの結果が得られている。ただしアクセプタンスに関する議論は本稿の主題ではないので他の報告に譲る。

ちなみに、 $\Delta p/p_0 = 1\%$ は、momentum compaction factor から RF 位相変化にすると、HER が 8.4° 、LER が 5.9° に相当する。

以上のように、本 RF Kick 機能により、容易に運動量アクセプタンスが評価できることが確認でき、非常に有用であることが分かった。今後も光学系の調整の際に、これを利用して即座に測定でることが期待される。

4. RF KICK に対するビームの応答

この章では、RF Kick のように加速位相に変調 (縦方向の強制振動) を与えた時のビーム応答について、解析的な計算式を用いて議論する。

4.1 ビーム応答の定式化

加速電圧の位相変調により励振されるシンクロトロン振動について考えると、運動方程式は

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_{rf}\alpha_c\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{eV_c [(1-k)\cos(\phi + \phi_s) + k\cos(\phi + \phi_m(t) + \phi_s)]}{E_0 T_0} - \frac{U'_0}{T_0}\epsilon \quad (2)$$

と書ける。ここで、 ϕ は同期位相 $\phi_s = \arccos(U_0/(eV_c))$ から見たビームの位相、 $\epsilon = (E - E_0)/E_0$ は同期粒子のエネルギー E_0 からの相対的ずれ、 T_0 はリングの周回周波数、 ω_{rf} は RF 角周波数、 α_c は momentum compaction factor、 $\phi_m(t)$ は RF 位相変調を表す。全加速電圧 V_c のうち、 kV_c ($0 < k \leq 1$) に位相変調がかかるとしている (上記の通り、LER, HER それぞれ $k = 0.71, 0.83$)。また、1 周当たりのエネルギー損失 $U(E)$ は、

$$U(E) \approx U_0 + U'_0 E_0 \epsilon \quad (3)$$

$$U_0 = U(E_0), \quad U'_0 = \left. \frac{dU}{dE} \right|_{E=E_0} \quad (4)$$

と線形近似している。更に Eq. (2) の右辺において、

$$(1-k)\cos(\phi + \phi_s) + k\cos(\phi + \phi_m + \phi_s) \approx \cos\phi_s - \phi\sin\phi_s - (k\sin\phi_s)\phi_m \quad (5)$$

と近似すると、 ϕ に関する微分方程式

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + 2\alpha_s \frac{d\phi}{dt} + \omega_{s0}^2 \phi = -k\omega_{s0}^2 \phi_m, \quad \omega_{s0} = \sqrt{eV_c \alpha_c \omega_{rf} \sin\phi_s / (E_0 T_0)} \quad (6)$$

が得られる。ここで、 ω_{s0} は incoherent synchrotron 角振動数 ($= 2\pi f_s$)、 $\alpha_s = U'_0 / (2T_0)$ は進行方向の放射減衰率である。

次に、ビーム位相 ϕ に対して Delta 関数型の位相変調を与えた場合の応答関数 (インパルス応答) $G(t)$ を求める。Equation (6) から、微分方程式

$$\frac{d^2 G}{dt^2} + 2\alpha_s \frac{dG}{dt} + \omega_{s0}^2 G = -k\omega_{s0}^2 \delta(t) \quad (7)$$

において、 $G(t)$ の Fourier 変換を

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t)e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

と置くと、周波数応答関数

$$g(\omega) = \frac{-k\omega_{s0}^2}{\omega_{s0}^2 - \omega^2 + 2j\alpha_s\omega} \quad (9)$$

が得られる。この Fourier 逆変換が $G(t)$ なので

$$G(t) = -k\omega_{s0}^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega t}}{\omega_{s0}^2 - \omega^2 + 2j\alpha_s\omega} d\omega \\ = -\frac{k\omega_{s0}^2}{\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}} e^{-\alpha_s t} \sin\left(\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2} t\right) H(t) \quad (10)$$

となる。ここで、 $H(t)$ は Heaviside の step 関数

$$H(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \frac{1}{2} & (t = 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases} \quad (11)$$

である。応答関数 $G(t)$ を用いると、任意の位相変調 $\phi_m(t)$ に対する ϕ の過渡的応答は

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t-t')\phi_m(t')dt' \quad (12)$$

で求められる。

ここで、実際の測定を考慮し、次のような sin 関数型の位相変調を考える。

$$\phi_m(t') = A_m \sin(\omega_m t') H(t') H(t_0 - t') \quad (13)$$

ここで、 A_m は位相変調の振幅、 ω_m は変調周波数 ($= 2\pi f_m$) である。また、位相変調は $0 < t < t_0$ の時間だけ継続したとし、 $t < 0$ では $\phi(t) = 0$ とする。このとき $\phi(t)$ は

$$\phi(t) = -\frac{k\omega_{s0}^2}{\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}} A_m e^{-\alpha_s t} \\ \times \int_0^t e^{\alpha_s t'} \sin\left(\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}(t-t')\right) \sin \omega_m t' H(t_0 - t') dt' \quad (14)$$

となる。この積分を実行すると、

$$\phi(t) = \frac{k\omega_{s0}^2}{2\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}} A_m \\ \times \left\{ \text{Re} \left[\frac{e^{j\omega_m t} H(t_0 - t) - e^{-\alpha_s t + j\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2} t}}{\alpha_s + j(\omega_m - \sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2})} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{e^{j\omega_m t} H(t_0 - t) - e^{-\alpha_s t - j\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2} t}}{\alpha_s + j(\omega_m + \sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2})} \right] \right. \\ \left. + \text{Re} \left[\frac{e^{-\alpha_s(t-t_0) + j\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}(t-t_0) + j\omega_m t_0}}{\alpha_s + j(\omega_m - \sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2})} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{e^{-\alpha_s(t-t_0) - j\sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2}(t-t_0) + j\omega_m t_0}}{\alpha_s + j(\omega_m + \sqrt{\omega_{s0}^2 - \alpha_s^2})} \right] \right\} H(t - t_0) \quad (15)$$

が得られる。

4.2 ビーム応答評価：測定と計算との比較

Section 3.3 で述べたような RF Kick に対するビームの応答について、上記の計算式 (Eq. (15)) と測定データとを比較 (fitting による条件の再現性を確認) した。その例を LER に絞って紹介する。ただし、ここでは位相変調幅は小さく、ビームロスが起きない場合とする。

まず、位相変調の継続時間を約 4.2ms (約 420 ターン) として、その後の減衰を観測した場合の例を Fig. 5 に示す。図は横軸をトリガからのターン数として、運動量偏差の測定値 (青) および計算式による fitting (橙) をプロットしている。測定値は TxT BPM のデータ (ビームの水平位置) から分散値 η_x を用いて $\Delta p/p_0$ とした。fitting は $\Delta p/p_0 \approx \epsilon$ とし、Eq. (1) に従い Eq. (15) を時間微分した $\epsilon(t) = 1/(\alpha_c \omega_{rf}) \cdot d\phi/dt$ の計算式で行っている。また各パラメータの fitting 結果も図中に示す。

Figure 5 において、変調を継続している間 (約 420 ターンまで) は振動が増大し、その後は減衰しているのが分かる。この増大率/減衰率は放射減衰率 α_s に依存し、fitting によりデザイン値 (約 22.8ms) に近い値が得られている。周波数も実際の AWG による変調周波数 2.36kHz と誤差の範囲で合っているとも言えるが、 ω_{s0} と ω_m で若干のずれがあり、これらは fitting において正確に区別されない可能性がある (別途要議論)。その他、位相変調振幅については、この時、約 0.85° の振幅で移相器に変調を与えており、fitting 結果は $kA_m = 1.13 \times 10^{-2} \text{ rad} \approx 0.65^\circ$ (LER は $k = 0.71$ なので $A_m \approx 0.91^\circ$) と誤差の範囲で合っていると言える。

一方、より変調振幅を大きくしていくと (1.3° 以上では) 非線形性 (fitting が合わなくなる傾向) が表れる。本来シンクロトロン振動は非線形振動であるので、大振幅により線形近似から外れる可能性はあるが、この数°の振幅でそうなるかどうか今後、詳細を検討する。

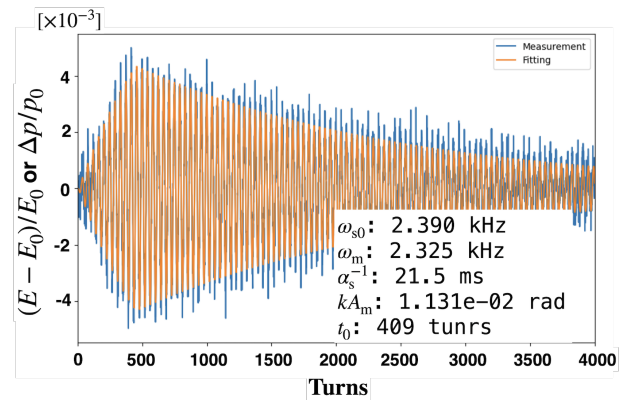


Figure 5: Fitting of analytic calculation with TxT BPM data of the RF kick response in LER for the case of 420-turn duration of phase modulation.

次に、位相変調を 4000 ターン以上継続させた場合について、2つの例をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

前者については、変調周波数が上述と同じ場合 (2.36kHz) で、このようにアクセプタンス範囲内で変調が継続されると、放射減衰と均衡するまで増大し、いずれ定常状態になる (Eq. (15) において $\omega_{s0} = \omega_m$ で

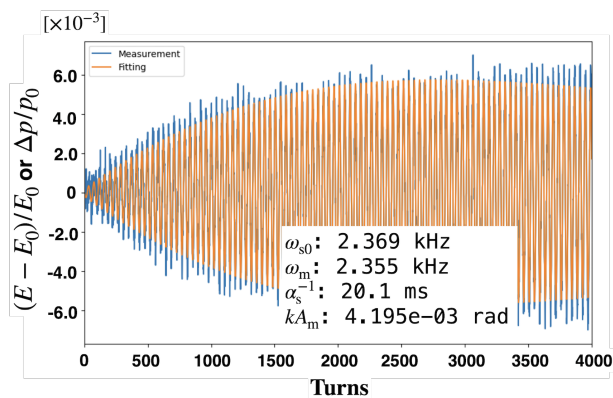


Figure 6: The case of keeping phase modulation during over 4000 turns for the RF kick response analysis like Fig. 5.

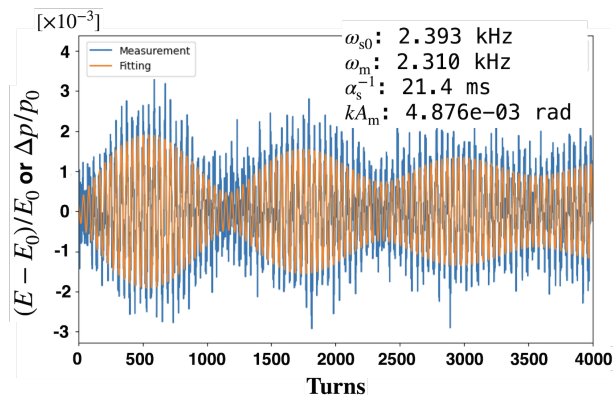


Figure 7: Same case of Fig. 6, but the phase modulation frequency was shifted by -50 kHz.

$H(t - t_0) = 0$ の場合)。

一方、後者 (Fig. 7) は変調周波数を -50Hz ずらして 2.31kHz とした場合である。この時の TxT BPM データの FFT では、Fig. 8 に示すようにピークが 2 山に見える。この場合、 f_m と f_s の周波数差でうねりが生じている (Fig. 6 でも長い周期でうねりがありそう)。うねりの周期は約 1.2ms で fitting 結果の ω_{s0} と ω_m 差と一致する。また ω_m は実際の変調周波数とも一致している。

ここで、Fig. 5, 6, 7 の fitting 結果において、Fig. 6 の場合だけ ω_{s0} が他の 2 例より 20Hz ほど低い (理由は不明)。ただし (図は省略するが) FFT のピークはシャープに見えて変調周波数とも一致している。うねりの周期からは、いずれも正しい (場合によって ω_{s0} がわずかにズレる?) とも考えられる。誤差の範囲かもしれないが、今後の解析の課題とする。

一方、位相変調の振幅 (A_m) については、Fig. 5 の場合と同様に、Fig. 6, 7 の fitting 結果は実際の変調振幅 (約 0.35°) とほぼ一致する。このように、この計算式から実際の測定結果を良く再現 (実際の条件パラメータを抽出) できると言える。

5. まとめ

SuperKEKB の LLRF 制御システムでは今年新たに、運動量アクセプタンスを直接的に評価するため、ゼロ

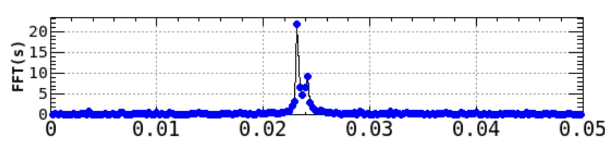


Figure 8: FFT of TxT BPM data for the case of Fig. 7.

モードダンパーを利用して強制的に加速位相を変調する (縦方向に振動させる = RF Kick) 機能を導入した。本機能によって容易に運動量アクセプタンスが測定・評価できるようになり、リング光学系の評価手段の一つとして非常に有効であることが確認された。今後も光学系の調整の際にいつでも即座に本機能を活用できることが期待される。

また、強制的な加速位相の変調に対するビームの応答について、解析的に求めた計算式は、実際の様々なパラメータ条件で Turn-by-Turn BPM の測定データをわりと良く再現する (fitting で実際のパラメータを抽出できる) ことが確認できた。こうした手法は、将来ビーム不安定性などの問題が発生した際の現象の理解に有効になる可能性がある。

参考文献

- [1] <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] https://www-linac.kek.jp/skekb/status/web/2022ab_history.png
- [3] K. Akai *et al.*, “Issues for SuperKEKB RF System for Future Beam Current Increases”, in this annual meeting, WEP075, 2024.
- [4] K. Akai *et al.*, “RF systems for the KEK B-Factor”, Nucl. Instrum. Meth. A 499, 2003, pp. 45-65.
- [5] T. Abe *et al.*, “Performance and operation results of the RF systems at the KEK B-Factor”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A006.
- [6] T. Furuya *et al.*, “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-factor”, Proceedings of SRF1995, CEA-Saclay, France, 1995, p. 729.
- [7] Y. Yamazaki and T. Kageyama, “A Three-Cavity System which Suppresses the Coupled-Bunch Instability Associated with the Accelerating Mode”, Part. Accel., 44, 107, 1994.
- [8] T. Kageyama *et al.*, “The ARES cavity for KEKB”, Conf. Proc. of APAC98, 1998, pp. 773-775.
- [9] T. Kobayashi *et al.*, “Development and Construction Status of New LLRF Control System for SuperKEKB”, Proc. of IPAC2014, WEPME071, 2014, pp. 2444-2446.
- [10] T. Kobayashi *et al.*, “Operation Status of LLRF Control System in SuperKEKB”, Proc. of PASJ2021, TUP044, pp. 541-545.
- [11] K. Akai, “Stability analysis of rf accelerating mode with feedback loops under heavy beam loading in SuperKEKB”, Phys. Rev. Accel. Beams 25, 102002 (2022).
- [12] M. Tobiyama *et al.*, “Beam Commissioning of SuperKEKB Ring at Phase 1”, Proc. of IBIC2016, MOAL03, 2016, pp. 6-10.
- [13] M. Tobiyama *et al.*, “Development of Gated Turn-by-Turn Position Monitor System for the Optics Measurement During Collision of SuperKEKB”, Proc. of IBIC2013, MOPF32, 2013, pp. 295-298.