

PF 2.5 GeV リングにおけるコヒーレント・シンクロトン振動数の再測定 UPDATED MEASUREMENT OF COHERENT SYNCHROTRON FREQUENCIES AT THE PHOTON FACTORY 2.5-GeV RING

坂中章悟[#], 山口孝明, 山本尚人

Shogo Sakanaka [#], Takaaki Yamaguchi, Naoto Yamamoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Previous measurements of longitudinal coherent frequencies at the KEK Photon Factory 2.5 GeV ring have revealed very interesting phenomena. The measured coherent frequencies disagreed with theoretical values, and unexpected oscillation modes appeared. We continue to study this phenomenon experimentally and theoretically. Because the low-level RF system of the PF ring is to be upgraded in the summer of 2023, we re-measured the coherent frequencies before the upgrade. The data obtained from the re-measurement were almost consistent with the results of the previous measurements.

1. はじめに

円形加速器において、周回するビームのバンチが縦方向(ビームの進行方向)に一齐に動く振動を(バンチ結合モード 0 の)コヒーレント・シンクロトン振動、または縦方向コヒーレント振動と呼ぶ。縦方向コヒーレント振動の振動数は、加速空洞に対するビーム負荷の状態に応じて変化する。このため、ビーム強度を変えた場合、または空洞電圧(加速電圧)を変えた場合に、コヒーレント振動数は一般に変化する。円形加速器においては、空洞電圧を一定のままビーム強度を増してゆくとビームが安定に加速出来なくなる現象が知られており、static Robinson instability[1]と呼ばれている。上記のコヒーレント振動数の変化は、この static Robinson instability と密接に関係している。

円形加速器にビームバンチが一様に分布していると仮定し、ビームと加速空洞との相互作用だけを考慮した理論モデルでは、ビームの縦方向コヒーレント振動数は4次の特性方程式の解で与えられる[1-4]。この特性方程式からは、一般に2つの振動モード($j\Omega$ が互いに複素共役である解が2組)が現れる。2つの振動モードのうち、ビーム電流が低い時にインコヒーレントなシンクロトン振動数に一致するモードを beam Robinson モード、空洞のデチューニング周波数に一致する振動モードを cavity Robinson モードと呼ぶ[3]。

KEK の光子・ファクトリー2.5 GeV 電子蓄積リング(PF リング)において縦方向コヒーレント振動数を様々な条件で測定したところ、非常に興味深い現象が見つかった[4]。測定されたデータの例を Fig. 1 に示す。この測定では、PFリングに一定のビーム電流(350 mA)を蓄積し、空洞電圧を変えてコヒーレント振動数を測定した。Figure 1 の上の段は振動数を、下の段は応答曲線の幅から求めた振動の減衰率を示す。グラフ中の実線は、4次の特性方程式を用いて計算した beam Robinson モードの振動数と減衰率を示す。グラフの中で黒丸の記号が beam Robinson モードに対する測定結果を示す。

[#] shogo.sakanaka@kek.jp

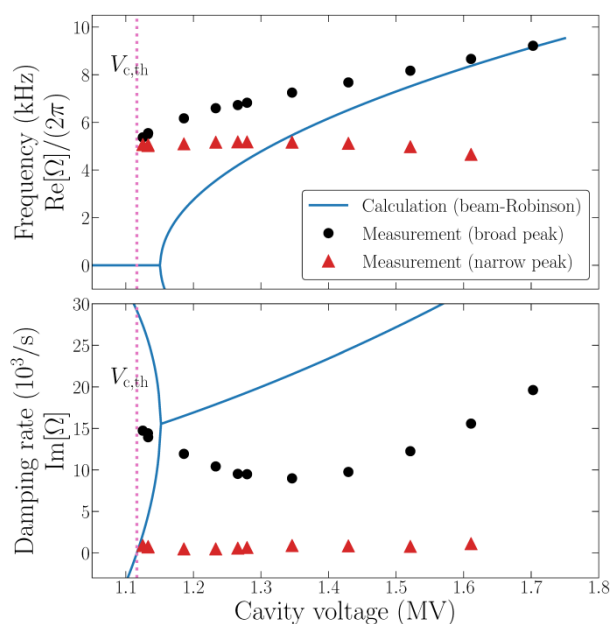


Figure 1: Measured coherent frequency and damping rate as the functions of the cavity voltage [4] at the PF storage ring. The beam current was 350 mA.

理論的な計算(実線)によれば、空洞電圧を下げた場合にコヒーレント振動数は急激に低下し、空洞電圧が約 1.15 MV の時に振動数がゼロになるはずである。さらに空洞電圧を約 1.11 MV まで下げると static Robinson instability によりビームが不安定になる。これに対し、黒丸記号で示した測定値では、空洞電圧を 1.13 MV まで下げてもコヒーレント振動数は約 5 kHz までしか低下せず、理論値と大きくずれていた。この測定では、もう一つ奇妙な現象が観測された。RF 位相変調に対するビーム信号の応答曲線において、理論的に予測されていない鋭いピークが出現し、空洞電圧を下げるに従ってそのピークの強度が上がっていったのである。Figure 1 で赤色の三角記号が、その鋭いピークの振動数と減衰率を示す。このピークの振動数は空洞電圧によらずほぼ一定

で、約 5.2 kHz であった。

上記の現象は、少なくとも PF リングにおいては、コヒーレント振動に関する理論的な計算値が実験値と合わないことを示唆しており、ビーム物理学上の重要な問題を提起している。この現象を理解するためには、PF リングを含めた様々な加速器での追加検証、および理論的な研究が必要である。

ところで PF リングでは 2023 年夏にローレベル RF 系の更新を予定しており、この更新後には、コヒーレント振動数の測定を従来の方法(次節で説明)とは異なる方法で行うことになる。このローレベル系更新の直前にコヒーレント振動数のデータを取っておけば、更新後に取得するデータと比較検証することができる。そこで、ローレベル系更新前の 2023 年 5 月にコヒーレント振動数の再測定を行った。また文献[4]で発表したデータは 2019 年 5 月~2021 年 5 月に取得したものであり、今回の測定により、発表済みのデータの再現性も確認できる。

2. 縦方向コヒーレント振動数の測定

2.1 測定方法

測定方法を Fig. 2 に示す。トラッキング・ジェネレータ (TG) 付きスペクトラムアナライザ (Advantest U3872) を使用し、TG 出力から周波数 ($f_{rf} + f_{sw}$) の正弦波信号を出力した。ここで f_{rf} は RF 周波数、 f_{sw} は ± 50 kHz の範囲でスイープした周波数である。この信号を周波数 f_{sw} にダウンコンバートし、その信号を RF 位相変調用のフェーズシフターに入力し、4 系統ある RF ステーションの位相を変調した。位相シフト量は 0.22° peak-to-peak (p-p) に設定した。一方、ボタン電極 (BPM) からの信号をスペクトラムアナライザに入力し、RF 位相変調に対するビームの応答を測定することにより、励振されたビームの振動を検出した。

測定は 2023 年 5 月 25 日に実施した。測定時の PF リングの運転条件は、ビームエネルギー 2.5 GeV、RF 周波数 500.107917 MHz (固定)、偏向電磁石による放射損失 $U_{BM} = 399$ keV、挿入光源による放射損失 $U_{ID} = 33$ keV、ビームのフィルパターンは連続した 250 バンチ (残り 62 バケットは空)、高速バンチ毎フィードバックは水平、垂直、縦方向とも ON であった。また計算上の momentum compaction factor は 0.0066、縦方向 radiation damping rate は 260 s^{-1} 、harmonic number は 312、インコヒーレント

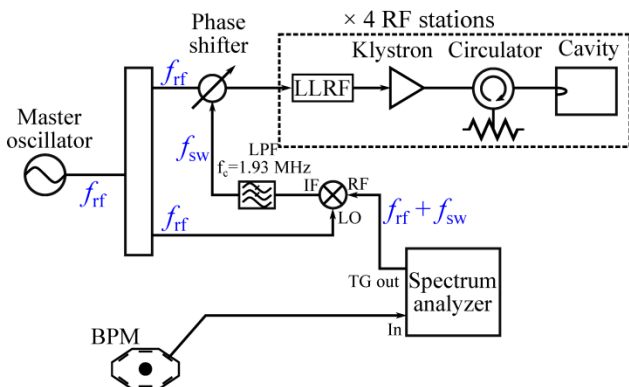


Figure 2: Setup for the measurement[4].

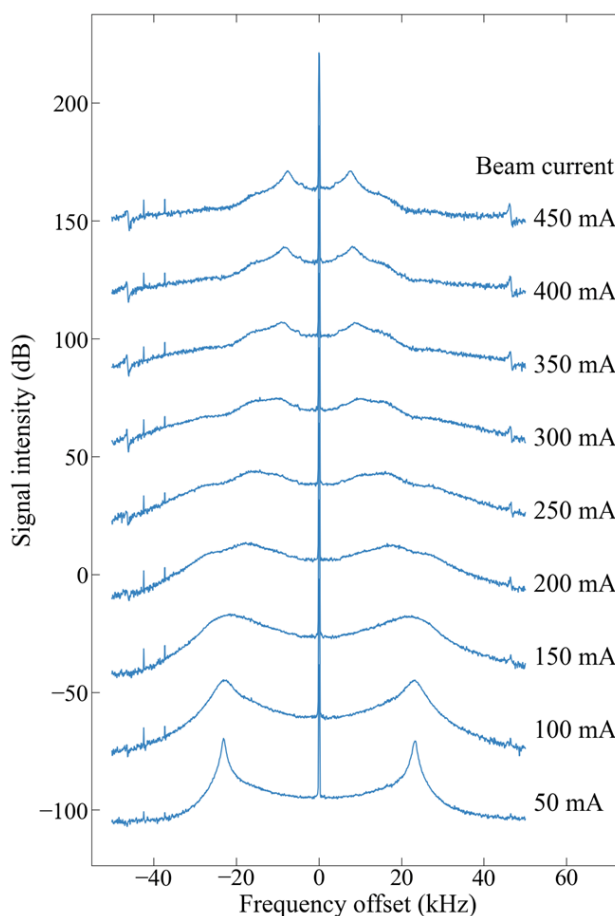


Figure 3: Measured beam responses under different beam currents. Total cavity voltage was fixed at approximately 1.65 MV. An offset of 30 dB was appended between neighboring traces. Measurement date: May 25, 2023.

なシンクロトロン振動数の計算値は 23.5 kHz (合計空洞電圧 $V_c = 1.7$ MV の場合) である。

2.2 ビーム電流を変えた場合の測定

空洞電圧 (空洞 4 台の合計 RF 電圧) を約 1.65 MV (正確には 1.651~1.664 MV の範囲内) でほぼ一定に保持し、ビーム電流をゼロから 450 mA まで積み上げながら、50 mA おきに縦方向コヒーレント振動数を測定した。スペクトラムアナライザの設定は、中心周波数 500.1079 MHz、周波数スパン 100 kHz、resolution bandwidth (RBW) 100 Hz、video bandwidth (VBW) 100 Hz、データ点数 1001 点、sweep time 20 sec とし、10 回のスイープをアベレーシングしてデータを取得した。

測定で得られた位相変調周波数 (横軸) に対するビーム信号の応答を Fig. 3 に示す。以前取得したデータ (文献[4], Fig. 10) と比較すると、以前のデータをほぼ再現している事がわかった。今回はアベレーシングを行った事で、ばらつきの少ないスムーズなデータが得られた。

Figure 3 では、中央のピーク (RF 周波数) に対し、ビームの振動を示す upper および lower サイドバンドがほぼ対称に現れているので、upper サイドバンドのみを解析した。Figure 3 のデータの縦軸をリニアスケールに直し、周波数 0.5 - 40 kHz のデータを取り出した。下限周波数

は RF 周波数のピークを除くため、上限は縦方向 quadrupole 振動(約 45 kHz)によるピークを除くために設定した。このデータを 1 つの振動子モデルを用いて次式でフィッティングした:

$$R_1(\omega) = \left| \frac{A_1}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2j\gamma_1\omega} + B_1 + jB_2 \right|. \quad (1)$$

このフィッティング結果から、角振動数 $\sqrt{\omega_1^2 - \gamma_1^2}$ と減衰率 γ_1 を求めた。このように求めたコヒーレント振動数と減衰率を Fig. 4 に示す。

Figure 4 で、丸印が今回の測定を、四角印が前回の測定結果(2019年5月の測定[4])を示す。コヒーレント振動数と減衰率ともに、大まかな傾向は前回の測定と合っているが、細かい点では差異が見られる。PF リングでは、ビーム電流 240 mA 付近で空洞のデチューニング周波数がインコヒーレントなシンクロトン振動数とほぼ一致する。このため、beam Robinson モードと cavity Robinson モードの結合が生じ、コヒーレント振動数が Fig. 4 の実線で示したような振る舞いをする。この付近では、実験的に測定した応答曲線(Fig. 3)において、2 つの振動モードが重なって観測されていると考えられる。上記の解析の際には、これを 1 つの振動子モデルでフィッティングしたため、フィッティングで求めた振動数は、理論的に予測される 2 つの振動数の中間付近に出ているものと考えられる。前回と今回の結果で差異が見られるのは、この 2 つの振動モードが重なっている領域である。この領域におけるより進んだ解析は第 3 節で議論する。

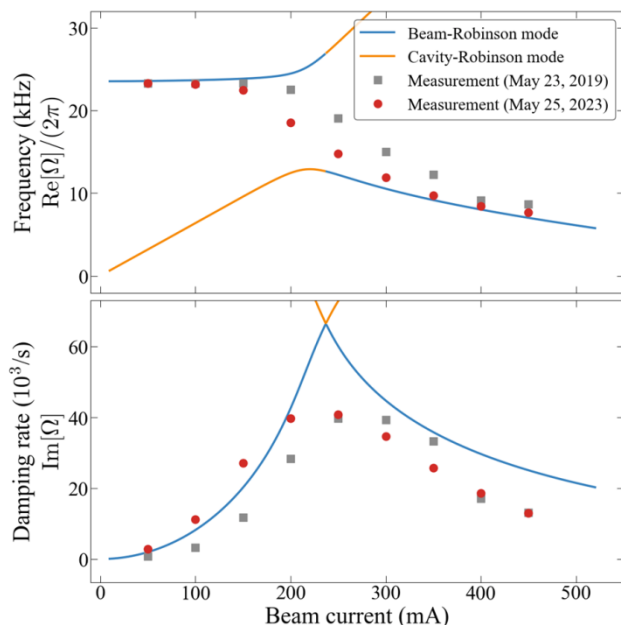


Figure 4: Coherent frequencies and damping rates as functions of the average beam current. The total cavity voltage was approximately 1.65 MV. Closed circles indicate the latest results whereas square symbols indicate the previous measurement[4]. Solid lines show the calculated values.

2.3 空洞電圧を変えた場合の測定

次に、トップアップ運転でビーム電流を一定(350 mA)

に保持しながら、空洞電圧を変え、コヒーレント振動数を測定した。測定結果を Fig. 5 に示す。スペクトラムアナライザの設定は 2.2 節の記述と同じである。Figure 5 では、空洞電圧 1.658 MV から 1.281 MV までの範囲に対し、ビームの位相変調に対する応答を示してある。ただし今回の測定では、空洞電圧を 1.312~1.281 MV まで下げた場合には強い縦方向ビーム不安定性が発生し、ビームが不安定であった。このため、この 2 点の空洞電圧に対する測定結果はビーム不安定性の影響を受けている可能性があり、参考データとすべきである。

Figure 5 に示されている通り、空洞電圧を 1.658 MV から下げてゆくと、幅の広いピーク (beam Robinson モードと考えられる) の振動数は下がってゆく。それと同時に、振動数が約 5 kHz の鋭いピークが現れ、空洞電圧を下げるほどその鋭いピークが高くなった。これは以前の測定(文献[4], Fig. 11)を再現する結果である。なお、周波数 45 kHz 付近に現れているピークは、縦方向 quadrupole 振動によるピークである。

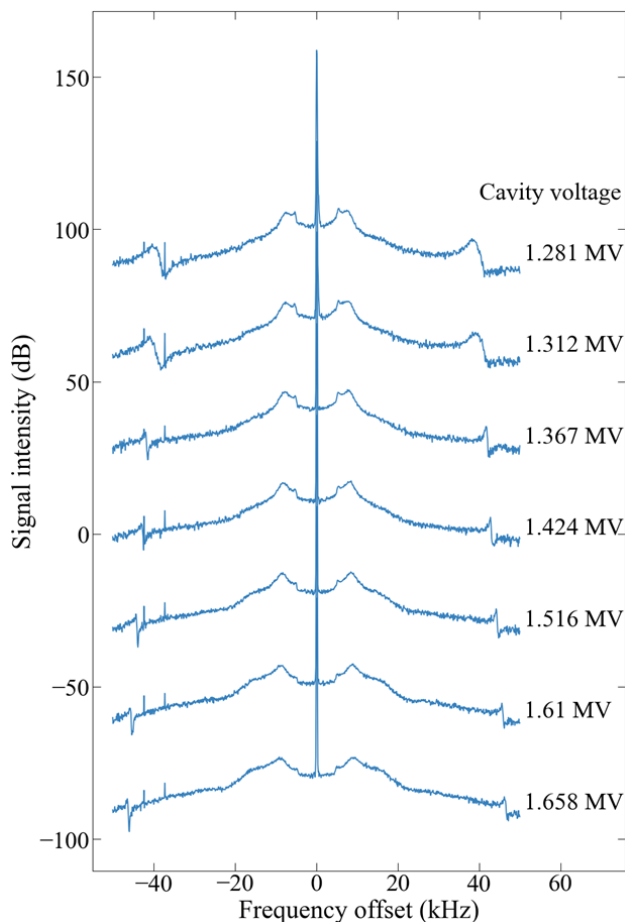


Figure 5: Measured beam responses under different cavity voltages. Beam current was fixed at 350 mA. An offset of 30 dB was appended between neighboring traces. Measurement date: May 25, 2023.

Figure 5 の upper(または lower) sideband では、幅広と幅の狭い 2 つのピークが現れているため、各トレースのリニアスケールでの応答曲線を 2 つの振動子モデルに基づく下記の式でフィッティングした:

$$R_2(\omega) = \left| \frac{A_1}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2j\gamma_1\omega} + \frac{A_2 e^{j\theta_2}}{\omega_2^2 - \omega^2 + 2j\gamma_2\omega} + B_1 + jB_2 \right| \quad (2)$$

このフィッティングにより求めた 2 つの振動の振動数と減衰率を Fig. 6 に示す。赤色の丸印と橙色の三角印が今回の測定結果で、それぞれ幅広のピークと鋭いピークの振動数を示す。また前回の測定結果(文献[4], Fig. 13)を灰色の四角と三角で示す。実線は、理論的に計算された beam Robinson モードの振動数および減衰率を示す。振動数については、今回測定したデータ(赤色と橙色の点)は、前回の測定結果(灰色の点)をほぼ再現している。ただし、今回の測定において空洞電圧が最も低い 2 点(1.312 MV と 1.281 MV)の測定結果は、ビーム不安定性の影響を受けている可能性があるため、参考データである。Figure 6 下のグラフに示した減衰率については、幅広ピークに対する測定結果は、前回の測定とやや異なっている。

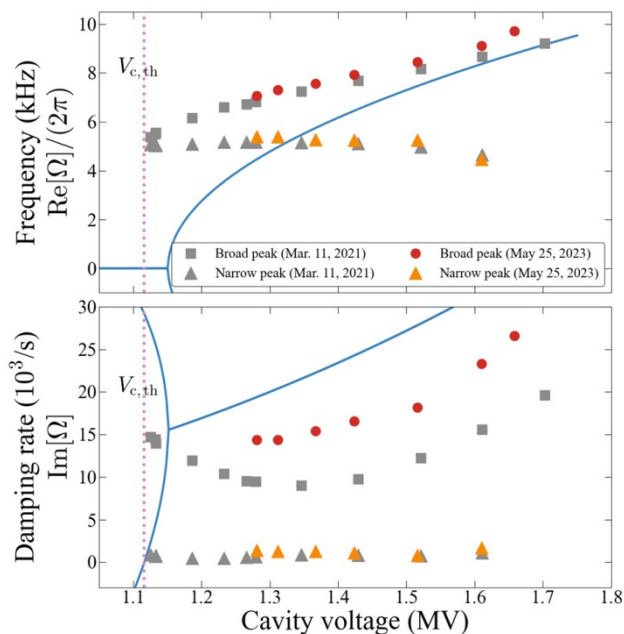


Figure 6: Measured coherent frequency and damping rate as the functions of the cavity voltage. The beam current was 350 mA. Red circles and orange triangles indicate the results of the latest measurement for the broad and narrow peaks, respectively. Gray squares and gray triangles indicate the results of previous measurement[4]. Solid lines indicate the calculated values for the beam Robinson mode.

3. 進んだデータ解析

2.2 節において、理論的には、ビーム電流 240 mA 付近で beam Robinson と cavity Robinson の 2 つの振動モードが結合し、2 つの振動モードが現れる筈であると述べた。2.2 節で述べたデータ解析では、これを 1 つの振動子モデルでフィッティングしたため、2 つの振動の中間的な振動数が得られたと解釈した。あらためて Fig. 3 の応答曲線を観察すると、特にビーム電流 200~300 mA のデータでは、応答曲線に 2 つの山があるように見える。

そこで、これらの応答曲線を Eq. (2)に示す 2 つの振動子モデルでフィッティングすることを試みた。Figure 3 に示した応答曲線のうち、ビーム電流 200~300 mA に対する応答曲線を、1 つの振動子モデルと 2 つの振動子モデルでフィッティングした例を Fig. 7 に示す。Figure 7 によれば、2 つの振動子モデルを用いた方が、応答曲線を良くフィットできる事がわかる。この 2 つの振動子モデルを用いて、Fig. 3 に示したデータのうちビーム電流 200 mA 以上のデータに対してフィッティングを行い、2 つのピークに対する振動数と減衰率を求めた結果を Fig. 8 に示す。

Figure 8 で赤色四角と橙色三角で示した点が、Fig. 3 の応答曲線を 2 つの振動子モデルでフィッティングし、2

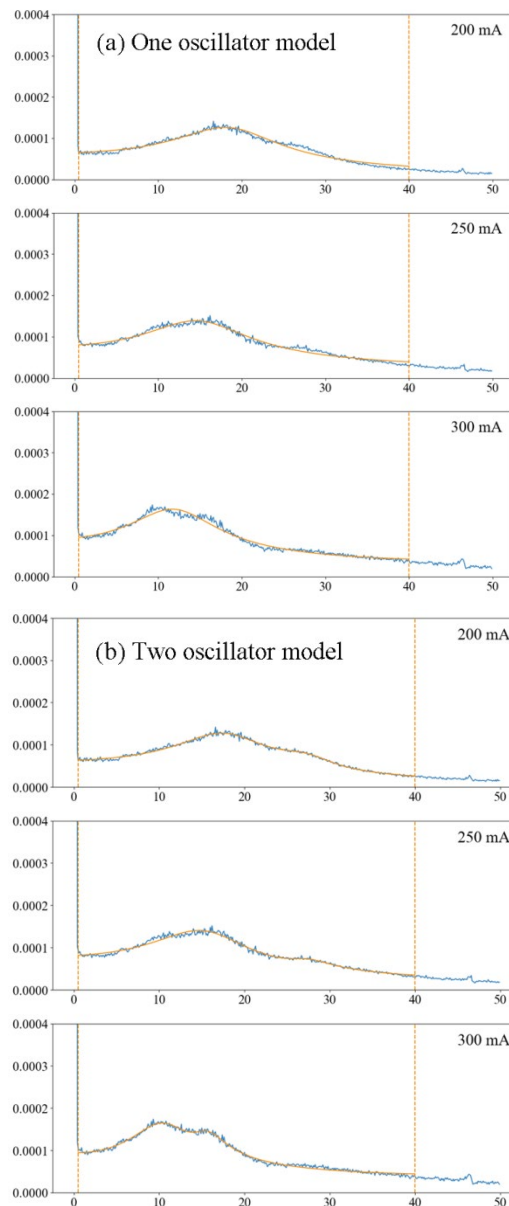


Figure 7: Results of fitting using (a) one oscillator model and (b) two oscillator model. Traces given in Fig. 3 were used. Blue and orange lines indicate the original data and fitted curves, respectively. Abscissa: frequency (kHz), ordinate: signal intensity in linear scale.

つの振動数と減衰率を求めた結果である。このうちピーク 1(四角印)の方は、振動数については 1 つの振動子モデルでフィッティングした場合とほぼ同じであり、減衰率については 1 つの振動子モデルの場合よりやや小さい結果であった。ピーク 2(三角印)については、ビーム電流 200~250 mA の場合には、周波数が高い方の cavity Robinson モードの振動数に近いが、ビーム電流 300 mA 以上ではピーク 1 の振動数(四角印)より数 kHz 高い振動数であり、理論的な 2 つの曲線(beam or cavity Robinson mode)のどちらにも一致していない。またピーク 2 の減衰率についても、ビーム電流が 200 mA から上がった場合に、減衰率が一旦下がるものの、ビーム電流 350 mA 以上では増加に転ずるといふ不自然な振る舞いをしていいる。

以上の結果から、Fig. 3 のデータ(ビーム電流を変えた場合)の応答曲線は、2 つの振動子モデルを用いた方が応答曲線をより良くフィットできるものの、結果として得られた 2 つの振動数・減衰率は、その解釈が難しいという結論が得られた。このように、応答曲線の細かい構造から詳しいデータを引き出す試みは、まだ検討・議論が必要だと思われる。同様に、Fig. 5 のデータを 3 つの振動子モデルを用いてフィッティングする試みも行ってみたが、現時点では結果の解釈が難しい状況である。

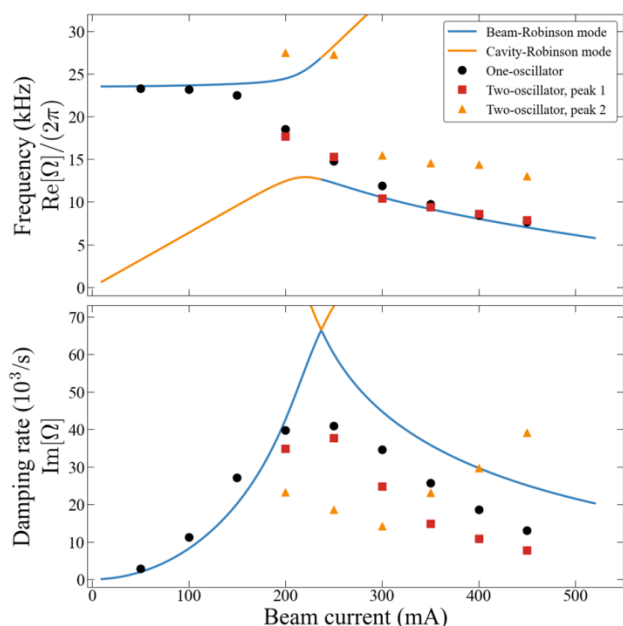


Figure 8: Results of reanalysis for the traces in Fig. 3. Red squares and orange triangles indicate the frequencies and damping rates, which were obtained from the fitting using two oscillator model. Black circles indicate the frequencies and damping rates obtained with one oscillator model (i.e., the same data indicated by red circles in Fig. 4). Solid lines indicate theoretical values.

4. まとめと今後の展望

PF リングにおける縦方向コヒーレント振動の先行研究[4]により、非常に興味深い現象が見つかっている。測定

されたコヒーレント振動数が理論的な計算値と合わず、また理論的に予想されない振動モードが現れたのである。PF リングでは、この興味ある現象に関して研究を継続する予定である。

PF リングでは 2023 年夏にローレベル RF 系の更新が予定されている。従来、コヒーレント振動数はトラッキング・ジェネレータ付きスペクトラムアナライザを用いて測定してきた。ローレベル系の更新後には、デジタル・ローレベル系に組み込まれた機能で RF 位相変調を行い、ビームの振動をスペクトラムアナライザ等で測定する、という別の方法で測定を行うことになる。従って、測定方法が変わった場合でも、以前と同様のデータが得られるかには注意が必要である。

この動機から、ローレベル系更新前の 2023 年 5 月に縦方向コヒーレント振動数の再測定を行った。測定では、空洞電圧をほぼ一定に保ちビーム電流を変えた場合と、ビーム電流を一定に保ち空洞電圧を変えた場合、についてコヒーレント振動数を測定した。これらのデータは、ローレベル更新後にデータを取得した場合に、比較するデータとして用いる予定である。

今回の測定で得られたデータを以前のデータ[4]と比較したところ、データは概ね再現している事が確認された。またビーム電流を変えた場合については、アベレーシングにより以前よりばらつきの少ないデータが得られた。そこで応答曲線から振動数と減衰率を求める際のフィッティングについて、1 つの振動子モデルと 2 つの振動子モデルの両方を用いて解析し、結果を比較した。2 振動子モデルでは、理論的に予測される 2 つの振動モードに近い結果が得られると期待したが、フィッティングの結果は解釈が難しいものであった。継続した検討が必要である。

今後は、PF リング以外の電子蓄積リングでも同様の現象が起きるのか、またなぜこのような現象が起きるのか、について、他の研究機関とも連携しながら研究を進めたいと考えている。

謝辞

KEK 放射光実験施設の皆様には、本研究のために貴重なマシンスタディの時間を割当てて頂きました。KEK の飛山真理氏には、測定に用いたスペクトラムアナライザを貸して頂きました。深く感謝致します。本研究は JSPS 科研費 JP20H04459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K.W. Robinson, "Stability of beam in radiofrequency system", MIT and Harvard University, Technical Report No. CEAL-1010, 1964.
- [2] 赤井和憲, "RF システム", 高エネルギー加速器セミナー OHO'94, 1994.
- [3] N. Towne and J.-M. Wang, "Spectrum of single bunch longitudinal dipole modes", Phys. Rev. E **57**, 3461 (1998). doi:10.1103/PhysRevE.57.3461
- [4] T. Yamaguchi *et al.*, "Systematic study on the static Robinson instability in an electron storage ring", Phys. Rev. Acc. Beams **26**, 044401 (2023). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.26.044401