

# PF2.5GeV リングのハイブリッド運転モードへの高調波空洞導入の可能性 SIMULATION STUDY FOR BUNCH LENGTHENING FOR PHOTON FACTORY HYBRID OPERATION MODE

山本 尚人\*, 田中 織雅, 高井 良太

Naoto Yamamoto\*, Olga Tanaka and Ryota Takai

High energy accelerator research organization, KEK

## Abstract

A hybrid filling mode with a high-current single bunch and a train of low-current bunches allows for simultaneous operation of high intensity and time-resolved experiments. At KEK Photon Factory since FY2017, the single bunch current is limited by around 30 mA due to beam-duct heat problems and shortening of the beam lifetime caused by single and multi-bunch instabilities. In order to increase the single bunch current, the bunch lengthening with harmonic RF cavities is investigated. When the bunch charge becomes higher, the ring impedance as well as the harmonic rf voltage affects the equilibrium bunch length and the beam stabilities. Then, the impact from the harmonic RF cavities and the ring impedance to the PF hybrid operation mode is studied by using the multi-particle tracking code "MBTRACK". As a result, it is found that the bunch lengthening operation with the ideal "flat potential" condition can be expected for the high-current single bunch by using two 1.5 GHz normal conducting cavities.

## 1. はじめに

KEK フォトンファクトリー (PF) は KEK つくば キャンパスにあるエネルギー 2.5 GeV, 周長 187 m, エミッタンス 34.6 nmrad の放射光源蓄積リングである [1]。PF リングでは 2012 年以降、シングルバンチビームからの放射光を利用した時間分解計測を必要とするユーザー向けに 1 年に約 1 ヶ月の頻度でハイブリッド運転を設けている [2]。ハイブリッド運転とはリング内に連続したバンチトレイン (マルチバンチ) と孤立したシングルバンチを同時に蓄積する運転モードのことである。高い平均電流を必要とするマルチバンチユーザーと、高い電荷を有する孤立バンチを必要とするシングルバンチユーザーとの間で限られたマシンタイムをシェアできるようにする [3,4]。

PF におけるハイブリッド運転時のシングルバンチ電流は、2012 年当時は 50 mA 程度であったが、2017 年以降は 30 mA まで低下している。これは超伝導垂直ウィグラー部 (VW#14) のダクト交換 [1,5] により、同ダクト部分での発熱及び真空劣化が問題となったからである。また、2018 年に挿入光源 (ID#19) の機器更新 [6] によりダクトを交換してからは、ID ギャップと関連して進行方向のバンチ結合型不安定性が起こりやすくなった。特に近年のマシン調整では、バンチ電流 50 mA を達成できないわけではないが、シングルバンチのビーム不安定性やマルチバンチ部においてもバンチ結合型不安定性が起こりやすい状況となっており、50 mA を長時間維持するのは困難な状況になっている。

高調波空洞を主空洞と合わせて用いることで、電子が感じる実効的な高周波 (RF) ポテンシャルが平坦になり電子バンチの縦方向の収束力を緩和でき

る [7]。蓄積リングではこの効果により周回ビームがバンチ伸張されるとともにバンチ内のシンクロトロン振動数拡がりも大きくなるため、ダクトの発熱や各種不安定性の発生閾値、さらにはエミッタンス増大や Touschek 寿命低下を緩和できる。第 3 世代以降の光源加速器ではこれらの利点から導入が進み、現在設計・建設中の極低エミッタンスリングでも積極的に導入が検討されている [8-15]。日本国内では分子科学研究所の UVSOR にてバンチ結合型不安定性を抑制するため、高調波空洞が用いられている [16]。

本研究では、PF リングハイブリッド運転時のシングルバンチ電流値を増強することを目的とした調査を行っている。PF リングに高調波空洞が導入されバンチ伸張が可能となれば、近年問題となっているダクトの発熱やビーム不安定性の問題の緩和が期待できる。本論文では、はじめにバンチ伸張についての検討手法を説明した後、第 3 節で PF リングのインピーダンスを見積もる。さらに、このインピーダンスを含めた場合のバンチ伸張について計算結果を示し、その結果について考察する。

## 2. 検討手法

主空洞の整数倍の共振周波数を持つ高調波空洞によるバンチ伸張は文献 [7] にあるように、空洞電圧の非線形性による Potential well distortion を考慮することで解析的に見積もることができる。しかし、本検討で扱うようなバンチフィリングが一様でない場合には、バンチトレイン内でバンチ電荷が異なったり、過渡的なビーム負荷変動が生じたりするため解析的な計算は困難である。特に高調波空洞を用いたバンチ伸張運転によりポテンシャルが平坦に近づく場合には、各バンチの振る舞いが過渡的ビーム負荷の変化に敏感となり、条件によってはバンチ伸張率が極端に低下することが報告されている [17,18]。

また大電流を蓄積する場合、リングインピーダン

\* naoto.yamamoto@kek.jp

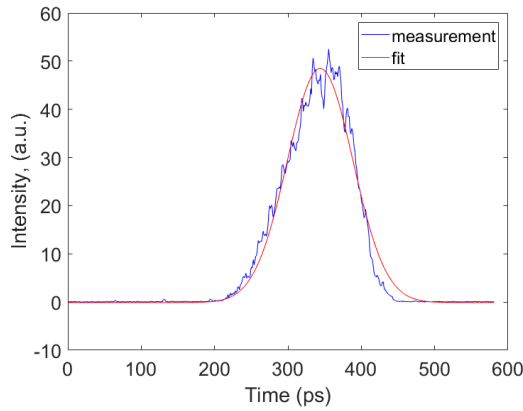


Figure 1: Longitudinal profile (blue) and gaussian-fitted curve (red) of electron bunch at the bunch current of 30 mA.

スを起因とする Potential well distortion によるバンチ形状変化も無視できない。例えば、2007 年当時の PF リングでの測定では、自然バンチ長 32 ps がバンチ電流 10 mA において約 43 ps まで伸張されることが報告されている [19]。

このような理由から、本研究では多粒子トラッキングコードの MBTRACK [20] を用いてバンチ伸張効果の検証を行った。MBTRACK はリング一周毎のバンチの運動をトラッキングするコードであり、任意のバンチフィリングを仮定して高調波空洞とリングインピーダンスを同時に考慮した計算が可能である。MBTRACK は位置と運動量を含めた 6 次元でのトラッキングが可能であるが、本検討では縦方向の運動に限り計算を行った。このため本検討では横方向ウエイク場に起因する Head-tail 不安定性については考慮していないが、RF 空洞（主および高調波）やリングインピーダンスに起因するようなビーム不安定性については計算に入っている。

### 3. リングインピーダンスの見積

PF リングのインピーダンスについては 2017 年の 12 月に測定されたシングルバンチ運転時のバンチ長測定結果を用いて行った。バンチ長はストリークカメラ（浜松ホトニクス, C5680+M5675+M5679）を用いて得られたプロファイルを 20 回分積算した後、ガウスフィットにより算出した。バンチ電流 30 mA 時の積算したプロファイルとガウスフィットの様子を Fig. 1 に示す。バンチ内の密度分布がわずかに右側によっていることが確認できる。

次に得られたバンチ長の電流値に対する依存性を Fig. 2 に示す。バンチ電流が増加するにつれてバンチ長が増大する様子が確認できる。

バンチ長の変化はリングインピーダンスのうち主にインダクタンス成分に引き起こされていると仮定してその大きさを求めた。Figure 2 には、Zotter's law に従う解析的な手法と MBTRACK を用いて得られた結果を合わせてプロットした。バンチ伸張がリングインピーダンスによる Potential Well Distortion によって引き起こされると考えると、自然バンチ

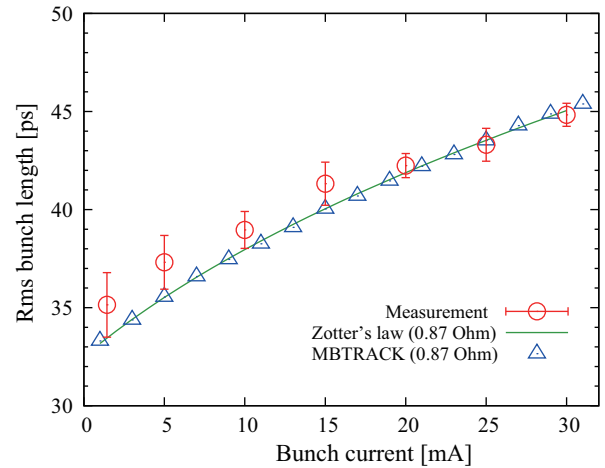


Figure 2: Bunch length as a function of the bunch current. The measurement (fitted) values are plotted by red circles together with the predictions by using Eq. 1 (green line) and MBTRACK code (blue triangles).

Table 1: PF-ring Parameter for Calculations

Parameter	Symbol	Value
Beam energy	$E_0$	2.5 GeV
RF frequency	$f_{rf}$	500.094 MHz
Main RF voltage	$V_1$	1.7 MV
Harmonic number	$h$	312
Energy loss per turn	$U_0$	399 keV
Average radius	$R$	29.77 m
Momentum compaction	$\alpha_c$	$6.56 \times 10^{-3}$
Synchrotron tune	$n_s$	0.01468
Natural bunch length	$\sigma_0$	32.4 ps (rms)
Natural relative energy spread	$dE/E$	$7.3 \times 10^{-3}$
Longitudinal damping time	$\tau_e$	3.9 ms

長  $\sigma_0$  に対する伸長率 ( $\sigma/\sigma_0$ ) は、下記の関係式を満たす [21]。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^3 + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \frac{\alpha_c I_b}{\nu_s^2 E_0} \left(\frac{R}{\sigma_0}\right)^3 Z_{eff} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_c, I_b, \nu_s, E_0, R$  はそれぞれモーメントコンパクション因子、バンチ電流、シンクロトロンチューン、ビームエネルギー、リングの平均曲率であり、 $Z_{eff}$  がリングの実効インピーダンスのインダクティブ成分である。Figure 2 では、 $Z_{eff} = 0.87 \Omega$  とし、各電流値において式 1 を満たす ( $\sigma/\sigma_0$ ) を求めプロットした。その他、計算に用いた PF リングのパラメータを Table 1 に示す。

MBTRACK でも同様に  $Z_{eff} = 0.87 \Omega$  とし各電流値でのバンチ長を求めた。Figure 2 から、Zotter's law 及び MBTRACK の計算結果が測定データをよく再現していることがわかる。このリングインピーダンスの値は過去の PF の測定結果と比べても矛盾のない

Table 2: Parameter of Main and Harmonic Cavities

Parameter	Main rf	3rd Harmonic rf
Cavity number	4	1 / 2
$R/Q, R = V_c^2/P_c$	174 $\Omega$	80 $\Omega$
Unloaded $Q$	39000	37500
Coupling factor	3.5	0
Total cavity voltage	1.7 MV	160 / 298 kV
Synchronous phase	1.304 rad	-1.770 / -1.731 rad
Detuning frequency	-44.1 kHz rad	146 / 152 kHz

値である [19].

#### 4. 高調波空洞によるバンチ伸張

高調波空洞による最大のバンチ伸張率は高調波次数が3の場合、ユニフォームフィルを仮定すると下記のような簡単な近似式で与えられる [22].

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_0} \cong \frac{0.765}{\sqrt{2\pi\sigma_0 f_{rf}/c}} \quad (2)$$

PF リングの最大バンチ伸張率を上式に従って求めると 2.36 となり、この時のバンチ長は 76.3 ps と予測される。

MBTRACK の計算において、バンチフィルパターンは PF リングで通常用いられているハイブリッド運転時とほぼ同じパターンとした。すなわち、130 バンチ (約 260 ns) の連続するバンチトレインの後、90 バンチ (約 180 ns) の空きバケットを設け、シングルバンチを配置した後、さらに 90 バンチの空きバケットを設けた。また、シングルバンチ電流は 50 mA、バンチトレイン全体の蓄積電流値は 450 mA とした。このとき、マルチバンチ部には各 3.1 mA を均等に蓄積することになる。

計算の際に用いた各 RF 空洞のパラメータ Table 2 に示す。主空洞のパラメータは現在 PF リングで用いられている空洞 [23] を、高調波空洞は最近検討が進められている TM020 空洞 [18, 24] をパッシブ運転 (外部 RF 電力の供給無し) で用いることを想定した。主空洞の運転パラメータについてはユニフォームフィル時に最大バンチ伸張率を得るために必要な値を選び、高調波空洞については空洞 1 台あたりの壁損失を最大 10 kW と制限したうえで、より高いバンチ伸張率を目指して決定した。

#### 5. 計算結果

高調波空洞を 2 台インストールした場合に MBTRACK により得られた各バンチ位置に対するバンチ長を Fig. 3 に示す。バンチトレイン全体においてバンチ伸張の効果がみられるが、マルチバンチ部におけるバンチ長は約 46 ps と伸張率はわずかに約 1.4 倍に留まっている。マルチバンチ部では高調波空洞電圧の電圧不足により十分にバンチ伸張効果が得られないものと考えられる。また、同じ理由により過渡

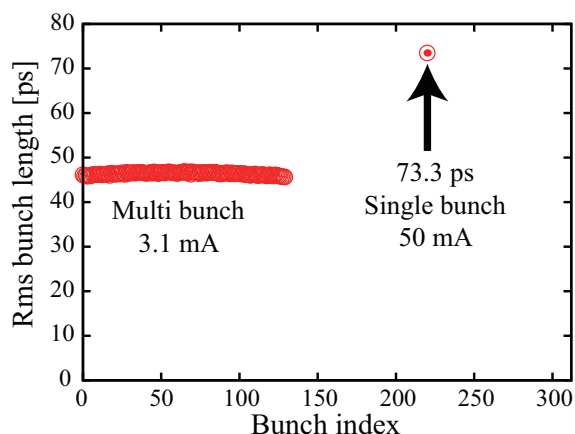


Figure 3: Bunch length along the bunch index, assuming the use of two harmonic cavities.

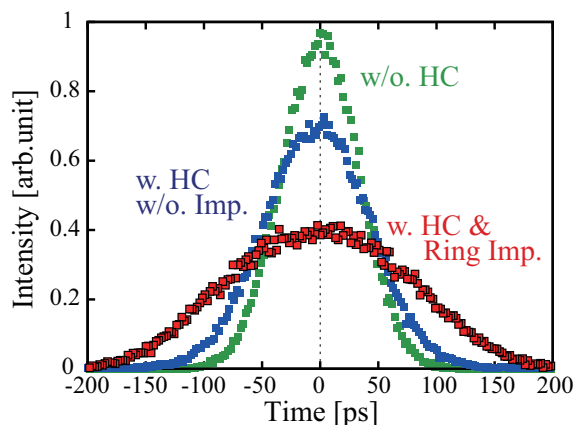


Figure 4: Longitudinal bunch profile of the single bunch having the bunch current of 50 mA.

的ビーム負荷の影響 (トレイン内でのバンチ長の大きな変化) は抑えられている。

孤立バンチ部のバンチ長は 73.3 ps となり、節 4 で述べた理想的な最大バンチ長 76.3 ps と同程度まで伸張されている。MBTRACK で得られたシングルバンチ部の縦方向バンチプロファイルを図 4 に赤色で示す。Figure 4 には比較のため、高調波空洞のない場合 (緑色) とリングインピーダンスを考慮しない場合 (青色) のプロファイルを合わせて示した。リングインピーダンスの有無で得られるバンチ長が大きく異なることが確認できる。

Figure 5 は、孤立バンチが蓄積リングを周回する際に感じる合計電圧をプロットしたものである。ビームのシンクロナス位相 (0 ps に相当する位置) 近辺に着目すると、リングインピーダンスを考慮した場合の合計電圧 (赤色) は考慮しない場合 (青色) に比べ電圧の傾きが平坦になっていることがわかる。これは、先に述べた高調波空洞の電圧不足をリングインピーダンスが誘起するウェイク場が補っているためだと考えられる。



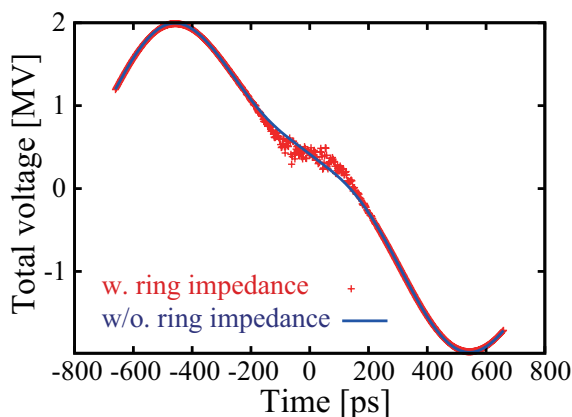


Figure 5: Total voltage seen by the single bunch.

Table 3: Summary of the Bunch Length Estimation

	Bunch current	Bunch length
Natural bunch length	-	32.5 ps
Measurement at FY2012 [2]	50 mA	56.3 ps
Measurement at FY2017	30 mA	45.2 ps
MBTRACK, 1 HC	50 mA	66.4 ps
MBTRACK, 2 HCs	30 mA	65.9 ps
MBTRACK, 2 HCs	50 mA	73.3 ps
Ideal case	-	76.3 ps

## 6. 考察

前節までに得られた計算結果に高調波空洞を1台のみとした場合と、高調波空洞2台で孤立バンチ電流を30 mAにした場合の結果を加え Table 3 に示す。2018年の挿入光源 (ID#19) 更新前のバンチ長電流値依存性から算出されたリングインピーダンスを用いて計算した結果、孤立バンチ電流が50 mAの場合、PFリングに高調波空洞を1台インストールすることで66.4 ps、2台で73.3 psのバンチ長が期待される。

2018年以降もPFのリングインピーダンスは大きく変化していないと仮定すると、高調波空洞を少なくとも1台インストールすることで、2017年の垂直ウィグラー (VW#14) 更新以降発生しているダクト発熱の問題の緩和が期待できる。

ダクトの発熱問題が緩和した上でどの程度バンチ電流を増加できるかについては、第1節で書いた各種不安定性の様子がバンチ伸張やLandauダンピングでどの程度緩和するかが重要である。そのため、これらについてはより詳細な調査が必要だと考える。

また、本論文では詳しい議論は行っていないが、MBTRACKでは孤立バンチ部においてエネルギー拡がりの増大が確認された。孤立バンチ電流50 mAの時その値は、高調波空洞1台で $1.07 \times 10^{-3}$ 、2台で $1.02 \times 10^{-3}$ であった。同様に孤立バンチ電流30 mAの時、高調波空洞2台で $8.14 \times 10^{-4}$ であった。これはMicro wave instabilityが発生しているためであると考えられる。現状のPFの運転条件においてはこ

の程度のエネルギー拡がり増大は、放射光利用に影響ないということであるが、今後注意が必要だと考える。

今回の計算により、特にバンチ電流が高い場合にバンチ伸張を行う際、リングインピーダンスの存在が重要であることが示唆された。この効果は一般的なモーメントコンパクション因子が正となるリングの場合には、バンチ伸張に必要な高調波空洞電圧を下げるという望ましい方向に働く。例えば、PFリングの場合、この効果が無い場合に同等のバンチ伸長率を得ようとする必要高調波空洞は4台と算出される。しかし、今回のように大電流孤立バンチのみのバンチ伸張が求められる場合には半分の2台でほぼ理想的なバンチ伸長率が得られることがわかった。

## 7. まとめ

KEK-PFリングのハイブリッド運転では、近年ユーザーに提供できる孤立バンチの電流値が下がっている。本研究ではこのバンチ電流を改善することを目的に高調波空洞を用いたバンチ伸張について調査を行った。

2017年に測定されたバンチ長の電流値依存性データをもとに解析的およびマクロ粒子トラッキングからPFリングのインピーダンスの大きさを見積もった。また、この値を用いて1.5GHzのTM020空洞を用いた時に得られるバンチ長を見積もった。この結果、少なくとも1台の高調波空洞をインストールすることで、有効なバンチ伸長率が得られることが示唆された。さらに、検討の過程において、高い電流値をもつ電子バンチをバンチ伸張する際、リングのインピーダンスが大きく関与することが確認された。

今後、バンチ伸張がPFのビーム不安定性に与える影響を調査したい。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K05131の助成を受けたものです。KEKの原田准教授にはPFの過去の運転条件について貴重な助言を頂きました。

## 参考文献

- [1] T. Honda, R. Takai, S. Nagahashi, and Y. Kobayashi, "Development and present status of photon factory light sources" in Proc. 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, no. 8, Geneva, Switzerland: JACoW, May 2018, THPMF043, pp. 4155–4158; <http://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/thpmf043.pdf>
- [2] R. Takai, T. Obina, T. Honda, and Y. Tanimoto, "Introduction of hybrid filling mode in photon factory storage ring", in Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ, Tokyo, 2012, 2012, pp. 1043–1047; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS057.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS057.pdf)
- [3] J. M. Filhol, L. Hardy, and U. Weinrich, "Status report of the esrf," in Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 99CH36366), vol. 4. IEEE, 1999, pp.

- 2334–2336;  
<http://accelconf.web.cern.ch/p99/PAPERS/WEF31.PDF>
- [4] T. Nakamura, T. Fujita, K. Fukami, K. Kobayashi, C. Mitsuda, M. Oishi, S. Sasaki, M. Shoji, K. Soutome, M. Takao *et al.*, “Filling of high current singlet and train of low bunch current in spring-8 storage ring” in Proceeding of European particle accelerator conference. Genoa, Italy, 2008, THPC127, pp. 3284–3286;  
<http://accelconf.web.cern.ch/e08/papers/thpc127.pdf>
- [5] Y. Kobayashi, S. Asaoka, M. Adachi *et al.*, “Present status of pf ring and pf-ar at KEK” in Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ, Tokyo, 2017, 2017, pp. 1330–1333;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP005.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP005.pdf)
- [6] R. Takai, S. Nagahashi, T. Honda, and Y. Kobayashi, “Present status of the pf-ring and pf-ar operations” in Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC’19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019, no. 1, Geneva, Switzerland, JACoW, TUPGW106, pp. 1654–1657;  
<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/tupgw106.pdf>
- [7] A. Hofmann and S. Myers, “Beam dynamics in a double rf system,” in 11th Int. Conf. on High-Energy Accelerators, Springer, 1980, pp. 610–614.
- [8] J. Byrd, K. Baptiste, S. D. Santis, S. Kosta, C. Lo, D. Plate, R. Rimmer, and M. Franks, “Design of a higher harmonic RF system for the advanced light source,” Nucl. Instr. Meth. A, vol. 439, no. 1, pp. 15 – 25, 2000;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890029900892X>
- [9] M. Georgsson, W. Anders, D. Krämer, and J. Byrd, “Design and commissioning of third harmonic cavities at BESSY II”, Nucl. Instr. Meth. A, vol. 469, no. 3, pp. 373–381, 2001;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201007835>
- [10] V. Serrière and J. Jacob, “Expected lifetime improvement with a superconducting harmonic rf system at the ESRF”, in Proc. of EPAC, 2002, Paris, France, 2002, pp. 748–750.
- [11] W. Anders and P. Kuske, “HOM damped NC passive harmonic cavities at BESSY”, in Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conf., vol. 2, 2003, pp. 1186–1188.
- [12] P. Bosland, P. Brédy, S. Chel, G. Devanz, M. L. C. S. France, P. Craievich, G. Penco, M. Svandrlíck, M. Pedrozzi, W. Gloor *et al.*, “Third harmonic superconducting passive cavities in ELETTRA and SLS”, in Proc. of 11th SRF workshop, 2003, pp. 239–243.
- [13] J. Rose, F. Gao, A. Goel, B. Holub, J. Kulpin, C. Marques, and M. Yeddulla, “Nsls-ii rf frequency systems”, in Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conf., IPAC’15, Richmond, VA, USA, 2015, p. TUPMA052.
- [14] 高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設, “Kek 放射光 conceptual design report ver 1.1,” KEK, Tech. Rep., 2017;  
[http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS\\_CDR\\_170522.pdf](http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf)
- [15] P. F. Tavares, E. Al-Dmour, Å. Andersson, F. Cullinan, B. N. Jensen, D. Olsson, D. K. Olsson, M. Sjöström, H. Tarawneh, S. Thorin, and A. Vorozhtsov, “Commissioning and first-year operational results of the MAX IV 3 GeV ring”, Journal of Synchrotron Radiation, vol. 25, no. 5, pp. 1291–1316, aug 2018.
- [16] K. Tamura, T. Kasuga, M. Tobiyama, H. Hama, G. Isoyama, and T. Kinoshita, “Double rf system for suppression of longitudinal coupled bunch instability on uvsor storage ring”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 33, no. 1A, p. L59, 1994;  
<http://stacks.iop.org/1347-4065/33/i=1A/a=L59>
- [17] J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, and V. Serriere, “Transient beam loading effects in harmonic rf systems for light sources”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 5, p. 092001, Sep 2002;  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.5.092001>
- [18] N. Yamamoto, T. Takahashi, and S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources,” Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 21, Jan. 2018, 012001;  
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001>
- [19] T. Obina and T. Mitsuhashi, “Measurement of bunch lengthening effects using a streak camera with reflective optics”, in Proceedings of DIPAC 2007, Venice, Italy, 2007, pp. 256–258;  
<https://accelconf.web.cern.ch/d07/papers/wepb12.pdf>
- [20] N. Yamamoto, A. Gamelin, and R. Nagaoka, “Investigation of Longitudinal Beam Dynamics With Harmonic Cavities by Using the Code Mtrack”, in Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC’19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019, no. 1, Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, Jun. 2019, MOPGW039, pp. 178–180;  
<http://jacow.org/ipac2019/papers/mopgw039.pdf>
- [21] G. Skripka, R. Nagaoka, M. Klein, F. Cullinan, and P. F. Tavares, “Simultaneous computation of intrabunch and interbunch collective beam motions in storage rings”, Nucl. Instr. Meth. A, vol. 806, pp. 221–230, 2016.
- [22] M. Venturini, “Passive higher-harmonic rf cavities with general settings and multibunch instabilities in electron storage rings”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 21, p. 114404, Nov 2018;  
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.114404>
- [23] M. Izawa, T. Koseki, S. Sakanaka, T. Takahashi, K. Hass, S. Tokumoto, and Y. Kamiya, “Installation of new damped cavities at the photon factory storage ring”, JSR, vol. 5, no. 3, pp. 369–371, May 1998;  
<http://dx.doi.org/10.1107/S0909049597015070>
- [24] N. Yamamoto, S. Sakanaka, and T. Takahashi, “Simulation study of parasitic-mode damping methods for a 1.5-ghz tm020-mode harmonic cavity”, in Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conf., IPAC’18, Vancouver, BC, Canada, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2018, p. 2822.