

SPring-8 次期計画における 3.5 倍高調波空洞によるバンチ伸長シミュレーション

SIMULATION ON BUNCH LENGTHENING WITH 3.5 HARMONIC CAVITY FOR SPRING-8-II PLAN

藤田貴弘^{#,A)}, 恵郷博文^{A)}, 中村剛^{A)}, 持箸晃^{A)}
 Takahiro Fujita^{#,A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Akira Mochihashi^{A)}
^{A)} JASRI/SPring-8

Abstract

At SPring-8 II plan, bunches with long bunch length would be stored using a higher harmonic cavity in order to avoid emittance growth due to intra beam scattering and to achieve enough beam life time. Bunch length with harmonic cavities was evaluated by tracking simulation. In the simulation, transient beam loading caused by bunch filling pattern was considered. If superconducting cavities with low R/Q were used as the harmonic cavity, bunches were lengthened almost enough. Although anomalous oscillation was observed at bunch length more than 30ps, a feedback scheme which directly detects energy shift damped the oscillation successfully.

1. はじめに

SPring-8 次期計画においては 10keV 光子における回折限界を目指しており、実現するための極低エミッタンスリングが検討されている。回折限界リングにおいてはバンチ内の電子・電子散乱(Intra beam scattering)によるエミッタンスの増大やビーム寿命の低下が懸念される。SPring-8 II では高調波空洞を導入してポテンシャルを変形させて、バンチ長を 20ps (自然長の 4 倍程度) 以上、目標は 50ps 程度まで伸長させ、エミッタンス増大やビーム寿命の低下を避けることを検討している。バンチ長を大きく伸長させるには高調波空洞の電圧と位相の高精度での調整が必要不可欠であると同時に、フィリングパターンに起因する遷移的なビームローディングの影響を評価し、必要な高調波空洞の仕様について前もって評価しておくことが重要である。

この論文では高調波空洞を用いて到達可能なバンチ長とパラメータの範囲について説明した後、フィリングパターンに起因する遷移的なビームローディングの影響を考慮したバンチ長を超伝導空洞のパラメータを用いた評価について述べる。ビームローディングは空洞の R/Q に依存するため、その評価を行った。

高調波電圧が基本波電圧に重畳した場合、進行方向のポテンシャルは基本波のみのそれから大きくひずみ、ガウス分布からほど遠くなり、場合によっては長いテールを引く場合がある。バンチ長の表現に用いられる標準偏差はバンチ長の指標として正しくない場合があるため、この論文においては、バンチ長は FWHM を 2.35 で割った値で表現することとした。また、バンチが著しく伸長した際にビームが安定に蓄積できない場合や、高調波空洞の R/Q を大きくした際に十分なバンチ長が得られない場合がある

ことが分かったため、その対策および考察を行った。

なお、SPring-8 II はまだ検討中の計画であり、加速器のパラメータは随時変更されている。この論文で用いる加速器構成およびパラメータは参考文献[1]のものを用いた。

2. 高調波空洞によるバンチ伸長

基本波と高調波の電圧を式(1)で記述すると、よく知られているようにそのポテンシャルによるバンチの進行方向分布は式(2)で与えられる[2]。

$$V(\phi) = V_1 \cos(\omega_1 \tau + \phi_s) + V_n \sin(\omega_n \tau + \phi_n) \quad (1)$$

$$\Psi(\phi, \Delta p/p) = \infty \exp \left\{ \frac{-eV_1 Y^2(\phi, \phi_s)}{2h\eta\beta^2 E \frac{\Delta p}{p}} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $V_1, \omega_1, \phi_s, V_n, \omega_n, \phi_n$ はそれぞれ、基本波の加速電圧、周波数、シンクロナス位相、高調波の電圧、周波数、位相であり、 h, η, β, E はそれぞれハーモニック数、スリッページファクタ、相対論的速度、電子のエネルギーである。また、

$$Y^2(\phi, \phi_s) = \frac{1}{V_1} \int_0^\phi \{V(\phi) - V_r\} d\phi \quad (3)$$

であり、 V_r は電子が損失するエネルギーを電圧に換算したものである。式(2)と Table 1 に示した SPring-8 II のパラメータを用いてバンチ長を計算すると、最適な条件では 50ps まで伸長できるものの、Figure 1 に示すように高調波電圧と位相に対して敏感であり、特に 20ps 以上のバンチ長を維持するためには

[#] tfujita@spring8.or.jp

位相に対するトレランスは 1° 程度である。このことから、高調波空洞電圧の高精度位相制御が重要になることが分かる。

また、ほとんどの電子蓄積リングにおいてはイオントラッピング対策のために何割かのバケットにビームを蓄積しない状態で運転するが、そのビームを蓄積していない空きバケットのために加速空洞内の電圧と位相が変調される。これは遷移的なビームローディングと呼ばれる効果であり、空洞の R/Q が小さいほど変調度も小さくなる。つまり、高調波空洞を用いてバンチ長を伸長させるには、基本波空洞と高調波空洞での遷移的なビームローディングを詳細に考慮する必要がある[3]。

Table 1 parameters of SPring-8 II

parameter	Symbol	Value
Beam energy	E	6 GeV
Energy loss per turn	U_{BM}	4 MeV
	U_{ID}	4 MeV
	U_{DW}	2 MeV
Accelerating voltage	V_1	16 MV
Harmonic voltage	$V_{3.5}$	3.5 MV
Accelerating frequency	f_{RF}	508.58 MHz
Harmonic number	h	2436
energy spread	$\Delta p/p$	0.15 %
slippage factor	η	1.55E-5
Beam current	I_b	300 mA
natural bunch length (w/o CSR, IBS)	σ_0	5.4ps

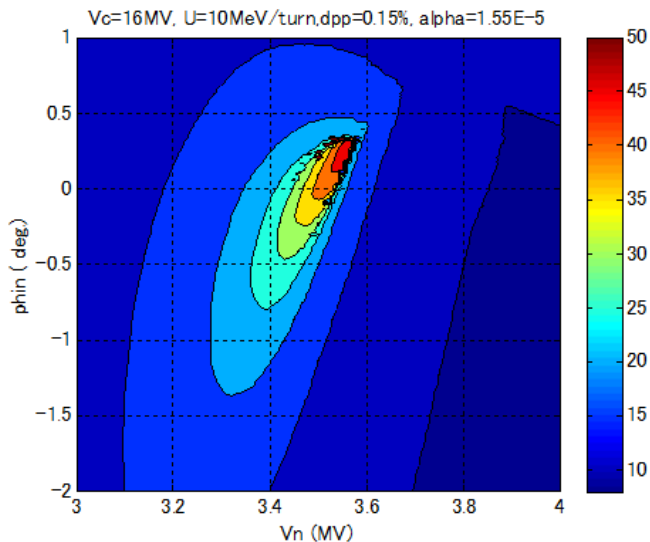


Figure 1: Bunch length dependence on harmonic cavity voltage and phase

Bunch length is calculated as FWHM/2.35.

3. 空洞のインピーダンスを考慮したトラッキングシミュレーション

基本波の電圧の1部と高調波の電圧は周回する

ビーム自身によって励起されるため、リング1周の遷移的なビームローディング考慮したバンチ長を評価するためにはバンチごとのシンクロナス位相やバンチ長と空洞電圧を自己無撞着に評価する必要がある。そのためにトラッキングシミュレーションを行った。シミュレーションの流れは次のとおりである。

- 粒子がリング1周する際に偏向電磁石、挿入光源、ダンピングウィグラーによってエネルギーを損失し、中心エネルギーからの偏差によってシンクロナス位相からずれる。
- 基本波空洞で加速され、空洞に電圧を励起する。
- 高調波空洞で加速され、空洞に電圧を励起する。
- シンクロトロン振動よりも遅い時定数で基本波の空洞電圧が所定の電圧になるように RF 源の電力およびチューナーにより位相を調整する。

シミュレーションには放射減衰と放射励起を考慮しており、これらの過程を経て平衡状態になった時のバンチ長を最終的なバンチ長とした。バンチあたりのマクロパーティクル数を 1000 としたが、この粒子数でのシングルショットではバンチ長についての十分な統計が得られないため、放射減衰によってバンチの重心振動が十分に収まってからさらに 1000 ターン余分に周回させて、その間の周回ごとの進行方向分布が同じ分布であるとみなして積算し、バンチ長の計算を行った。用いたフィリングパターンは現在の SPring-8 で標準的に用いられているマルチバンチ(連続 160 バンチのバンチトレインと 43 バケットの空きバケットを1組として等間隔に12組蓄積されるフィリング)の偶数バケットにのみ蓄積した。このフィリングでは蓄積バケットのバンチ電流は均一であるので、シミュレーションには fundamental なビームローディングの効果は考慮しなかった。また、バンチ電流が低電流であるため、potential well distortion も考慮しなかった。

前節に述べたように、空洞の R/Q が小さいほどバンチごとのバンチ長の変動も一樣に近くなると考えられるが、低い R/Q でありながら、限られたスペースにおいて十分な加速電圧を生じさせるには常伝導空洞よりも超伝導空洞が適していると考えられる。また、超伝導空洞でも多セル空洞より単セル空洞のほうが R/Q を低くした設計が可能であるため、Table2 に示すセットにて評価を行った。シミュレーションに用いた基本波空洞の常伝導パラメータ、超伝導パラメータ、および高調波空洞の超伝導単セル空洞パラメータおよび超伝導2セル空洞パラメータを Table 3 に示す。

Figure 2 (a), (b), (c), (d)に case 1 のシミュレーション結果を示す。Figure 4 (a)に示すようにバンチトレインの中心付近のバンチのみ 50ps まで伸長されているが、そのほかのバンチは 20ps 程度で、最も短いもので 15ps 程度になっている。これは Figure 2 (b)に示すように基本波と高調波の空洞電圧がバンチトレインによって変調され、それによってバンチのシンクロナス位相も大きく変調されている

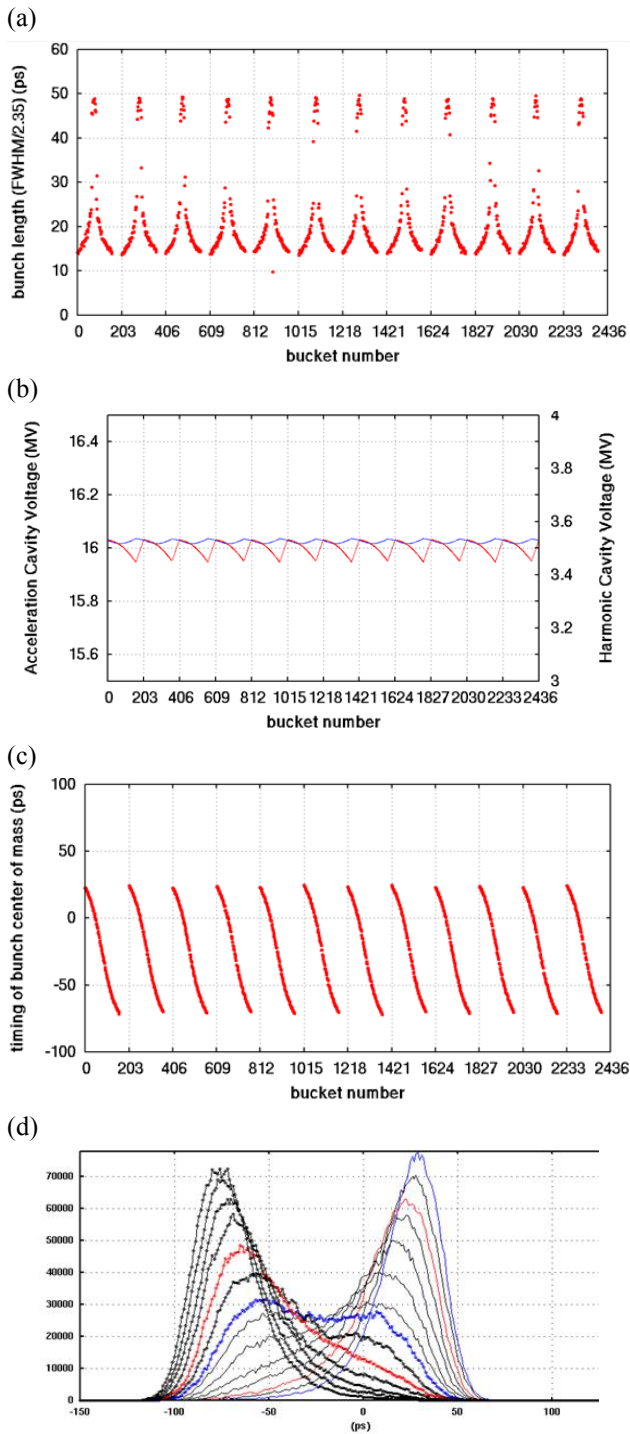


Figure 2: Tracking simulation when 160 bunch train x 12 (only even bucket) is stored with NC 508MHz cavities and SC 1-cell harmonic cavities

(a) Bunch length: Bunches in the head of the train lean into forward direction and vice versa. (b) Variation of fundamental (red) and harmonic (blue) cavity voltage along the bunch train, (c) Synchronous phase, (d) Longitudinal bunch profile in the train

ためである。トレイン内でのバンチごとのシンクロナス位相のずれは最大で 100ps であり、Figure 1

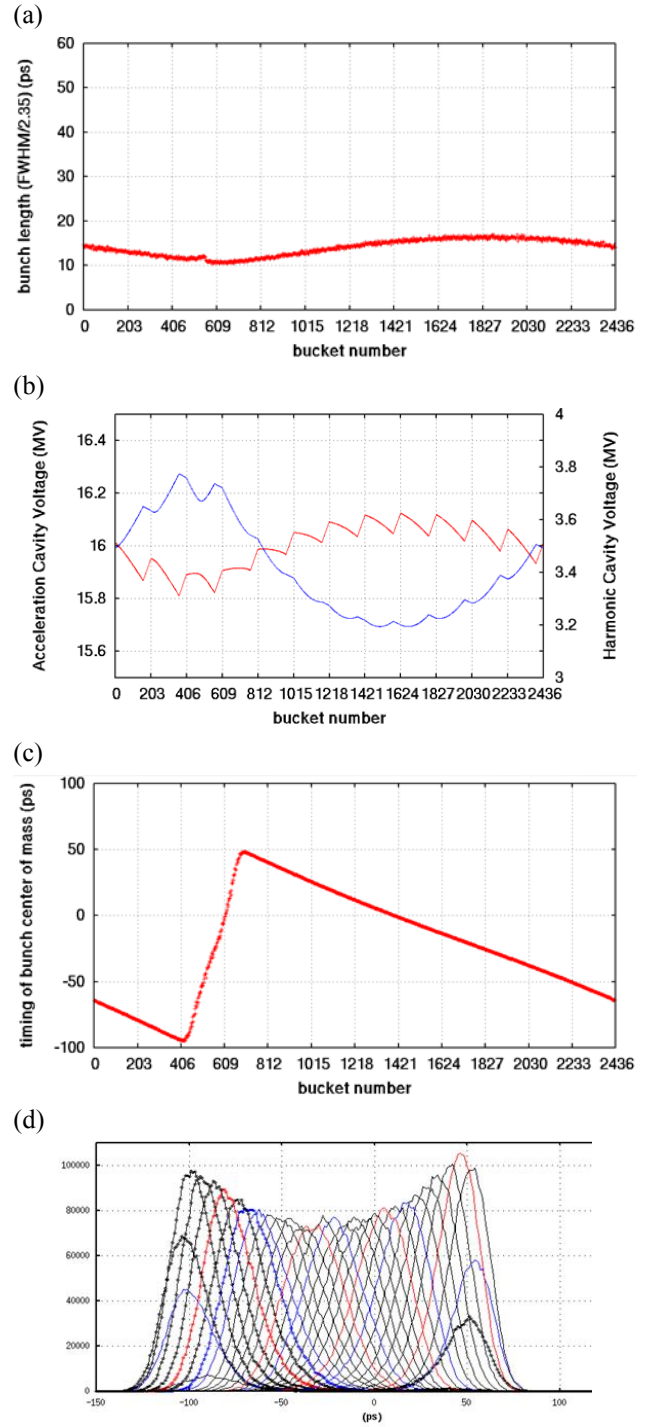


Figure 3: Tracking simulation when 160 bunch train x 12 (only even bucket) is stored with NC 508MHz cavities and SC 2-cell harmonic cavities

(a): Bunch length: All bunches are less than 20ps. (b) Variation of fundamental (red) and harmonic (blue) cavity voltage along the bunch train, (c) Synchronous phase, (d) Longitudinal bunch profile in the train

で示された位相のトレランスと比較して非常に大きな値である。

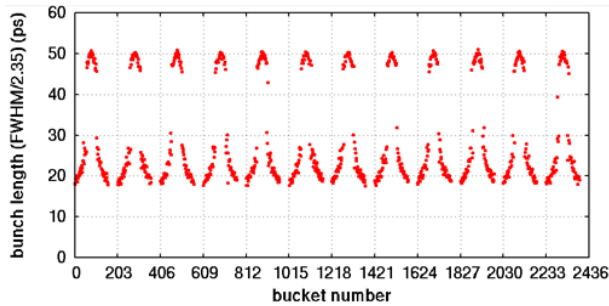


Figure 4: Tracking simulation when 160 bunch train x 12 (only even bucket) is stored with SC 508MHz cavities and SC 1-cell harmonic cavities

Figure 3 に case 2 の結果を示す。十分に伸長されたバンチは存在せず、空洞電圧がトレインの構造以外にリング 1 周の構造で変調され、またシンクロナス位相にもリング 1 周の構造が現れている。蓄積しているビームのフィリングパターンには 1 ターンの構造は無いが、理由は次のように考えることができる。高調波空洞の R/Q が大きいと必然的に Q 値が低くなるため、空洞のインピーダンスがブロードになっており、1 周回周波数だけ離れた周波数でも電圧を励起する。さらに、高調波電圧によりポテンシャルが著しく変形しているため、わずかな電圧によってバンチのシンクロナス位相が変化する。

こういったシンクロナス位相の構造が現れる閾値について、シミュレーションで調べたところ、トータルの R/Q 値が約 200 Ω以下であれば問題ないことが分かった。

Figure 4 に case 3 の結果を示す。基本波空洞も超伝導空洞とし、R/Q を下げることでバンチトレインの両端でも 20ps のバンチ長が得られた。しかし、超伝導空洞にすることで、基本波のトータルの R/Q が約 1/4 になったとしても得られるバンチ長としては大きな変化はない。

トレイン内のバンチ電流に勾配を持たせてローディングを緩和できないか調査したが、特に改善する解は見つかっていない。考えられる緩和策としては、ビームが誘起する電圧よりも十分高い電圧を発生させることであるが、加速器の効率的な運転も求められており、不必要に高い加速電圧で運転することは現実的な解決策ではないと考えられる。

Table 2: Cases of tracking simulation

case	基本波空洞	高調波空洞
1	NC	SC (1cell)
2	NC	SC (2cell)
3	SC	SC(1cell)

Table 3: Cavity parameters

parameter	R/Q	Q ₀	β (@300mA)	Ncav
NC 508MHz	124	221 Ω	2.9	24
NC 508MHz	90	2.7E8	8438	8
SC HC (1cell)	80	2390	3200	2
SC HC (2cell)	221	2.7E8	2390	2

4. バンチ伸長時のシンクロトロン振動

Case 1 においてバンチ長のシミュレーションを行った際、バンチ長がある程度以上長くなるとバンチ重心とバンチ長とが振動する現象がみられた。Figure 5 に高調波空洞の電圧を 1000 ターンごとに高くし、バンチ長を少しずつ伸長させた際の結果を示す。バンチ長が 30ps 以下であれば、バンチ重心、バンチ長ともに振動している様子は見られないが、30ps を超えたあたりから重心とバンチ長の両方が振動し始めた。また、振動はビーム不安定性のように指数関数的に成長するものではなく、一定の振幅になって安定であった。高調波電圧によってポテンシャルが著しくひずんでおり、シンクロトロン振動周波数そのものの同定が難しく、また、位相空間での粒子分布はその分布形状が複雑に変動していた。

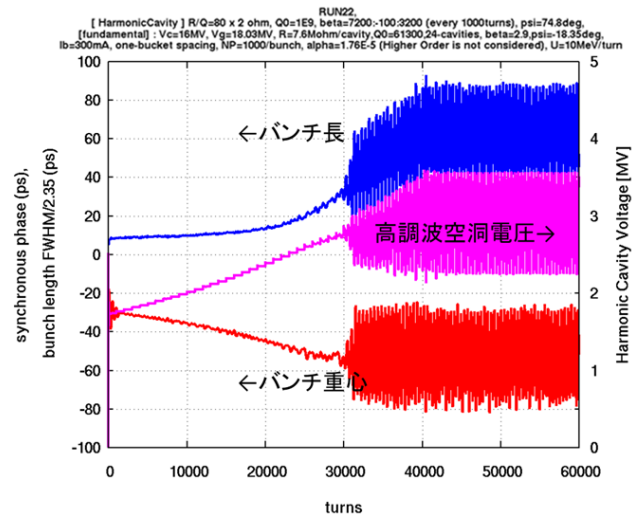


Figure 5: Synchronous phase and bunch length oscillation occurred w/o synchrotron oscillation feedback

この振動を抑制するためにシンクロトロン振動のフィードバックを試したが、大きくひずんだポテンシャルにおいては外力によって振動周波数が大きく変わってしまうため、位相振動からエネルギーキックを計算するフィードバックでは抑制することが困難であった。そこで、バンチのエネルギー振動を検出してそのままキックする方法を試したところ、バンチ重心とバンチ長の振動を抑制することができた。高調波電圧によってポテンシャルが大きくひずんでいること、高調波電圧をビーム自身が励起していること、シンクロトロン

チューンのスプレッドが非常に大きく、その平均値も 5×10^{-4} 程度でありが非常に遅いことがこれらの現象の原因であると考えられる。

5. まとめ

SPring-8 次期計画で検討している高調波空洞を用いたバンチ伸長について、遷移的なビームローディングの効果を考慮してトラッキングシミュレーショ

ンを行った。高調波空洞を低 R/Q の単セル超伝導空洞にし、シンクロトロン振動のフィードバックを行うことで、最大 50ps で 20ps 程度のバンチ長が得られることが確認できた。バンチ長が長くなった場合に生じるエネルギー振動の詳細なメカニズムは現象論的にしか理解できていないため、より有効な対策を含め、今後検討を進めていく。

参考文献

- [1] SPring-8 Upgrade Plan Preliminary Design Report
http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/spring-8_II/
- [2] A. Hoffmann and Myers, International Conference on High Energy Accelerators CERN, Geneva, July 7-11, 1980
- [3] N. Town, J. Rose, "Bunch Lengthening Harmonic System for NSLS-II", EPAC08, pp. 904-906