

# J-PARC RCS における奇数次のビームローディングによるビーム損失 BEAM LOSS CAUSED BY ODD HARMONICS OF BEAM LOADING IN J-PARC RCS

山本昌亘 <sup>\*A)</sup>、原圭吾 <sup>B)</sup>、長谷川豪志 <sup>B)</sup>、野村昌弘 <sup>A)</sup>、大森千広 <sup>B)</sup>、  
島田太平 <sup>A)</sup>、田村文彦 <sup>A)</sup>、戸田信 <sup>B)</sup>、吉井正人 <sup>B)</sup>

Masanobu Yamamoto <sup>\*A)</sup>、Keigo Hara <sup>B)</sup>、Katsushi Hasegawa <sup>B)</sup>、Masahiro Nomura <sup>A)</sup>、Chihiro Ohmori <sup>B)</sup>、  
Taihei Shimada <sup>A)</sup>、Fumihiko Tamura <sup>A)</sup>、Makoto Toda <sup>B)</sup>、Masahito Yoshii <sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup>KEK

## Abstract

A harmonic number of J-PARC RCS is two, and when all rf buckets are filled with bunches, the major parts of the beam Fourier components are the even harmonics. However, the particle tracking simulation suggests that the odd harmonics promote asymmetry on each bunch shape and they rapidly increase under some conditions. When the asymmetry becomes larger and larger monotonously, it causes severe beam loss. Furthermore, although the odd harmonics remain small amplitude, an amplitude modulation of them makes a beam halo and causes small beam loss. We describe the particle tracking simulation results to investigate the odd harmonics.

## 1. はじめに

J-PARC では、Linac の 400 MeV アップグレード及び 50 mA 増強の完了により、RCS において設計ビーム強度である 1 MW でのビーム調整が可能となった [1]。現状ではまだ供用可能なビーム損失レベルにはなっていないが、1 shot で 1 MW 相当の粒子数 ( $8.3 \times 10^{13}$  ppp) の加速に成功している [2]。

RCS では、ハーモニック数  $h = 2$  の RF バケツに 2 バンチを入れて 1 MW 相当の粒子数を加速しているので、ビーム電流の主なハーモニック成分は RF 周波数の倍数、つまりハーモニック数  $h$  で言えば偶数次 ( $h = 2, 4, 6 \dots$ ) となる。

図 1 に、1 MW 相当のビームを加速した際の、各ハーモニック成分の  $h = 6$  までのシミュレーションの例を示す。この計算では、ビームローディングがバンチに影響を与えないとして、通常の加速パターンでのバンチ形状の変化による影響を見ている。

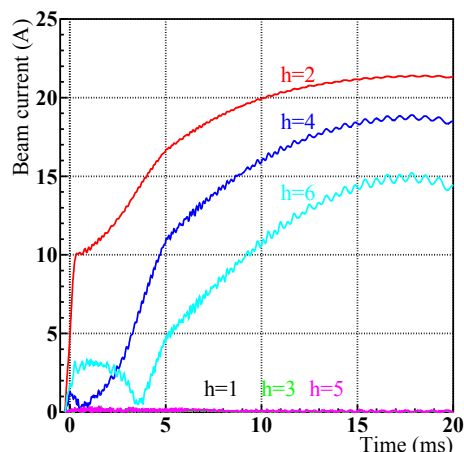


Figure 1: Each harmonic of the beam during the acceleration without the beam loading.

偶数次の成分が 10 A を超える電流値になるのに対して、奇数次については大きくても 0.3 A 程度と非常に小さいことが分かる。このため、大強度ビームを加速するにあたっては偶数次の成分のみに着目し、それをキャンセルすることによって安定なビーム加速を実現できると考えられてきた。

ところが、実際に 1 MW 相当のビームに対して  $h = 2, 4, 6$  の成分のみビームローディングを補償して加速をすると、顕著なビーム損失を起こすことが分かってきた。以下、奇数次のビームローディングによる影響を粒子トラッキングシミュレーションによって調べる。

## 2. 奇数次のビームローディング

### 2.1 加速パターン

400 MeV 入射にて 1 MW 相当のビームを加速する際のパラメータを表 1 に、加速パターンを図 2 に、またビームローディングや空間電荷効果がない状態でのエミッタンスとフィリングファクターを図 3 に示す。

Table 1: The Parameters of the RCS

Injection energy	400 MeV
Extraction energy	3 GeV
Harmonic number	2
Number of bunches	2
Number of particles	$8.3 \times 10^{13}$ ppp
Max. RF voltage	438 kV
RF frequency	1.228~1.672 MHz
Momentum compaction factor	0.0119798
Linac current	44.5 mA
Macro pulse length	500 $\mu$ s
Chopping width	489 ns

加速パターンは Linac が 50 mA 相当のビームを供給するとして、元々チョッピングが 435 ns のときにエミッタンスが 5 eVs になるように設計したが [3]、現状では Linac の電流値の制限があり、チョッピングが 489 ns で図 3 に示されている通りエミッタンスが 6 eVs 程度、フィ

\* masanobu.yamamoto@j-parc.jp

リングファクターが最大 90 %程度となっている。フィリングファクターが加速前半で少し低くなっているのは、バンチングファクターを改善するために 2 倍高調波をかけているためである。

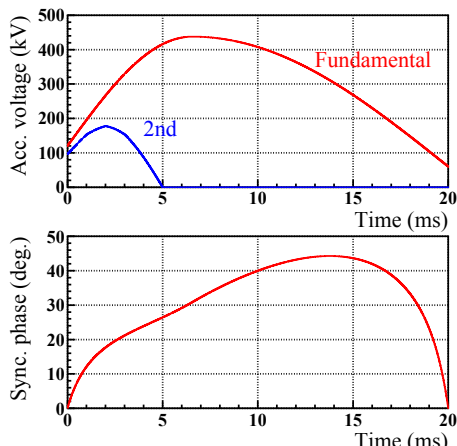


Figure 2: The acceleration voltage pattern of the RCS.

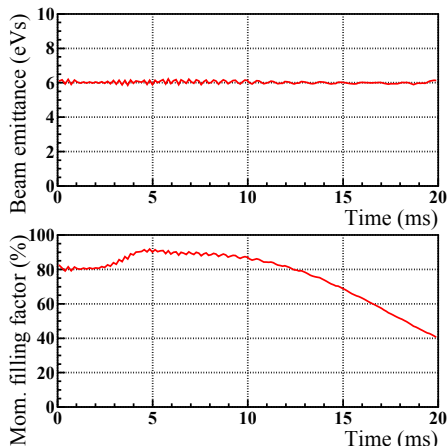


Figure 3: The beam emittance and the momentum filling factor during the acceleration.

## 2.2 ビーム損失を引き起こすハーモニック成分

図 4 にビームローディング及び空間電荷効果がバンチに影響を及ぼすとして、1 MW 相当のビームを加速した際のビーム損失の様子を示す。なお、後でその影響について述べるが、加速空洞の共振点を 2.1 MHz にして運転した場合の結果である。赤で示したものが、 $h = 2, 4, 6$  の成分についてビームローディング補償<sup>[4]</sup>を行った場合の結果である。入射が完了した直後の 1 ms 付近から、大きなビーム損失が発生していることが分かる。

緑で示したものが、 $h = 1, 2, 4, 5, 6$  の成分についてビームローディング補償を行った場合の結果である。この場合、 $h = 2, 4, 6$  の場合に比べてビーム損失がわずかに改善しているが、入射直後に大きく損失する様子については改善は見られない。

それに対して、青で示したものが  $h = 2, 3, 4, 6$  の成分についてビームローディング補償を行った場合の結果である。この場合ビーム損失がほとんど見られなくなるから、ビーム損失を引き起こしている主な原因は

$h = 3$  の成分であることが分かる。なお  $h = 7$  以上の成分については、大きなビーム損失には影響しない。

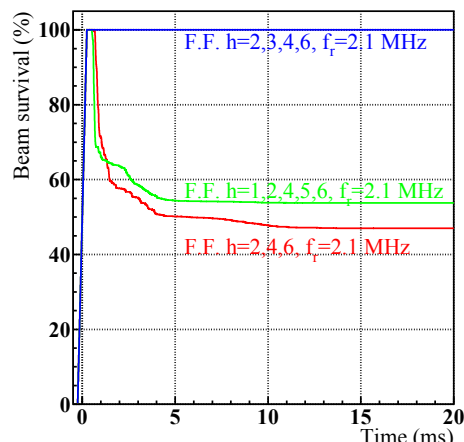


Figure 4: Beam survival rate under the beam loading during the acceleration.

$h = 2, 4, 6$  の成分についてビームローディング補償を行った場合に、ビームの各ハーモニック成分がどのように変化しているかを示したのが図 5 である。ビーム損失が起こる少し手前から  $h = 3, 5$  といった奇数次の成分が大きくなっており、このうち  $h = 3$  の成分が大きくなってきているのがビーム損失を引き起こしていると考えられる。

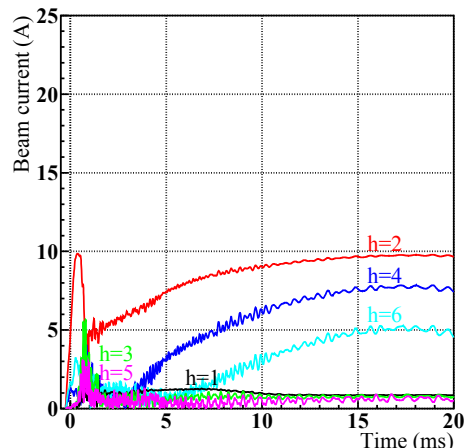


Figure 5: Each harmonic of the beam during the acceleration under the beam loading.

## 2.3 奇数次の位相

ここまで示してきた計算結果は、加速空洞の共振点が 2.1 MHz の場合の結果であるが、1 MW トライアルを行うに当たって、電源のトリップ対策として元々の共振点 1.7 MHz から変更した経緯がある<sup>[5]</sup>。共振点が変わった場合、ビーム損失の様子は大きく変わる。

図 6 に、 $h = 2, 4, 6$  の成分についてビームローディング補償を行った場合で、共振点が 2.1 MHz の場合 (赤) と 1.7 MHz の場合 (ピンク) についてビーム損失の様子を示す。共振点を 1.7 MHz にした場合については、奇数次のハーモニック成分をキャンセルしなくても、ビーム損失がほぼ無いことが分かる。

図7に、空洞インピーダンスの測定結果を示す。共振点が1.7 MHzの場合(赤)と2.1 MHzの場合(青)で磁性体の性質によりQ値やインピーダンスの最大値が少し違って来るが、 $h=3$ の成分について言えばインピーダンスの絶対値は同程度である。つまり、ビーム損失が大きく変わるのは、共振点の変更に伴いウエイク電圧の位相が変わることに起因していると考えられる。

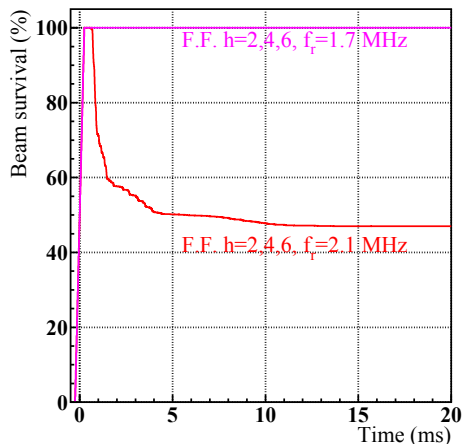


Figure 6: The comparison of the beam survival rate with respect to the cavity resonant frequency.

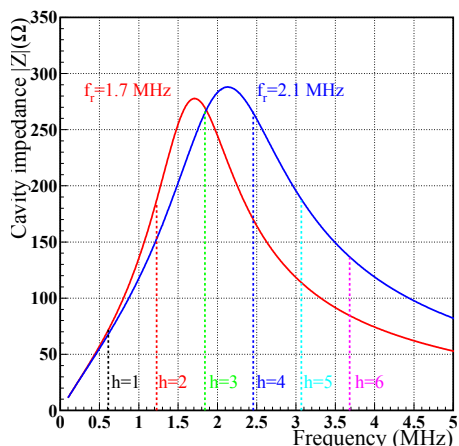


Figure 7: The measurement results of the cavity impedance.

図4のように、加速の初期の段階でビーム損失が起こっていることから、計算の結果を分かりやすく検証するため加速をしない運転モードでの計算を行った。電圧は基本波のみを120 kVかけ、ビームローディングについては $h=3$ のみが大きく影響しているとして、他のハーモニック成分及び空間電荷効果も考慮から外した。

また、実際のRCSではLinacからのビームを306ターンかけて入射しているが、これについても最初にRFバケツにマッチしたビーム分布を1ターン目に用意して、すぐにトラッキングを開始するようにした。初期のビーム分布を図8に示す。赤が1バンチ目で青が2バンチ目を示す。この初期分布の状態での各ハーモニック成分を表2に示す。偶数次に比べて奇数次が小さな状態であることが分かる。

図9に、 $h=3$ のハーモニック成分に対するウエイ

ク電圧の位相 $\phi_z$ をある値に仮定した場合のビーム電流及びウエイク電圧の振幅の変化を示す。 $\phi_z = -60$ 度の場合は振幅はほとんど増えていないが、 $\phi_z$ を60度に向かって変化させると振幅が増えていく。30度や60度の場合では1msにも達しない内に急激に増えていき、その電流値は $h=2$ の成分にも匹敵するくらいになる。

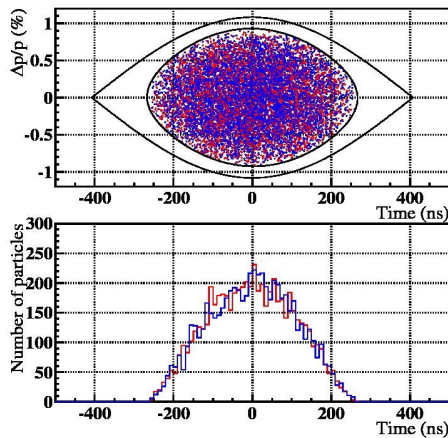


Figure 8: The initial beam distribution.

Table 2: Each Harmonic of the Beam for the Initial Beam Distribution

Harmonics	Amplitude
$h=1$	0.05 A
$h=2$	11.5 A
$h=3$	0.12 A
$h=4$	2.83 A
$h=5$	0.19 A
$h=6$	0.82 A

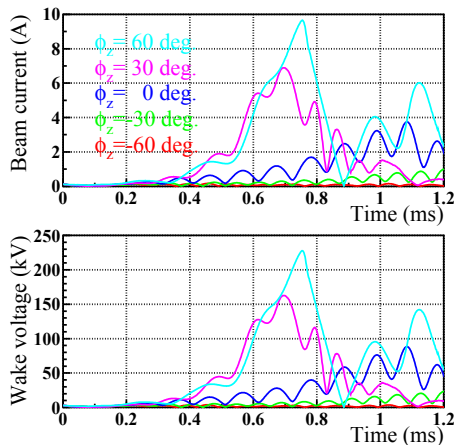


Figure 9: The growth of the  $h=3$  harmonic under the various phases of the wake voltage.

図10に $\phi_z=30$ 度の場合のビームエミッタンスの変形を示す。 $h=3$ のビームローディングを補償しなければ、1つ目と2つ目のバンチ間の形の非対称性が増していき、安定な加速は望めない状態となることが分かる。この現象は、ビーム不安定性のようなバンチの振動が

徐々に大きくなるものとは違って、RF バケツの歪みによるバンチ間の非対称性が単調に増えていくことで起こるビーム損失と考えられる。

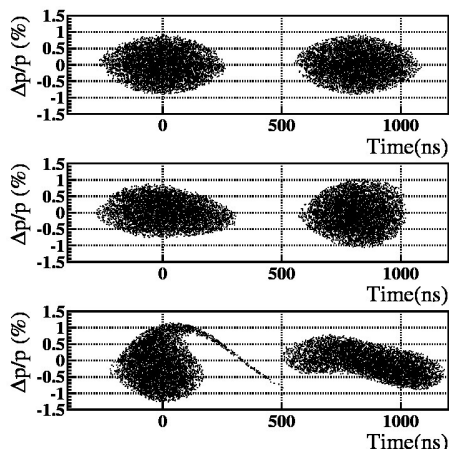


Figure 10: The deformation of the bunches under the  $h = 3$  beam loading.

これらの計算は加速しないモードでの計算結果であるが、図 6 の空洞共振点の変化によるビームの振る舞いの大きな違いも、このようなウエイク電圧の位相の違いによって引き起こされると考えられる。なお、入射時の周波数で  $h = 3$  の成分について、共振点が 1.7 MHz のときには  $\phi_z = -20$  度で共振点が 2.1 MHz のときには  $\phi_z = +20$  度である。

#### 2.4 奇数次の振幅変調

図 6 において、共振点を 1.7 MHz にした場合は、奇数次のビームローディングが存在する場合でもビーム損失がほとんど起こらないことを示した。しかし、全くビーム損失がないわけではなく、図 11 のピンクの線で示したフィリングファクターで分かるように、100%に達しているところがありビーム損失がわずかながら存在する。このビーム損失は、 $h = 1, 3, 5$  のビームローディングも補償した場合 (水色) には起きなくなる。

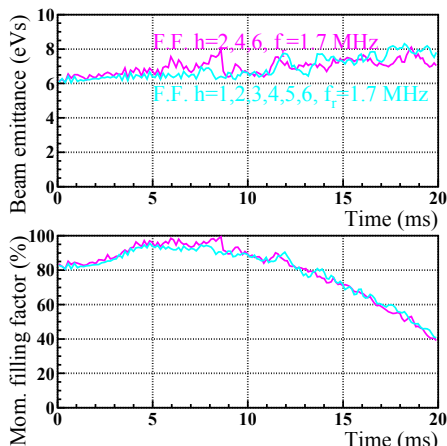


Figure 11: The beam emittance and the momentum filling factor during the acceleration with and without the odd harmonic beam loading.

図 12 に、 $h = 2, 4, 6$  のみビームローディング補償を行った場合の奇数次のハーモニック成分を示す。ビーム電流値としてはそれほど大きくないものの、振幅が変動する奇数次のビームローディングの影響をずっと受けていることが分かる。

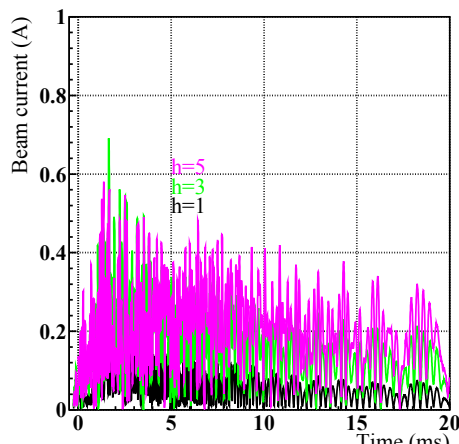


Figure 12: Each harmonics of the beam current during the acceleration under the beam loading of the odd harmonics at the resonant frequency of 1.7 MHz.

この状態について、前節で使用した加速しないモードで  $h = 3$  のみのビームローディングがある場合を使って調べてみた。 $h = 3$  の成分が増大しない  $\phi_z = -60$  度の条件で計算を行うと、 $h = 3$  のビーム電流値及びウエイク電圧は図 13 の赤線のようになり、加速中の計算である図 12 のような微小な電流値で振幅が変動している様子と同じ状況である。

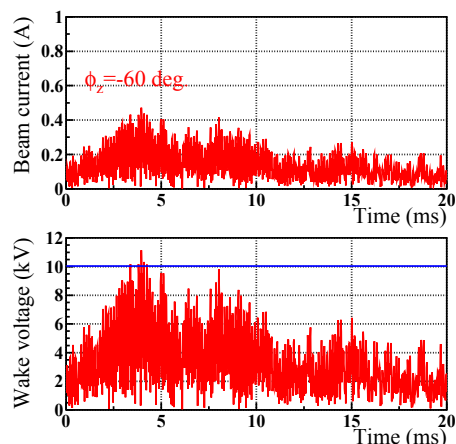


Figure 13: The  $h = 3$  harmonic under the  $\phi_z = -60$  degrees.

この状態でビームエミッタンスの変化を表示させたものが図 14 で、図 10 と違ってビームのコアの部分の形状は変わらないものの、ハロー成分が発生していることが分かる。

ちなみに、 $h = 3$  のウエイク電圧が振幅変調しないと図 13 の青線のように 10 kV 一定の電圧がかかったとして計算をさせてみると、エミッタンスは図 15 のように安定となる。つまり、 $h = 3$  成分の振幅変調により



エミッタンスの拡散が促され、ハローが形成されて微少なビーム損失に至っていると考えられる。なお、この振幅変調によるハローの形成については、 $h = 3$  以外の奇数次成分でも確認される。

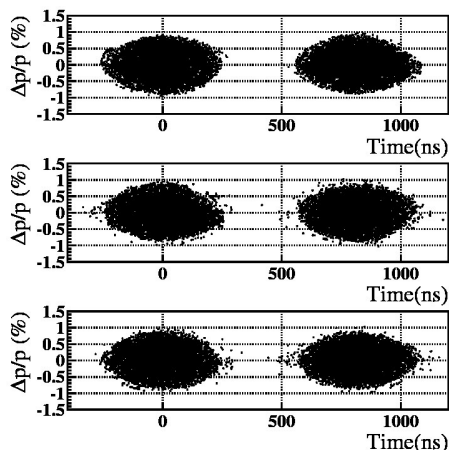


Figure 14: The halo formation under the small amplitude modulation of  $h = 3$  beam loading.

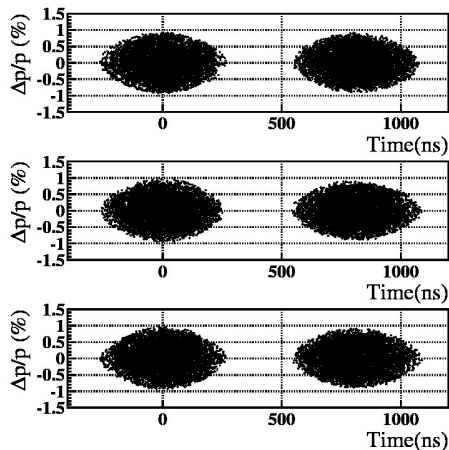


Figure 15: No halo formation without the amplitude modulation of  $h = 3$  beam loading.

### 3. まとめ

J-PARC RCSにおいて、ハーモニック数2のRFパケツに2バンチ入れた場合には、奇数次のハーモニック成分については微少な値なのでこれまであまり考慮されてこなかったが、奇数次のウエイク電圧の位相によってはバンチ間の非対称性が促進され、ひいては顕著なビーム損失を引き起こすことが分かった。また、奇数次のウエイク電圧の微少な振幅変調によってビームハローが形成され、わずかながらビーム損失につながる事が分かった。

これらのビーム損失は、奇数次についてもビームローディング補償を行うことで原理的には回避することができるはずであるが、どの程度の精度まで追い込まなければならないかは、今後の課題である。

### 参考文献

- [1] M. Kinsho, Proc. of IPAC 2015, THPF044 (2015).
- [2] H. Hotchi, Proc. of IPAC 2015, TUBB3 (2015).
- [3] M. Yamamoto *et al.*, 第7回日本加速器学会, WEPS047 (2010).
- [4] F. Tamura *et al.*, PRST-AB **14**, 051004 (2011).
- [5] H. Hotchi, Proc. of HB2014, MOXLR02 (2014).