

Longitudinal Particle Simulation for J-PARC RCS

山本昌亘^{1*}、絵面栄二³、長谷川豪志²、原圭吾²、堀野光喜⁴、野村昌弘¹、大森千広²、
シュナーゼアレクサンダー¹、島田太平¹、鈴木寛光¹、高田耕治³、高木昭²、田村文彦¹、戸田信²、
吉井正人²

¹JAEA J-PARC センター、²KEK J-PARC センター、³KEK、⁴日本アドバンステクノロジー

Abstract

The beam commissioning has been going at the J-PARC RCS. Some longitudinal beam gymnastics and the acceleration has been successfully performed under the high intensity operation. We had developed the longitudinal particle tracking code with the beam loading and the space charge effects. The comparison between the beam test result and the particle tracking simulation is described.

J-PARC RCS 縦方向シミュレーション

1. INTRODUCTION

J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS) は、実験施設及び Main Ring (MR) へのビーム供給を開始しており、ビーム強度増強を目指した加速器のビームスタディも同時に進行中である^[1]。RCS の運転パラメーターを表 1 に載せる。

Injection energy	181 MeV
Extraction energy	3 GeV
Harmonic number	2
Repetition rate	25 Hz
Acceleration period	20 ms
RF Frequency range	0.939~1.672 MHz
Momentum compaction factor	0.0119798

表 1: J-PARC RCS のパラメーター。

縦方向ビームダイナミクスについては、加速全域にわたってシミュレーションを行い検討している。

入射領域においては、空間電荷効果を抑えるためにバンチングファクターを大きくしなければならない。RCS の設計値である 8.3×10^{13} ppp を実現するためには、バンチングファクターが 0.4 程度が必要となる。RCS では Linac からのチョップされたビームをマルチターン入射によって入射しているが、マルチターン入射においてはバンチングファクターを解析的に予測することが難しいため、シミュレーションによってバンチングファクターを大きく保つ最適な入射条件を探すことが有力な手法となる。

また、取り出し時においては、RCS では各ユーザー向けに違ったバンチ形状を求められるが、RCS では加速後半にかけてシンクロトロン振動数が数百 Hz 程度と非常に小さな値となり、バンチ形状がバケツ形状の変化に追従しにくくなる。このような場合にも、シミュレーションを行うことで、取り出し時のバンチ形状を予測することができる。

本報告では、シミュレーションと実際のビームスタディの結果の比較を行う。

2. SIMULATION

シミュレーションコードは、縦方向ビーム運動の差分方程式を各粒子に対してトラッキングしていくもので、大強度ビーム向けに Wake 電圧や空間電荷効果も取り込んでビームのシミュレーションが行えるものとなっている^[2,3]。また、加速電圧パターンの周波数とシンクロナス粒子のエネルギーとビームの中心エネルギーの三者が全てずれている場合でも計算が容易になるように、シンクロナス粒子を前進差分法によって磁場から直接求める手法を採用している^[4]。

2.1 Beam loading

シミュレーションには Wake 電圧 V_b を含めることができる。Wake 電圧は、式 (1) のように空胴のインピーダンス Z_{cav} とビーム電流 I_b を周波数領域で掛け合わせ、それを式 (2) のように時間領域に戻して加速電圧に重畳させている。

$$V_b(\omega) = Z_{cav}(\omega) \times I_b(\omega) \quad (1)$$

$$V_b(t) = \sum_N V_b(N\omega_{rev}) e^{-iN\omega_{rev}t} \quad (2)$$

$(N = 1, 2, 3, \dots)$

Wake 電圧のビーム試験とシミュレーションの比較を行ったのが図 1 である。ビーム試験の条件は、粒子数は 2×10^{12} ppp、偏向磁場一定で加速を行っている状態でビームを入射し、20 ms の間周回させた後取り出している。Wake 電圧は、加速電圧を発生させていない空胴の電圧モニターで測定した。このとき真空管は動作状態に無く、空胴のインピーダンスのみで誘起される Wake 電圧の測定となる。

図 1 で、太い実線がシミュレーションであり、影状の線が測定結果である。空胴インピーダンスは、加速ギャップあたり 800Ω 、共振点は 1.65 MHz、 Q 値は 1.7 程度と、実際の空胴を想定して計算を行った。図 1 より、シミュレーションはビーム実験の結果を

* masanobu.yamamoto@j-parc.jp

よく再現していることが分かる。

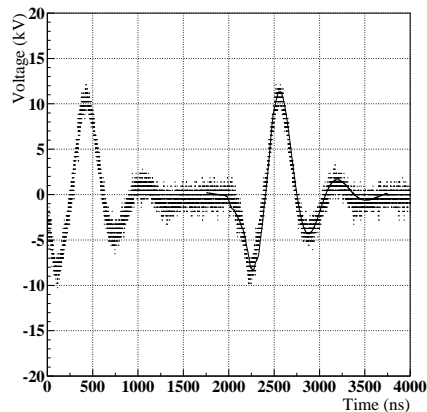


図 1: Wake 電圧のビーム試験とシミュレーションの比較。

2.2 Injection

Linac からの H^- イオンビームは、荷電変換フォイルで陽子に変換されてマルチターン入射で RCS へ入射される^[5]。RCS の RF 波長に対する Linac 中間バンチの長さの比 (チョッピングファクター) は 56% 必要で、RF パケツの時間方向の大半を Linac 中間バンチが占めることになる。このため、時間方向にも運動量方向にもペインティングをする余裕はほとんど無いが、中間バンチを RF パケツの中心だけで受け取っている、パケツの中心付近の電荷密度が非常に高くなってしまふ^[5]。

ペインティングによるバンチングファクターの改善が難しいため、2 倍高調波を加えてバンチ形状を平滑化することがまず考えられる。チョッピングファクターの大きなビームによるマルチターン入射の場合、基本波に対する 2 倍高調波の割合を 50% 以上にするのが有効であることがシミュレーションで示されている^[6]。さらに、シンクロナス粒子に対して RF 周波数に周波数オフセットを加えて、RF パケツの中で運動量方向にオフセットを加えた入射を行うことも有効であることも計算で示されている^[6]。

図 2 に、2 倍高調波を基本波に対して電圧比で 80% 加え、さらに -0.2% の運動量オフセットを加えた場合のシミュレーション結果を載せる。運動量オフセットは、入射開始から磁場のボトムまでは -0.2% 固定でかけておき、その後 1 ms で運動量オフセットをゼロにしている。

しかし、運動量オフセットを加えると、入射直後の 1/4 シンクロトロン振動後にバンチが細くなってしまふことが図 2 から見て取れる。これを緩和するために、2 倍高調波の位相スイープを導入している^[7]。これは、基本波に対する 2 倍高調波の位相差 ϕ_2 を、入射開始は大きくとって RF パケツを非対称にしておき、シンクロトロン振動によってビームエミッタンスがある程度均一になってくる頃に位相差をゼロに戻す手法である。このとき任意の粒子に加わる電圧は、

$$V = V_1 \sin \phi + V_2 \sin \{2(\phi - \phi_s) + \phi_2\}, \quad (3)$$

と表される。ここで V_1 は基本波の振幅、 V_2 は 2 倍高調波の振幅、 ϕ_s はシンクロナス位相である。図 3 に、2 倍高調波位相スイープを導入した場合のシミュレーションを載せる。入射直後のバンチが図 2 に比べてなだらかになっていることが分かる。

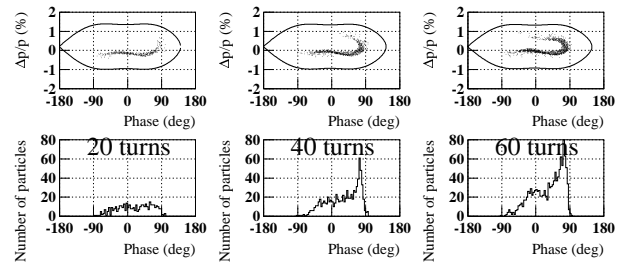


図 2: マルチターン入射のシミュレーション例。基本波に対して 80% の電圧比の 2 倍高調波を加え、さらに -0.2% の運動量オフセットを加えている。

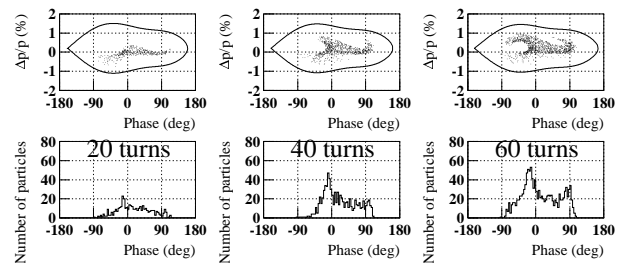


図 3: 図 2 に加えて、2 倍高調波の位相スイープを導入した場合のシミュレーション結果。

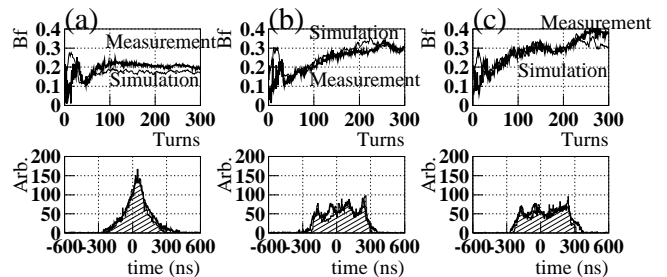


図 4: ビーム試験とシミュレーション結果の比較。(a) 基本波のみ、(b) 80% の 2 倍高調波と -0.2% の運動量オフセットを加えた場合、(c) (b) の条件からさらに 2 倍高調波位相スイープを加えた場合。

このシミュレーションとビーム試験の結果の比較を行った。ビーム試験は、取り出し時のビーム出力が 100 kW 相当、粒子数にして 8.3×10^{12} ppp で行われた。図 4 (a) は、基本波のみの場合、(b) は 2 倍高調波と運動量オフセットを加えた場合、(c) は (b) に加えて 2 倍高調波位相スイープを加えた場合である。それぞれの図で上の図は横軸に周回数、縦軸にバンチングファクター、下の図はマルチターン入射終了直後のバンチ波形を示している。バンチングファクターの図では、太線がビーム試験、細線がシミュレーション結果で、バンチ波形の図では、太線がビーム試験、影付きのヒストグラムがシミュレーションである。

シミュレーションは、ビーム試験結果と概ねよい一致を示している。ただし、入射直後については若干違いがあり、これは入射直後はビーム電流値が低いため、パンチ波形をモニターしている壁電流モニターの S/N 比がよくないことが原因として考えられる。

2.3 Extraction

J-PARC RCS は、実験施設と MR にビームを供給する。それぞれのビーム供給先に対して、RCS の取り出し付近で縦方向ビーム操作を行う。基準となる加速電圧パターンでは、ビームエミッタンスの不用意な増加を防ぐために、Momentum filling factor とビームエミッタンスを加速全域にわたって一定に保つようにしている^[8]。ただし、取り出し付近については、Relative beam loading が大きくなりすぎないように、取り出し電圧を調整している^[9]。図 5 (a) は、基準となる加速電圧パターンで加速全域にわたってシミュレーションをした場合のパンチ波形である。

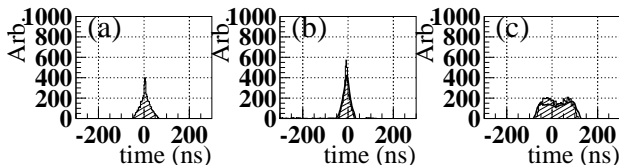


図 5: 取り出し時のパンチ波形の、シミュレーションとビーム試験の比較。

ミューオン実験向けに、短パンチを取り出すビーム試験を行った。手法としては、取り出し前の 1/4 シンクロトロン振動分だけ、加速電圧を上げて、位相空間でビームエミッタンスを回転させるものである。図 5 (b) に、短パンチのビーム試験結果とシミュレーションの比較を載せる。太線がビーム試験で影付きのヒストグラムがシミュレーションである。この場合のビーム試験の条件は、粒子数は 1.64×10^{12} ppp で、Linac から入射されるマクロパンチ長は $100 \mu\text{s}$ である。通常に取り出し電圧が 60 kV であるところに対して、短パンチ試験では、取り出しの 0.4 ms 手前で 180 kV に電圧を上げている。シミュレーションの結果はビーム試験の結果とよく合っており、基準となる加速電圧パターンで、取り出し時に 120 ns だったパンチ幅が、短パンチ試験では 80 ns となっている。

MR の入射に向けては、MR の入射領域での空間電荷効果を緩和するために、平滑化されたビームを供給する。これを実現する手法としては、取り出し付近で 2 倍高調波をかけることが有効である。図 5 (c) に、MR 向けのビーム試験結果とシミュレーションの比較を載せる。この場合のビーム試験の条件は、粒子数が 8.3×10^{12} ppp となっている。2 倍高調波は、取り出しの 2 ms 手前から加え始め、 1 ms 手前で基本波に対して 50% の振幅になるようにし、そのまま取り出し時まで 50% の振幅を保つようにしている。シミュレーションはビーム試験結果と若干違っており、これはビームローディングの効果が現れているものと考えられる。

シミュレーションにはビームローディング効果を

入れることができるが、真空管動作時にビームが見る空洞インピーダンスをまだ正確にはシミュレーションに反映できておらず、また ALC のようなフィードバックについても未検討である。その結果ビーム試験との間で、若干の違いが出ているものと考えられる。

3. SUMMARY

J-PARC RCS の縦方向ビーム運動について、シミュレーションとビーム試験の結果について比較を行った。入射領域や Wake 電圧の評価においては概ね良い一致をみたが、ビームローディングの影響が出てくるビーム強度での加速全域にわたるシミュレーションについては、まだ改善する必要がある。

参考文献

- [1] H. Hotchi *et al*, “Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 040402 (2009)
- [2] M. Yamamoto *et al*, “Beam Loading in JHF 50 GeV Proton Synchrotron, Proc. of 11th Symp. on Acc. Sci. and Tech. in Japan, p.277, 1997
- [3] M. Yamamoto *et al*, “Beam Loading Effects in JHF Synchrotron”, Proc. of APAC98, p.399, 1998
- [4] M. Yamamoto *et al*, “Acceleration Voltage Pattern for J-PARC RCS”, Proc. of EPAC08, p.379, 2008
- [5] M. Yamamoto *et al*, “Longitudinal Particle Simulation for J-PARC RCS”, Proc. of 5th Part. Acc. Soc. Japan, p.358, 2008
- [6] M. Yamamoto *et al*, “Longitudinal Beam Dynamics on 3 GeV PS in JAERI-KEK Joint Project”, Proc. of EPAC02, p.1073, 2002
- [7] F. Tamura *et al*, “Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltages in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 041001 (2009)
- [8] R. Baartman, “Efficient Numerical Technique to Find Bucket”, TRI-DN-K226, 1993
- [9] The Joint Project Team of JAERI and KEK, “The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators”, JAERI-Tech 99-056 or KEK Report99-4, 1999.