

J-PARC MR でのウェイク場の時間構造の調査

THE INVESTIGATION ON THE TIME STRUCTURE OF THE WAKE FIELD AT THE J-PARC MR

小林愛音、外山毅、佐藤洋一、五十嵐進、吉井正人、杉山泰之

Aine Kobayashi*, Takeshi Toyama, Yoichi Sato, Susumu Igarashi, Masahito Yoshii, Yasuyuki Sugiyama
 KEK/J-PARC

Abstract

For higher beam power, evaluating the impedance with multi-bunch is necessary at the J-PARC MR. The imaginary part of the impedance, the betatron tune shifts induced by the space charge effects were estimated and the quantitative evaluation is on-going. Understanding on the dependence of the bunch distant is one of the keys to impedance model reconstruction. The investigation on the time structure of the wake field is discussed in this report.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の主リング (MR) ではビームロスの削減が大強度化に必要である。マルチバンチでのベータatronチューンシフトの振る舞いに着目し、シフト量を補正することで、ビームロスを抑えビーム強度を上げることができた。大強度ビーム加速に影響するインピーダンスの理解のため、マルチバンチでの強度・バンチ数・バンチングファクター依存性を測定した。定性的には、MRの主要横方向インピーダンス源 [1] である空間電荷効果 [2,3] と抵抗性壁効果 [4,5] をもとにしたモデルで現象の理解はできているが [6]、定量的理解と評価のために、多粒子モデルシミュレーションによるインピーダンス源の評価を進めている。

2. MR のチューンシフト

MR はハーモニック数 9 で、8 バンチまで入れることができる。モデルと実際の条件との違いの一つとして、理論式ではバンチ間隔が均等であることが仮定されている。バンチの分布が変わるとチューンシフトの傾きが変わるのかを調べた。Figure 1 に示すように 3 バンチを用いて詰めるパターンを均等または連続と変えてチューンシフトを測定すると傾きが異なることを観測した [7]。モデルとの比較のため均等に詰めた条件で行った (Fig. 2 (a), (b))。Model L は Laslett の式 [2,3] から、Model S と C はそれぞれは抵抗性壁効果 [4,5] の式を元に作った。ここで、MR の周長 35 % を占める偏向電磁石のダクト断面の形状は楕円形、残りは円形と近似した。ダクトの材質はステンレススチールである。さらに仮に 9 バンチ詰めた場合の傾きを Fig. 3 から外挿して求めモデルと比較した (Fig. 2(c), (d))。

3. ウェイク場の減衰

次章で述べるシミュレーションの準備として、ウェイク場がどれくらいで減衰するかを見積もる必要が

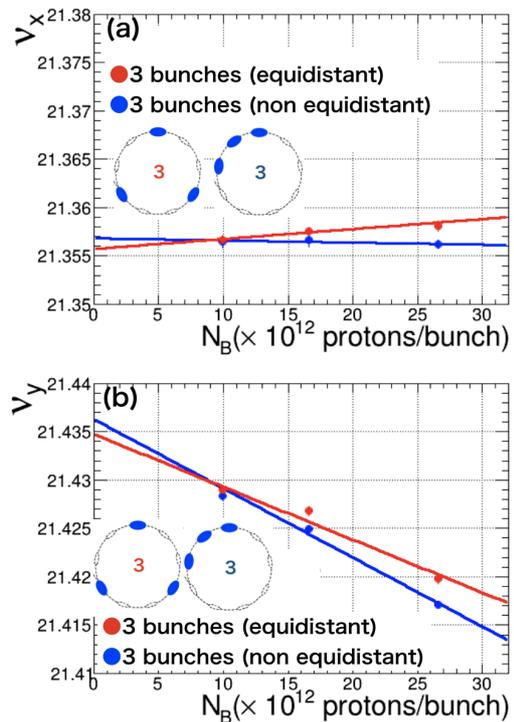


Figure 1: Tune shift slopes for two filling patterns in the horizontal (a) and vertical (b) planes.

ある。

ウェイク場の減衰を調べるための実験を行なった。RCS から MR に入射される 2 バンチの前後をバンチあたりの粒子数を変える操作 [8] を行いそれぞれのバンチの強度の比を 16 : 1 にした。強度の大きいバンチを source、小さいバンチを witness と呼ぶことにし、witness は source からのウェイク場の影響を受けるとする。強度の比は逆にすることもできるため、Fig. 4 に表すように witness から見た source までの距離を 1 バケツ分、または 8 バケツ分とできる。Figure 5(a) に典型的な信号を示す。測定器 iGp12 [9] を用いて測定した。1 turn を 576 スライスして波形

* aine.kobayashi@kek.jp

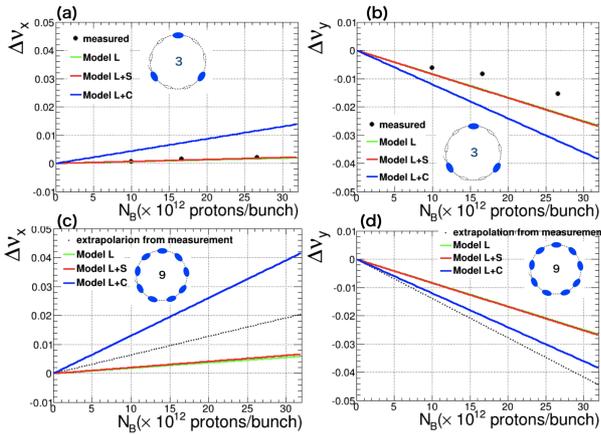


Figure 2: Measured (dots) and modeled (lines) tune shifts for three equidistant bunches in the horizontal (a) and vertical (b) planes. The extrapolation from measured (dashed) and modeled (solid) tune shifts for nine equidistant bunches in the horizontal (c) and vertical (d) planes. Model L represents the model based on space charge effects. Models S and C are resistive wall effects based on Shobuda *et al.* and Chao *et al.*, respectively.

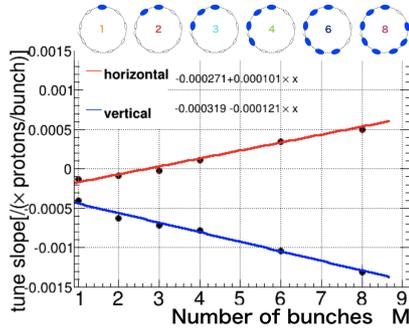


Figure 3: Measured tune shift slopes as a function of the number of bunches with fitted lines. The sign of the tune shift slope for horizontal and vertical planes were opposite.

を記録しており、1 バンチ分は 64 スライスある。それぞれのスライス毎に、Blackman-Harris 窓関数を適用し fast Fourier transform (FFT) を行い、バンチ毎のチューンを求めた (Fig. 5(b))。Source からの witness の差が tune shift である。

ここで、主要インピーダンス源である抵抗性壁効果を用いて時間変化の減衰を考える。実測に近く表現している理論 [5] の Eq. (21) を用いた。この式で今 $n = 0$ の 1 バンチのときを考えれば良いので、横方向ウェイク場は、

$$W_{\perp}(s) = 2 \frac{cZ_0\rho_0}{\pi b^2 d} \cdot \vartheta_2(0, e^{-\alpha s}) \cdot D_{\perp} \quad (1)$$

と楕円テータ関数 ϑ_2 で表すことができる。c は光速、 Z_0 は真空のインピーダンス 376.7Ω 、 ρ はダクトの材質の伝導率である。 $\alpha = \pi^2 \rho_0 / d^2$ とした。 D_{\perp} は元の論文 [5] の Eq. (17) にある source particle と witness

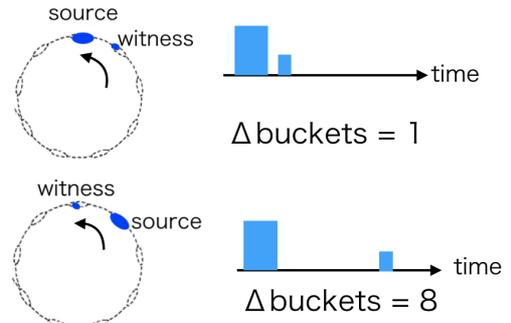


Figure 4: The schematic view of the experimental condition with two different distances between source and witness bunches.

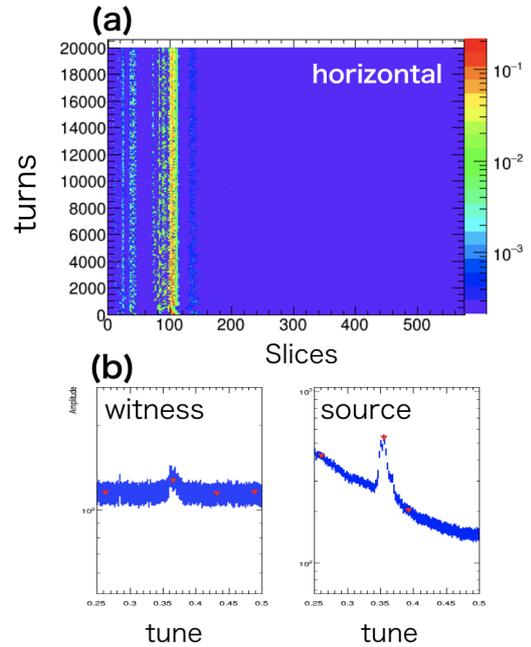


Figure 5: Typical row signal measured with iGp12 (a) and tune spectra for each bunches (b).

particle が dipole ウェイクと quadrupole ウェイクから受ける力の項であり、これは実質チューンシフトに関連している。

この Eq. (1) と、実際の測定 (Fig. 4) で得たチューンシフト量との比較が Fig. 6 である。係数は考察中だが、傾向が説明できることがわかる。

したがって、Eq. (1) より、ウェイク場がどれくらいで減衰するかを見積もることができる。Equation (1) は Fig. 7 の青線で表されている。約 500 以下では $1/\sqrt{e^{-\alpha s}}$ 、離れると $e^{-\alpha s/4}$ でそれぞれ表すことができる。MR 1 周で 1567.5 m であり、例えば 0.1% 以下になるのは 4 周あれば十分であると見積もられる。後の章で述べるシミュレーションでは 5 周と 10 周と比較しほぼ変化はなかったため、定常状態になっていると考えられる。

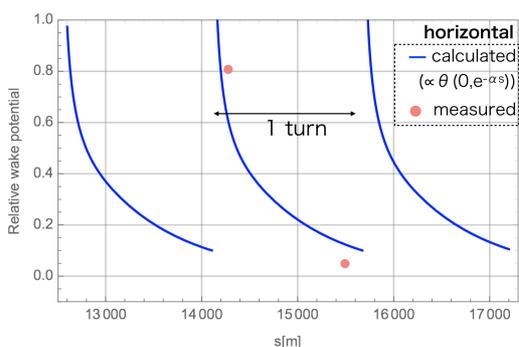


Figure 6: Relative wake decay of the measurement and model. It is scaled to compare the tendency. The coefficients are under estimation.

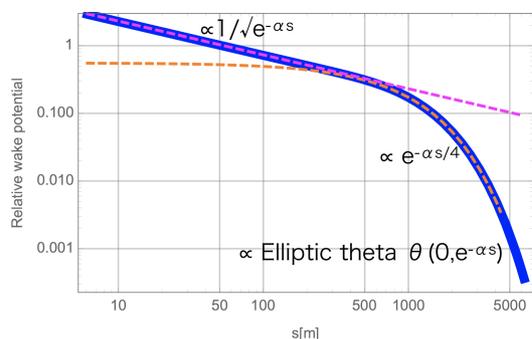


Figure 7: The distance dependence of the wake function.

4. 多粒子モデルのシミュレーション

シミュレーションツールとして PyHEADTAIL [10] を用いた。抵抗性壁インピーダンスは今回は B. Yee-Rendon 氏が IW2D [11] で計算した結果を引用した [12]。インピーダンスモデルは Fig. 8 に示す。本

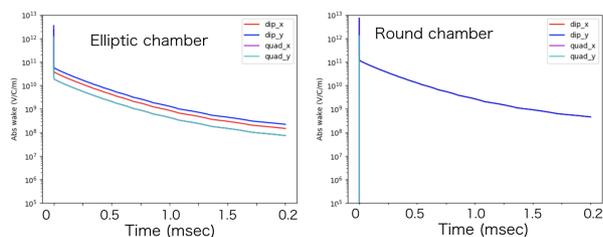


Figure 8: Wake field of the elliptical chamber (a) and the round chamber (b). In the round chamber, the wakes in the x and y planes are the same value due to the symmetrical geometry.

研究に適用するために、マルチバンチの効果を入れ、設定値を実際のビーム条件に近づけた。

Figure 9 は、single bunch での tune shift のシミュレーション (破線) と測定 (実線) の比較である。同様に 3 バンチで、Fig. 1 に示したようなバンチの詰め方の違いが見えるかのシミュレーションを行なった (Fig. 10)。概ね合っているが、定量的には考察中

である。また、垂直方向が特に合わないのでシミュレーション条件の見直しを行う。

現在のところ、Fig. 11 に示すようにダクト断面毎のチューンシフト (a) や、ウェイク場の種類毎 ((b) では dipole wake 場による寄与) のチューンシフトが計算できる。今後ウェイク場源の要素毎の評価を行い、定量的なインピーダンスの導出の準備を進める。

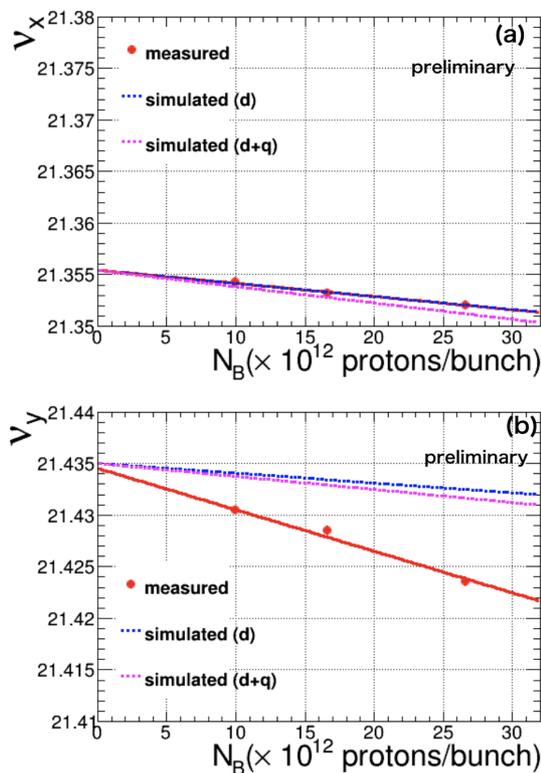


Figure 9: Preliminary results of the tune shift simulation (dashed lines) and measurement (solid lines) with single bunch for horizontal (a) and vertical (b) planes. The blue and magenta dashed lines show the component of the dipole and quadrupole wake fields, respectively.

5. キッカーインピーダンス

他の MR の横インピーダンス源の候補として挙げられているのはキッカーである。入射キッカー 2 台、取り出しキッカー 5 台ある。過去に測定された FX キッカーのレゾナンス周波数はビームの周回周波数の整数倍の中間に位置しているので、その効果は小さい [13]。PyHEADTAIL によるシミュレーションでチューンシフトは見られず、今後詳細を CST PARTICLE STUDIO [14] 等も用いて調べることにする。

6. まとめ

J-PARC MR の大強度ビーム加速に影響するインピーダンスを評価するために、マルチバンチのチューンシフトを測定しモデルと比較した。ウェイク場の

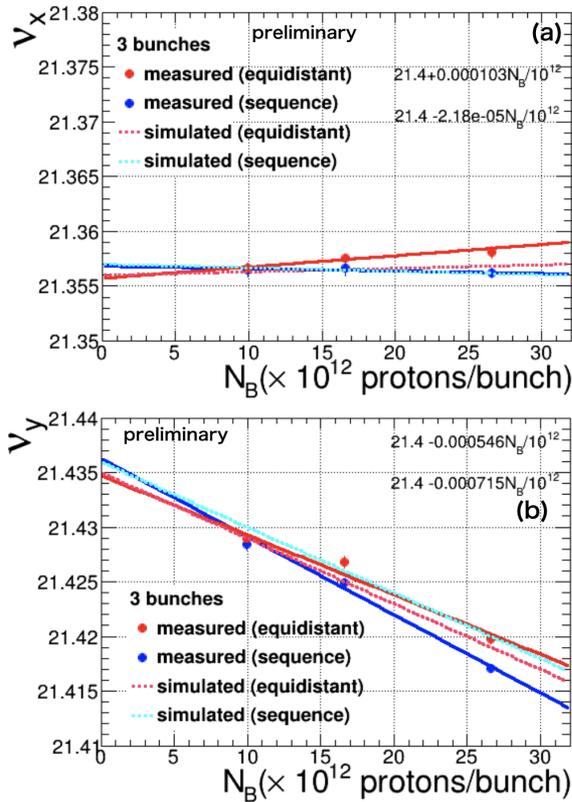


Figure 10: Preliminary results of the tune shift simulation (dashed lines) and measurement (solid lines) with three bunches for horizontal (a) and vertical (b) planes. Two different bunch filling patterns, equidistant (red) and sequence (blue) are shown. The difference can be seen in the simulation, but it is under discussion. The previous 5 turns are enough for including the wake in the calculation, but figure (b) shows includes the result of previous 1 turn due to large discrepancy.

減衰を測定し、抵抗性壁効果の理論式と測定を比較した。多粒子モデルシミュレーションを行い、ウェイク場の寄与やバッチの分布による違いについて調べた。理解と評価の準備を進めている。

さらにインピーダンスの実部であるインスタビリティの測定とシミュレーションを行い、インピーダンスの評価を進める。

謝辞

昨年の加速器学会の発表ではマルチバッチのチューンシフトは2バッチずつの測定であったが、陳榮治氏の質問により1バッチ毎に測定すること、およびウェイクの積み重ねの様子を考察する方法の助言をいただいた。大見和史氏と菖蒲田義博氏からはこれまでチューンシフトやウェイク場についての助言をいただいた。田村文彦氏には、RFの操作や測定についての助言をいただいた。Michael Schenk氏、Bruno Salvant氏にはPyHEADTAILの使い方、特にマルチバッチとウェイク場長さの取り扱いについて

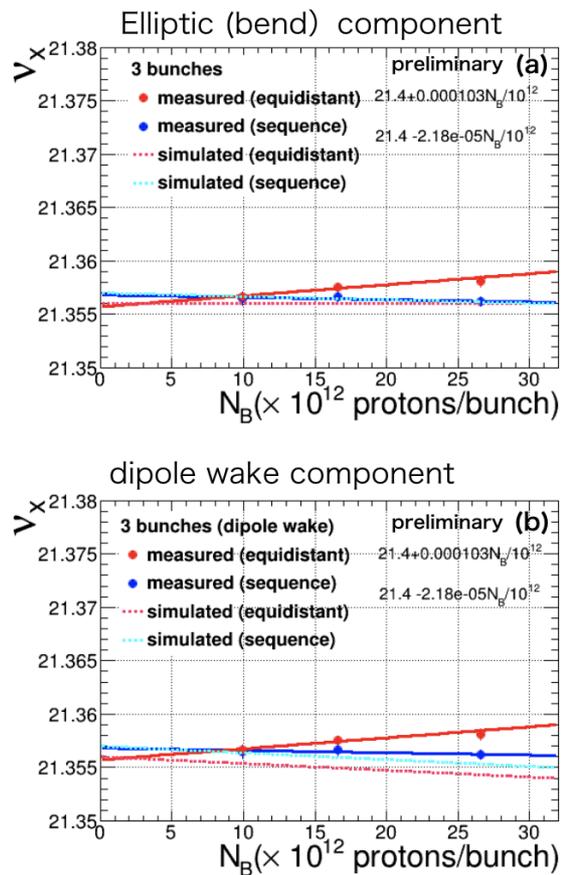


Figure 11: Preliminary results of the tune shift by the elliptical cross-section component (a) and the dipole wake component (b).

助言をいただいた。他にも、議論や実験に協力していただいた関係者の皆様に大変感謝申し上げます。本研究はJSPS 科研費JP18H05537の助成を得たものです。

参考文献

- [1] Y.H. Chin, "Impedance and Beam Instability Issues at J-PARC Rings", HB2008, Nashville, Aug 2008, WGA01, p.40; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HB2008/papers/wga01.pdf>
- [2] L.J. Laslett, "On intensity limitations imposed by transverse space-charge effects in circular particle accelerators", Proceedings of the 1963 Summer Study on Storage Rings, Accelerators and Experimentation at Super-High Energies, N.Y., BNL, 10 Jun. -19 Jul., 1963, pp. 324-367; <http://lss.fnal.gov/conf/C630610/p324.pdf>
- [3] B.Y. Ng, "Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities", World Scientific Pub Co Inc, 2006.
- [4] A. Chao, S. Heifets, and B. Zotter, "Tune shifts of bunch trains due to resistive vacuum chambers without circular symmetry", Phys. Rev. A. B. **5**, 111001, Nov. 2002; <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.5.111001>
- [5] Y. Shobuda and K. Yokoya, "Resistive wall impedance and

- tune shift for a chamber with a finite thickness”, Phys. Rev. E **66**, 056501, Nov. 2003; <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.66.056501>
- [6] A. Kobayashi *et al.*, “Bunch train tune shift study for higher beam power at J-PARC MR”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 60-64; <http://www.pasj.jp>
- [7] A. Kobayashi *et al.*, “Studies on coherent multi-bunch tune shifts with different bunch spacing at the J-PARC main ring”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, 19-24 May. 2019, pp. 167-170; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPGW036>
- [8] F. Tamura *et al.*, “Development of the beam chopper timing system for multi-turn injection to the J-PARC RCS”, Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007.; <https://ieeexplore.ieee.org/document/4441171>
- [9] Dimtel iGp12 homepage; <https://www.dimtel.com/products/igp12>
- [10] E. Métral *et al.*, “Beam instabilities in Hadron Synchrotrons”, IEEE Transactions on Nuclear Science, **63**, 2, Apr. 2016, pp. 1001-1050.; <https://ieeexplore.ieee.org/document/7445885>
- [11] N. Mounet, “The LHC transverse coupled-bunch instability”, PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2012.
- [12] B. Y. Rendon *et al.*, “Updated model of the resistive wall impedance for the main ring of J-PARC”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver BC, Canada, 29 Apr. - 4 May., 2018, pp. 3204-3206; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAK002>
- [13] T. Toyama, “Coupling impedance (ZL, ZT) measurements with the wire method”, 2014, internal document.
- [14] CST - Computer Simulation Technology homepage; <https://www.cst.com/products/cstps>