

J-PARC MRにおける4極キッカーと ストリップラインピックアップによるビーム応答測定 MEASUREMENT OF BEAM RESPONSE FOR THE QUADRUPOLE KICKER WITH THE STRIPLINE PICKUP IN J-PARC MR

中西芳枝^{#, A)}, 外山毅^{B)}, 岡田 雅之^{B)}, 小関 忠^{B)}, 久保木 浩功^{B)}, 仲村佳悟^{A)}, 中家剛^{A)},
市川温子^{A)}, 南野 彰宏^{A)}
Yoshie Nakanishi^{#, A)}, Takeshi Toyama^{B)}, Masashi Okada^{B)}, Tadashi Koseki^{B)}, Hironori Kuboki^{B)},
Keigo Nakamura^{A)}, Tsuyoshi Nakaya^{A)}, Atsuko Ichikawa^{A)},
^{A)} Kyoto University
^{B)} KEK

Abstract

In high intensity proton synchrotrons, linear and nonlinear betatron resonances cause beam loss. When the betatron tune spreads over a resonance line, the oscillation amplitude will get larger, causing a large beam loss. Our study aims for a direct measurement of the betatron tune spread by using a quadrupole kicker and a 4-electrode monitor. The monochromatic rf signal is inputted to the kicker and we induce an oscillation by kicking the beam. The amplitude of the quadrupole oscillation will depend on the number of particles having a certain tune. In the beam test at J-PARC MR, the dipole kicker was used as a quadrupole kicker by exciting the two facing electrodes in-phase. We measured the response to the kick at several frequencies. We observed that the amplitude depends on the kicker frequency and the number of particles per bunch. This indicates that the quadrupole oscillation can be induced by a kicker and the possibility of measuring the number of a particular tune particle from the response. This paper describes the result of the beam test and our prospect.

1. はじめに

大強度陽子ビーム加速器、J-PARC main ring synchrotron (MR)では、現在ビームロスによるビーム出力の制限を最小限にとどめるための様々な取り組みがなされている[1,2]。ビームロスの原因の一つとして考えられているのは、空間電荷効果によるインコヒーレントチューンスプレッドである。チューンの広がり共鳴線に触れると、ビームの振動振幅が増大する。現在、J-PARC MRでは、チューンの広がりをシミュレーションによって算出しており、直接測定していない。チューンスプレッドを測定によって知ることができれば、より適正な運転パラメータを決めることができる。

われわれは、チューンスプレッドの直接測定を目標とし、4極キッカーに対するビームサイズ応答を測定した。

2. 測定原理・方法

入射ミスマッチや、誤差磁場の影響などで、理想的なビームの制御ができていない場合、ビームはわずかに4重極振動しながらリング内を周回し始める。そして、徐々に広がり、より大きなビームサイズの定常状態になる。この定常状態に対して、単色周波数のノーマル4極の外力を加えることで、振動を誘導させる。

4重極振動の共振周波数と粒子固有のベータatronチューンは、近似的にで(1),(2)のような関係であらわされる[3]。

$$2v_x = n_x \pm f_{RF}/f_{rev} \quad (1)$$

$$2v_y = n_y \pm f_{RF}/f_{rev} \quad (2)$$

ただし、 $v_{x(y)}$ は $x(y)$ 方向のベータatronチューン、 $n_{x(y)}$ は整数、 f_{RF} はキッカーのRF周波数、 f_{rev} はビームの周回周波数である。

本測定では、Table 1のような陽子ビームを使用し、4極キッカーで単色周波数の収束・発散力を加えた。キッカーは、Figure 1のように真空パイプに対向する2枚の電極から構成されている。普段ダイポールキッカーとして使用しているものを4極キッカーとして代用した[4]。ダイポールキッカーとして用いる時は、2つの電極に逆位相のRFパワーを送ることで、ビームに横一方向の力を加えることができる。一方で、4極キッカーとして用いる場合には、電極に同位相の信号を送る。本測定では、Horizontal方向に電極が付けられている3連のストリップラインキッカーを使用した。

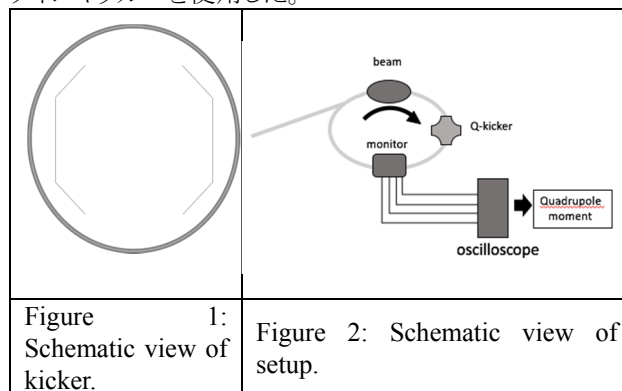


Figure 1: Schematic view of kicker.

Figure 2: Schematic view of setup.

[#] yoshie@scphys.kyoto-u.ac.jp

ビームがキッカーを通ると、式(1),(2)を満たすチューン

の粒子の4重極振動が励振される。本測定では、4電極ピックアップを用いて、ビームの4重極モーメントを測定し、その周波数スペクトルを観測した。使用したピックアップはテーパードカプラー型 BPM である[5]。

本測定でのキッカーの設定値を Table 2 にまとめた。入射直後のビームは入射ミスマッチの影響があるため、キック開始のタイミングは、ビーム入射1秒後とした。キッカーへの信号の入力には、Figure 3 のような回路を組んだ。パワースプリッター Mini-circuits ZFSC-2-6+は同位相の信号を出力するものを用いた。シグナルジェネレータは Tektronix 製の AFG3252 を用いた。シグナルジェネレータからの信号を増幅するためのアンプに R&K A101 K101- 6565R RF Power Amplifier を用いた。また、キック開始 0.04 秒前から 0.2 秒間、オシロスコープ LECROYHDO6104-MS でデータを取得した。サンプリングレートは 2.5×10^8 Hz、ADC bit 数は 12bit である。アテネータは、Bird Electronic Corporation 製の 8329-300 w/Blower を用いた。

データの測定は同じ条件下、つまりバンチ内粒子数やキッカーの周波数を変えずに3度測定を行った。さらに、バンチ内粒子数を2度変え、それぞれ3回ずつ測定した。J-PARC では、RCS のバケツにビームを入射する際に、間引き[6]によって、ビーム強度を変えることができる。本測定では Thin ratio を 16/32, 22/32, 28/32 とした。それぞれに対応する陽子数を Table 3 に示した。ただし、測定中ビームロスしており、測定開始時と終了時で粒子数が変化していた。Thinning ratio 16/32 で 0.02×10^{13} protons、22/32 で 0.05×10^{13} protons、28/32 で 0.08×10^{13} protons減少した。

Table 1: Beam Parameter

Horizontal tune	22.40
Vertical tune	20.75
周回周波数	185743.5Hz

Table 2: Kicker Setting Parameter

Maximum power	3kW×2
frequency	222854 Hz, 215854 Hz, 208854 Hz, 201854 Hz, 194854 Hz, 247615 Hz
Kicker angle	102μrad / m / turn

Table 3: Beam Intensity

Thinning ratio	The number of protons per bunch
16/32	$0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}$
22/32	$1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$
28/32	$1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$

3. 結果

3.1 信号の処理方法

データをビームのターン毎、つまり $5.384\mu\text{s}$ 毎に区切り、37147turn 分それぞれの波形をフーリエ変換した。時間枠は $5.384\mu\text{s}$ 、サンプリング周期は 4ns であった。周波数スペクトルのピークをモニターの電極毎に導出した。それぞれのピーク値を $V_i (i = 1, 2, 3, 4)$ とすると、4重極モーメントは $Q = (V_1 + V_3 - V_2 - V_4) / (V_1 + V_3 + V_2 + V_4)$ で算出できる[7]。境界要素法を用いた数値計算によると、4重極モードの感度係数は、 $K_Q = 237.4 [1/m^2]$ であった。ただし、 $Q = K_Q \times (\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle)$ である。

この Q をターン毎、つまり $5.384\mu\text{s}$ 間隔で 29715turn 分プロットし、さらにフーリエ変換を行った。Time window は $0.1599[s]$ である。

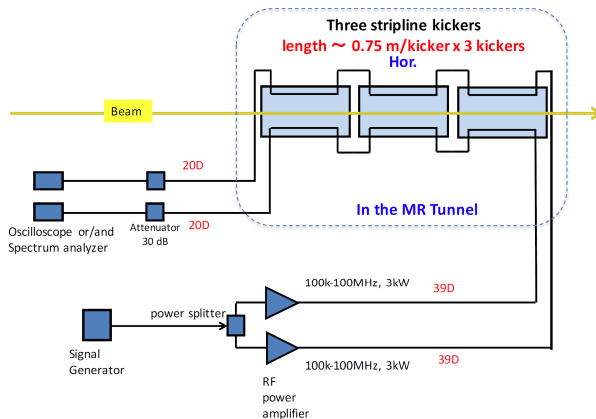


Figure 3: Schematic view of kicker setup.

3.2 結果・考察

キッカー周波数 247615Hz、バンチの粒子数 1.15×10^{13} protons の条件下での結果を Figure 4 に示す。横軸は周波数[Hz]、縦軸はフーリエ係数である。

このピークがキックによる共振であることを確かめるため、以下の二つの条件でも測定を行った。

- ① ビームを入れずにキッカーをオンにした場合
- ② ビームを入れ、キッカーはオフにした場合

①はキッカーの RF が、パイプを通るなどの予期せぬ経路で電極に伝わっていないかどうかを調べるための測定である。この場合 Q は意味のない値である。電極の信号をフーリエ変換し周波数のスペクトルを確認したが、キッカーの RF 周波数ではピークをもっていなかった。このことから、電極の信号のうち、キッカーの信号がビームの共振以外の経路で電極に伝わる成分は無視できるほど小さいことがわかった。

②は、キッカーON での信号の周波数スペクトルのピークがキッカーによる振動を示しているのかを調べるために測定した。②では、Figure 4 のようなピークは見られなかった。この結果から、Figure 4 などで見られたピークはキッカーRF による共振を示していることがわかった。また、入射直後に生じる自発的な4重極振動は、データ測定中は測定感度以下に低減していることがわかった。

$$Q \text{ のフーリエ変換で得られたピークの周波数は } (\text{キックの周波数}) - (\text{周回周波数}) \quad (3)$$

に対応していると考えられる。Figure 4 の条件下で、(3)から導出した予想値は 61879.5Hz であり、測定結果は 61886.8Hz であった。これは3度の測定いずれも小数点2桁まで一致している。他の5つのキッカーRF 周波数についても比較すると、すべて 7Hz~9Hz だけ予想値を上回る周波数でピークを持った。このずれは、キッカーのRF の不安定性、周回周波数のゆらぎ、フーリエ変換のバンド幅~6.25Hz、ビーム光学的効果の単独または複数によるものであると考えられるが現在は不明である。このピークでのフーリエ係数はキッカーによって励振した4重極振動の振幅に対応している。この値を q_{peak} と呼ぶ。

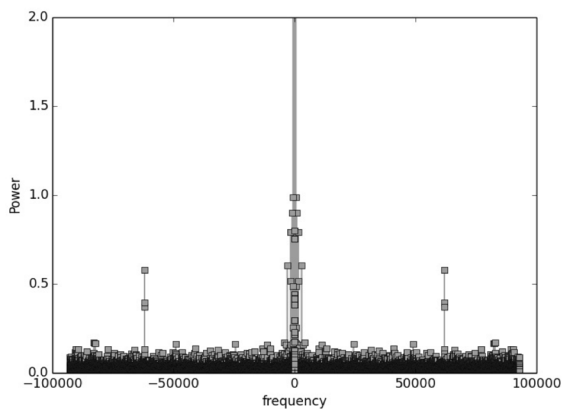


Figure 4: Frequency spectrum of the turn by turn quadrupole moment (29715turn).

Thinning ratio22/32 の測定結果を Figure 5 に示す。横軸はキッカーRF の周波数、縦軸は q_{peak} である。Thinning ratio22/32,28/32 において、キッカーRF が 247615Hz の時、ピークは幅を持っていた。これは、この条件下で、チューンスプレッドが vertical の共鳴線にもかかるためであると考えられる。そのため、Figure 5 での 247615Hz の q_{peak} は、Figure 4 でピークを形成している周波数での q_{peak} の和とした。つまり、ピーク周り4点の周波数での q_{peak} の和をとった。

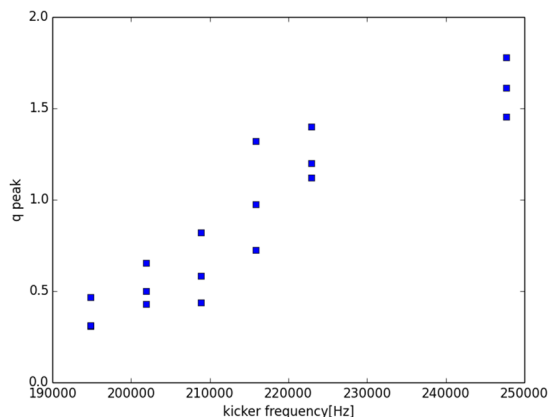


Figure 5: The intensity of quadrupole resonance.

これを、同じキッカーRF 周波数での測定の平均を取り、

Thinning 28/32,16/32 についても導出した結果が Figure 6 である。さらに横軸を式(3)でチューンに直したものが Figure 7 である。

$$(f_{kick}/f_{rev} - 1) \cdot 0.5 + 20.5 = \nu \quad (3)$$

縦軸 q_{peak} は4重極振動の大きさをあらわしており、これは粒子数とキックの周波数に依存していることがわかる。

Figure 6 から、 q_{peak} は $\nu = 20.62 \sim 20.65$ 付近を中心とした分布をしていることがわかる。このことから、そのチューンを中心としたチューンスプレッドを形成していると考えられる。粒子数を変えたことによるチューンスプレッドの変化は大きくは見えない[8]。これはキッカーの RF 周波数の変え方が粗く、ピークを見れていないからであると考えられる。また、Thinning 22, 28 ではデータ取得中のビームロスにより、intensity を大きく変えられなかったことも原因として考えられる。また、Thinning 16 と 22 での q_{peak} のスペクトルのわずかな違いをチューンスプレッドの変化と解釈することもできる。

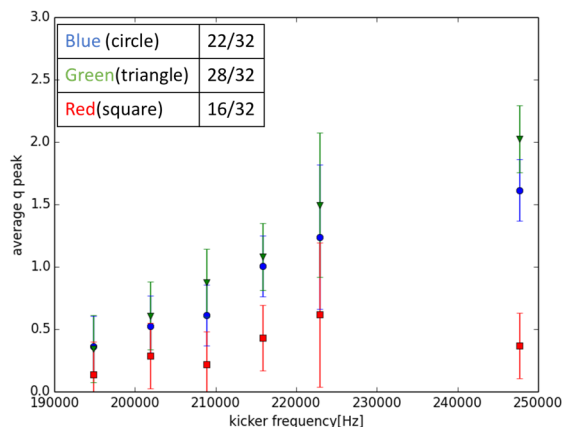


Figure 6: The intensity of quadrupole resonance.

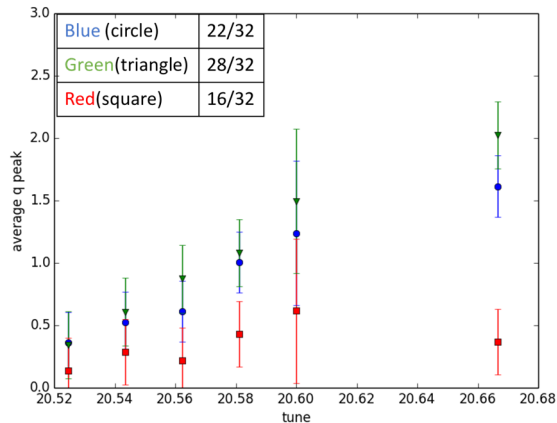


Figure 7: The intensity of quadrupole resonance. The horizontal axis is kicker RF tune.

4. まとめ

4極キッカーを用いてビームを単色周波数でノーマル4極キックをした。その結果、4重極振動のキック周波数に対応した成分の振動が増幅した。その振動の大きさから、チューンのスプレッドが観測できると考えられる。今後は *envelop* 方程式、および *Vlasov* 方程式にキッカーの力を加え、数値計算によりこの実験の結果と比較し、より深い考察をする予定である。また、さらなる追実験も予定している。

謝辞

本研究は、MEXT 科研費 25105002 新学術領域 研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] S.Igarashi, “Accelerator Based Neutrino Experiments T2K J-PARC”, MOOLP04, in these proceedings.
- [2] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B004.
- [3] L.Smith, “Effect of gradient errors in the presence of space-charge forces”, Pros.Int.Conf. on High-Energy Accelerators, Dubna, 1963, p.897.
- [4] T.Toyama and M.Okada, “The Kick Angle Calibration of the Exciter in the J-PARC MR”, TUP077, in these proceedings.
- [5] K.Nakamura, “The development of J-PARC MR Intra-bunch Feedback System for getting higher intensity neutrino beam on T2K experiment”, Kyoto Univ.,2015, Master thesis, in Japanese.
- [6] http://j-parc.jp/public/Acc/ja/bunch_linac2rcs.html.
- [7] 三浦孝子 *et al.*,” KEK-PS 主リングにおける横方向四極モードの測定”,The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003.
- [8] R.Bar, “Measurement of space-charge-induced frequency shifts of quadrupolar beam oscillations in the SIS”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 415, 1998, pp.460-463.