

Measurement of betatron-tune in the KEK 12GeV-PS/J-PARC

Takako Miura^{1A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Naoki Hayashi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

Abstract

Measurement of betatron-tune in the KEK 12 GeV-PS is performed by using band limited white noise which excites coherent betatron oscillations via stripline unit. We compared the results of the measurement for betatron oscillation amplitude with the result of calculation, and confirmed the consistency. The design of the tune-monitor in J-PARC was also discussed applying this result.

KEK 12GeV-PS/J-PARCにおけるベータトロンチューン測定

1. はじめに

コヒーレントベータトロンチューン測定用のモニターは、ビームに横方向のキックを与えて振動を励起するエキサイターと、ビームの振動を検出するビーム位置検出器(BPM)から構成される。ベータトロン振動のスペクトルは、周回周波数(f_0)の高調波(kf_0)のサイドバンド($kf_0 \pm \nu f_0$)として現れるため、BPMの信号を周波数解析して、直近の周回周波数の高調波からの周波数差(νf_0)を周回周波数 f_0 で規格化することによりチューン(ν)を得ることができる。ここで、 k は整数。

KEK 12 GeV PSは、陽子を500 MeVから12 GeVまで加速しているが、連続的にコヒーレントなベータトロン振動を励起できるように、ストリップライン型のエキサイター電極に帯域制限白色ノイズをかけて、ベータトロン振動との共鳴を利用して強制的に振動を与える方法をとっている。白色ノイズを使うことで、周波数を変えてスキャンする必要が無く、一度だけで測定が可能となる。

KEK-PSでの測定から得られたエキサイターのパワーとビームのベータトロン振動振幅との比較、及び、この結果を用いたJ-PARCにおけるチューンメータの設計について報告する。

2. エキサイター

2.1 構成

KEK PSのエキサイターの構成を図1^[1]に示す。帯域制限白色ノイズを、180°分配器によって2つに分割し、50Ωの特性インピーダンスに設計されたストリップライン型電極にそれぞれ入力する。このエキサイターはTEM伝送線を成しており、2つの電極間に作られる電磁場によって粒子を偏向させる。

効率よくビームを蹴るため、電場(E)とローレン

ツ力($e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)が同じ向きになるように、電力をビームの進行方向に対して下流側から供給する。エキサイター内は真空、TEM波の条件から、長さ L における実効電圧 U_x は、電力を下流側から供給する場合

$$U_x = (1 + \beta) \int_0^L E_x ds \quad (1)$$

と表されるが、上流から供給する場合は

$$U_x = (1 - \beta) \int_0^L E_x ds \quad (2)$$

となり、速度が大きくなり、ローレンツ β が1に近づくにつれ、電場の力と磁場の力が打ち消し合い、ビームを蹴ることができなくなる^[2]。

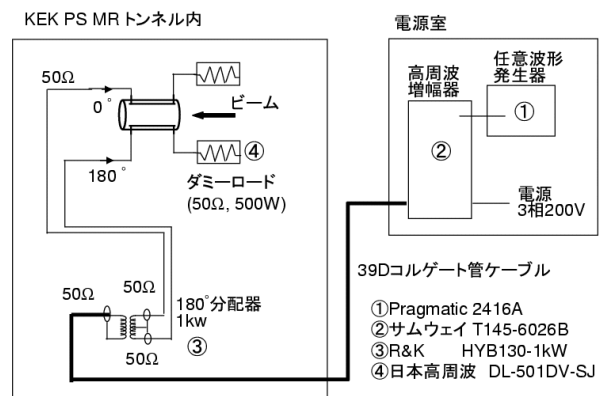


図 1: KEK PS のエキサイター構成図

2.2 設計計算

ある1つのベータトロンサイドバンドのベータトロン振動数分布をカバーするように周波数全幅 $=\Delta f_n$ で帯域制限白色ノイズをかけるとすると、コヒーレントなベータトロン振動振幅の期待値は漸近的に次式のように表される^[3]:

¹ E-mail: takako.miura@kek.jp

$$x_{rms} \approx \frac{\theta_{rms} \sqrt{\beta_x^e \beta_x^m}}{4} \frac{f_0}{\sqrt{\pi \Delta f_n \Delta f_\beta}} \quad (3)$$

ここで、 θ_{rms} はエキサイターによるキック角、 β_x^e 、 β_x^m はそれぞれエキサイターとBPMの設置場所のベータ関数、 f_0 は周回周波数、 Δf_β はベータトロン振動周波数分布($\Delta v_x f_0$)の半値幅である。長さ L のエキサイターによるキック角(θ_{rms})は、ビームの運動量を p 、ローレンツベータを β とすると

$$\theta_{rms} \approx \frac{eL}{pc} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) E_x, \quad (4)$$

$$E_x = \frac{\sqrt{ZP}}{d}, \quad (5)$$

と表される。ここで、 c は光速、 E_x は横方向の電場である。アンプから供給されるパワー(P)と、アンプから見た負荷側のインピーダンス($Z=50\Omega+50j\Omega=100j\Omega$)から、2電極の電位差は \sqrt{ZP} と表される。ただし、電極間の電場分布は電極の形状に依存するため、電荷重畳法によって電極間の電場分布を計算し、中心付近で平坦、且つ強度が大きくなるように電極設計を行う。現在KEK PSで使用されているエキサイター電極の断面図を図2に示す。電極の電位差と計算から得られた中心付近の電場の関係から、(5)式にある実効的な電極間距離(d)が求まり、 $d=0.126$ mとなった。

BPMで検出されるベータトロン振動の周波数成分が、ノイズフロアよりも大きくなるような振幅を与えるように設計が行われる。

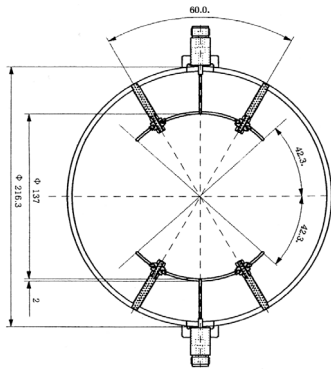


図 2: KEK PSエキサイター電極の断面

3. 測定

計算と実際の測定結果との整合性をみるため、測定を行った。

3.1 エキサイターへのパワー供給方向の依存性

ビームと同じ向きにパワーを供給すると、(2)式で表されるように、電場の力と磁場の力が打ち消し合い、ビームを蹴ることができなくなるはずである。下流からパワーを入れてベータトロン振動が確認できている条件で、ケーブルを上流側と

入れ替えて実際に測定を行ったところ、振動が励起されなくなったことが確認された。

3.2 供給パワーに対するベータトロン振幅

供給パワーを1.2 kW、1.55 MHzを中心とした550 kHz幅で白色ノイズを水平方向にかけたときのBPMの左右の信号の差信号(ΔV)をスペクトルアナライザーに入れて測定した結果を図3に示す。図3は、横軸が周波数で0から10 MHz、縦軸が時間で上から下へ時間の経過を表している。入射部と加速途中までは、周回周波数 f_0 に対する全ての高調波 kf_0 でベータトロンサイドバンドが見られているが、これは入射エラーとHead-tailインスタビリティなどの影響と思われる。加速されるにつれ、白色ノイズと共鳴する $2f_0$ のサイドバンド($2f_0 - \nu_0$)のみが励起されている。他、 $7f_0 + \nu_0$ と $11f_0 - \nu_0$ の所にも見られるが、これはKEK PSの9バンチ入射による周波数の折り返しによるものである。ノイズフロアは、 50Ω ターミネータを入れたものと比較し、ほぼスペアナだけで決まっていた(約 2×10^{-10} mW/kHz)。

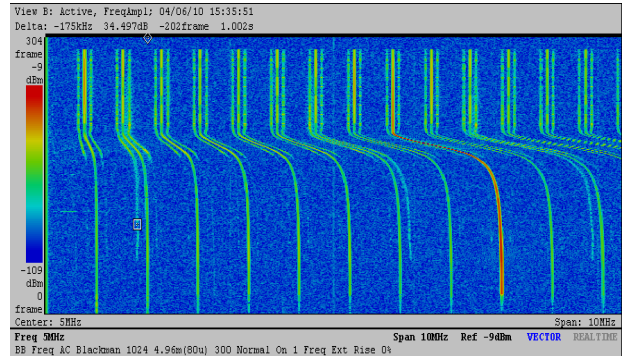


図 3: 周波数分布の測定結果. 横軸は周波数(0~10MHz)リニアスケール, 縦軸が時間(4.96ms/フレーム, 全部で300フレーム, 軸方向は上から下)

4. 考察

実際の測定値と(3)から得られる振幅に対するBPMの出力計算との比較を行う。代表して7.7 GeVの場合を比較する。

測定値は $\sim 63 \mu V$ 、ケーブルの減衰を補正すると、実際には $\sim 70 \mu V$ が出力されている。測定に使われたモニタは静電型BPMで、電極内径が150 mm、板厚4 mm、電極幅(ϕ)はほぼ 90° 幅(上下左右に4分割した形状)、長さ(l)が140 mm、真空チェンバと電極のギャップが3 mmで、静電容量(C)が52 pFである。電極の占める角度を ϕ とすると、対向電極に誘起される電流の差は

$$\Delta I = I_R - I_L = I_b \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \frac{x}{R} \approx 0.9 I_b \frac{x}{R} \quad (6)$$

と表される。 I_b はビーム電流、 R は電極の内半径

である。電極長さ(l)は、バンチ長に比べて非常に短いので、左右の出力の差信号はバンチのピーク電流(I_p)を用いて次のように近似できる:

$$\Delta V = \left[\frac{1}{n} (0.9 I_p \frac{x}{R}) \cdot \frac{l}{\beta c} \right] \frac{1}{C} \quad (7)$$

ここで、 n は電極直後につけたインピーダンス変換用のトランスの巻数(BPMと回路側で10:1)である。測定時の1バンチあたりの陽子数は約 3.8×10^7 protonsでバンチ長が60 nsであるので、 $I_p \sim 2$ A。以上の条件からベータトロン振動の振幅に直すと約3 μ mの振幅と考えられる。

一方、計算は次のように行った。 $L=0.7$ m, $Z=100$ Ω , $P=1.2$ kW, $d=0.126$ mより(4),(5)式から $\theta_{rms}=0.31$ μ rad。 β_x^e, β_x^m は15 mと15.9 m, f_0 は878.4 kHz, Δf_n は0.55 MHz, Δf_β の決定にはクロマティシティが必要だが、測定値が無いため12 GeV付近のクロマティシティ $\xi \sim -6.0$ ^[4]を採用し、運動量幅 $\Delta p/p = \pm 0.35$ % (測定値)とすると、 $\Delta f_\beta = \Delta v f_0 = (\xi \Delta P/P) f_0 \approx 37$ kHzとなる。ゆえに(3)式からビームの平均的な変位量は、 ~ 6 μ mとなった。

結果として、クロマティシティの値など不確定な数値はあるが、測定値と計算値が比較的近い値を示す結果となった。

但し、このシステムには若干の問題点がある。それは、アンプパワーをフルに活用するために、入力保護回路を利用し、定格の入力電圧よりも高い電圧でホワイトノイズをかけていることである。ホワイトノイズは、様々な位相で様々な周波数の波の重ね合わせであるため、変調波のように振舞い、ピークが重ねあったところで大きな振幅になるため、各周波数成分の電圧を十分小さいところで使わないと定格入力を超えてしまう。現在、クリップ回路で定格電圧を越えるところをカットしているが、それによる大きな問題は起きていない。

5. J-PARC 3GeVリングへの検討

KEK-PSと同じようなエキサイターをJ-PARCの3GeVリング(RCS)にも設置する予定である。RCSの第1期では、20 msの間にビームを181 MeVから3 GeVに加速し、25 Hzで繰り返す。バンチのピーク電流は、入射で10A、加速終了付近で45Aとなる。PSに比べて大きい、1/100の強度の運転も予定されているので、大きなダイナミックレンジが必要となる。ビームダクトもKEK-PSより大きい。クロマティシティは、6極電磁石の補正なしでの運転も予定されているので、ナチュラル・クロマティシティを $\xi_x = \xi_y = -8.5$ を用いた。(3)式を使って同様に計算を行った。使用するパラメータは、表1に載せた。BPMは、KEK-PSと同じく4分

割型電極を用い、電極内径が $\phi 297$ mm, 長さが200 mm, 電極板と真空容器間のギャップが2mm, 静電容量は202 pF, インピーダンス変換トランスの巻き数が8:1のものとする。

結果、最も入射時が最も振幅が大きく、10 μ m、加速途中 (加速開始から16ms)が最も小さく、2 μ m程度の振幅となった。モニターの出力電圧は、運転で想定されるピーク電流を使って計算すると、最も小さい値で、21 μ V(-63dBm)となった。測定時に想定されるノイズレベル(平均値)は-90 dBm (ビン幅: 3kHz/ch)であるので、通常運転では測定可能と考えられる。ただし、1/100の強度に対しては、ゲインを変更して測定すると考えると、ベータトロン振動の振幅は-103 dBmとなる。KEK PSのノイズレベルを参考にすると、ノイズレベル(平均値)は-118 dBmと想定され、ノイズのバタツキに埋もれる可能性がある。そのため、この場合は、何度か測定を繰り返し、平均化処理をする必要があると考えられる。

表1: 主なパラメータの比較表

	KEK PS	RCS
L (m)	0.70	0.81
p (GeV/c)	1.09 \rightarrow 12.9	0.61 \rightarrow 3.82
Z (Ω)	100	100
P (W)	1000	1000
d (m)	0.126	0.509
β_x^e, β_x^m (m)	15, 15.9	9.39, 8.0
Δf (kHz)	550 \rightarrow 550	234 \rightarrow 417
Δv	0.006 \rightarrow 0.05	0.16 \rightarrow 0.03
R (mm)	75	148.5

6. まとめ

KEK 12 GeV PSでは、帯域を制限した白色ノイズでベータトロン振動を共鳴励起し、チューンの測定を行っている。コヒーレントなベータトロン振動振幅の測定結果と計算との比較を行い、両者の一致を確認した。この結果をふまえて、J-PARCにおけるチューンメータの設計を行った。今後はエキサイターによるビームロスについての検討も行うつもりである。

参考文献

- [1] J. Kishiro et al., ICALEPCS'97 (p233).
- [2] 徳田登. "TEMキッカーによる粒子の偏向", 1996, private communication.
- [3] 外山毅. "コースティング・ビームの横方向エキサイターに対する応答", KEK-PS ASN-443, URL: <http://www-accps.kek.jp/Reports/ASN/ASN443/ASN443.pdf>
- [4] 外山毅. "主リング・フラットトップでのクロマティシティ測定", KEK-PS SR500, URL: <http://www-accps.kek.jp/Reports/SR/SR500/SR500.pdf>