

# J-PARC 主リング SX 運転での Longitudinal Schottky Signal

## SCHOTTKY SIGNAL DURING LONGITUDINAL DEBUNCHING PROCESS AT J-PARC MR SX

吉井正人 \*<sup>A)</sup>、杉山泰之 <sup>A)</sup>、外山毅 <sup>A)</sup>、大森千広 <sup>A)</sup>、田村文彦 <sup>B)</sup>、野村昌弘 <sup>B)</sup>  
原圭吾 <sup>A)</sup>、長谷川豪志 <sup>A)</sup>、山本昌亘 <sup>B)</sup>、古澤将司 <sup>A)</sup>、森田裕一 <sup>A)</sup>、島田太平 <sup>B)</sup>  
Masahito Yoshii\*<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>  
Masahiro Nomura<sup>B)</sup> Keigo Hara<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>, Masashi Furusawa<sup>A)</sup>  
Yuichi Morita<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Complex, J-PARC/KEK

<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency, J-PARC/JAEA

### Abstract

J-PARC MR synchrotron supplies a high intense protons to the hadron experimental facility (HD).  $5.5 \times 10^{13}$  protons per pulse (ppp) accelerated up to the 30 GeV flat top energy are slowly extracted by using the third order resonance extraction system. The high extraction efficiency of 99.5 % and high beam power of  $> 50$  kW are maintained. Especially, to keep the extraction efficiency high, mitigating the transverse instability caused by electron clouds is a very important issue. Longitudinal phase offset injection is effective to increase longitudinal emittance of bunch at the injection energy and the transverse RF systems are essential to dump the instabilities. In this time, we have observed a quasi-schottky signal of the wall current monitor by a spectrum analyzer. Because the signal gives us the momentum information of a circulating proton. Momentum spread of a coasting beam is particularly important for SX beam tuning. The establishment of this method is expected to be useful for the elucidation of beam instability and its suppression, and for improving the reproducibility of SX beam operation.

### 1. はじめに

J-PARC MR SX 運転では 99.5 % の高い取出効率で 50 kW を越えるビームをハドロン実験に供給している。大強度陽子ビームは 30 GeV の Top エネルギーまで加速された後、高周波加速電圧をオフし、デバンチ過程を経て 3 次共鳴取出しが行われる。その粒子数は  $5.5 \times 10^{13}$  ppp に及ぶ。SX に於けるビームの性質、取り出し効率は、電子雲に起因する横方向の不安定現象の抑制が鍵になっていて、入射時の縦方向位相空間へのオフセット入射やデバンチ過程での transverse RF による抑制手法により、不安定現象を回避している [1]。この電子雲は加速ポテンシャルの拘束力が無くなる「デバンチ過程」での周回ビームの電流密度強度と深い関係があり [2]、縦方向のエミッタンス増大が横方向の不安定現象抑制に不可欠になっている。今回、壁電流モニタの Schottky signal を観察し、その周波数スペクトルの解析から 30 GeV ビームのデバンチ過程からビームが取り出されるまでの運動量の拡がりを観測した。この手法の確立は、ビーム不安定現象の解明とその抑制、さらに、SX ビームの調整と再現性向上に役立つと期待している。

### 2. LONGITUDINAL BUNCH MANIPULATION

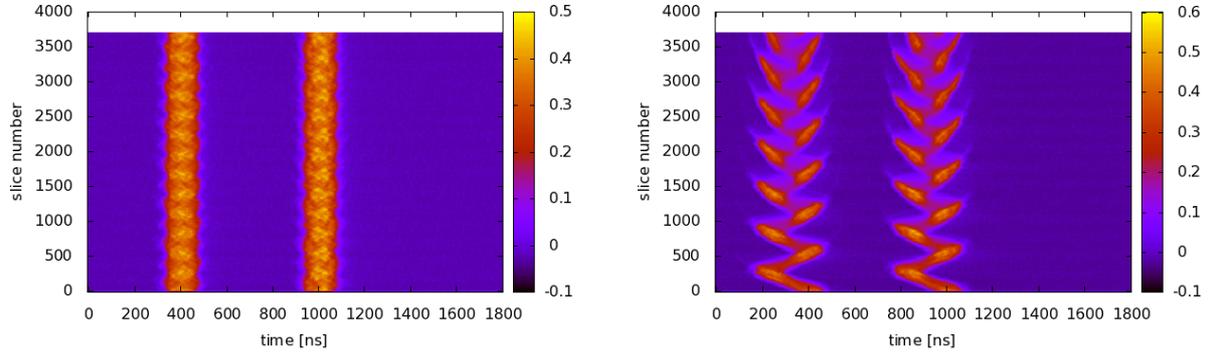
MR へは RCS から 2 バンチずつ 4 回、合計 8 バンチが入射される。RCS から入射されるビームの典型

的なバンチは縦方向のエミッタンスが 3 eVs、バンチ巾が 160 nsec、運動量広がりには  $\pm 0.3\%$  である。RCS から入射されるビームのピーク電流を抑えるため、RF 入射位相にオフセットを加え（縦方向の位相空間のバケツ中心から入射位相をずらし）ダイポール振動を起こさせ、縦方向エミッタンスの増大を図っている。ダイポール振動を誘起する高周波位相のオフセット量は、デバンチ過程で横方向の不安定現象が生じないように調整しているが、同時に、加速の初期段階でビームロスが生じさせないぎりぎりの値に調整しなければならない。調整量は現在 55 度に達し、縦方向エミッタンスは 10 eVs にまで大きくなり、ほぼその大きさは限界に達している。縦方向のエミッタンスを増大させ周回ビームのピーク電流を下げる手法としては 2 次高調波システムも利用できるが、その調整手法は確立しておらず、高周波位相操作が現時点では不安定現象抑制に最も効果的に寄与している。RCS から入射される最初の 2 バンチの壁電流モニタのマウンテン・ビュー波形を Fig. 1 に示す。高周波位相のオフセット入射により、加速開始時の周回ビームのバンチング・ファクター（平均電流とピーク電流の比）は 0.25 から 0.4 に改善されている。

### 3. LONGITUDINAL SCHOTTKY SIGNALS

荷電粒子が加速器リングに設けたモニタを通過するとき観測される信号を考える。粒子の周回周波数を  $f_0$ 、電荷  $e$  を持つ 1 つの荷電粒子がモニタ通過時に生じる電気信号は、周回周期  $1/f_0$  毎の delta 関

\* masahito.yoshii@kek.jp



(a) Centered Injection (RF offset = 0 degree)

(b) Phase Offset Injection (RF offset = 50 degree)

Figure 1: Mountain view plots of two bunches from RCS to MR; (a) Centered Injection, (b) Injection with an RF phase offset.

数の Fourier 級数で与えられる [3].

$$i(t) = e f_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(jn\omega_0 t) = e f_0 + 2e f_0 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\omega_0 t) \quad (1)$$

ここで、

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2)$$

である。

Longitudinal 周波数スペクトルは周回周波数  $f_0$  のハーモニックで構成される。longitudinal potential に拘束されるバンチドビームは位相空間内で  $f_0$  から僅かに異なる周回周波数  $f_0 + \Delta f$  で運動し、位相空間に分布する。slippage factor ( $\eta$ ) を使って、運動量と周回周波数には (3) 式の関係があり、その n-th 目の周波数スペクトルも  $n f_0$  の周りに  $\pm n \Delta f$  の拡がりをもつ。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\eta \frac{\Delta p}{p_0} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_p$  momentum compaction とローレンツ  $\gamma$  を使って、slippage ( $\eta$ ) は、

$$\eta = \frac{1}{\gamma_t^2} - \frac{1}{\gamma^2} = \alpha_p - \frac{1}{\gamma^2} \quad (4)$$

である。

J-PARC MR は、imaginary  $\gamma_T$  ラティスが採用されている。そのため、Slippage ( $\eta$ ) が小さく、入射 3 GeV から取り出し 30 GeV の間に Slippage 値は  $\eta = -0.0577$  から  $-0.0019$  に変化する。したがって、式 (3) を使って、運動量の変化量 0.1% 当たりの  $\Delta f$  は 10.7 Hz から 0.356 Hz と見積もることができ、十分に大きなハーモニック数  $N$  を幅広く選ぶことができる。

Table 1: Basic Parameters

Energy	revolution	slippage	$\Delta f$ at $\Delta p/p=0.1\%$
3 GeV	186 kHz	-0.0577	10.7 Hz
30 GeV	191 kHz	-0.00188	0.356 Hz

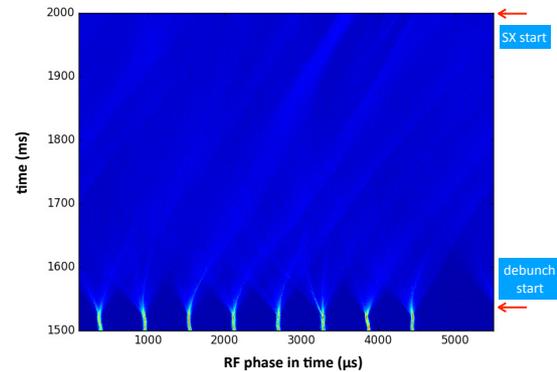


Figure 2: Mountain view plot during debunching process.

#### 4. 運動量広がり測定

Longitudinal schottky signal の測定は、ハドロンユーザー向けの遅い取り出し (slow extraction: SX) モードのビームで行った。SX モードの運転では、ビームは加速後デバンチ過程によりバンチした状態からシンクロトロン周上全体に広がった密度分布に時間構造をもたない coasting beam 状態となってリングを周回し、3 次共鳴により 2 秒という長い時間をかけて徐々に取り出される。デバンチ過程を経た coasting beam の周波数分布から周回ビームの運動量広がりのを定量的に抑え、定常運転のパラメーターとするのが Longitudinal Schottky signal 測定の目的である。

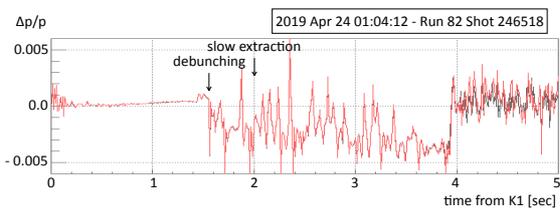


Figure 3: The time variation of average momentum displacement calculated by using the closed orbit distortion.

Schottky signal の測定は広帯域の壁電流モニタの信号を用い、ローデ・シュワルツ・ジャパンの FPL1003 Spectrum Analyser で周波数スペクトル解析を行った。

#### 4.1 デバンチ過程

MR に入射された 8 バンチは 30GeV のタイミングで高周波加速電圧を停止してデバンチ過程に移行する。この時点でのシンクロトロン周波数は 20Hz 程度である。Figure 2 に示したデバンチ過程の mountain view plot のバンチ長の時間変化の様子から運動量の広がりはおおよそ ±0.3% であることが分かるが、バ

ンチ毎のばらつきも見て取れる。Figure 3 に全周の位置モニタからえられた closed orbit distortion (COD) から計算されたビームの平均運動量の変位を示す。デバンチ過程開始直後から平均運動量に減少が見られる。これはフィードフォワードによるビーム荷補償を行っているが、その補正誤差による考えている。

#### 4.2 Schottky signal の周波数スペクトル

Figure 2 の Mountain view plot から運動量広がり、±0.3% かそれ以上であることから分解能帯域幅や掃引時間を考慮し、 $n = 900$  以上の高調波帯域の信号を観測した。Figure 4 は、 $n = 900$  (中心周波数 172 MHz) の schottky signal の周波数スペクトルを典型例として示す。Spectrum Analyser の trigger offset 機能を使ってデバンチ開始 ( $t=1540$  msec) から 20 msec 毎 (図左側) およびデバンチがほぼ完了する  $t = 1700$  ms からビーム取り出しが完了する  $t = 4000$  ms までは 100 msec 毎 (図右側) に Schottky signal を解析し、それらの周波数スペクトルを示した。

### 5. 考察

MR SX モードに於ける 30 GeV に加速された陽子ビームのデバンチ過程から 3 次共鳴でビームが取り出されるまで各時間に於ける schottky signal を観測

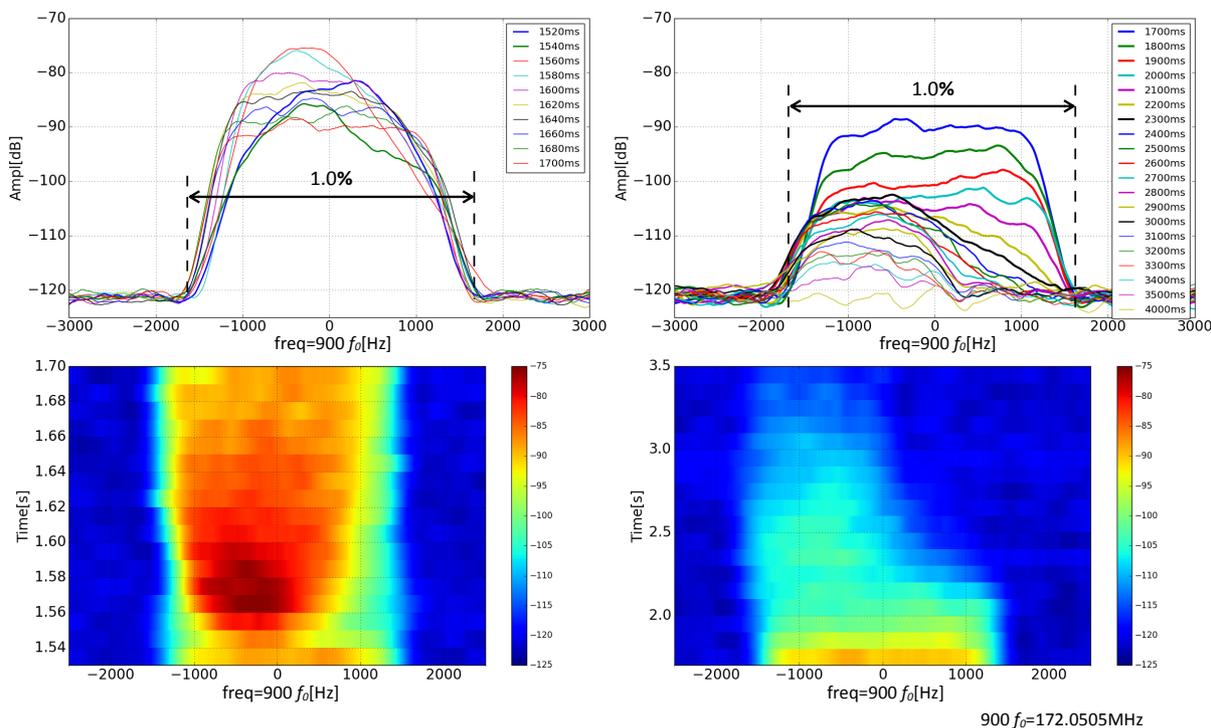


Figure 4: Frequency spectrums of schottky signals.

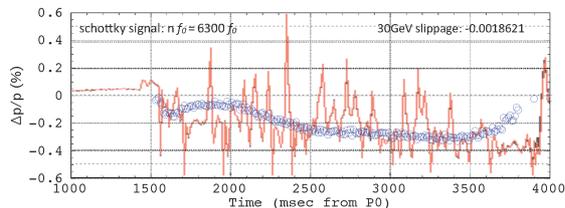


Figure 5: The time variation of average momentum displacements.

した。観測したシグナルの高調波数  $n$  をパラメータに  $n = 900, 3600, 6300$  について周波数解析を行い、いずれの条件でも同様の運動量広がり結果として得られることを確認した。

### 5.1 デバンチ過程での運動量の広がり

加速終了後、ビームがバンチした状態から coasting 状態に至る間の運動量広がり、概ね一定で  $\pm 0.5\%$  であった。バンチ構造が残ったビームの観測ではビームの高調波成分がビームの電流分布に依存するため、Schottky signal の解析から中心運動量を得ることは難しい。周波数スペクトルの中心値を平均運動量と仮定して、COD 解析から得られた 8 バンチの中心運動量の図にプロットした (Fig. 5)。デバンチ過程で運動量が減少する傾向が Schottky signal の解析に於いても観測されている。

### 5.2 ビーム取り出し時の運動量広がり

ビームの取り出しは、 $t = 2000$  ms から  $t = 4000$  ms までの 2 秒に渡る。周回するビームの中で運動量の高い粒子がより多く取り出される様子が schottoly signal の測定で初めて観測された。取り出し時の水平方向のチューンは取り出し効率が最大になるようにデバンチ過程での運動量減少を考慮して  $\Delta f/f_0$  が  $-0.2\%$  付近で最小になるように調整しているが、運動量に対するチューンの広がりが  $-$  側より  $+$  側が大きい傾向にあり、運動量の高い粒子から取り出されるのはチューンの広がりの非対称の影響と考えられる。今後、クロマティシティーをパラメータに schottoly signal の周波数スペクトルを観察し、SX 取り出しメカニズムの解明を目指す。

## 6. まとめ

MR SX モードでデバンチ過程を経て 3 次共鳴取り出しされるビームの運動量分布を測定した。壁電流モニターで観測したビーム電流信号の高調波成分を R&S FPL1003 Spectrum Analyser を用いて周波数スペクトル解析した。観測は代表的なハーモニック数  $n = 900, 3600, 6300$  について Schottky signal の周波数解析を行い、いずれの条件でも同様の運動量広がりが得られることを確認した。特に、 $n = 6300$  の高調波信号の解析は掃引時間が短く (7.6 ms)、信号レベルも十分あり、定常運転でのモニターとして利用できる。MR SX モードの大強度運転では、横方向の不安定現象の

抑制が鍵であり、これまでは MR 入射時に RF 位相にオフセット (典型的  $50^\circ$  or  $55^\circ$ ) を加え、ダイポール振動による縦方向エミッタンスの増大化で電流密度の低下を図っている。今後は、2 次高調波システムや VHF 空洞システム [4] の導入を新たに検討して、縦方向のエミッタンスの定量的な操作が求められている。Schottky signal の周波数スペクトル観測は、運動量分布測定に不可欠であり、また安定且つ再現性ある加速器運転とより大強度なビーム加速の実現に向け期待が大きい。

## 参考文献

- [1] R. Muto *et al.*, “Current status of slow extraction from J-PARC Main Ring”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp.2311-2314 (2019).
- [2] Bruce Yee-Rendon *et al.*, “Electron cloud simulations for the main ring of J-PARC”, J. Phys.: Conf. Ser. 874 012065 (2017).
- [3] S. van der Meer, “DIAGNOSTICS WITH SCHOTTKY NOISE”, CERN/PS/88-60 (AR).
- [4] M. Yamamoto *et al.*, “Simulation of Phase Modulation for Longitudinal Emittance Blow-up in J-PARC MR”, Proceedings of the JPS Conference, 8. 012015 (2015).