

シンクロトロンからの遅いビーム取り出しにおけるスピル増加のためのカラーノイズデータの変更

INCREASE OF SPILL INTENSITY BY MODIFYING COLORED NOISE DATA IN SLOW BEAM EXTRACTION FROM A SYNCHROTRON

奥川雄太郎^{#, A)}, 中西哲也^{A)}, 栗田哲郎^{B)}

Yutaro Okugawa^{#, A)}, Tetsuya Nakanishi^{A)}, Tetsuro Kurita^{B)}

^{A)} College of Industrial Technology, Nihon University

^{B)} The Wakasa Wan Energy Research Center

Abstract

It is a key technology to obtain a uniform spill in a slow beam extraction from a synchrotron. The authors have proposed an RFKO method using a multiband colored noise (CN) signal. This noise signal includes higher betatron resonance frequencies, and experiment and simulation have shown that a uniformity of spill intensity improves with the no. frequency bands (max. ten). The purpose of this study is to increase beam extracted using a lower power amp. by modifying the CN signal. The method is to reduce higher values of the CN signal so as to reduce a ratio of max. value to effective one, because a max. output of an amp. is limited by a max. value of the input voltage. A simulation shows that there is not a significant difference in fluctuation of a spill even if the ratio is reduced from 5 of original data to 2. As a result, the output power can be increased 25/4 times. On the other hand, the spill was measured with changing longitudinal RF voltage, in order to investigate the effect of bunching on the fluctuation of spill. In the present paper, results of these simulations and beam experiments using a WERC synchrotron are described.

1. はじめに

シンクロトロンからの遅いビーム取り出しにおいて、一様なスピルを得ることは重要な技術である[1]。筆者らはその方法としてマルチバンドのカラーノイズ(CN)信号を使った RFKO 法を提案している[2]。このノイズ信号は、高次のベータトロン共鳴周波数帯を複数含んだもので、含まれる共鳴周波数帯の数が多いほどスピルが滑らかになることが実験およびシミュレーションで示された。

本研究の目的は、CN 信号を加工して比較的パワーの小さい高周波アンプでより多くのビームを取り出すことである。その方法が、アンプの最大出力電圧は入力電圧の最大値で決まるため、CN 信号が強い部分を下げ、最大値と実効値の比を下げることである。一方、従来の方法ではスピルを一様にするためにバンチングを行っており、これがビーム ON/OFF を高速に制御できない原因となっている[3]。そこで、バンチングがスピルのばらつきに与える影響を調べた。本論文では、これらのシミュレーション結果と若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のシンクロトロンを使ってビーム実験を行った結果について述べる。

2. WERC シンクロトロンの概要

WERC 加速器施設 (W-MAST) は、ダンデム加速器およびそれを入射器としたシンクロトロンによって、広範囲のエネルギーのイオンビームを様々な実験に供給している。WERC シンクロトロンの平面図を Fig. 1 に示す。

今回実験を行った時のシンクロトロンのパラメータを以下に示す。粒子は炭素イオンを用い、出射エネルギーは

55MeV/u でこのとき周回周波数は 2.973MHz である。また、ベアーチューンは $v_x=1.681$ 、 $v_y=0.791$ 、運動量分散 $\Delta P/P=\pm 6 \times 10^{-4}$ [4]、クロマティシティ $\xi_x(\Delta v_x/\Delta P/P) = -0.42$ である[5]。

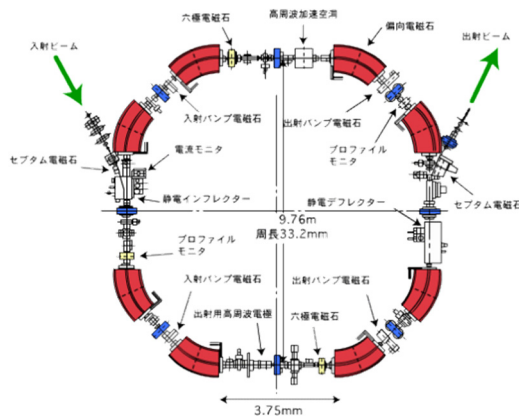


Figure 1: Schematic layout of the WERC synchrotron.

3. シミュレーション方法

3.1 概要

シンクロトロンは、六極電磁石、RFKO のある位置で分割し、その間はトランスフォーマーマトリクスで与える。また、六極電磁石および RFKO は、その位置でローレンツ力による x' だけを変化させる。各区間のトランスフォーマーマトリクスは、CERN で開発された AGILE で計算し、本プログラムの入力データとして与えた。但し、各トランスフォーマーマトリクスにおいて determinant が 1 になるように一つのマトリクス要素をわずかに変えている。キック角は全回転数に必要な値を予め計算し、その後トラッキングの計算を行う。

[#] ciyu19005@g.nihon-u.ac.jp

CN によるキック角のアルゴリズムとして、デジタルフィルタ法を用いた[6]。入力信号列が x_k で与えられる時、デジタルフィルタの出力 y_k は次式で与えられる。

$$y_k = \sum_{n=0}^{N_h} h_n x_{k-n} \quad (1)$$

ここで、 N_h+1 はフィルタ係数の数、 h_n はバンドパスフィルタに対しては次式で与えられる。

$$h_n = \frac{2}{\pi n} \cos(m\omega_0 T) \sin(m\omega_b T) \quad (m \neq 0)$$

$$h_0 = 4f_b T \quad (m = 0)$$

$$m = n - N_h/2$$

$$\omega_0 = (\omega_H + \omega_L)/2$$

$$\omega_b = (\omega_H - \omega_L)/2$$

ここで、 n が $0 \sim N_h$ である時 m は $-N_h/2 \sim N_h/2$ の値を取る。 T は入力信号の間隔を与えるサンプリング周期、 f_H ($\omega_H = 2\pi f_H$) は高域遮断周波数、 f_L は低域遮断周波数である。

CNを信号源とした RFKO によるキック角を計算するために、上記デジタルフィルタ法を次のように用いる。まず、-1 から 1 までの乱数 x_k を発生させると、その数値列はデジタルホワイトノイズに等価である。その時、 y_k は周波数バンド幅が f_L から f_H までのデジタルカラーノイズとなる。従って、サンプリング周期をシンクロトロン一周の時間とすると、 y_k の数値列はある粒子の周回毎のキック角とすることができる。その際、Eq. (1)の各パラメータは次のように定義される。 f_L と f_H はベータトロンチューンとの比較を容易にするために周回周波数当たりの値で与える。 T は、周波数を周回周波数当たりで与えるため、粒子を周回上の一箇所だけに存在すると仮定すると1であり、複数個所に等間隔で分布させるとその数(ビン数)の逆数となる。この時、キック角は次式で与えられる。

$$\delta_{N_{rev},i} = C \cdot y_{((N_{rev}-1)N_s+i)}$$

ここで、 C は振幅係数、 N_{rev} は回転数、 i はビン番号、 N_s はビンの総数である。バンドの周波数幅は $(f_L, f_H) = (n+0.31, n+0.36), (n+0.64, n+0.69)$ とし、 $n=0,1,2,3,4$ までの 10 バンドとした。粒子数は 70 万個、六極電磁石は 3 万ターンの間に立ち上げ、その後 RFKO を ON し、WERC の取り出し実験に相当する 740000 ターンのシミュレーションを行った。

シミュレーションでは、全粒子をビンと呼ばれる場所に集中させ、1 ターンごとに全てのビンの粒子に対してキック角を加えて計算を続ける。Figure 2 はその概略図である。ビン数の決定に当たっては実際の CN 発生方法について説明する必要がある。粒子に与える CN は DAC を用いて発生させた[7]。その模式図を Fig. 3 に示す。あらかじめ PC 上で計算した CN データを DAC のメモリに書き込み、外部クロックにより出力する。CN データを出力するクロック周波数は、必要な最大周波数 14MHz を考慮して決めた。ある波形を正しくサンプリングするには、波形の持つ周波数成分の最大値の 2 倍以上の周波数

でサンプリングする必要がある。この値が高いほど精度は良くなるため、今回は最大周波数の 10 倍(140MHz)以上を考えた。

一方、使用した DAC に適用することができる周波数は最低で 250MHz であるため、クロック周波数はこの値とした。周回周波数を $f_0=2.973\text{MHz}$ 、ビン数を N_s とすると、ビンの時間間隔は、 $(1/f_0 \cdot N_s)$ で表される。これをクロック周波数 250MHz に合わせて出力するため Eq. (2) のような関係が成り立つ。よって、ビン数は 84 個となり、1 ターンあたり 84 個のデータが作成されることになる。

$$\frac{1}{f_0 \cdot N_s} = \frac{1}{250 \times 10^6} \quad (2)$$

$$N_s \cong 84$$

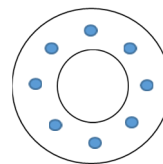


Figure 2: Conceptual scheme of the bins.

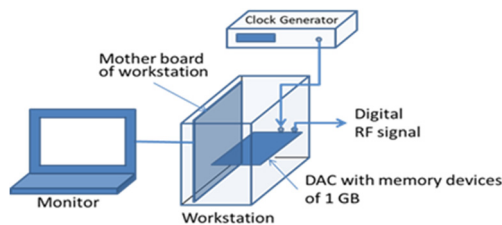


Figure3: Outline of the CN source.

3.2 CN データの選択

DAC メモリには限りがあるため、計算した CN データを繰り返し使用する必要がある。そこで、20 万ターン分の CN データを用いたビームシミュレーションを行い、そこからスパイルの変動が少ない区間のデータを選んだ。Figure 4 にバンド数 10 で 20 万ターン分の CN データを繰り返し用いたシミュレーション結果を示す。Figure 4 から 290000-370000 ターンの 8 万ターンの CN データを用いることにした。Figure 5 に 8 万ターン分の CN データを繰り返し用いたシミュレーション結果を示す。Figure 4 に見られた周期的な強い成分がなくなっていることが確認で

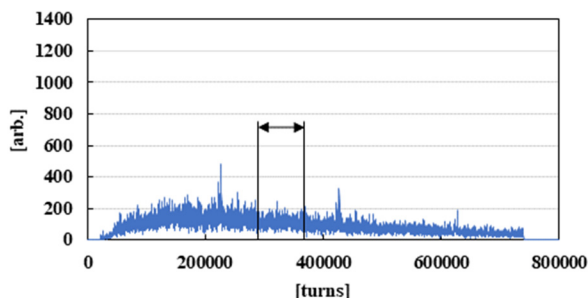


Figure 4: Spill structure simulated using data of 200000 turns with 10 bands.

きる。

また、これらのシミュレーション結果は 120 ターンの間に取り出された粒子数をプロットしている。これはビーム実験結果のスピルに最も近い表示回転数になり、時間にして約 40 μ s である。同じ区間に相当するスピルを拡大したシミュレーション結果を Fig. 6、実験結果を Fig. 7 に示す。

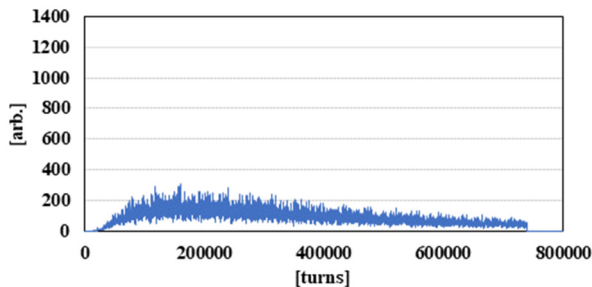


Figure 5: Spill structure simulated using data of 80000 turns with 10 bands.

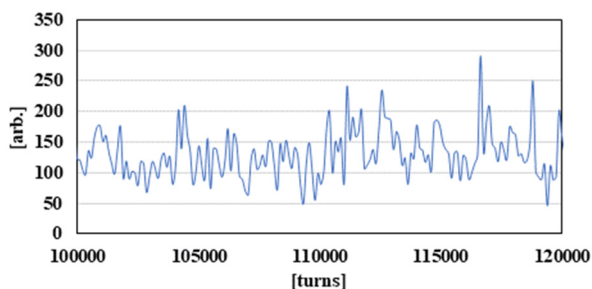


Figure 6: Spill structure plotted with during every 120 turns.

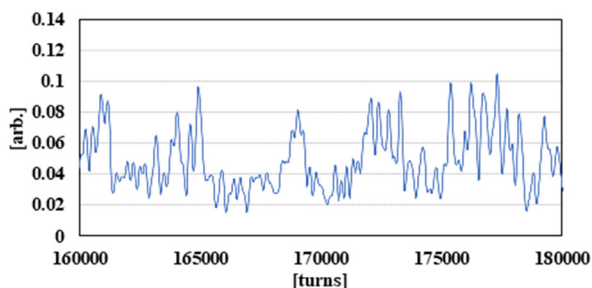


Figure 7: Beam experimental result.

4. シミュレーション結果

4.1 バンド数によるばらつきの変化

前章で述べた方法で計算したバンド数 1 の結果を Fig. 8 に示す。Figure 5 と比較すると明らかにバンド数 10 の方がスピルのばらつきが小さいことが分かる。

スピル強度のばらつきの評価を行うのに標準偏差を用いた。データ数を n 、120 ターンの間に取り出された粒子数を x 、粒子数の平均を \bar{x} とすると、標準偏差 σ は以下の式で与えられる。

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

1 回の取り出しにおけるスピル全体の標準偏差を求めるとき、平均値の変化が大きい立ち上がり部分は計算に含めず、平均値がほぼ同じ区間を用いた。結果として、100000-300000 ターンを 2 分割し、それぞれの区間で標準偏差を計算し、それらを平均した。この計算をバンド数 1,2,4,6,8,10 に対して行った。Figure 9 に計算結果を示す。バンド数が増えるにつれてばらつきの値が減少していくことが分かる。

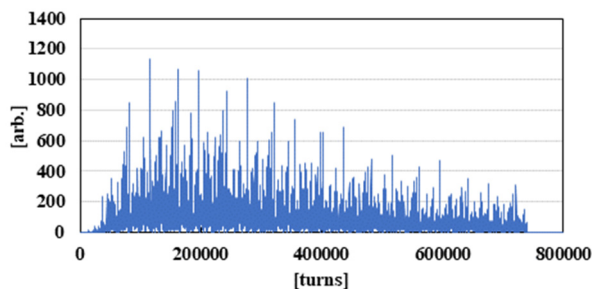


Figure 8: Spill structure simulated using data of 80000 turns with 1 band.

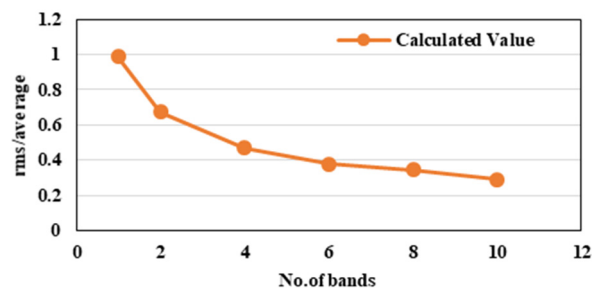


Figure 9: Fluctuation of the spill intensity vs. the number of bands.

5. 実験結果に対するバンド数によるばらつきの変化

5.1 ノイズ除去

ビーム実験の結果に対してばらつきを評価する際、スピルに含まれるノイズ成分を除去する必要がある。そこでビーム on 時と off 時のデータをフーリエ変換し、得られた周波数スペクトルからノイズにあたる成分を 0 にした。Figure 10 にバンド数 10 でノイズ除去を行う前と後のスピルを示す。Figure 11 にバンド数 1 の結果を示す。両結果とも明らかにノイズ成分が減少していることが確認できる。

このノイズ除去の操作をバンド数 2,4,6,8,10 に対しても行い、偏差の計算を行った。計算区間は 120000-360000 ターンを 2 分割して求めた。Figure 12 に各バンドに対する偏差の計算結果を示す。計算結果と同様にバンド数が増えるにつれてスピルのばらつきが減少していくことを確認した。

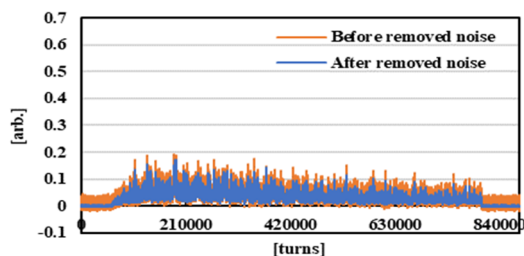


Figure 10: Spill structure measured and that with removed noise. The number of bands is 10.

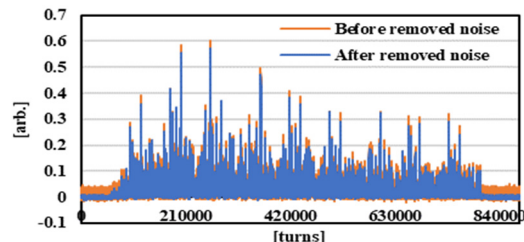


Figure 11: Spill structure measured and that with removed noise. The number of band is 1.

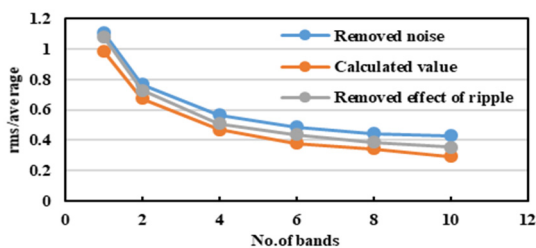


Figure 12: Fluctuation of the spill intensity vs. the number of bands.

5.2 リプル除去

Figure 12 からノイズ除去をしたビーム実験結果の偏差とシミュレーション結果の偏差に差があることが分かる。この原因として四極電磁石電源の電流リプルが考えられる。そこで、ノイズ除去を行ったスピルをフーリエ変換し、得られた周波数スペクトルから電流リプル成分である 60Hz の高調波成分を除去した。Figure 13 にバンド数 10 でノイズ除去とリプル除去の比較図を示す。Figure 14 にバンド数 1 の結果を示す。両結果ともリプル除去を行うことで、スピルにみられる強い成分が抑えられており、全体として

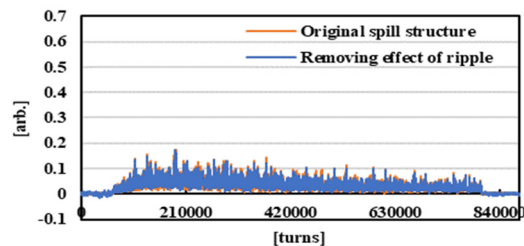


Figure 13: Spill structure with removing effect of ripple and original spill structure. The number of bands is 10.

スピルのばらつきが小さくなった。同様の操作をバンド数 2,4,6,8 に対しても行い、各バンド数の結果に対して偏差の計算を行った。Figure 12 の結果を見ると、ノイズ除去を行ったものに対してリプル除去を行った結果は、全バンドで偏差が計算値に近づいた。

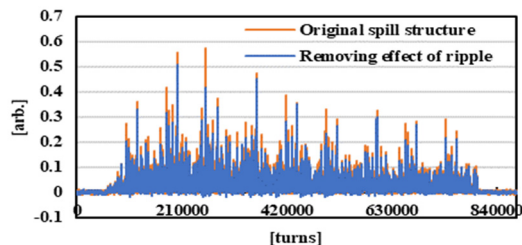


Figure 14: Spill structure with removing effect of ripple and original spill structure. The number of band is 1.

6. CN データの最大値を下げたことによるビーム取り出し量の変化

6.1 CN データの最大値を下げる方法

昨年度行ったビーム実験で CN データの最大値(V_m)と実効値(V_e)の比を 5 から 3.3 まで下げても、スピルのばらつきに影響がないことを確認した[8]。そのため今年度は、先の比をさらに 2.0 まで下げ、実効値を上げることでビーム取り出し量の増加を試みた。今回使用した CN データは、 V_m/V_e の値が 3.3 と 2.0 のものである。

最大値の調整は次のように行った。ある CN データの波形の最大値を $|V_p|$ 、揃えたい最大値を $|V_m|$ とすると $|V_p| > |V_m|$ の場合、前後の値が 0 をクロスするまでの全ての値に $|V_m|/|V_p|$ をかけて波形が滑らかに変化するようにした。

6.2 ビーム取り出し量と偏差

前節で述べた方法で作成した CN データでビームシミュレーションとビーム実験を行った。バンド数は 10 である。Figure 15 にシミュレーション結果、Fig. 16 にビーム実験結果を示す。シミュレーション結果は $V_m/V_e=3.3$ では 400000 ターンで約 50%の取り出しに対して $V_m/V_e=2.0$ では 400000 ターンで既に約 90%取り出された。実験結果も V_m/V_e の値が小さい方が明らかに取り出し量の増加を確認できる。しかし、実験結果はシミュレーション結果ほど急激な取り出され方はしなかった。これは、実験結果には RFKO 装置の周波数特性の影響により、高周波側で特性が悪化するため、特性を考慮していないシミュレーション結果に比べて実効値が小さくなったためだと考えられる。

次にスピルの偏差を計算した。計算に使用した区間はシミュレーション結果では $V_m/V_e=3.3$ は 100000-300000 ターンを 2 分割、 $V_m/V_e=2.0$ は 50000-100000 ターンを用い、実験結果は $V_m/V_e=3.3$ は 120000-360000 ターンを 2 分割、 $V_m/V_e=2.0$ は 120000-240000 ターンを用いた。Table 1 に偏差の計算結果を示す。シミュレーションと実験結果ともに $V_m/V_e=3.3$ より 2.0 の方が偏差は小さいことが分かる。これは繰り返し使用している 8 万ターンの

CN データによってスピルにみられる周期的な変動が $V_m/V_e=2.0$ より 3.3 の方が強調されて見えるためだと考えられる。

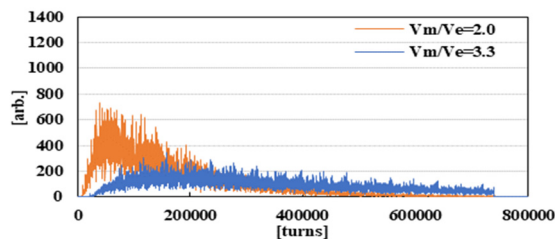


Figure 15: Beam simulation results with V_m/V_e of 2.0 and 3.3.

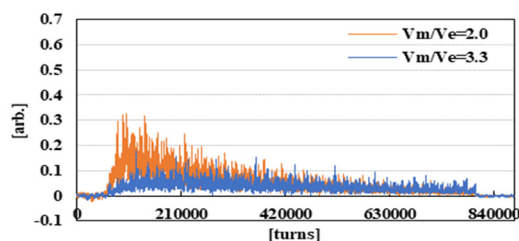


Figure 16: Beam experimental results with V_m/V_e of 2.0 and 3.3.

Table 1: Standard Deviation vs. V_m/V_e Value

	Cal.	Mes.
$V_m/V_e=3.3$	0.302	0.377
$V_m/V_e=2.0$	0.275	0.355

7. バンチングによるスピルのばらつきの変化

バンチングがスピルのばらつきに与える影響を調べるために RF 電圧を変化させ、スピルを測定した。バンド数 1 と 10 に対して RF 電圧が 10V から 400V までのスピルを測定し、そこから偏差を求めた。ここで RF 電圧は RF 制御システムを保護するために最低 10V で運転している。Figure 17 にバンド数1で RF10V と 400V のときのスピルを示す。Figure 18 にバンド数 10 の結果を示す。バンド数 1 では、RF 電圧を大きくすることで強い成分が抑えられていることが分かる。一方バンド数 10 では RF 電圧によってほとんどスピルに変化は見られなかった。Figure 19 に各 RF 電圧に対するスピルの偏差を示す。バンド数 1 の結果から RF 電圧が 200V 以上では偏差に変化がなかった。これは、周回ビームの運動量分散に相当する RF バケットハイト以上ではシンクロトロン振動は変わらないためだと考えられる。正確には実際の測定から 140V である。また、RF 電圧を大きくしてもバンド数 1 の偏差はバンド数10ほど改善されなかった。これはバンド数 1 の RF10V に見られる周期的な強い成分がシンクロトロン振動が与える効果に対して大きいためだと考えられる。バンド数 10 では RF 電圧を変化させてもスピルのばらつきがほとんど変化しなかったことから、マルチバンド CN にすることでバンチングしなくても一般的なビーム取り出しが行えることを確認した。

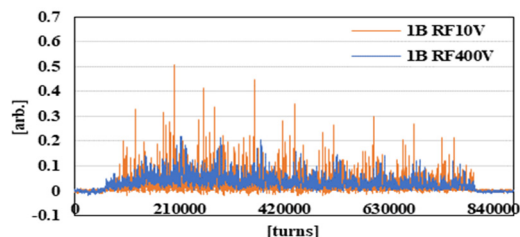


Figure 17: Beam experimental results of using 1 band with longitudinal RF voltage setting of 10V and 400V.

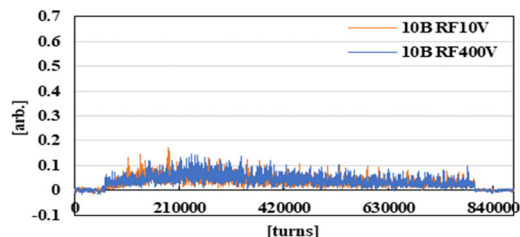


Figure 18: Beam experimental results of using 10 bands with longitudinal RF voltage setting of 10V and 400V.

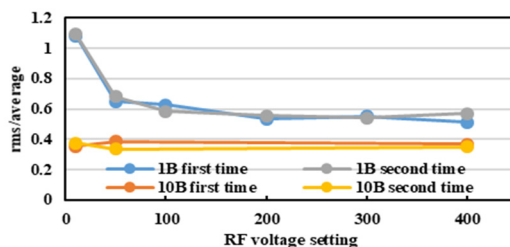


Figure 19: Fluctuation of the spill intensity vs. longitudinal RF voltage setting.

8. 結論

スピルのばらつきはシミュレーションとビーム実験結果ともにバンド数が増えるにつれて小さくなった。取り出し量を増加させるために CN データの最大値を下げる操作を行ったところ、大幅に取り出し量を増加させることができた。また、RF 電圧を変化させてもバンド数 10 においては、スピルの偏差はほとんど変化しなかったため、マルチバンド CN にすることでバンチングしなくても一般的なビーム取り出しが可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Th. Haberer, W. Becher, D. Schardt, G. Kraft, Nucl. Instr. Meth. A 330 (1993) 296.
- [2] T. Nakanishi, Nucl. Instr. and Meth. A621 (2010) 62.
- [3] T. Furukawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A503 (2003) 486.
- [4] T. Shiokawa *et al.*, in these proceedings.
- [5] T. Kuruta, (private communication).
- [6] T. Nakanishi, K. Tsuruha, Nucl. Instr. and Meth. A608 (2009) 37.
- [7] T. Nakanishi, A. Shinkai, Nucl. Instr. and Meth. A769 (2015) 16-19.
- [8] Y. Okugawa *et al.*, Proc. of the PASJ2019, Kyoto, Japan, pp.501-505.