

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

日大生産工(院) ○奥川 雄太郎 塩川 智也
日大生産工 中西 哲也

1. まえがき

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。

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]、クロマティシティー

$$\xi_x \left(\frac{\Delta v_x}{v} \right) = -0.42 \text{ である [5]。}$$

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ァ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ァーマトリクスは、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、

各トランスファ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。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。

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

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。

$$\begin{aligned} h_n &= \frac{2}{\pi n} \cos(m\omega_0 T) \sin(m\omega_b T) \quad (m \neq 0) \\ h_0 &= 4f_b T \quad (m = 0) \\ m &= n - N_h/2 \\ \omega_0 &= (\omega_H + \omega_L)/2 \\ \omega_b &= (\omega_H - \omega_L)/2 \end{aligned}$$

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の周回時間とすると、 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、Equation (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

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

Yutaro OKUGAWA, Tomoya SHIOKAWA and Tetsuya NAKANISHI

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。

$$f_0 \cdot N_s = 250 \times 10^6 \quad (2)$$

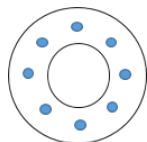


Figure 2: Conceptual scheme of the bins.

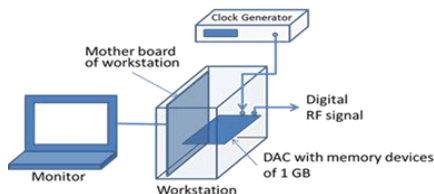


Figure 3: Outline of the CN source.

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、そこからスピ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。Fig. 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。Fig. 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。Fig. 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きる。

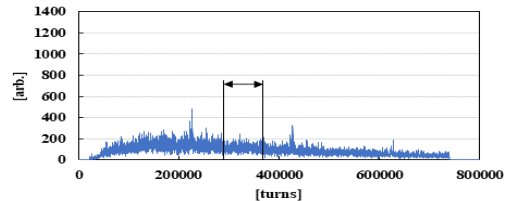


Figure 4: Spill structure simulated using data of 200000 turns with 10 bands.

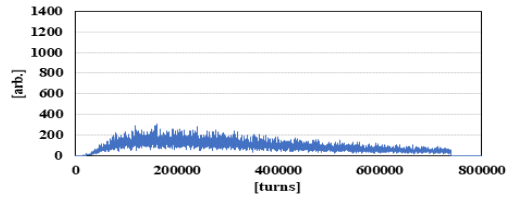


Figure 5: Spill structure simulated using data of 80000 turns with 10 bands.

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Figure 8に示す。Fig. 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。

スピン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ン全体の標準偏差を求める場合、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。Fig. 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。

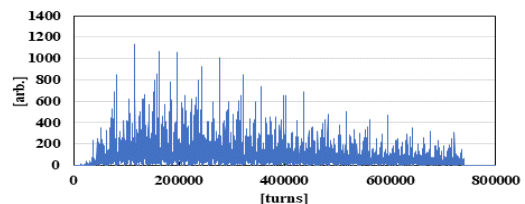


Figure 8: Spill structure simulated using data of 80000 turns with 1 band.

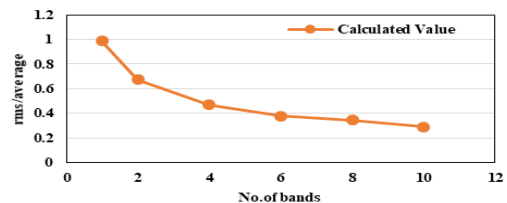


Figure 9: Fluctuation of the spill intensity vs. the number of bands.

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。Fig. 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, 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。Fig. 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。

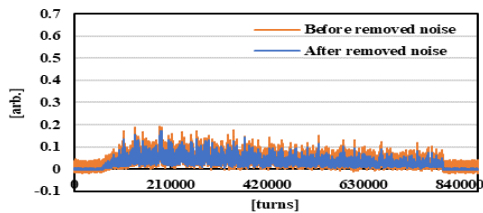


Figure 10: Spill structure measured and that with removed noise. The number of bands is 10.

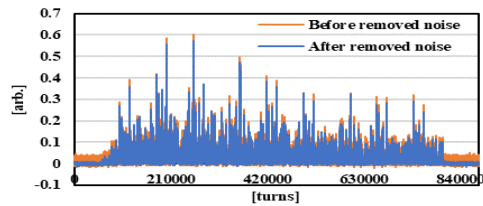


Figure 11: Spill structure measured and that with removed noise. The number of band is 1.

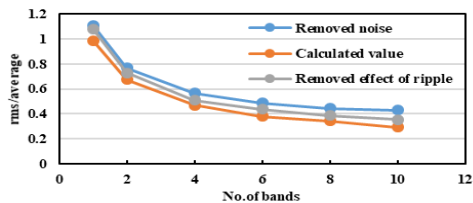


Figure 12: Fluctuation of the spill intensity vs. the number of bands.

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。Fig. 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。Fig. 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。Fig. 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。

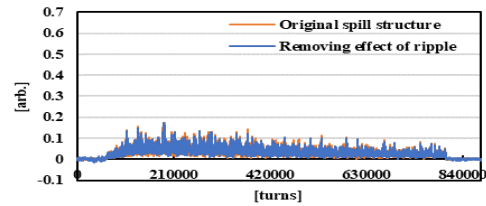


Figure 13: Spill structure with removing effect of ripple and original spill structure. The number of bands is 10.

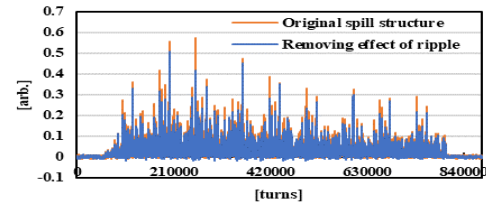


Figure 14: Spill structure with removing effect of ripple and original spill structure. The number of band is 1.

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。

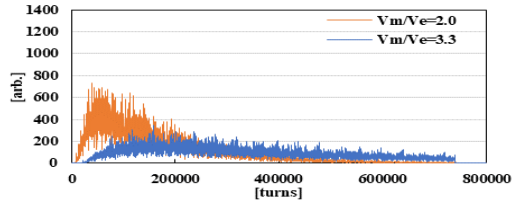


Figure 15: Beam simulation results with V_m/V_e of 2.0 and 3.3.

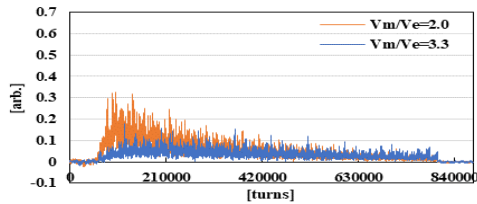


Figure 16: Beam experimental results with V_m/V_e of 2.0 and 3.3.

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。Fig. 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。Fig. 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様なビーム取り出しが行えることを確認した。

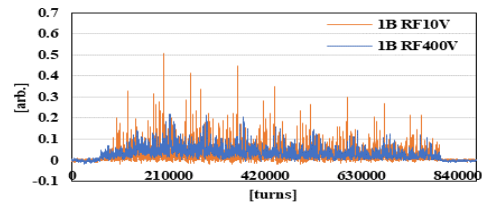


Figure 17: Beam experimental results of using 1 band with longitudinal RF voltage setting of 10V and 400V.

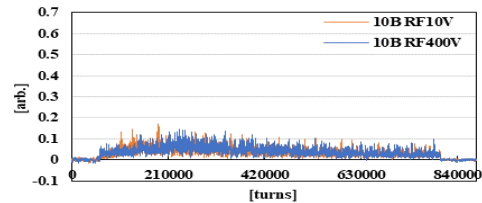


Figure 18: Beam experimental results of using 10 bands with longitudinal RF voltage setting of 10V and 400V.

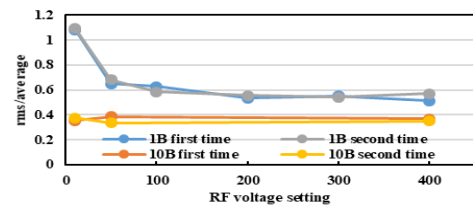


Figure 19: Fluctuation of the spill intensity vs. longitudinal RF voltage setting.

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様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