

マルチバンド RFKO 電界による遅いビーム取り出しの原理実証 試験のためのビームシミュレーション研究

日大生産工(院) ○奥川 雄太郎 山口 輝人
日大生産工 中西 哲也

1. まえがき

シンクロトロンは、陽子または炭素ビームを用いたがん治療に使用されている。シンクロトロンから取り出されるビーム強度は、特にスキニング照射において、正確な線量制御のために一様であることが望まれる。加えて、最も良い線量分布を与えるスポットスキニング照射には高速のビームオン/オフ制御が必要である。これを実現するためのビーム取り出し方法として、シンクロトロン内をベータトロン振動しながら周回している粒子に対して横方向の高周波電界をかけることでビームを拡散させて取り出す RFKO (Radio Frequency Knockout) 法がある。この RFKO 法はいくつかの施設で遅いビーム取り出しに使用されている。筆者らは高周波源として、複数のベータトロン共鳴周波数帯を含むカラードノイズ (CN) をを提案し、ビームシミュレーションで出射ビーム強度が一様になることを示した。

今回、若狭湾エネルギー研究センター (WERC) でマルチバンド方式の原理実証実験を行うために様々な条件でビームシミュレーションを行った。また、ビーム実験で用いる高周波アンプの最大出力電力は、ピーク電圧により制限される。また、スビル強度は実効値の二乗に比例するため、キック角データのピーク値を下げ実効値を上げる操作を行った。このピーク値の操作によるスビルの影響がないことをシミュレーションにより確認した。今回はこれらの結果について報告する。

2. シミュレーション方法

2.1 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 [4]。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

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。

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

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

$$m = n - N_h / 2$$

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

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

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、その数値列はディ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 までのディ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、式 (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。

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

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。ベアーチューンは $v_x = 1.681$ 、 $v_y = 0.791$ 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。周回周波数は炭素 55 MeV/u では、2.973 MHz である。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

BEAM SIMULATION STUDY FOR PROOF-OF-PRINCIPLE TEST OF SLOW BEAM EXTRACTION BY MULTIBAND RADIO FREQUENCY ELECTRIC FIELD

Yutaro OKUGAWA, Teruto YAMAGUCHI and Tetsuya NAKANISHI

し実験に相当する740,000ターンのシミュレーションを行った。粒子数は50万個、RFKOキック角は約45%の粒子が取り出されるように調整した。45%に調整したのは、今回の実験で用いた40Wの高周波アンプではこの程度の取り出しになると考えたためである。

2.2 ビン数の決定

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 1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。その模式図をFig. 2に示す。あらかじめPC上で計算したキック角データをDACのメモリに書き込み、外部クロックにより出力する。キック角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式(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。

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

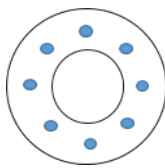


Figure 1: Conceptual scheme of the bins.

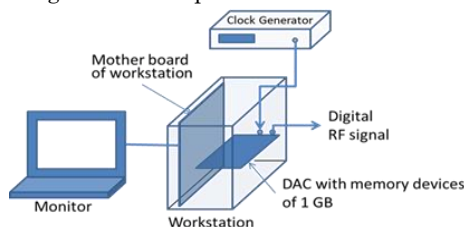


Figure 2: Outline of the CN source.

3. キック角データの選択とシミュレーション結果

DACメモリには限りがあるため、計算したキック角データを繰り返し使用する必要がある。さらに、データ処理をするためにエクセルに取り込むことを考えて、今回は5万ターン分以下のデータを繰り返し使うことにした。そこで、20万ターン分のキック角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3区間のキック角データを選んだ。Figure 3は20万ターン分のキック角を連続的に用いたビームシミュレーション結果であり、100ターンの間に取り出された粒子数をプロットとしたものである。Fig. 3から①1-20000、②1-50000、③70000-120000ターンのキック角データを繰り返し用いることにした。

上記3つの区間でバンド数1,2,4,6,8,10に対してビームシミュレーションとWERCでのビーム実験を行った。1バンドと10バンドの結果をそれぞれFig. 4からFig. 9に示す。Fig. 4からFig. 6はシミュレーション、Fig. 7からFig. 9は実験結果である。シミュレーション結果から1バンドに対して10バンドのほうがスピル強度のばらつきが小さいことが分かる。繰り返しキック角データを用いたことにより、スピルに周期性が見られた。実験結果も同様の結果が得られ、スピルに周期性が確認できたが、10バンドにおいてはシミュレーション結果ほど明確な周期性が見えないものがあった。周回ビームの初期強度分布は、WERCではビーム入射時の粒子密度分布が一樣になるような入射をしていることから、セパトロクス内で一樣な分布とした。ただし、Figs. 3,16の結果はガウス分布で行っている。

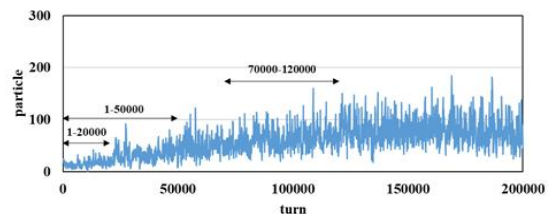


Figure 3: Spill structure simulated with continuous data.

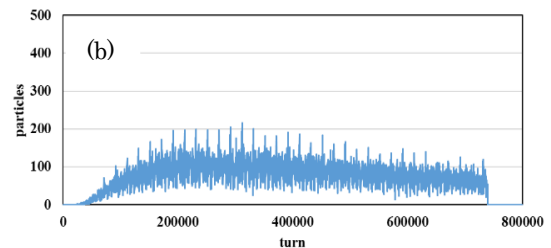
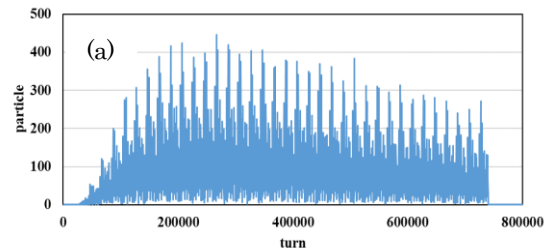
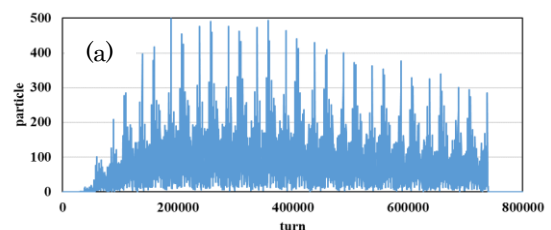


Figure 4: Spill structures simulated using data of 1 to 20000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b)



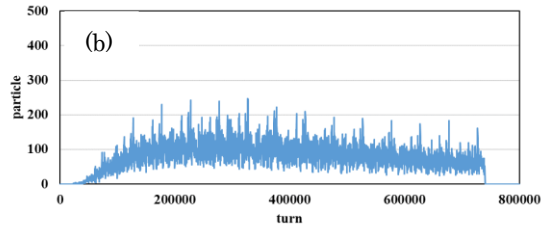


Figure 5: Spill structures simulated using data of 1 to 50000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

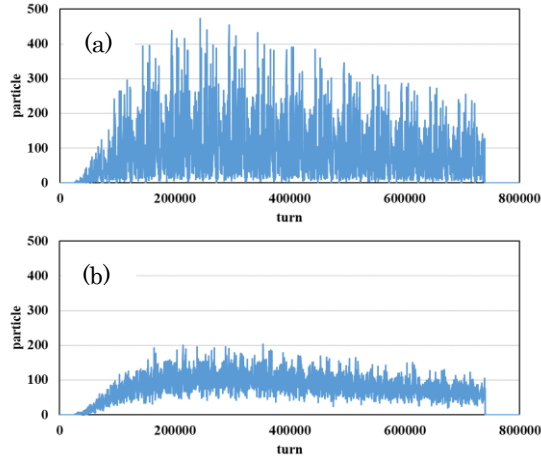


Figure 6: Spill structures simulated using data of 70000 to 120000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

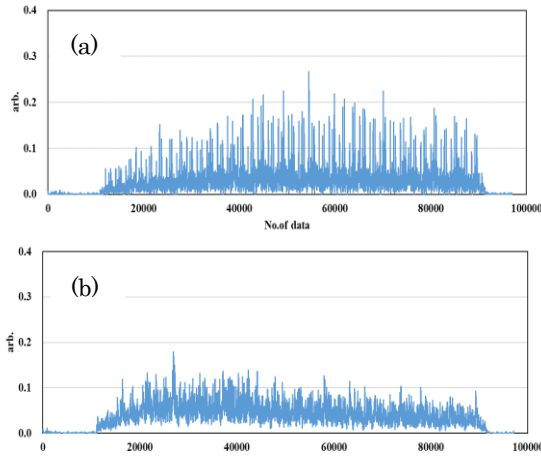


Figure 7: Beam experiment results using data of 1 to 20000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

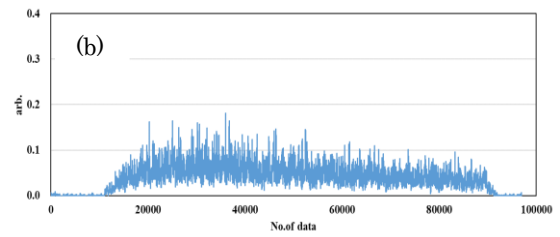
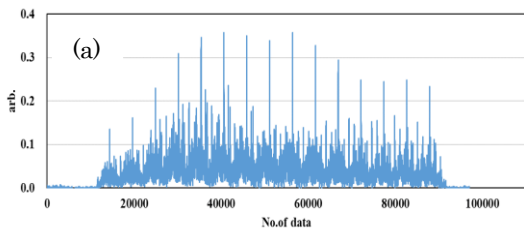


Figure 8: Beam experiment results using data of 1 to 50000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

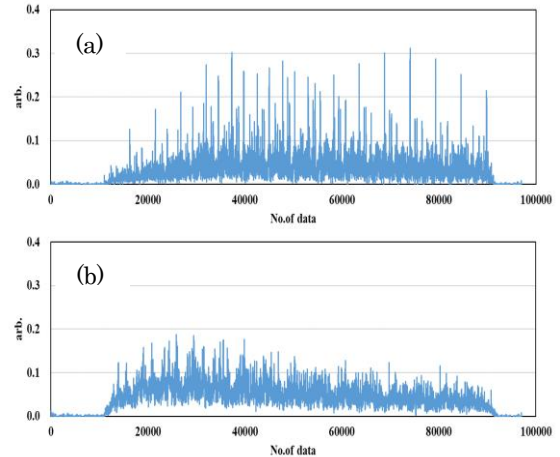


Figure 9: Beam experiment results using data of 70000 to 120000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

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 、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、200000-700000 ターンを 5 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。3 つの繰り返しキック角データをバンド数 1, 2, 4, 6, 8, 10 に対してばらつきを計算した。Fig. 10 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。また、繰り返しキック角データによるばらつきの差は 8 バンドで①が最も良いが、10 バンドでは③も良い結果になった。8 バンドにおいては②、③の 2 つのデータには周期的なスピルの変動があったのに対して①ではほとんど見られなかったことによるものだと考えられる。10 バンドでは、①に周期的なスピルの変動が表れたため 8 バンドから大きな変化はしなかったと考えられる。②と③は周期的なスピルの変動はそのままだが、連続的な変化が少なくなったため 8 バンドよりばらつきの値が減少したと思われる。

一方、同様に評価した実験結果を Fig. 11 に示す。シ

ミュレーションと同様の傾向を示したが、シミュレーション結果ほど標準偏差は下がらなかった。8 バンドと 10 バンドにおいては使用するキック角データによるばらつきの差はほとんど見られなかった。

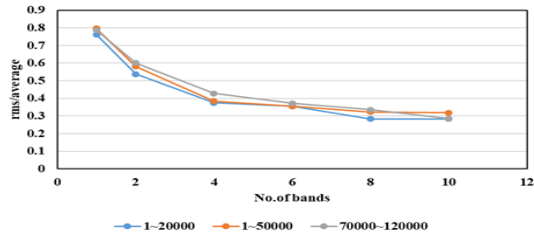


Figure 10: Calculated variations of the spill intensity vs. the number of bands.

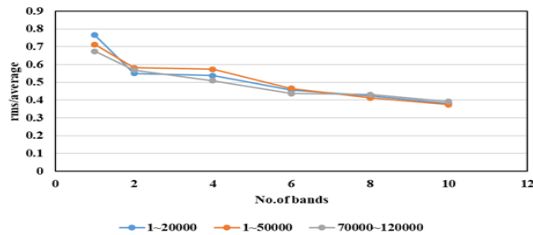


Figure 11: Experimental results of variation of the spill intensity vs. the number of bands.

4. キック角最大値を下げる操作とスピルへの影響

ビーム実験に用いる高周波アンプの最大出力電力は、キック角データの最大値によって決まる。通常の正弦波では、最大電圧は実効値の $\sqrt{2}$ 倍という関係があるが、キック角データの場合この値よりも大きくなる。Figure 12 にキック角データの例を示す。このデータは 1 万ターン分のキック角データを出力したものであり、データ数は 84 万個である。最大値は 7.53×10^{-6} [rad]、実効値は 1.53×10^{-6} [rad]であった。最大値は実効値の約 5 倍となる。このためアンプの出力電圧の実効値は正弦波の場合に比べて $\sqrt{2}/5$ 倍でしか使えない。また、出射粒子数は実効値の 2 乗におおむね比例するため、取り出しへの影響は大きい。そのため、キック角の最大値を下げる操作を行った。今回最大値は $\pm 5 \times 10^{-6}$ [rad]にした。

最大値の調整は次のように行った。 $|V_p| > 5 \times 10^{-6}$ の場合、前後の値が 0 をクロスするまでの全ての値に $5 \times 10^{-6}/|V_p|$ をかけて波形が滑らかに変化するようにした。また、途中でキック角の絶対値が増加に転じた場合は、それ以降の変更は行わないようにした。最大値を下げる処理を行ったキック角データの例を Fig. 13 に示す。 $\pm 5 \times 10^{-6}$ [rad]よりも大きな値が $\pm 5 \times 10^{-6}$ [rad]にそろっていることが確認できる。この操作により実効値は 5/3.3 倍にできた。スピルへの影響を確認するため、ビームシミュレーションを行った。最大値を下げる操作を行う前のシミュレーション結果と操作を行った後のシミュレーション結果を Fig. 14 に示す。この結果から、最大値を下げる操作を行ってもスピルに大きな変化はないことが分かる。

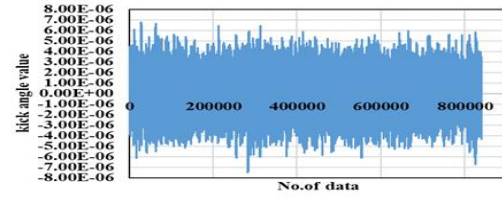


Figure 12: Kick angle data before lowering maximum value.

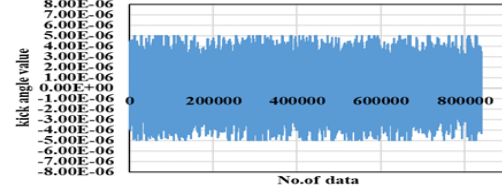


Figure 13: Kick angle data after lowering maximum value.

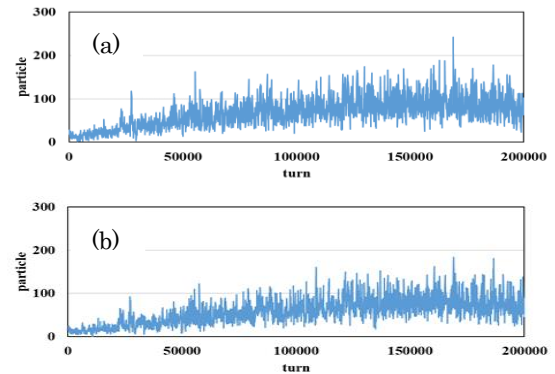


Figure 14: Simulation results using kick angle data before lowering maximum value (a) and after lowering maximum value (b).

5. 結論

WERC での原理実証実験を行うために比較的スピルが平坦な 3 種類のキック角データを用いたビームシミュレーションを行った。8 バンドと 10 バンドにおいてシミュレーション結果では使用するキック角データによって偏差にばらつきが生じたが、実験結果では、ばらつきの差はほとんど見られなかった。また、キック角データの最大値を下げる操作を行うことにより、実効値は 5/3.3 倍にでき、スピルに影響は見られなかった。

参考文献

- [1] L. Falbo, "Advanced Accelerator Technology Aspects for Hadron Therapy," Proceedings of the HIAT, pp. 156-162, 2012.
- [2] T. Nakanishi, Nucl. Instr. and Meth. A621 (2010) 62.
- [3] T. Nakanishi, A. Shinkai, Nucl. Instr. and Meth. A769 (2015) 16-19.
- [4] T. Nakanishi, K. Tsuruha, Nucl. Instr. and Meth. A608 (2009) 37.