

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

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

奥川雄太郎[#], 山口輝人, 中西哲也

Yutaro Okugawa[#], Teruto Yamaguchi, Tetsuya Nakanishi
College of Industrial Technology, Nihon University

Abstract

A Radio Frequency Knockout (RFKO) method is used for fast beam control in beam extraction from a synchrotron. It has been already confirmed by beam simulation that a uniform spill can be obtained by using a multi-band colored noise (CN) including many betatron resonance frequencies as a radio frequency source of the RFKO. The beam simulation study is performed for the proof-of-principle experiment of the beam extraction using the multiband RFKO system at Wakasa Wan Energy Research Center. A digital-to-analog (D/A) converter method has been developed as the CN source. Calculated CN data are used repeatedly in this method. The fluctuation of spill intensity decreases with the number of frequency bands of CN from the simulation result. The fluctuation of spill also decreases when CN data of a section with less fluctuation is used repeatedly. The standard deviation of spill fluctuation to the average value with ten bands becomes a half of that with one band.

1. はじめに

粒子線がん治療における効果的なビーム照射法としてスポットスキニング照射法がある。この方法はシンクロトロンからのビーム取り出しにおいて高速なビーム制御が必要であり、それを目的としてRFKO(Radio Frequency Knockout)法がある[1]。一様なスピルを得るために、高周波源として複数のベータトロン共鳴周波数帯を含んだマルチバンドのカラードノイズ(CN)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樣になることを示した[2]。実際の CN 発生源としては DAC(D/A Converter)を用いる[3]。あらかじめ PC 上で計算した CN 信号による粒子のキック角データを DAC のメモリに書き込み、外部クロックにより出力する。DAC の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。

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。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、スピ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て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ピ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。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。

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

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

$$m = n - N_h/2$$

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

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

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。先ず、-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

[#] ciju19005@g.nihon-u.ac.jp

数バンド幅が f_L から f_H までのデジタルカラードノイズとなる。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。

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

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。

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 55MeV/u では、2.973MHz 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 $f_0=2.973$ 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。

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

$$f_0 \cdot N_s = 250 \times 10^6$$

$$N_s \cong 84$$

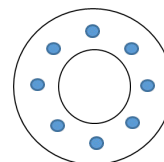


Figure 1: Conceptual scheme of the bins.

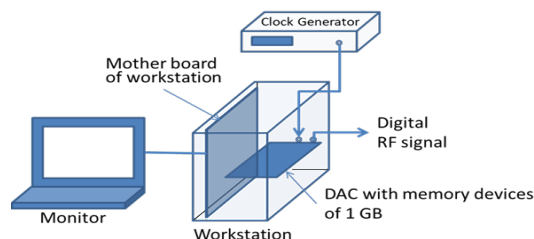


Figure 2: Outline of the CN source.

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。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。Figure 3 から 1-50000 ターンと比較的スピルの変動が少ない 1-20000、70000-120000 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。Figure 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つた。参考のために 1 バンドに対してキック角を連続的に用いたものを Fig. 10 に示す。同図から上述したような周期性は見られないが、スピル強度の変動は繰り返しデータと同様に大きいことが分かる。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様になるような入射をしていることから、セパトリティクス内で一様な分布とした。ただし、Fig. 3、Fig. 16 の結果はガウス分布で行っている。

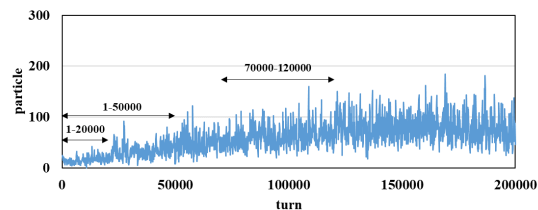


Figure 3: Spill structure simulated with continuous data.

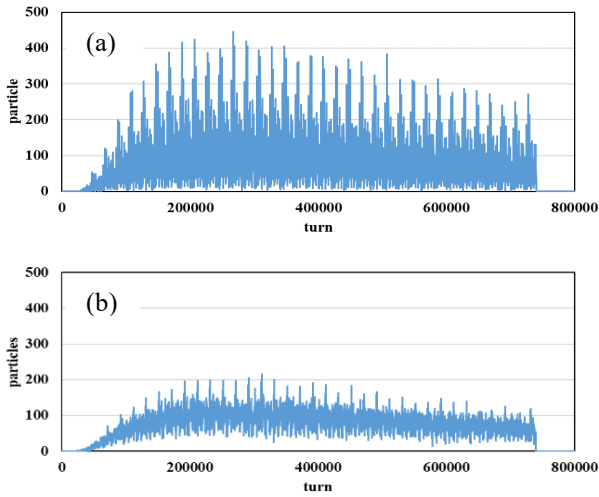


Figure 4: Spill structures simulated using data of 1 to 20000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

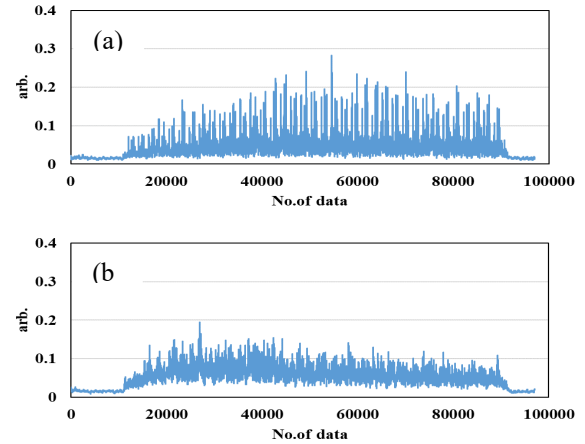


Figure 7: Beam experiment results using data of 1 to 20000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

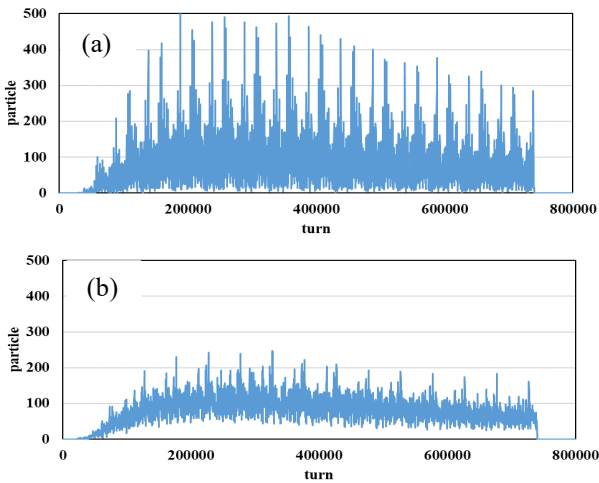


Figure 5: Spill structures simulated using data of 1 to 50000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

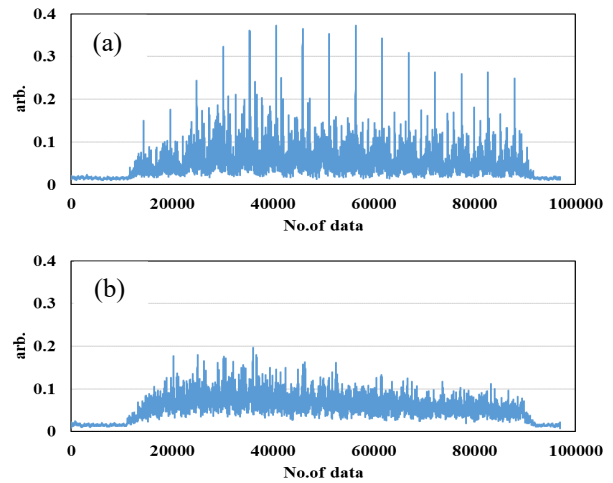


Figure 8: Beam experiment results using data of 1 to 50000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

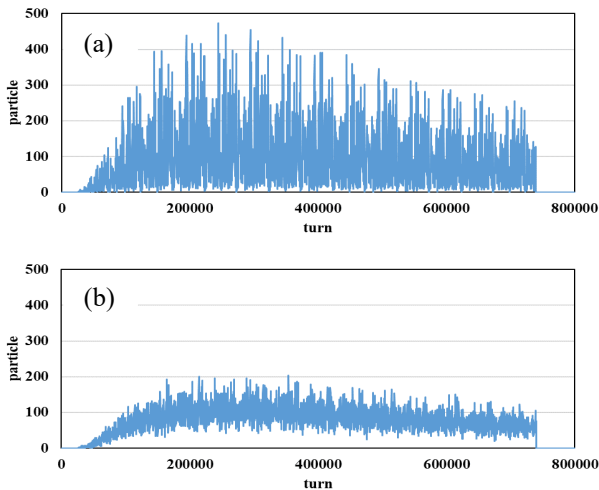


Figure 6: Spill structures simulated using data of 70000 to 120000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

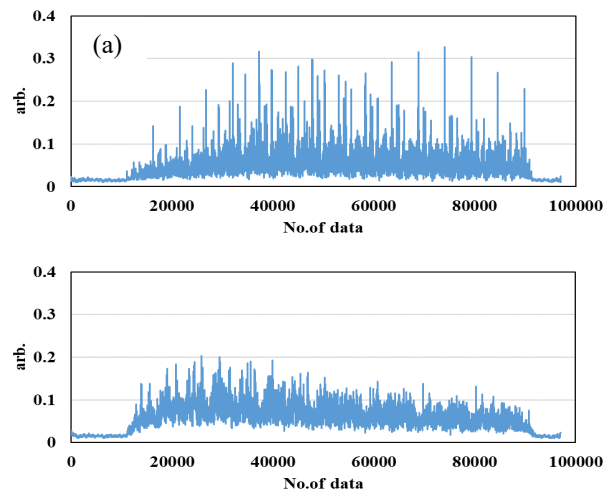


Figure 9: Beam experiment results using data of 70000 to 120000 turns with 1 band (a) and 10 bands (b).

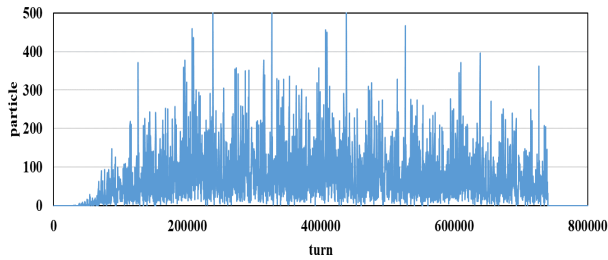


Figure 10: Spill structure simulated with continuous data with 1 band.

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。Figure 11 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は、変動の少ない区間を用いた方がばらつきが小さいことが分かる。

一方、同様に評価した実験結果を Fig. 12 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。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。

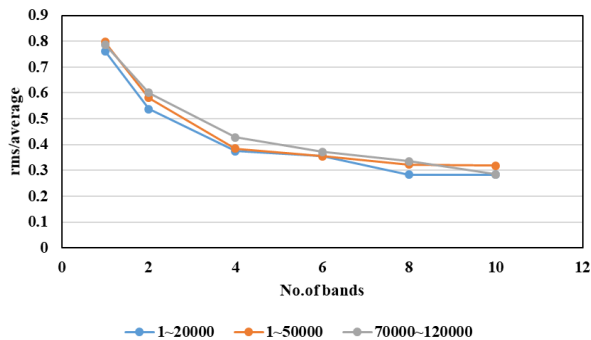


Figure 11: Calculated variations of the spill intensity vs. the number of bands.

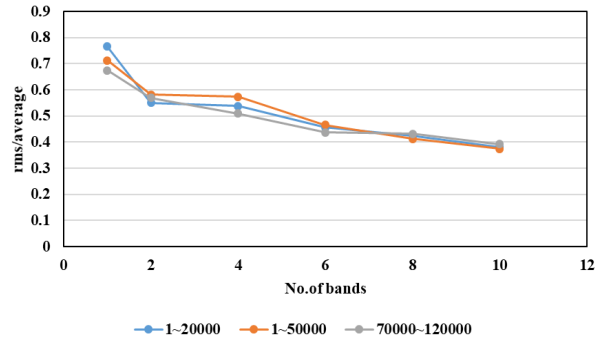


Figure 12: Experimental results of variation of the spill intensity vs. the number of bands.

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 13 にキック角データの例を示す。このデータは 1 万ターン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. 14 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。また、Fig. 13 の最大値 7.53×10^{-6} [rad]付近を拡大したものを Fig. 15 に示す。最大値を含むデータだけ変更し、0 をクロスした後のデータに変化がないことを確認できる。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. 16 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対して大きな変化はないことが分かる。

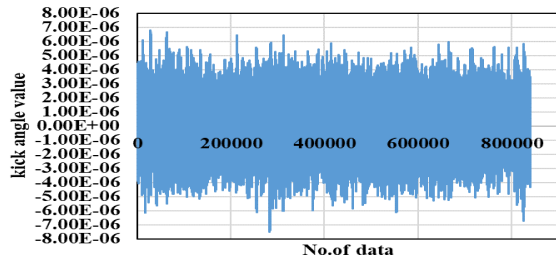


Figure 13: Kick angle data before lowering peak value.

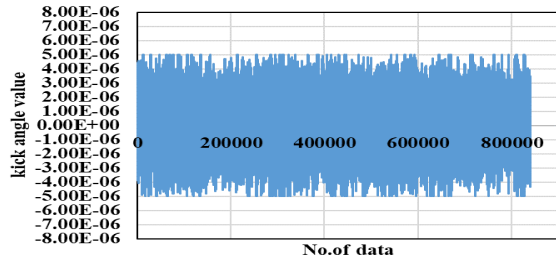


Figure 14: Kick angle data after lowering peak value.

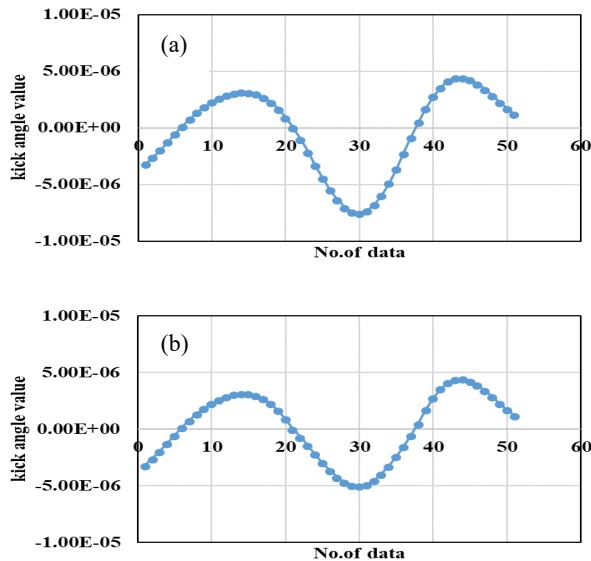


Figure 15: Kick angle data before lowering peak value (a) and after lowering peak value (b).

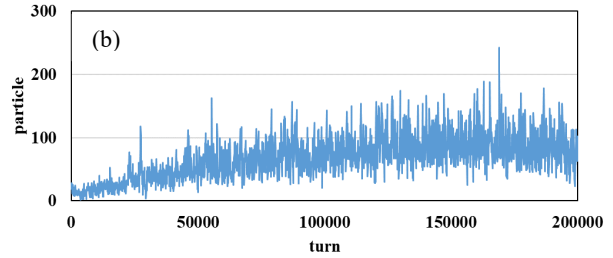
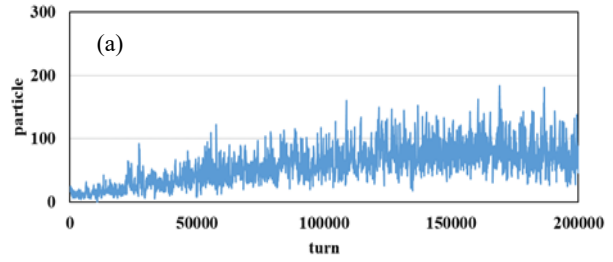


Figure 16: Simulation results using kick angle data before lowering peak value (a) and after lowering peak value (b).

5. 結論

WERC での原理実証実験を行うために連続的なキック角データから、回転数が 1-20000, 1-50000, 70000-120000 のデータを繰り返し用いたビームシミュレーションを行った。その結果、スピル強度の変動が少ない 1-20000 ターンのキック角データを用いた時に最もばらつきが小さくなった。スピル変動の標準偏差は 1 バンドに対して 10 バンドの結果は約半分減少した。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るスピルへの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.