

シンクロトロンからの取出しビームの一様化に関する研究

STUDY ON UNIFORMIZATION OF A BEAM EXTRACTED FROM A SYNCHROTRON

中西哲也[#]

Tetsuya Nakanishi

College of Industrial Technology, Nihon University

Abstract

A slow beam extraction using a multiband RF signal was performed at the WERC synchrotron successfully. The variation of spill intensity was improved with the number of frequency bands, and a fast spill switching-off was attained. The RF signal was generated using digital data calculated with a digital filter method. The data for 80000 turns were repeatedly used. The experiment showed that roughly the same fine spill structure was repeated with 80000 turns. This suggests that more uniform spill could be obtained with modifying the digital data locally and the number of frequency bands could be decreased. Beam simulation showed that well-uniform spill can be obtained by modifying the digital data of 10000 turns even if the number of frequency bands is six.

1. はじめに

粒子線がん治療装置の主加速器であるシンクロトロンからの遅いビーム取出し法として高周波ノックアウト (RFKO) 方式が使われている。この方式はビーム on/off 制御を高速にできる利点がある。効果的な照射方法であるスポットスキヤニング照射では、特にこの高速制御が必要とされる。しかし、高周波信号の周波数バンドが一共鳴周波数帯だけだと取出しビーム (スピル) 強度の変化が大きくなる問題がある。その解決法として周回ビームをバンチングする方法があるが、ビーム on/off 制御が遅くなる問題が新たに生じる[1, 2]。

これらの問題を解決する方法として筆者は複数の共鳴周波数帯を含む高周波信号を使用する方法を提案し、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原理実証 (POP) 試験に成功している[3, 4]。

この高周波信号の発生方法は、必要なスペクトルから作成した信号のデジタルデータを DA コンバータ (DAC) に記録し、外部クロックに同期して出力する。記録媒体は1回の取出しに必要な記録容量はあるが、データを繰り返し使うことも可能であり、POP 試験では 8 万ターン分のデータを繰り返し使った。それによるスピルを詳細に検討した結果、データの繰り返しに合わせてスピルの微細構造も繰り返されるのが分かった。これは、データを部分的に調整することによりスピル強度の変動をより低減できることを示唆する。発表ではビームシミュレーションで行ったこの検討結果について報告する。

2. マルチバンド信号を用いた RFKO 取出しの概要

取出しのために周回粒子のベータatron振動を大きくするためには、その振動数の高周波電界を与える必要があるが、振動数は粒子の振幅により異なるため、RFKO の信号としてはその周波数成分を含んだ信号とする必要がある。そのような信号を用いてビームシミュレーションした結果を Fig. 1(上)に示す。信号はデジタル

ホワイトノイズからデジタルフィルタ法を用いて必要な周波数帯を含む信号を作り出した。このような信号をここではカラードノイズ (CN) と呼ぶ。一共鳴周波数帯だけでは同図の 1 バンドに示すようにスピルの強度変化が大きい。これに対して、筆者が提案した方式では Fig. 1(下)に 10 個の共鳴周波数帯を含めた信号による結果を示すが、スピルの変化は明らかに小さくなるのが分かる。また、ビーム off 時間も 100 μ s 程度以下で行えることを示唆した[3, 4]。

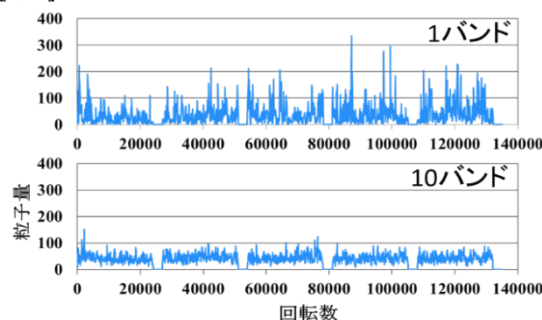


Figure 1: Spill structures with 1 and 10 bands.

1/3 共鳴を用いた取り出しでは、共鳴周波数は以下の式で表される。

$$f = \left(n \pm \frac{1}{3} \right) f_0$$

ここで、 n は整数、 f_0 は粒子の周回周波数である。上記 10 バンドでは $n=0\sim5$ とした周波数付近のバンドを用いた。WERC シンクロトロンの実験では、 f_0 は約 3 MHz で各バンド幅は 100 kHz 以下とした。ちなみに、普及型重粒子線 (炭素) 装置では約 3.5 MHz である。

ビーム実験に用いた RFKO システムのブロック図を Fig. 2 に示す。マルチバンドスペクトルの CN 信号は次のような手順で信号を発生させる[5]。まず、デジタルフィルタ方式で CN データを作成後、DAC のメモリに保存し、そのデータを外部クロックにより出力する。今回使用した CN データは、20 万ターン分のデータでビームシミュレーションした中で、スピルの変化が比較的小さい 8 万ターン分を用いて繰り返し出力した。また、シンクロトロンの一週

[#] nakanishi.tetsuya@nihon-u.ac.jp

当たりのサンプリング数は 84 とした。ここで、使用した DAC(AVAL DATA 社 APX-500/DAM-500)では最大約 600 万ターン分のデータ保存が可能である。

DACを装着した Workstation から出力した CN は Low pass filter を通して RF スイッチに入力され、ビーム取り出し時間の間だけ出力される。その後位相分配器により、位相が 180 度異なる信号として、それぞれ 40 W の広帯域高周波アンプ、IT、APN を通して各 RFKO 電極に入力される。

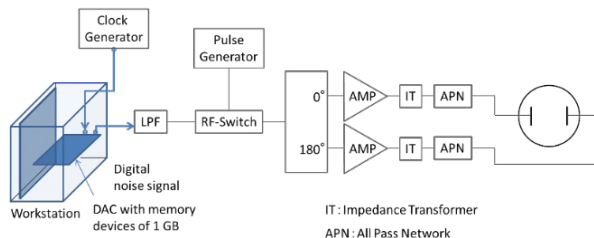


Figure 2: Block diagram of the RFKO system.

3. スピルの微細構造と CN データの関係

3.1 ビーム実験結果

WERC シンクロトロン[6]で実験したときの粒子は炭素イオンで、出射エネルギーは 55 MeV/u、取り出し時間は 250 ms で周期は 2 s であった。チューンは $v_x = 1.683$ 、 $v_y = 0.787$ 、周回周波数は 2.97 MHz で、クロマティシティは $\Delta v_x / \Delta P / P = -0.42$ 、運動量分散は $\Delta P / P = 6 \times 10^{-4}$ である。また、スピル測定には線量モニタが用いられ、サンプリング周期は $8 \mu s$ 、信号処理回路は最終段に 33.9 kHz の LPF がある。

測定したスピルを Figs. 3-6 に示す。バンド数は 10 である。Figure 3 は生データをフーリエ変換してノイズ成分を除去して逆変換した結果で、Fig. 4 は更にシンクロトロンの電磁石の電流リップルによる影響、具体的には 60 Hz 付近とその高調波成分を除去した結果である。図の横軸は線量モニタのサンプリング周期 ($8 \mu s$) で取得したデー

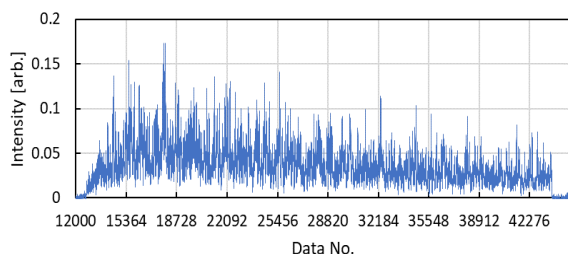


Figure 3: Measured spill structure with removed noise.

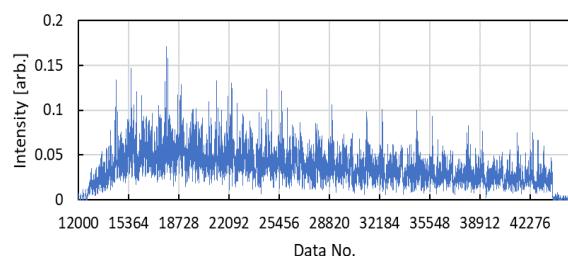


Figure 4: Measured spill structure with removed noise and the effect of current ripple of magnets.

タ No.である。8 万ターンは 3364 のデータ数に相当し、図はそのデータ数で区切っているが、スピル構造の周期性が確認できる (Fig. 4)。スピル強度のバラつきは、比較的平均強度が一定している 18700 から 22000 を用いて標準偏差を求め平均値で割った値 (σ/ave) で評価し、ノイズ除去後が 0.41、リップル除去後が 0.34 であった。

Figure 5 は Fig. 3 のデータ No. 20000-21000 と 8 万ターン後のその区間に相当するデータを重ね書きしたもので、Fig. 6 は Fig. 4 の同区間のスピル構造を示す。Figure 5 は電流リップルによる変動により分かりにくいのが、その成分を取り除いた Fig. 6 からスピルの微細構造は CN データの繰り返しに応じて同様の構造が繰り返されていることが分かる。

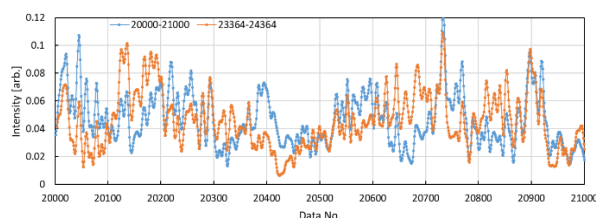


Figure 5: Spill fine structures with removed noise.

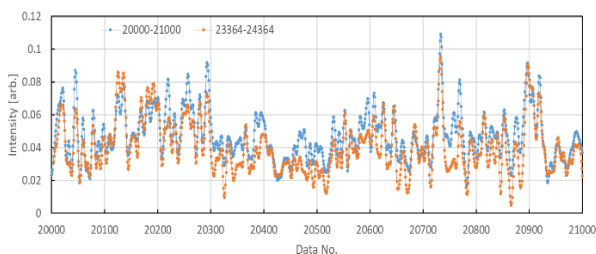


Figure 6: Spill fine structures with removed noise and the effect of current ripple of magnets.

Figure 7 は連続的に入射・出射を繰り返す中で、適当な間隔でデータ収集したスピルの 3 ショットである。同図に示すデータは、Fig. 4 から分かるように 8 万ターン周期の強いピークがあり、データ No.22000 付近のピーク以降の 1000 のデータを使用した。出射のタイミングと CN データ出力開始のタイミングは一致していない場合もあり、3 ショットのピークのデータ No.は異なるため、横軸は 1~1000 の同じ番号とした。この図からも、シンクロトロンの入射・出射に関わらずスピルの微細構造は CN データの繰り返しに応じて繰り返されていることが分かる。

従って、スピル強度が強い部分は下げ、弱い部分は上げるように CN データを部分的に調整(変更)すれば、スピル強度の変動はさらに低減できると考える。

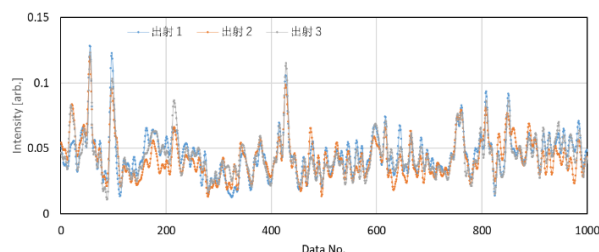


Figure 7: Spill fine structures of 3 shots.

Figures 8, 9 にはバンド数6の場合のスピル構造と2ショットのスピル微細構造の重ね描きを示す。バンド数10の場合と同様にCNデータの繰り返しに応じて微細構造も繰り返されていることが分かる。

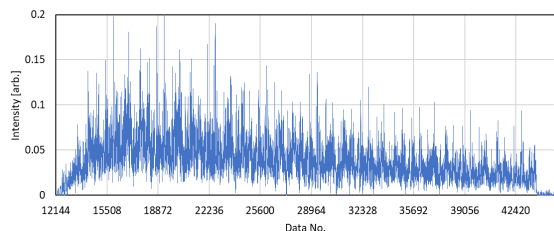


Figure 8: Measured spill structure for 6 bands with removed noise and the effect of current ripple.

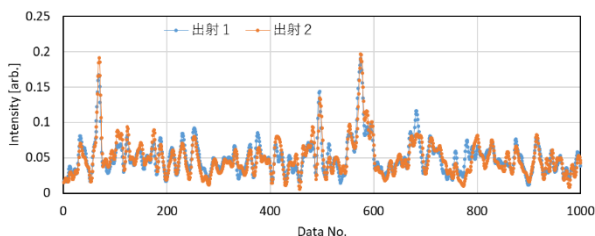


Figure 9: Spill fine structures of 2 shots.

3.2 計算結果

Figure 10 に実験で使用した10バンドのCNデータと同じデータを使って計算した結果を示す。図は100ターン(34 μ s)の間に取り出された粒子数を線で結んだものである。初期粒子数は200万個である。8万ターンの周期性は見られるが、実験結果とは構造は異なる。理由は線量モニタの周波数応答や初期粒子分布の違い等が考えられる。Figure 11 は16万ターン目から実験の1000データ分に相当する18390ターンまでのスピルの微細構造と、その8万ターン後の同区間のスピルを重ね書きしたものである。スピル構造は繰り返されていることが分かる。スピルのバラつき(σ /ave)は0.28である。

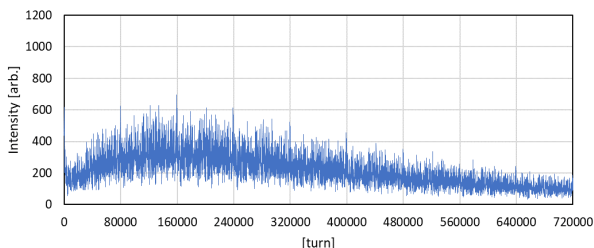


Figure 10: Simulated spill structure using CN data of 10 bands of 80,000 turns repeatedly.

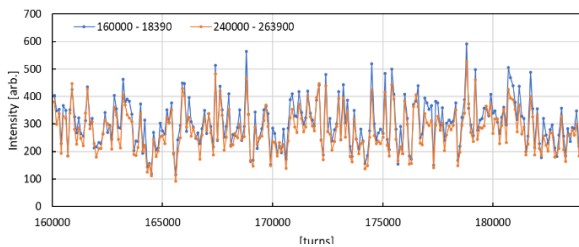


Figure 11: Magnification of spill structures in Fig. 10.

6バンドの結果をFigs. 12, 13に示す。10バンドと同様に8万ターンの周期性が見られ、スピルの微細構造もCNデータの繰り返しに応じて繰り返されていることが分かる。スピルのバラつき(σ /ave)は0.39である。

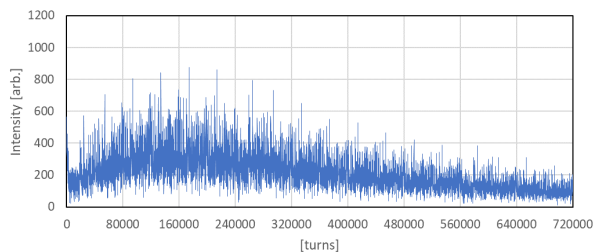


Figure 12: Simulated spill structure using CN data of 6 bands of 80,000 turns repeatedly.

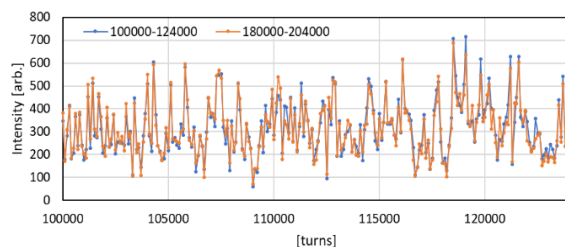


Figure 13: Magnification of spill structures in Fig. 12.

4. CN データ調整によるスピル強度の一樣化に関するシミュレーション検討

4.1 10バンドの結果

スピルの微細構造は実験と計算では異なっていたので、CN調整は実際のスピルを見ながら繰り返し行う必要がある。そのためには、繰り返されるCNデータ数は少ない方がよい。そのため、繰り返しデータ数は1万ターン分で行った。Figure 14 は32回繰り返し用いて計算した結果である。初期粒子数は200万個である。スピルのバラつき(σ /ave)は繰り返し8万ターンの結果とほぼ同じであった。

調整にはFigure 15 に青色で示す3万から4万ターンの

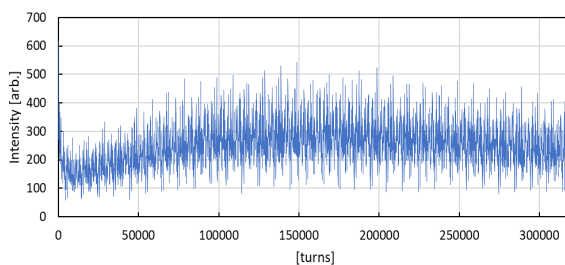


Figure 14: Spill structure using CN data for 10 bands of 10,000 turns repeatedly.

スピルを用いた。図は100ターンの間に取り出された粒子数を丸印でプロットし、それらを線で結んだものである。この平均値から目標粒子数の上限・下限値を決め、それを超えた場合、その50ターン前から150ターン前の間のCN強度を同じ割合で増減した。それによりその後のスピル強度も変わるため、前記調整を繰り返した。50ターン前からにした理由は、セパトリクスを出てから取り出されるまでに時間がかかるためである。

調整後のスピルを同図橙色で示す。調整した結果の CN データを繰り返し用いて 32 万ターンのシミュレーションをした結果を Fig. 16 に示す。スピル強度のバラつきは、平均強度が比較的一定している 13 万から 17 万ターンを用いて標準偏差を求め平均値で割った値は、調整前の 0.28 から 0.14 に改善された。

4.2 6 バンドの結果

CN 調整によりバンド数を減らすことができれば、

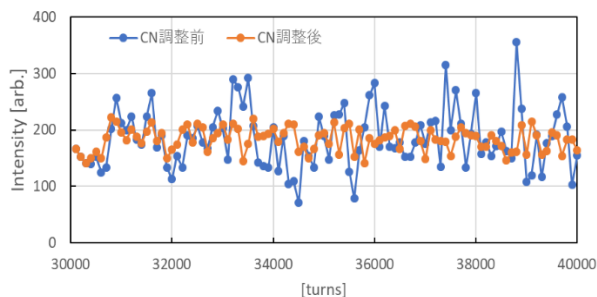


Figure 15: Spill structures before and after modifying CN data for 10 bands.

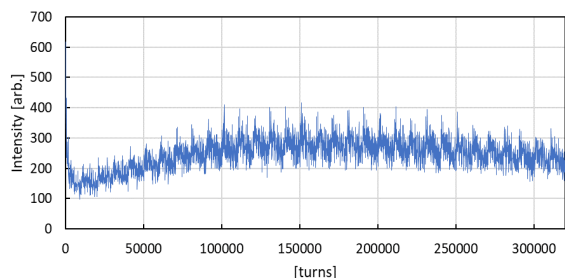


Figure 16: Spill structure with modified CN data for 10 bands.

RFKO システムの効率は良くなる。普及型重粒子線治療に用いられるシンクロトロンでは 10 バンドとすると 0.8-16.3 MHz の周波数帯が必要となるが、システムの周波数特性は主に All Pass Network (APN) によって決まる。前段の高周波変圧器の電圧比が 1:5 の場合、APN 出力は 16.3 MHz で約 50 % に低下する。電圧比が 1:4 では約 90 % である[7]。これに対して、6 バンドの場合は必要な最大周波数は 9.3 MHz となり、電圧比 1:5 でも出力の低下は殆どなくなる。また、陽子線の場合、必要な周波数帯は 6 バンドなら 1.6-21.4 MHz となり、電圧比 1:4 では APN の出力低下は 21.4 MHz で 70 % 程度である。

Figure 17 は 1 万ターン分の CN データを繰り返し用いて 32 万ターンまで計算した結果である。6 バンドでは初期粒子数は計算時間を短くするために 100 万個とした。

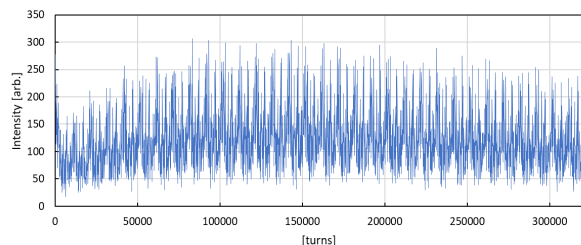


Figure 17: Spill structure using CN data for 6 bands of 10,000 turns repeatedly.

スピルのバラつきは $\sigma/\text{ave} = 0.41$ である。このスピルの 5 万から 6 万ターンのデータを使って CN を調整した結果を調整前のデータとともに Fig. 18 に示す。また、この調整後の CN データを繰り返し用いて 32 万ターンまで計算した結果を Fig. 19 に示す。スピルのバラつきは $\sigma/\text{ave} = 0.41$ から 0.16 まで改善された。

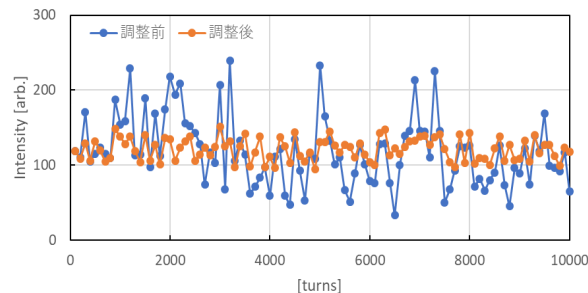


Figure 18: Spill structures before and after modifying CN data for 6 bands.

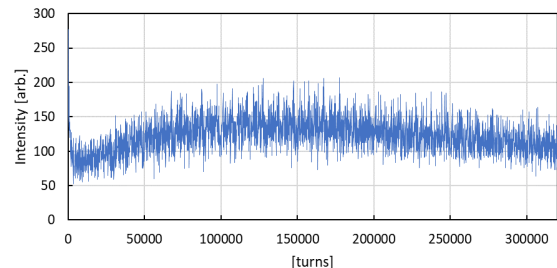


Figure 19: Spill structure with modified CN data for 6 bands.

4.3 CN 調整ターン数とスピルの関係

CN 調整は対象回転数が少ないほど調整作業を短縮でき効果的である。しかし、Fig. 20 に 6 バンドで計算したスピルに対して調整した 5000 ターン分と 2000 ターン分で計算した結果を示すが、CN データ数を減らすことにより取出し粒子数が減る結果となった。CN データ数と取出し粒子数 (30 万ターンまでの取出し粒子数 / 初期粒子数) の関係を Fig. 21 (左) に示すが、1 万ターン付近では変化は小さいが、ターン数を減らすほど取出し粒子数は

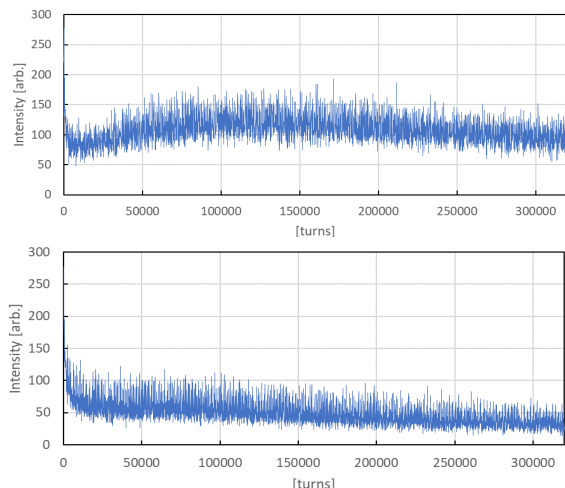


Figure 20: Spill structures with modified CN data of 5000 (upper) and 2000 (lower) turns for 6 bands.

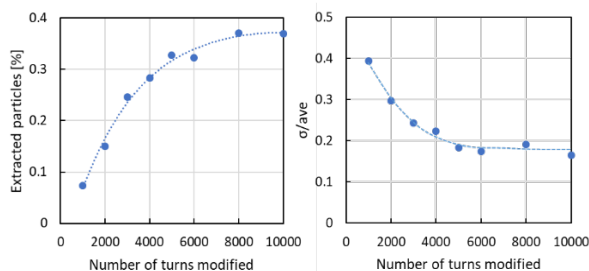


Figure 21: The ratio of extracted particles to initial particles (left) and σ/ave (right). The horizontal axis is the number of CN data modified in unit of turns.

減少することが分かる。また、スピルのバラつきを Fig. 21 (右) に示すが、ターン数の減少によりバラつきは増加することが分かる。

原因を調べるために、1000 ターンと 1 万ターンのデータをフーリエ変換して周波数スペクトルを求めた。1/3 共鳴付近と 2/3 共鳴付近について Fig. 22 に示す。シンクロトロンでの取出し時のベアーチューンは 1.683 なので、セパトリティクス内のチューンスプレッドは 2/3 共鳴では $1.666 \dots \sim 1.683$ 、1/3 共鳴では $1.317 \sim 1.333 \dots$ である。1 万ターンではスペクトルはバラつきが大きいのが平均的には一様に近く、変化のピークとピークの間は狭い。RFKO による拡散は、単一周波数でもその付近のベータトロン振動数を有する粒子も拡散するので、セパトリティクス内の全粒子はおおよそ一様に拡散されていると考える。これに対して 1000 ターンでは、スペクトルはゆっくりと変化しており、特に 1/3 共鳴では拡散力が非常に弱い周波数帯が広く存在することが分かる。このようなスペクトルの違いが回転数当たりの取出し粒子数が減少する原因で、スピルのバラつきが大きくなる原因でもあると考える。

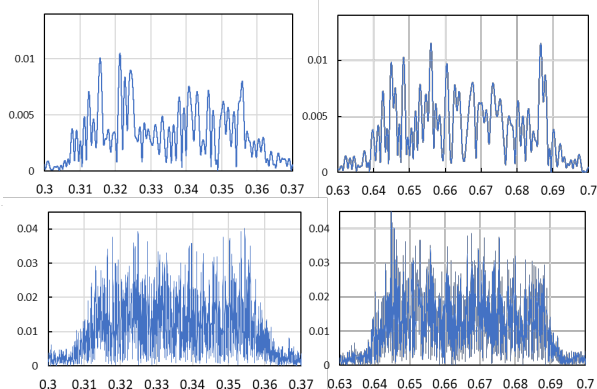


Figure 22: Frequency spectra of CN data of 1000 (upper) and 10000 turns (lower). Horizontal and vertical axes of all figures are frequency in tune unit and intensity.

5. 結論

RFKO 信号源として CN データを繰り返し使用する場合、CN データの繰り返しに応じてスピルの微細構造も繰り返されることがビーム実験でも分かった。これは、CN データを局所的に調整(変更)することによりスピルのバラつきを更に低減できることを示唆する。ビームシミュレーションによる検討の結果、1 万ターン分の CN データを調整することで、バラつきは 10 バンドの場合半分に低

減できた。6 バンドでも 10 バンドの調整後のバラつきと同程度まで低減できた。調整ターン数は、少ないと取出し粒子数が少なくなり、バラつきも大きくなることが分かった。1 万ターン程度が適当である。

参考文献

- [1] L. Falbo, “Advanced Accelerator Technology Aspects for Hadron Therapy”, Proceedings of the HIAT 2012, pp. 156-162, 2012.
- [2] T. Furukawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 503, p. 486, 2003.
- [3] T. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, vol. 462, pp. 177-181, 2020.
- [4] T. Shiokawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 1010, p. 165560, 2021.
- [5] T. Nakanishi, A. Shinkai, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 769, pp. 16-19, 2015.
- [6] K. Matsuda *et al.*, Proc. of the PAC2001, Chicago, USA, pp. 2590-2592.
- [7] 中西哲也, 日本大学生産工学部第 54 回学術講演会講演概要 (2021-12-11), ISSN2186-5647, pp.202-205.