生産工学部電気電子工学科 鶴羽光平、阿部勇次、新井悠斗 同准教授 中西哲也

1.はじめに

重粒子線がん治療は、がん患部の周りの正 常な細胞への影響が少なく、患者への負担が 少ない[1]。重粒子線を効果的に照射する方法 として考案されているスポットスキャニング 照射法では、ビームを細かく絞り、それを数 モブロックに分けたガン患部の一つ一つに照 射する。この照射法を行うためのビーム取り 出しの方法として、パルス四極電磁石(PQ) とRFKO装置を用いたQAR法が提案されている。 本研究では、QAR法のシミュレーションプログ ラムを開発することにより、装置を稼動させ ずに結果を予測し、実験の効率化を図ること を目的とする。ここで述べるシミュレーショ ンはHIMACのラティスを用いて行う。

2. トランスファーマトリクスの計算 加速器において、荷電粒子はローレンツカ

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2} = qvB \cdot \cdot \cdot (1)$$

を受けて円運動する。シンクロトロンでは、 粒子の中心軌道からのズレをx、傾きを

x  $(=\frac{dx}{ds})$ とすると、 x''+K(s)x=0 · · · (2)

が成り立つ。これをHillの方程式という。こ こで、 *K*(*s*)は周期関数である。この方程式 は次の行列式で解くことができる。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \left( M_x \right) \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \cdot \cdot \cdot (3)$$

ここで、 $M_x$ をトランスファーマトリクスと いい、 $x_0, x_0'$ は位相平面上の粒子の初期値で ある。本プログラムでは、 $M_x$ は既存のプロ グラムで計算し入力データとして与えた。

3.カラードノイズ電界によるキック角の計算\_\_\_\_\_

RFKO装置は粒子に高周波電界を加えること により、x 値を増加させて、拡散する装置で ある。粒子は様々な周波数で運動しているの で、単一の周波数の電界では全て拡散するこ とができない。そこで、RFK0装置の信号源と してカラードノイズを用いる。白色雑音は全 ての周波数成分を均一に含んだ雑音である が、白色雑音の周波数成分の範囲を限定して いるものをカラードノイズという。白色雑音 では、余分な周波数成分が多く含まれるので、 カラードノイズを用いる。カラードノイズに よるキック角は次式で与えられる[2]。

$$\delta_i = 2\sum_{k=1}^N \sqrt{S(\overline{\nu_k})} \Delta \overline{\nu_k} \cos\{2\pi \overline{\nu_k}(N_{rev} + \frac{i}{N_s}) + \theta_k\}$$
  
••••(4)

ここで、 $v_k$ :電界の周波数、N:バンド幅の 分割数、 $\Delta v_k = v_k - v_{k-1}$ ,  $\overline{v_k} = \frac{v_k + v_{k-1}}{2}$ であ

る。 $\Delta v_k$ の分布はガウス分布として与えた。 プログラムではマトリクス計算の間でx を 上記キック角だけ変化させる。

4.カラードノイズの基本パラメーター の設定

4.1 周波数成分の分割数 式(4)の分割数Nが多いほどキック角の値は、 実際のカラードノイズに近くなる。しかし、 分割数が多過ぎると計算時間が長くなるの で、拡散理論を満足する適切な分割数を求め る。カラード/ $\Lambda$ の強度が $A_1$ ,  $A_2$ の時、残留 粒子数がある値になるときの回転数をそれぞ れ $N_1$ ,  $N_2$ とする。拡散理論によると、

 $A_2 = \sqrt{2}A_1$ の時、 $\frac{N_2}{N_1} = 2$ となる[2]。これを確 かめるために、粒子が10万回転した時の回転 数に対する残留粒子数を計算した結果を図1 に示す。ここで、周波数成分の範囲はペータ トロン振動数のチューン $_3\frac{2}{_3} \pm 0.018335$ で与え た。この上限値は実際に実験で用いられてい る値である。また、周波数成分の分割数は 10000であり、 $A_1 = 5 \times 10^{-6}$ 、 $A_2 = 3.53 \times 10^{-6}$ 、  $A_3 = 2.5 \times 10^{-6}$ である。

Developing program of extracted beam from a synchrotron using a pulse Q-magnet assisted by RF-knockout

Tetsuya NAKANISHI, Kouhei TURUHA, Yuji ABE, Yuto Arai



図1 回転数に対する残留粒子数

図から、 $\frac{N_2}{N_1}$ ,  $\frac{N_3}{N_2}$ を求める。ただし、  $N_1, N_2, N_3$ が1点ずつでは誤差が大きいの で、それぞれ5点求めて以下のように平均し た。

$$\frac{N_{2-1} + N_{2-2} + N_{2-3} + N_{2-4} + N_{2-5}}{N_{1-1} + N_{1-2} + N_{1-3} + N_{1-4} + N_{1-5}} = 1.98$$

$$\frac{N_{3-1} + N_{3-2} + N_{3-3} + N_{3-4} + N_{3-5}}{N_{3-4} + N_{3-4} + N_{3-4} + N_{3-5}} = 1.95$$

 $N_{2-1} + N_{2-2} + N_{2-3} + N_{2-4} + N_{2-5}$ このように分割数10000では、ぼぼ理論通りの 結果が得られていることが分かる。ちなみに、 5000分割で同様の計算を行った場合、2に近く ならなかった。また、周波数成分の分割数が 10000で、粒子が64万回転した時、 N=40000,640000におけるヒストグラムを図2、 図3に示す。



図2 N=40000の分布 図3 N=640000の分布

カラードノイズを加えると、全ての粒子に一様に影響が与えられ、ガウス分布を保ったま ま粒子数が減少していることが分かる。

4.2 周波数成分のバンド幅の設定

計算時間を考慮するとカラードノイズのバ ンド幅は少ない程良いので、バンド幅の違い による粒子の取り出され方の違いを検討し、 適切なバンド幅を求める。そのために、4.1 節で用いたバンド幅を2倍と5倍にして計算し た結果を図4に示す。



## 図4 異なるバンド幅における回転数に対す る残留粒子数

バンド幅が2倍と5倍の時、取り出される粒子 数はほぼ同じとなるので、バンド幅は2倍が適 切である。また、バンド幅が1.5倍の時は、2 倍の時に比べて取り出される粒子が約1000個 減少した。 5. パルス四極電磁石の時間的変化 PQの磁場勾配Kは時間的に次式のように変 化する。

 $K = \frac{K_{\text{max}}}{T_q} NT_0 \cdot \cdot \cdot (4)$ ここで、 $K_{\text{max}}$ :Kの最大値、 $T_q$ :Kが最大とな る時間、N:回転数、 $T_q$ :粒子が一周する時間 である。PQのK値を変化させることにより、 粒子を取り出す。

# 6.PQとRFKOの交互運転によるビーム取 り出しシミュレーション

QAR法では、PQとRFKOを図5のように交互に ON、OFFする。



図5 PQとRFKOのタイムチャート

このプログラムを組み込んで粒子を取り 出した結果を以下の図に示す。ただし、  $K_{\text{max}}$ =0.0014655, Tq=0.01,  $2\sqrt{S}$ =0.0006



図6 粒子の取り出しシミュレーション結果

また、HIMACでのQAR法によるビーム取り出しの実験結果を図7に示す。



## 図7 OAR法の実験結果

両図から、取り出されるビーム強度の形は比 較的一致していることが分かる。

## 7.まとめ

QAR法のシミュレーションプログラムを作成し、正常に動作することを確認した。また、 実験結果と比較し、ビーム強度の形が比較的 良く一致することを確認した。

## 「参考文献」

[1] 辻井博彦、遠藤真広、「切らずに治すが ん 重粒子線治療がよくわかる本」コモンズ [2]Kazuo Hiramoto、Masatugu Nishi、 Resonant beam extraction scheme with constant separatrix