

シンクロトロンからの取り出しビーム軸の安定化

STABILIZATION OF BEAM AXIS EXTRACTED FROM SYNCHROTRON

友亮人^{#, A)}, 想田光^{A), B)}, 遊佐顕^{A)}, 田代睦^{A)}

Ryoto Tomo^{#, A)}, Hikaru Souda^{A)}, Ken Yusa^{A)}, Mutsumi Tashiro^{A)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Yamagata University

Abstract

Beam position stability is an essential element of particle therapy. In the current operation sequence at GHMC, COD that results from temporal variations in the magnetic field of the synchrotron's magnets after initialization causes beam-axis deviations. First, we measured beam-axis deviations in the treatment rooms using screen monitors and strip-line monitors. We also measured COD variation in the synchrotron using position monitors located in it. A maximum beam position deviation of 2.9 mm was observed at a treatment room entrance. COD variation 30 minutes after the initialization of the GHMC synchrotron's magnets was 1.4 mm. Furthermore, we developed new beam optics that are robust against the change of the COD. We successfully reduced the beam position deviation to 0.5 mm.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センター(GHMC)では最大シンクロトロンからの最大出射エネルギー400 MeV/u のビームを用いて炭素線治療照射を行っている[1]。GHMCの運転パターンは初期化完了以降、入射エネルギー4 MeV/u から約 1 秒で設定エネルギーまで偏向磁場とRF周波数を変化させることで加速させ、1秒かけてビームを出射し、約1秒かけて偏向磁場とRF周波数を変化させることで入射エネルギーまで減速させる。また、治療時のビーム取り出しにブロードビーム法を採用している。これは、ワブラー電磁石によりビームを円形に走査することでビームの照射範囲を調整し、散乱体を用いて平坦な線量分布を作成している。その後、広い照射範囲からマルチリーフコリメーターを用いてターゲット領域以外の線量を遮蔽している。粒子線治療においてビーム軸の安定性は治療計画時と実際の照射の線量分布を一致させるための重要な要素である。ビーム重心位置が ± 3 mm以内であることをもってビーム軸正常としている。

しかし、現状ではシンクロトロンの初期化から数分間でHEBTでのビーム軸変動が発生している。特に、エネルギーの低い290 MeV/uでの運転時に大きくビーム軸が変動することが確認されている。このビーム軸の変動を抑えることにより、さらに安定した治療条件を実現することが可能となる。ビーム軸変動の要因として電磁石のヒステリシスによるCOD時間変動の影響とスプル内運動量の変動によるDispersionの影響が考えられるが、ビーム軸の変動を抑えた新しいビーム光学系を開発するためにビーム軸変動の原因と変動量を定量的に調査する必要がある。そのため、長時間運転時のビーム軸変動量の計測とCODの寄与をなくした際のビーム軸変動の計測を行った。加速器設備の大幅な変更を行わず、ビームパラメータのみを変更することで治療効率を向上させることを目的とした新規光学系の設計を行った。

2. 方法

2.1 現在のビーム軸時間変動測定

ビーム軸の時間変動幅を確認するためにC室垂直コース(CVC)にて290 MeV/uでの運転時にアイソセンターに設置したスクリーンモニタ(SC)、SCの8.6 m上流に設置した非破壊型ビームプロファイルモニタであるストリップラインモニタ(SLM)を用いてビーム軸変動を、シンクロトロン内に設置している静電ビームポジションモニタ(PM)を用いCOD変動をシンクロトロンの初期化から30分間測定した。

2.2 Dispersion 測定

GHMCではビームを加速させることにより遅いビーム取り出しを行う方式を採用している[2]。これにより、加速による運動量の変化によってビーム軸が変動することが考えられる。そのため、290 MeV/u加速完了時のRF周波数を0.005%程度変更することにより、エネルギーを変化させCOD測定とビーム軸測定を行った。その後、ステアリング電磁石の電流値を変更することでCODを基準値に戻した。これにより、CODからの寄与をなくしDispersionの影響を測定した。CODからの寄与をなくした運動量変化($\Delta p/p$)とCOD、ビーム軸の関係を測定した。

2.3 新規光学系作成

ベータトロン位相を変更することにより、時間経過によるビーム軸の変動を抑えた、新しい光学系の作成を行った。CODの影響により、シンクロトロン内でのビーム軸が外側に動いている。これにより、HEBT内ではベータトロン振動の振幅が大きくなる。現状の光学系ではシンクロトロンから治療室までのベータトロン位相進みが $(n+1/2)\pi$ でないため、CODの変動とともにビーム軸も変動していると考えられる(Fig. 1)。ベータトロン位相を適切な位置に調整することで、CODの変動によるビーム軸の変動を低

[#]m1810005@gunma-u.ac.jp

減できると予想した。そのため、MAD8 を用いたシミュレーションにより、ベータatron位相を変更した新規光学系を作成した。

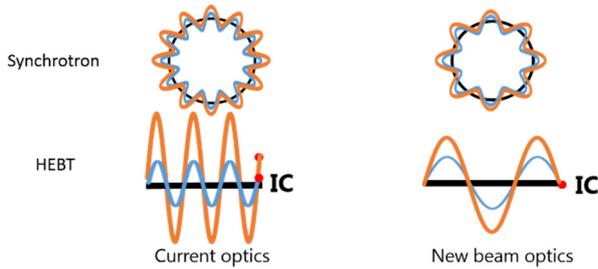


Figure 1: The schematic diagram of influence by the betatron phase.

3. 結果・考察

3.1 現在のビーム軸時間変動

Figure 2 にシンクロトロン初期化から 30 分間のビーム軸水平方向変動、COD 変動の結果を示す。SLM で最大 2.9 mm、SC で最大 1.2 mm の変動が確認された。また、COD は最大 1.4 mm の変動が確認された。また、Fig. 3 に COD 変動とビーム軸変動の関係を示す。SC、SLM で測定された水平方向のビーム軸の時間変動は COD の時間変動と線形関係であることが確認された。磁場が時間とともに変化している[3]ことから、COD 時間変動が生じ、ビーム軸の変動が起きていると思われる。実際の治療運用ではビーム軸変動が ± 2 mm を超えた場合に速やかに調整用マシンタイムを確保して、HEBT のステアリング電磁石で軸調整を行っている。このビーム軸変動を抑えることにより、実験等のマシンタイムをより多く確保することができる。

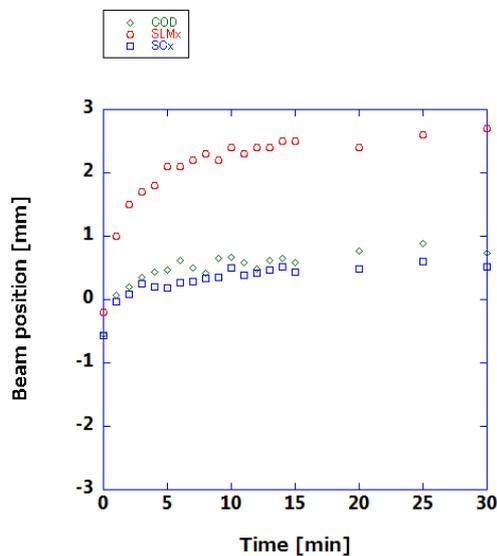


Figure 2: Time evolution of the beam position in CVC.

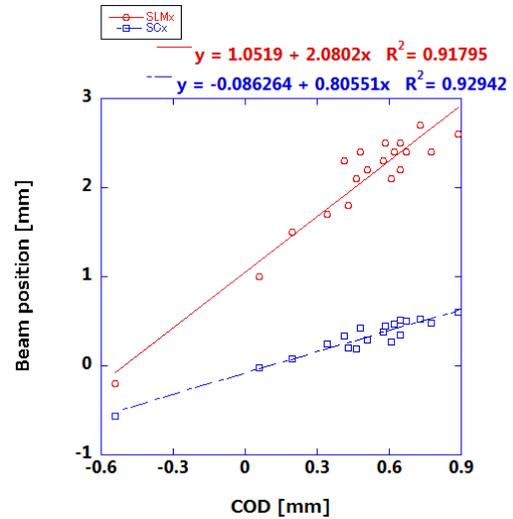


Figure 3: Relation between beam position and COD in CVC.

3.2 Dispersion 測定

Figure 4 に COD からの寄与をなくした際の $\Delta p/p$ と COD、ビーム軸変動の関係を示す。この条件下では COD はほぼ一定であるが、ビーム軸変動が生じており、 $\Delta p/p$ と線形関係であることが確認された。これより、ビーム軸変動には COD のみではなく Dispersion の影響も関与していることがわかった。

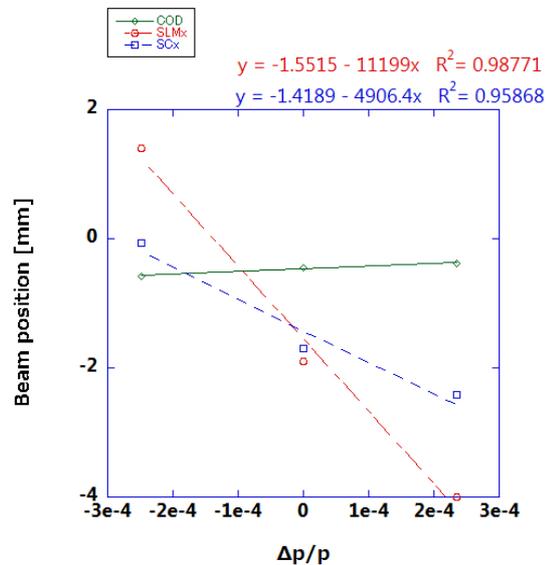


Figure 4: Relationship COD, dispersion and $\Delta p/p$.

3.3 新規光学系作成

Figure 5 にシンクロトロン出射直前の四重極磁石 S-QF3 からベータatron位相進みを SLM 位置で 3.174π 、SC 位置で 3.506π に設定した新規光学系のビーム軸時間変動を示す。シンクロトロン起動から 30 分間ビーム軸

の変動量は最大 0.5 mm となった。Figure 6 にベータatron位相進み mux と最大ビーム軸変動量をまとめたものを示す。変動量が $\text{mux}=3.3\pi$ 付近でビーム変動量が小さくなっている。また、 $\text{mux}=2.8\pi$ 付近で大きく変動していることがわかった。

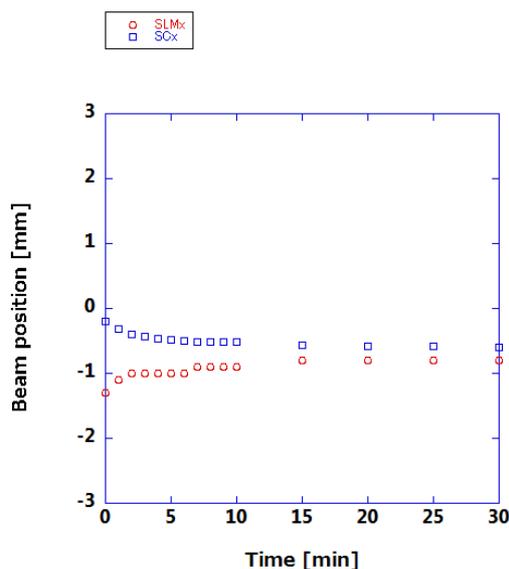


Figure 5: Time evolution of the beam new optics.

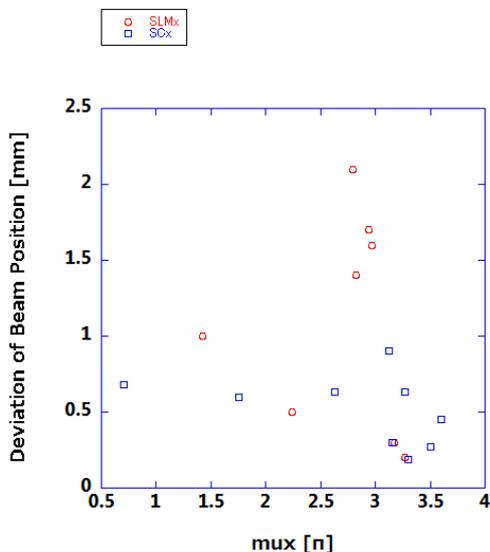


Figure 6: Deviation of beam position between 1 and 30 min after synchrotron initialization.

4. まとめ

ビーム軸変動に COD と Dispersion の両方が影響を与えていることが確認された。ベータatron位相進みの変更により、ビーム軸変動量が変化することが確認された。また、SLM 位置で 3.174π 、SC 位置で 3.506π に設定した光学系で、ビーム軸変動を SLM で 2.9 mm から 0.5 mm

に、SC で 1.2 mm から 0.4 mm に抑えることに成功した。今後、ベータatron位相とビーム軸変動量の関係について更に詳しく調査していくと共に、治療に使用するより良い光学系の設計を行っていく。

謝辞

本研究は GHMC のマシナタイム利用の一環として行われました。また、実験からデータ取得において、日立製作所の運転技術員の皆様と加速器エンジニアリング株式会社の皆様には多くのご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. Ohno *et al.*, Cancers vol. 3, 4-4046-4060, 2011.
- [2] T. Fujimoto *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A812 68-72, 2016.
- [3] H. Souda *et al.*, Jpn. J. Med. Phys. 36, 184, 2016.