

## 機械学習によるサイクロトロン調整手法の検討

### RESEARCH OF MACHINE LEARNING-BASED TUNING METHODS FOR CYCLOTRONS

井村友紀<sup>#, A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 齋藤高嶺<sup>A)</sup>, 田村仁志<sup>A)</sup>, 安田裕介<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>, 荘浚謙<sup>A)</sup>, ZHAO HANG<sup>A)</sup>, 橘高正樹<sup>A)</sup>, 松井昇大朗<sup>A)</sup>, 渡辺薫<sup>A)</sup>, 石山敦士<sup>B)</sup>  
Tomoki Imura<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Takane Saito<sup>A)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Takafumi Hara<sup>A)</sup>, Him ChongTsun<sup>A)</sup>, Hang Zhao<sup>A)</sup>, Masaki Kittaka<sup>A)</sup>, Shotaro Matsui<sup>A)</sup>, Kaoru Watanabe<sup>A)</sup>, Atsushi Ishiyama<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Waseda University

#### Abstract

Machine learning is used to find the optimum current values for two Glaser lenses and a solenoid in the beam injection line. The trajectory of the proton beam is calculated by OPAL-t, standard deviations of x and y distributions were obtained. Sum of these standard deviations is passed to machine learning as an argument to be minimized. Iteration of the magnetic field calculation and the simulation of beam trajectory are driven by the machine learning and the minimization were performed. Within 100 trials of minimization, the optimum solution of current values was obtained which enabled a transportation of 90% of the beam to the inflector.

#### 1. 研究背景

加速器は原子核・素粒子分野の発展を支えており、新たな物理現象の探索実験には必要不可欠である。また、近年ではがん治療やがん検査用ラジオアイソトープの生成といった医療分野への応用、使用済核燃料廃棄物を減容する ADS 核変換技術など産業分野への加速器の応用が期待されている。加速器が特に応用分野で広く普及するためには、迅速で且つ性能を最大限発揮させる加速器の調整手法の確立が不可欠である。この調整手法として、近年、様々な分野で導入が進んでいる機械学習が有用と考えられる。この技術を既存の AVF サイクロトロンとリングサイクロトロン、次世代の高温超伝導スケルトンサイクロトロンに適用することで、調整時間の短縮や潜在能力を最大限に引き出すことを実現し、普及機器としての完成度を高めることが期待される[1, 2]。

#### 2. 研究目的

加速器が社会実装されていくために不可欠な簡便で迅速な調整手法の確立のために機械学習により加速器調整の実現が重要な開発となる。加速器の調整とは通常複数の磁石コイルを複合的に調整することである。この調整パラメータの最適値を見出すため、これまで物理モデルに基づく検討や、オペレーターの経験の積み重ねによる最適値の導出がなされてきた。これにとって代わる方法として、機械学習の手法を導入する。特に機械学習のうちベイズ最適化の手法は運転調整の最適値を短時間で効率よくこなすのに適したツールであるため、ベイズ最適化をサイクロトロン調整に導入する[3]。今回サイクロトロン調整のうち、垂直入射ラインのビーム調整に特化して機械学習の適用を検討した。垂直入射ライ

ンのビーム輸送シミュレーション計算にベイズ最適化法を適用し、サイクロトロンの中心に設置されたインфлекター電極入口位置においてビーム径が最小(全幅 8 mm 以下)になるような集束レンズのコイル電流値の探索を試みた。

#### 3. 研究方法

##### 3.1 研究手法の概要

今回、ベイズ最適化の導入を検討した、垂直入射ラインの磁石配置図を Fig. 1 に示す。2つのグレーザーレンズとソレノイドによって構成されている。この3つの磁場を最適化し垂直入射ライン終端のインфлекター入り口でのビームサイズが 8 mmφ に収まるように調整していく。今回はシミュレーション計算上で実際の垂直入射ラインの調整を模擬し、ベイズ最適化の有用性を検討した。

##### 3.2 OPERA-3D による磁場計算

グレーザーレンズはソレノイドがリターンヨークで覆われたものである。ソレノイドはサイクロトロンの内部にある。OPERA-3D でこれらグレーザーレンズとソレノイドのモデ

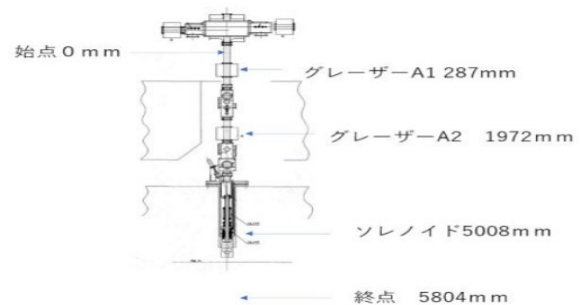


Figure 1: Beam injection line.

<sup>#</sup> imura@rcnp.osaka-u.ac.jp

ルを作り、磁場計算した[4]。ビーム入射ラインにおける二つのグレーザーレンズは同一のものを使用した。計算されたグレーザーの磁場分布を Fig. 2 に、ソレノイドの磁場分布を Fig. 3 に示した。グレーザーについては Fig. 4 に示した通り。電流値と磁場の線形成についても確認した。

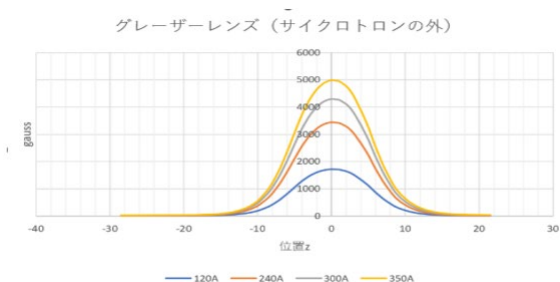


Figure 2: Glaser lens current and magnetic field.

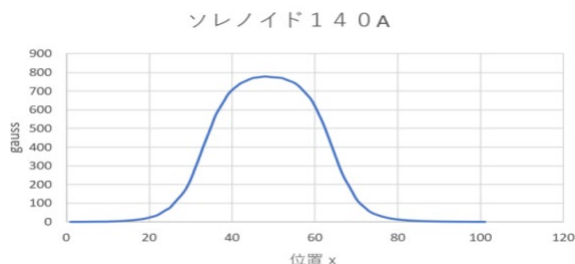


Figure 3: Solenoid magnetic field and current.

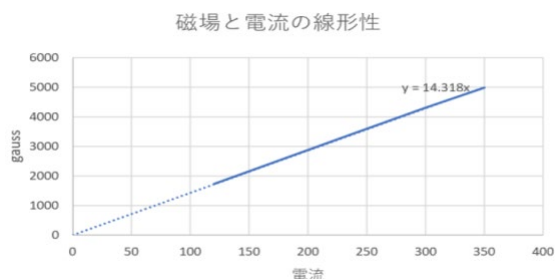


Figure 4: Linearity of current and magnetic field in glaser lens.

### 3.3 OPAL-t による軌道計算

OPERA-3D で計算された磁場を使って垂直入射ラインのビーム輸送を計算する。この計算は OPAL-t を利用した。この OPAL-t では空間電荷効果を含んだ軌道計算がなされる[5]。OPAL-t の初期条件は陽子線、粒子 1000 個、エネルギー 50 keV、初期エミッタンス  $100\pi$  mm mrad、ビーム電流 1  $\mu$ A である。始点のビームサイズは  $\sigma_{x\_initial}=4.2$  mm、 $\sigma_{y\_initial}=4.4$  mm とした。

### 3.4 GPyOpt によるベイズ最適化

垂直入射ラインのビーム調整にベイズ最適化を適用することを、OPAL-t に与える磁場を調整しながら、OPAL-t のシミュレーション結果を最適化することで模擬

した。ベイズ最適化とは、最適解が得られる確率が高い点を順番にサンプリングすることで早く最適解にたどり着くための手法である。そのために予測したい関数やデータはガウス分布に従っていると仮定する。カーネル関数 (2 つの入力の類似度を測る指標) を導入する。これは変数間の関係を規定し、予測モデルに大きく影響する。ガウス過程法による関数の推定結果は、事後確率の期待値と標準偏差で与えられる。そして、事後確率の期待値と標準偏差によって獲得関数は定義される。獲得関数が最大の点を次のサンプリング点としてデータで取得する手法がベイズ最適化である。

ベイズ最適化は Python の GPyOpt を使う[6]。ベイズ最適化が最適化する関数の引数は各磁石の最大設定磁場に対する倍率とした。この磁場の倍率をビーム輸送シミュレーションコード OPAL-t に引き渡し、計算結果として得られるビームの終点の x と y の標準偏差の和の値を関数の返り値とする。この返り値が最小になるようにベイズ最適化が実行される。

Figure 5 に示すようにベイズ最適化は初期乱数 20 試行、最適化のサイクル 100 試行で実行された。また、今回はベイズ最適化がうまく実行できるようにビームダクトの径を実際のものより大きくした。ビーム径が実際のビームパイプと同じ場合の計算が、本来ベイズ最適化にとっては重要であるが、ビーム径が制限となって獲得関数の取得が困難とみられるケースがあったため、対応策としてビーム径をありえない大きさまで大きくすることで対処した。なお、大きくする前の x と y の標準偏差はともに約 7 mm であった。

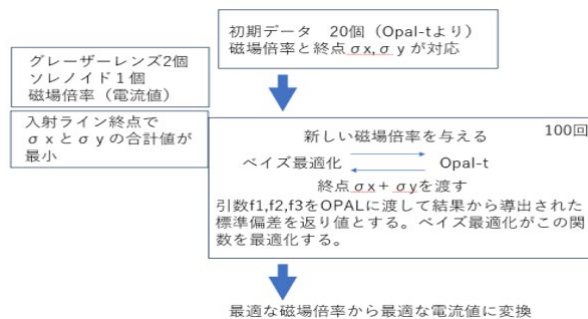


Figure 5: Beam injection line.

## 4. ベイズ最適化の結果

Figure 6 の下図は、ベイズ最適化における各々の試行で OPAL-t に引き渡される 3 つの磁石における磁場倍率の変遷である。また、Fig. 6 の上図は与えられた磁石パラメータをもとに OPAL-t が算出した x と y のビームサイズの各々の標準偏差を合計したものである。試行が進むにつれ、ビームサイズが小さい解が見いだされていく様子が見て取れる。Figure 7 と Fig. 8 がビームの始点と終点のエミッタンス及びビームの分布である。ベイズ最適化の結果最適電流はグレーザー A1、16.1 A、グレーザー A2、122.5 A、ソレノイド、824.6 A であった。最終的に最適化された終点のビームサイズは  $\sigma_{x\_final}=5.1$  mm、 $\sigma_{y\_final}$

= 5.0 mm、 $\sigma_{x'}_{\text{final}} = 62 \text{ mrad}$ 、 $\sigma_{y'}_{\text{final}} = 61 \text{ mrad}$  だった。



Figure 6: Total standard deviation per number of trials and multiplier of magnetic field per number of trials.

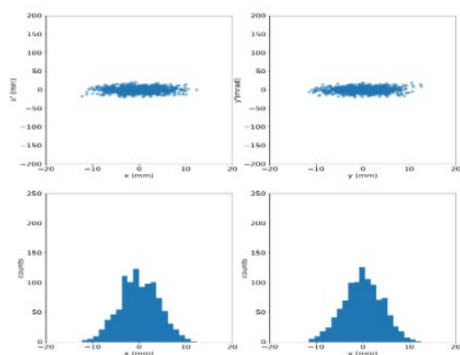


Figure 7: Beam distributions of x, y, x-x' and y-y' at the start point.

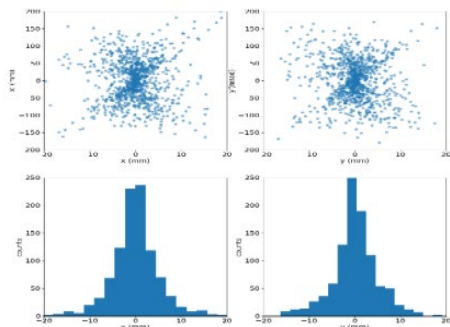


Figure 8: Beam distributions of x, y, x-x' and y-y' at the end point.

## 5. まとめ

AVFサイクロトロン調整時間を短縮し、効率良くビーム性能の最大化を図るため、サイクロトロンビーム調整に機械学習を組み込む開発に着手した。今回の3パラ

Table 1: Current Values and Standard Deviation after Bayesian Optimization

グレーザーA1	16.1 A
グレーザーA2	122.5 A
ソレノイド	824.6 A
$\sigma_{x\_initial}$ (標準偏差)	4.2 mm
$\sigma_{y\_initial}$ (標準偏差)	4.4 mm
$\sigma_{x\_final}$ (標準偏差)	5.1 mm
$\sigma_{y\_final}$ (標準偏差)	5.0 mm
$x'$ の標準偏差(角度)	62 mrad
$y'$ の標準偏差(角度)	61 mrad

メータのベイズ最適化では100回以下の試行で、約90%のビームがインフレクターに到達する解が見いだされた。今回は入射ラインの機器配置などのビーム輸送上の制約を全て考慮していないこと、サイクロロン上ヨーク内に設置されたソレノイドレンズの磁場分布にサイクロロン本体電磁石のメインコイル電流値に応じた励磁特性を組み込んでいないことなどにより、まだ運転上の最適条件を見出す余地が残されている。今後、諸条件を考慮した上で、イオン源からのビーム輸送調整を最適化していく予定である。また、実際のビーム径の制限でも計算できる手法を模索する。

## 参考文献

- [1] Kratochwil *et al.*, J Nucl Med.2016 , 57,1941-1944. 225Ac-PSMA-617 for PSMA-Targeteda-Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer.
- [2] H.W. Koay, M. Fukuda, H. Kanda, T. Yorita. (2021), Beam dynamics and characterization of a new high-intensity compact air-core high temperature superconducting skeleton cyclotron(HTS-SC).Results in Physics 33(2022)105090.
- [3] Yasuyuki Morita, “Development of multidimensional adjustment method for ECR ion source using machine learning”.
- [4] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/opera/solutions/>
- [5] <https://gitlab.psi.ch/OPAL/src/-/wikis/>
- [6] <https://sheffieldml.github.io/GPyOpt/>