

# 機械学習による AVF サイクロトロン の最適なパラメーターの探索 OPTIMIZING AVF CYCLOTRON PARAMETERS THROUGH MACHINE LEARNING

井村 友紀, 福田 光宏, 依田 哲彦, 神田 浩樹, 齋藤 高嶺, 田村 仁志, 安田 裕介, 荘 俊謙, ZHAO HANG, 松井 昇大朗,  
Ahsani Hafizhu Shali, 渡辺 薫, 石畑 翔, 板倉 菜美

Tomoki Imura, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Takane Saito, Hitoshi Tamura, Yusuke Yasuda,  
Tsun Him Chong, Hang Zhao Shotaro Matsui, Shali Ahsani Hafizhu, Kaoru Watanabe, Sho Ishihata, Nami Itakura,  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

## Abstract

A machine learning technique was applied to find the optimum values of main- and trim-coil currents for generating an isochronous field and of initial RF phase for the RCNP AVF cyclotron. Acceleration conditions of a 65 MeV proton beam such as an energy, a radial position and a beam phase were evaluated by a single-particle trajectory simulation using OPAL-cycle. An evaluation function was defined by the conditions that a particle phase difference from a reference RF phase was minimized after the 15th turns where isochronism should be maintained, and that an energy and a radial position of an accelerated particle reached to more than 64 MeV and the region between 1.028 m and 1.032 m for beam extraction, respectively. Iteration of the magnetic field calculation and the simulation of beam trajectory are driven by the bayesian machine learning. the optimum solution of current values and initial RF phase were obtained within 800 trials of parameter settings for minimization of the evaluation function.

## 1. 研究概要

加速器技術は、原子核・素粒子分野の発展を支え、新たな物理現象の探索実験に不可欠である。さらに、医療分野でがん治療やがん検査用ラジオアイソトープの生成、使用済核燃料廃棄物を減容するための ADS 核変換技術など、応用分野においても加速器への期待が高まっている。中性子生成、 $\mu$  粒子生成、ラジオアイソトープ生成の効率化に大強度ビームが求められている。AVF サイクロトロン (Fig. 1) での大強度加速を目指す場合、空間電荷効果の取り扱いが問題となる。ビームの軌道を解析的に求めるのが困難なためである。空間電荷効果を考慮したビーム軌道解析を行うため、Particle-In-Cell 法 (PIC 法) を用いたビーム軌道シミュレーションコード OPAL-CYCL を用いる。その準備段階として、等時性磁場を形成するためのメインコイル電流値及び 16 個のトリムコイル電流値をベイズ最適化法を用いて求めた。また、加速粒子の初期位相も併せて最適化した。AVF サイクロトロンでの加速条件は、加速粒子は陽子、加速エネルギーは 65 MeV、イオン源からの入射エネルギーは

50 keV、RF 周波数は 33.68 MHz、加速ハーモニクスは 2、加速電圧は 50 kV とした。

## 2. 研究手法

OPAL-CYCL [1] では OPERA3D [2] での磁場分布を取り込むことが可能で、空間電荷効果を用いた軌道計算ができる。今回、OPAL-CYCL で使用する磁場はミディアンプレーンの XY 平面上の  $B_z$  である。その他の領域の  $B_z$  また  $B_x, B_y$  は OPAL により計算される。AVF サイクロトロン の複数のコイルの電流値を変えるたびに OPERA3D で磁場分布を作るのは時間がかかる。本研究のベイズ最適化は複数の試行で電流値を毎回変えるため、短時間で磁場分布を作成できるように予め飛び飛びのコイル電流値での磁場分布を計算してデータベース化し、補間法を用いて任意のコイル電流値での磁場分布を求めるようにした。以降、補間法により作成した磁場分布を事前磁場データと呼ぶ。ここでの補間法は同じ位置の点での磁場の値を電流値を変えて補間することである。Figure 2 の上図は事前磁場データの補間とベイズ最適化法で求めたコイル電流値に対して得られた磁場分布、Fig. 2 下図はそのコイル電流値を用いて OPERA3D により計算した磁場分布と上図との差をとった磁場分布である。メインコイルの磁場はその電流値を 5 A から 800 A まで 5 A ずつの磁場分布を得てスプライン補間した。トリムコイルの磁場はメインコイルとトリムコイルの両方による磁場からメインコイルのみの磁場を差し引いた磁場分布を基に簡易的な線形補間より得た。メインコイルの補間磁場分布は Fig. 3 上図より OPERA3D との差が小さいことがわかる。よって、Fig. 2 下図の最大約 22 gauss の差は 16 個のトリムコイルの磁場補間の精度の悪さが起因していることが Fig. 3 下図より示す。これはこの手法の有用性を簡易的に確認するためにトリムコイルの形成精度を緩くしたためである。最適化する電流値の範囲は過去のシミュレーションで使用していたデータの  $\pm 10\%$  をトリムコイルの範囲としメインコイ

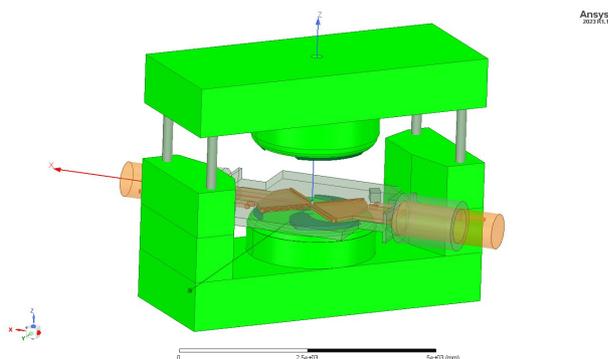


Figure 1: AVF cyclotron of Osaka University.

ルは± 0.1% とした。RF 初期位相は-45 度から 135 度までにした。

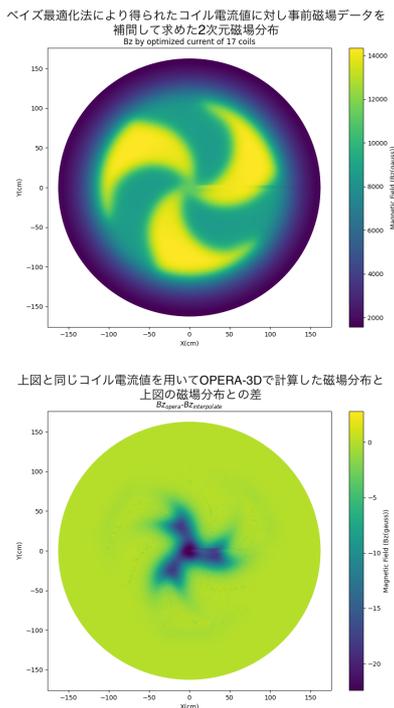


Figure 2: Interpolated Bz by optimization parameter and Bz difference between interpolated value and Opera3D.

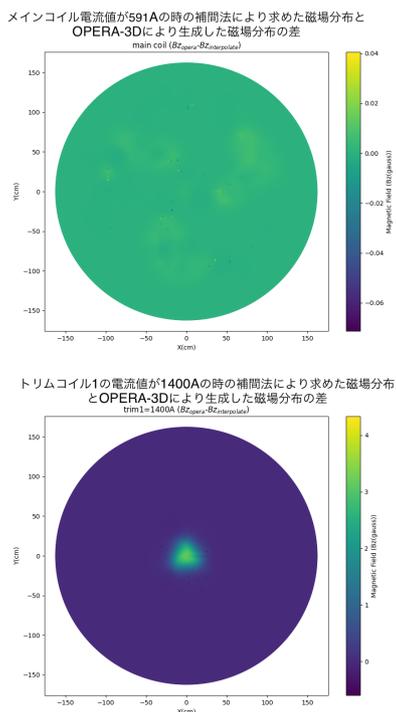


Figure 3: Interpolated Bz difference of main and trim coil between interpolated value and Opera3D.

### 3. ベイズ最適化

GPy-Opt を利用したベイズ最適化法によりメインコイルと 16 個のトリムコイルの電流値、加速粒子の RF 初期位相を最適化する。GPyOpt は Python 向けのベイズ最適化ライブラリである。また、ベイズ最適化は早く最適解を見つける手法で、特に多変数関数に有効である。GPyOpt はガウス過程を用いて未知の関数をモデル化し、確率分布を生成し、それを評価し次のパラメータを選ぶ。これにより、効率的かつ効果的に最適解に近づく。Figure 4 にベイズ最適化法によるコイル電流値及び RF

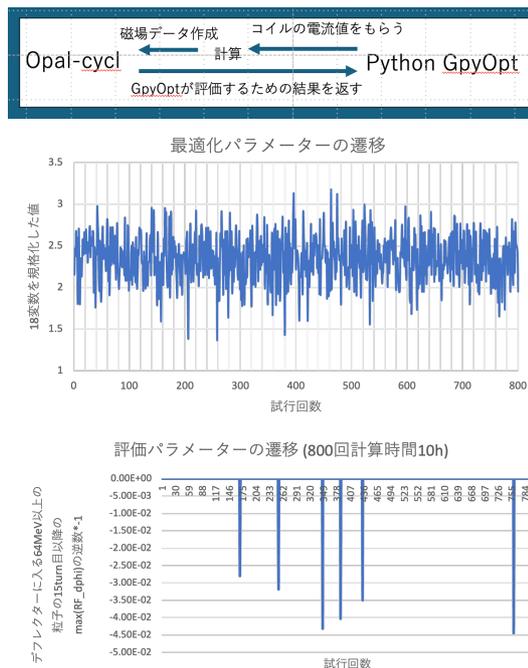


Figure 4: Bayesian optimization process and transition of optimization parameter and evaluation parameter.

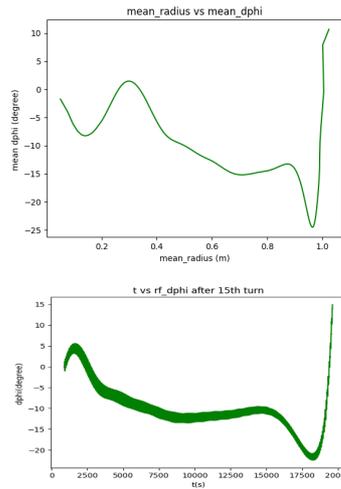


Figure 5: Beam distribution of RF phase difference by optimization parameter.

初期位相の最適化の流れ図及び最適化パラメーターと評価パラメーターの遷移を示す。複数の電流値から磁場分

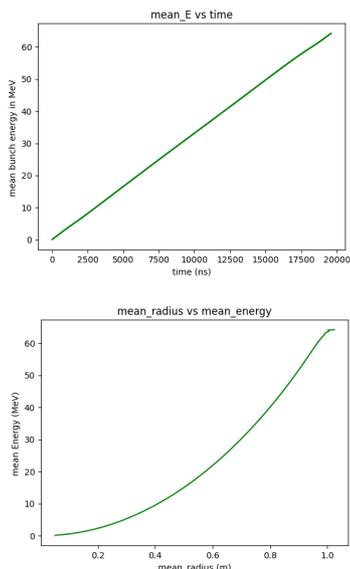


Figure 6: Beam distribution of Energy and orbit by optimization parameter.

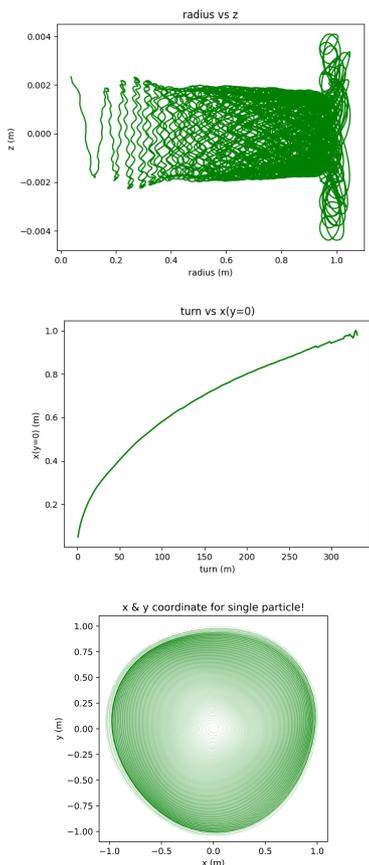


Figure 7: Beam distribution of betatron oscillation, radius, and orbit by optimization parameter.

布が作成され、OPAL-CYCLに引き渡される。評価関数は「OPAL-CYCLによる粒子加速の結果ビーム取り出し位置で64 MeV以上のとき1それ以外は0」×「15turn目以降のRF位相差 (Fig. 5)の最大値の逆数」とした。この評価パラメーターの選択理由は高エネルギーでデフレクターに入ることと中心バンブを考慮したからである。獲得関数はLCB(Lower Confidence Bound)を利用した。800回試行した結果を下に示す。Figure 5 上図よりビーム位相差が±5度以内に収まっていないことから完全な等時性磁場はできていないことがわかる。これからさらに磁場を最適化する必要がある。Figure 6 上図は粒子のエネルギーの変化で、単調増加して64 MeVまでの加速が可能になったことがわかる。Figure 7 上図はベータトロン振動していることがわかる。Figure 7 下図は粒子の軌道で比較的重なっておらず、正しく回っている。Table 1は最適化前と最適化後のパラメーターの変化を表す。

Table 1: First Optimization Parameter and Final Optimization Parameter

パラメーターの名称	最適化前	最適化後	単位
メインコイルの電流値	591.0	591.3	A
トリムコイル1の電流値	-493.4	-513.3	A
トリムコイル2の電流値	-2.567	-2.745	A
トリムコイル3の電流値	-349.6	379.2	A
トリムコイル4の電流値	-220.3	-228.1	A
トリムコイル5の電流値	-34.23	-31.59	A
トリムコイル6の電流値	-226.0	-229.1	A
トリムコイル7の電流値	-163.2	-161.1	A
トリムコイル8の電流値	141.3	-139.2	A
トリムコイル9の電流値	-70.87	-76.71	A
トリムコイル10の電流値	-197.0	-188.1	A
トリムコイル11の電流値	-64.88	-63.62	A
トリムコイル12の電流値	-69.25	-71.28	A
トリムコイル13の電流値	176.1	159.3	A
トリムコイル14の電流値	-54.79	-50.89	A
トリムコイル15の電流値	-1051	-1052	A
トリムコイル16の電流値	433.3	394.8	A
初期RF位相	45	9.0	degree

#### 4. まとめ

事前にデータベース化した磁場分布を用いて65 MeV陽子加速のパラメータをベイズ最適化法を用いた機械学習により求め、単粒子で330turnで約64 MeVまで加速できることをビーム軌道シミュレーション計算によって確認した。今回の解析では800回試行して、0以外の評価パラメーターは6個しかなく、試行回数を増やしたり、評価パラメーターを変更することで、ベイズ最適化を上手く活用しその結果を評価する。さらに、トリムコイルの磁場分布作成のための補間方法を見直し、それにより磁場分布作成における正確性を得る。その場合、たくさんのデータを使用し複数回の補間を行うために、最適化計算に長い時間を要するものとよそうされる。そこで、次元削減、pythonでのデータ読み込みの工夫、クラウドGPUを使い性能の高いGPUを選ぶことにより、時間短縮を行う。加えて、大阪大学のAVFサイクロトロン過去のシミュレーションのコイル電流の実績値を用いて

OPERA3Dにより磁場分布を作成し、OPAL-CYCLを用いて軌道計算を行った場合には必ずしも実ビームを再現できないことから、実際の磁場測定で得られた生データを参考にし、磁場シミュレーションソフト OPERA3Dとの違いを基に新たな磁場補間を行う。また、磁場の再現性が損なわれる場合も今後想定し、さらにその他の条件も考慮し、様々なパラメーターを調整して多粒子計算し、空間電荷効果も考慮したビーム軌道解析による高強

度ビーム加速パラメーターの最適化につなげる。

## 参考文献

- [1] A. Adelman *et al.*, “OPAL a Versatile Tool for Charged Particle Accelerator Simulation”, arXiv e-prints, p. arXiv:1905.06654, May 2019.
- [2] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera/solutions/>