

ハーモニートロン実現を目指す垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計 MAGNET DESIGN OF VERTICAL FFA PoP MODEL FOR HARMONYTRON

足立恭介^{*,A)}, 有馬秀彦^{A)}, 米村祐次郎^{A)}, 高松恒輝^{A)}, 堂本剛秀^{A)}
石橋一心^{A)}, 宇山真一朗^{A)}, 池田伸夫^{A)}, 森義治^{B)}

Kyosuke Adachi^{*,A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Yujiro Yonemura^{A)}, Koki Takamatsu^{A)}, Takahide Domoto^{A)}
Isshin Ishibashi^{A)}, Shinichiro Uyama^{A)}, Nobuo Ikeda^{A)}, Yoshiharu Mori^{B)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} Kyoto University

Abstract

A new type of accelerator called Harmonytron has been proposed. The Harmonytron is based on a scheme of vertical Fixed-Field Alternating gradient (vFFA) focusing with harmonic number jump beam acceleration. At Kyushu University, a vertical FFA PoP model is under construction. The objective of this study is to design the magnet for the vertical FFA accelerator proof-of-principle model. In this article, the current status of the development of the vertical FFA PoP model and the results of magnetic field measurements are discussed.

1. はじめに

大強度ハドロンならびに短寿命ミュオンを効率良く加速する新しい加速方式：ハーモニートロン (Harmonytron) が提案されている [1]。ハーモニートロンは、曲率半径を一定に保ったまま加速と共に軌道が垂直方向に変化する垂直 FFA (Fixed Field Alternating gradient) 加速器 [2] に、加速方式であるハーモニック数跳躍加速 [3] を適応させた加速器である。垂直 FFA 加速器の磁場は通常の加速器と異なり、スキュー磁場成分を含む。そのため、水平方向と垂直方向の粒子の運動が結合 (カップリング) し、その運動の複雑化は磁石設計を困難にしてきた。なお、現在まで実機の開発と原理検証は行われていない。九州大学では、垂直 FFA 加速器の原理実証を目指して垂直 FFA 加速器原理実証モデルの設計・開発を進めている。垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計を進めるにあたり、カップリングを含む粒子の複雑な運動を考慮できる手法が重要となる。

本研究では、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計を目的とし、3次元磁場解析コードを用いた磁場設計における新しい評価手法を提案した。また、提案した手法を用いた磁石設計の妥当性の検証を目的とした3次元磁場測定を実施した。本発表では、提案した手法を用いた磁石設計と、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの開発状況について説明した後、3次元磁場測定に関する測定系や測定方法、解析結果について報告する。

2. 垂直 FFA 加速器原理実証モデル

2.1 光学系

垂直 FFA 加速器において、垂直方向にスケーリング則を満たす磁場分布は以下の式で表される [4]。

$$B_y = B_0 \exp(my), \quad (1)$$

ここで B_0 は $y = 0$ での磁束密度、 m は磁場勾配の指標であり、 m 値とよばれる。

垂直 FFA 加速器原理実証モデルの光学設計には、転送行列を用いた軌道解析法を使用した。転送行列を用いた軌道解析法は、従来シンクロトロン光学設計に用いられてきた手法であり、垂直 FFA 加速器に関しては、磁場を線形に近似することで適応可能である [5]。垂直 FFA 加速器原理実証モデルのリングパラメータを Table 1 に示す。垂直 FFA 加速器原理実証モデルはセクター型電磁石を用いた FD シングレット集束系とした。セクター電磁石の場合、エッジ角が 0 deg. であることから設計軌道上の磁場が垂直成分のみとなり、垂直方向へ軌道がキックされないため設計軌道が閉じる。この特徴は、曲率半径を一定に保ったまま加速と共に軌道が垂直方向に変化する垂直 FFA 加速器において利点となる。

Table 1: Ring Parameters of the vFFA Electron Model

Lattice	FD singlet
Magnet type	Sector
Number of cell	16
Ring radius	1.0 m
Energy	20.0 to 40.0 keV
m value	-4.0 1/m
Excursion	0.1 m
$B_0(F)$	60.8 Gauss
$B_0(D)$	22.2 Gauss

2.2 磁場設計手法

垂直 FFA 加速器原理実証モデルの電磁石として、マルチコイル型電磁石を採用した。マルチコイル型電磁石の概略図を Fig. 1 に示す。

図中の灰色で示した点線は重畳磁場を表しており、各コイルから生成された磁場の総和に等しい。コイル電流値に分布を持たせることで磁場勾配を持った磁場分布を生成できる。マルチコイル型電磁石は磁極形状がシンプルかつ磁場勾配 m 値の可変が比較的容易であ

* adachi@nucl.kyushu-u.ac.jp

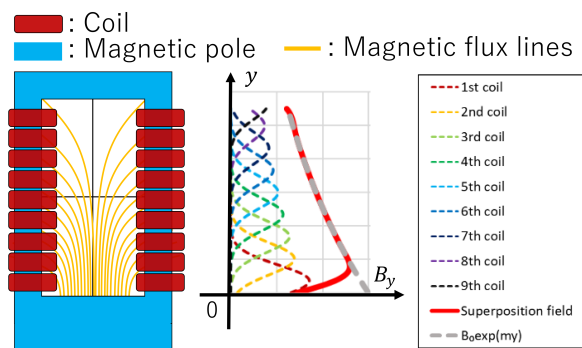


Figure 1: Schematic diagram of a multi-coil type magnet (9coils).

るという利点を持つ。磁場勾配の生成と磁場勾配の可変性に関しては先行研究にて検討され、垂直 FFA 加速器におけるマルチコイル型電磁石の有用性は示されている [6]。垂直 FFA 加速器の磁場分布を生成する場合、理想的な磁極の場合には以下に示す式より電流値が決定される。なお、 I_0 は基準となる電流値を示しており、 n はコイル段数を示している。

$$I_n = I_0 \exp(m y_n), \quad (2)$$

実際の磁極は有限のサイズである事や、隣り合う電磁石との相互作用等の影響が存在するため、電流値の調整が必要となる。また垂直 FFA 加速器の場合、生成される磁場分布はスキュー磁場成分や非線形磁場成分、漏れ磁場成分が含まれ、それによって粒子の運動は複雑化する。そのため、コイル電流を調整する際に使用する設計指標は、複雑な粒子の運動を考慮する必要がある。そこで、新たな設計指標として実効的磁場勾配 (以降、実効的 m 値) を定義した。実効的 m 値は、磁場の積分値である BL 積より求められる m 値であり、BL 積は各エネルギーでの閉軌道上の磁場 (垂直成分 B_y) の積分より計算される。実効的 m 値は集束磁場成分と発散磁場成分それぞれに求められ、軌道上の磁場 (垂直成分) が正の場合は発散、負の場合は集束と分けられる。閉軌道は、スキュー磁場成分や非線形磁場、漏れ磁場の下で描かれる軌道であるため、閉軌道上の磁場より求められる実効的 m 値は、これら複雑な要素を考慮した設計指標となっている。マルチコイル型電磁石の電流値を調整パラメータとしてイタレーションを行い、実効的 m 値が設計値と一致する条件を求めた。以下に、電流値調整のイタレーション手順を示す。電流値は最小二乗法を用いて最適化される。

1. Eq.(2) より初期電流値を決める
2. 軌道計算用の磁場分布を作成する
3. 軌道計算コードを用いて閉軌道を求める (Runge-Kutta 4th)
4. 閉軌道上の磁場より実効的 m 値を求める
5. 最小二乗法を用いて、電流値を更新する

手順 2 で作成する磁場分布は、OPERA-3D [7] を用いてあらかじめ磁場計算した各段コイルごとの磁場分

布を重ね合わせることで作成されている。あらかじめ磁場計算した各段コイルの電流値 I_n は Eq. (2) の値を使用した。また、重ね合わせる際に、電流の調整量に応じて実数倍することで、疑似的に電流値の調整された磁場分布を生成する。これは、イタレーション内に OPERA-3D の計算を含めると計算時間が膨大になるためである。この方法に関しては、先行研究にて妥当性が検証されている [6]。

2.3 磁場設計結果

マルチコイル型電磁石の段数は、コイル段数の拡張性をもたせつつ製作期間などを考慮して、18 とした。コイルを複数個組み合わせることで、18 段以下の任意の段数に切り替えることができる。Figure 2 にコイル段数 18 に対する電流値調整前後の実効的 m 値と閉軌道変位を示す。横軸は設計値である 20~40 keV の範囲のエネルギーである。図中の (a) と (b) は、電流値調整前後の実効的 m 値、図中の (c) と (d) は、電流値調整前後の閉軌道変位を示している。黒線は、30 keV での閉軌道位置を基準とした場合の理想的な閉軌道変位を示しており、緑マーカーは軌道解析により求めた閉軌道変位を示している。図から分かるように、電流値調整前は実効的 m 値が右肩下がりになっており、設計値に対して一定値となっていないことが分かる。調整前の閉軌道変位を見ると、理想値とは異なる変位となっていることが分かる。一方で、電流値を調整した後は、20~40 keV の範囲で設計値 $m = -4.0$ 1/m に対して一定値となっていることが分かる。閉軌道変位に関しては、同じエネルギー範囲で理想値に沿う結果が得られた。Figure 3 に 20~40 keV の範囲のいくつかのエネルギーでの閉軌道を示す。図より、エネルギーの変化に対して半径方向はほとんど一定を保ち、y 方向に変化していることが分かる。また、 m 値の設計値が負であるため、エネルギーが上昇するほど軌道が下降している。

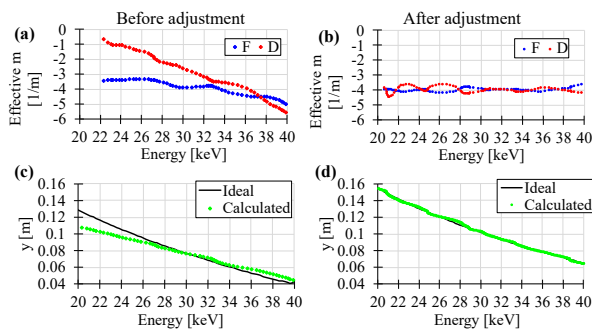


Figure 2: The closed orbit displacement and the effective m , (a) and (b) are the effective m , (c) and (d) are the closed orbit displacements before and after adjustment.

2.4 マルチコイル型電磁石の製作

提案した評価指標である実効的 m 値を用いて磁石設計を行い、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの電磁石を製作した。Figure 4 に製作したマルチコイル型電磁石のコイルと磁極を示す。磁石の形状はセクター型となっている。天板は 20 mm 厚、底板は 40 mm 厚であり、磁

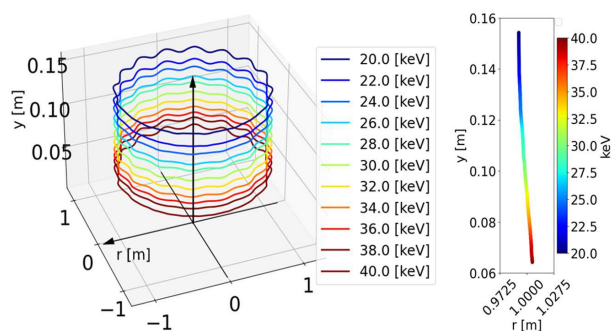


Figure 3: Closed orbits of the vFFA electron model at various energies.

束密度の高くなる底板は天板に比べて厚い。磁極は開口部 62.5 mm×240 mm であり、垂直方向に広い。コイルは直径 2.0 mm の銅線を使用して作製し、2層 11 巻き構造とした。コイルの温度上昇は自然冷却で十分に抑えられる設計となっている。また、コイルは下から積みあげる方式で設置した。

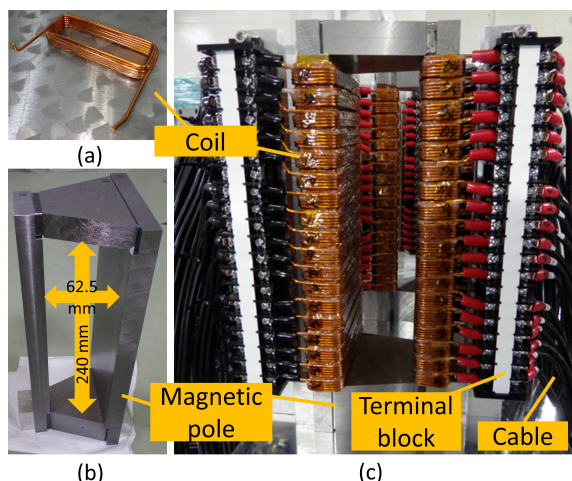


Figure 4: Photograph of the multi-coil type magnet. (a) Winding coil. (b) Magnet pole. (c) Assembled view.

3. 3次元磁場測定

3.1 測定体系

磁場計算結果を基にした磁石設計の妥当性の検証を目的として、3次元磁場測定を実施した。Figure 5 に、製作したマルチコイル型電磁石と、ホール素子を用いた3次元磁場測定架台を設置した様子を示す。垂直 FFA 加速器原理実証モデルは 16cell であるが、磁場測定は 3cell 分の建設を終えた段階で実施し、3cell のうち中央の cell について行う。測定する cell の両側に 1cell ずつ設置することで、16cell すべてを設置した時の磁場分布に近い分布を生成させている。2台の電動アクチュエータとリニアスライダを用いて、アーム及び先端のホルダー（ホール素子を固定するアルミ製の部材）を3次元方向に移動させる。電磁石内に差し込む方向を X 軸とし、垂直方向を Y 軸とした。2台の電動アクチュエータ

の駆動及び磁場データの取得には LabVIEW を使用し、 $(dX, dZ) = 5 \times 5 \text{ mm}$ の格子点上を自動走査して磁場を取得する設定とした。Y 軸方向のリニアスライダは手で操作し、測定間隔 dY は 10 mm とした。磁場測定架台は、アーム取り付け部が X 軸上、Z 軸上に乗る位置・角度となる様にアライメントし、アーム及び先端のホルダーは当て治具を用いて取り付ける。

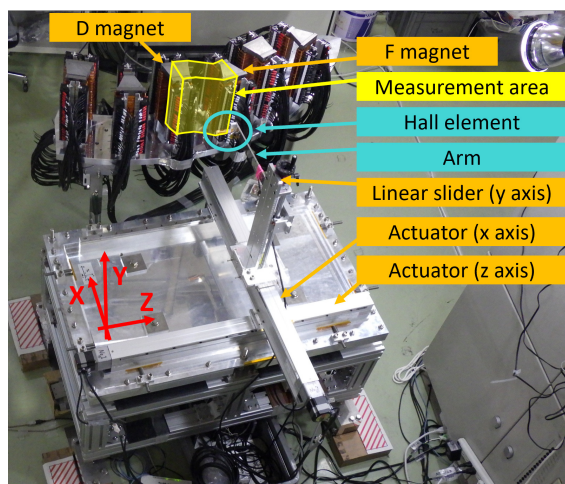


Figure 5: Six magnets(3-cell) and field measurement device.

Figure 6 に、ホール素子を取り付けたホルダーを示す。使用したホール素子はともに Group3 社製の 1 軸ホール素子 LPT-230 である。ホルダー (a) と (b) を同時に使用できないため、測定成分や測定領域によって Fig. 6 のホルダー (a) と (b) を切り替えることで、3成分すべてを測定した。ホルダー (a) は集束電磁石内と発散電磁石内の B_y, B_x 成分、ストレートセクションでの B_y, B_z の測定に使用し、ホルダー (b) は集束電磁石内と発散電磁石内の B_z 成分、ストレートセクションでの B_x の測定に使用した。

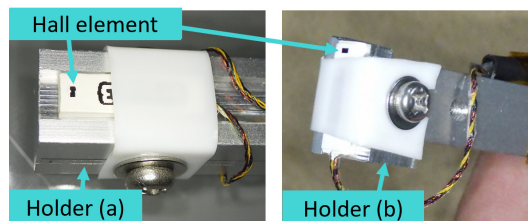


Figure 6: Two types of hole element holders.

3.2 測定条件

実験機器の制約より、18 段コイルを 3 個 1 セットに分けて直列に接続し、6 段のマルチコイル型電磁石として運用した。また、配線ケーブルより発生する磁場の影響を少なくするため、すべての配線ケーブルは上流と下流が横並びとなるように配線した。

2.2 節にて述べた調整方法を用いて、Table 1 に示した設計条件を満たす 6 段コイルの電流値の最適化を行った。得られた電流値の組み合わせを Table 2 に示す。

Table 2: Current Value of each Coil

Focusing magnet		Defocusing magnet	
Steps	Current A	Steps	Current A
1	5.09	1	3.42
2	4.63	2	2.99
3	4.38	3	2.74
4	3.70	4	2.14
5	3.38	5	1.55
6	2.96	6	1.26

磁場測定では、その再現性を確保するために毎回の測定前に残留磁場を基準状態に戻す必要がある。本測定では、最大電流値 10 A を与えた状態と 0 A とした状態とを、時間をおいて繰り返すことで、残留磁場をリセットした。残留磁場の再現性は 0.08 Gauss 以下の精度で一致した。

3.3 磁場測定結果

Table 2 の電流値条件を使用し、磁場評価の第 1 段階として集束電磁石中心と発散電磁石中心を通る y 軸上の B_y を測定し、OPERA-3D の磁場計算結果との比較を行った。結果を Fig. 7 に示す。

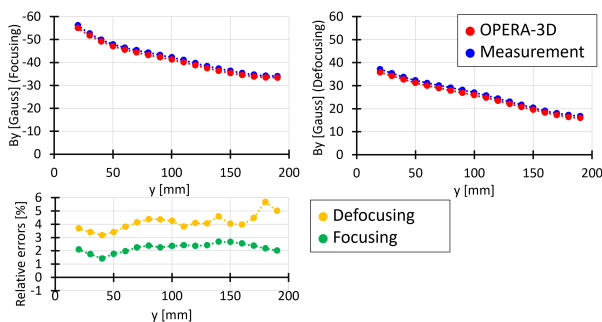


Figure 7: Comparison of magnetic field calculated by OPERA-3D with that obtained by field measurement.

OPERA-3D の磁場計算結果と磁場測定結果は、集束電磁石でおよそ 1.5~2.8 % 程度、発散電磁石で 3~5.8 % 程度の差異が生じる結果となった。磁場の有効領域、つまり 20~40 keV の閉軌道が求まる範囲である $y = 50 \sim 150$ mm に限定すると、集束電磁石は約 2.5 %、発散電磁石は約 4 % で一定の量ずれていることが分かる。これは、残留磁場やバックグラウンド磁場によるシフトが主要原因と考えられる。範囲外の差異に関しては、磁極天板や底板に近いことによる残留磁場やバックグラウンド磁場の変化が影響していると考えられる。上述した差異の評価に関しては、今後の検討課題である。

3.4 電流値の再調整と再測定

実際のビームは、測定によって得られる磁場を受けて運動する。そこで、磁極中心の y 軸上の B_y が、バックグラウンド磁場を含めた状態で一致する様に電流値の再調整を行った。再調整後の電流値の組み合わせを Table 3 に示す。なお、表中括弧内の数字は、補正値を

表している。

Table 3: Current Value of each Coil after Correction

Focusing magnet		Defocusing magnet	
Steps	Current A	Steps	Current A
1	5.10 (+0.01)	1	3.34 (-0.08)
2	4.61 (-0.02)	2	2.98 (-0.01)
3	4.51 (+0.13)	3	2.69 (-0.05)
4	3.82 (+0.12)	4	2.20 (-0.06)
5	3.46 (+0.08)	5	1.59 (+0.04)
6	3.20 (+0.24)	6	1.29 (+0.03)

補正後の電流値条件より得られた測定結果を Fig. 8 に示す。

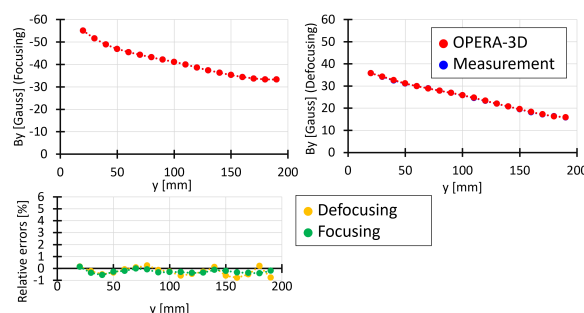


Figure 8: Comparison of magnetic field calculated by OPERA-3D with that obtained by field measurement after adjustment.

再調整により、磁場計算結果の B_y と磁場測定結果 B_y の差は 0.8 % 以下となった。この条件下で 3 次元磁場測定を行い、実効的 m 値の比較を行った。ただし、磁場測定結果における BL 積の計算には、磁場計算結果より得られた閉軌道を用いた。閉軌道上の各点での磁場の値は、その点を囲む磁場測定の格子点上の磁場を用いて重み付き計算を行い求めた。比較結果を Fig. 9 に示す。

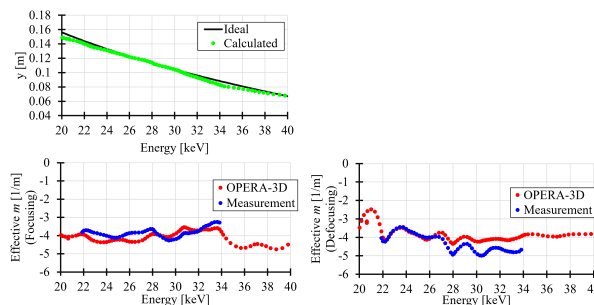


Figure 9: Comparison of magnetic field calculated by OPERA-3D with that obtained by field measurement after adjustment.

閉軌道変位は 6 段コイルで電流調整を行った結果であり、6 段の場合でも理想値に沿う閉軌道が得られた。18 段コイルを調整した結果と比較すると多少理想値と

のずれが大きくなっているが、これはコイルの段数が少ない(パラメータが少ない)事による、電流値最適化の粗さと考えられる。実効的 m 値についても、段数を減らしたことによってがたつきは増えたが、 m 値の設計パラメータである -4.0 1/m に一定値となっていることが分かる。測定範囲の関係より、磁場測定結果より求めた実効的 m 値は $22\sim 34$ keV までの範囲となった。得られた範囲について比較すると、磁場測定結果より求めた実効的 m 値も -4.0 1/m に近い値となっており、 $22\sim 27$ keV の範囲では OPERA-3D と同程度の一定値となった。集束電磁石の m 値は全体的に OPERA-3D の実効的 m 値を再現できているが、発散電磁石の 28 keV 以上では OPERA-3D に比べて大きい値となった。以上の結果は、今回提案した設計指標を用いた磁場設計手法が妥当であることを示唆している。一部のエネルギー範囲で差異が見られた理由について等の詳細な解析は今後の検討課題である。

4. まとめ

ハーモニートロン実現のための垂直 FFA 加速器の原理実証を目的として、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計を行った。また、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの電磁石を製作し、磁場測定を行った。

従来シンクロトロンに用いられる光学設計手法を用いて、垂直 FFA 加速器原理実証モデルの設計パラメータを決定した。

マルチコイル型電磁石を用いた磁場設計において、閉軌道上の磁場の BL 積より求まる実効的磁場勾配を新たな設計指標として提案した。実効的磁場勾配を用いた調整の結果、 $20\sim 40$ keV の範囲で理想的な閉軌道変位を持つ磁場分布を生成できた。

磁極中心軸上において 3次元磁場測定を実施した結果、磁場計算結果と誤差 1%以下の精度で一致する磁場を生成できた。また、磁石設計において調整した実効的 m 値と、磁場測定結果より得られた実効的 m 値が重なる結果が得られ、本研究で提案した磁石設計手法の妥当性が確かめられた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP21K12538) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Y. Mori, Y. Yonemura and H. Arima : “A Proposal of Harmonictron” , Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ., vol. 77, no. 2, pp. 1-13, Dec. 2017.
- [2] T. Ohkawa, “FFAG electron cyclotron” , Phys. Rev. vol.100, p.1247, Dec. 1955.
- [3] A. G. Ruggiero, “rf acceleration with harmonic number jump” , Phys. Rev.ST Accel. Beams, vol.9, 100101, Oct. 2006, doi:10.1103/PhysRevSTAB.9.100101
- [4] S. Brooks, “Vertical orbit excursion fixed field alternating gradient accelerators” , Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol.16, 084001, Aug. 2013, doi:10.1103/PhysRevSTAB.16.084001
- [5] K. Adachi *et al.*, “An electron model of vertical FFA accel-

- erator for Harmonytron” , Proc.of 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC23), pp.1405-1407, 2023.
- [6] K. Adachi, Master’s thesis, Kyushu University (2021).
- [7] ”Opera-3d User Guide” (Vector Fields Software, 2016).