

3GeV 陽子ビーム軌道の変化に基づくソレノイド漏れ磁場の調査と軌道補正 INVESTIGATION OF SOLENOID FRINGE FIELD BASED ON CHANGE IN 3-GeV PROTON BEAM ORBIT AND THE ORBIT CORRECTION

山口雄司^{#,A)}, 明午伸一郎^{A)}, 山崎高幸^{B)}

Yuji Yamaguchi^{#,A)}, Shin-ichiro Meigo^{A)}, Takayuki Yamazaki^{B)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Fringe field of a secondary-particle capture solenoid magnet with three coils has been experimentally investigated placed at muon science facility in materials and life science experimental facility (MLF), J-PARC. To clarify relationship between the fringe field and excitation current of each coil and interference of fields by the coils, proton beam position changes in vertical direction were measured for 125(= 5³) combinations of excitation currents using a multi-wire profile monitor located in front of the final target of MLF. The measured position changes show that the field by the most upstream coil is non-linear with its current while the fields by other coils are linear and that the field can be enhanced by excitation of multiple coils. The non-linearity of the field by the most upstream coil has been introduced to the proton beam orbit correction, which has been demonstrated.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)[1]では 1 MW の大強度パルス陽子ビームを物質・生命科学実験施設(MLF)へ供給している。陽子ビームは Fig. 1 に示すように、3 GeV シンクロトロン(RCS)から 25 Hz の早い繰り返して取り出され、3 GeV 陽子ビーム輸送施設(3NBT)を通して厚さ 2 cm の黒鉛標的とその下流の水銀標的に照射されてそれぞれでミュオンと中性子を生成する。

生成したミュオンは、ミュオン科学実験施設(MUSE)[2]での実験に利用される。MUSE では黒鉛標的に生成した二次粒子を効率良く利用するために、Fig. 2 のように 4 本の二次ビームライン(Dライン、Sライン、Uライン、Hライン)へ取り出すことができる。各ビームラインは複数の実験エリアへ分岐し、実験条件に応じて様々なミュオン利用実験に対応可能となっている。

Hラインは大強度ミュオンビームラインとして設計され、Hライン最上流には黒鉛標的からの二次粒子を捕集するために、Fig. 3 に示すような大口径ソレノイド HS1 を有している[3]。HS1 は低速ミュオンだけでなく、高い運動量をもつミュオンも効率良く輸送できるように、3つのコイル

HS1-1, HS1-2, HS1-3 を独立に励磁できるようになっている。励磁パターンは、定性的にはミュオンの運動量に応じて 2 通りあり、30 MeV/c 以下の低い運動量に対しては主に HS1-1 を励磁し、高い運動量に対しては 3 つすべてのコイルを十分に励磁する。Hラインは 2022 年 1 月に運転を開始し、H1 実験エリアで最初のビームが観測された[4]。

Hラインの運転に伴い、水銀標的に入射する 3GeV 陽子ビームの垂直方向の位置の変化が観測された。ビーム位置の変化は HS1 の漏れ磁場による影響であり、中性子ビーム強度に影響を与え得る。さらに、中心から 3 mm 以上のビーム位置変化により、入射位置の逸脱による機器の損傷を防ぐために機器保護システム(MPS)が発報し、MLF の利用運転を停止させる。そのため安定したビームを供給するためには、漏れ磁場によって変化した軌道の補正が重要となる。

3NBTでは、Fig. 2 に示す 2 台の補正電磁石 Y22, Y23 の電流を HS1 の各コイルの励磁電流に応じて自動で調整することで、軌道を補正している。自動調整では、各コイルの励磁電流と漏れ磁場の関係を線形と仮定し、各コイルを特定の電流で励磁した場合に必要な補正量によって決まる傾きをもった線形関数を用いている。傾きを決

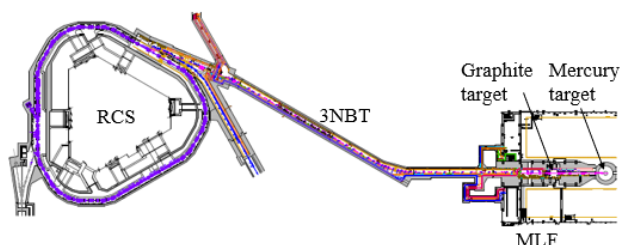


Figure 1: Plan view of beamline from 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) to Materials and Life Science Experimental Facility (MLF).

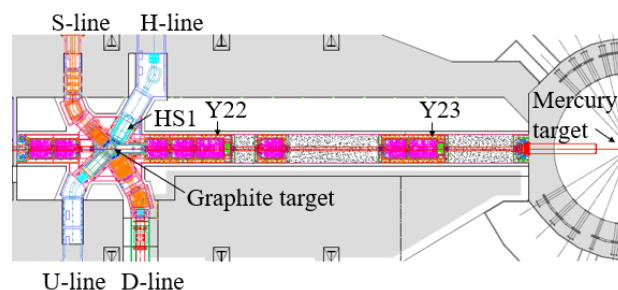


Figure 2: Plan view of secondary beamlines around graphite target and primary beamline to mercury target.

[#] yamaguchi.yuji@jaea.go.jp

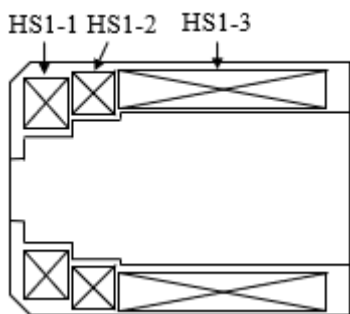


Figure 3: Schematic diagram of large-aperture capture solenoid HS1 placed at most upstream of H-line. The entrance of HS1 is left side in this figure.

める補正量は Fig. 4 に示すように、ビーム光学総合計算コード SAD[5, 6]を用いた軌道計算によって求められる。複数のコイルが同時に励磁されている場合には、相互に干渉しないと仮定し、各コイルに対する補正量の和を必要な補正量としている。

しかし、現状では HS1-1 を単独で励磁したときや複数のコイルを励磁したときに正しく補正できない場合があり、励磁パターンに応じ、実測したビーム位置変化に基づいて線形関数の傾きを決める補正量を再計算している。この不正確な補正は、HS1-1 の励磁電流と漏れ磁場に対する線形性の仮定や各コイルによる磁場の不干渉の仮定が成立しないことを示唆している。任意の励磁パターンに対して、パラメータを再計算することなく、正しく補正するためにはこれらの仮定の成立性を明らかにし、補正に用いる関数を再検討する必要がある。

本研究では、各コイルに通電し得る励磁電流の全範囲にわたり、励磁電流と漏れ磁場の関係および複数のコ

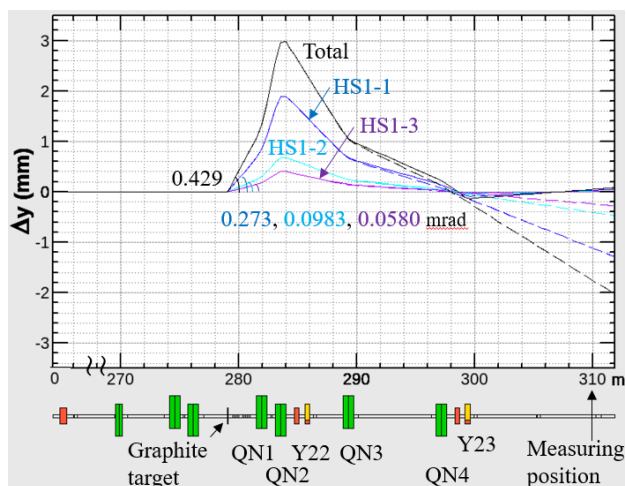


Figure 4: Proton beam orbit calculation using SAD. The horizontal axis is orbit length and vertical is deviation of the orbit in vertical direction from the central orbit. The orbits changed by fringe fields of HS1-1, 1-2, 1-3, and total of them are shown with blue, cyan, purple, and black dashed lines, respectively. The excitation current of the coils is assumed to be 1 kA in this calculation. The orbits corrected by the steering magnets of Y22 and Y23 are also shown with solid lines.

イルを励磁した際の磁場の干渉の有無を明らかにすることを目的として、HS1 の励磁による 3GeV 陽子ビーム位置の変化を調べる。本稿では、漏れ磁場の調査結果と調査結果に基づいて一部改良した軌道補正の結果を示す。

2. 測定

HS1-1, 1-2, 1-3 の各励磁電流 I_{1-1} , I_{1-2} , I_{1-3} を最大電流 (I_{1-1} , I_{1-2} , I_{1-3}) = (2.5, 2.5, 2.4) kA に対し、独立に 0, 25, 50, 75, 100% の 5 通りで通電し、合計 125 (= 5^3) 通りの励磁パターンにおける鉛直方向の陽子ビームの位置の変化 Δy を測定した。励磁パターンの順序は、磁気履歴の影響をできるだけ低減するために、Fig. 5 に示す順序とした。すなわち、 $I_{1-1} = I_{1-2} = I_{1-3} = 0$ から測定を始め、陽子ビームラインから最も遠く、漏れ磁場の影響が最も小さいと予想される HS1-3 の電流の変更頻度が高い順序を選んだ。漏れ磁場の影響が最も大きいと予想される HS1-1 の電流は増加方向だけであり、利用運転時と同じ通電方法である。

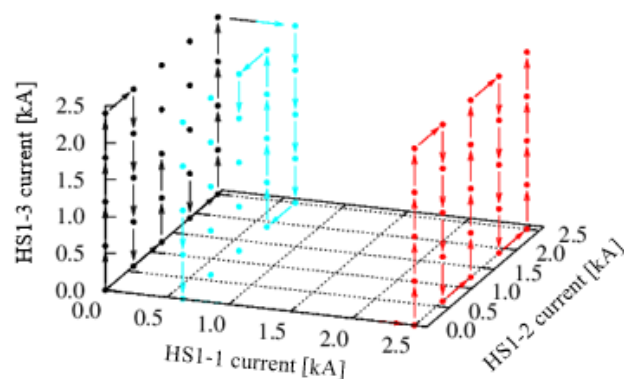


Figure 5: Excitation pattern of HS1 in the measurement. Arrows show the procedure. Excitation starts from $(I_{1-1}, I_{1-2}, I_{1-3}) = (0, 0, 0)$ and ends at (2.5, 2.5, 2.4) via the excitation patterns in planes $I_{1-1} = 0$ (black), 0.625 (cyan), 1.25, 1.875, and 2.5 (red). Planes $I_{1-1} = 1.25$ and 1.875 are not shown in this figure for visibility.

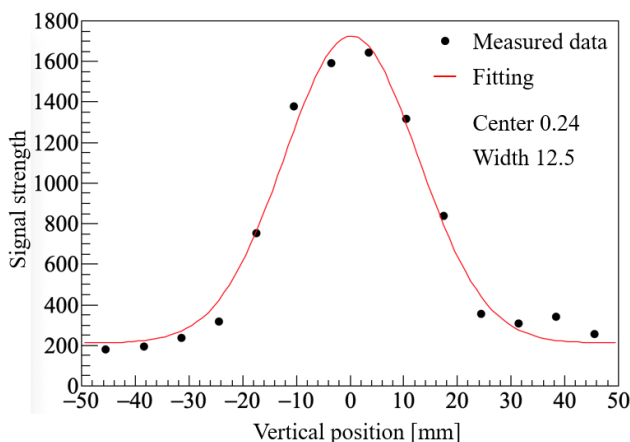


Figure 6: Proton beam profile measured using multi-wire profile monitor at $I_{1-1} = I_{1-2} = I_{1-3} = 0$. Black circles, observed data; red line, fitted result by Gauss function.

ビーム位置の測定には、水銀標的の約 2 m 上流 (Fig. 4 に示した測定位置) に設置されたマルチワイヤープロファイルモニター[7]を用いた。このプロファイルモニターは、常にビームライン上に固定され、水銀標的に入射するビーム位置、幅の常時監視に使用されている。鉛直方向のビーム位置、幅は 7 mm 間隔で張られた 14 本の炭化ケイ素(SiC)ワイヤーによる測定データに対して、Fig. 6 のようにガウス関数を用いたフィッティングから得られる。

3. 漏れ磁場の調査

3.1 各コイルの励磁電流と漏れ磁場の関係

HS1-1, 1-2, 1-3 をそれぞれ単独励磁した場合の励磁電流と Δy との関係を Fig. 7 に示す。HS1-1 の励磁電流を増加させると、 $|\Delta y|$ の増加率も増大しており、 Δy は励磁電流に対して非線形性を示すことがわかる。一方、HS1-2, 1-3 の励磁電流を増加させた場合には、 $|\Delta y|$ の増加率はほぼ一定となり、 Δy は線形性を示す。

測定点に対し、以下の一次および二次関数を用いて最小二乗法によるフィッティングを行い、励磁電流 I と Δy との関係を求めた。

$$\Delta y = a_1 I \quad (1)$$

$$\Delta y = b_2 I^2 + b_1 I \quad (2)$$

HS1-1, 1-2, 1-3 の各コイルの励磁電流 I_{1-1} , I_{1-2} , I_{1-3} と Δy との関係はそれぞれ次式で表される。

$$\Delta y = -0.362I_{1-1}^2 - 0.777I_{1-1} \quad (3)$$

$$\Delta y = -0.410I_{1-2} \quad (4)$$

$$\Delta y = -0.242I_{1-3} \quad (5)$$

各コイルについての $|\Delta y|$ の増加率を比較すると、陽子ビームラインから最も遠い HS1-3 で $|\Delta y|$ の増加率は最小 (0.242) となり、最も近い HS1-1 で最大 (~0.777) となる。また、HS1-1 による Δy には二次の成分が含まれ、HS1-1 の漏れ磁場が大きく影響することがわかる。

ビーム位置の変化 Δy は、Fig. 4 の軌道計算からわかるように、漏れ磁場によるキックと 4 台の四極電磁石によるキックの結果であるが、漏れ磁場のキックに比例する。このことは、HS1-1 による Δy の二次成分が光学ではなく、漏れ磁場に起因することを示し、励磁電流に対する HS1-1 の漏れ磁場の非線形性を示す。この非線形性は、設定電流で定常運転中だけでなく、第 4 章で示すように、設定電流に遷移中にも、線形性を仮定した補正量と実際に必要な補正量とに差異を生じさせ、軌道に影響する。

3.2 複数コイル励磁における漏れ磁場

HS1-1 と 1-2, HS1-1 と 1-3 および HS1-2 と 1-3 の組を励磁した場合の Δy の様子 (黒丸) を、単独励磁した場合の Δy の和 (緑丸) とともにそれぞれ Figs. 8, 9, 10 に示す。緑丸は、励磁したコイル間での干渉等が無いと仮定した値を表しており、たとえば Fig. 8 に示す $I_{1-1} = 0.625$ kA (25%), $I_{1-2} = 2.5$ kA の値は、Fig. 7 の上段の $\Delta y(I_{1-1} = 0.625) = -0.65$ mm と中段の $\Delta y(I_{1-2} = 2.5) = -1.04$ mm から -1.69 mm と求められる。

Figure 8 において HS1-1 を最大電流の 25% で励磁した場合、この状態で HS1-2 を励磁すると、 $I_{1-2} > 1.25$ kA (50%) で $|\Delta y|$ は単独励磁時の和より大きくなる傾向を示す。

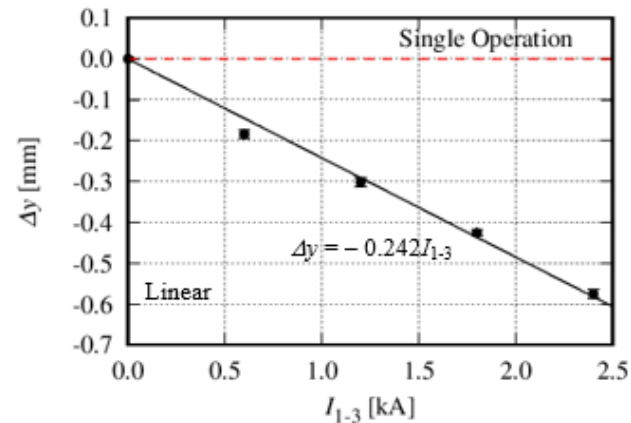
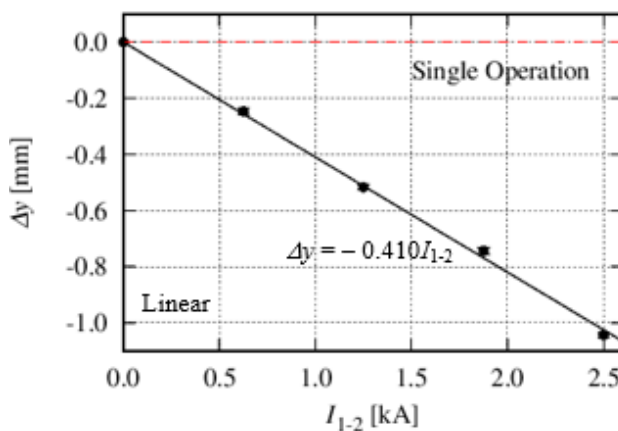
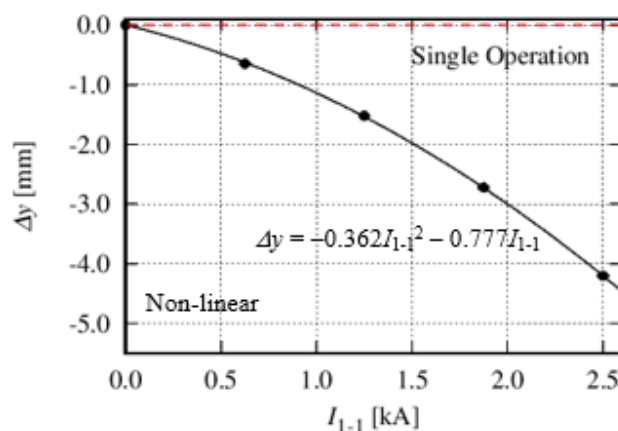


Figure 7: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-1} (top), I_{1-2} (middle), and I_{1-3} (bottom).

HS1-1 を最大電流の 50% で励磁した場合には、同様の傾向が HS1-2 の励磁電流によらず観測される。HS1-1 を 75, 100% 励磁した場合も 50% 励磁した場合と同様の傾向となる。

HS1-1 と 1-3 の組を励磁した場合、Fig. 9 に示すように HS1-1 を最大電流の 25% で励磁した状態では、HS1-3 の励磁電流によらず、 $|\Delta y|$ は単独励磁時の和とほぼ一致する。HS1-1 の励磁電流を 50% に増加させると $I_{1-3} > 0.625$ kA (25%) で単独励磁時の和より大きくなる。HS1-1 の 75, 100% 励磁でも 50% 励磁と同様の傾向となる。

HS1-2 と 1-3 の組を励磁した場合には、Fig. 10 に示すように HS1-2 を最大電流の 75% で励磁した状態でも HS1-3 の励磁電流によらず、 $|\Delta y|$ は単独励磁時の和と同

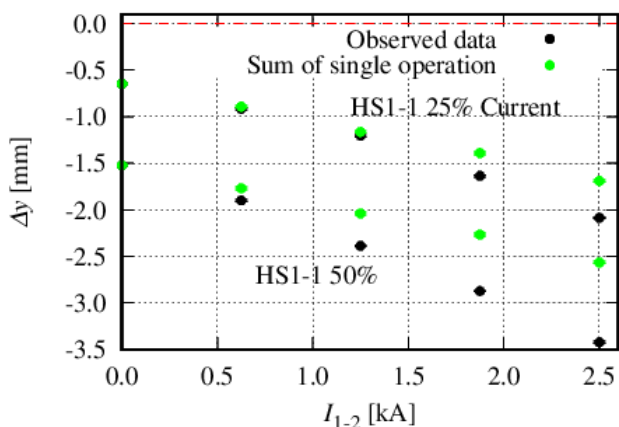


Figure 8: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-2} with $I_{1-1} = 0.625, 1.25$ kA. Observed data are shown with black circles. Green circles are sum of single operation data plotted in Fig. 7.

様の傾向を示す。HS1-2 を最大電流で励磁すると、 $I_{1-3} > 0.625$ kA (25%) で単独励磁時の和より大きくなる傾向を示す。

以上のように $|\Delta y|$ が単独励磁時の和より大きくなる傾向は、励磁したコイル間での干渉等を示唆する。2つのコイルの同時励磁では、最も漏れ磁場の影響が大きい HS1-1 を最大電流の 50% 以上で励磁中に他のコイルを励磁すると、漏れ磁場の影響が単独励磁時の和より増大することがわかった。このことは 3つのコイルの同時励磁でも同様である。HS1-1 の 25% 励磁中では、Figs. 8, 9 の結果から $I_{1-2} > 1.25$ kA (50%) で漏れ磁場の影響の増大が観測されたので、HS1-2 を 25% 励磁に減少させた状態で HS1-3 を励磁した場合に漏れ磁場の影響の増大が観測されるかを調べておく。

Figure 11 に示すように、HS1-1, 1-2 を最大電流の 25% で励磁した状態で HS1-3 を励磁すると、 $I_{1-3} > 0.625$ kA (25%) で $|\Delta y|$ は単独励磁時の和より大きくなる傾向を示しており、漏れ磁場の影響の増大が観測された。

以上の結果から、複数のコイルを同時に励磁するとき、漏れ磁場の影響が単独励磁から推定される影響より増

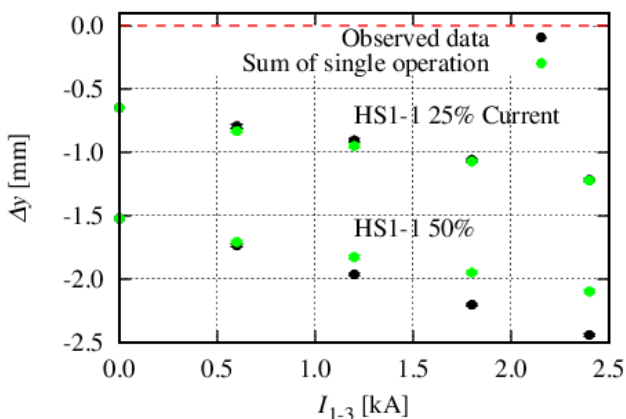


Figure 9: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-3} with $I_{1-1} = 0.625, 1.25$ kA. Black circles, observed data; green circles, sum of single operation data.

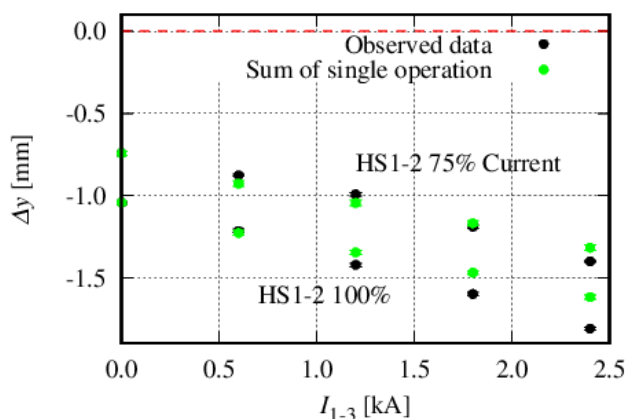


Figure 10: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-3} with $I_{1-2} = 1.875, 2.5$ kA. Black circles, observed data; green circles, sum of single operation data.

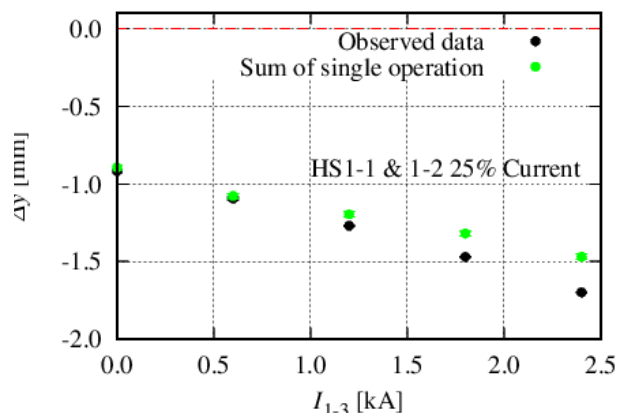


Figure 11: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-3} with $I_{1-1} = I_{1-2} = 0.625$ kA. Black circles, observed data; green circles, sum of single operation data.

大する場合があることがわかった。影響が増大するような HS1 の励磁パターンは、Fig. 12 の立体で囲まれる領域に含まれ、高励磁側の半分以上を占める。

この増大を考慮した補正は、Eqs. (1), (2) の a_1, b_1, b_2 を

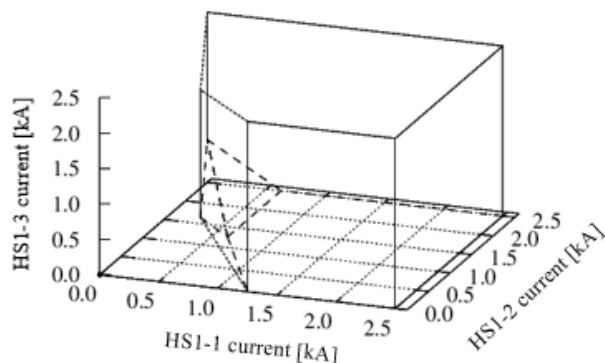


Figure 12: HS1 excitation pattern region where Δy is different from sum of that in single operation. The region is inside the three-dimensional shape.

励磁電流の関数として扱うことで可能になると予測できる。HS1-1 と 1-2, HS1-1 と 1-3 の組を励磁した場合の Δy の結果から $b_1(I_{1-2}, I_{1-3})$, $b_2(I_{1-2}, I_{1-3})$ を決定し、HS1-2 と 1-3 の組を励磁した場合の結果から $a_1(I_{1-3})$ を決定することで、Eqs. (3), (4) の定数をそれぞれ I_{1-2} と I_{1-3} , I_{1-3} に応じて変化させることができ、複数コイル励磁時の増大を補正できると考える。

4. 軌道補正

HS1-1 の非線形性を軌道補正に導入した。Figure 13 に、HS1 の励磁電流を増加させている間における鉛直方向ビーム位置の変化を示す。このときの HS1 の運転では、低い運動量のミュオンに対する励磁パターンとして、励磁電流 $(I_{1-1}, I_{1-2}, I_{1-3}) = (2.05, 0.9, 0.1)$ kA を設定した。HS1-1 の非線形性を考慮しなかった場合(破線)、ビーム位置は励磁電流増加中に最大で約+0.4 mm 中心から逸れたのに対し、非線形性を考慮した場合(黒実線)では、およそ中心を維持し、軌道補正を改善させることができた。HS1 の漏れ磁場によりビーム位置は負方向に変化するので、破線のような正方向への逸脱は、過剰補正を意味するが、これは Fig. 14 の破線のように線形性を仮定すると補正量が常に過大評価となることに起因する。Figure 14 の破線の式は、運転の励磁電流 $I_{1-1} = 2$ kA で $\Delta y = -3$ mm から

$$\Delta y = -1.5I_{1-1} \quad (6)$$

と表され、実線と破線の差 Δy_{dif} は Eqs. (3), (6) から次式のような二次関数となる。

$$\Delta y_{\text{dif}} = -0.362(I_{1-1} - 0.999)^2 + 0.361 \quad (7)$$

Equation (7) は Fig. 13 の点線のように、HS1-1 の励磁電流 0.999 kA で最大+0.361 mm 中心から逸れる放物線となり、破線の振る舞いと一致する。

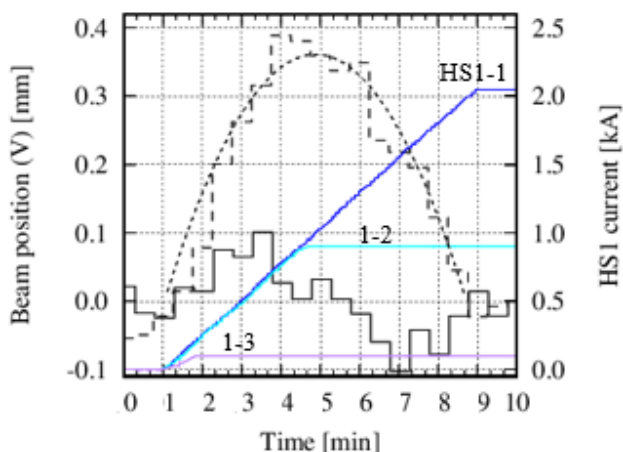


Figure 13: Vertical proton beam position corrected with considering non-linearity of HS1-1 (solid step line) and without that (dashed step line) in increasing HS1 currents. Currents of HS1-1, 1-2, and 1-3 are shown with blue, cyan, and purple solid lines, respectively. The dotted line is predicted beam position by Eq. (7) for the dashed step line case. The beam position of 0 mm is the center position.

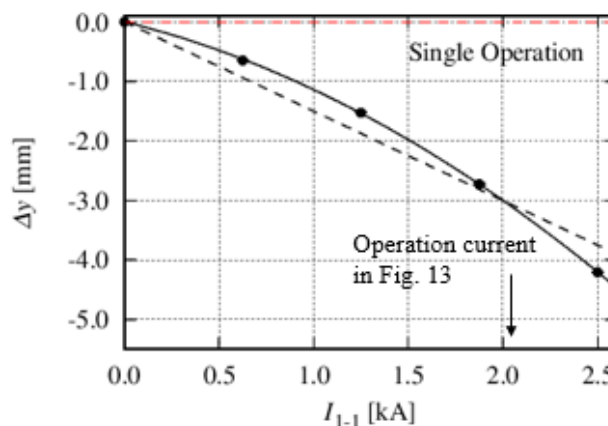


Figure 14: Proton beam position change in vertical direction Δy as function of I_{1-1} . Circles, measured data; solid line, fitted curve; dashed line, linear function for operation current of 2.05 kA.

5. まとめ

HS1 の漏れ磁場による陽子ビーム軌道変化をより正確に補正するために、HS1-1, 1-2, 1-3 の励磁電流と漏れ磁場の関係と複数のコイルを励磁した際の磁場の干渉の有無を明らかにした。HS1-1 の漏れ磁場は、励磁電流に対して非線形性を示すことがわかった。また、複数のコイルの励磁によって磁場が増大する場面があることがわかった。HS1-1 の非線形性を軌道補正に導入することで、補正を改善させることができた。今後、複数コイルの励磁による増大も補正に導入することで、任意の励磁パターンに対応した補正が期待できる。

謝辞

軌道補正の改良に協力いただいた J-PARC センター加速器第四セクションの塚敦氏に感謝する。

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, “The Joint Project for High-intensity Proton Accelerators”, JAERI-Tech 99-056, 1999, pp. 1-78.
- [2] Y. Miyake *et al.*, “J-PARC muon source, MUSE”, Nucl. Instr. Meth. A, 600, 2009, pp. 22-24.
- [3] N. Kawamura *et al.*, “New concept for a large-acceptance general-purpose muon beamline”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2018, 2018, pp. 1-12.
- [4] T. Yamazaki *et al.*, “New beamlines and future prospects of the J-PARC muon facility”, EPJ Web Conf., 282, 2023, 01016 pp. 1-5.
- [5] SAD Home Page, <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [6] Y. Ohnishi *et al.*, “Computer program complex SAD for accelerator design, simulation and commissioning”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, July 31 – August 3, 2019, pp. 4-8.
- [7] S. Meigo, Y. Yamaguchi, “SiC sensor wire test by heavy ion beam irradiation”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, August 29 – September 1, 2023, pp. 825-829.