

ヒステリシスを考慮した輸送系に用いられる偏向電磁石の磁場測定

MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELDS WITH HYSTERESIS EFFECTS IN BENDING MAGNET FOR BEAM TRANSPORT

保富立樹^{#, A)}, 菅原賢悟^{A)}, 石禎浩^{B)}, 栗山靖敏^{B)}, 上杉智教^{B)}, 沖田英史^{B)}, 不破康裕^{B)}

Ritsuki Yasutomi^{#, A)}, Kengo Sugahara^{A)}, Yoshihiro Ishi^{B)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}

Tomonori Uesugi^{B)}, Hidefumi Okita^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}

^{A)} Kindai University

^{B)} Kyoto University Research Reactor Institute

Abstract

TOSCA is one of the de facto standard software for magnetic analysis and it has been used for accelerator magnet design until now, however, hysteresis effects is one of the biggest challenge which has not be taken into account at the designing stage. In recent years, “play model” was proposed which can be incorporated into finite element magnetic field analysis with ease and the hysteresis effects can be qualitatively evaluated, thus, there is a possibility that design accuracy of the accelerator magnets will be significantly improved. The “play model” is based on the idea of the “direct current hysteresis”, therefore, to apply the “play model” to the accelerator magnets, quantitative discussions on the coupling between the hysteresis effects, and time-dependent effects such as magnetic after effects, and eddy current effects are required. The objective of this work is to quantitatively evaluate the influence of current excitation pattern of accelerator electromagnet and to judge applicability of direct current hysteresis model for magnetic field design of electromagnets for accelerator. We are now constructing a measurement system of the magnetic fields of the bending magnet for beam transport. By the development of this technique, it may be possible to design and control the magnetic field of the FFAG accelerators, taking hysteresis effects into account, and tunes of FFAG accelerator would be adjusted to improve the beam intensity.

1. はじめに

加速器用電磁石から発生する磁場は履歴現象(ヒステリシス)により、同じ電流値を設定した場合でもその履歴によって発生する磁場が異なることが広く知られており、そのモデル化も長年に渡って研究されている。

また、これまで加速器用電磁石の磁場設計には、2ポテンシャル法を採用している「TOSCA」[1]が用いられてきた。しかし、ヒステリシスの効果は複雑であり、これまで定量的な磁界設計は行われて来なかった。近年、有限要素法による磁界シミュレーションと組み合わせることによって、磁気ヒステリシスを定量評価できる様々なヒステリシスモデルが提案されている。これを加速器用電磁石の設計に用いることにより、我々は、設計精度の向上を図ろうとしている。代表的なヒステリシスモデルとして、プレイモデル [2,3,4]、Jiles Atherton モデル [5,6]、Stoner-Wohlfarth モデル [7,8]、ストップモデル [9,10,11]、ブライザッハモデル [12,13,14,15] などの様々なモデルが提案されており、今もなお継続的に研究がなされている。

プレイモデルは、ブライザッハモデルと数学的に等価であることが示されているが、このモデルはブライザッハモデルよりも計算量が劇的に少なく、有限要素法と組み合わせると現実的な解析時間で計算できる。また、他のモデルに比べて磁気特性の実測結果の再現の精度が良い。そこで、我々はプレイモデルに注目し、加速器用電磁石の設計への適用を検討している。

本研究の最終目標は、加速器用電磁石におけるヒス

テリシスに電流励磁パターンが与える影響を定量評価し、ヒステリシスの影響を考慮した電磁石設計技術を確立することで、FFAG 加速器に適用していく。本技術を活用することで、初期化運転パターンを最適化し、運転中のチューンの変動を抑制することで、ビームのロスを低減させ、ビーム強度を増加することを検討している。

2. 本研究の最終目標への取り組み

本研究の最終目標を達成するために、我々は以下のステップで研究を行うことを検討している。

ステップ 1) 初期化運転による加速器用電磁石の磁場分布のシミュレーション

まず、我々は第一段階として、モーターの世界で鉄損の解析精度を向上させる目的で開発された電磁界解析ソフト「JMAG」[16]を用いて、初期化運転パターンにより、磁場分布が変化することが、磁界解析で再現できるかどうかを検証した。詳細は 3 章で述べることにする。

ステップ 2) 2ポテンシャルとA-φ法で同等の静磁界解析が行うことができるかの検証

本研究のステップ2として、これまで、加速器用電磁石の設計を行う際、加速器業界ではデファクトスタンダードである TOSCA (2ポテンシャル法) が用いられてきたが、これまで、ヒステリシスを定量的に考慮した磁場設計は行

1733340440h@kindai.ac.jp

われて来なかった。一方で、JMAG では磁気ヒステリシスを定量評価できるプレイモデルが組み込まれており、ヒステリシスを考慮した電磁界解析を行うことができる。そこで、2ポテンシャル法を採用している TOSCA と A- ϕ 法を採用している JMAG が磁界解析において同等であれば A- ϕ 法を採用している JMAG を用いて加速器用電磁石を設計する。そうすることによって、ヒステリシスを考慮した解析を行うことができる。つまり、2ポテンシャルと A- ϕ 法で同等の静磁界解析が行うことで、今後 A- ϕ 法を用いて良いかどうかの検証を行う。

ステップ 3) TOSCA にプレイモデルを組み込み可否の検証

我々は、加速器用電磁石を対象にヒステリシスを考慮した磁界解析を行うために、ステップ1で A- ϕ 法と2ポテンシャル法との比較を行い、もし、A- ϕ 法と2ポテンシャル法に等価性(同等の計算資源で同等精度)がなければ、TOSCA にプレイモデルを組み込む予定である。

また、プレイモデルで用いられるプレイヒステロン単独が作るヒステリシスループは反時計回りである。それゆえ、プレイモデルは、磁界 H の入力に対して磁束密度 B を出力とするヒステリシス特性を表現するのに適している。しかし、磁界 H の入力に対して磁束密度 B を出力とする手法は、これまで実績がないため、その手法を確立する必要がある。

ステップ 4) 実際の電磁石を運転させて、直流ヒステリシスの考え方が適用可否の検証

実際の電磁石を運転させ、それによりできたヒステリシスが励磁する電流の時間の変化によって、ヒステリシスが変化しなければ、直流ヒステリシスの考え方が適用できるといえる。ここで直流ヒステリシスとはヒステリシスが時間に依存しないこと。適用できれば、ヒステリシスの効果と磁気余効・渦電流の効果を分離することができ、ヒステリシスを定量的に評価することができる。

もし、磁気余効がヒステリシスに影響しなければ、直流ヒステリシスの考え方が適用でき、プレイモデルを組み込んだ有限要素法でヒステリシスを考慮し、加速器用電磁石を設計することができる。また、磁気余効がヒステリシスに影響していれば、プレイモデルを拡張することによって加速器用電磁石に適用できる可能性がある。

ステップ 5) ヒステリシスを考慮した磁界解析と実際の実測値との比較

プレイモデルを組み込んだ TOSCA を用いて、加速器用電磁石の磁場分布のシミュレーションを行い、実測の磁場分布との比較を行う。

ステップ 6) FFAG 主加速器において、初期化運転パターンを最適化することで、運転中のチューンの変動を抑制できるかどうかの検証

FFAG 主加速器において、運転チューンの変動を抑制できるような磁場分布を予め、シミュレーションで予測を行う。そして、その磁場分布を、ヒステリシスを考慮した磁場解析でそれを再現できるように初期化運転パターンを決定する。そうすることによって、チューンを共鳴線から避けることができ、ビームロスが減少し、ビームの強度を増加させる可能性がある。

今回の加速器学会ではステップ 1)の結果についてのみ報告する

3. JMAG(A- ϕ 法)+プレイモデルによる BMBT1 のヒステリシスを考慮した磁場分布の解析結果

京都大学原子炉研究所には、FFAG 主偏向電磁石は、D マグネットと F マグネットのコンバインド型であり、FFAG 主偏向電磁石は直流運転ではあるものの電磁石の初期化パターンは、D マグネットを先に初期化し、F マグネットをあとから初期化するなど組み合わせの数が多く複雑である。

そのため、比較的単純な構造の輸送系偏向電磁石 (Bending Magnet for Beam Transport) の磁場分布を対象に研究を進めることにした。輸送系偏向電磁石を Fig.1 に示す。

そこで、BMBT1 を用いて、初期化運転パターンによって磁場分布が変化するかを調べるシミュレーションを行った。

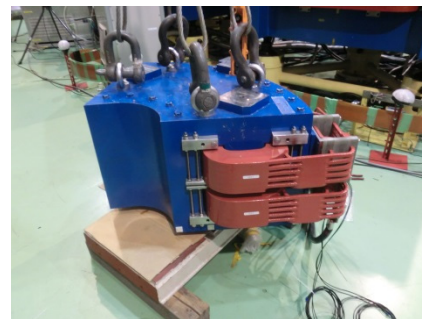


Figure 1: Bending magnet for beam transport magnet (BMBT1).

3.1 測定部分

Figure 2 に示されている θ° の磁場(T)をシミュレーションによって計算した。

ここで、弧 AB は、点 O を中心とする曲率半径は 500 mm の円弧で、角度の範囲は 0° から 180° である。また、この BMBT1 の最大磁場は 1.3 T である。

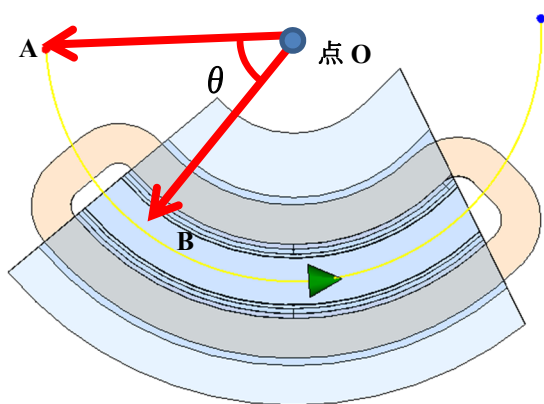


Figure 2: Magnetic field distribution of BMBT 1 simulated along the beam center. The position is measured by angle θ .

3.2 電流励磁波形の設定について

シミュレーションでは、3 パターンの電流励磁波形を用いた。1つ目のパターンは、時間に比例し、目標の200 Aまで電流を励磁させる。2つ目のパターンは、目標の200 Aに励磁させる前に、一度、電流を最大値(270 A)まで励磁させてから、200 Aにする。3つ目は、一度、最大値(270 A)まで励磁させてから0 Aにする。そして、目標の200 Aまで励磁させる。

JMAG で設定した 3 パターンの電流励磁波形をそれぞれのグラフを Fig. 3 ~ Fig. 5 に示す。本解析では、渦電流の影響は無視したため、励磁速度の依存性はない。

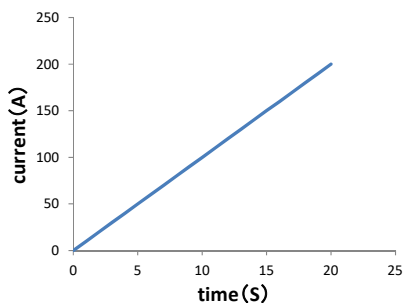


Figure 3: Current excitation waveform ①.

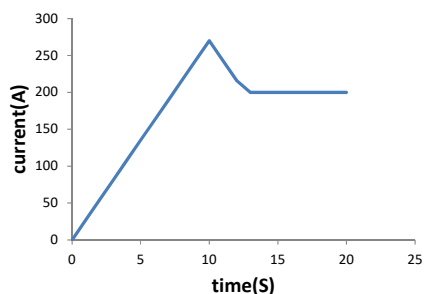


Figure 4: Current excitation waveform ②.

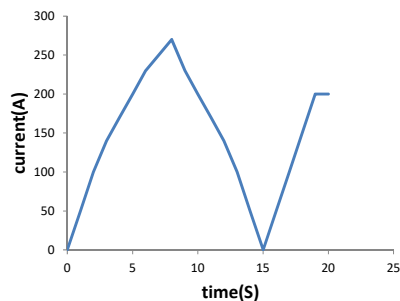


Figure 5: Current excitation waveform ③.

3.3 解析結果

BMBT1 の磁束密度と各電流励磁パターンの θ の依存性を Fig. 6 から Fig. 8 に示す。それぞれ、横軸に θ 、縦軸に磁場(T)を取った。

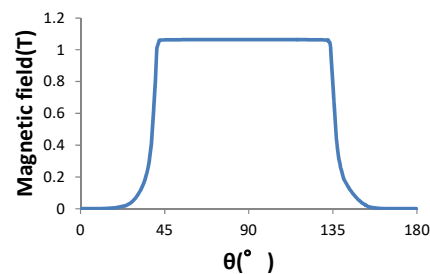


Figure 6: Dependence of θ and the magnetic field when the current is excited by waveform ①.

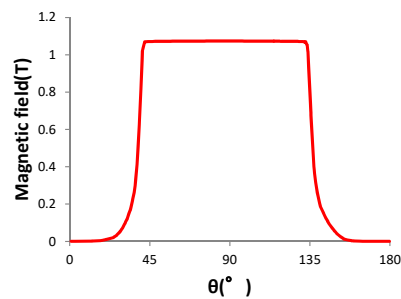


Figure 7: Dependence of θ and the magnetic field the current is excited by waveform ②.

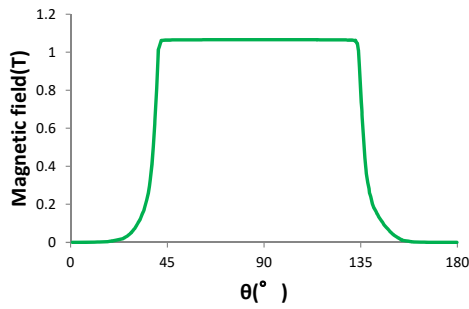


Figure 8: Dependence of θ and the magnetic field the current is excited by waveform ③.

また、Fig. 9 にパターン①とパターン②の差を縦軸 G(gauss)で示す。同様にパターン①とパターン③を Fig. 10 に、パターン②とパターン③の Fig. 11 に示す。

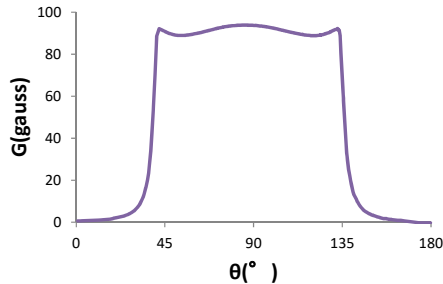


Figure 9: Difference between ① and ② at θ .

Figure 9 では、Fig. 2 の角度 θ が 90° のところで最大値(約 93 G)をとり、また、 θ が 45° と 135° のところで、少しであるが角のような形をしており、それぞれ約 90 G の誤差が出ている。

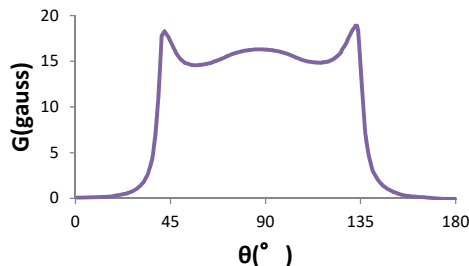


Figure 10: Difference between ① and ③ at θ .

Figure 10 では、角度 θ が 45° の部分で約 17 G ほどの誤差が出ており、 45° と 135° の部分で角のようなものがはっきり見える。また、パターン①とパターン③の誤差は、パターン①と②の誤差、パターン②と③の誤差に比べて、73 G ほど小さい。

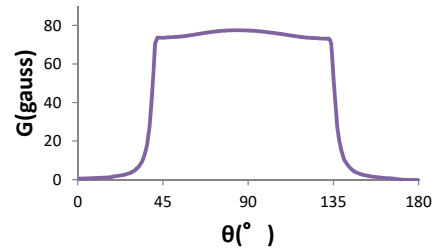


Figure 11: Difference between ② and ③ at θ .

Figure 11 は角度 θ が 90° と 135° の部分で 77 G ほどの誤差が出ている。

Figure 9 から Fig. 11 より、電流の励磁の仕方により、縦軸を G(gauss)で誤差をとると、全体的に見て、17 G から 90 G 存在している。よって、初期化運転パターンによって、主に θ が 45° から 135° で磁場分布が変化していることが結果からみてとれる。

このように、1.3 T 中、パターン①と②では最大約 90 G、パターン①と③では最大約 15 G、パターン②と③では最大約 77 G のヒステリシスによる差はプレイモデルでも表現できることが明らかになった。

4. まとめと今後の方針

3 章のシミュレーション結果から、初期化運転パターンによって、発生磁場の分布の変化が定量的に評価できることが明らかになった。

現在、我々は、ステップ 2 の 2 ポテンシャルと A- ϕ 法で同等の静磁界解析が行うことができるかの検証に取り組んでおり、逐次研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] J.Simkin and C.W.Trowbridge. "On the use of the total scalar potential in the numerical solution of field problems in electromagnetics" Int. J. Num. Meth. Engng. Vol.14, pp.423-440, 1975.
- [2] M. A. Krasnosel'skii and A. V. Pokrovskii: *Systems with Hysteresis*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1989).
- [3] S. Bobbio, G. Miano, C. Serpico and C. Visone: "Models of Magnetic Hysteresis Based on Play and Stop Hysterons", *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 6, 4417-4426 (1997).
- [4] T. Matsuo, Y. Osaka and M. Shimasaki: "Eddy-Current Analysis Using Vector Hysteresis Models with Play and Stop Hysterons", *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 1172-1177, (2000).
- [5] K. Muramatsu, N. Takahashi, T. Nakata, M. Nakano, Y. Ejiri and J. Takehara: "3-D Time-Periodic Finite Element Analysis of Magnetic Field in Non-Oriented Materials Taking into Account Hysteresis Characteristics", *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 2, 1584-1587 (1997).
- [6] N. Takahashi, T. Kayano, K. Miyata, K. Ohashi: "Effect of Minor Loop on Magnetic Characteristics of Permanent

- Magnet Type of MRI”, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3, 1893-1896 (1999).
- [7] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth: “A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys”, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **240A**, pp.599-642 (1948).
- [8] G. Friedman: “New Formulation of the Stoner-Wohlfarth Hysteresis Model and the Identification Problem”, *J. Appl. Phys.*, **67**, 9, 5361-5363, (1990).
- [9] M. A. Krasnosel'skii and A. V. Pokrovskii: *Systems with Hysteresis*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1989).
- [10] T. Matsuo, Y. Osaka and M. Shimasaki: “Eddy-Current Analysis Using Vector Hysteresis Models with Play and Stop Hysteresis”, *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 1172-1177, (2000).
- [11] G. Miano, C. Serpico and C. Visone: “A New Model of Magnetic Hysteresis, Based on Stop Hysteresis: An Application to the Magnetic Field Diffusion”, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3, 1132-1135 (1996).
- [12] F. Preisach: “Über die Magnetische Nachwirkung”, *Zeitschrift für Physik*, **94**, 277-302 (1935).
- [13] I. D. Mayergoyz: *Mathematical Models of Hysteresis*, Springer-Verlag, New York (1991).
- [14] E. Della Torre: *Magnetic Hysteresis*, IEEE Press, New York (1999).
- [15] 奥村浩士, 木嶋昭: 「ヒステリシス特性のデジタルシミュレーションとその応用」, *電学論*, **103-B**, 7, 451-458 (1983).
- [16] JMAG-Studio commercial software, JSOL, Ltd.; <http://www.jmag-international.com/index.html>