

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04454

研究課題名(和文) 磁気ヒステリシスを定量化した、加速器用電磁石の高速かつ高精度な制御方法の研究

研究課題名(英文) Research on high-speed and high-precision control methods for accelerator electromagnets with quantified magnetic hysteresis.

研究代表者

菅原 賢悟 (Sugahara, Kengo)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：50718963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：加速器用電磁石の運転ではヒステリシスの影響を考慮する必要がある。ヒステリシスの影響を評価する方法の一つとして有限要素法が挙げられるが計算時間が長大となるため、加速器用電磁石の運転支援に適していない。我々は計算コストが比較的小さい「磁気回路網法」を加速器の運転支援に用いることを検討している。本研究ではケルビン変換の考え方を取り込むことで加速器電磁石のような開磁路においても適用できるように拡張した。この研究成果は日本磁気学会から論文賞として表彰された。その後、さらに実験的検討を重ねることにより直流ヒステリシスに加えて磁気余効と結合したヒステリシスのモデリングが必要であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

がん治療や材料開発には加速器が用いられている。加速器とは照射するビームを加速する装置であるがその軌道を制御するためには電磁石が用いられる。電磁石には鉄が用いられているが鉄にはその履歴に依存するヒステリシス現象があるため、電磁石に流す電流と発生磁場の関係が単純ではない。結果としてビームの制御を高精度に行うことの妨げとなっている。本研究では、このヒステリシスの影響を考慮することでビーム制御の高度化することを目的としている。本研究が完遂すると例えばがん治療用の高精度な照射が達成される。この科研費による研究期間では、その目標の達成に向けて重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In the operation of accelerator magnets, it is necessary to consider the effect of hysteresis. The finite element method is a method to evaluate the effect of hysteresis, but it is not suitable for the operation of accelerator magnets because of its long calculation time. Therefore, the use of "reluctance networks analysis," which have a relatively low computational cost, is being considered to support the operation of accelerator magnets. In this study, the concept of the Kelvin transformation is extended to be applicable to open magnetic circuits such as accelerator magnets. The results of this research have received a paper award from the Magnetics Society of Japan. Further experimental investigation revealed that in addition to DC hysteresis, it is necessary to model hysteresis coupled with magnetic aftereffects.

研究分野：加速器工学と電磁界解析

キーワード：粒子線ビーム 加速器用電磁石 電磁界解析 磁気回路網 ケルビン変換 磁気ヒステリシス 磁気余効

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

加速器は、電場・磁場を用いて荷電粒子を加速させて粒子ビームを発生させるシステムであり、高エネルギー物理の研究、放射光発生装置、医療診断・治療などに利用されている。前述のとおり、これら加速器用電磁石の運転において、未だ磁気ヒステリシスの定量化は困難とされ、初期化運転を行う事でその影響を極小化している。初期化運転とは、電磁石の最大設定電流と最小設定電流を交互に流すことを複数回繰り返す操作であり、加速器で照射するビームを調整する際、即ち加速器用電磁石が作る磁場を変更する際には必要不可欠とされている。加速器自体の製作誤差や設置時の誤差は必ずあるため、機器据付後には、設計通りのビーム照射を行うために、電磁石の設定値を調整して磁場を補正しなくてはならない。実にこの調整に半年もの時間を要しているのが現実である。加速器システムの電磁石総数は粒子線治療装置で数十～百個。Spring8規模になるとその数は1500にも及ぶ。ビームを調整するには、個々の電磁石の設定電流を変更する必要があるが、そのたびにビームおよび電磁石を停止しては初期化運転を行っている状態である。このビーム調整に要する時間が、加速器システムの運用面でもコスト面でも大きな障害となっている。

2. 研究の目的

加速器分野では高精度な磁場分布を即時変更できないという課題に対して、加速器分野に磁気ヒステリシス定量化モデルを適用する事で、初期化運転も機器の停止も要せずに、期待する磁場分布を得るための電磁石の設定電流値を算出する「リアルシミュレーション」手法を提案する事を本研究の目的とする。磁気ヒステリシスを定量化するモデルの研究はこれまででもモータ等の電気機器分野では積極的に進められてきたものの、これを加速器の分野へ適用する研究は、申請者の研究グループ以外では例が無い。この手法を確立し、加速器のビーム調整過程でリアルシミュレーションが可能となれば、ビーム調整に要する期間を半分以上短縮できると見込んでいる。(図1)

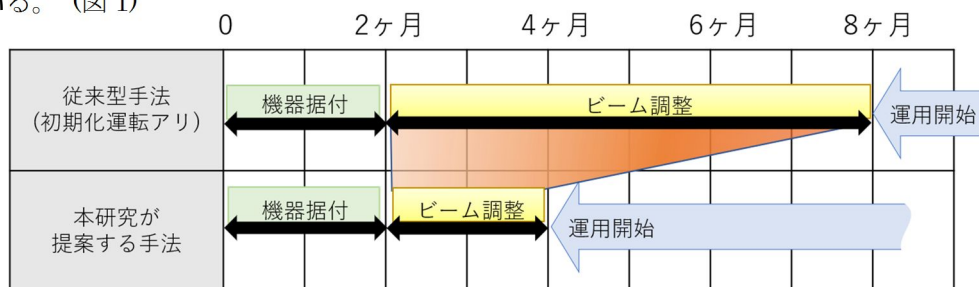


図1. 本研究が提案する手法を加速器の運転に適用した場合に見込める効果の一例

また、本研究では、磁気ヒステリシス定量化モデルとして、電気機器の分野で近年提案された「プレイモデル」を用いていくが、こうした、分野の垣根を越えて研究成果を共有する事自体にも価値があると我々は考えている。このプレイモデルを異業界である加速器に適用する研究を進める事で、両業界の研究成果が互いの発展につながる実例を作り、業界を問わず電磁解析技術全体の発展につながるものと思われる。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示す小型のC型電磁石を作成し、電磁界シミュレーションと実測の両側面から検討を行った。また、実際の加速器に使われる4極電磁石を東北大学に設置し測定による検討を行った。直流電源、オシロスコープ、ガウスメータをそれぞれ制御する制御システムを構築し、磁気ヒステリシスと磁気余効がどのように結合するのかを研究した。

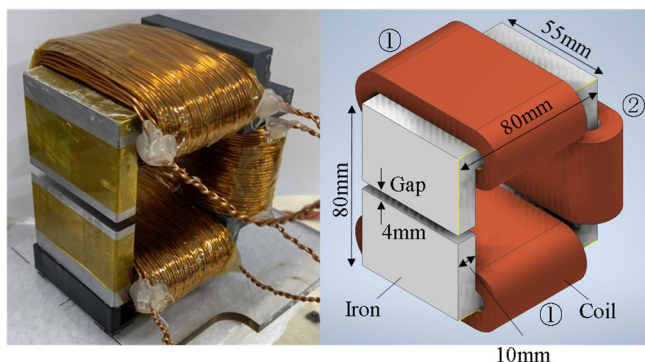


図1 作成した小型のC型電磁石



図2 東北大学に設置した4極電磁石

4 . 研究成果

研究成果のリストを下記に示す。

2020/9/3

電気学会 静止器・回転機合同研究会

菅原賢悟

SA-20-038, RM-20-062

電磁場開領域問題におけるケルビン変換の適用範囲拡大

2020/9/3

電気学会 静止器・回転機合同研究会

羽根吉紀, 菅原賢悟, 中村健二

SA-20-049, RM-20-073

開磁路に適用可能な磁気回路網解析

2021/7

Journal of the Magnetics Society of Japan(磁気学会優秀論文賞)

羽根吉紀, 菅原賢悟, 中村健二

A Novel Reluctance Network Model Applicable for Open Magnetic Circuits

2021/3/4

電気学会 静止器・回転機合同研究会

浦田知希, 菅原賢悟, 石 禎浩, 中村健二, 羽根吉紀

SA-21-004, RM-21-004

磁気ヒステリシスが加速器用電磁石のギャップ磁場に与える影響に関する基礎検討

2022/9

IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 9, pp. 1-6

Kengo Sugahara

Electromagnetic Analysis of Eddy Current Testing with Kelvin Transformation

2022/3/7

電気学会 静止器・回転機合同研究会

浦田知希, 菅原賢悟, 石 禎浩, 中村健二, 羽根吉紀

SA-22-016, RM-22-016

磁気ヒステリシスと磁気余効が加速器用電磁石の発生磁場に与える影響に関する実験的検討

2022/8/8

電気学会 マグネティックス研究会

恩知諠武, 菅原賢悟, 浦田知希, 羽根吉紀, 石 禎浩

MAG-22-078

加速器用電磁石における磁気ヒステリシスモデリングの実験的検討

2022/9/29

電気学会 静止器・回転機合同研究会

浦田知希, 菅原賢悟, 羽根吉紀

SA-22-071, RM-22-074

縮約ブレイドモデルによる加速器用電磁石の高速制御手法に関する基礎検討

2022/12/27

IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering

羽根吉紀, 浦田知希, 恩知諠武, 菅原賢悟, 中村健二, 石 禎浩

Experimental Consideration on Influence of Magnetic After Effect on Gap Magnetic

Field and Applicability of Conventional Hysteresis Models for Particle Accelerator

Electromagnets

2023/3/1

Journal of the Magnetics Society of Japan

矢野博之, 菅原賢悟

Magnetic Moment Method with the Idea of Magnetic Surface Charge Method

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Hane, K. Sugahara, K. Nakamura	4. 巻 45
2. 論文標題 A Novel Reluctance Network Model Applicable for Open Magnetic Circuits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 112-117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 羽根吉紀, 浦田知希, 恩知諠武, 菅原賢悟, 中村健二, 石禎浩	4. 巻 18
2. 論文標題 Experimental Consideration on Influence of Magnetic After Effect on Gap Magnetic Field and Applicability of Conventional Hysteresis Models for Particle Accelerator Electromagnets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 500-505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 矢野博之, 菅原賢悟	4. 巻 47
2. 論文標題 Magnetic Moment Method with the Idea of Magnetic Surface Charge Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 52-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 浦田 知希, 菅原 賢悟, 石 禎浩, 中村 健二, 羽根 吉紀
2. 発表標題 磁気ヒステリシスが加速器用電磁石のギャップ磁場に与える影響に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会 静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kengo Sugahara, Hiroyuki Yano
2. 発表標題 Magnetic Moment Method with the Idea of Magnetic Surface Charge Method
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽根吉紀, 菅原賢悟, 中村健二
2. 発表標題 開磁路に適用可能な磁気回路網解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浦田知希, 菅原賢悟, 羽根吉紀, 中村健二, 石禎浩
2. 発表標題 磁気ヒステリシスが加速器用電磁石のギャップ磁場に与える影響に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石 禎浩 (Ishi Yoshihiro) (00525834)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤原 耕二 (Fujiwara Koji) (20190093)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	
研究分担者	中村 健二 (Nakamura Kenji) (70323061)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	羽根 吉紀 (Hane Yoshiki) (40908753)	東北大学・工学研究科・JSPS特別研究員(PD) (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関