

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14709

研究課題名（和文）高温超伝導応用機器の最適設計を目指した遮蔽電流密度の高性能解析

研究課題名（英文）High Performance Shielding Current Density Analysis for Optimal Design of High-Temperature Superconducting Devices

研究代表者

高山 彰優（Takayama, Teruou）

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70396589

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：核融合炉の燃料ペレット入射に用いられる超伝導線形加速器（SLA）システムの加速性能を向上させるために、数値解析を実施した。この目的のため、有限要素法に基づく数値解析コードを開発し、遮蔽電流密度と高温超伝導薄膜の動的な動きを同時に解析した。また、電磁石内の電流プロファイルを最適化するため、NGnet法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせた方法を有限要素法コードに実装した。結果として、最適化された電流分布は、均一な分布と比較して狭いプロファイルになることが示されました。その結果、超伝導薄膜のサイズを大きくすることができ、目的の速度に達するまでの加速時間を約2.9倍と大幅に短縮することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たに開発された数値コードとトポロジー最適化手法の組み合わせは、高温超伝導機器の設計最適化における応用性と有用性を示すことから、超伝導研究の進歩と新たな知見がもたらされる。最適化によって高温超伝導機器の性能向上やエネルギー効率の改善が実現し、超伝導技術の実用化が進むと考えられる。具体的には、高温超伝導リニア加速システムの設計により、磁場閉じ込め核融合炉の燃料ペレットを効率的に加速・制御することが可能になる。同様の手法は他の超伝導機器にも応用でき、エネルギー利用可能な超伝導機器の性能向上や効率化に貢献する。また、効率的かつ経済的な超伝導機器の開発が可能になり、幅広い社会的課題の解決にも寄与する。

研究成果の概要（英文）：To enhance the acceleration performance of a superconducting linear accelerator (SLA) system used for fuel pellet injection in fusion reactors, a numerical investigation was carried out. For this purpose, a numerical code based on the finite element method (FEM) was developed to analyze the simultaneous behavior of shielding current density and dynamic motion of the high-temperature superconducting thin film. To optimize the current profile in the electromagnets, a method combining the normalized Gaussian network approach with a genetic algorithm was implemented in the code. The computational results demonstrated that the optimized current distribution resulted in a narrower profile compared to the uniform distribution. As a result, it was possible to increase the size of the thin film, leading to a significant reduction in the acceleration time required to reach the desired speed, approximately 2.9 times faster.

研究分野：シミュレーション科学，超伝導工学

キーワード：有限要素法 数値シミュレーション 高温超伝導薄膜 線形加速システム 多目的最適化

## 1. 研究開始当初の背景

1986年に発見された高温超伝導体はそのままではなく、線材、バルク、薄膜などの形態に変えられ、さまざまな用途に利用されている。代表的な実用例としては、磁気共鳴画像やリニアモーターカーがある。しかしながら、このような超伝導機器の開発や設計には膨大な時間、労力、コストがかかるため、超伝導体内の遮蔽電流密度解析が不可欠である。超伝導応用機器を設計・開発するには、超伝導体内の遮蔽電流密度の解析が欠かせない。特に大型な超伝導機器を設計する場合には、数値シミュレーションは必須であるといえる。

近年、磁場閉じ込め核融合炉の燃料である固体水素ペレットを高温プラズマコアに導入する目的で、高温超伝導リニア加速（SLA: Superconducting Linear Acceleration）システムが提案された。このシステムは、リニアモーターカーの原理を利用し、加速用と浮上用の2種類の高温超伝導体（HTS: High-Temperature Superconductors）を用いる。これにより、固体水素ペレットは、2種類のHTSを組み込んだ容器に収められ、電磁的に加速することが可能となる。ただし、SLAシステムはまだ磁場閉じ込め核融合炉へのペレット導入には使用されておらず、実験的にどの程度のペレット速度が得られるのかは明確ではない。

## 2. 研究の目的

高温超伝導体内の遮蔽電流密度の巨視的振る舞いは、Maxwellの方程式に基づく非線形微分方程式の初期値・境界値問題で表される。遮蔽電流密度の時間発展問題を解析するための手法としては、磁気ベクトル・ポテンシャル法と電流ベクトル・ポテンシャル法（以下、 $T$ 法と略記）がある。どちらの手法でも、非線形微分方程式は遮蔽電流密度の支配方程式に変形された後、連立1次方程式を解く問題に帰着することができる。本研究では、 $T$ 法を用いて遮蔽電流密度の解析を行う。

本研究の目的は、上記の遮蔽電流密度解析を工学的に応用し、SLAシステムの数値シミュレーションを実施することによって、同システムの実現・設計可能性を数値的に調べることであり、また、その加速性能を数値的に向上させることである。

## 3. 研究の方法

本研究では、 $T$ 法を使用した遮蔽電流密度解析およびコードを用いて、超伝導体内の遮蔽電流密度解析を行う。HTS薄膜内を流れる遮蔽電流密度を解析するために、有限要素法を基にした数値シミュレーションコードを開発した。また、同コードには多目的最適化の一手法であるNSGA-IIを実装しました。さらに、開発したコードを使用してSLAシステムの加速性能を評価し、加速用電磁石の形状最適化手法としてon/off法およびNGnet法を採用した。

## 4. 研究成果

本研究で得られた3点の成果を以下に示す。

### (1) 電磁石電流分布の最適化

SLAシステムの加速性能を数値的に向上させることを目的に、HTS薄膜内を流れる遮蔽電流密度を解析する有限要素法の数値・コードを開発した。さらに、同コードに多目的最適化の遺伝的アルゴリズム（NSGA-II）を実装し、SLAシステムの加速性能を調べた。加速

用電磁石の形状最適化法として、on/off法とNGnet法を採用した。その結果、加速用電磁石の形状最適化として、NGnet法を適用した結果、一様電流分布の場合より、ペレット速度が約4倍増加した。さらに、加速用電磁石の電流分布が、on/off法とNGnet法で決定されたが、on/off法の場合、電流分布が疎らであるため、製作の観点から現実的ではない。一方、纏まった電流分布であるため、電磁石作製の実現性があることが明らかになった。

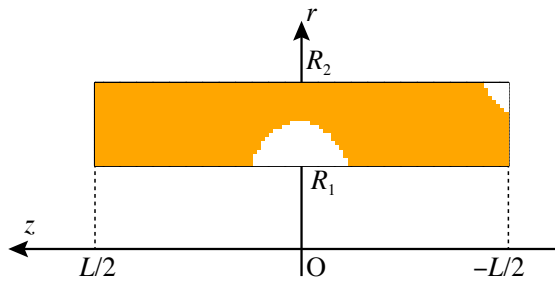


Fig. 1 電磁石電流の分布

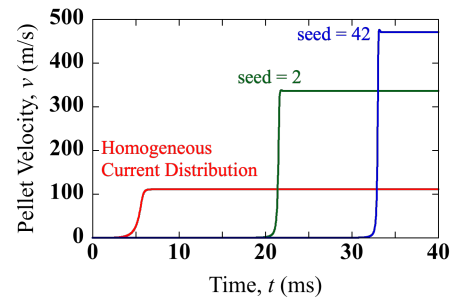


Fig. 2 ペレット速度の時間変化

### (2) 2重電磁石の使用とその最適化

2重磁石の形状最適化法にもNGnet法を採用し、NSGA-IIを用いて多目的最適化問題を解いた。また、目的関数にペレット速度とエネルギー変換効率を採用し、目的関数が最適化に及ぼす影響を調べた。その結果、内側電磁石の最適化は外側電磁石の最適化よりもペレット速度の向上に有効であることがわかった。また、ペレット速度とエネルギー効率はトレードオフの関係にあることがわかった。したがって、加速磁石の設計において、ペレット速度に着目するか、エネルギー効率に着目するかで、最適な形状を任意に決定することができる。つまり、SLAシステムの設計の際、ペレット速度を重視するか、エネルギー効率を重視するかを選択することが可能となる。

### (3) 指数関数的増加電流の適用

指数関数的に増加する電流を電磁石に印加したとき、立ち上がる電流の最大値が大きく、急峻に増加する。この結果から、SLAシステムのペレット入射時間を大幅に短縮する可能性が数値的に示されたといえる。加速時間 $t_E$ は約1/5に短縮された。今後は、時定数や電磁石間隔などの実験パラメータを変化させながら、SLAシステムの加速性能について検討していく。

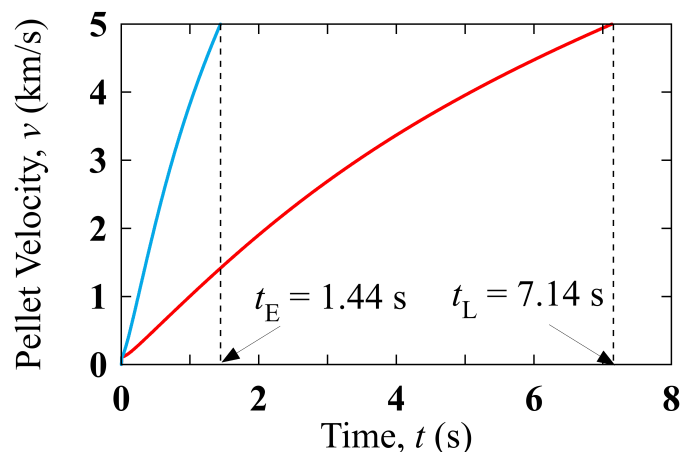


Fig. 3 ペレット速度の時間変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takayama Teruo, Yamaguchi Takazumi, Saitoh Ayumu, Kamitani Atsushi	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Optimization of Electromagnet Current Distribution in Superconducting Linear Acceleration System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3158374	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 該当する
1. 著者名 高山 彰優	4. 巻 97
2. 論文標題 高温超伝導体の数値電磁界解析 - 高性能解析技術の開発と応用 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 500~507
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 Takayama Teruo, Yamaguchi Takazumi, Saitoh Ayumu, Kamitani Atsushi	4. 巻 31
2. 論文標題 Improvement of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection: Optimization of Current Profile	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3064795	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 KAMITANI Atsushi, TAKAYAMA Teruo, SAITOH Ayumu, NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Acceleration Techniques for Linear-System Solver in Shielding Current Analysis of Cracked HTS Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2405005~2405005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2405005	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 TAKAYAMA Teruou、YAMAGUCHI Takazumi、SAITOH Ayumu、KAMITANI Atsushi、NAKAMURA Hiroaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Multi-Objective Optimization of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection by Using Finite Element Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401025 ~ 2401025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2401025	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 Takayama Teruou、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi	4. 巻 30
2. 論文標題 Numerical Investigations on Enhanced-Performance Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2979401	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 Takayama Teruou、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi	4. 巻 64
2. 論文標題 FEM-simulation of superconducting linear acceleration system for pellet injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 1469 ~ 1475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-209467	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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Teruou Takayama
2. 発表標題 Numerical Investigation on Superconducting Linear Acceleration System: Shape Optimization of Current Distribution in Electromagnet
3. 学会等名 JSST2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高山 彰優
2. 発表標題 超伝導リニア加速システムの数値シミュレーション：電磁石の形状最適化
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高山 彰優
2. 発表標題 超伝導リニア加速システムの FEMシミュレーション：多目的最適化による電磁石形状の決定
3. 学会等名 MAGDA2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takayama Teruou、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi
2. 発表標題 Improvement of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection: Optimization of Current Profile
3. 学会等名 ASC2020 ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayama Teruou、Yamaguchi Takazumi、Saitoh Ayumu、Kamitani Atsushi
2. 発表標題 Multi-Objective Optimization of Superconducting Linear Acceleration System for Pellet Injection by Using Finite Element Method
3. 学会等名 ITC29 ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河崎 洋志, 高山 彰優, 齋藤 歩, 神谷 淳
2. 発表標題 高温超伝導リニア駆動型ペレット入射法の数値シミュレーション：多目的最適化の適用
3. 学会等名 MAGDA2020
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------