

令和元年6月13日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01403

研究課題名(和文)次世代MRI/NMRのための磁性流体によるシミングの基礎検討

研究課題名(英文)Fundamental Investigation of shimming by magnetic fluid for next generation MRI/NMR

研究代表者

野口 聡 (Noguchi, So)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：30314735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：次世代MRI/NMRの磁場補正技術の基礎検討を実施した。現在、世界的に第二世代超伝導体を使用した高磁場マグネットが開発されており、20テスラ以上の高磁場発生に成功している。そして、MITでは30.5テスラのNMR用マグネットが、日本でも9.4テスラのMRI用マグネットの開発が進められている。それらの次世代MRI/NMRマグネットで問題となっている、遮蔽電流による不正磁場の低減を検討してきた。また、遮蔽電流磁場を低減する手法を検討する前に、高精度かつ高速に磁場均一度を計算する手法および遮蔽電流を計算する手法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QOL向上を目指す医療や製薬などの場で、より高磁場なMRIやNMRの開発が求められている。日本や米国などでその開発研究が行われている。しかし、MRIやNMRは高度な均一磁場が求められるが、第二世代高温超伝導を使用したマグネットは遮蔽電流磁場と呼ばれる不正磁場が発生する。そこで、本研究では、その遮蔽電流磁場を正確にシミュレーションすること、マグネット自体の不正磁場を高速に求めることをまず実施し、その後、その不正磁場を低減することを検討した。この成果により、次世代MRI/NMRの実現が近づいた。

研究成果の概要(英文)：I have done a fundamental investigation on a shimming way for next-generation MRI/NMR magnets. Recently, magnets wound with second-generation high-temperature superconducting tape wires are developed all over the world. For example, MIT is making an NMR magnet to generate 30.5 teslas, Japan 9.4-tesla MRI magnet. However, such magnets has a problem on the screening current-induced field. It deteriorates the field homogeneity. Therefore, I have developed a simple simulation method to calculate the screening currents and the field generated by them. In addition, I have developed a accelerating method to compute the field homogeneity of magnets composed of multistacked pancake coils.

研究分野：超伝導工学

キーワード：NMR 高磁場 磁場補正

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

Massachusetts Institute of Technology (MIT)で第二世代高温超伝 (REBCO) テープ線を利用した高磁場 NMR マグネット(30.5 T)の開発が始まった。REBCO テープ線は、扁平なテープ形状をしており、マグネット励磁時に大きな遮蔽電流が誘導される。この誘導遮蔽電流は、本来、高均一度であるべき磁場を大きく見出してしまふことが問題となっていた。また、日本でも、REBCO テープ線を用いた 9.4 T MRI マグネット開発が NEDO や AMED のプロジェクトとして進められていた。この遮蔽電流の作る不正磁場は均一度を乱すだけでなく、時間的にも減衰するという問題もある。このように、REBCO テープ線によるマグネットの実用化のためには、遮蔽電流を見積もることと、不正磁場を正す (シミング) ことが重要となっていた。

2. 研究の目的

(1) REBCO テープ線によるマグネットで、励磁時に誘導される遮蔽電流をシミュレーションを通じて明らかにすること、さらに遮蔽電流が作る不正磁場を見積もる。

(2) MRI/NMR 用 REBCO マグネットは通常、パンケーキ・コイルと呼ばれる形態をしている。また、電流が流れる超伝導層が、REBCO テープ線に占める割合が極端に小さいため、従来のようにコイル内に電流が均一に流れているとすると、不正磁場計算精度が悪い。そこで、このパンケーキ・コイル形状に合わせた、高速不正磁場計算手法を開発する。

(3) 時間的に変動する不正磁場を補正する (シミング) ために、新たに磁性流体濃度を時間変更するシミング法の基礎検討を実施する。まずは、基礎検討として、不正磁場の補正に十分な磁化が得られるかシミュレーションで検討する。

3. 研究の方法

(1) REBCO マグネット内に誘導される遮蔽電流を評価するためには、精度の高い電磁界シミュレーションが必要である。これまで、有限要素法に薄膜近似を用いた方法が、遮蔽電流シミュレーションとして提案されてきたが、これは超伝導テープ面に平行な磁場 (軸方向磁場) の影響を考慮できていなかった。そこで、より高精度なシミュレーションを実施するために、軸方向磁場を考慮した高精度遮蔽電流シミュレーションを開発する。

(2) REBCO パンケーキ・コイルでは、パンケーキ・コイル同士がわずかに離れていること、超伝導層が REBCO テープ内の極一部であることから、マグネット断面内を離散的に電流が流れていることになる。したがって、全ての超伝導層を計算する必要があるが、膨大な計算時間を要する。そこで、パンケーキ・コイル形状の相似性を利用し、高速な計算手法を開発する。

(3) 磁場下で、磁性流体の磁化をシミュレーションにより調査する。また、流体解析を実施し、磁場下で磁性流体の流れの様子を検討し、シミングに利用できるかを判断する。

4. 研究成果

(1) REBCO マグネット内の遮蔽電流を解析するために、薄膜近似法を併用してきた。しかし、この手法では、z 方向磁場による影響、すなわち超伝導層の厚みが無視されており、MRI や NMR に必要とされる磁場解析精度が達成できなかった。そこで、新たに z 磁場成分が超伝導層を貫く定式化を行い、解析手法を確立した。図 1 に解析結果を示す。上図が従来法で、下図が提案法による電流分布解析結果である。わずかながら両者に違いがあり、この違いがコイル中心付近にわずかな磁場の違いを生じさせる。

(2) 従来の低温超伝導体を使用した MRI/NMR マグネットでは、丸い素線断面内に超伝導フィラメントが分布していたために、矩形コイル断面内の電流密度を一様として磁場均一度を評価できた。しかし、REBCO パンケーキ・コイルでは、パンケーキ・コイル同士がわずかに離れていること、超伝導層が REBCO テープ内の極一部であることから、マグネット断面内を離散的に電流が流れていることになる。したがって、従来のような、均一電流密度法では高精度な磁場評価ができないので、全ての超伝導層を計算する必要がある。当然、計算時間が膨大なものとなり、実用的でない。そこで、図 2 に示すように、相似形のパンケーキ・コイルの磁場均一度を計算するときは、ルジャンドル級数展開の移動オペレータを利用することで、計算時間の高速化を図った。表 1 に示すように、計算時間はおよそ 6% になり、大幅な計算時間の短縮化に成功した。

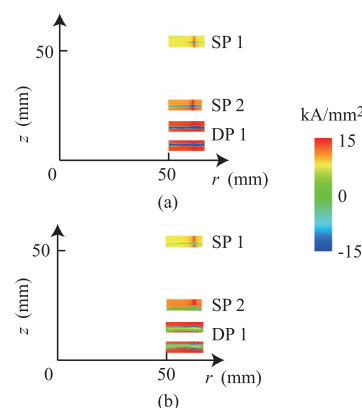


図 1 遮蔽電流解析結果
(a)従来法、(b)提案法

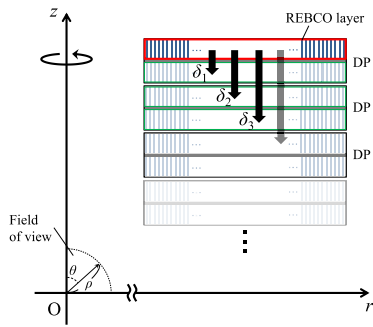


図2 提案計算手法

表1 計算時間の比較

Computation method	Computation time
All REBCO layers one by one	66 days & 14 hours
Proposed method	9 days & 15 hours

CPU: Xeon W5160, Memory: 8 GB.

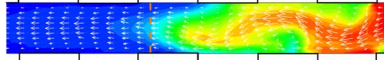


図3 磁性流体の流れシミュレーション

(3) 磁性流体による新しいシミングの基礎検討を実施するために、図3に示すような、流体シミュレーションを実施した。しかし、高磁場下での流体拡散はMRIやNMRで要するほどの速さで拡散できないことが明らかになった。また、磁化が大変に小さいことから、遮蔽電流による不正磁場を補正するほどの磁場が発生できないことも明らかになった。将来的には、微量およびゆっくり変化する磁場に関する補正は検討の価値があるかもしれないが、研究当初の遮蔽電流磁場の補正は達成できないことから、研究方針を若干修正した。以下に詳述するが、①遮蔽電流磁場の簡易計算法の開発および②Field Shaking法による遮蔽電流磁場の低減に関する研究を追加実施した。

(4) 不正磁場を発生させる遮蔽電流の簡易計算法を提案してきた。これまで、遮蔽電流の解析には、有限要素法に、薄膜近似法を併用し、さらに多重極展開法などで使用メモリ量の低減化を図らなければならなかった。このよう高度なシミュレーション手法は、世界でも数人の研究者しか実施できず、世界的に検討されている遮蔽電流磁場のシミング問題の解決を妨げていた。そこで、次世代MRI/NMRマグネットのシミングに貢献するために、等価回路による簡易な遮蔽電流磁場計算法を提案した。解析結果も良好であり、ホームページを利用して、解析手法を利用できるなど、同分野の研究者への貢献を図った。

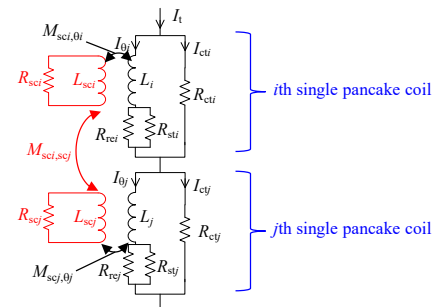


図4 等価回路による遮蔽電流解析結果手法

(5) NMR/MRIマグネット内に誘導される遮蔽電流が作る不正磁場を低減する方法として、インサート・コイルを上下に動かす手法を検討した。従来、遮蔽電流が作る磁場の影響を小さくするために、交流磁場を印加するField Shaking手法が提案されてきた。しかし、この手法では、交流磁場を発生させるための専用マグネットが必要となり、実用化には難しさが残っていた。さらに、第二世代高温超伝導体(REBCO)を使用した場合には、遮蔽磁場効果が大きいことから、従来のField Shaking手法は限定的な適応にとどまることが想定されていた。そこで、REBCOコイルを励磁後に物理的に移動させることで、遮蔽電流の作る不正磁場を減衰させることを試みた。その結果、十分な不正磁場軽減効果が確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8件)

- ① So Noguchi, Dongkeun Park, Yoonhyuch Choi, Jiho Lee, Yi Li, Philip C. Michael, Juan Bascunan, Seungyong Hahn, Yukikazu Iwasa, "Quench Analyses of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 29, Art no. 4301005, 2019.
DOI: 10.1109/TASC.2019.2903268
- ② So Noguchi, Ryosuke Miyao, Haruyoshi Okusa, Takahiro Tatsuta, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, "Turn-to-Turn Contact Resistance Measurement of No-Insulation REBCO Pancake Coils," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 29, Art no. 4601605, 2019.
DOI: 10.1109/TASC.2019.2903643
- ③ So Noguchi, Hiroshi Ueda, Seungyong Hahn, Atsushi Ishiyama, Yukikazu Iwasa, "A simple screening current-induced magnetic field estimation for REBCO pancake coils," Superconductor Science and Technology, 査読有, vol. 32, Art no. 045007, 2019.

DOI: 10.1088/1361-6668/aafe26

- ④ So Noguchi, Seungyong Hahn, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, Atsushi Ishiyama, “An Extended Thin Approximation Method to Simulate Screening Current Induced in REBCO Coils,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 54, Art no. 7201904, 2018.
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2752083
- ⑤ Jiho Lee, Dongkeun Park, Phillip C. Michael, So Noguchi, Juan Bascunan, Yukikazu Iwasa, “A Field-Shaking System to Reduce the Screening Current-Induced Field in the 800-MHz HTS Insert of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet: A Small-Model Study,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 28, Art no. 4301105, 2018.
DOI: 10.1109/TASC.2018.2803801
- ⑥ So Noguchi, Vlatko Cingoski, “Simulation of Screening Current Reduction Effect in REBCO Coils by External AC Magnetic Field,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 27, Art no. 4701405, 2017.
DOI: 10.1109/TASC.2017.2650864

[学会発表] (計 12 件)

- ① So Noguchi, Dongkeun Park, Seungyong Hahn, Yukikazu Iwasa, “A Simple Screening Current Simulation Method Using Equivalent Circuit Model for REBCO Pancake Coils,” 2018 Applied Superconductivity Conference, Seattle, USA, Nov. 2018.
- ② So Noguchi, Hiroshi Ueda, Seungyong Hahn, Atsushi Ishiyama “New Screening Current Simulation on REBCO Pancake Coils,” CHATS on Applied Superconductivity 2017, Sendai, Japan, Nov. 2017.
- ③ So Noguchi, Hiroshi Ueda, Seungyong Hahn, Atsushi Ishiyama, “A Facile Method to Estimate Screening Current-Induced Fields in REBCO Pancake Coils,” 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherland, Aug. 2017.
- ④ So Noguchi, Ryosuke Miyao, “An Extended Thin Approximation Method to Simulate Screening Current in REBCO Coils,” 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Daejeon, Republic of Korea, Jun. 2017.
- ⑤ So Noguchi, Ryosuke Miyao, Hajime Igarashi, Atsushi Ishiyama, “An Accelerated Computation Method of Legendre Polynomial Coefficients for MRI REBCO Magnet Design,” The 17th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, USA, Nov. 2016.
- ⑥ S. Noguchi, K. Monma, K. Katsumata, A. Ishiyama, “A Facile Stability Evaluation Method for NI REBCO Pancake Coils during Local Normal-state Transition,” 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, USA, Sep. 2016.
- ⑦ R. Miyao, S. Noguchi, H. Igarashi, “Fast and Accurate Computation Method of Magnetic Field Homogeneity for NMR/MRI REBCO Pancake Coils,” 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, USA, Sep. 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://hbd.ist.hokudai.ac.jp/scifweb/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：宮尾 亮介

ローマ字氏名：(MIYAO, Ryosuke)

※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、研究者個人に帰属されます。