

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360132

研究課題名（和文）高温超伝導マグネットによる高安定・高均一な高磁界発生のためのマイクロ電磁現象制御

研究課題名（英文）Control of electromagnetic phenomena in high T_c superconductor tapes to generate stable and uniform high magnetic fields by using high T_c superconductor magnets

研究代表者

雨宮 尚之 (AMEMIYA NAOYUKI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10222697

研究成果の概要（和文）：線材内部のマイクロ電磁現象、すなわち、磁化電流（遮蔽電流）によって発生される磁界が高温超伝導テープ線材で巻いた NMR マグネットや MRI マグネットにおいて磁界精度を損なってしまう。まず、磁化電流（遮蔽電流）が磁界精度に与える影響について実験的に調べるために、非ツイスト Bi-2223 テープ線材で小さなコイルを巻き、その発生磁界を測定した。コイルの励磁電流を変化させたとき、発生磁界には明確な履歴効果が見られたが、これは磁化電流（遮蔽電流）が磁界精度に与える影響の証左である。6 時間にわたってコイル電流を一定値に保持して発生磁界を測定したところ、発生磁界のドリフトが観測された。このドリフトは磁化の緩和に起因するものと考えられる。線材の磁化、すなわち、マイクロ電磁現象を制御して、これに起因する誤差磁界を低減する目的で、ツイスト Bi-2223 線材の適用を行った。すなわち、ツイスト Bi-2223 線材でコイルを巻き、その発生磁界を測定した。線材のツイストにより、磁界のヒステリシスは抑制され、また、磁界の安定度も向上した。また、電磁現象シミュレーションにより、マイクロ電磁現象を可視化しコイル発生磁界の安定性について検討した結果、マイクロ電磁現象を制御して高安定な磁界を発生するためには、線材の glass-liquid 転移磁束密度、glass-liquid 転移温度の向上が有効である可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：The shielding-current-generated magnetic field deteriorates the field quality in the NMR magnets or the MRI magnets. The magnetic field generated by a small coil wound with a Bi-2223 tape was measured to study the influence of the shielding-current-generated magnetic field on the field quality of the coil. When changing the excitation current, an apparent hysteretic behavior was observed: this is the evidence of the influence of the shielding-current-generated magnetic field, the magnetization, on the generated magnetic field. When the coil current was kept at constant for six hours, a drift was observed in the measured magnetic field. This drift should be caused by the relaxation of the tape magnetization. We considered the application of a twisted Bi-2223 tape to reduce the micro-scale electromagnetic phenomena, that is, the shielding-current-generated magnetic field, to improve the field quality. Another coil was wound using a twisted Bi-2223 tape, and the magnetic field hysteresis and the stability of the magnetic field were studied experimentally. As compared to the coil wound with the non-twisted Bi-2223 tape, the coil wound with the twisted Bi-2223 tape showed a smaller hysteresis in the generated magnetic field and showed a better temporal stability of the magnetic field. Through numerical electromagnetic field simulation, we visualized the micro-scale electromagnetic phenomena and studied the field stability of magnets. Increase in the glass-liquid transition magnetic field and increase in the glass-liquid transition temperature of high T_c superconductor tapes might be an approach to control the micro-scale electromagnetic phenomena and to improve the field stability of magnets.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	0	0	0
2013年度	0	0	0
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導マグネット・高温超伝導・NMR/MRI・電磁現象・ツイスト・磁界精度・遮蔽電流・残留磁化

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導テープ線材を用いて高磁界発生用マグネットを作ることができれば、生命科学・分析化学・創薬などの分野で切望されている超高分解能 NMR 分析装置やコンパクト NMR 分析装置、医療分野で期待されている開放型 MRI 断層撮像装置や液体ヘリウムフリーMRI断層撮像装置などが実現できる。しかし、高温超伝導テープ線材は、その幅広形状故磁化が大きく、この磁化、現象としては線材内のマイクロ電磁現象が誤差磁界を発生させ、マグネット発生磁界の安定性や均一性を損なうと考えられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、線材内のマイクロ電磁現象による誤差磁界発生の検証・解明と、線材アーキテクチャ・電磁特性の最適デザインによる、精密高磁界（高安定で高均一な高磁界）発生のためのマイクロ電磁現象制御法の提案である。

3. 研究の方法

実験的アプローチと数値解析による理論的アプローチを組み合わせ研究を行った。

すなわち、Bi-2223 テープ線材によってコイルを試作し、このコイルを液体窒素で冷却し高安定電源で励磁し、コイル中心における磁界をホールセンサで測定した。また、ファラデーの電磁誘導の法則とビオ・サバールの法則を組み合わせ得られた支配方程式に超伝導線材の非線形導電特性をべき乗則電界－電流密度特性やパーコレーション遷移モデルによる電界－電流密度特性を組み込んだ構成方程式を組み合わせ数値電磁界解析により、マイクロ電磁現象をシミュレートし、これが発生する誤差磁界の理論的評価を行った。パーコレーション遷移モデルにより電界－電流密度特性を表現するにあたっては、実際に短尺の高温超伝導テープ線材の通

電特性をさまざまな条件のもとで測定し同モデルの諸パラメータの決定を行った。

4. 研究成果

(1) Bi-2223 線材コイルにおけるマイクロ電磁現象による誤差磁界発生の検証・解明とその制御手法の提案

まず、表 1 に諸元を示した非ツイスト線材 Type-S で巻いたコイル NT (諸元を表 2 に示す) に対して、0 A→+25 A→0 A→-25 A→0 A→+25 A と電流を通電し磁界を測定した。この実験における電流に対する磁界の値を示したものが図 1、各電流値における磁界の平均値に対する偏差を電流値に対してプロットしたものが図 2 である。図 2 は図 1 の拡大図に相当する。これらの図を見ると、磁界にはヒステリシスがあることがわかるが、これは線材の磁化、すなわち線材内部のマイクロ電磁現象の影響である。

次に、コイル NT に 3 時間電流を流さない状態で放置し、その後、6 時間電流を流し、その後、電流を遮断し 6 時間以上放置した。このとき、電流を通電した 6 時間の磁界の時間変化を図 3 に示す。磁界は緩やかにドリフトしているが、これは線材内部の電流分布が緩やかに変化している、すなわち磁化が緩和している影響であると考えられる。

次に、同様な 2 種類の実験を、表 1 に諸元を示したツイスト線材 Type-AC で巻いたコイル T で行った。図 4 にコイル T の磁界のヒステリシスを、図 5 にコイル T の磁界の時間変化を示す。

図 2 と図 4 を比べるとツイスト線材 Type-AC で巻いたコイル T のヒステリシスが明らかに小さく、図 3 と図 5 を比べるとコイル T の方が磁界のドリフトが小さい。これらのことから、コイル NT における磁界のヒステリシスやドリフトは、フィラメント間を流れる結合電流に大きく影響され、結合電流を速やかに減衰させることができるツイス

ト線材で巻いたコイル T では、マイクロ電磁現象が磁界精度に与える影響は相対的に小さいと考えられる。すなわち、Bi-2223 テープ線材においては、ツイストがマイクロ電磁現象を制御し高安定・高均一な磁界を発生するためのひとつの方法として提案できる。

表 1 線材の諸元

名称	Type-S	Type-AC
幅	2.64 mm	2.64 mm
厚さ	0.186 mm	0.205 mm
銀比	2.0	2.7
フィラメント数	121	55
撚りピッチ	N/A	10 mm
臨界電流	75 A	65 A
n 値	17	16

表 2 コイルの諸元

	コイル NT	コイル T
線材	Type-S	Type-AC
ターン数	370	356
ダブルパンケキ数	10	10
高さ	63 mm	62 mm
パンケキ内直径	70 mm	70 mm
パンケキ外直径	80 mm	80 mm
臨界電流	33 A	30 A

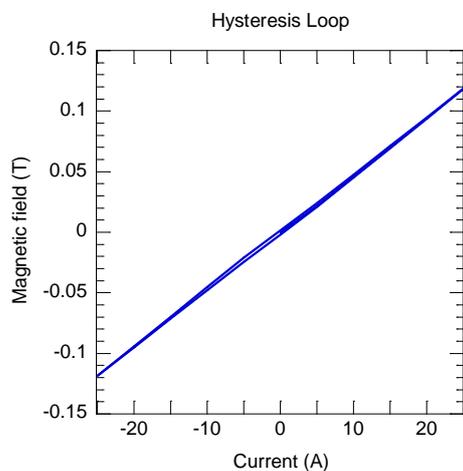


図 1 コイル NT の磁界のヒステリシス

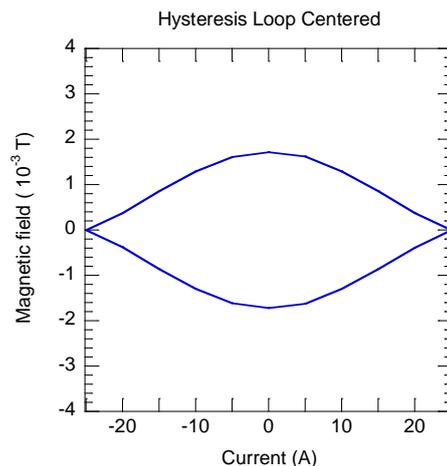


図 2 コイル NT の磁界のヒステリシス (拡大図)

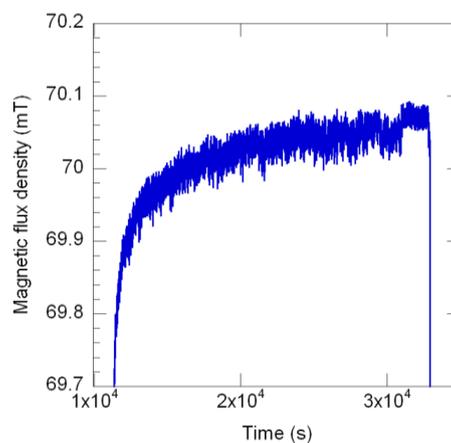


図 3 コイル NT の磁界の時間変化

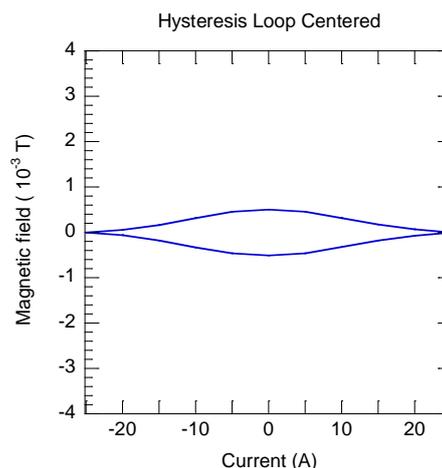


図 4 コイル T の磁界のヒステリシス (拡大図)

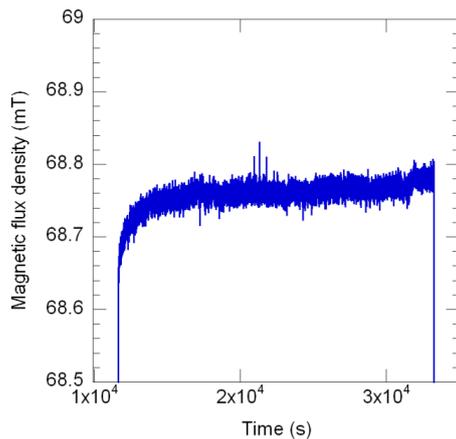


図5 コイル T の磁界の時間変化

(2) ミクロ電磁現象シミュレーションによる誤差磁界の理論的評価

Bi-2223 線材の通電特性を測定し、その結果をもとにパーコレーション遷移モデルを用いて線材の通電特性を定式化した。これを用いた電磁現象シミュレーションを行ったところ、時間経過に伴う線材内部の電流分布の変化、すなわち、ミクロ電磁現象を可視化することができた。これをもとに、コイル発生磁界の安定性などについて検討し、ミクロ電磁現象を制御して高安定な磁界を発生するためには、線材の glass-liquid 転移磁束密度、glass-liquid 転移温度の向上が有効である可能性を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. N. Amemiya, K. Takahashi, N. Okada, T. Nakamura, T. Ogitsu, T. Kurusu, M. Ono, M. Kodaira, and K. Noda, Multi-pole components of magnetic field in dipole magnets wound with high Tc superconductor tape and feasibility of their accelerator applications, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 20, No. 3, 2010, pp. 364-367,

[学会発表] (計 5 件)

1. N. Amemiya, A. Morishige, and T. Nakamura, Reduction of shielding-current-generated magnetic field by using twisted Bi-2223 multifilamentary tape, 22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22), 2011/9/13, Marseilles (France)

2. 李全, 雨宮尚之, 中村武恒, Improved stability of magnetic field in superconductor coils by applying twisted Bi-2223 multifilamentary tapes, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 2011/11/10, 金沢歌劇座 (金沢市)
3. N. Amemiya, N. Okada, A. Morishige, T. Nakamura, and T. Ogitsu, Influence of Shielding Current in HTS Tape on Field Quality of Magnets, The 14th US-Japan Workshop on Advanced Superconductors, 2009/12/14, 国立強磁場研究所 (Tallahassee, アメリカ合衆国)
4. N. Amemiya, N. Okada, T. Nakamura, T. Ogitsu, M. Kodaira, M. Ono, T. Orikasa, and K. Noda, Multi-Pole Magnetic Field Components in High Tc Superconducting Dipole Magnets and Feasibility of Their Accelerator Applications, 21st International Conference on Magnet Technology, 2009/10/23, Hefei Municipal Government's office (合肥、中国)
5. A. Morishige, T. Nakamura, N. Amemiya, K. Akachi, and H. Oyama, Influence of Non-Linear Electromagnetic Behavior of Bi-2223 Superconductor Tapes on Residual Magnetization of Double-Pancake Coil, 21st International Conference on Magnet Technology, 2009/10/22, Hefei Municipal Government's office (合肥、中国)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 尚之 (AMEMIYA NAOYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10222697

(2) 研究分担者

中村 武恒 (NAKAMURA TAKETSUNE)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30303861