

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18758

研究課題名(和文)非破壊パルス強磁場磁束濃縮法による超100T高感度磁化測定

研究課題名(英文)High sensitive magnetization measurements beyond 100 T using non-destructive flux concentration of pulsed high magnetic fields

研究代表者

鳴海 康雄(Narumi, Yasuo)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50360615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、非破壊パルス電磁石を用いて磁束を濃縮する新しい磁場発生技術確立し、人類が未だ成し得ていない電磁石の破壊・変形を伴うことのない100テスラの磁場発生と、その磁場下での磁化測定を実現する事である。パルス磁場下の金属には、磁束の浸入を妨げるための遮蔽電流が誘起される。この時、排斥された磁束が残された非金属領域に集中すると、元の磁場強度を上回る局所的強磁場の実現が期待できる。この考えをもとにして無酸素銅製の治具を作成し、パルス磁場中に挿入する実験を行ったところ、約5テスラの初期磁場が約10テスラまで増加する、約200パーセントの磁場増強が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子や原子核のスピンに直接作用する磁場は、物理現象を解明する基礎研究から、磁性材料や電子デバイスを制御するための産業応用に至る、様々な分野で必要不可欠な外場である。磁場発生技術の長い歴史の中で、非破壊パルス磁場による100テスラの更新は多年の悲願であり、新しい磁場発生技術の開発が切望されていた。本研究で示した非破壊磁束濃縮法の実現はその状況に風穴を開ける重要な成果である。また、超強磁場を必要としない多くの磁場発生装置の小型化にも貢献出来るため、社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to establish the new magnetic-field-generation method for magnetization measurements over 100 tesla which is not realized by a non-destructive pulse magnet. Magnetic flux dose not penetrate high-conductive materials due to shielding currents under pulsed magnetic fields. As a result, a part of the magnetic flux is condensed inside a remanent non-conductive area. Based on this idea, we constructed a pulse magnet equipped with a oxygen-free-copper insert and succeeded in generating a magnetic field of 10 tesla which was double the original magnetic field of 5 tesla without the copper insert.

研究分野：強磁場物性

キーワード：パルス強磁場 100テスラ 磁束濃縮法 非破壊 磁化測定

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

磁場は電子や原子核が持つスピンを精密に制御できる基本的な外場であり、NMR を利用した画像診断用超伝導磁石や大型加速器で荷電粒子の軌道を変える偏向電磁石など、基礎から応用のあらゆる分野で磁場が利用されている。基礎・応用の枠を越えた磁場発生技術の進化の流れの中において、100 テスラという磁場はその一つの到達点であり、また越えるべき大きな壁にもなっている。磁場発生技術は大別すると、超伝導技術を含む定常磁場と、瞬間的な大電流印加によるパルス磁場の 2 つがあり、後者はさらにコイルの破壊を伴うか否かで破壊型と非破壊型に分類される。発生する磁場はコイルに流れる電流量に比例する。また、コイルに働くローレンツ力は電流と磁場の積で決まる。つまり、ローレンツ力は印加電流の 2 乗で大きくなり、100 テスラ領域において、現代の材料開発技術が実現しうる高強度導体の機械的強度と拮抗する大きさになる。非破壊型パルス磁場の上限が 100 テスラとなっている主な要因がここにある。

2. 研究の目的

前述の理由から、材料強度の限界を超えた応力が作用する磁場領域を非破壊で実現するには、電流量を増やすことで得られる従来の方法とは全く異なる磁場発生技術の開発が必要となる。本研究の目的は、非破壊パルス電磁石を用いて磁束を濃縮する、これまでに無い全く新しい磁場発生技術を確立し、人類が未だ成し得ていない電磁石の破壊・変形を伴うことの無い 100 テスラの磁場発生と、その磁場下での磁化測定を実現する事である。

3. 研究の方法

磁場の強さとは、空間辺りの磁力線密度どれだけ高いかで定義される。破壊型磁場発生法の最高峰である電磁濃縮法では、パルス磁場中の金属表面に磁束の浸入を妨げる渦電流が誘起される仕組みを利用して、種磁場を内包した金属パイプを高速で収縮する事により磁束の閉じ込めを実現し、実験室系で世界最高となる 1200 テスラの磁場発生が報告されている [1]。本研究では、変動磁場中にバルク金属が配置された場合、金属の変形が起こらなくとも、磁力線は伝導度の高い金属を避けるように分布することに注目している。この時、磁束の逃げ道となる非金属領域を適切に設けることで、元の磁束密度を上回る局所的強磁場領域の実現が期待される。実は、この考えのもとになる現象を多くの人が知っている。超伝導体が示す完全反磁性である。実際に、超伝導体を用いた磁場の閉じ込め作用を示す実験も行われている [2]。ここで問題になるのが、超伝導現象に特有な臨界磁場の存在である。第 2 種超伝導体では、下部臨界磁場以上で超伝導体内部への磁束の浸入が始まり、上部臨界磁場では超伝導が消失し、磁束の排斥作用は完全に無くなる。つまり、超伝導体固有の物性によって、磁場閉じ込めが期待出来る磁場に上限が存在する。本研究の鍵となるのは、磁場の排斥に単純金属における渦電流を利用している点にある。この現象には、特定の磁場の閾値が存在しないため、高い磁場領域でも磁場の排斥効果が期待出来る。このようなアイデアのもとに、磁束を局所領域に整流する金属製の治具“磁束濃縮器(FC)”を作成し、パルス電磁石に挿入して閉じ込め効果を検証する実験を行った。図 1 に実験装置の概略図を示す。磁束の閉じ込め効果は、金属の伝導度と印加磁場の周期に大きく影響される。そのため、FC の作成には伝導度の高い無酸素銅を使用した。形状は、中心付近に磁束が集中するように、中心に穴があいたテーパ状の構造となっている。また、誘起される渦電流が穴に対して閉ループ

とならないように、FC を縦に切断するスリットを設けている。さらに、磁場の周期に対応するパルス幅が短くなるように、インダクタンスの小さい小型のパルス電磁石を新規に製作して実験を行った。

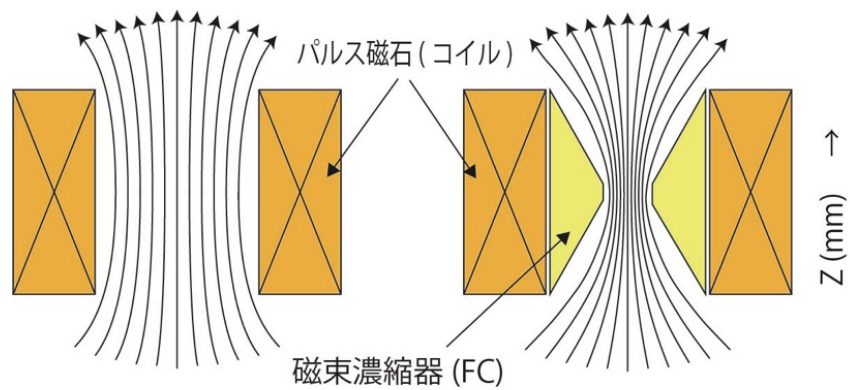


図1 パルス電磁石と無酸素銅製磁束濃縮器 (FC) の配置概略図

4. 研究成果

図2に、キャパシタンス $C = 1.25 \text{ mF}$ のコンデンサ電源とインダクタンス $L = 12.3 \text{ } \mu\text{H}$ のパルス電磁石を用いて行った磁束濃縮実験の結果を示す。図2(a)は磁場中心部における発生磁場の時間プロファイルで、FCの挿入前に約500マイクロ秒のパルス幅で最大5テスラの磁場を発生している。一方、FCを挿入した場合にはパルス幅が約400マイクロ秒と短くなり、最大磁場が約10テスラと約200%の磁束濃縮効果が得られることがわかった。この実験ではパルス電磁石とFCの両方が液体窒素により約マイナス200ケルビンまで冷却されており、予備的に行った室温での実験では濃縮率は約140%であったことから、FCの高い導電性が濃縮率の向上に重要な役割を果たしていることがわかる。また、交流電源を用いた外部磁場の周波数依存性の実験では、周波数が高いほど濃縮効果が高い事も確認しており、渦電流による遮蔽効果が重要であることがこの実験からもわかる。図2(b)はパルス電磁石の軸方向に沿った磁場の空間プロファイルである。この結果から、FCにいた穴が中心で狭くなるテーパ構造であることを反映して、中心付近で磁束が顕著に濃縮されていることを確認した。図2の実験で用いた磁場空間に対するFCの占有率は97%(コイル内径19φに対してFC内径3.5φ)である。さらに、占有率が99%(内径1.5φ)のFCを用いると、液体窒素冷却時に約300%の高い濃縮率が得られる事も確認しており、元のコイル内径を相対的により大きくすることで、更なる濃縮率の向上も期待できる。一方で、元磁場を約20テスラに上げて実験を行うと濃縮率は約150%となり、磁場強度の増加と共に濃縮率が低下していく振る舞いが確認された。この現象は、高磁場域で誘起される渦電流が大きくなることで、ジュール熱によりFCの温度が上昇し、導電性が悪化した結果、磁束の排斥効果も低下

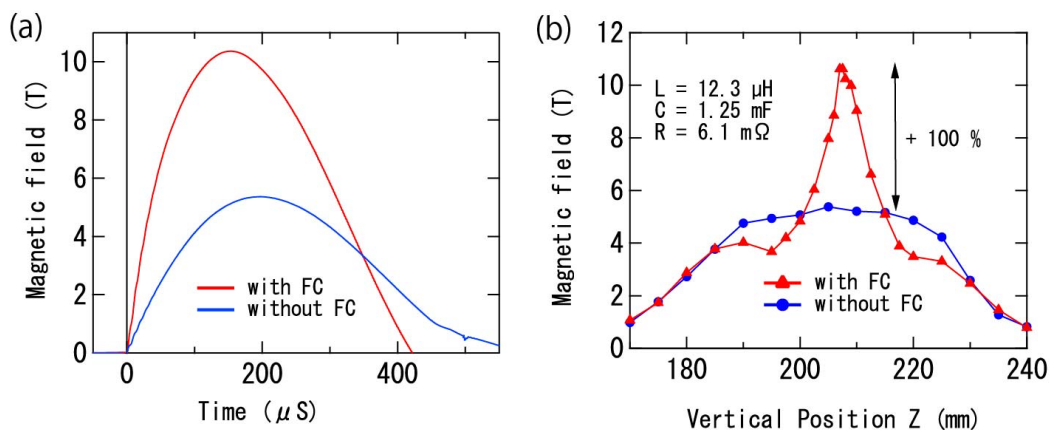


図2 発生磁場の時間プロファイル (a) と空間分布 (b) に対する磁束濃縮効果

したことが原因であると考えている。

本研究では、パルス磁場によって磁束の濃縮が自発的に起こる現象を世界で初めて観測する事に成功した。研究期間内に目標であった非破壊 100 テスラに到達することは出来なかったが、それに至る新しい手法を示したという点で、画期的な成果が得られたと考えている。現在、これまでに得られた結果を理論的にサポートするための有限要素法を用いた数値解析を進めており、その結果をフィードバックして磁束濃縮器の構造の最適化を図ることで、より高磁場を実現する研究を継続して進めていく予定である。

[1] D. Nakamura et al., *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 095106 (2018).

[2] T. Kiyoshi et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 2174 (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Song Yuxin, Tanaka Junya, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki, Fukuda Takashi, Kakeshita Tomoyuki, Sugiyama Masaaki, Terai Tomoyuki	4. 巻 62
2. 論文標題 Incubation Time of Occurrence of Magnetic Field-Induced Martensitic Transformation in an Fe-24.8Ni-3.7Mn(at%) Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1614 ~ 1618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021088	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 Yoshida Hiroyuki K., Noguchi Naoya, Ishii Yuto, Oda Migaku, Chen Jie, Yamaura Kazunari, Yamashita Satoshi, Nakazawa Yasuhiro, Kida Takanori, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetic Properties of S = 1/2 Distorted Kagome Antiferromagnet CdCu ₃ (OH)6Cl ₂ with Low-Symmetry Orbital Arrangement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044714 ~ 044714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.044714	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 Ishii Y., Narumi Y., Matsushita Y., Oda M., Kida T., Hagiwara M., Yoshida H. K.	4. 巻 103
2. 論文標題 Field-induced successive phase transitions in the J1-J2 buckled honeycomb antiferromagnet Cs ₃ Fe ₂ Cl ₉	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.104433	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 Takeuchi Tetsuya, Tahara Tíme, Kida Takanori, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki, Kindo Koichi, Iha Wataru, Ashitomi Yousuke, Yara Tomoyuki, Nakashima Miho, Amako Yasushi, Hedo Masato, Nakama Takao, Onuki Yoshichika	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetization Process in EuCo ₂ P ₂ and EuT ₂ Ge ₂ (T: transition metal): Comparison of Experiment and Theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034709 ~ 034709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.034709	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 Oyama Kohei, Mitsuda Akihiro, Wada Hirofumi, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki, Takahashi Ryunosuke, Wadati Hiroki, Setoyama Hiroyuki, Kindo Koichi	4. 巻 89
2. 論文標題 Ga Substitution Effect on the Valence Transition of Eu ₂ Pt ₆ Al ₁₅	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114713 ~ 114713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114713	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 Tahara Time, Kida Takanori, Narumi Yasuo, Takeuchi Tetsuya, Nakamura Hiroyuki, Miyake Kazumasa, Kindo Koichi, Hagiwara Masayuki	4. 巻 89
2. 論文標題 Vanishment of Metamagnetic Transition in the Metal-to-Insulator Transition Compound BaVS ₃ under High Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064711 ~ 064711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.064711	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8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 松崎大亮, 鳴海康雄, 竹内徹也, 和氣剛, 中村裕之, 萩原政幸
2. 発表標題 4Heを用いた1 K以下極低温におけるパルス強磁場磁化測定装置開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳴海康雄, 佐藤和樹, 松崎大亮, 竹内徹也, 和氣剛, 中村裕之, 山下智史, 中澤康浩, 冬広明, 福田貴光, 橘高俊一郎, 榊原俊朗, 松尾晶, 金道浩一, 萩原政幸
2. 発表標題 ダイヤモンド格子磁性体MnSc ₂ S ₄ の磁場-温度相図
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳴海康雄
2. 発表標題 ユーザーファシリティーとしてのパルス強磁場
3. 学会等名 強磁場コラボラトリー2030シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松崎大亮, 佐藤和樹, 鳴海康雄, 竹内徹也, 萩原政幸
2. 発表標題 パルス強磁場下における1K以下極低温装置開発
3. 学会等名 物性研短期研究会 / 強磁場科学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松崎大亮, 佐藤和樹, 鳴海康雄, 竹内徹也, 萩原政幸
2. 発表標題 4Heを用いた1 K以下極低温におけるパルス強磁場磁化測定装置開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Narumi and M. Hagiwara
2. 発表標題 Non-Destructive Pulsed High Magnetic Field Generation by means of a Flux Compression
3. 学会等名 The 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳴海康雄, 萩原政幸
2. 発表標題 非破壊パルス強磁場磁束濃縮法II
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳴海康雄, 萩原政幸
2. 発表標題 非破壊パルス強磁場磁束濃縮法
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017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