様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　 ６ 月 １５ 日現在

機関番号：３２２０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：２０Ｋ０４４４９

研究課題名（和文）超伝導モーターの軽量化を目指した着磁システムの検討

研究課題名（英文）Consideration of magnetizing system aiming for light-weighting of superconducting motor

研究代表者
横山　和哉（YOKOYAMA, Kazuya）

足利大学・工学部・教授

研究者番号：６０３１３５５８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,900,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導バルク磁石の回転機への応用を目指して，パルス磁化法で大きな磁力を発生させると同時に，装置の小型・軽量化について検討した。パルス着磁の際にバルク体により長く磁場を曝すために用いられる軟鉄ヨークに注目し，形状を従来の円柱型に加え，円筒型とクロス型を新たに製作して着磁特性を評価した。温度及び印加磁場の大きさを変えてパルス着磁実験を行い，単位重量当たりの総磁束量を比較した結果，クロス型で円柱型の2倍の値となった。さらに，パルス着磁システムの三次元数値解析モデルを作成し，実験と同条件の数値解析を行った。数値解析の結果は実験結果を再現できており，また着磁プロセスの可視化にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
脱炭素社会のニーズから，大型風力発電の導入，航空機や大型船舶の推進装置の電動化などが検討されている。これらの実用化に向けては装置の小型・軽量化が重要な課題であり，小型な装置で永久磁石や電磁石を超える強い磁場を発生できる超伝導バルク磁石は有効な選択肢の一つである。磁化方法は，回転機の電機子巻線を用いて短時間で着磁できるパルス磁化法が有効な手法であるが，試料の性能を十分引き出すことが難しい問題がある。本研究は磁化装置の一部である軟鉄ヨークの形状を変更するという簡便・安価な手法であり，実用化には有効な手法であると考えられる。また，作成した数値解析モデルを着磁方法の改善等に用いることができる。

研究成果の概要（英文）：Aiming to apply superconducting bulk magnets to rotating machines, we study to generate a strong magnetic field by pulsed-field magnetization (PFM) and to reduce the size and weight of the device at the same time. We focused on soft-iron yokes, which were used to expose the bulk to a magnetic field at longer time, and the magnetizing properties when using the conventional disk-shaped yoke and newly fabricated ring- and cross-shaped yokes were evaluated. PFM experiments were carried out by changing the temperatures and the amplitude of applied field. The total magnetic flux per unit weight of the cross-shaped yoke was twice that of the disk-shaped one. Moreover, a three-dimensional numerical model of our bulk PFM system was created and numerical analysis was performed under the same conditions as the experiment. The numerical results reproduced the experimental results, and the magnetization process was successfully visualized.

研究分野：応用超伝導

キーワード：超伝導バルク体　回転機応用　パルス着磁　軟鉄ヨーク　三次元数値解析

※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

SDGs やカーボンニュートラルへの対応として，大型風力発電の導入，航空機や大型船舶の推進装置の電動化などが検討されており，これらの応用には発電機やモータの小型・軽量化が重要な課題である。そこで，超伝導技術を用いることにより，高磁場及び大電流の発生が可能となり，特に超伝導バルク磁石は小型冷凍機で高温超伝導バルク体を冷却し，着磁することで，冷却し続ける限り疑似的に永久磁石として使用することができる。また，着磁方法としては，電機子コイルを用いて短時間で着磁できるパルス磁化法が有効であると考えられる。一方で，同手法では試料に磁場を曝す時間が短いため，発生磁場が小さくなる。パルス磁化法で発生磁場を改善する手法として，試料の温度や印加磁場の大きさを変えながら複数回磁場を印加する手法や，着磁電源のキャパシタンス及び着磁コイルのインダクタンスを変更することでパルス磁場の時定数を変更する手法が提案されてきた。後者はロングパルス法と呼ばれ，着磁特性の改善に有効であるが，装置の変更を伴うためコストがかかってしまう。そこで，本研究ではバルク体により長く磁場を曝すために用いられる軟鉄ヨークに注目し，その形状や大きさを変更することにより，捕捉磁場を維持しつつ装置を軽量化することを検討した。

２．研究の目的

超伝導バルク磁石は小型・安価な装置で，既存の永久磁石や電磁石の限界である 2 テスラを超える磁場を容易に発生することができる。また，着磁方法としてパルス磁化法を採用することで，磁場中冷却法で必要となる超伝導マグネットを使用せず，汎用のコンデンサバンクと銅コイルのみで着磁することができる。一方で，パルス磁化法による捕捉磁場は磁場中冷却法のそれに比べ半分程度であり，捕捉磁場の改善が必要である。本研究は，パルス磁化法の際に用いられる軟鉄ヨークに注目し，その形状を従来の円柱型から，円筒型，クロス型に変更した時の着磁特性を評価する。また，これまでは実際に軟鉄ヨークを製作し，パルス着磁実験を行うことにより着磁特性を評価してきたが，経済的・時間的な問題から数値解析を導入し，理論的な検討を行った。

３．研究の方法

(1)実験方法

図 1 に，パルス着磁コイルを磁極に取り付けたバルク磁石システムの概略図を示す。厚さ 2 mm の SUS316L リングで補強した φ60×20 mm の GdBCO バルク体（日本製鉄製）を，2 段 GM 冷凍機（RM20，アルバック製）のコールドヘッドの先端に接続したサンプルステージに配置する。なお，バルク体とサンプルステージに間には，φ64×20 mm のパーメンジュールディスクを配置している。バルク体及びサンプルステージをスーパーインシュレーションで覆った後，真空チャンバを取り付ける。試料を冷凍機で冷却した後，温調器を用いて 20，30，40，50 K に調整する。次に，純鉄製のヨークを固定した着磁コイルを磁極に取り付ける。ここで，軟鉄ヨークには，表 1 に示す厚さ 47 mm の円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いた。各温度において 3.9～6.2 T のパルス磁場（立上時間：10 ms，全パルス幅：100 ms）を 1 回印加し，試料表面中央に貼り付けたホールセンサ（BHT-921，F.W.BELL 製），及びセルノックス抵抗温度計（CX-1030-SD-HT-1.4L/J，Lakeshore 製）により，着磁中の磁束密度及び温度の時間変化を測定した。磁場印加後，着磁コイルを取り外し，3 次元ホールセンサ(HGT-3030，LakeShore)を用いて磁極表面（試料表面から約 4 mm）の磁束密度分布を測定した。また，実測データから総磁束量を算出した。

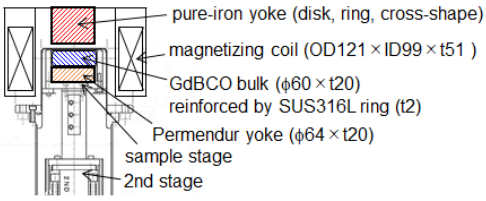
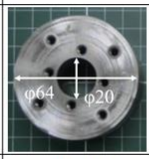
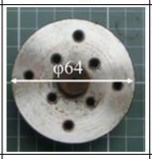
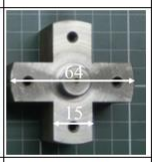


図 1　軟鉄ヨークを固定した着磁コイルを取り付けた超伝導バルク磁石装置の概略

表 1　超伝導バルク磁石装置の概略

shape	disk	ring	cross
photo & size			
weight	1.17 kg	1.05 kg	0.78 kg

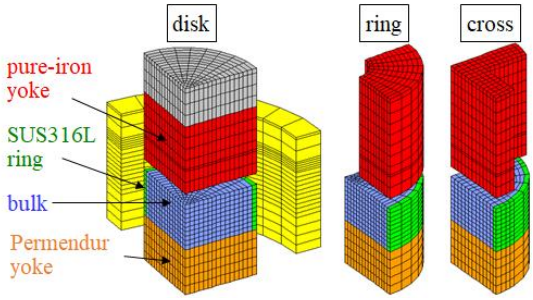


図 2　円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いた場合のパルス着磁システム（図 1）の三次元解析モデル

(2)解析方法

図 2 に図 1 示したパルス着磁システムの

三次元解析モデルを示す。解析において，バルク体の非線形電気特性には n 値モデル

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c}\right)^2 \qquad (1)$$

ここで，E_0は超伝導体の臨界電流密度J_cを定義する基準値である。臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデル

$$J_c(B,T) = \frac{J_{c0}(T)}{\left(1+\frac{B}{B_0}\right)^{\alpha}} \qquad (2)$$

ここで，B_0，αは実測値から得られるフィッティングパラメータである。

$$J_{c0}(T) = J_{cn}\left[1-\left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right]^m \qquad (3)$$

ここで，J_{cn}は $T=0$ における電流密度である。
をそれぞれ用いた。
また，熱過渡方程式には

$$\rho \cdot C\frac{dT}{dt} = \nabla\cdot(\kappa\nabla T) + Q \qquad (4)$$

ここで，ρは密度，Cは比熱，κは熱伝導率，Qは $Q=E\cdot J$で与えられる熱源である。
を用いた。

バルク体は結晶成長過程においてピン止め点となる 211 相が多く集まる結晶成長境界（Growth Sector Boundary，GSB）とその間の領域である結晶成長領域（GS Region，GSR）が形成され，超伝導特性は GSR に比べて GSB の方が高い。数値解析では，バルク体に GSB と GSR の 2 つの領域を持つモデルを作成した。表 2 に解析に用いたパラメータを示す。J_{cn}は使用するバルク体の着磁実験の結果から GSB では1.0×10^9（A），GSR では0.8×10^9（A）とした。なお，解析ソフトには，有限要素法による動磁場の過渡応答解析ソフト Photo-Eddy /Thermo（PHOTON）を用いた。

表 2　解析に用いたパラメータ

Parameter	Description	Value
E_0 (V)	Characteristic electric field	1×10^{-4}
N	n value in E-J power low	21
B_0 (T)	Material–dependent constant	0.5
α	Material–dependent constant	1
J_{cn} (A)	Local magnetic flux extrapolated to T=0 at GSB and GSR	1.0×10^9 0.8×10^9
T_c (K)	Critical temperature	93
ρ (kg/m3)	Mass density	5.9×10^{-3}
κ_{ab}, κ_c (W/m/K)	Thermal conductivity of bulk along ab-plane, and c-axis	20, 4
T_{op} (K)	Operation (initial) temperature	20
I_{app} (A)	Input current of the exiting coil	3.9×10^3

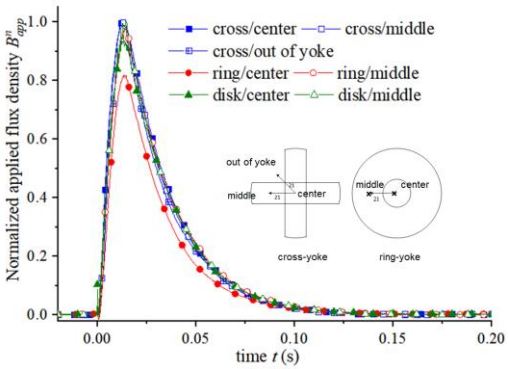


図 3　円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いた場合のパルス波形の比較

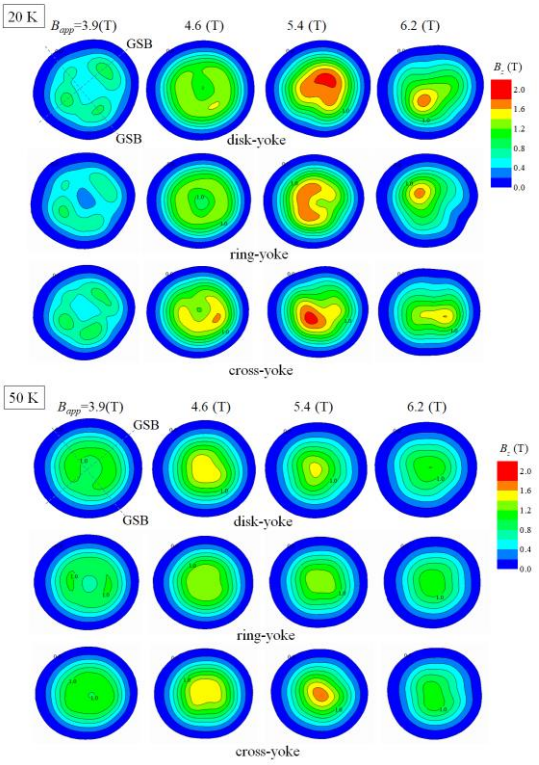


図 4　円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いた場合の磁束密度分布の比較

４．研究成果

(1) 着磁実験の結果

図 3 に円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いた場合のパルス波形の比較を示す。円筒型の中央部分において，他に比べて約 80%の値となっている。これは，中央部分に軟鉄がないことに起因している。

図 4 に 20 及び 50 K における磁極表面における磁束密度分布を示す。いずれの温度においても，印加磁場 3.9 T では試料中央まで磁束は侵入しておらず，特に円筒型ヨークでは中央の値が最も低くなっている。また，その他の印加磁場でも円筒型の捕捉磁場が小さいことがわかる。円柱型とクロス型比較すると，ほぼ同等の磁場分布になっている。

図 5 に 20～50 K における磁極表面における最大磁束密度及び総磁束量を示す。いずれの温度においても，円筒型の捕捉磁場が最も小さく，クロス型は円柱型よりも若干多くなっている。円筒型の値が小さい原因としては，中央部の印加磁場が小さいためである。

図 6 に単位重量当たりの総磁束量を比較した結果を示す。これらの値は，図 5 の総磁束量の値を，それぞれのヨークの重量で割った値である。円柱型及び円筒型ヨークはほぼ同じ値となっているが，クロス型ヨークでは，円柱型ヨークの約 2 倍の値となっている。

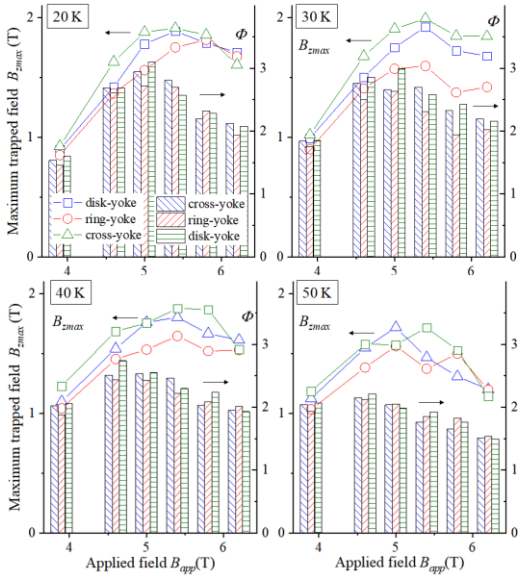


図 5　最大磁束密度及び総磁束量の比較

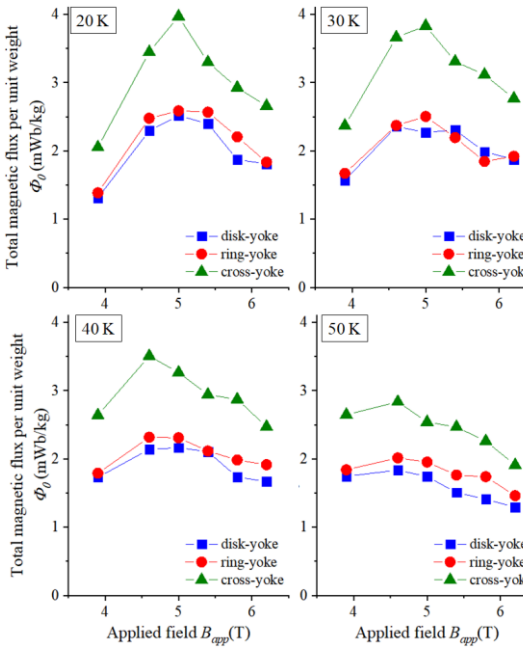


図 6　単位重量当たりの総磁束量の比較

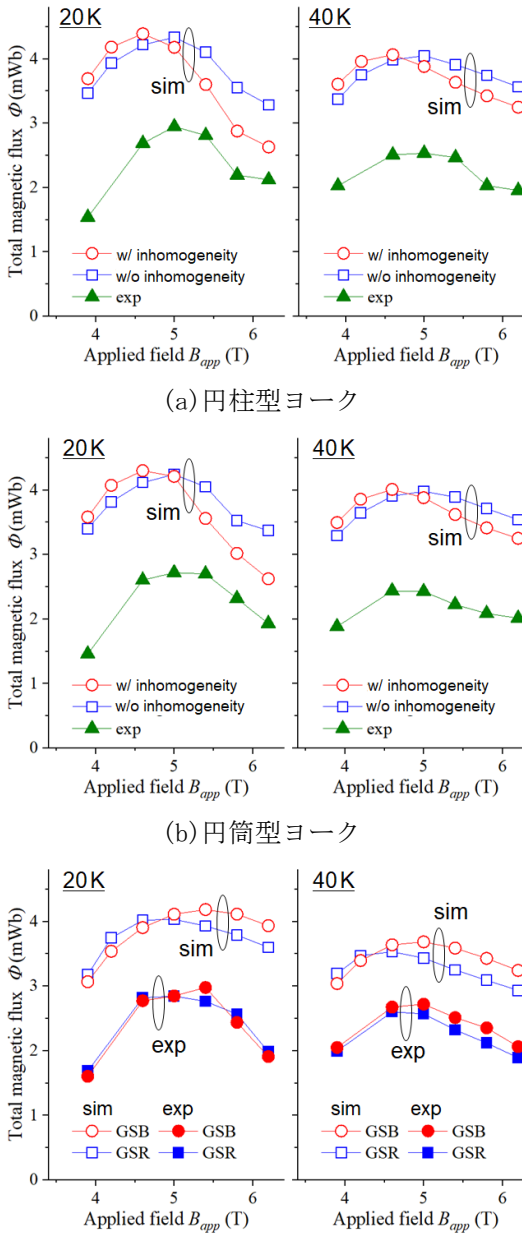


図 7　総磁束量の印加磁場依存性の比較

(2) 数値解析の結果

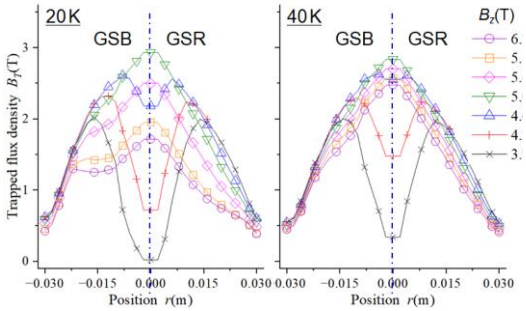
図 7 に円柱型，円筒型，クロス型ヨークにおける総磁束量の印加磁場依存性の，GSB と GSR の不均一性を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果を示す。さらに，比較のために実験結果を合わせて示す。クロス型ヨークにおいては，軟鉄部分を GSB に配置した場合と GSR に配置した場合について比較した。いずれの結果においても，解析結果は実験結果の約 2 倍の値となっているが，印加磁場と捕捉磁場の変化の傾向は一致している。絶対値が異なっているのは，実験では軟鉄ヨークを取り外した後，磁極表面の磁束密度分布を測定しているが，数値解析はソフトウェアの制約上，軟鉄ヨークを取り外さない状態での磁束密度分布となっているためである。

図 8 に試料の GSB 及び GSR における一次元磁束密度分布を示す。図の左半面が GSB 上，右半分が GSR 上の分布となっている。GSB の方が J_c が高いため，分布の傾きが大きくなっている。円柱型，円筒型，クロス型（GSB 配置）及びクロス型（GSR 配置）を比較すると，クロス型（GSB 配置）の捕捉磁場が最も大きく，円筒型が最も小さい値となっている。

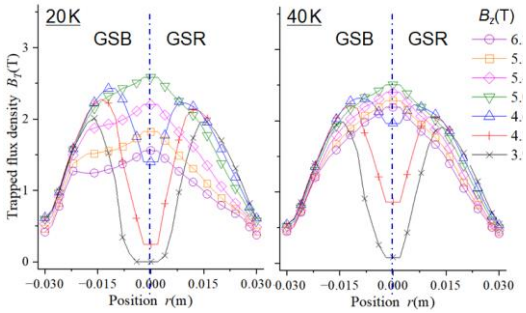
図 9 に増磁過程（0～10 ms）及び減磁過程（10～100 ms）における GSB 及び GSR 上の一次元磁束密度分布の時間変化を示す。増過程では，時間とともに外周部から試料中央部に磁束が侵入していることがわかる。GSB と GSR を比較すると，GSR 部の方が磁束密度が高く，GSR から優先的に磁束が侵入していることを示している。減磁過程においては，外周部に磁束密度は減少する一方で，中央部の磁束密度は約 20 ms までは増加している。これは，周辺部から磁束フローにより磁束が中央に集まってきていることを示している。それ以降は，中央部の磁束密度はほぼ変化せず，外周部の磁束密度の減少に伴い，磁束密度分布が凸型になることがわかる。また，磁束密度

の大きさ及び傾きに注目すると，GSR に比べて GSB の方が磁束密度が大きく，また傾きが急であることがわかる。これまでの着磁実験では，GSR から磁束が侵入し，GSB に捕捉されると考察してきたが，数値解析により着磁プロセスが理論的に確認することができた。

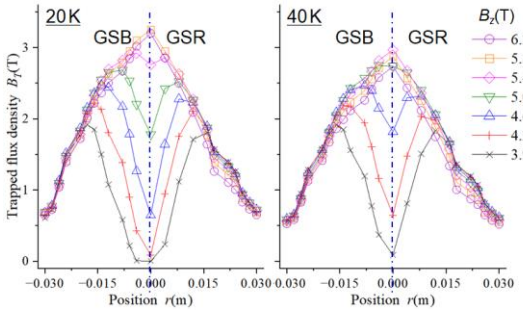
今後，解析モデルを用いて捕捉磁場の拡大及び着磁の効率化，さらにヨークの形状や大きさの最適化について検討する予定である。



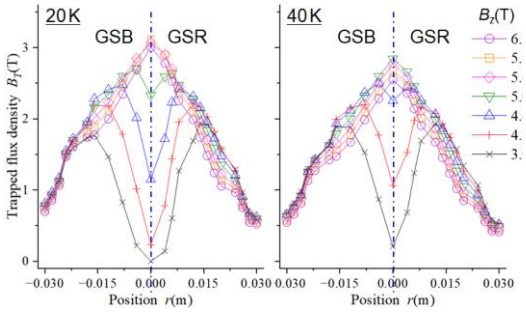
(a) 円柱型ヨーク



(b) 円筒型ヨーク

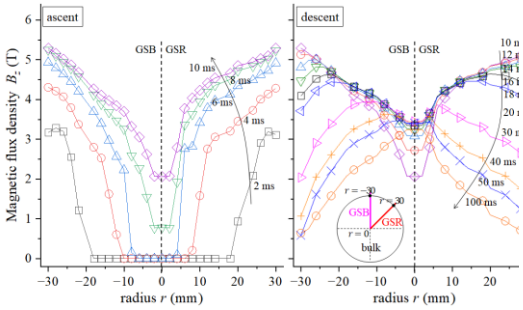


(c) クロス型ヨーク（GSB 配置）

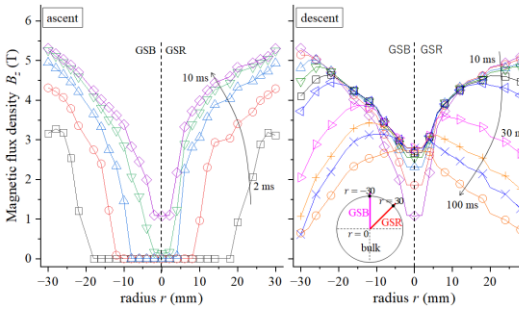


(d) クロス型ヨーク（GSR 配置）

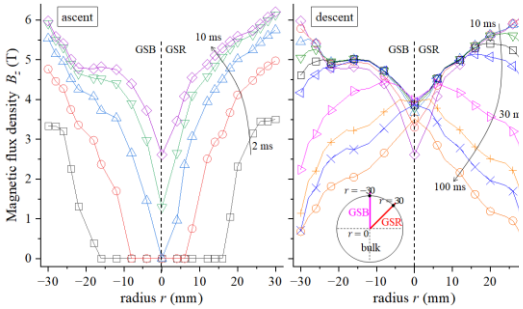
図 8　GSB 及び GSR における一次元磁束密度分布の比較



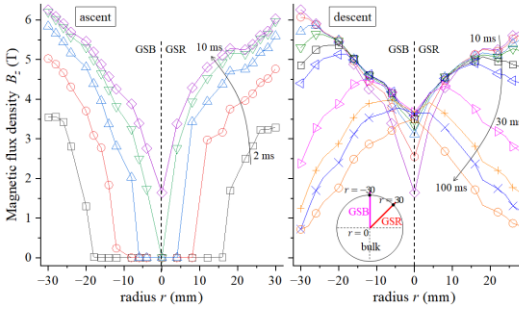
(a) 円柱型ヨーク



(b) 円筒型ヨーク



(c) クロス型ヨーク（GSB 配置）



(d) クロス型ヨーク（GSR 配置）

図 9　増磁過程及び減磁過程における一次元磁束密度分布の時間変化

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計6件（うち査読付論文　6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 Yokoyama K.、Oka T.	４．巻 32
２．論文標題 Influence of Soft-Iron Yoke Thickness on the Magnetizing Characteristics of a Bulk Magnet Excited by Pulsed-Field Magnetization	５．発行年 2022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.2021.3135370	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 Yokoyama Kazuya、Oka Tetsuo	４．巻 32
２．論文標題 A numerical evaluation of magnetizing characteristic of bulk magnet excited by pulsed-field magnetization with different shaped soft-iron yokes	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.2022.3163675	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 Yokoyama Kazuya、Oka Tetsuo	４．巻 31
２．論文標題 Investigation of the Magnetizing Performance of a REBCO Bulk Magnet Excited by Pulsed Field Magnetization Using Cross-Shaped Iron Yokes	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.2021.3059722	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 Yokoyama Kazuya、Oka Tetsuo	４．巻 30
２．論文標題 Influence of the Shape of Soft-Iron Yoke on Trapped Field Performance of HTS Bulk	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.2020.2976064	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 Yokoyama K、Oka T	４．巻 1559
２．論文標題 Magnetizing characteristic evaluation of REBCO bulk in PFM using different yokes	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	６．最初と最後の頁 012047～012047
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1559/1/012047	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 Sakai N、Oka T、Yamanaka K、Dadiel L、Oki H、Ogawa J、Fukui S、Scheiter J、H??ler W、Yokoyama K、Noudem J、Miryala M、Murakami M	４．巻 1559
２．論文標題 Occurrence of Flux Jumps in MgB2 Bulk Magnets during Pulse-Field Magnetization	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	６．最初と最後の頁 012024～012024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1559/1/012024	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16件（うち招待講演　3件／うち国際学会　8件）

１．発表者名 横山和哉，岡徹雄
２．発表標題 REBCOバルク体のパルス着磁における軟鉄ヨークに厚みが捕捉磁場特性に及ぼす影響
３．学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
４．発表年 2021年

１．発表者名 Kazuya Yokoyama, Tetsuo
２．発表標題 Influence of Soft-iron Yoke Thickness on the Magnetizing Characteristics of a Bulk Magnet Excited by Pulsed-field Magnetization
３．学会等名 15th European Conference on Applied Superconductivity（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名
Yokoyama Kazuya, Oka Tetsuo

２．発表標題
Numerical evaluation of magnetizing characteristics of REBCO bulk magnet excited by pulsed-field magnetization with various soft-iron yokes

３．学会等名
12th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting Bulk Materials（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Yokoyama Kazuya, Oka Tetsuo

２．発表標題
A numerical evaluation of magnetizing characteristic of bulk magnet excited by pulsed-field magnetization with different shaped soft-iron yokes

３．学会等名
27th International Conference on Magnet Technology（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Asaad Mahmoud, YU CONG, Yokoyama Kazuya, Oka Tetsuo

２．発表標題
Magnetizing performance evaluation of bulk magnet activated by pulsed-field magnetization when using different soft-iron yokes

３．学会等名
34th International Symposium on Superconductivity（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
YU CONG, Asaad Mahmoud, 横山和哉, 岡徹雄

２．発表標題
パルス着磁における軟鉄ヨークとバルク磁石の捕捉磁場の関係

３．学会等名
第102回低温工学・超電導学会

４．発表年
2021年

１．発表者名
YU CONG，Asaad Mahmoud，横山和哉，岡徹雄

２．発表標題
パルス着磁されたバルク磁石におけるクロス型ヨークの厚みが捕捉磁場に及ぼす影響

３．学会等名
令和4年電気学会全国大会

４．発表年
2022年

１．発表者名
Asaad Mahmoud，YU CONG，横山和哉，岡徹雄

２．発表標題
厚みの異なる軟鉄ヨークを用いた時のパルス着磁されたバルク磁石の着磁特性の数値解析

３．学会等名
令和4年電気学会全国大会

４．発表年
2022年

１．発表者名
横山和哉，Asaad Mahmoud，YU CONG，岡徹雄

２．発表標題
形状の異なる軟鉄ヨークを用いたバルク磁石のパルス着磁特性の数値解析

３．学会等名
令和4年電気学会全国大会

４．発表年
2022年

１．発表者名
横山和哉，岡徹雄

２．発表標題
クロス型軟鉄ヨークを用いたREBCOバルク体のパルス着磁特性の評価

３．学会等名
第99回春季低温工学・超電導学会

４．発表年
2020年

１．発表者名
K. Yokoyama and T. Oka

２．発表標題
Investigation of the magnetizing performance of a REBCO bulk magnet excited by pulsed field magnet-ization using cross-shaped iron yokes

３．学会等名
Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC2020)（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
J. Longji Dadiel, Pavan K. N Sugali, Naomichi Sakai, Hiraku Ogino, Taichiro Nishio, Kazuya Yokoyama, Tetsuo Oka, Masato Murakami

２．発表標題
Comparative Study of the Effect of Nano Activated Charcoal and Diamond on the Performance of MgB2 Bulk Superconductor

３．学会等名
33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Tetsuo Oka, Kengo Yamanaka, Kimiaki Sudo, Longji Dadiel, Jun Ogawa, Kazuya Yokoyama, Walfgang Häßler, Jacques Noudem, Kévin Berger, Naomichi Sakai, Miryala Muralidhar, Masato Murakami

２．発表標題
Shielding Effect on Flux Trapping in Pulsed-Field Magnetizing for Mg-B Bulk Magnet

３．学会等名
33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Tetsuo Oka, Kengo Yamanaka, Masateru Sudo, DANIEL Longji, DORGE Remi, Kazuya Yokoyama, SCHEITER Juliana, Jun Ogawa, Satoshi Fukui, BERGER Kevin, BADICA Petre, NOUDEM Jacques

２．発表標題
Trapped magnetic field characteristics of MgB2 bulk with different additive contents and MgB2 bulk with different types of additives by pulse magnetization

３．学会等名
33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
横山和哉，岡徹雄

２．発表標題
クロス型ヨークの大きさがバルク磁石の捕捉磁場特性に及ぼす影響

３．学会等名
第100回春季低温工学・超電導学会

４．発表年
2020年

１．発表者名
横山和哉，岡徹雄

２．発表標題
パルス着磁されたHTSバルク磁石におけるヨークの大きさが着磁特性に及ぼす影響

３．学会等名
令和3年電気学会全国大会

４．発表年
2021年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

足利大学工学部電気電子分野応用超伝導研究室
https://www2.ashitech.ac.jp/elec/yokoyama/

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
研究協力者	岡　徹雄 (Oka Tetsuo)		

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