

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560343

研究課題名(和文) 小型強力磁石の実用化を目指した着磁簡略化の検討

研究課題名(英文) Simplification of magnetization aiming at practical use of a small-size strong magnet

研究代表者

横山 和哉 (Yokoyama, Kazuya)

足利工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60313558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：大型・高特性の超伝導バルク体において、パルス磁化法により大きな磁場を効率的に捕捉させるために、試料に細孔を加工する手法を考案した。その着磁特性を評価するため、磁束密度及び温度のリアルタイム測定システムを構築し、細孔の大きさや個数の異なる試料において、温度と印加磁場の大きさを変えたパルス着磁実験を行った。磁場分布や磁束密度等の時間応答を比較することで、細孔の大きさや数が磁場の捕捉に及ぼす影響を明らかにした。さらに、詳細な磁束の挙動を把握することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a hole-processed bulk superconductor to trap the magnetic field efficiently in a large-size and high-performance material excited by pulsed field magnetization. To evaluate the magnetizing performance of the bulk material, a real-time measurement system of magnetic flux density and temperature was constructed, and an experiment in which a single pulsed field was applied with changing amplitude of the magnetic field and temperature was carried out using GdBCO bulks with a 1-mm-diameter hole, a 2-mm-diameter hole and four 2-mm-diameter holes. When investigating magnetic field distributions and time responses of magnetic flux density and temperature, we obtained a suggestion that about 1 mm in diameter was proper for the hole size and clarified that a solder filled in small holes inhibited an decrease in magnetic flux by improving a cooling effect. Moreover, we also succeeded to comprehend the detailed behavior of the magnetic flux such as flux jumps.

研究分野：電気電子工学

キーワード：超伝導バルク体 パルス着磁 捕捉磁場 リアルタイム測定システム

### 1. 研究開始当初の背景

近年の資源・環境問題において、レアアースの回収や水質浄化等へ、磁気の活用が期待されている。また除染された土壌から放射性物質を分離・回収することにより、中間貯蔵設備に保管する物質の減容化への応用も提案されている。さらに、医療分野では磁気による薬剤の誘導等、安全かつ効果的な投薬技術への応用も検討されている。

高温酸化物超伝導バルク体（以下、バルク体と略す）を用いた磁石装置は、試料を冷却・磁化した後、冷凍機等で冷却し続けることにより疑似的な永久磁石として使用することができる。従来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、装置が小型・安価かつ低ランニングコスト等のメリットがある。近年の超伝導材料の大型化や高特性化に伴い、磁化されれば大きな磁力を発生できるものの、磁化の過程が難しくなる傾向にあり、バルク磁石装置の実用化には強磁場化と共に磁化の容易さが重要な課題となっている。

### 2. 研究の目的

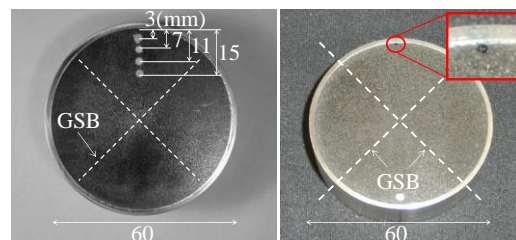
本研究は大型・高特性バルク体において、パルス磁化法により大きな磁場を効率的に捕捉させることとする。バルク体の磁化法は磁場中冷却法とパルス磁化法に大別でき、前者は試料の性能限界まで磁化できるものの、大型の超伝導マグネットが必要であり、また励磁時間が長いデメリットもある。後者は汎用のコンデンサバンクや銅コイルで励磁でき、短時間で磁化できるため、産業応用に向けては後者が有利であると考えられる。これまで捕捉磁場が性能限界の半分程度であることが問題であったが、複数回パルス磁場を印加する方法や温度を調整する手法などが提案され、捕捉磁場が改善されてきた。しかし、近年の材料の高性能化に伴い、上記の方法でも大きな磁場を捕捉させることが難しくなってきた。そこで、試料の一部に機械的に細孔を加工することで意図的に超伝導特性の低い部分を作り、そこから選択的に磁場を侵入させる方法を考案した。本申請研究では、細孔を加工した試料における磁束密度等の実測データから磁束の挙動を把握し、着磁のメカニズムを明らかにする。さらに、細孔が着磁特性に及ぼす影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超伝導バルク体

$REBa_2Cu_3O_x$  超伝導バルク体 (RE=Y, Gd 等の軽希土類) は、超伝導相である  $REBa_2Cu_3O_x$  (RE123相) に非超伝導相である  $RE_2BaCuO_5$  (RE211相) を添加し、種結晶を用いて結晶成長させることで作製される。この時、不純物である RE211相が押し出されて結晶成長境界 (Growth Sector Boundary, GSB) が形成される。一方、GSB に囲まれた部分は結晶成長領域 (Growth Sector Region, GSR) と呼ばれる。RE211相

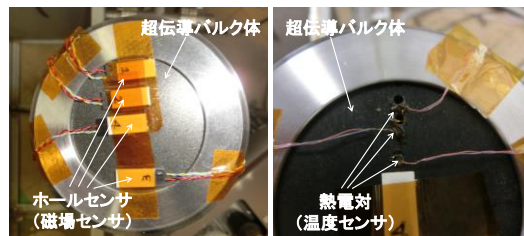
は磁束を捕捉するピン止め点であるため GSB は GSR に比べて超伝導特性が高い。そこで、本研究では着磁後の捕捉磁場の向上を重視して、GSB には加工を加えず、GSR に細孔を加工することとした。当初、磁束を内部まで侵入させることを目的として、図1(a)に示すように半径の半分程度の位置まで直径2mmの細孔を4個加工した。しかし、磁場分布が歪んでしまったり、捕捉磁場が低下してしまったりする問題があった。本研究では、細孔の大きさや個数を検討するため、加工前の試料で捕捉磁場特性を測定した後、直径1mmの細孔を試料の厚みの半分程度加工した場合、その穴を貫通させた場合、さらに直径2mmに拡大した場合について実験を行った。



(a) 細孔  $\phi 2\text{mm} \times 4$  個 (b) 細孔  $\phi 1\text{mm} \times 1$  個  
図1 細孔加工した超伝導バルク体

#### (2) 磁束密度及び温度のリアルタイム測定システム

着磁中の磁束の挙動を把握するため、試料表面における磁束密度及び温度をリアルタイムで測定するシステムを構築した。従来は7回/sのサンプリングレートであったが、印加するパルス磁場の立ち上がり時間が10msであるため、有用なデータを得ることが難しかった。本研究ではサンプリングレートが100  $\mu\text{s}$  以上のデータロガー (PA-S1000/8, (株)P&A テクノロジーズ) を用いて複数点を測定できるシステムを構築した。そして、ホールセンサ (極低温用, BHT-921, F.W.BELL) により磁束密度の時間変化を測定するとともに、T型熱電対 (線径76  $\mu\text{m}$ , テフロン被覆, 自作) を接続することで温度も測定する。図2に各センサのセットアップを示す。ホールセンサはカプトンテープ、熱電対はワニスを用いて試料表面に貼り付けた。



(a) 磁場センサのセットアップ (b) 温度センサのセットアップ  
図2 リアルタイム測定システム

#### (3) 実験方法

図3に実験装置の概略を示す。バルク体を2段 GM サイクル冷凍機 (RF273SA, アイシン精機製) の2nd ステージに接続した銅ロッド

の先端のサンプルホルダに取り付け、断熱シートで覆い、さらに真空チャンバを取り付ける。その後、温度コントローラで20~50 Kに調整しながら試料を冷却する。次に磁極の先端に着磁コイルを取り付け、各温度において3.1~7.0 Tのパルス磁場（立ち上がり時間：10 ms）を各1回印加する。その際、磁場印加時の試料表面における磁束密度及び温度の時間変化を測定する。着磁コイルを取り外した後、磁極表面（試料からの距離：4 mm）の磁束密度分布を測定した。なお、細孔加工前に上記の条件で実験を行っており、加工前後の結果を比較した。

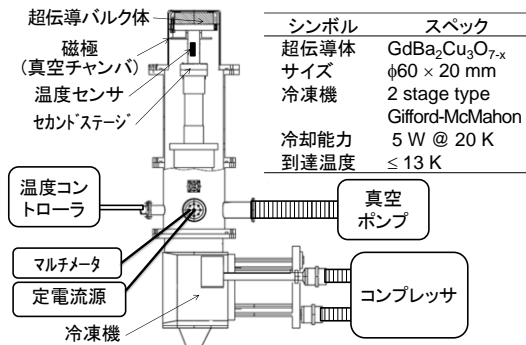


図3 超伝導バルク磁石装置の概略

#### 4. 研究成果

##### (1) 磁束密度分布の比較

図4に20 Kにおける(a)加工前、(b)φ1 mmの細孔が1個（貫通）、(c)φ2 mmの細孔が1個、(d)φ2 mmの細孔が4個の場合の磁束密度分布を示す。各図の左上の数字は印加磁場の大きさである。3.9 Tの弱い磁場では、加工前はほとんど磁場が侵入していないが、細孔を加工することによりその部分から磁束が侵入していることがわかる。また、細孔が4個の場合は磁場を捕捉している部分が広がっている。印加磁場が5.4 Tの場合は(a)~(c)で磁場を強く捕捉している赤色の面積が広がっている。一方、(d)では細孔加工した部分で分布が歪んでおり、磁束が抜け出たことが考えられる。印加磁場7.0 Tでは(a)に比べて(b)及び(c)の磁場を強く捕捉している部分が減少している。(d)では磁場分布が歪んでおり、磁場の強い部分はさらに小さくなっている。以上の結果、細孔を1個とすることにより、磁場分布の歪みがなくなることを確認した。

##### (2) 総磁束量の比較

図5に20~50 Kにおける印加磁場と総磁束量の関係を示す。なお、総磁束量( $\Phi$ )の値は図4の磁束密度分布から算出した。20 Kでは印加磁場と共に $\Phi$ が大きくなり、5.4 Tで最大となっている。 $\Phi$ の最大値は加工前に比べて加工後は小さくなっているが、細孔1個の場合は直径による違いはない。一方、細孔が4個の場合、 $\Phi$ は小さな値となっている。30 Kでは、細孔が1個の場合、4.6 Tで最大

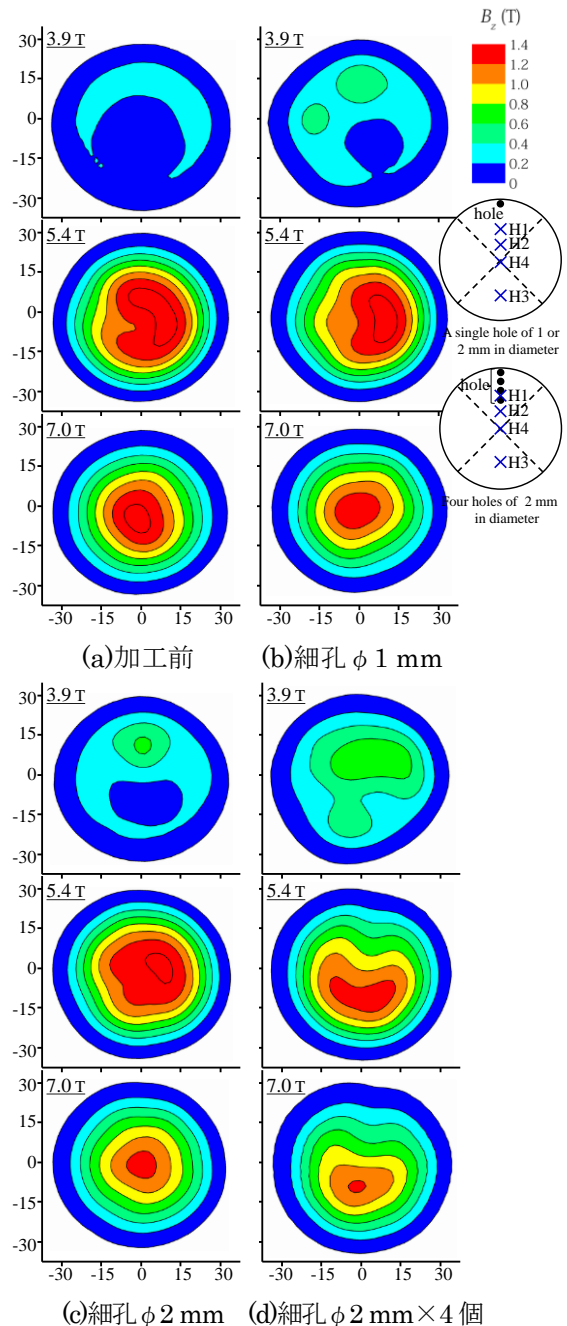


図4 磁束密度分布の比較 (20 K)

値を取り、その後減少している。また、細孔4個の場合もほぼ同じ値となっている。40及び50 Kの場合、φ2 mmの細孔が1個の場合と4個の場合でほぼ同じ値となっている。ここで、20 Kにおいて印加磁場6.2 Tで総磁束量が小さくなっているが、これはフラックスジャンプによるものであり、後述する磁束密度の時間応答の結果でも確認している。総磁束量の結果から、細孔はφ2 mmでは大きすぎるといふ知見が得られた。

##### (3) 磁束密度の時間変化

図6に(a)細孔φ1 mm及び(b)細孔φ2 mmの場合の試料表面における磁束密度の時間変化を示す。印加磁場3.9 Tの場合、(a)においてはH1の値が大きくなっており、試料

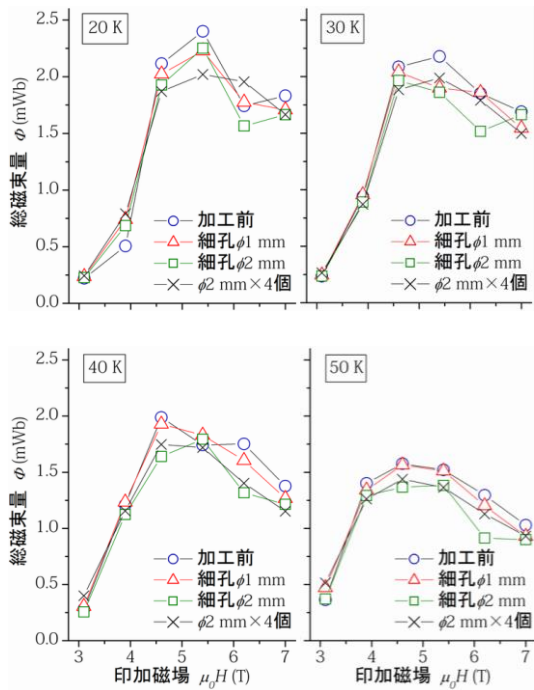


図5 印加磁場と総磁束量の関係

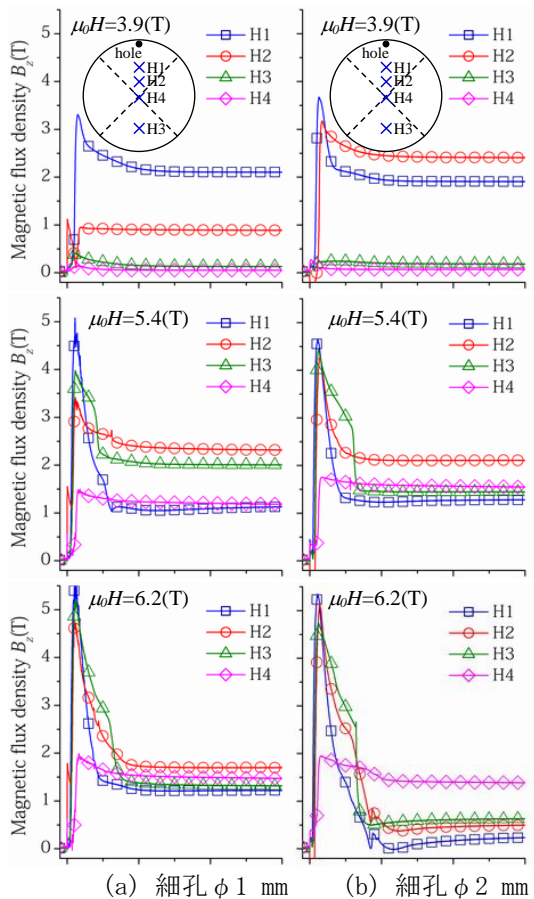
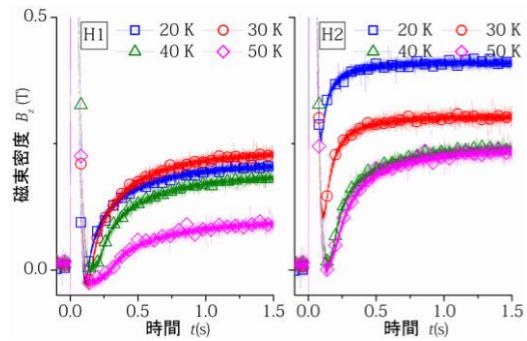
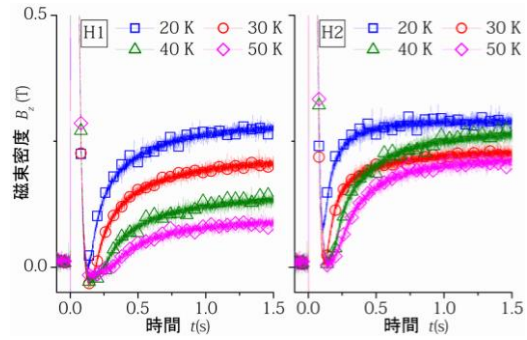


図6 磁束密度の時間変化 (20 K)

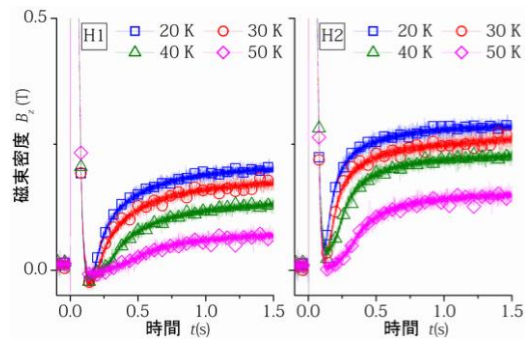
端部のみ磁束が捕捉されている。一方(b)では H2 の値も大きく、細孔が大きくなったことで、より内部まで磁束が侵入していることがわかる。印加磁場 5.4 T では H4 の値が大きくなり、磁束が中心部分まで侵入している。また、50 ms 付近で H3 の値が急激に低下



(a) 印加磁場 5.4 T



(b) 印加磁場 6.2 T



(c) 印加磁場 7.0 T

図7 細孔部分の磁束密度の比較

しており、フラックスジャンプが発生したことがわかる。ただし、細孔部分からは離れていることから細孔加工とは関係ないと考えられる。印加磁場 6.2 T では H3 の減少が顕著になっており、特に細孔 phi 2 mm では H1 及び H2 の値も大きく減少し、H1 はほぼ 0 になっている。このように試料表面の磁束密度の時間変化を詳細に測定することにより、磁束の動きを把握することができた。

#### (4) 細孔部分の磁束密度の変化の比較

図5の印加磁場 6.2 T の H1 及び H2 の結果において、磁束密度が減少してから再び増加していることが確認された。これは 30~50 K の温度や別の試料でも確認している。図6に細孔 phi 2 mm x 4個の試料における(a)印加磁場 5.4 T, (b)6.2 T, (c)7.0 T の時の H1 及び H2 の磁束密度 ( $B_z$ ) の時間変化を示す。いずれの結果も、磁場印加後、 $B_z$  が一旦減少した後に再び増加している。これは、磁場侵入時のピンニング損失に伴う発熱で  $J_c$  が低下し、磁束フローが発生したことを示している。その後、試料が冷却されて  $J_c$  が改善されると、

磁束フローが止まり、再び磁束が捕捉されるため  $B_z$  が増加する。H1 ではいずれの印加磁場においても  $B_z$  が 0 まで減少しており、一度すべての磁束が抜け出ていることがわかる。一方、(a)のH2では、温度が低いほど  $B_z$  の減少が時間的に早く止まり、更に  $B_z$  の最小値が大きいことがわかる。これは、ハンダにより試料が冷却され、 $J_c$  が早く回復することを示唆している。(b)及び(c)においても同じ傾向がみられるが、印加磁場が大きいほど  $B_z$  の最小値は小さくなっている。これは、印加磁場の増加に伴い発熱が大きくなり、冷却されるまで時間がかかることが原因であると考えられる。このように、磁場印加後の磁束フローを抑制する効果があることを明らかにした。

#### (5) 細孔に充填したハンダの冷却効果の検証

前節の磁束フロー抑制効果を詳細に検討するため、熱電対を貼り付けて温度の時間変化を測定した。図8にハンダがある場合とない場合の(a)印加磁場 5.4 T, (b)6.2 T, (c)7.0 Tにおける細孔部分の温度上昇の比較を示す。いずれの場合も磁束侵入時のピンニング損

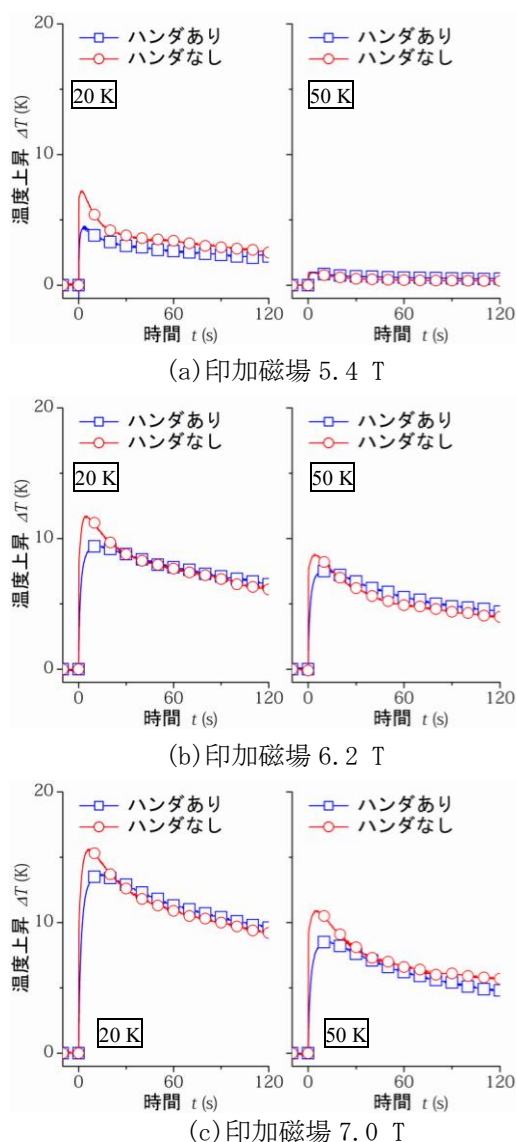


図8 細孔部分の温度の時間応答の比較

失に伴う温度上昇は、ハンダありの方が最大値が小さいことがわかる。これは図7の結果と一致しており、ハンダによる冷却効果が確認された。

#### (6) まとめ

本研究は細孔加工した超伝導バルク体の着磁特性を評価するため、磁束密度及び温度のリアルタイム測定システムを構築し、細孔の数や大きさの異なる試料でパルス着磁実験を行った。その結果、細孔の大きさが  $\phi 2$  mm では捕捉磁場が低下することや、ハンダにより磁束フローが抑制されることを明らかにした。今後これらの成果を基に、着磁の効率化及び捕捉磁場の更なる向上を目指し、バルク磁石の実用化につなげたい。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① K. Yokoyama, R. Igarashi, R. Togasaki, T. Oka, "Pulsed field magnetization characteristics of a holed superconducting bulk magnet", Physica C, 査読有, 2015, accepted.
- ② K. Yokoyama, R. Igarashi, R. Togasaki, T. Oka, "Improvement of the trapped field performance of a holed superconducting bulk magnet," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 25, 2015, Art.No. 6800804  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2370792
- ③ K. Yokoyama, T. Tsukui, H. Mita, N. Tsubonoya, T. Oka, "Investigation of the Flux Flow-inhibiting Effect of a Hole-opened Superconducting Bulk Magnet," Physics Procedia, 査読有, Vol.58, 2014, pp. 302-305  
DOI:10.1016/j.phpro.2014.09.075
- ④ K. Yokoyama, T. Tsukui, H. Mita, N. Tsubonoya, T. Oka, "Experimental Verification of the Magnetic Flux Penetration Property and a Flux Flow Inhibition Effect of a Superconducting Bulk Magnet with Small Holes", Physics Procedia, 査読有, Vol.45, 2013, pp. 261-264  
doi:10.1016/j.phpro.2013.05.017
- ⑤ K. Yokoyama, T. Oka, N. Kondo, S. Hosaka, "Pulsed-field magnetization of a bulk superconductor with small holes", Physica C, 査読有, Vol. 484, 2013, pp. 343-347  
DOI:10.1016/j.physc.2012.03.074

[学会発表] (計20件)

- ① ムハンディラム エランダ, 安藤正亮, 横山和哉, 「細孔バルク体のパルス着磁特性の評価」, 第5回 電気学会東京支部 栃木・群馬支所 合同研究発表会, ETT-15-75/ETG-15-75, 宇都宮大学, 2015.3

- ② K. Yokoyama, R. Igarashi, T. Togasaki, T. Oka, "Pulsed Field Magnetization Characteristics of a Holed Superconducting Bulk Magnet", 27th International Symposium on Superconductivity (ISS2014), SAP-73, Tokyo, Japan, 2014.11
- ③ 戸ヶ崎亮介, 五十嵐僚太, 岡 徹雄, 横山和哉, 「細孔バルク体の細孔のサイズとパルス着磁特性の関係」, 2014 年秋季低温工学・超電導学会, 1C-p11, こらっせ福島, 2014.11
- ④ 五十嵐僚太, 戸ヶ崎亮介, 岡 徹雄, 横山和哉, 「温度測定による細孔バルク体の冷却効果の評価」, 2014 年秋季低温工学・超電導学会, 1C-p10, こらっせ福島, 2014.11
- ⑤ K. Yokoyama, R. Igarashi, R. Togasaki, T. Oka, "Improvement of the trapped field performance of a holed superconducting bulk magnet", Applied Superconductivity Conference (ASC2014), 3LPo1L-03, Charlotte NC, USA, 2014.8
- ⑥ 五十嵐僚太, 戸ヶ崎亮介, 岡 徹雄, 横山和哉, 「細孔ありバルク体の冷却効果の検証」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会 (東京大会), Y-110, 東京電機大学, 2014.8
- ⑦ 戸ヶ崎亮介, 五十嵐僚太, 横山和哉, 岡 徹雄, 「1 か所に細孔を加工した超伝導バルク体のパルス着磁特性」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会 (東京大会), Y-111, 東京電機大学, 2014.8
- ⑧ 横山和哉, 五十嵐僚太, 戸ヶ崎亮介, 岡 徹雄, 「捕捉磁場特性の改善を目的とした細孔バルク体の着磁特性の評価」, 2014 年春季低温工学・超電導学会, 1B-a05, タワーホール船堀, 2014.5
- ⑨ 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 横山和哉, 岡 徹雄, 「細孔サイズがバルク体の着磁特性に及ぼす影響」, 平成 26 年電気学会全国大会, 5-164, 愛媛大学, 2014.3
- ⑩ 五十嵐僚太, 戸ヶ崎亮介, 津久井友隆, 横山和哉, 岡 徹雄, 「細孔ありバルク体の磁束フロー抑制現象における冷却効果の影響」, 平成 26 年電気学会全国大会, 5-165, 愛媛大学, 2014.3
- ⑪ 津久井友隆, 三田裕幸, 岡 徹雄, 横山和哉, 「細孔の大きさによるバルク体への着磁特性の影響」, 2013 年秋季低温工学・超電導学会, 3C-a09, ウィンクあいち (愛知県産業労働センター), 2013.12
- ⑫ K. Yokoyama, T. Tsukui, H. Mita, N. Tsubonoya, T. Oka, "Investigation of the flux flow inhibiting effect of a hole-opened superconducting bulk magnet", 26th International Symposium on Superconductivity (ISS2013), SAP-104, Tokyo, Japan, 2013.11
- ⑬ 横山和哉, 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 岡 徹雄, 「細孔ありバルク体のパルス着磁における捕捉磁場特性」, 2013 年春季低温工学・超電導学会, 1P-p14, タワーホール船堀, 2013.5
- ⑭ K. Yokoyama, T. Tsukui, H. Mita, N. Tsubonoya, T. Oka, "Evaluation of the trapped field performance of a hole-opened superconducting bulk magnet", 23rd International Conference on Magnet Technology (MT23), 3PoAP-04, Boston MA, USA, 2013.7
- ⑮ 横山和哉, 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 岡 徹雄, 「細孔ありバルク体の磁束フロー抑制効果の検証」, 平成 25 年電気学会全国大会, 5-163, 名古屋大学, 2013.3
- ⑯ 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 横山和哉, 岡 徹雄, 「細孔あり超伝導バルク体の捕捉磁場特性の評価」, 平成 25 年電気学会全国大会, 5-164, 名古屋大学, 2013.3
- ⑰ 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 岡 徹雄, 横山和哉, 「細孔加工した超伝導バルク体のパルス着磁における捕捉磁場特性」, 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-89/ETG-12-89, 宇都宮大学, 2013.2
- ⑱ K. Yokoyama, T. Oka, N. Kondo, S. Hosaka, "Experimental verification of the magnetic flux penetration property and a flux flow inhibition effect of a superconducting bulk magnet with small holes", 25th International Symposium on Superconductivity (ISS2012), SAP-75, Tokyo, Japan, 2012.12
- ⑲ 津久井友隆, 三田裕幸, 坪野谷典之, 岡 徹雄, 横山和哉, 「細孔バルク体の捕捉磁場特性の評価」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, 1A-a02, いわて県民情報交流センター (アイーナ), 2012.11
- ⑳ K. Yokoyama, T. Oka, N. Kondo, S. Hosaka, "Evaluation of pulsed-field magnetization of a bulk superconductor with small holes", Applied Superconductivity Conference (ASC2012), 2MPN-01, Portland, USA, 2012.10

〔その他〕

ホームページ：足利工業大学 工学部 創生工学科 機械・電気工学系 電気電子コース 応用超伝導研究室  
<http://www2.ashitech.ac.jp/elec/yokoyama/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 和哉 (Yokoyama Kazuya)  
 足利工業大学・工学部・准教授  
 研究者番号：60313558

(3) 連携研究者

岡 徹雄 (Oka Tetsuo)  
 新潟大学・工学部・教授  
 研究者番号：40432091