

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20560001

研究課題名(和文) 量子化磁束ダイナミクスのリアルタイム精密観測と超強力バルク磁石開発への展開

研究課題名(英文) Direct observation of the dynamics of vortices in high temperature superconducting bulks and development of the strong bulk magnet

研究代表者

内藤 智之 (NAITO TOMOYUKI)

岩手大学・工学部・助教

研究者番号：40311683

研究成果の概要(和文)：超伝導バルク体にパルス磁場を印加したときの量子化磁束の振る舞いに対する知見を得るために局所磁束密度および局所温度を複数箇所測定した。その結果、量子化磁束はバルク端部のみならず表面からも侵入することが明らかとなった。また、バルク体を小片試料に切り分けて測定した局所的な臨界電流密度分布は、パルス着磁で実現される不均一な捕捉磁場分布と矛盾せず、量子化磁束は低磁場ではピン止めが弱い領域に高磁場では強い領域に捕捉されるということが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To study the dynamics of vortices in high temperature superconducting bulks in the pulsed field, both local vortex densities and temperatures were measured. The vortices intruded into the bulk not only at the edges but also at the surfaces. The distribution of the local critical current density which was estimated from the magnetization loop using the small pieces cut from the bulk was consistent with the inhomogeneous trapped magnetic field profiles. The vortices were trapped at the weak/strong pinning region for the low/high applied magnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：超伝導バルク磁石、パルス着磁、磁束ダイナミクス、磁束ピン止め、臨界電流密度、元素置換効果

1. 研究開始当初の背景

近年、RE-Ba-Cu-O (RE：希土類元素)系高温超伝導体のバルク(擬似単結晶)の育成が可能になるに従って、高温超伝導バルクを磁化(量子化磁束を捕捉(ピン止め))させた高温超伝導バルク磁石が応用用途の一つとして注目されている。最も効果的な磁化(着磁)法

は、超伝導電磁石を用いた静磁場中冷却法で、超伝導工学研究所のグループが17テスラのY-Ba-Cu-Oバルク磁石の開発に成功している。超伝導バルク磁石の性能はネオジム永久磁石(数百ミリテスラ程度)等に比べて圧倒的な優位性を持つ。ただし、静磁場中冷却法は超伝導電磁石を必要とし高ランニングコス

トであることから、最近では超伝導電磁石不要のパルス着磁法(超伝導状態のバルクに数ミリ秒のパルス磁場を印加して着磁)の研究が精力的に行われている。この方法は、簡便、低コスト、可搬性という利点があるが低温(50K以下)での捕捉磁束密度が磁場中冷却法の場合に比べて非常に小さいという欠点も併せ持つ。従って、利点を活かすためには捕捉磁束密度の向上が不可欠である。

我々は2003年から高温超伝導バルクへのパルス着磁に関する研究を行ってきた。新しい2段階パルス着磁(Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling: MMPSC)法では、第1段階は高温(T_1)で弱いパルス磁場(B_1)を2回印加(No. 1&2)し、第2段階は低温(T_2 [$<T_1$])で強いパルス磁場(B_2)を2回印加(No. 3&4)する。これまで数多く行ってきた実験から、最終的な捕捉磁束 B_T (No. 4) を高めるには、第1段階においてバルク中心部よりも周辺部に多くの磁束を捕捉させる(断面形状がM字型)ことが重要であることが明らかとなった。しかしながら、このM字型磁場分布が(1)なぜ実現されるのか?(2)なぜ最適なのか?という疑問に対する答えはまだ得られていない。つまり、着磁条件(入口)から着磁結果(出口)に至る過程がブラックボックス的、すなわち磁束ダイナミクスの詳細が明らかになっていない。このため、着磁条件の最適化を経験的に行うしかない点がパルス着磁法の最大の問題点である。この問題を解決するためには、パルス磁場下における磁束ダイナミクスを明らかにする必要があると考えて本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究ではパルス磁場下における高温超伝導量子化磁束のダイナミクスを2つの方法で精密観測し、動的磁束相図の詳細を明らかにすることを目的とした。1)溶液のモーゼ効果を利用した磁束ダイナミクスのリアルタイム観察(システムの新規立ち上げ)、2)微小ホール素子2次元アレイと極細熱電対を用いた局所磁場・温度分布測定。特にM字型磁場分布の発現機構とその意味を微視的な観点から明らかにすることに加えて、M字型よりも適切な初期磁場分布に対する知見を得る。また、材料開発の観点からバルク形状と着磁特性の関係を検討し、パルス着磁において最適なバルク形状を明らかにする。量子化磁束の試料への出入りは試料端(バリエータとなる)形状の影響を受けることが知られている。そこで、種々の形状(通常のパネル状、円錐形状、すり鉢形状など)のバルクを作製し、パルス着磁に最適なバルク形状を検討する。また、市販品同等品質の超伝導バルクの作製技術を確認することも目的とした。

3. 研究の方法

測定に用いた超伝導バルクは種結晶を用いた溶融法を用いて作製された。パルス着磁に用いたバルクは新日本製鐵もしくは超電導工学研究所で作製された。元素置換効果を調べたバルクは我々が作製した。

パルス着磁は改良型2段階パルス着磁(MMPSC)法で行った。第1段階は高温(T_1)で弱いパルス磁場(B_1)を2回印加(No. 1&2)し、第2段階は低温(T_2 [$<T_1$])で強いパルス磁場(B_2)を2回印加(No. 3&4)する。捕捉磁場は低温用ホール素子、温度はCernox抵抗温度計もしくはクロメル-コンスタンタン熱電対を使用して測定した。

臨界電流密度は超伝導量子干渉素子(SQUID)磁束計を使用して磁化曲線を測定し、拡張型ピンモデルを用いて算出した。電気抵抗率は直流4端子法で測定した。捕捉磁場の解析に用いる熱伝導率を定常熱流法で測定した。

4. 研究成果

(1)Y-Ba-Cu-O超伝導バルクの磁束ピン止め特性の向上を目指して、YサイトへのLaまたはPrの微量置換効果を検討した。測定試料は図1(a)挿入図に示すように、種結晶から1mmおよび3mm下の位置から切り出した。試料は薄板形状で典型的な寸法は $2 \times 2 \times 1 \text{mm}^3$ であった。図1(a)および1(b)に、種下1mmおよび3mm試料の臨界電流密度の磁場依存性 $J_c(H)$ を各々示す。種下1mm試料については0.1%置換試料の $J_c(H)$ が4.5テスラ以上の磁場領域で母物質の $J_c(H)$ を上回り、それとともに不可逆磁場 H_{irr} も5テスラ以上となり母物質を上回った。ここで H_{irr} は $J_c(H) = 4 \text{A/cm}^2$ となる磁場で定義した(図中の点線)。しかしながら、その他の置換量については $J_c(H)$ お

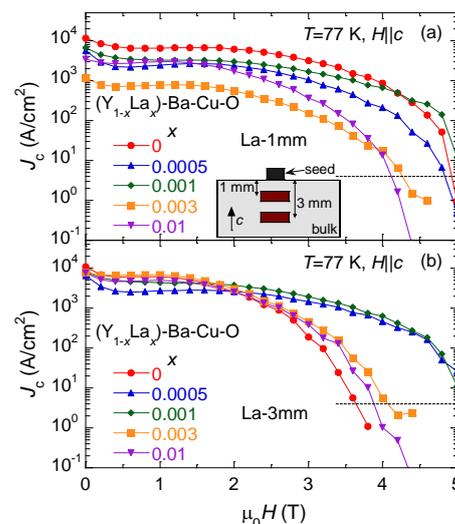


図1: (Y, La)-Ba-Cu-Oバルク体の臨界電流密度 J_c の磁場依存性 (a) 種下1mm試料 (b) 種下3mm試料

よび H_{irr} ともに向上しなかった。一方、種下 3mm 試料については、2 テスラ以上の磁場領域で全ての置換試料の $J_c(H)$ および H_{irr} が母物質のそれを上回った。以上の結果より Y サイトへの La もしくは Pr の微量置換は磁束ピン止め特性の向上に有効であることが分かった。

(2) これまではバルク表面の温度変化のみをモニタしていた。本研究では図 2 のように直径 45mm、厚さ 15mm の Sm 系超伝導バルクに直径 1mm の微小貫通孔を複数開け、そこにクロメル-コンスタンタン熱電対(直径 76 μ m)を複数配置した。このセッティングによりパル

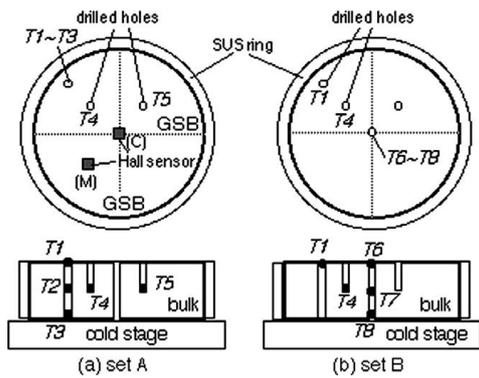


図 2: ホール素子と熱電対の配置

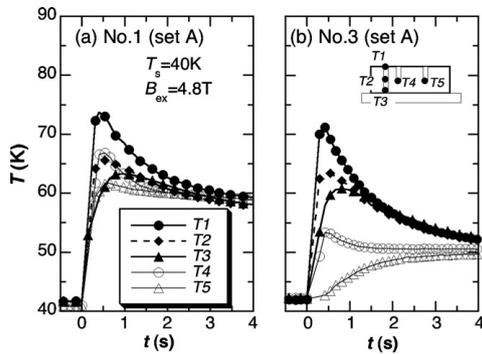


図 3: setA 配置における局所温度の時間依存性(a)No.1 パルス印加時、(b)No.3 パルス印加時

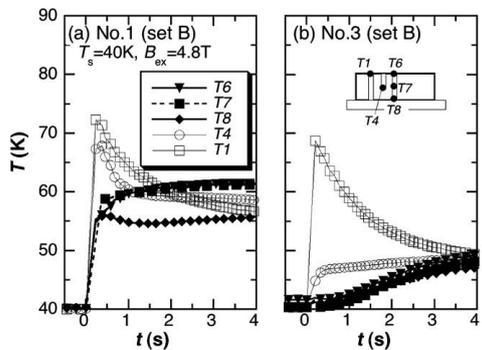


図 4: setB 配置における局所温度の時間依存性(a)No.1 パルス印加時、(b)No.3 パルス印加時

ス磁場印加時のバルク厚さ方向や内部半径方向の温度変化をモニタすることが可能になった。まず、setA の配置においてバルク周辺部の細孔内で表面(T1)、中央(T2)、底面(T3)の温度変化を測定した(図 3)。その結果、厚さ方向に温度勾配が生じることが分かった。これは、パルス磁場を印加した数ミリ秒後に量子化磁束がバルク端面のみならず表面からも侵入することを示唆する重要な結果である。また、半径方向の温度変化(T2 と T4 の比較)からも量子化磁束がバルク表面から侵入していることが分かった。一方、setB の配置によりバルク中央部で周辺部と同様の温度モニタをしたところ、中心部の温度上昇は上部(T6)、中央(T7)、底面(T8)でほぼ断熱的に起こることや厚さ方向の温度勾配がほとんど生じないことが明らかとなった(図 4)。通常、量子化磁束はバルク端面からのみ侵入すると考えられている。パルス磁場で発生させた量子化磁束はマイスナー効果でバルクを回り込んでいる。量子化磁束密度が局所的に高い箇所が表面付近に出現し表面からの侵入が起こったと推測される。今回、パルス磁場印加時のバルクの温度変化を精密観測することにより量子化磁束が表面から侵入するという新たな知見が得られた。

(3) パルス着磁による捕捉磁場分布とバルク体の磁束ピン止め特性の直接比較を実施した。図 5 に $T=60K$ における印加磁場 1.1T および 1.3T の捕捉磁場の 2 次元分布を示す。

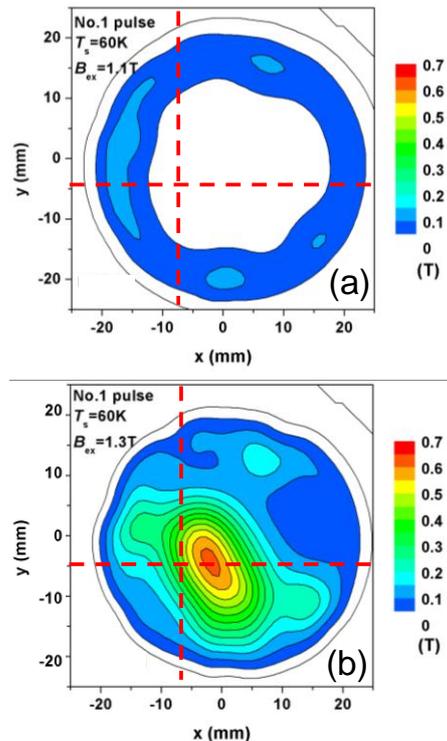


図 5: $T=60K$ における捕捉磁場の 2 次元分布図(a)印加パルス磁場 1.1T、(b)1.3T。赤の点線は GSB を表す

印加磁場 1.1T のとき磁束はバルク体成長時に形成される結晶成長領域に捕捉され、1.3T になると結晶成長領域の境界面付近(図中赤い点線)に捕捉された。パルス着磁実験終了後、バルク体を小片試料に切り分けて、それら小片試料を用いて磁化測定から臨界電流密度、電気抵抗率測定から不可逆曲線(図 6)をそれぞれ決定した。結晶成長領域では臨界電流密度は低く、不可逆曲線も低温低磁場に位置した。一方、結晶成長領域の界面付近では臨界電流密度が高く、不可逆磁場も高温高磁場側に位置することが明らかとなった。捕捉磁場分布と磁束ピン止め特性との比較から量子化磁束は先ず磁束ピン止め力の弱い結晶成長領域から侵入を開始し、最終的には磁束ピン止め力の強い結晶成長領域界面近傍に捕捉されることが明らかになった。

(4) 量子化磁束は主にバルク体端部から侵入するが、その侵入は磁束ピン止め力の弱いところから選択的に起こる。磁束侵入経路をバ

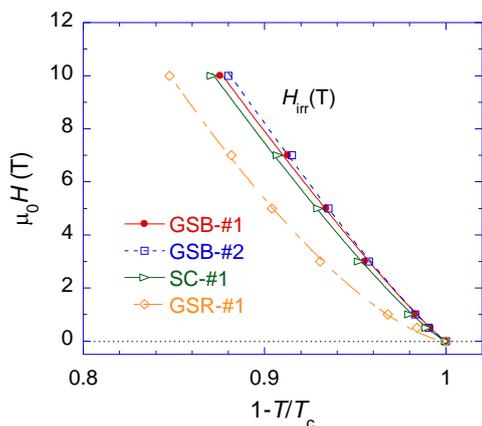


図 6: 磁場-温度相図。GSB は結晶成長境界、GSR は結晶成長領域および SC は種結晶直下からそれぞれ切り出した試料を表す。

ルク体の形状加工によって制御することを試みた。実際バルク形状加工を行う前に、電磁場と熱伝達を錬成解析できるソフト PHOTOON を用いたパルス着磁のシミュレーションからバルク形状の最適化を検討した。磁束侵入障壁を下げるように端部をテーパ形状にしたバルク体に対するシミュレーションから得られた捕捉磁場分布は通常円盤状バルク体のそれとほぼ同一であった。従って、バルク体端部の形状は磁束侵入にほとんど寄与しないことが明らかとなった。

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 18 件)

- (1) T. Naito, D. Furuta, T. Arayashiki, H. Fujishiro, Y. Yanagi, and Y. Itoh, "Position dependence of irreversibility line on thin plate Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor", Physics Procedia, 27 (2012) pp.168-171, 査読有
- (2) H. Fujishiro, T. Naito, D. Furuta, T. Arayashiki, Y. Yanagi, and Y. Itoh, "Direct J_c measurements and trapped field profiles using an identical superconducting bulk", Superconductor Science and Technology 24 (2011) 105003 (6 pages), 査読有
- (3) H. Fujishiro, K. Kakehata, D. Furuta, and T. Naito, "Temperature measurements in small holes drilled in HTSC bulk during pulsed field magnetization", Physica C 470 (2010) pp. 1181-1184, 査読有
- (4) T. Naito, K. Sato, D. Yamaguchi, and H. Fujishiro, "Vortex pinning properties of $(Y_{1-x}La_x)$ -Ba-Cu-O and $(Y_{1-x}Pr_x)$ -Ba-Cu-O superconducting bulks", Physica C 469 (2009) pp. 1218-1220, 査読有
- (5) H. Fujishiro, T. Tateiwa, K. Kakehata, T. Hiyama, T. Naito, and Y. Yanagi, "Trapped field characteristics on 65 mm GdBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC)", Physica C, 468 (2008) pp. 1477-1480, 査読有
- (6) T. Naito, H. Fujishiro, K. Iida, S. Nariki, and M. Murakami, "Thermal conductivity of Er-Ba-Cu-O and Ho-Ba-Cu-O superconducting bulks", Superconductor Science and Technology 21 (2008) 085001 (4pp), 査読有
- (7) T. Naito, H. Fujishiro, K. Iida, and M. Murakami, "Anisotropic thermal conductivity of Er-Ba-Cu-O bulk superconductors", Physica C, 468 (2008) pp.1428-1430, 査読有

[学会発表] (計 32 件)

- (1) T. Naito, "Position dependence of irreversibility line on thin Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor", 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011.10.26, Tower Hall Funabori

- (Tokyo)
- (2) T. Naito, “Thermal Transport and vortex pinning Properties in (Dy,RE)-Ba-Cu-O (RE=La, Pr, Gd) bulk superconductors”, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), 2010. 11. 3, Epochal Tsukuba (Tsukuba)
 - (3) H. Fujishiro “Temperature measurements in small holes drilled in superconducting bulk during pulsed field magnetization”, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), 2009. 11. 3, Epochal Tsukuba (Tsukuba)
 - (4) T. Naito, “Vortex pinning properties of $(Y_{1-x}La_x)$ -Ba-Cu-O and $(Y_{1-x}Pr_x)$ -Ba-Cu-O superconducting bulks”, 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), 2008. 10. 29, Epochal Tsukuba (Tsukuba)
 - (5) 藤代博之, “強いピン止め力を有する超伝導バルクへのパルス着磁”, 2008年度春季低温工学・超電導学会, 2008. 5. 26, 明星大学(東京都)

[その他]

ホームページ等

<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 智之 (NAITO TOMOYUKI)

岩手大学・工学部・助教

研究者番号：4 0 3 1 1 6 8 3

(2) 連携研究者

藤代 博之 (FUJISHIRO HIROYUKI)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：9 0 1 9 9 3 1 5