

パルス着磁による ab 面方向冷却型超伝導バルク磁石の伝熱解析 — c 軸方向冷却との比較 —

藤原 篤^{*1}, 立岩 達也^{*1}, 藤代 博之^{*1,†}, 永渕 尚志^{*2}, 林 秀美^{*2}, 岡 徹雄^{*3}

Heat Propagation Analysis of an HTSC Bulk Magnet Cooled along the ab -plane and Magnetized by Pulse Field — Comparison with a c -axis-cooled System —

Atsushi FUJIWARA^{*1}, Tatsuya TATEIWA^{*1}, Hiroyuki FUJISHIRO^{*1,†}, Takashi NAGAFUCHI^{*2},
Hidemi HAYASHI^{*2} and Tetsuo OKA^{*3}

Synopsis: The time evolutions and three-dimensional temperature profiles in a cryocooled superconducting bulk disk have been investigated using a finite element method (FEM) after applying pulse field magnetization (PFM). The bulk is either cooled down along the ab -plane through the brass support component and magnetized using a split-type coil, or cooled along the c -axis and magnetized using a solenoid coil. The temperature rise ΔT due to the magnetic flux intrusion in the case of the “ ab -plane cooled type” is experimentally small and the trapped field B_T^P is enhanced as compared to the “ c -axis cooled type”. The calculated temperatures $T^p(t)$ can effectively reproduce the measured $T(t)$ with an appropriate assumption of the heating area and total generated heat Q . The heating area is wider and the Q value is relatively smaller in the “ ab -plane cooled type” as compared to the “ c -axis cooled type”. These analytical results suggest that, in the “ ab -plane cooled type”, cooling along the high thermal-conductive direction in the bulk magnet and the increase in total heat capacity due to close contact of the bulk magnet and the brass support component are effective for reducing ΔT and enhancing B_T^P .

Keywords: bulk superconductor, pulse field magnetization, trapped field, temperature rise, heat propagation analysis

1. はじめに

RE-Ba-Cu-O 系バルク超伝導体中のピン止め中心となる第2相粒子の微細分散や, RE (Rare Earth, 希土類)元素の選択などにより, 臨界電流密度 J_c や捕捉磁場 B_T などの超伝導特性が向上し, 電流リードなどへの導体応用, 磁気浮上搬送などへの浮上応用, そして磁気分離装置などへの超強力磁石(超伝導バルク磁石)応用が期待されている¹⁾. そのうち超伝導バルク磁石を実現する方法として, 一般的には磁場中冷却着磁(Field Cooled Magnetization: FCM)が用いられ, スパッタリングカソードへの応用として室温空間に

5.2 T を発生する装置が報告されている²⁾. 一方 FCM と並んで, 超伝導転移温度 T_c 以下に冷却したバルクに 1 s 以下の強いパルス磁場を印加して磁束を捕捉させるパルス着磁(Pulse Field Magnetization: PFM)は, 超伝導マグネットを用いる必要がなく着磁装置がコンパクトで安価なため最近盛んに研究されている. PFM による捕捉磁場 B_T^P は, 反復着磁法(IMRA 法)や³⁾, 軟磁鉄ヨークの採用⁴⁾, バルクの温度を段階的に低下させながら PFM を行う方法(MPSC 法)⁵⁾, 渦巻き型コイルの利用⁶⁾などにより, 液体窒素温度(77.3 K)付近では FCM による捕捉磁場 B_T^{FC} とほぼ同等の値が得られている. しかし, さらに低温で PFM を行う場合, ピン止め力 F_p の増大によるピン止め損失の増大と比熱 C の減少により, バルクの温度上昇が大きく, 臨界電流密度 J_c が減少するため, 捕捉磁場 B_T^P は B_T^{FC} に比べて小さい. これまで本研究グループでは, パルス磁場印加時のバルク表面の温度と磁場の測定を系統的に行い, パルス着磁のメカニズムを発熱現象から明らかにしてきた⁷⁻¹⁰⁾. その結果から新しく改良型 MPSC 法(MMPSC 法)を提案し, Gd-Ba-Cu-O 系バルク超伝導体を用いて, これまでの PFM における捕捉磁場の最高値 3.80 T を上回る $B_T^P=5.20$ T の磁場をバルク表面に捕捉することに成功した^{11,12)}.

^{*1} Received June 2, 2006

岩手大学工学部材料物性工学科
〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5
Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka,
Iwate 020-8551, Japan

^{*2} 九州電力(株)総合研究所
〒815-8520 福岡県福岡市南区塩原 2 丁目 1-47
Kyushu Electric Power Co. Inc., 2-1-47 Shiobaru, Minami-ku,
Fukuoka 815-8520, Japan

^{*3} 新潟大学工学部工学力教育センター
〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐 2 之町 8050
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata 950-2181,
Japan

[†] E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp

一般的な PFM は、Fig. 1(a)に示すように超伝導バルクの底面(ab 面)を冷凍機の cold stage に接続して c 軸方向に冷却し、ソレノイド型のパルスコイルに挿入して着磁する(以降、"c-axis cooled type"と名付ける)。この方法では円盤状バルクを底面から冷却するため、1 台の冷凍機でバルクを 1 個しか冷却できず、しかもパルスコイルを取り除いた後にバルクの一面しか有効な磁極として利用できなかった。著者らはバルク磁石の広範な応用のためには、列状または面状に複数個配列したバルクを PFM により着磁する技術の開発が必要であると考えた。この場合には、Fig. 1(b)に示すようにバルクを ab 面(側面)方向から冷却し、スプリット型のパルスコイルに挿入してバルクに対して c 軸方向に磁場を印加する必要がある(以降、"ab-plane cooled type"と名付ける)。このタイプでは、パルスコイルを取り除いた後にバルクの両面を磁極として室温空間で利用できる。すでに 2 連型、5 連型バルク磁石を作製し、"c-axis cooled type"よりも捕捉磁場 B_T^P が大きいことを示した^{13,14)}。

本研究では、同一の Sm-Ba-Cu-O 系超伝導バルクを用いて、"ab-plane cooled type"と"c-axis cooled type"の配置に対してパルス着磁を行った実験結果(捕捉磁場、温度上昇)を比較した。さらに着磁の際の発熱・伝熱現象を熱伝導シミュレーションにより解析した。2つのタイプのパルス着磁後の伝熱現象の違いについて検討し、"ab-plane cooled type"バルク磁石の実用の可能性について考察した。

2. 実験方法

本研究では c 軸配向の Sm-Ba-Cu-O 系バルク(同和鉱業製: 直径 45 mm, 厚さ 15 mm: $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Sm123): $\text{Sm}_2\text{BaCuO}_5$ (Sm211)=1.0:0.3; Ag: 10 wt.%)を使用した。バルクは真空中でエポキシ樹脂含浸を施した後、表面の樹脂は温度応答を向上させるために取り除いた。Fig. 1(a)に示す"c-axis cooled type"では、バルク底面は軟磁鉄ヨークを介して Gifford McMahon (GM)サイクル He 冷凍機(アイシン精機)の cold stage に接続され、c 軸方向から冷却した。Fig. 1(b)に示す"ab-plane cooled type"では、バルクは ab 面(側面)方向から厚さ 6.5 mm、高さ 15 mm の真鍮部材を用いてネジで締め付けられ、真鍮部材の端部を He 冷凍機の cold stage に接続し ab 面方向から冷却した。両タイプとも伝導冷却によりバルク表面で 50 K に冷却した。バルク中心位置 PT での温度 T は直径 76 μm のクロメル-コンスタンタン熱電対を用いて、位置 PH での捕捉磁場 B_T^P はホールセンサ (F.W.Bell, Model BHT921)を用いて測定した。"ab-plane cooled type"においては 2 枚の軟磁鉄ヨーク付きスプリット型パルスコイルを、"c-axis cooled type"では 1 枚の軟磁鉄ヨーク付きソレノイド型パルスコイルを、それぞれ液体窒素で冷却して通電した。最大ピーク磁場が $B_{\text{ex}}=3.75\sim 6.40$ T の範囲のパルス磁場をバルクの c 軸方向

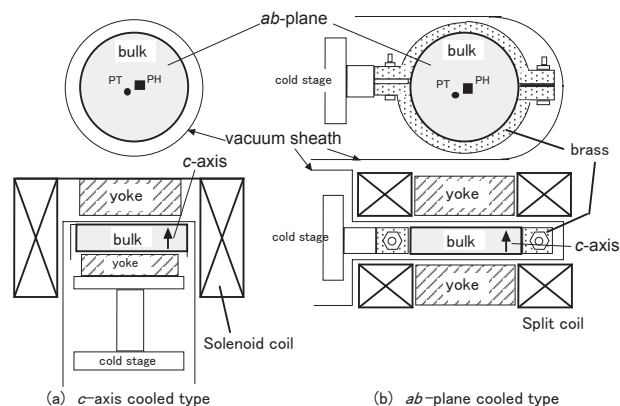


Fig. 1 The experimental setup around the Sm-Ba-Cu-O bulk and the pulse coil for the (a) "c-axis cooled type" and (b) "ab-plane cooled type".

に印加し、磁場印加直後の温度 $T(t)$ と捕捉磁場 B_T^P の測定を行った。着磁後に両タイプともパルスコイルを超伝導バルクから取り外した。 $B_{\text{ex}}(t)$ はパルス電源とパルスコイルの間にシャント抵抗を直列に接続し、デジタルオシロスコプを用いて測定した。"ab-plane cooled type"(スプリット型)及び"c-axis cooled type"(ソレノイド型)で使ったコイルが作るパルス磁場の立ち上がり時間は、コイルのインダクタンスと抵抗の違いのため、それぞれ $t_r=16$ ms, 12 ms であった。

3. 実験結果

Fig. 2 にパルス磁場 B_{ex} を印加した後に位置 PT で測定された温度の時間依存性 $T(t)$ を、"c-axis cooled type"と"ab-plane cooled type"の場合に対してそれぞれ示す。両タイプとも印加磁場 B_{ex} の増加とともに最大温度上昇 ΔT_{max} が増大するが、 $T(t)$ には大きな違いがある。すなわち、"ab-plane cooled type"の $T(t)$ は $t=2\sim 3$ s で最大値を示し、その後比較的速く温度が低下するのに対して、"c-axis cooled type"では $t=10$ s で $T(t)$ は最大値を示し、温度の低下も緩やかである。

Fig. 3 に両タイプで着磁した場合の捕捉磁場 B_T^P 及び、最大温度上昇 ΔT_{max} の印加磁場依存性を示す¹³⁾。 B_T^P は全ての印加磁場で"ab-plane cooled type"の方が大きく、 B_T^P が最大となる B_{ex} は"ab-plane cooled type"の方が高磁場側にシフトしている。また ΔT_{max} は"ab-plane cooled type"の方が小さく温度上昇が抑制される。これまでの検討では B_T^P が ΔT_{max} の低減と密接に関係しており⁹⁾、両タイプのバルク磁石における $T(t)$ や B_T^P の振る舞いの違いは、冷却方向の違い、熱伝導率の高い真鍮部材の有無やパルスコイルの違いなどが原因と考えられるが、この考察は次節以降で述べる。

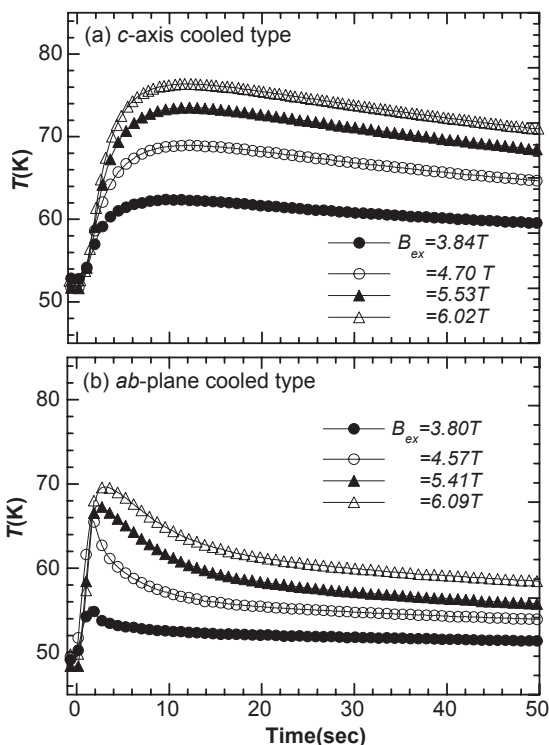


Fig. 2 The time evolution of the temperature $T(t)$ after applying various pulse fields B_{ex} for the Sm-Ba-Cu-O bulk at $T_s=50$ K magnetized by the (a) “c-axis cooled type” and (b) “ab-plane cooled type”.

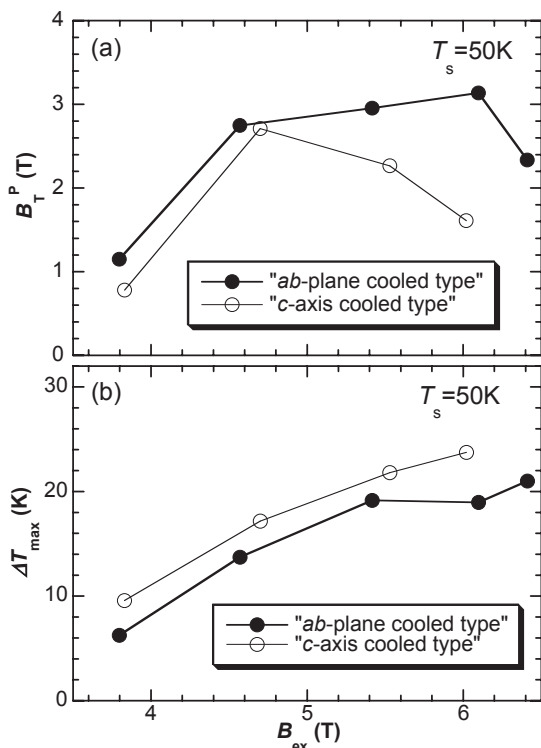


Fig. 3 (a) The trapped field B_T^P and (b) maximum temperature rise ΔT_{max} at the bulk center as a function of the applied field B_{ex} using the “ab-plane cooled type” and the “c-axis cooled type” bulk magnet.

4. 熱伝導シミュレーションによる解析

4.1 解析方法

熱伝導解析により，“c-axis cooled type”と“ab-plane cooled type”の実験で測定したバルク表面 PT での温度変化 $T(t)$ を再現する発熱量及び発熱分布を推定し，発熱後の 3 次元伝熱現象を考察した．有限要素法による熱伝導解析ソフトはフォトン(株)の PHOTO-series THERMO を用いた．基礎方程式は，以下の式で与えられる．

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = Q \quad (1)$$

ここで ρ はバルクの密度， C は比熱， κ は熱伝導率， Q は単位体積当たりの発熱量である．解析では円盤状バルクを半径方向に 10 分割，周方向に 20 分割，高さ方向に 6 分割した． ρ ， C ， κ は温度と共に変化するが，本解析では簡単のため 50 K での一定値（ $\rho (=5.94 \text{ g/cm}^3)$ ， $C (=136 \text{ J/kg/K})$ ， $\kappa_{ab} (=13.1 \text{ W/m/K})$ ，及び $\kappa_c (=3.38 \text{ W/m/K})$ ）を熱物性データベース¹⁵⁾から引用した．“ab-plane cooled type”におけるバルク周辺の真鍮部材は，バルク外周部に厚さ 6.5 mm，高さ 15 mm の真鍮リングが存在するとして解析を行った（50 K での真鍮の物性値：密度 $\rho=8.50 \text{ g/cm}^3$ ，比熱 $C=118.1 \text{ J/kg/K}$ ，熱伝導率 $\kappa=52.6 \text{ W/m/K}$ を用いた）．この場合のバルク外周と真鍮リング間の接触熱抵抗，“c-axis cooled type”におけるバルク底面と軟磁鉄ヨーク間及びコールドステージとの間の接触熱抵抗は過去の結果を用いた¹⁶⁾．

パルス着磁において発生する熱量 Q は，ピン止め点に磁束が捕捉される場合のピン止め損失 Q_p と，磁束が超伝導体内を粘性力に逆らって運動することによる粘性損失 Q_v の和（ $Q=Q_p+Q_v$ ）と考えられる¹⁷⁾．このうち Q_p は交流損失的な発熱と考えられ，これまでの検討で $M-H$ カーブから求められる損失とほぼ等しいことが分かっているが⁸⁾， Q_p や Q_v を解析的に求めるのは困難である．従って本解析では，総発熱量 Q_{si} をフィッティングパラメータとして扱った． Q_{si} は次式で表すことが出来る．

$$Q_{si} = q \cdot \int_0^t \theta(t) dt \quad (2)$$

ここで， q は発熱量仕事率（定数）， $\theta(t)$ は発熱の時間依存性である． $\theta(t)$ は実験的に求めることは困難なので，本解析では $\theta(t)$ が印加したパルス磁場 $B_{ex}(t)$ と同じ時間依存性を持つと仮定した．この仮定は，発熱の原因が磁場進入による Q_p と Q_v であると考えないと現実的な仮定であると言える¹⁶⁾．**Fig. 4** に両タイプで用いたコイルによりバルクの

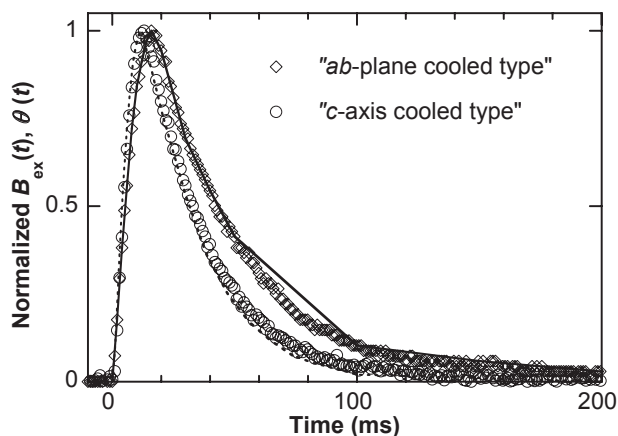


Fig. 4 The normalized applied field $B_{ex}(t)$ of the split coil (“*ab*-plane cooled type”) and the solenoid coil (“*c*-axis cooled type”). The time dependencies of the heat generation $\theta(t)$ used in the analysis are also shown by the solid and dotted lines, respectively.

中心位置に発生するパルス磁場の時間依存性 $B_{ex}(t)$ を規格化して示す。前述したように、“*ab*-plane cooled type” ($t_r=16$ ms) でのパルス磁場は“*c*-axis cooled type” ($t_r=12$ ms) よりもわずかにゆっくりと立ち上がり、パルス磁場の立ち下がりも遅いことが分かる。 $\theta(t)$ は **Fig. 4** 中に示す折れ線で近似した。PFM 法では磁束はバルクに外周部から侵入するため、発熱はバルク外周部ほど大きいと考えられる¹⁶⁾。解析では円筒対称に発熱していると仮定し、半径方向の 10 分割のうち外側から何層までに発熱が生じているか（発熱領域）と総発熱量 Q_{si} をパラメータとして最適化を行った。発熱領域の各要素には Q_{si} を均等に分散させて熱を与えた。

4.2 解析結果

Fig. 5 に、 $T_s=50$ K で“*ab*-plane cooled type”においてパルス磁場 $B_{ex}=5.5$ T を印加した場合の、バルク表面中心 (PT) での温度変化の測定結果 $T(t)$ と解析結果 $T^*(t)$ を示す。発熱領域の大きさと総発熱量 Q_{si} を様々に変化した結果、発熱領域を 10 層中最外層から 7 層とし、総発熱量を $Q_{si}=487$ J とすることにより、解析結果 $T^*(t)$ は測定結果 $T(t)$ をほぼ再現することが出来た。発熱は 100 ms 程度の短時間に終了し、しかも発熱量が使用した冷凍機の冷却能力 (2W at 40 K) に比べ 2 桁以上大きいことを考慮すると、パルス着磁における発熱はほぼ断熱的に起こっていると考えることが出来る⁸⁾。この場合、総発熱量はパルス磁場印加後の最大温度上昇 ΔT_{max} と比熱 C を用いて次式から実験的にも算出することが出来る⁹⁾。すなわち、

$$Q_{ex} = \int_{T_s}^{T_s + \Delta T_{max}} C(T) V_{bulk} dT \quad (3)$$

ここで T_s ($=50$ K) はバルクの初期温度、 V_{bulk} はバルクの体積である。(3)式から得られた総発熱量は $Q_{ex}=439$ J であり、フィッティングで最適化した発熱量 Q_{si} とほぼ一致した。このことは発熱がバルク外周部で起こっていても、数秒の間に熱はバルク全体に十分に拡散し、熱容量としてはバルク全体が寄与していることを示している。**Fig. 5** 中には比較のために、真鍮部材をバルク超伝導体で置き換えたと仮定し、同じ発熱分布と発熱量を与えた場合の解析結果を点線で示した。この場合には $T^*(t)$ の最高温度が約 2 K 高く、立下りが明らか緩やかになる。このことは高い熱伝導率を持つ真鍮部材の存在による熱はけの向上と熱容量の増大が、バルクの温度上昇を低減させていることを示唆している。すなわち、バルク外周部で発生した熱の一部が真鍮部材に吸収されたと考えることが出来る¹⁰⁾。

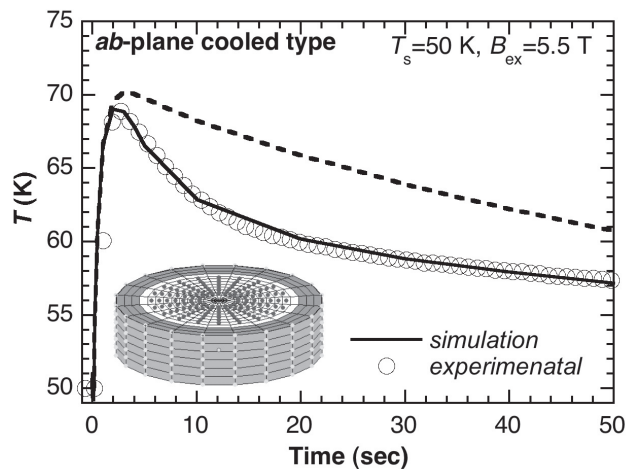


Fig. 5 The time dependencies of the measured temperature $T(t)$ and the calculated temperature $T^*(t)$ for the “*ab*-plane cooled type” after applying $B_{ex}=5.5$ T at 50 K. The dotted line shows $T^*(t)$ in the case without brass support component under the same heat generation.

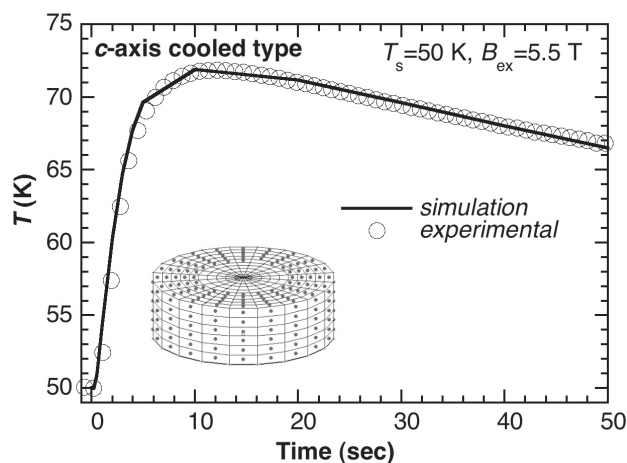


Fig. 6 The time dependencies of the measured temperature $T(t)$ and calculated temperature $T^*(t)$ for the “*c*-axis cooled type” after applying $B_{ex}=5.5$ T at 50 K.

Fig. 6 に、 $T_s=50$ K で“c-axis cooled type”において、パルス磁場 $B_{ex}=5.5$ T を印加した場合のバルク表面中心(PT)での温度変化の測定結果 $T(t)$ と解析結果 $T^*(t)$ を示す。発熱領域と総発熱量 Q_{si} を種々に変化させて解析した結果、発熱領域はバルク周辺部の 10 層中外層の 5 層に存在し、 $Q_{si}=533$ J の場合に $T^*(t)$ は測定結果 $T(t)$ をほぼ再現することが出来た。このときの Q_{si} は、(3)式から得られた総発熱量 $Q_{ex}=517$ J とほぼ等しい値となった。

4.3 3次元温度分布の推定

4.2 で最適化された発熱領域の大きさと総発熱量 Q_{si} を用いて 3次元温度分布を計算し、両タイプの熱伝達の様子を考察した。Fig. 7 に“ab-plane cooled type”において、パルス磁場 $B_{ex}=5.5$ T を印加した後のバルク表面の半径 r 方向の温度 $T^*(t, r)$ の時間依存性を示す。 $T=50$ K のバルクはパルス磁場を印加した直後($t=0.5$ s)に $r=12$ mm で温度が 74 K まで上昇し、その後 $t=20$ s で 60 K まで低下した。バルク中心($r=0$)での $T(t)$ は $t=2$ s でピークを示し、その後徐々に低下した。 $t=20$ s 以降は r 方向の温度勾配がなくなり、均一に温度が低下し、約 10 分後にはバルク全体が 50 K になった。一方、真鍮部材($r=25$ mm)は $t=10$ s で最大 $T=60$ K に達し、その後徐々に温度が低下した。解析では半径方向の 10 層中の外側の 7 層の広い範囲($6.8 < r < 22.5$)で発熱が起こっているが、真鍮部材への熱伝達が有効であることが明らかになった。

Fig. 8 に“c-axis cooled type”において、パルス磁場 $B_{ex}=5.5$ T を印加した後のバルク表面の半径方向の温度 $T^*(t, r)$ の時間依存性を示す。“c-axis cooled type”では、接触熱抵抗の存在のため、バルク内部の温度変化は c 軸方向にはほとんど生じないことが解析結果から得られた。パルス磁場を印加した直後にバルク外周部の温度は 82 K まで上昇するが、 $t=20$ s で温度は低下し 71 K になった。一方、中心部の温度は徐々に上昇して $t=10$ s でピークを示し、その後徐々に低下する。 $t=20$ s 以降は r 方向の温度勾配もなくなり、均一に温度が低下し、約 15 分後にはバルク全体が 50 K になった。解析では半径方向の 10 層中の外側の 5 層($11.3 < r < 22.5$)で発熱し、“ab-plane cooled type”より外周部付近で多くの発熱が起こっていると考えられる。発生した熱は熱伝導率の低い c 軸方向からのみ冷凍機のクールドステージへ排出されるので、温度変化がゆっくりと進行することが分かる。

5. まとめ

本研究では、直径 45 mm の Sm-Ba-Cu-O 系バルクを同一温度で“ab-plane cooled type”と“c-axis cooled type”でセットし、同一強度のパルス磁場を印加した場合の伝熱現象を実験と解析から求めた。その結果、以下の点が明らかになった。

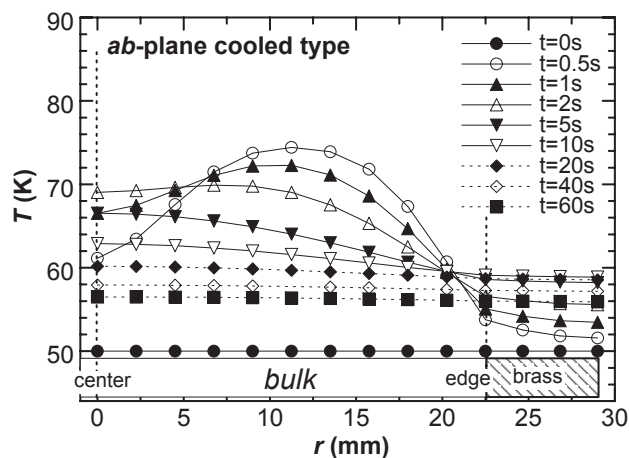


Fig. 7 The calculated temperature profiles $T^*(t)$ on the surface of the bulk in the radius direction (r -direction) in the “ab-plane cooled type” after applying pulse field magnetization, $B_{ex}=5.5$ T at 50 K.

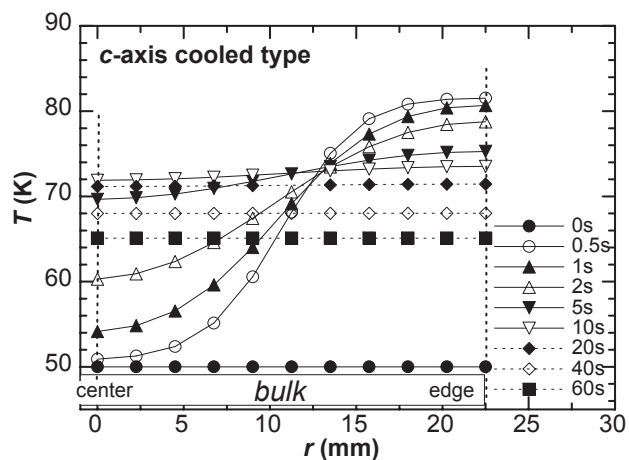


Fig. 8 The calculated temperature profiles $T^*(t)$ on the surface of the bulk in the radius direction (r -direction) in the “c-axis cooled type” after applying pulse field magnetization, $B_{ex}=5.5$ T at 50 K.

- 1) 同一強度のパルス磁場を印加した場合の測定結果から、“ab-plane cooled type”は“c-axis cooled type”に比べて温度上昇 ΔT_{max} が抑制され、捕捉磁場 B_T^P が向上することが明らかになった。“ab-plane cooled type”ではバルク表面($T_s=50$ K)で最大捕捉磁場 $B_T^P=3.2$ T を実現し、磁気分離装置などへの適用に向けた複数のバルク超伝導体の着磁技術として有望な着磁方法であると言える。
- 2) 熱伝導解析により、両タイプとも総発熱量 Q_{si} と発熱分布を最適化することにより、パルス磁場印加後の温度変化 $T(t)$ の実測値を再現することが出来た。この際使用した Q_{si} は、温度上昇 ΔT_{max} と比熱 C から実験的に求めた総発熱量 Q_{ex} と良い一致を示した。
- 3) “ab-plane cooled type”ではバルク外周に装着した真鍮

部材の存在による熱はけの向上と熱容量の増大が, “c-axis cooled type”に比べて温度上昇 ΔT_{\max} が抑制される原因であることが熱伝導解析から明らかになった. このことが, “ab-plane cooled type”は“c-axis cooled type”に比べて捕捉磁場 B_T^p が向上する原因と考えられる.

- 4) 実験装置の制約からパルス形状やバルクと冷凍機の cold stage との距離などは完全に同一には出来なかったが, 同一バルクを用いて可能な限り条件を揃えることで“c-axis cooled type”と“ab-plane cooled type”の伝熱現象の違いを実験的及び解析的に明らかにすることが出来た.
- 5) たとえバルク中心でのパルス磁場強度 B_{ex} が同一でも, 両コイルが作る局所的な磁場分布 $B_{ex}(t, r)$ は異なっており, 発熱現象や磁場捕捉に影響を与えている可能性がある. これらの影響についての検討が今後の課題である.

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(No. 17560001)および, 夢県土いわて戦略的研究推進事業(平成16~18年度)から支援を受けて行われた. 誌面を借りて関係者への謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi and S.I. Yoon, “Melt-processed light rare earth-Ba-Cu-O”, Supercond. Sci. Technol. **9** (1996) 1015-1033
- 2) Y. Yanagi, T. Matsuda, H. Hazama, K. Yokouchi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka, H. Ikuta and U. Mizutani, “Generation of strong magnetic field using 60 mm ϕ superconducting bulk magnet and its application to magnetron sputtering device”, Physica C **426-431** (2005) 764-769.
- 3) U. Mizutani, T. Oka, Y. Itoh, Y. Yanagi, M. Yoshikawa and H. Ikuta, “Pulsed-field magnetization applied to high- T_c superconductors”, Appl. Supercond. **6** (1998) 235-246.
- 4) H. Ikuta, H. Ishihara, Y. Yanagi, Y. Itoh and U. Mizutani, “Extracting the utmost from the high performance of Sm-Ba-Cu-O bulk superconductors by pulse field magnetizing”, Supercond. Sci. Technol. **15** (2002) 606-612.
- 5) M. Sander, U. Sutter, R. Koch, M. Kläser, “Pulsed magnetization of HTS bulk parts at T<77K” Supercond. Sci. Technol. **13** (2000) 841-844.
- 6) T. Ida, H. Matsuzaki, Y. Akita, M. Izumi, H. Sugimoto, Y. Hondou, Y. Kimura, N. Sakai, S. Nariki, I. Hirabayashi, M. Miki, M. Murakami and M. Kitano, “Magnetization properties for Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors with a couple of pulsed-field vortex-type coils”, Physica C **412-414** (2004) 638-645.
- 7) H. Fujishiro, T. Oka, K. Yokoyama and K. Noto, “Time evolution and spatial distribution of temperature in YBCO bulk superconductor after pulse field magnetizing”, Supercond. Sci. Technol. **16** (2003) 809-814.
- 8) H. Fujishiro, K. Yokoyama, M. Kaneyama, T. Oka and K. Noto, “Estimation of generated heat in pulse field magnetizing for SmBaCuO bulk superconductor”, Physica C **412-414** (2004) 646-650.
- 9) H. Fujishiro, M. Kaneyama, K. Yokoyama, T. Oka and K. Noto, “Generated heat during pulse field magnetizing for REBaCuO (RE=Gd, Sm, Y) bulk superconductors with different pinning ability”, Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 158-165.
- 10) H. Fujishiro, K. Yokoyama, M. Kaneyama, T. Oka and K. Noto, “Effect of metal ring setting outside HTSC bulk disk on trapped field and temperature rise in pulse field magnetizing”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 3762-3765.
- 11) H. Fujishiro, M. Kaneyama, T. Tateiwa and T. Oka, “A Record High Trapped Field by Pulse Field Magnetization Using GdBaCuO Bulk Superconductor”, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1221-L1224.
- 12) H. Fujishiro, T. Tateiwa, A. Fujiwara, T. Oka and H. Hayashi, “Higher trapped field over 5 Tesla on HTSC bulk by modified pulse field magnetizing”, to be published in Physica C (2006)
- 13) H. Fujishiro, A. Fujiwara, T. Tateiwa, T. Oka and H. Hayashi, “New Type Superconducting Bulk Magnet by Pulse Field Magnetization with Usable Surface on Both-sides in Open Space”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 1007-1010.
- 14) A. Fujiwara, T. Tateiwa, H. Fujishiro, H. Hayashi, T. Nagafuchi and T. Oka, “Development of five aligned superconducting bulk magnets by pulse field magnetizing”, to be published in Physica C (2006)
- 15) see, <http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/database.html>
- 16) H. Fujishiro, S. Kawaguchi, M. Kaneyama, A. Fujiwara, T. Tateiwa and T. Oka, “Heat propagation analysis in HTSC bulks during pulse field magnetization”, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) S540-S544.
- 17) 松下照男, 磁束ピンニングと電磁現象, 産業図書, 1994

藤 原 篤 昭和57年2月22日生. 平成16年岩手大学工学部材料物性工学科卒業. 平成18年同大学院工学研究科博士前期課程(材料物性工学専攻)修了. 平成18年4月よりアルプス電気(株)勤務. 専門は超伝導バルク応用. 低温工学協会会員.

立 岩 達 也 昭和58年2月24日生. 平成17年岩手大学工学部材料物性工学科卒業. 現在, 同大学院工学研究科博士前期課程(材料物性工学専攻)2年在学中. 専門は超伝導バルク応用. 低温工学協会会員.

藤 代 博 之 昭和32年3月8日生. 昭和55年東北大学工学部電子工学科卒業. 昭和60年同大学院工学研究科博士後期課程(電子工学専攻)修了. 九州工業大学情報工学部助手, 岩手大学工学部材料物性工学科助教授を経て平成18年教授, 現在に至る. 専門は電子材料学, 応用物理学. 特に超伝導材料や熱電変換材料の開発と応用に関する研究に従事. 低温工学協会, 日本物理学会, 応用物理学会会員. 工学博士.

永 瀧 尚 志 昭和45年10月9日生. 平成3年3月久留米工業高等専門学校卒業. 同年4月九州電力(株)入社. 現在, 同総合研究所電力貯蔵技術グループで超伝導研究に従事. 電気学会会員.

林 秀 美 昭和 31 年 5 月 9 日生。昭和 54 年 3 月九州工業大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月九州電力（株）入社。平成 16 年九州大学大学院博士後期課程単位取得退学。現在、同社総合研究所電力貯蔵技術グループ長。超電導およびパワーエレクトロニクスの研究開発に従事。2001 年電気学会進歩賞。低温工学協会、電気学会会員。博士（工学）。

岡 徹 雄 昭和 30 年 12 月 3 日生。昭和 54 年京都大学工学部金属加工学科卒業。同年アイシン精機（株）入社。平成 14 年～16 年（財）いわて産業振興センター研究員（出向）を経て、平成 18 年 2 月、新潟大学工学部助教授。現在に至る。主に高温超伝導の材料と応用研究に従事。低温工学協会、日本機械学会、電気学会、日本金属学会会員。博士（工学）。