パルス磁場によるバルク高温超電導磁石の磁化特性評価

学生員 福岡 克弘 (能開大)

正 員 橋本 光男 (能開大)

Measurement of Magnetization Property of Bulk High- T_c Superconducting Magnet
by Pulse Magnetic Field

Katsuhiko Fukuoka, Student Member, Mitsuo Hashimoto, Member (Polytechnic University)

We studied pulse magnetic field using a small coil to magnetization of the high- T_c superconductor (HTSC), and assessed its pulse magnetization property. Because the HTSC bulk material has grains of various sizes, its magnetic properties are not uniform. Therefore, it is important for application of the HTSC to develop a nondestructive measurement method in order to evaluate characterization of magnetic properties of the superconducting bulk materials. We developed a magnetic field visualization system that enables to measure magnetic field using a Hall device probe and that produces visual images of the magnetic field on a computer display. The domains of large value of magnetization coincide with those of the grains. And we can see that the negative magnetic field is around the domain of the large magnetization value. Pulse magnetization method using the small coil can magnetize the HTSC without the field-cooling.

キーワード：パルス磁場、バルク高温超電導体、超電導磁石、結晶粒、磁場可視化システム

1. はじめに

MPMG(Melt Powder Melt Growth)法による半溶融凝固法により作製したイットリウム系超電導体(YBCO)は、123相中に微細分散した211相が有効なピン止め点として働くため、液体窒素温度(77K)、1Tにおいて $1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ を越える高臨界電流密度の特性を持つ⁽¹⁾⁽²⁾。このような高温超電導体の応用の一つとして、超電導体を磁化させたバルク超電導磁石が考えられている⁽³⁾。このバルク超電導磁石は、吸引力を利用した磁気浮上などでの使用が提案されている⁽⁴⁾。このような応用では、バルク高温超電導体を高い値に磁化させる必要がある。高温超電導体を磁化させるには、高磁場発生装置を用いてフィールドクーリングする方法が一般的である。これに超電導コイルを用い、容易に高磁場が得られるが、コストが高い点や超電導コイルのクエンチを防ぐため、磁場の値を上下するのに時間がかかるといった問題がある。また、図1のような磁気浮上システムで磁化用に常電導マグネットを用いた場合、十分な磁束を得るためにはこの励磁コイルが大型となり、その結果磁気回路も大型になるため設計上のネックとなる。

そこで、小型の励磁コイルに強力なパルス電流を流す

図1 吸引力を利用した磁気浮上システム

Fig.1. System of magnetic levitation using sucking force.

ことによるパルス磁場で、高温超電導体を磁化する方法について検討する。さらに、パルス磁場による磁化方法が実用化されれば、フィールドクーリングのプロセスを省略することができる。このためシステムの簡素化、さらにシステムの軽量化が可能となる。そこで本研究では、ゼロフィールドクーリングした高温超電導体について、

パルス励磁による磁化特性を求め、パルス励磁の有用性の確認を目的としている。

本研究で使用したYBCOバルク超電導体は、必ずしも均一な材料ではなく結晶粒を持ち、また材料内での割れなどを含んでいる。このため材料の特性は、一点で評価することはできなく、試料全面について評価する必要がある。そこで我々は、磁場可視化計測装置^(5~7)を用いて、超電導体の残留磁束分布を計測し評価した。

2. 実験方法

高温超電導体に、パルス磁場を励磁するシステムを図2に示す。このパルス磁場発生装置は、オイルコンデンサバンク、パルス励磁コイル、発生スイッチで構成されている。コンデンサバンクの最大容量は、 $2000\mu\text{F}$ である。パルス励磁コイルは、直径 1.6mm の銅線を 220 ターン巻いたもので、外径が 105mm 内径が 75mm の円筒コイルを使用した。このコイルは、 1A の励磁電流でコイルの中心に 25Oe を発生することができる。超電導体試料はコイルの中央に置き、コイルと共に液体窒素により冷却した。また、励磁電流の波形はシャント抵抗を用いて、オシロスコープにより計測した。

図2 パルス発生装置の構成図

Fig.2. Diagram of pulse forming network.

図3は、残留磁場を計測するための磁場可視化システムである。この計測システムは、センサを駆動するX-Yテーブルとそのコントローラ、磁束計測用センサとして低温用ホールセンサ(BHT-921型：ベル社)とそのアンプおよび

図3 磁束計測システム

Fig.3. Block diagram of magnetic flux measurement system.

(a) 結晶粒小 (厚さ15mm)

(b) 結晶粒大 (厚さ15mm)

(c) MPMG II (厚さ2mm)

図4 高温超電導体の偏光顕微鏡写真

Fig.4. Micrographs of HTSC.

計算機で構成されている。使用したホールセンサは外径 6.35mm の円盤形で、その中の検出部は直径 0.5mm である。この磁気感度は 0.8mV/kgauss で、直線性は 30kgauss 以下で $\pm 1\%$ 以下である。ホール出力電圧の温度係数は $\pm 100\text{ppm}$ 以下である。ホールセンサは液体窒素温度中で使用するため、一度オフセットの補正を行えば、再度補正をする必要はない。ホールセンサと超電導体表面とのギャップは、 0.5mm とした。ホールセンサが検出する磁束は、垂直成分のみである。計算機の役割は、X-Yテーブルの制御およびホールセンサの出力を増幅した信号をA/D変換ボー

ドを通しての入力、さらに取り込んだデータから磁束のフルカラー画像を計算し、それをディスプレイ上に出力することである。

図4に試験に用いた超電導材表面の偏光顕微鏡による写真を示す。これらの高温超電導体は、MPMG法により製造したYBCO超電導体である。図の(a)は結晶粒が小さい試験片(以下結晶粒小と呼ぶ)、(b)はシーディング(種埋め)を行い試料表面に結晶粒を大きく成長させた試験片(以下結晶粒大と呼ぶ)、(c)は二方向温度勾配制御法⁽⁶⁾を用いて作成しC軸が板面にほぼ平行に配向している結晶粒を持つ試験片(以下MPMGⅡと呼ぶ)である。試験片の大きさは、結晶粒小と結晶粒大の試料が40mm×40mm×15mmのバルク材。MPMGⅡの試料が厚さ15mmの試料から表面のみを切り出した40mm×40mm×2mmである。これらの図より、高温超電導体の表面は必ずしも均一ではなく、結晶粒界やクラック等が存在することが判る。

3. 実験結果と考察

<3・1> YBCO超電導体のパルス磁化による残留磁束分布 図5に励磁コイルに印加したパルス電流の波形を示す。(a)はコンデンサバンクの容量を1000 μ F、(b)は2000 μ Fとしたときの波形である。コンデンサバンクの

(a) コンデンサ容量 1000 μ F

(b) コンデンサ容量 2000 μ F

図5 パルス電流波形

Fig.5. Pulse current waves.

図6 結晶粒小のパルス磁化特性

Fig.6. Pulse magnetization property of small grain sample.

図7 結晶粒大のパルス磁化特性

Fig.7. Pulse magnetization property of large grain sample.

容量を1000 μ Fとしたときのパルス幅は5.76msecであり、2000 μ Fとしたときのパルス幅は8.16msecである。波形はほぼ半波のサイン波である。

それぞれの試料でパルス磁化により試料内部にトラップされる残留磁束の分布を計測し、それをフルカラー表示した結果を、図6(結晶粒小)、図7(結晶粒大)、図8(MPMGⅡ)に示す。これらの画像は、50mm×50mmを計測したもので画像の周囲は励磁コイルの内部に接し、超電導体

Maximum value 0.44kgauss
(Peak pulse field 46.0kOe)

図8 MPMG II のパルス磁化特性
Fig.8. Pulse magnetization property
of MPMG II sample.

(40mm×40mm)は中央に位置している。測定はX方向(横方向)に35点、Y方向(縦方向)に32点計測している。計測開始点(X=1,Y=1)は図の左下で、計測終了点(X=35,Y=32)は図の右上である。それぞれの画像で磁場のカースケールは、最大磁束を±Maxとして表示し、その最大値を図中に示している。印加するパルス磁場は、コンデンサバンクの容量を1000 μ Fとし最大磁場が46.0kOe、パルス幅が5.76msecである。

これらの垂直成分の磁束分布の図から、正の高い値の磁束(パルス磁場方向を正とする)と、値は小さいが一部の領域に負の磁束が観測された。図中に示している磁化の最大値は、パルス磁場のピーク値に比べ十分小さい。このことは、パルス磁場のピーク時では臨界磁場を越え超電導状態ではない。そして、パルスがピークを越え減少する過程において、外部磁場は超電導特性の良い領域から臨界磁場以下となり、外部磁場をトラップしていくと考えられる。しかし、クラックや結晶粒界などの臨界磁場の低い領域が存在すると、磁場がかなり減衰しなければ超電導状態になれない。しかし、外部磁場がゼロに近づいても、近くにある特性の良い領域が正に磁化しているため、そのループ磁束が加わりその領域では負の磁束分布になる。従って、その領域では負のループ磁束をトラップすることになり、負の磁束が観測されると考えられる。

また図7の結晶粒大の図を見ると、図4の試料の左中央部に見られる、結晶粒中に大きなクラックの存在する箇所には負の磁束が観測される。次に、図8の厚さ2mmのMPMG IIの試料に着目すると、厚さ15mmの結晶粒大や結

(a) X-axis

(b) Y-axis

図9 X軸・Y軸の磁束密度

Fig.9. Magnetic flux density of X-axis, Y-axis.

晶粒小に比べ磁化の最大値は低くなった。これは、結晶粒大や結晶粒小の試料は厚みがあるため、結晶粒は板厚方向にも成長しているが、MPMG IIの試料は厚みが薄い分、成長した結晶粒の厚みも薄い。そのため、高い値の磁束をトラップできない。また、結晶粒大と結晶粒小の試料を比べると、結晶粒大は全体に均一に磁化している。しかし、磁化の最大値を見ると結晶粒小の方が大きい。これは、結晶粒小の試料には一部(試料上部中央)に特に臨界磁場の高い結晶粒が存在するためである。この結果から判るように、試料の表面写真の結晶粒やクラックのパターンとほぼ同じ磁化分布が得られた。しかし、特性の良い結晶粒が成長しているかどうかは、表面観察からだけでは判らないが、このパルス磁化による可視化計測により評価することができる。

図9に示すのは、図6～8の図中に示すXX線およびYY線での線分布である。図9の(a)はX方向、(b)はY方向の線分布である。この図より、試料内にトラップされる残留磁

Maximum value 1.80kgauss
(Peak pluse field 46.0kOe)
(a) コンデンサ容量 1000 μ F

Maximum value 1.76kgauss
(Peak pluse field 47.5kOe)
(b) コンデンサ容量 2000 μ F

図10 パルス幅の違いによる磁化特性分布
Fig.10. Distribution of magnetization property
by various pulse widths.

束の値は一定ではなくばらつきがあることが判る。そして、結晶粒界およびクラック等の分布している臨界磁場の低い領域は、印加磁場と逆の負の値の磁束が観測される。また(b)図を見ると、結晶粒小は残留磁束の値が部分的に高くなり、そのばらつきが大きいことが判る。

<3・2> 測定条件の比較 図10に示すのは、コンデンサバンクの容量を変化させ、印加するパルス磁場のパルス幅の違いによる残留磁束の分布の様子を比較した図である。測定に用いた試料は結晶粒小である。(a)のパルス幅は5.76msecであり、(b)は8.16msecである。印加したパルス磁場の最大値は、(a)が46.0kOe、(b)が47.5kOeとほぼ同じ値である。これらの図を比較すると、残留磁束の分布の様子並びに残留磁束の最大値は、印加するパルス磁場のパルス幅を変えても、ほぼ同じものになった。

図11は、印加するパルス磁場の最大値の違いによる比較を行った図である。パルス幅は全て8.16msecである。測

Maximum value 1.58kgauss Maximum value 1.76kgauss
(a) Peak pluse field 15.6kOe (c) Peak pluse field 47.5kOe

Maximum value 1.87kgauss Maximum value 1.52kgauss
(b) Peak pluse field 31.8kOe (d) Peak pluse field 64.0kOe

図11 ピーク磁場の違いによる磁化特性分布
Fig.11. Distribution of magnetization property
by various peak fields.

Maximum value 1.82kgauss
(Peak pluse field 22.8kOe)
(a) パルス磁化

Maximum value 1.72kgauss
(Applied field 25.0kOe)
(b) 直流磁化 (フィールドクーリング)

図12 パルス磁化と直流磁化の比較
Fig.12. Comparison with pulse magnetization
and DC magnetization.

定に用いた試料は結晶粒小である。これらの図から、印加するパルス磁場の最大値が大きいほど、印加磁場と同じ正の値で磁化している領域が少なくなり、負の値で磁化している領域が多くなっている。また残留磁束の最大値は、(b)の印加したパルス磁場の最大値が31.8kOeのときに最も高い値となっている(1.87kgauss)。このことから高温超電導体を磁化するには、パルス磁場強度に最適値が存在することが判った。

<3・3> パルス磁化と直流磁化の比較 図12の(a)にパルス励磁による残留磁束の分布と、(b)に超電導コイルを用いた高磁場発生装置による直流励磁の残留磁束の分布を示す。測定に用いた試料は結晶粒小である。超電導コイルを用いた高磁場発生装置による計測は、フィールドクールにより行った。パルス磁化の測定条件は、印加するパルス磁場の最大値が22.8kOe、パルス幅が5.76msecである。高磁場発生装置による直流磁化の印加磁場は25.0kOeである。これらの図からパルス励磁、高磁場発生装置による直流励磁の残留磁束の最大値は、ほぼ同じ値となった。しかし、残留磁束の分布の様子を見ると、パルス磁化は直流磁化に比べ、負の値で磁化する領域が多く正の値で磁化する領域が少ないことが判る。以上のことより、試料の上部中央のような臨界磁場が高く特性の優れた領域を切り出すなどして使用することにより、磁気浮上システムに用いる強力な超電導磁石をパルス励磁により磁化できることが判った。

4. 結論

吸引力を利用した磁気浮上システムにおいて、バルク高温超電導磁石の応用が検討されている。この高温超電導磁石の磁化に、小型軽量であるパルス磁化の適用性を検討した。得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) パルス励磁により、フィールドクーリングと同程度の磁化が可能であることが確認できた。

(2) 特性が不均一なバルク高温超電導体において、負の磁化領域が存在した。また、ピーク印加磁場が高くなると負の磁化領域が増える傾向が見られた。

(3) パルス励磁により超電導体を磁化するには、印加するパルス磁場強度に最適値が存在することを確認した。

(4) 小型の励磁コイルを用いたパルス磁化によって、高温超電導体を十分に磁化できることを確認した。

ここで本実験に使用した高温超電導体は、超電導磁石用に開発されたものではなく、結晶粒界やクラック等も含む一般的な高温超電導材のバルク試料である。そこで、高温超電導体を磁石として応用する場合は、特性の均一なものを開発するか又は、本手法の測定により特性の良い結晶粒を切り出して使用することが考えられる。吸引力を利用した磁気浮上システムに、バルク高温超電導磁石を考える場合、パルス励磁は励磁コイルが小型軽量と

なるため、有用な手法となることが確認できた。

本研究において、高温超電導体試料の提供、並びに種々御援助いただいた国際超電導産業技術研究センターの村上雅人室長および樋口天光研究員に謝意を表する。

(平成7年9月18日受付、同8年2月19日再受付)

文 献

- (1) H.Fujimoto, M.Murakami, S.Gotoh, N.Koshizuka, T.Oyama, Y.Shiohara and S.Tanaka : *Advances in Superconductivity II*, p.285 (Springer-Verlag, Tokyo, 1990)
- (2) M.Murakami, S.Gotoh, H.Fujimoto, K.Yamaguchi, N.Koshizuka and S.Tanaka : *Supercond. Sci. Technol.* 4 S43 (1991)
- (3) S.Gotoh, M.Murakami, N.Koshizuka and S.Tanaka : *Physica B*, 165, 1379 (1990)
- (4) H.Kitahara, H.Ohsaki and E.Masada : *International Symposium of Superconductivity (ISS '94, 1994)*
- (5) 福岡克弘、橋本光男、「高温超電導体の磁場可視化計測による材料特性評価」、日本非破壊検査協会、秋季大会、pp.257-260 (1993-10)
- (6) 橋本光男、福岡克弘、「高温超電導体の可視化計測による磁化特性評価」、電気学会、マグネティックス研究会、資料番号(MAG-93-166), pp.7-15 (1993)
- (7) 福岡克弘、橋本光男、「磁場可視化計測による高温超電導体の材料特性評価」、電学論A, pp.213-218 (平7-3)
- (8) N.Sakai, M.Murakami, H.Takaichi, K.Kondoh and N.Koshizuka : *Advances in Superconductivity V*, p.569 (Springer-Verlag, Tokyo, 1992)

福岡 克 弘 (学生員) 1971年12月23日生まれ。1994年3月職業能力開発大学校電気工学科卒業。1996年3月同大学校研究課程工学研究科電気情報専攻修了。同年4月東京職業能力開発短期大学校電気技術科講師、現在に至る。

橋 本 光 男 (正員) 1950年12月11日生まれ。1972年茨城大学工業短期大学部電気工学科卒業。1976年同電子工学科卒業。1971年東京大学工学部、文部技官、助手。1990年職業能力開発大学校電気工学科助教授。1995年同教授、現在に至る。工学博士。