

# FCM 法による GdBaCuO 系超電導バルクの捕捉磁場特性

平成 21 年度入学 20209058 藤代研究室 細川潤基

## I. Introduction

高温超電導体バルクは、主成分である c 軸配向した  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (123 相) の超電導擬似単結晶に、磁束ピン止め中心となる非超電導相  $\text{RE}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_5$  (211 相) や機械的特性向上のための Ag の粉末等を微細分散させた複合材料である。一般的な超電導体バルクは磁場を捕捉(着磁)するピン止め力が強く、従来の永久磁石(NdFeB 系; 0.5T)に比べ、はるかに強い磁場(数~10T 級)の発生源として磁気浮上や磁気分離、MRI、船舶用モータ等に用いられる。着磁方法としては、磁場中冷却着磁法(FCM)やゼロ磁場中冷却着磁法(ZFC)、パルス着磁法(PFM)が挙げられる。FCMは、静的外部磁場を印加しつつ  $T_c$  以下に冷却し、バルクに磁場を捕捉させた後、外部磁場を取り除く(減磁)方法で、最も高い捕捉磁場を得ることが出来る。

本研究では、高温超電導体バルクの実使用温度領域(30~50K)で高い捕捉磁場の実現できるバルク作製条件を明らかにする目的で、液体窒素温度 77K で磁束ピン止め特性が異なるバルクや 211 相の割合が異なるバルクの捕捉磁場特性を測定した。

表.1 バルク試料の詳細

## II. Experimental procedure

表 1 に実験に使用したバルク試料を示す。NSC-3 と 4 は 77K での捕捉磁場がそれぞれ 1.5T と 1.0T と特性が異なり、低温側で捕捉磁場特性に変化があるか調べる。また超電導相と常伝導相の組成比を変化させた時の捕捉磁場特性を調べるために、NSC-5 と 6 は 211 相の仕込み量を標準仕込み量である 25mol% からそれぞれ 20mol% と 30mol% に変化させてある。試料は全て新日鐵住金が作製した GdBaCuO 系高温超電導体バルクを使用した。全試料とも  $\Phi 46\text{mm} \times 15\text{mm}$  の円板形状のバルクに、肉厚 5mm の金属リング(SUS316L)を接着させている。

FCM には最大印加磁場 10T の超電導マグネットを用いた。バルクを冷凍機のコールドステージに取り付け、 $\sim 10^{-5}\text{Torr}$  まで真空引きをした後、超電導マグネットに挿入し、着磁を行った。

温度測定はセルノックス温度センサーをバルク表面とリング側面に取り付けて行い、捕捉磁場は、バルク表面中心にホールセンサーを貼り付けて測定した。また捕捉磁場分布は真空容器表面上 0mmup(=バルク表面 5mmup)を x-y 平面を走査可能なホールセンサーを用いて測定した。

名称	形状	印加磁場 (T)	211 相仕込み量 (mol%)
NSC-3 (Gd4756)	円板形状バルク $\Phi 46\text{mm} \times 15\text{mm}$	1.5T	25
NSC-4 (Gd5333)	円板形状バルク $\Phi 46\text{mm} \times 15\text{mm}$	1.0T	25
NSC-5 (Gd5429)	金属リング (SUS316L) 接着、肉厚 5mm	1.4T	20
NSC-6 (Gd5430)	金属リング (SUS316L) 接着、肉厚 5mm	1.5T	30

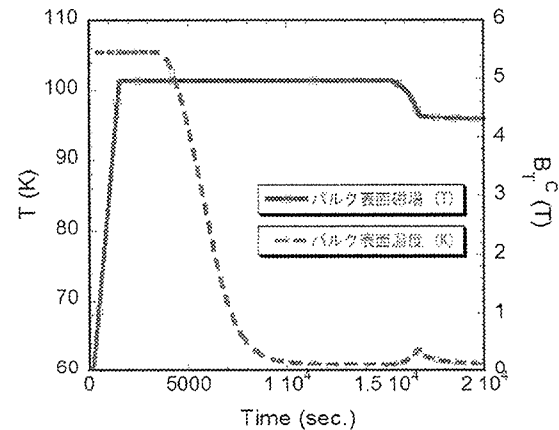


図 1 着磁過程の実測例

## III. Results

図 1 は着磁過程の実測例で、バルク表面磁場(実線)と表面温度(破線)の時間変化を示している。この測定では 4.3T の磁場が捕捉された。バルク表面磁場の減少と共に表面温度が上昇した。図 2 に各試料の減磁した際のバルク表面温度  $T_s$  における表面中心捕捉磁場  $B_T^c$  変化を示す。また図 3 は最低温で着磁した後、昇温しながら測定した  $B_T^c$  の温度依存性である。破線は印加磁場を満足させた時の予想捕捉磁場である。NSC-6 を除き、各試料とも

低温になるにつれ捕捉磁場が上昇した。しかし  $T_s=77\sim 60\text{K}$  で  $B_T^0$  は温度に対して直線的に変化したが、60K 付近以下では飽和する傾向を示した。これは印加磁場強度の不足が考えられる。最終的な  $B_T^0$  は NSC-3 では 7.63T、NSC-4 は 7.66T、NSC-5 は 8.15T、NSC-6 では 7.50T である。NSC-5 だけ高い  $B_T^0$  を得たのは、最低温着磁での最大印加磁場が唯一 9T(他は 8.5T)と高かったためと考えられる。NSC-5 は  $T_s=40\text{K}$  において 15T 程度の強磁場捕捉が予測される。

#### IV. Discussion

##### IV-i 異なる減磁温度での捕捉磁場特性

図2においてNSC-3とNSC-4の  $T_s=77\text{K}$  での捕捉磁場は、新日鐵住金の報告ではそれぞれ 1.5T、1.0T で、実験値は 1.91T、1.21T だった。直接液体窒素に浸して実験を行った新日鐵と比べ高い値を示した。また、 $T_s$  約 40K での捕捉磁場はそれぞれ 7.63T、7.66T だった。 $T_s=77\text{K}$  では実験値で 0.7T の差があったが、低温側の  $T_s$  約 40K ではほぼ同じ捕捉磁場を得た。さらに、十分な印加磁場を与えること(図3の破線)で実際にはNSC-3が10T、NSC-4が12Tを捕捉すると予想される。以上より、高温側と低温側で捕捉磁場特性が異なることが言える。

##### IV-ii 211相の仕込み量を変化させた時の捕捉磁場特性

図2が示すように、NSC-5とNSC-6の77Kでの  $B_T^0$  は新日鐵住金の報告ではそれぞれ 1.4Tと1.5Tで、実験値は 1.80T、1.98Tであった。最低温での  $B_T^0$  は、NSC-5は8.15T、NSC-6は7.50Tである。211相仕込み量が30mol%のNSC-6が  $T_s=60\sim 77\text{K}$  で、どのバルクよりも高い磁場を捕捉した。図3でNSC-5、NSC-6ともに211相の仕込み量が25mol%であるNSC-3よりも  $B_T^0$  が高い磁場を捕捉することが予想される。211相量を変化させることで高い  $B_T^0$  が期待できるが、今回使用したものと異なる試料や測定回数を増やすことが必要である。

#### V. Conclusion

本研究では、高温超電導体バルクにおいて異なる減磁温度と超電導相と非超電導相の組成比の、40~77KでFCM法による捕捉磁場特性を評価した。減磁温度が低温になるにつれて捕捉磁場  $B_T^0$  は上昇した。高温側での  $B_T^0$  が異なったNSC-3とNSC-4は最低温でほぼ等しい磁場を捕捉した。十分な外部磁場を印加することでNSC-4の  $B_T^0$  がNSC-3のそれを上回ると予想される。77Kと40Kの減磁温度で捕捉磁場特性が異なる。また211相の仕込み量が20mol%のNSC-5と30mol%のNSC-6では、25mol%のNSC-3と比べ高い  $B_T^0$  が得られ、十分な印加磁場でさらに高い捕捉磁場が期待出来る。しかしより正確な比較のためには、十分な外部磁場の印加、さらに各減磁温度での印加磁場の強度や掃引速度を固定化することが望ましいと言える。

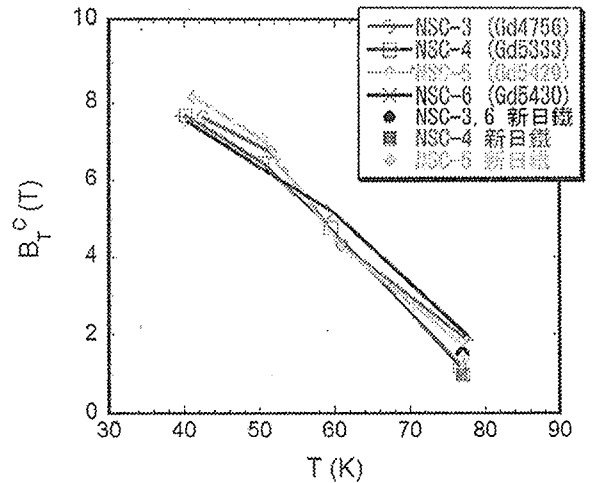


図2 減磁した時のバルク表面温度  $T_s$  における中心捕捉磁場  $B_T^0$  変化

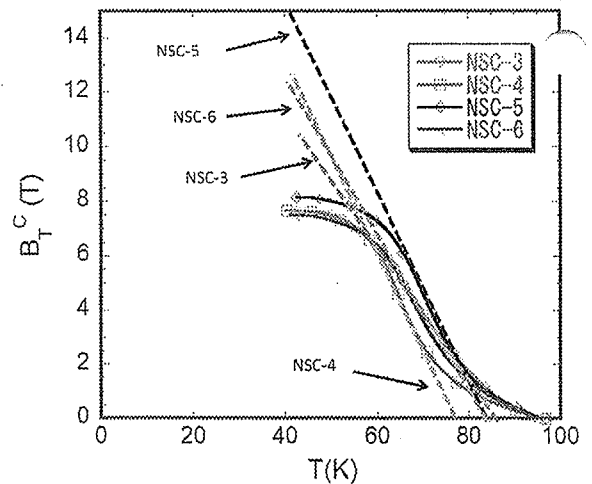


図3 最低温で着磁後、昇温させた時の  $B_T^0$  の減磁温度変化