

# バルク超伝導体のパルス着磁における発熱現象のシミュレーション

平成 16 年度入学 21204020 藤代研究室 小林大地

## 1. 序論

バルク超伝導体は様々な応用が提案されているが、特に擬似的永久磁石としての応用が期待されている。バルクを着磁する方法としてパルス着磁(Pulsed Field Magnetization)法がある。この着磁法の利点は装置が小型で安価なため実験装置に容易に組み込めることにある。しかしパルス着磁法は磁束がピンニング力や粘性力に逆らって急激に運動することで、超伝導バルク体の捕捉磁場減少の原因となる大きな発熱が生じる。これまで本研究室では、バルクの捕捉磁場向上のためバルク表面の温度上昇の測定結果を用いてバルク全体の発熱解析を行ってきた。解析結果は、バルクはパルス着磁直後に断熱的に温度が上昇することを示したが、バルク内部の伝熱過程は推測の域を出なかった。

そこで本研究ではバルク表面だけではなくバルク内部の温度上昇を実験的に測定することで、バルク内部の発熱について多くの情報を得た。さらに伝熱解析で発熱現象を再現し、より正確な発熱条件や発熱に影響する要因を考察した。

## 2. 実験方法と解析方法

直径 45mm、厚さ 15mm の Sm 系超伝導バルクに対し、初期温度  $T_s$  を比較的高温の 40K、印加磁場  $B_{ex}=3.8, 6.0T$ 、比較的低温の  $T_s=20K$ 、 $B_{ex}=3.8, 6.3T$  の条件でパルス着磁を行った。バルクの温度測定を図 1 の挿入図に示すように T1 から T5 で行った。これらの条件で得た実験結果についてシミュレーション解析を行った。

伝熱解析はフォトン㈱の PHOTO-series THERMO を使用した。伝熱解析は有限要素法を用いて 3 次元の熱伝導方程式を解くことによって行った。バルクのモデルは半径方向に 10 分割、高さ方向に 6 分割、円周方向に 20 分割した。バルク周辺に設置した厚さ 4.5mm の SUS リングは半径方向に 2 分割、高さ方向に 6 分割した。解析に必要な熱伝導率、比熱、密度といった物性値はデータベースを参照した。またバルク底面を定温度境界( $T_s=40K, 20K$ )とした。バルク-リング間とバルク底面に 0.1mm の仮想的な接触熱抵抗層  $R_{ab}$ 、 $R_c$  を置いた。この層の熱伝導率を変化させることにより熱抵抗を推定した。これまでのシミュレーション解析の結果から、 $R_{ab}$  はバルクの ab 面の熱伝導率の 1000 分の 1、 $R_c$  はバルクの c 軸方向の熱伝導率の 250 分の 1 を与えた。また、バルクの発熱はパルス磁場印加時のみに起こっていると仮定し、発熱にパルス波形と同じ時間変化を与えた。一般的に超伝導バルクではピン止め力やピン止め点の分布により不均一に発熱が起こるが、本研究では均一に発熱が起きているものとして解析を行った。

## 3. 解析結果

### 3.1 低磁場を印加した場合の発熱源の形状

図 1 に  $T_s=40K$ 、 $B_{ex}=3.8T$  における超伝導バルクの温度の時間変化を示す。(a)に実験値、(b)に表面の測定温度をもとに内部を推定した過去のシミュレーション解析値を示す。これまでのシミュレーション解析では図 1(b)の挿入図に示すように発熱源を外層 5 層に均一に与えていた。バルク表面(T1)とバルク内部(T3)を比較すると実験値では T3 のほうが T1 より早く立ち上がっていることがわかる。これはバルク中心においてより内部で発熱が起きているためである。このことは過去のシミュレーションの条件では再現することができなかった。

本研究では図 2 の挿入図に示すような内部の層が中心側に突き出た形状(モデル a)と表面と底面

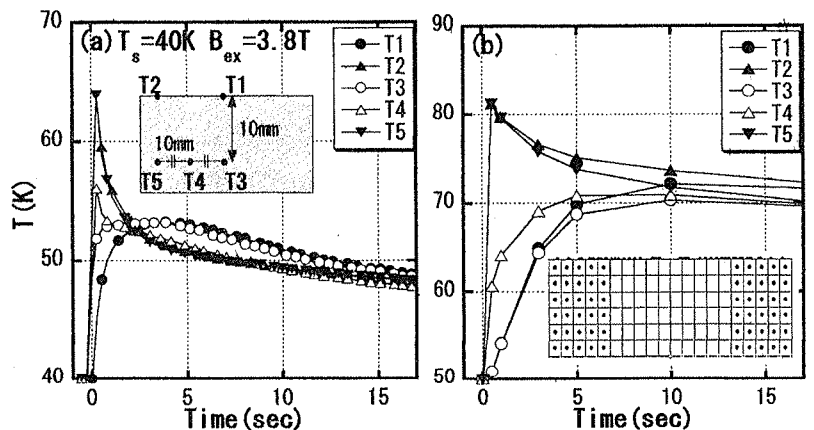


図 1. 温度-時間依存性 (a)  $T_s=40K$ 、 $B_{ex}=3.8T$  のときの実験値と(b)解析値

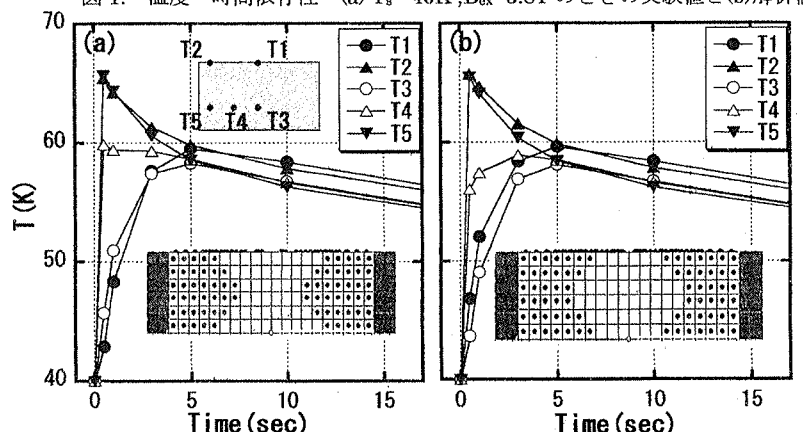


図 2. 温度-時間依存性(解析値) (a)モデル a,(b)モデル b

の層が中心側に突き出した形状(モデル b)にして解析を行った。その結果図 2(a)に示すようにモデル a で T3 の温度の立ち上がりが早く、振る舞いが実験値と一致する結果を得られた。一方モデル b では図 2(b)に示すように T3 の温度の立ち上がりが遅く実験値と一致しなかった。従ってパルス着磁ではモデル a のような発熱が起きていると予測される。

### 3.2 高磁場を印加したときの発熱源の形状

図 3(a)に  $T_s=40K$ ,  $B_{ex}=6.0T$  におけるバルクの温度の時間変化を示す。低磁場印加( $B_{ex}=3.8T$ )と比べ T3 の立ち上がりが早いことがわかる。低磁場印加で用いた発熱源の形状で発熱量を増やしてシミュレーション解析したところ、図 2(a)の絶対値が上昇するだけで温度の振る舞いは変化しなかった。そこで高磁場印加では外周部だけでなく内部でも発熱が起こると仮定し、発熱源を内部に追加した。また、外周部と内部の発熱に差をつけて解析を行った。外周部と内部の発熱の比率は 1.2:1 とした。その結果、図 3(b)に示すように発熱源を外周部のみに置いた場合より実験値に近い振る舞いを得ることができた。

従って、高磁場印加ではより中心で発熱が起こっており、発熱量は外周のほうが大きいことがわかる。

### 3.3 低温での伝熱解析と接触抵抗層 $R_c$ の考察

図 4、図 5 に  $T_s=20K$ ,  $B_{ex}=3.8, 6.3T$  におけるバルクの温度変化と解析値を示す。 $T_s=40K$  の発熱源の形状で解析を行うと、 $T_s=40K$  の解析結果と同じようにバルク中心の温度の立ち上がりの振る舞いが一致した。

しかし、ピーク後の温度変化の再現ができなかった。そこでバルクの熱はけの再現のために接触抵抗層  $R_c$  についての考察を行った。 $R_c$  の熱伝導率は過去のデータ値を使用していたが、実験値と一致するように最適化した。最適化した結果、 $T_s=40K$ ,  $B_{ex}=3.8T$  のときバルクの熱伝導率の 150 分の 1、 $T_s=20K$ ,  $B_{ex}=3.8T$  のときバルクの熱伝導率の 3000 分の 1 となった。より低温になるほど  $R_c$  の熱伝導率は小さくなり、冷却されにくくなる。これは、冷凍機の冷却能力が低温になるほど低下し、熱はけが悪くなるためである。

## 4. まとめ

本研究では Sm 系超伝導バルクのパルス着磁における発熱現象のシミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。結果、発熱源のより正確な形状、また印加磁場の強度によって発熱の仕方が異なることが分かった。発熱源の形状は断面に対して均一ではなく、内部が中心側に突き出した形状であった。低磁場を印加したとき発熱はバルク外周のみで起こっているが高磁場を印加したときはより中心で発熱が起こっている。低磁場印加では外周部に比べ中心部の発熱が小さいので無視することができると考えられる。これらの特徴は初期温度を変化させてもあてはまる。

また、初期温度によって接触抵抗層の熱伝導率が変化する現象が見られたが、これは冷凍機の冷却能力の変化を再現したものであると考えられる。

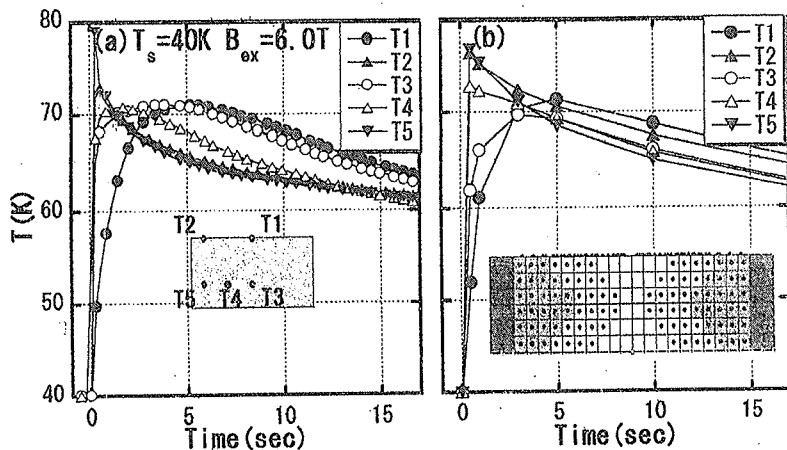


図 3. 温度-時間依存性 (a)  $T_s=40K$ ,  $B_{ex}=6.0T$  のときの実験値と(b)解析値

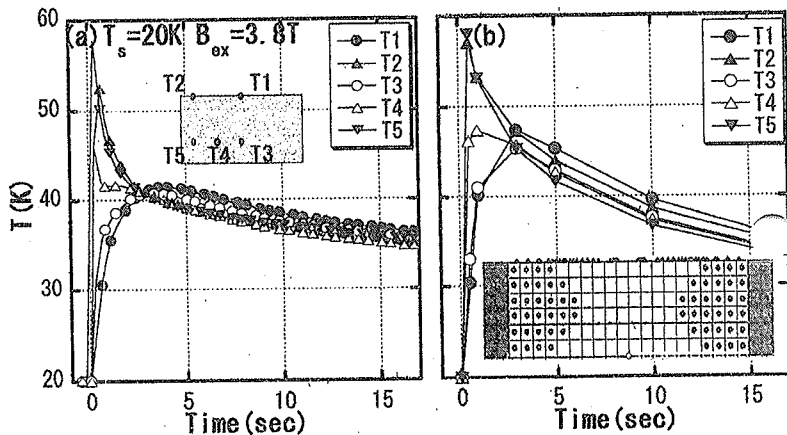


図 4. 温度-時間依存性 (a)  $T_s=20K$ ,  $B_{ex}=3.8T$  のときの実験値と(b)解析値

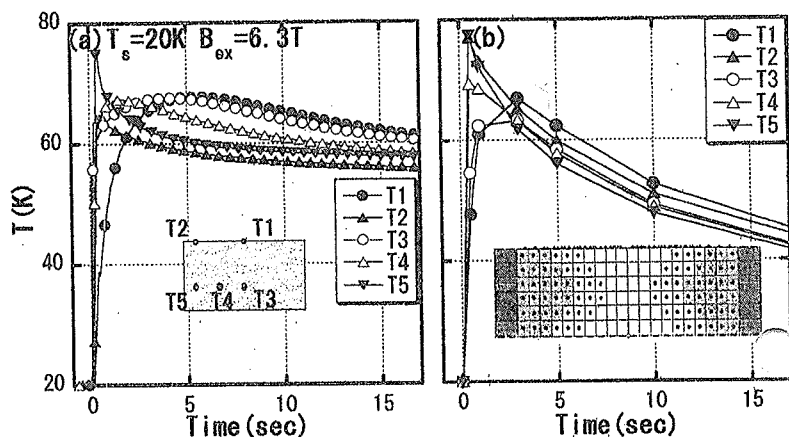


図 5. 温度-時間依存性 (a)  $T_s=20K$ ,  $B_{ex}=6.3T$  のときの実験値と(b)解析値