

バルク超伝導体のパルス着磁における発熱現象 と温度シミュレーション

平成 12 年度入学 16 番 池部研究室 川口 秀介

1 はじめに

既存の永久磁石と比較して、小型でかつ強磁場を発生する物質として、強磁場を捕捉した高温超伝導体がある。この超伝導永久磁石の実現において、着磁装置の小型、軽量化を考えるとパルス着磁 (PFM) による着磁が有効となる。しかし、この着磁方法には温度上昇が大きいという問題があり、その改善が必要とされている。そこで本研究では、温度上昇をシミュレーション解析し、実験値と比較、検討する。シミュレーション解析では、表面や測定が難しい内部の温度分布が視覚的に推定することができる。また、理想的な発熱現象と実験での発熱現象を比較することで、発熱現象に影響している要因(接触熱抵抗など)を特定できる。

2 実験方法

(株) フォトンのシミュレーションソフト(PHOTO-THERMO)を使用し、パルス磁場印加後の温度分布を再現する。高温超伝導バルク(直径 45mm、高さ 15mm)は、図 1 のように高さ方向に 6 分割、半径方向に 10 分割、円周方向に 20 分割した円柱を想定する。各物性値は表 1 に表す。実際の実験データと同じく、図 2 のように GSB(Growth sector boundary)の交点 T1 及び、中心から 12.5mm の距離の温度 T2、T3、T4、T5 の時間依存性を計算した。バルクの下面を 40K(一定)、他の面は断熱条件で解析を行った。PHOTO-THERMO は、物質の熱の流れや温度分布を解析するための有限要素法によるプログラムである。一般には物質の材料特性、すなわち熱伝導率、密度は温度によって変化するが、このプログラムではこの変化を小さいとしこれらの量を一定値として次の熱拡散方程式に入力する。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div } \kappa \text{grad} T = Q$$

ここで、 ρ は密度、 κ は熱伝導率、 C は比熱を表す。有限要素法とは、解析領域をいくつかの要素に分割し、この要素の頂点やエッジ上に節点と呼ばれる点を設け変位ベクトルや歪みなどの量を代表する。要素内でのこれらの量はこの節点上の値から補間関数の次数が決まる。

表 1 各バルク物性値

| | Yバルク | Smバルク |
|-------------------------|-------|-------|
| 半径(mm) | 22.5 | 22.5 |
| 高さ(mm) | 15 | 15 |
| 比熱(J/K/kg) | 85.1 | 92.31 |
| 密度(kg/m ³) | 6000 | 5940 |
| K _{ab} (W/m/K) | 20.48 | 13.4 |
| K _c (W/m/K) | 9.31 | 3.3 |

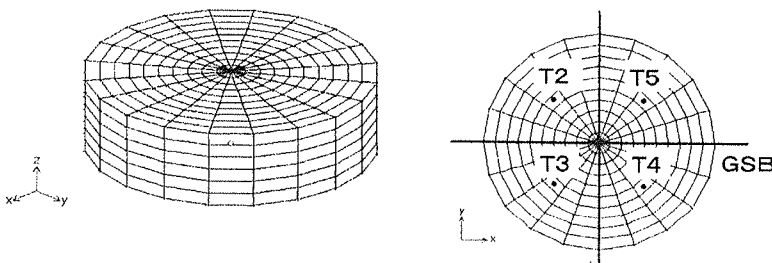


図 1 バルク形と測定位置

3 実験結果及び考察

YBCO バルクは、外周から均一に磁場が入りやすいという特徴があることがわかっているため、各温度測定地点での結果を再現しやすい。そのため、YBCO バルクでの解析から行った。実験で使用するパルス波形と同じ波形でバルクの周囲に熱量 Q を加える。熱量は、実験から得られた温度上昇のデータから算出した。図 2 に温度の時間依存性の実験値とシミュレーションの結果を示す。温度 T2 の実験値は、約 7 秒後に温度がピークに達した後は非常に緩やかに温度が下がっている。熱抵抗を考えない場合実験から推定した $Q=8 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ の熱を周囲に均一に加えた結果、約 20 秒で初期温度 40K に戻るといった結果になった。これは明らかに実験結果とは違う。この結果から、実際の実験では間に接触熱抵抗が存在すると考えられる。そこで、次はバルク下に 0.1mm の仮想的な層を加え、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。最適化を行った結果、バルクの 1/5000 の低い伝導率の層が存在することがわかる。以上の結果から、実際の実験では、バルクとコールドステージの間に大きな接触熱抵抗があることが明らかになった。また、温度分布の半径方向依存性を計算した結果、高さ方向の温度差は小さく、時間とともに中心に温度が伝わりバルク全体の温度がほぼ均一になった後、下から熱が逃げる振舞いが見えた。

次に Sm バルクのパルス着磁の際の温度分布を再現する。実験データより、このバルクでは T4、T5 で急激な温度上昇と減少が見られ、T2、T3 では Y バルクと同じ振る舞いが見られることがわかった。そこで T4、T5 の振る舞いを再現した後、T2、T3 の振る舞いと合わせて考える方法をとった。T4、T5 での温度分布からわかることは、発熱は不均一に起こっているということである。T4 の外側に図 3 (1) のように熱を与え、熱の逃げ方を考察した。熱量は、総量 $50 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ になるように加えた。この場合の 1 秒後の温度分布を図 3 (1) 下図に示す。この図から、1 秒後には広範囲にわたって熱が広がっている様子がわかる。T4 地点での時間依存性を図 4 に示す。さらに鋭いピークを再現するため、総熱量は変えずに図 3 (2)、(3) のように熱を加えた。これは、発熱領域を狭くすることで狭い面積のまま熱が伝わり、T4 地点では T2、T3、T5 側からの熱吸収が大きくなると予測したからである。結果、さらに鋭いピークが見られた。ここで、実験結果と比較してピーク後の温度減少が大きいのは T2、T3、T5 側からの発熱がないためと考えられる。以上のことを考慮して、総熱量を変えずに T2、T3 の振る舞いと合わせて数パターンのシミュレーションを試した結果、図 5 のように実験結果とほぼ一致した。熱量は、T4 の外側を 1 として図 6 のような比率で与えた。この場合 T2、T3 側では間の GSB 付近に発熱を加えた。これは T4、T5 に近づけて発熱を加えると T4、T5 のピークがなくなり、T2、T3 の外側に加えると T2、T3 にピークができるためである。

4 結論

それぞれの高温超伝導バルクのパルス着磁実験でおこる発熱現象をシミュレーションにより再現できた。そして、実験結果と比較することで、コールドステージとの接触熱抵抗が存在し、その抵抗が非常に大きいものであることがわかった。また、Sm バルクの複雑な温度分布を再現できたことにより、着磁の際の磁束の振る舞いを予測できた。

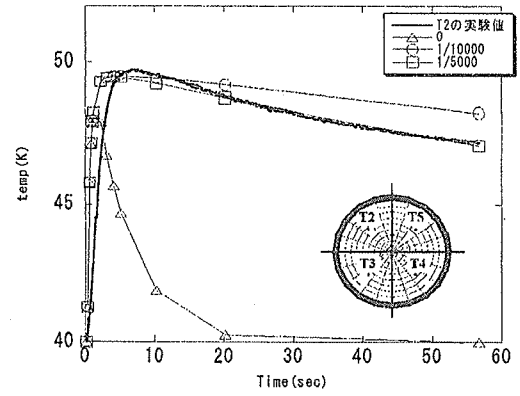


図 2 YBCO バルク解析結果

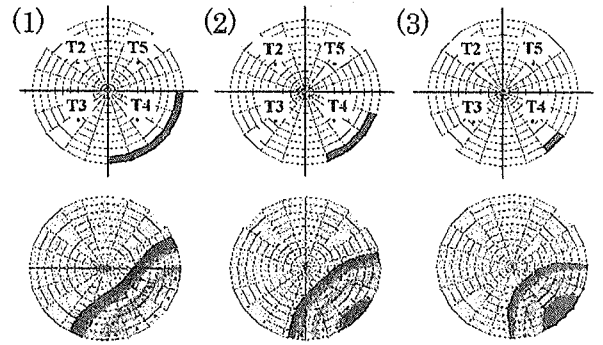


図 3 熱の加え方(上)、熱分布図(下)

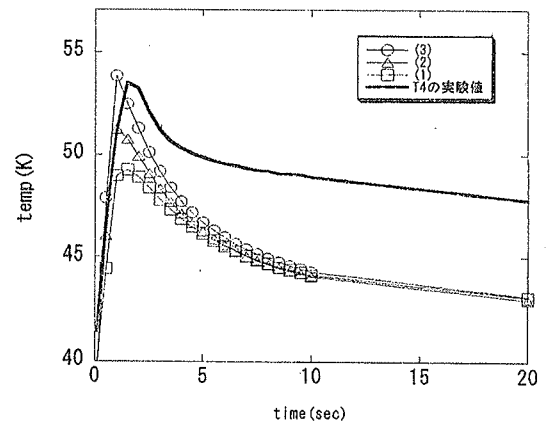


図 4 Sm バルク解析結果 (T4)

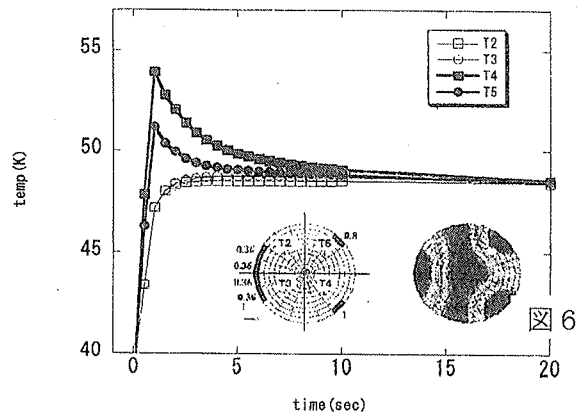


図 5 Sm バルク解析結果(T2~T5)