

研究ノート

セラミックス超伝導体の I-V 特性シミュレーション

小山職業訓練短期大学校 岡野一雄・大江康二
中里和美・水竹剛司
齋藤晃久

I-V Characteristics Simulation of Superconducting Ceramic

Kazuo Okano, Kohji OHE, Kazumi Nakazato, Tsuyoshi Mizutake, Teruhisa Saito

要約 Y-Ba-Cu-O系セラミックスの電気的特性のうち I-V 特性の電気伝導シミュレーションについて検討を行った。

Y-Ba-Cu-O系セラミックスは、製造条件により、77Kにおいても残留抵抗が現れることが知られている。このような残留抵抗の確認される試料についてその I-V 特性の測定を行った。この結果を説明するために、試料の電子顕微鏡写真に基づいてセラミックス超伝導体の等価回路を提案し、I-V 特性についてコンピュータシミュレーションを行った。

超伝導セラミックスは、粒子と粒界から成る複合体であるためシミュレーションに用いる回路素子は2種類に大別した。さらに、粒子と粒界の臨界温度、臨界電流密度に分布を考慮してシミュレーションを行った。この結果、実測値とシミュレーション結果が良い一致を示した。

I はじめに

Y-Ba-Cu-O系セラミックスに代表される高温セラミックス超伝導体は、製造方法により77Kにおいても残留抵抗が存在することが知られている⁽¹⁾。我々は残留抵抗の原因を究明するために77K付近でのセラミックス超伝導体の I-V 特性が非線型であることについてすでに報告をしている⁽²⁾。

本報ではこの I-V 特性の非線型について、

- (1) セラミックスが粒子と粒界層の複合体であること、
- (2) それぞれの粒子、粒界層の臨界温度、臨界電流密度が均一ではなく分布していること

を考慮してコンピュータシミュレーションを行った。

II モデル化とシミュレーション

セラミックス超伝導体の I-V 特性シミュレーションを行うに当り、微構造モデル、等価回路を提案する。

論文受け日 1989. 3. 20

まず、Fig. 1 に一般的なY-Ba-Cu-O系セラミックス超伝導体の電子顕微鏡写真を示す。この図より、セラミックスは単結晶から成る粒子、粒子と粒子の界面である粒界層、粒子間に形成される気孔の複合体であることが明らかである。

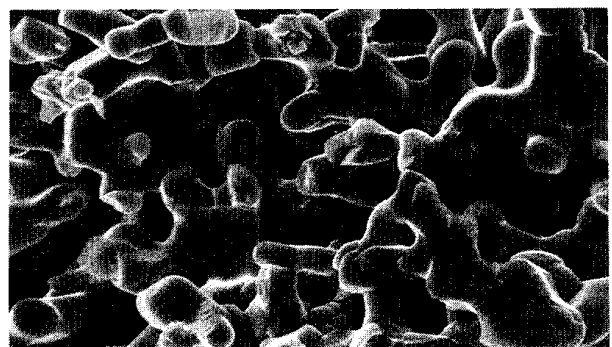


図1 Y-Ba-Cu-O系セラミックスの
走査型電子顕微鏡写真

そこで、この図に基づいてセラミックス超伝導体の二次元微構造モデルをFig. 2 に提案する。このモデルにおいては、セラミックスは粒子と粒界層だけで構成され気孔部が含まれていない。これは、気孔部が絶縁体であり電気伝導に関与しないためである。このような微構造のセ

ラミックスを流れる電流は図中に矢印で示すように、

I_{GB} : 粒界に沿って流れる電流、

I_G : 粒界層を横切って流れる電流

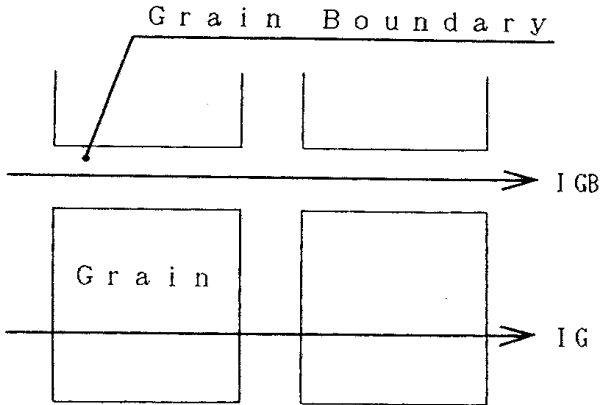


図 2 超伝導セラミックスの微構造モデル

の 2 種類に大別される。

このような微構造モデルに基づいて提案したセラミックス超伝導体の等価回路が Fig. 3 である。この回路において R_G は常伝導状態の粒子の抵抗を示し、 R_{GB} は常伝導状態の粒界層の抵抗を示している。ここで、抵抗値 R_G 、 R_{GB} は、温度、電流密度、磁場の関数であり、臨界温度 T_c 以下、臨界電流密度 J_c 以下、臨界磁場 H_c 以下において零となる。また、臨界温度、臨界電流密度、臨界磁場のうち、いずれかが臨界値を越えるとセラミックスは有限の抵抗値 R_G 、 R_{GB} を持つことになる。

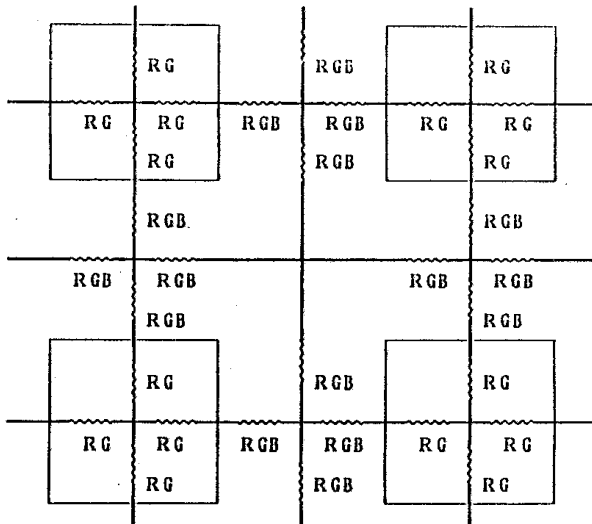


図 3 超伝導セラミックスの等価回路モデル

この等価回路において、 R_G と R_{GB} が電氣的に全く同じ特性を持つ物質であればセラミックス超伝導体を徐々に冷却すると臨界温度 T_c でセラミックス全体が同時に超伝導状態に転移することになる。

また、超伝導状態のセラミックスを流れる電流が徐々に大きくなり、臨界電流密度 J_c に達するとセラミックス

全体が同時に常伝導状態に転移することになる。ところが、セラミックスの粒子を構成する物質は単結晶であり、粒界層は結晶方向の異なる粒子と粒子の接合部であるため、アモルファスであると考えられる。従って、少なくとも粒子と粒界層の臨界温度、臨界電流密度、臨界磁場は異なっていると考えられる。さらに、セラミックスは多くの粒子の集合体であるため、それぞれの粒子の組成、結晶欠陥の濃度、粒子の形状等は若干異なっている。また、粒界層は連続体であるため試料全体を通して 1 個であるが、空間的にその性質が分布しているため、粒界層の抵抗は Fig. 3 に示すように 1 粒子の周囲に 8 個に分割して個数の概念を用いる事ができる。従って、粒子の抵抗 R_G や粒界層の抵抗 R_{GB} の臨界温度、臨界電流密度、臨界磁場はそれぞれの値が一定ではなく Fig. 4 に示すように、ある値を中心として分布していると考えられる。

Fig. 4 (A) は常伝導状態での粒子の抵抗と粒界層の抵抗の分布状態を示した図であり、横軸は抵抗値、縦軸は等価回路における粒子の抵抗 R_G と粒界の抵抗値 R_{GB} の個数である。Fig. 4 (B) (C) の縦軸は (A) と同様に個数であり、横軸はそれぞれ臨界温度、臨界電流密度である。なお、本報では $I-V$ 特性を扱っているため磁場は一定と考えている。従って臨界磁場は考慮していない。

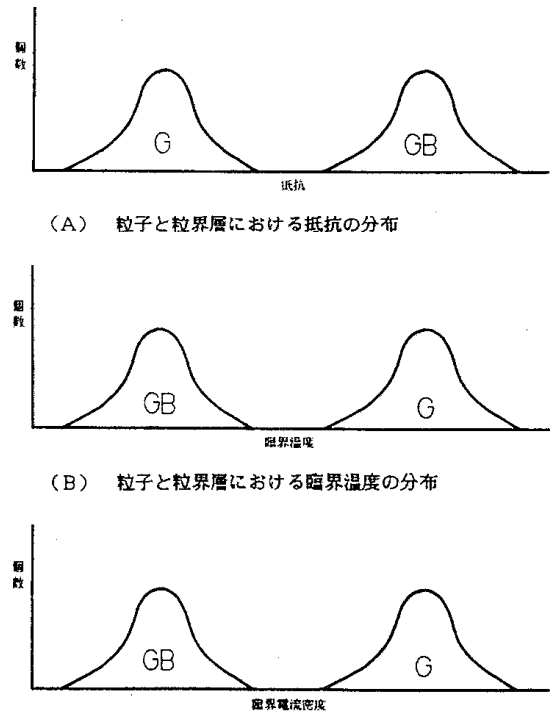


図 4 超伝導セラミックスの抵抗、臨界温度、臨界電流密度の分布状態

今回のシミュレーションにおいて分布は正規分布を用い、粒子と粒界層の特性は次のように設定した。すなわち粒子の抵抗 R_G の平均値は $5m\Omega$ 標準偏差は $2m\Omega$ 、

粒子の抵抗 R_G の臨界温度の平均値は100K 標準偏差は2K、

粒子の抵抗 R_G の臨界電流密度は500mA 標準偏差は50mA、

粒界層の抵抗 R_{GB} の平均値は8m Ω 標準偏差は5m Ω 、
粒界層の抵抗 R_{GB} の臨界温度の平均値は90K 標準偏差は2K、

粒界層の抵抗 R_{GB} の臨界電流密度の平均値は90mA 標準偏差は3mA

である。また、粒子の数は、二次元微構造モデルにおいて一辺に1000個の粒子が存在すると仮定し、Fig. 3に示す回路網にキルヒホッフの法則を適用して解いた。このような条件に基づいて、試料の温度を80K、90K、100Kとした場合のシミュレーション結果をFig. 5に示す。この図において横軸の電圧は、電流が100mAとなる電圧で規格化してある。また、図中の実線はシミュレーションの結果であり、プロットはY-Ba-Cu-O系セラミックス超伝導体の実測値を示している。粒界層の臨界温度の平均値を90Kに設定しているため、100Kのシミュレーションではほとんどの抵抗が常伝導状態になっているため、線型の結果が得られ実測値ともよい一致を示している。また、80Kのシミュレーション結果も90mA付近で急激に電圧が大きくなり、超伝導体が常伝導状態に転移していることが明らかになっている。この場合にもシミュレーション結果は実測値とよい一致を示している。一方、90Kのシミュレーションでは実測値と大幅に異なっている。この原因としては次のようなことが考えられる。実測値のデータにおいて、試料の温度は90Kであるが、測定中に試料が自己発熱により温度が上昇したために常伝導状態に転移したことが考えられる。すなわち、90Kの実測値のデータは試料の電流密度が上昇して臨界温度を越えたために超伝導体が常伝導状態に転移したのではなく、自己発熱のため超伝導体が部分的に高温になり臨界温度を越えたために常伝導状態に転移したことが考えられる。

III まとめ

今回のコンピュータシミュレーションを行った結果、I-V特性の非線型はセラミックスの臨界温度と臨界電流密度の不均一性により発生することが明らかになった。

(注)

- (1) 岡野一雄, 川路 昭, 岩崎隆治, 加藤孝義:
Y-Ba-Cu-O系セラミックスの電気物性に及ぼす
 M_0 添加の影響, 日本セラミックス協会学術論文誌

1988年4月

P480-482

- (2) 川路 昭, 岡野一雄, 加藤孝義, 小林 大: 焼成後に酸素を添加した超伝導セラミックスにおける電気的特性, プレーティングとコーティング,
1988年

P139-142

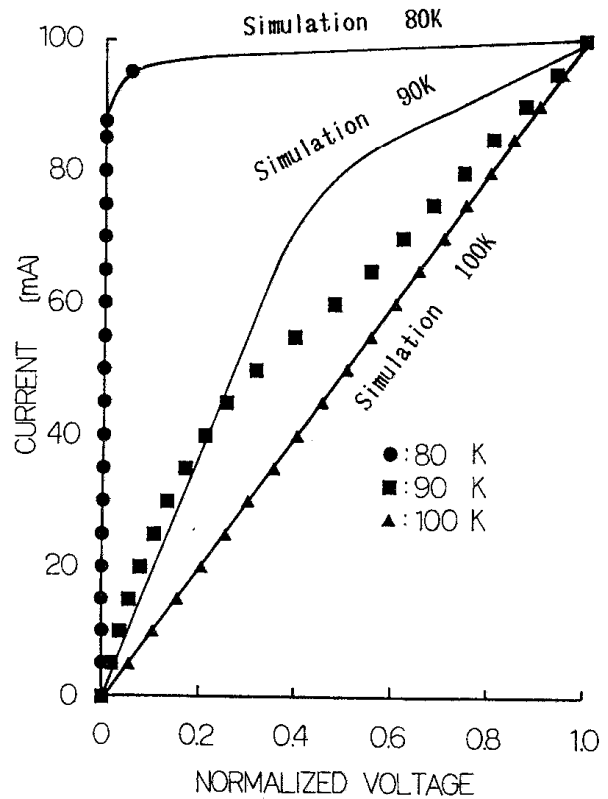


図5 超伝導セラミックスのI-V特性
のシミュレーション結果と実測値との比較