研究ノート

微小交流磁界重畳法による酸化物超電導体内の
臨界電流密度の測定倪 宝荣, 宗像 敏之, 松下 照男, 岩熊 成卓
船木 和夫*, 竹尾 正勝*, 山藤 馨

九州大学工学部電子工学教室 福岡市東区箱崎 6-10-1

* 九州大学工学部超伝導マグネット研究センター 福岡市東区箱崎 6-10-1

(1988年8月5日受理)

Measurement of Critical Current Density in
Superconducting Oxides by AC Inductive MethodBaorong NI, Toshiyuki MUNAKATA, Teruo MATSUSHITA, Masataka IWAKUMA,
Kazuo FUNAKI*, Masakatsu TAKEO* and Kaoru YAMAFUJIDepartment of Electronics, Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812*Research Institute for Superconducting Magnets, Faculty of Engineering,
Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812

(Received August 5, 1988)

Synopsis:

Sintered oxide superconductors can carry only small transport current, while large closed shielding currents flow inside grains. In this report we demonstrate that an ac inductive method is useful for estimate of these current densities. It is shown that estimate of the critical current density in sintered materials from dc magnetization measurement contains a serious error. The history effect of the critical current density is also discussed.

1. はじめに

液体窒素温度を大幅に上回る臨界温度をもつ酸化物超電導体についての研究が盛んに行われているが、電力や高磁界関係への応用の際の線材の大量生産に適していると考えられる焼結材料などでは、臨界電流密度が低いことが問題となっている。一方、このような材料では、結晶粒内にバルクな臨界電流密度と比べて3桁以上も大きな密度の臨界電流が流れていることが知られている。このようなことから、今後バルク材の臨界電流特性を改善していくのに、まず製作された試料の結晶粒内および結晶粒間の電流密度等を含めて、特性の正確な評価が必要である。

一般的に行われている特性の評価方法としては、抵抗法(四端子法)、静的磁化法(直流磁化法)などが挙げられる。しかし、現時点の焼結体については、こ

れらの方法はどれも十分ではない。抵抗法の場合、電流端子部分での発熱などの問題があり、また試料全体のバルク臨界電流密度しか得られない。一方、静的磁化法による測定からは結晶粒内および粒間の電流密度のある平均的なものしか得られず、この二つの電流密度の分離には磁化の試料厚さ依存性を測定する必要がある。すなわち、厚さの変化に対する磁化の変化率からバルクな電流密度を、また厚さが結晶粒径に等しくなるまで外挿したときの磁化の値から結晶粒内の電流密度を得ることができる。試料の厚さを変化させるには、試料を測定したたびに機械的に削って行く方法と、違った厚さの一連の試料を作る方法などがあるが、その場合でも機械加工による特性の変化や試料の特性のばらつきなどが問題になる。

本研究ノートでは、一つの試料に対して非破壊的な測定により、結晶粒内および結晶粒間の電流密度が同

時に得られる有効な方法として、微小交流磁界重畳法 (AC 法) を紹介する。また、同一試料における異なる測定方法を比較するため、抵抗法と静的磁化法による測定も行い、それぞれの結果についての検討も加えた。

2. 微小交流磁界重畳法

平板状試料に平行に直流バイアス磁界と微小交流磁界を印加し、試料を取り囲むピックアップコイルの誘起電圧を測定して、試料に入り出す交流磁束量 Φ が得られる。交流磁界の振幅 b を変化させて多点測定し、 Φ を b の多項式によって近似的に表す。こうして

$$\lambda' = \frac{1}{2w} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial b}$$

により数値解析を行うと、各 b の値に対応する交流磁界の侵入距離 λ' が得られる。通常のパルク超電導試料では、 $\lambda'-b$ 特性における勾配が臨界電流密度を J_c として $1/\mu_0 J_c$ になり、これより J_c の値が求まる。この方法を Campbell 法という⁹⁾。なお、以上のように振幅を変えて測定する代りに交流磁界および侵入磁束の瞬時値を用いて解析する方法があり、これを波形解析法²⁾という。

ここでは Campbell 法を用いた。交流磁界の振幅は 0 ~ 20 mT で、交流磁界の周波数は 40.2 Hz であった。実験はすべて液体窒素浸漬で行った。試料は最も多く使われている Y 系酸化物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ で、普通の焼結方法で作成されたものであり、 $J_c \approx 560 \text{ A/cm}^2$ (0 T, 77 K, 抵抗法による) である。

3. 測定結果および検討

AC 法からの結果を Fig. 1 に示す。この $\lambda'-b$ 特

Fig. 1 AC penetration depth λ' vs ac field amplitude b at $B=0.1 \text{ T}$ and $T=77 \text{ K}$. This shows a rapid flux penetration into a bulk at small b and a following gradual penetration into grains at large b .

Fig. 2 Variations in the flux penetration when the field amplitude b is increased by δb ; for (a) small b and (b) large b .

性より試料に外部磁界を印加したときの磁束線の振舞いがわかる。わずかな交流磁界をかけたとき、侵入距離が急速に増大し、磁束線が急激に侵入したことを示している (Fig. 2(a) 参照)。これは磁束の侵入を遮蔽する試料全体の臨界電流密度が非常に小さいことを反映している。その後、交流磁界の振幅が大きくなると磁束は徐々にしか侵入しない。これは Fig. 2(b) に示すように磁束がパルクの中心まで到達した後は、一層の磁束の侵入は大きな閉じた遮蔽電流が流れる個々の結晶粒内へしか起こらないからである。このように、酸化物焼結体には、小さなパルク電流とそれに独立な

Fig. 3 The critical current densities J_c measured resistively and ac inductively at 77 K. The estimate from the dc magnetization J_M is also shown for comparison. The intragrain current density J_g is compared with the theoretical estimate J_{av} .

Fig. 4 Schematic illustration of λ' vs b curve. The areas of two hatched regions represent contributions to the magnetization from respective shielding currents.

大きな結晶粒内の電流が共存していることがわかる。試料内のバルクな臨界電流密度は Fig. 1 の初期の急速な磁束侵入を示す部分の傾きから得られ、その値は抵抗法による測定結果とほぼ一致している。一方、結晶粒内の臨界電流密度は試料の結晶粒径分布に基づいて計算した λ' - b 曲線の結果が実験結果と合うようにして求められる。この値は焼結体の粉体についての静的磁化測定から求めた値²⁾と同程度である。こうして得られた結果を Fig. 3 に示す。また、直流磁化から従来の計算方法で求めた臨界電流密度の値 J_M も示す。

このように、バルクの電流密度は結晶粒内の電流密度に比べ 3~4 桁小さくなっている。すなわち、結晶粒内には大きな電流が流れていても、全体の輸送電流に寄与しておらず、これは結晶粒界面が輸送電流の障壁となっていることによる。全体のバルクな臨界電流密度は結晶粒間に存在する弱い結合や結晶粒界面自体の状態によって決まる。

Fig. 2 の λ' - b 特性は磁束分布に対応しており、これから Fig. 4 の斜線部分の面積が直流磁化に対応する。ここで、直流磁化に対する寄与は粒間のバルク電流からよりも、粒内の遮蔽電流からのほうが圧倒的に大きいことに注意しなければならない。この磁化がすべてバルク電流によるものとするため、実測される電流密度よりもはるかに大きな値が得られたのである。すなわち、粒内の電流と粒間のバルク電流とのある種の平均値が求められてしまったのである。したがって、大きく違った二種類の電流密度を有する現段階の焼結体については、静的磁化測定による臨界電流密度の評価は適当とはいえない。

印加磁界の増磁および減磁の履歴によって焼結体のバルク臨界電流密度の値が変わるという履歴効果が知ら

Fig. 5 History dependent critical current density measured resistively and ac inductively at $T=77K$.

れている⁴⁾。AC 法の実験結果からもこのような現象が観測される (Fig. 5)。ただし、 λ' - b 特性の結晶粒内部分に相当する磁束分布は増磁過程と減磁過程とで変らず、したがって、結晶粒内の電流密度は履歴効果を示さない。すなわち、酸化物で観測されたこの履歴効果は磁束ピンニング現象において知られる従来の履歴効果ではなく、結晶粒間に存在する弱い結合に起因したものであるといえる。同様な履歴効果は従来の超電導材料で製作したブリッジにおいても観測されている⁵⁾。ブリッジにおける履歴効果は薄膜を流れる遮蔽電流の履歴に起因したものであり、このことから、焼結体における履歴効果も結晶粒内の大きな遮蔽電流の履歴が粒間の弱い結合に影響を及ぼしたものと考えられる。しかしながら、定量的な説明はまだ与えられていない。

以上のように、微小交流磁界重量法はバルクな超電導材料の特性を評価する上で手軽でかつ有効な手法である。上に述べたほかに、磁界の増加とともに急速に減少する超電導領域の体積的割合についても評価できる。この手法の詳細については文献 6) を参照されたい。

参考文献

- 1) A. M. Campbell: J. Phys. C2 (1969) 1492
- 2) R. W. Rollins, H. Küpfer and W. Gey: J. Appl. Phys. 45 (1974) 5392
- 3) H. Kumakura, M. Uehara and K. Togano: Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 1557
- 4) K. Noto *et al.*: Physica 148B (1987) 239
- 5) K. Mizumo and T. Aomine: J. Phys. Soc. Jpn. 52 (1983) 4311
- 6) B. Ni, T. Munakata, T. Matsushita, M. Iwakuma, K. Funaki, M. Takeo and K. Yamafuji: Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) 1658