

第三高調波電圧誘導法を用いた YBCO coated 線材の  $E$ - $J$  特性の評価

松下研究室 原口輝久

はじめに 液体窒素温度で超伝導状態になることが出来る酸化物超伝導体のうちY系の超伝導体は特に高温高磁界中での特性が優れており、その応用に向けた研究が盛んに行われている。本研究で用いた YBCO-coated 線材では、近年実用レベルに近い臨界電流特性を持った長尺の線材も開発され、その応用が期待されている。

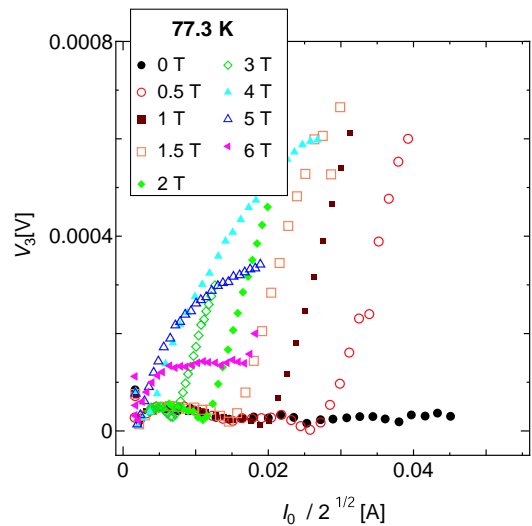
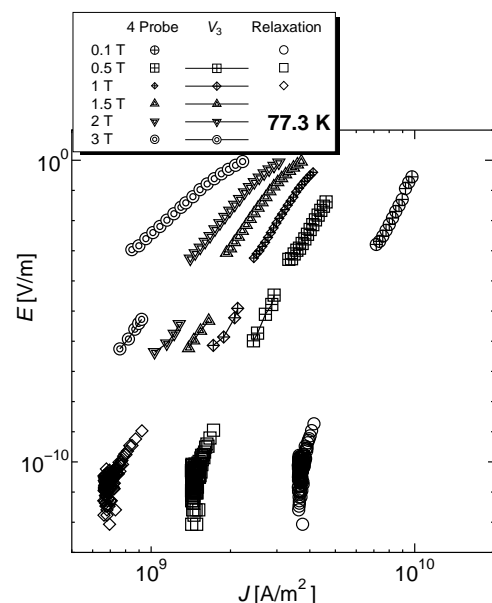
応用の際に重要となる超伝導体の特性の一つに電気抵抗の発生なしに流せる最大直流電流密度である臨界電流密度がある。しかし実際にはこの臨界電流密度は一定のパラメータではなく、発生する電界のレベルによって大きく変わる。そして各応用によって超伝導体が置かれる電磁気的環境が異なるため、発生する電界の値は異なる。よって臨界電流特性もそれぞれの応用に即したものが必要であり、広い電界領域での  $E$ - $J$  特性を明らかにすることは非常に意味のあることである。第三高調波電圧誘導法は中間電界領域における測定が可能で、また非破壊非接触での測定であるため、 $E$ - $J$  特性の評価法として非常に有効であると言える。そこで本研究では、第三高調波電圧誘導法および四端子法、磁化緩和法を用いて広い範囲での  $E$ - $J$  特性の評価を行ない、長尺の YBCO coated 線材の測定法としての有効性を調べるとともに、 $E \propto J^n$  としたときの  $n$  値や、 $J_c$ - $B$  特性の評価もあわせて行なった。

**実験** 試料は株式会社フジクラで製作した YBCO-coated 線材である。中間層の配向には IBAD 法を、超伝導層の成膜には PLD 法を用いている。IBAD 法とは線材の基板と超伝導層の間にある中間層を高度に配向することの出来る技術で、これによってその上に成膜される超伝導層も非常によく配向したものが得られる。試料は超伝導層の膜厚が  $1\mu\text{m}$ 、サイズは幅が  $10\text{mm}$ 、長さが  $10\text{mm}$  となっており、超伝導層の上に保護膜として厚さ  $10\mu\text{m}$  の銀が蒸着されている。また、 $c$  軸は試料面に対し垂直に配向している。実験で使用したコイルは線径  $50\mu\text{m}$  の銅線を  $400$  回巻いたもので、コイル部は内径  $2\text{mm}$ 、外径  $6.05\text{mm}$ 、高さ  $1.12\text{mm}$  である。このコイルを試料の  $0.27\text{mm}$  直上に設置し、交流電流を流すことで  $c$  軸に平行に外部交流磁界を発生させ、コイル両端間に発生する電圧の第三高調波成分の検出を行なった。なお、コイルに流す交流電流の周波数の範囲は  $75\text{Hz}$  から  $2\text{kHz}$  とした。

**結果及び検討** 図1は  $77.3\text{K}$ 、および各磁界における第三高調波電圧の電流振幅依存性である。外部交流磁界が大きいほど、第三高調波電圧が発生するときの電流値  $I_{c0}$  が減少している。この  $I_{c0}$  は  $J_c$ 、コイル定数  $K$ 、試料の厚さ  $d$  を用いて  $I_{c0} = J_c d / K$  と表すことができ、これより磁界の増加に伴って  $J_c$  が減少していることがわかる。また電界を  $E = 3\sqrt{3}/8\mu_0\omega J_c d$  とし  $E$ - $J$  特性を評価することができる。図2は  $77.3\text{K}$  における  $E$ - $J$  特性である。電界  $E$  が  $10^{-5} \sim 10^{-6}\text{V/m}$  付近のデータが第三高調波電圧誘導法によって測定されたデータである。これよりも高い電界領域のデータが四端子法、低い電界領域のデータが磁化緩和法により測定されたものである。それぞれのデータを比較してみると全体としてよく一致しており、長尺の YBCO coated 線材の特性評価法として、第三高調波電圧誘導法が中間電界領域の測定に有効であることがわかる。

一般に  $n$  値は大きいほど良いとされているが、最も大きいところでおよそ  $20$  程度で、磁界が上がるに従い下がっていくことが分かった。実用超伝導線材での  $n$  値は  $50$  程度と言われており、そういった意味では実用的にはまだ厳しいということが言える。

**まとめ** 本研究では、第三高調波電圧誘導法を用いて  $E$ - $J$  特性の評価を行うとともに、四端子法、磁化緩和法による結果との比較を行なった。その結果、全体としてよく一致していることが分かった。 $n$  値は最も高いところで  $20$  程度の値を持つが、その値は磁界の上昇とともに低下した。第三高調波電圧誘導法は、四端子法や磁化緩和法では測定困難な領域の  $E$ - $J$  特性の評価を行なうことができ、また測定周波数を変化させることで測定可能な電界領域を選択可能であることも、第三高調波電圧誘導法のメリットであると言える。

図1 77.3 K での  $V_3$ - $I_0$  特性。図2 77.3 K での  $E$ - $J$  特性。