

## 【隔月連載記事】

### バルク超電導磁石の誕生（その3）

SRL/ISTEC 第1・3研究部長 村上雅人

#### 1. はじめに

超電導磁石をつくるためには、高磁場中でも大きな超電導電流を流さなければならない。ところが、純粋な超電導体では混合状態で電流を流すと量子化磁束が動き回り、電気抵抗がゼロにはならないのである。そこで、磁束の運動を阻止するピン止めセンターと呼ばれる、非超電導相を微細に分散した組織をつくる必要がある。こうすれば、磁束の運動が阻止され、大きな電流をゼロ抵抗で流すことができる。

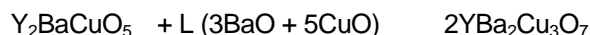
ところで、量子化磁束の大きさは高温超電導体では数 nm である。よって、磁束をうまくピン止めるためには、この程度の大きさの常電導相を超電導マトリックス内に分散する必要がある（と考えられていた）。まさに、いまはやりのナノテクノロジーであるが、こんな組織制御など、よほどの幸運に恵まれなにかぎり、できようはずがない。とすれば、高温超電導体においてピン止め効果を得ることなどあきらめざるを得ない。

ここで、ピン止め効果について再び考えてみよう。この効果は、超電導と常電導のエネルギー差を利用して得られるものである。よって、何も常電導のサイズが磁束と同じ大きさでなくともよいのである。

この事実を確認するためには、いくら数式を使って説明しても効果はない。やはり、実験結果で証明するのがいちばんである。ここで登場するのが、超電導バルク磁石の原料となる熔融法で作製した Y-Ba-Cu-O である。

#### 2. Y-Ba-Cu-O におけるピン止めセンター

前号で紹介したように、Y-Ba-Cu-O 系では



という包晶反応によって、半熔融状態から超電導相である  $YBa_2Cu_3O_7$  (Y123) が生成する。L は液相 (liquid phase) を示しており、かっこ内はその組成である。この化学組成ならば、原理的には Y123 の超電導相しか生成しない。

この時、常電導相である  $Y_2BaCuO_5$  (Y211) 濃度が高い側に、あらかじめ初期組成をずらすと、Y123 超電導相の中に常電導相である Y211 相が分散した組織をつくることができるのである。望んでいた組織が、この系ではうまくつくることができる。これこそ天恵であろう。

しかし、Y211 粒子の大きさは数 10  $\mu\text{m}$  程度である。これでは大きすぎる。この粒子を微細化してはじめてピン止め効果が得られるが、そのプロセス開発こそが重要な鍵を握っているのである。幸いにも、その微細化の方法は、偶然に見つかったのである。

高温超電導体をつくる元素、特に Ba は反応性が高い。どなるつぼ材料を使っても反応してしまう。その中で、材料にあまり悪影響を与えないつぼが白金 (Pt) であった。そこで、開発初期の頃は、少々高価ではあるものの、Pt りつぼを使って溶融成長させていたのである。このため、融液の中に Pt がわずかに溶出してしまっていたのである。

実は、この Pt に Y211 相を微細にする働きがあったのである。この結果、図 1 に示すように、Y211 の平均粒直径を 0.1 - 1 μm 程度まで微細化することに成功したのである。Pt が効果的であるという事実は、他のつぼ材料を使うと、Y211 粒子の大きいものしかできないという実験結果から次第に明らかになってきたのである。

それでは、Pt はどうして Y211 の微細化に効果があるのであろうか。この理由

については、Pt が Y211 の核生成サイトになるという説と、Y211/Y123 界面の界面エネルギーを下げるという説があるが、これらが相乗的な効果をもたらしているものと、現在では考えられている。その後 CeO<sub>2</sub> など他の添加物によっても Y211 の微細化が図られることが明らかとなっている。また、最近では、添加する Y211 粒子の初期粒径を小さくすることでも、最終組織の Y211 粒径を微細化できることも明らかになっている。

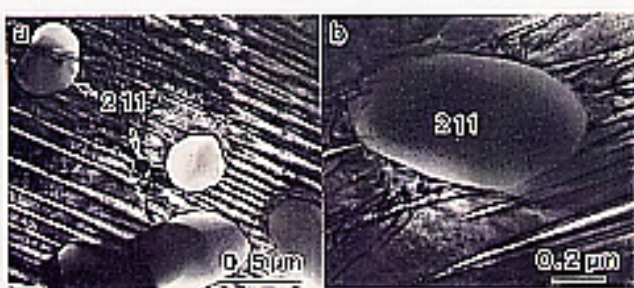


図1 溶融法で作製した Y-Ba-Cu-O (Y123 + 40% Y211) の透過電子顕微鏡写真。すじ状の模様 (双晶) が入っているのが Y123 超電導マトリックスであり、その内部に分散している黒い粒子が Y211 である。

### 3. 超電導磁石への道

このような努力の結果、液体窒素温度で実用化の目安といわれている 10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup> 程度の臨界電流密度を達成することができたのである。しかし、前にも話したが、いくらピン止め効果が得られたと言っても、目に見えるかたちで示さないと信じてもらえない。そこで、行ったのが図 2 に示した浮上実験である。

この浮上実験では、まずバルク Y-Ba-Cu-O 超電導体を液体窒素で冷やす。つぎに、超電導状態になったバルク体に永久磁石を近づける。すると、電磁誘導によって超電導体に電流が誘起される。この誘導電流は、レンツの法則にしたがって、永久磁石の磁場に反発する向きの磁場を発生させるので、浮上するのである。もし、大電流が抵抗ゼロで流れなければ、すぐに浮上は終わってしまう。当時は、5 時間以上も浮上し続けることを確認した。これは、ピン止め効果のおかげで抵抗ゼロの電流がバルク体に流



図2 Y211 の微細化によってピン止め効果を引き出したバルク Y-Ba-Cu-O 体による浮上実験。

れていることを示している。

さて、このようにピン止め効果が強いのであれば、電磁誘導を利用してバルク体を磁石にすることができるのではないだろうか。しかも、超電導状態であれば、大電流を流すことができるので、超強力磁石をつくることができるはずである。そこで、浮上実験につかったバルク体を磁化してみることにした。この場合、バルク体を液体窒素で冷やす前に磁場を加えておく。この状態でバルク体を冷却するのである。この操作を専門的には磁場中冷却と呼んでいる。そして、バルク体が十分冷えた後で、外部の磁場を取り除く。こうすれば、ピン止め効果によってバルク体に磁場が捕捉された超電導体になるはずである。

ところが、この実験を行うと、磁場の分布が均一ではなく、ところどころにピークの見える分布となり、ピークの高さは2000 - 4000 G (0.2 - 0.4 T) 程度であった。表面磁場が5000Gの永久磁石を使った予備実験であったので、その後超電導マグネットを使って2Tの磁場を加えて同様の実験を行ったところ、結果はほとんど同じものであった。これでは、磁石としては使い物にならない。

それでは、なぜ捕捉磁場は小さかったのであろうか。この理由としては、バルクが多結晶体で、しかも結晶方位がそろっていないことが挙げられる。つまり、磁石として機能させるためには、結晶方位のそろったバルク体、できれば単結晶状の試料合成が必要となるのである。

すこし聞いただけでは無理な気がするが、このようなバルク材料合成を可能にするプロセスが開発されたのである。これが超電導バルク磁石誕生への大きな一歩となったが、それについては次回紹介する。

[超電導 Web21 トップページ](#)