

電磁石の応用に適した全方向磁場に耐えられる高温超電導体の開発

米子工業高等専門学校 西澤 侑吾

要旨

高機能な高温超電導体である Bi 系高温超電導ウィスカーを電磁石に応用することができると、省スペース・低コストで且つ強力な電磁石を実現することができる。しかしながら、流すことのできる最大の電流密度が、印加される磁場の角度によって極端に変化してしまうという問題点 ($J_c - \theta$ 依存性) が存在し、この応用の妨げとなっている。

本研究では、この問題を解決するために Bi 系高温超電導ウィスカーへ Mg を添加した。これにより、 $J_c - \theta$ 依存性を約 1/7 へ改善することに成功した。

1. 緒言

超電導体は直流の電気抵抗が 0Ω という究極の省エネルギー材料である。電気抵抗が 0Ω だと熱損失無く大電流を流すことができる。そのため、強力で低消費電力な電磁石を作製することができる。この電磁石はリニアモーターカーなどの次世代技術に応用できる^[1]。

現在、電磁石に実用化されている超電導体は、超電導として機能する温度 (臨界温度: T_c) が $77K$ 以下の低温超電導体のみである。低温超電導体は冷却に液体ヘリウムを用いなければならない。液体ヘリウムは高価である上に断熱構造が大型になってしまうため、コストやスペースに問題が生じる。

従って、高温超電導体 (T_c が $77K$ 以上) を用いて電磁石を作製することができれば冷却に液体窒素を使えるので、コスト削減・省スペースにもつながる。

しかしながら、高温超電導体は電磁石への実用化において大きな問題を抱えている。それは印加される磁場 (H) の角度 (θ) によって流すことのできる電流の最大密度 (臨界電流密度: J_c) が大きく変化してしまうことである ($J_c - \theta$ 依存性)。具体的には、高温超電導体の c 軸と平行に磁場を印加したとき ($H//c$) に J_c が著しく減少する。そのため、高温超電導体を電磁石に応用すると、 $H//c$ 印加時の低い J_c で全体が規制されてしまう。これを改善することができなければ電磁石への応用は難しい。

そこで本研究ではこの問題を改善し、高温超電導体を電磁石へ実用化するための基礎的な研究を行った。その際、高温超電導体として着目したのが $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ ($n=1\sim 3$) 高温超電導針状結晶 (Bi 系ウィスカー) である。Bi 系ウィスカーは資源が豊富で作製が容易であるため実用性が高い。それに加えて、Bi 系高温超電導体の中でも極めて高い

J_c を持つ^[2]。そのため、Bi 系ウィスカーの $J_c - \theta$ 依存性を改善することで省スペース・低コストで且つ強力な電磁石作製につながると考えた。

改善方法としては Bi 系ウィスカーに対して、原材料に含まれていない Mg を添加する方法を採用した。Mg は安価で、原子サイズが小さいので Bi 系ウィスカーの構造を壊さずに入り込みやすい。これによって、Mg が $H//c$ の磁束を捕捉し、 $J_c - \theta$ 依存性が改善されると予想される (図 1 参照)。

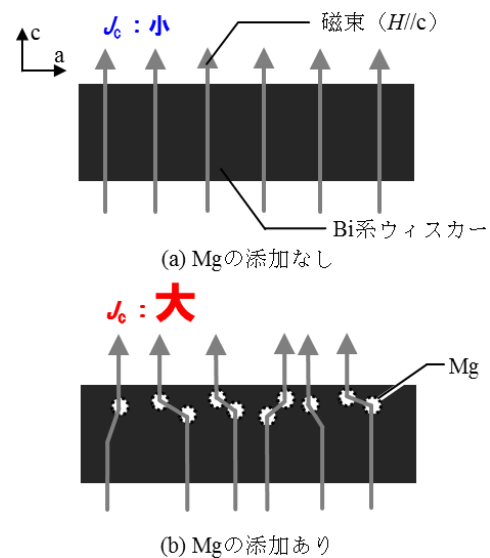


図 1. Mg が磁束を捕捉する様子 (模式図)

2. 実験

(1) Bi 系ウィスカーの育成

<実験方法>

まず、Bi 系ウィスカーの母材を作製する。

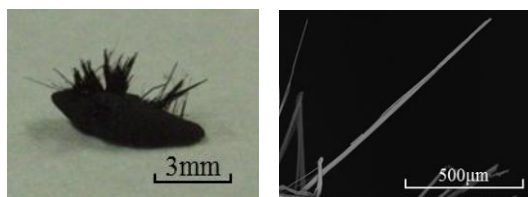
原材料を元素比が Bi : Sr : Ca : Cu = 2 : 2 : 2 : 4 となるように計量し、混合する。これを 1200°C で 0.5h 加熱して完全に熔融させる。熔融した原材料を表面に Al₂O₃ 粉末を散布した鉄板で挟んで冷やし、Bi 系ウィスカーの母材を作製する。この母材を Al₂O₃ 燃焼ボートに 1cm 間隔で並べ、880~900°C の管状炉中で熱処理することで Bi 系ウィスカーを育成する。このとき、育成時間は 24~96h で酸素流量は 120ml/min とした。

次に育成した Bi 系ウィスカーを走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscopy) で観察した。このときの条件は加速電圧 : 15keV、空間分解能 : 3.0nm とした。

<実験結果>

図 2 に育成した Bi 系ウィスカーの (a) 光学写真、(b) SEM 像を示す。図 2 に示した Bi 系ウィスカーは育成温度 : 894°C、育成時間 : 96h の条件で育成したものである。

育成の結果、図 2(a) に示すように 2.0~4.8mm の Bi 系ウィスカーを得ることができた。また、育成した Bi 系ウィスカーの J_c および T_c はそれぞれ $J_c = 2.3 \times 10^4$ A/cm²、 $T_c = 89.6$ K であった。



(a) 光学写真 (b) SEM 像

図 2. 育成した Bi 系ウィスカーの光学写真と SEM 像

(2) Mg 添加

<実験方法>

まず、Al₂O₃ 燃焼ボートに MgO 粉末を入れ、そこに 2.(1) の方法で育成した Bi 系ウィスカーを埋める。そして、これを管状炉で 400~800°C、5h、大気中で加熱した。図 3 にその様子を示す。

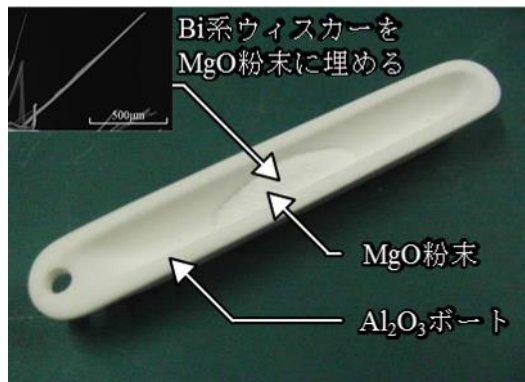


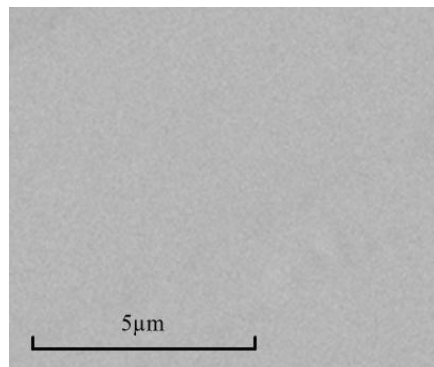
図 3. Mg 添加の様子

次に、実際に Mg が Bi 系ウィスカーに添加されているかどうかを調べる。これには、エネルギー分散型分析装置 (EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) を使用した。このときの EDX の測定条件は、加速電圧 : 15keV、エミッション電流 : 10µA、空間分解能 : 3.0nm であった。

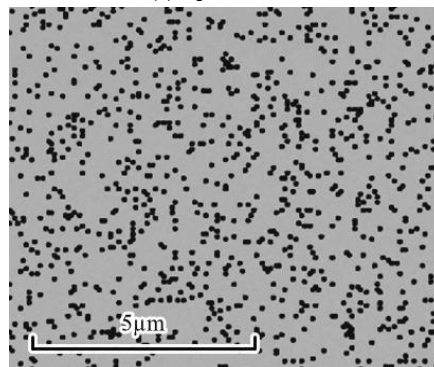
<実験結果>

図 4 に Bi 系ウィスカー表面の EDX 測定結果を示す。この図にある黒点は Mg が存在する場所を表している。この図から、実際に Mg は Bi 系ウィスカーの表面に添加されていることが確認できた。また、Mg を添加した Bi 系ウィスカーでは、加熱温度 400°C と 800°C のものを比較すると、Mg の量は 800°C のときの方が多く添加されていることが分かった。

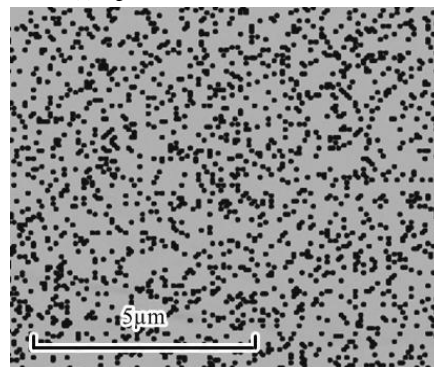
このことから加熱温度が高いほど Mg が多く添加され、磁束を捕捉する力がより強く働くのではないかと考えられる。



(a) Mg の添加なし



(b) Mg の添加あり、加熱温度 : 400°C



(c) Mg の添加あり、加熱温度 : 800°C

図 4. Bi 系ウィスカー表面の EDX 測定結果 (Mg 添加有無の比較) (黒点 : Mg)

(3) J_c - θ 依存性測定

<実験方法>

Mg 添加した Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性を測定するために、磁場を印加する角度を変えながら電流 - 電圧特性を測定した。このとき、磁場 (H) は 0.5T とした。そして、 J_c - θ 依存性を定量的に評価するため、依存性の程度を次式から求めた。

$$\gamma = \frac{J_{c\perp}}{J_{c\parallel}} \quad (1)$$

この式において、各変数の意味は次の通りである。 γ : J_c - θ 依存性の程度、 $J_{c\perp}$: 磁場 H を c 軸と垂直 ($H\perp c$) の方向に印加したときの J_c 、 $J_{c\parallel}$: 磁場 H を c 軸と平行 ($H\parallel c$) の方向に印加したときの J_c 。なお、この γ の値は 1 に近ければ近いほど J_c - θ 依存性がなく、特性が優れていることを示している。

<実験結果>

図 5 に Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性特性を示す。この図から、Mg を添加した Bi 系ウィスカーでは J_c - θ 依存性が改善されていることが分かった。また、 J_c - θ 依存性が最も改善されたのは Mg 添加処理における加熱温度が 400°C のものだった。

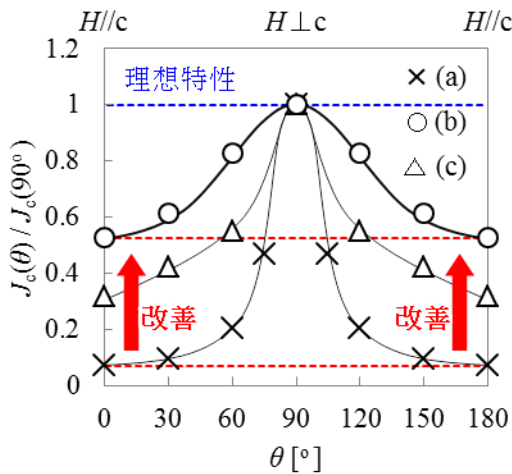


図 5. Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性特性

[a] Mg の添加なし、Mg の添加あり：(b) 400°C、(c) 800°C]

一方、図 4 の EDX 測定結果では、800°C で加熱した方が Mg を多く添加することができていたため、 J_c - θ 依存性がより改善されるだろうと考えていた。しかし、実際には加熱温度が 400°C の Bi 系ウィスカーに比べて改善されていなかった。これは、Bi 系ウィスカーの融点に近い 800°C で加熱してしまったため、Bi 系ウィスカー自体の構造が熱分解してしまったことが原因と考えられる。

従って、Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性を改善するには加熱温度を 400°C として Mg を添加することが有効であることが分かった。また、式(1)から J_c - θ 依存性の程度を定量的に求めた。その結果、(a)の Mg を添加していない Bi 系ウィスカーの $\gamma=13.8$ に対して、(b)の加熱温度：400°C で Mg を添

加した Bi 系ウィスカーは $\gamma=1.89$ と約 1/7 に改善されていることが分かった。この値は Bi 系ウィスカーと同じく実用化が期待されている $YBa_2Cu_3O_x$ 高温超電導体の $\gamma=4$ ^[3]と比較しても十分に小さい。

これらの結果から、Bi 系ウィスカーの表面に加熱温度：400°C で Mg を添加することで、全方向の磁場に耐えられる高温超電導体を作製することができた。

3. 結言

この研究は Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性を改善させることを目的に、Bi 系ウィスカーに Mg を添加した。その結果、Mg を添加する際の加熱温度を 400°C とすることで Bi 系ウィスカーの J_c - θ 依存性を大幅に改善することができた。具体的には $\gamma=13.8$ (添加なし) から $\gamma=1.89$ と約 1/7 に改善された。

従って、磁場を印加する角度を変えても J_c の変化量が少ない高温超電導体の作製に成功し、省スペース・低消費電力な電磁石の実現に一歩近づくことができた。

文 献

- [1] 下山淳一, “トコトンやさしい超伝導の本,” 日刊工業新聞社, vol. 2, pp. 126-129, 2006.
- [2] H. Tanaka, H. Yoshikawa, S. Ueda, C. Tsuruta, Y. Matsui, T. Ishigaki, S. Honda, S. Kishida, “Synchrotron radiation X-ray photoemission spectroscopy and high-resolution transmission electron microscopy analysis of $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ superconducting whiskers with high critical current density,” *J. Appl. Phys.*, vol. 106, p. 083907(3), 2009.
- [3] B. Roas, L. Schultz, and G. Saemann-Ischenko, “Anisotropy of the critical current density in epitaxial $YBa_2Cu_3O_x$ films,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, pp. 479-482, 1990.