

内部拡散法 Nb₃Sn 線材の I_c と B_{c2} のひずみ依存性 Strain dependence of I_c and B_{c2} for Internal tin Nb₃Sn wire

東北大・金研 小黒英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄
茨城大 石垣徹

H. Oguro¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, T. Ishigaki²
¹ Institute for Materials Research, Tohoku University
² Ibaraki University

1. はじめに

我々のグループでは、実用超伝導線材の超伝導特性とひずみとの関係を調べている。この研究の中で、強磁場中での超伝導特性の測定と、中性子や放射光を用いた線材内部の超伝導体そのもののひずみの測定を行い、その2つの結果を比較して超伝導線材のひずみ効果について調べてきた[1]。その結果、上部臨界磁場のひずみ依存性を、3次元ひずみを用いて正確に表すモデルを作成した[2]。そして、様々な線材への適用を行い、その有用性を確認してきた[3]。このモデルを超伝導マグネット応用へ適用するには、 I_c にも適用可能であるのかを正確に把握する必要がある。

今回は、中性子回折および B_{c2} のデータが揃っている内部拡散法 Nb₃Sn 線材に対して、 I_c のひずみ依存性の測定を行い、 B_{c2} のひずみ依存性との違いを考察した。ここから、我々の作成した実用ひずみ不変量モデルを、 I_c のひずみ依存性へ適用する際の問題点などを考察する。

2. 実験方法

試料には、一般的な内部拡散法 Nb₃Sn 線材を使用した。この試料に対する B_{c2} のひずみ依存性測定は、昨年度の研究で実施している[2]。

残留ひずみ測定のための中性子回折実験は、J-PARC の汎用粉末中性子回折装置 iMATERIA を用いて行った。線材は 8 mm に切断した後に 10 本ずつ並べて積み上げ、測定時に中性子ビームに当たる超伝導体の量が多くなるように工夫を施した。測定には、最も分解能の良い背面バンクを用いた。冷凍機を用いて 10 K の温度で測定を行い、クライオスタットごと回転させることで軸方向と横方向の測定を行った。ひずみゼロの際の格子定数は、線材から Nb₃Sn フィラメントを取り出し、これを粉末状にして、φ6 mm のバナジウム管に詰めて、線材と同様に 10 K の温度で測定を行った。

I_c の引張りひずみ依存性の測定には、カム方式の低温強磁場中引張り応力印加装置を用いた[3]。試料線材は 4 cm、電圧端子間距離 1 cm として 15 T で荷重を加えながら、 I_c の測定を行った。ひずみは線材に直接貼った、ひずみゲージを用いて測定を行った。ひずみゲージは、線材のたわみ成分を除去するため、線材表裏の対称位置に貼付けている。

このとき、線材が弱いためか、測定前と測定後で

ひずみの値が変化した。これは、線材へ働く電磁力で変形したものと思われる。このときのひずみは、変形した後のひずみ状態で I_c が決定していることとなるため、測定後のひずみの値を真の値として結果の整理を行った。

3. 実験結果と考察

図 1 に、内部拡散法 Nb₃Sn 線材に対する 10 K における B_{c2} のひずみ依存性を示す。特徴として、ひずみが大きい所まで緩やかに B_{c2} が変化し、大きな劣化が見られない点が挙げられる。

この線材の軸方向、横方向に関して、中性子回折を用いて 10 K において残留ひずみを測定した。図 2 に観測された結果を示す。この結果から格子定数を求め、フィラメントの結果と比較して残留ひずみを求めた。軸方向の残留ひずみは圧縮方向に 0.2464%、横方向は圧縮方向に 0.0202%であった。これは、 B_{c2} のひずみ依存性におけるピーク位置と矛盾しない。

これらの結果を用いて、実用ひずみ不変量モデル[2]を用いて解析を行った。式の形を以下に示す。

$$S_b = \frac{1}{(1 + a_1 \epsilon_{\text{hyd}})}$$

$$\frac{1}{\left(1 + a_2 \frac{3}{2\sqrt{2}} \epsilon_{\text{dev}}^2 + a_3 \frac{\text{sgn}(\epsilon_{\text{tensile}} + \epsilon_{\text{ax}0})}{8\sqrt{2}} \epsilon_{\text{dev}}^3 + a_4 \frac{9}{8} \epsilon_{\text{dev}}^4\right)}$$

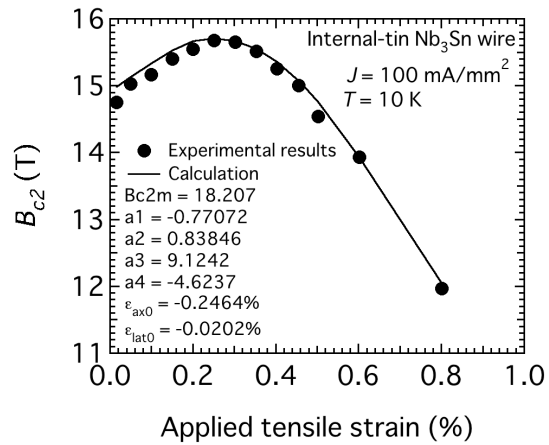


Fig. 1 The applied tensile strain dependence of upper critical field for Internal tin Nb₃Sn wire. Points are experimental results. The solid line is the calculation result by practical invariant strain model.

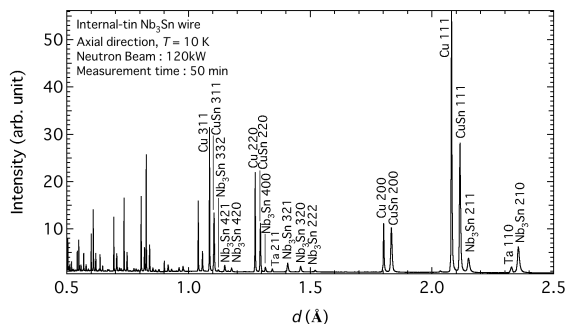


Fig. 2 The diffraction peaks of axial direction for internal tin Nb_3Sn wires at 10 K.

ここで、 $S_b = B_{c2} / B_{c2max}$, ϵ_{hyd} は静水圧ひずみ、 ϵ_{dev} は偏差ひずみ、 $\epsilon_{tensile}$ は与えた引張りひずみ、 ϵ_{ax0} は軸方向の残留ひずみである。 ϵ_{hyd} と ϵ_{dev} は軸方向、横方向の残留ひずみの値から求めた。その時の結果は図 1 の実線で示した。このときのフィッティングパラメータは $a_1 = -0.77072$, $a_2 = 0.83846$, $a_3 = 9.1242$, $a_4 = -4.6237$ であった。この結果はうまく B_{c2} のひずみ依存性を表すことができている。

次に図 3 に、 I_c のひずみ依存性を示す。結果として、 I_c がピークを持つ時のひずみは B_{c2} の結果と同じであり、正確な測定ができていることが分かった。ところが、特にピークより大きなひずみ領域で、内部拡散法線材に一般に言われているような、大きな I_c の劣化が見られる。この点は、 B_{c2} のひずみ依存性と大きく異なる。

超伝導特性 B_{c2} と I_c のひずみによる変化の違いが分かるように、両者とも最大値を元に規格化したグラフを図 4 に示す。この図から、特にそれぞれの超伝導特性のひずみ依存性のピークとなるひずみより大きなひずみ領域において、その特性低下の割合が大きく異なっている。この原因として、ひずみが 0.4%程度加わっていることから、線材内部のフィラメントの破断が原因であると考えられる。つまり、 I_c のひずみ依存性をモデルで表そうとした場合には、

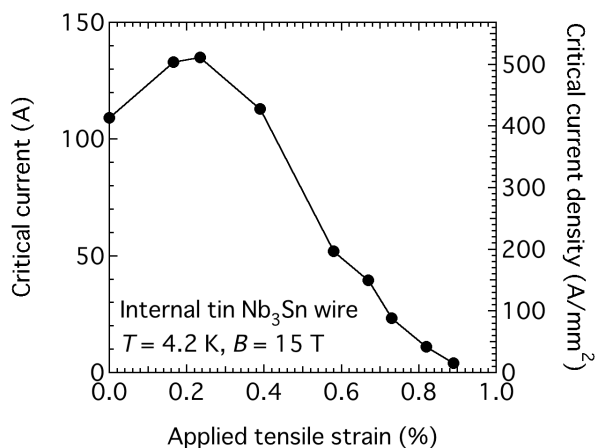


Fig. 3 The applied tensile strain dependence of critical current for internal tin wire at 4.2 K in 15 T.

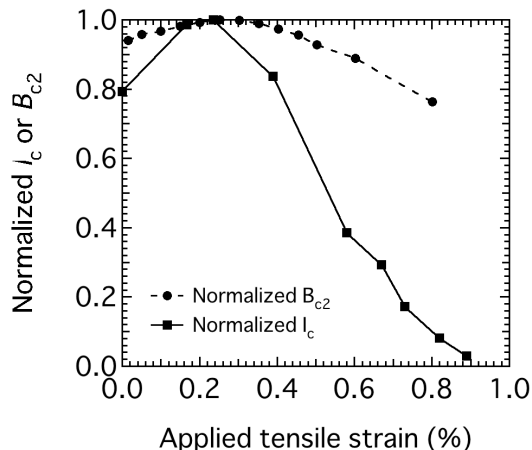


Fig. 4 The applied tensile strain dependence of normalized B_{c2} and I_c for internal tin Nb_3Sn wires.

あるひずみ以上でフィラメントのクラックが入ることを考える必要がある。フィラメントのクラックを定量的に現す考え方は、Miyoshi[5]らにより提案されているが、この考えを組み込むことで、ブロンズ法だけでなく内部拡散法や、パウダーインチューブ法など、機械的に弱いと言われている線材の I_c のひずみ依存性を正確に表すことにつながる。

4. まとめ

内部拡散法 Nb_3Sn 線材の B_{c2} 、 I_c 、残留ひずみを調べ、実用ひずみ不変量モデルで I_c のひずみ依存性が表せるかどうかを考察した。いずれの測定でも、残留ひずみの値は矛盾しない値となったが、 I_c のひずみ依存性は B_{c2} とは異なり、残留ひずみを越えたひずみを加えると大きく劣化した。このため、 B_{c2} から導出した実用ひずみ不変量モデルと合わない結果となった。これは、フィラメントのクラックが原因だと思われる、これをモデルに組み込むことができると考えられる。

参考文献

- [1] H. Oguro et al., J. Appl. Phys. **101** (2007) 103913
- [2] 小黒英俊、平成 20 年度博士論文
- [3] 小黒英俊 他、平成 21 年度年次報告書、p. 60
- [4] G. Nishijima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **20** (2010) 1391
- [5] Y. Miyoshi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **20** (2010) 1404