

# 内部拡散法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の B<sub>c2</sub> の 3 次元ひずみ依存性

## Three-dimensional strain dependence of B<sub>c2</sub> for internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn wires

茨城大 小黒英俊、石垣徹  
 東北大・金研 西島 元、淡路 智、渡辺 和雄  
 H. Oguro<sup>1</sup>, T. Ishigaki<sup>1</sup>, G. Nishijima<sup>2</sup>, S. Awaji<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Ibaraki University

<sup>2</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 線材は実用線材として、強磁場超伝導マグネットに利用されているが、その超伝導特性がひずみによって大きく変化することが問題として残っている[1]。このひずみによる特性変化を正確に把握するためには、3次元ひずみを考える必要があることが分かってきた[2, 3]。

これまでに筆者らは、ブロンズ法線材に関して3次元ひずみと超伝導特性の関係を調べ、3次元ひずみを用いることでその超伝導特性を表せることを示した[4]。これをその他の製法の線材に拡張するため、ブロンズ法より機械的に弱いことが指摘されている、内部拡散法に注目し、その3次元ひずみと超伝導特性の関係を調べた。このため、一般的な内部拡散法線材を用意し、B<sub>c2</sub>の引張りひずみ依存性と、その時の3次元ひずみの変化を測定した。

### 2. 実験方法

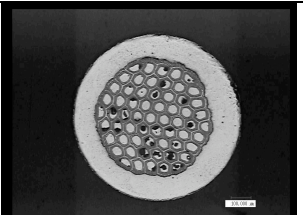
#### 2-1. 試料

試料には一般的な内部拡散法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を用意した[5]。表1に各線材の諸元と断面図を示す。線材は、真空中にて 200°C、350°C、450°C、580°C、650°C の多段熱処理を行い作製した。

#### 2-2. B<sub>c2</sub>の引張り歪依存性の測定

強磁場低温下引張り歪印加装置を用いて B<sub>c2</sub> の引張り歪依存性を測定した。この時に線材の軸、横方向歪を同時に測定することで、3次元歪の測定を行った。ひずみの測定は、線材に直接ひずみゲージ

Table 1 Cross section and specification of the internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn wire

Cross section	
Wire diameter (mm)	0.820
Cu / Non Cu ratio	1.03
Twist pitch (mm)	10
Heat treatment	200°C, 350°C, 450°C, 580°C, 650°C

を貼付けて行った。ひずみゲージは線材の表裏の2カ所に貼付けることで、線材のたわみ等の影響を消去している。また、温度の安定する 4.2 K にてひずみを与えているため、引張り時の温度変化によるひずみのぼらつきを抑えている。B<sub>c2</sub>は、4端子法による電気抵抗測定の結果より求めた。試料の長さは 15 mm、電圧端子間距離は 5 mm とした。測定は、東北大金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター(HFLSM)の 18T 超伝導マグネットを用いて行った。

### 3. 実験結果と考察

図1に、内部拡散法線材の B<sub>c2</sub> の引張り歪依存性を示す。図には 10 K、12 K、14 K の B<sub>c2</sub> を示している。この結果から、軸方向の残留ひずみは約 0.25% であることが分かる。また、図1には比較のため、ブロンズ法線材の測定結果[4]を破線で示した。高温において、ブロンズ法線材の B<sub>c2</sub> が大きくなっているが、これはブロンズ法線材の T<sub>c</sub> (= 17.3 K) が内部拡散法線材の T<sub>c</sub> (= 16.6 K) より高いことが影響していると考えられる。ブロンズ法と内部拡散法とを比

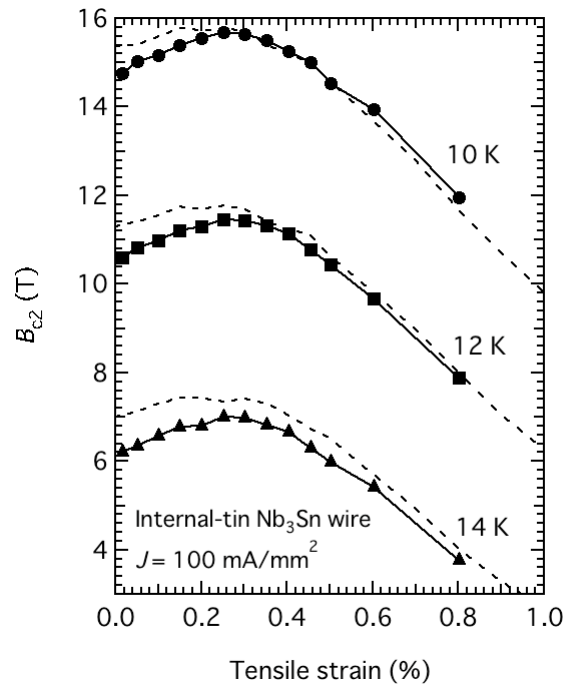


Figure 1 The tensile strain dependence of B<sub>c2</sub> for the internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn wire at 10 K, 12 K, and 14 K. Dashed lines are results of bronze route Nb<sub>3</sub>Sn wires[4].

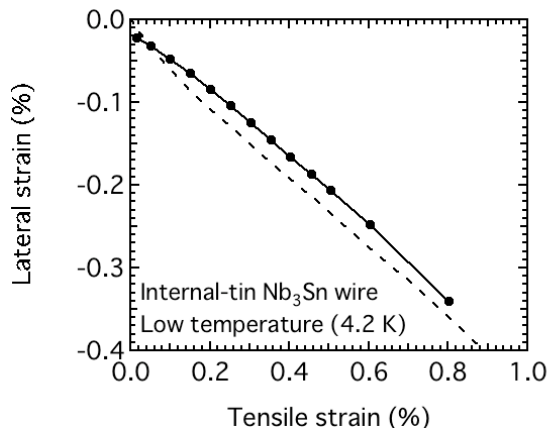


Fig. 2 The lateral strain as a function of the tensile strain for the internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn wire. Dashed lines are results of bronze route Nb<sub>3</sub>Sn wires[4].

較すると、 $J_c$ の引張りひずみ依存性から言われているような、大きな $B_{c2}$ の劣化が無いことが分かった。これは、 $B_{c2}$ の測定において、電流密度が小さいために破断したフィラメントを避けるように電流が流れ、フィラメントの破断の影響が出にくかったためではないかと考えられる。つまり、 $B_{c2}$ の測定から、Nb<sub>3</sub>Snの結晶粒に与えるひずみ効果の影響としては、ブロンズ法と内部拡散法とでは変わらないことが分かった。

図2には横方向ひずみの引張りひずみによる変化を示した。ここでも比較のため、ブロンズ法線材の結果を破線で示した。内部拡散法の横方向ひずみの変化率、つまり、直線近似した場合の傾きは0.4となり、ブロンズ法の0.43より小さくなった。

これまでの研究において、上記の値が大きいとひずみによる超伝導特性の変化が大きくなることが分かっている[4]。今回の結果は、内部拡散法線材とブロンズ法線材とでその値に大差は無かった。つまり、製法の違いがあっても、生成されているNb<sub>3</sub>Snの超伝導特性に対するひずみ効果に大きな差は現れないことが分かった。今後は、 $J_c$ の引張りひずみ依存性も詳細に調べ、製法による $J_c$ のひずみ依存性の違いが、フィラメントに発生するクラックの影響で説明できるのかどうかを検討する必要がある。

#### 4. まとめ

内部拡散法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を用いて、 $B_{c2}$ の引張りひずみ依存性の測定から、3次元ひずみと超伝導特性の関係を調べた。この結果から、内部拡散法の残留ひずみが0.25%であることが分かった。また、引張りひずみに対する横方向ひずみの変化率は0.4となった。今回の結果をブロンズ法と比較すると、横方向ひずみの変化率がほぼ変わらなかったことから、 $B_{c2}$ の引張りひずみ依存性に対して、 $J_c$ で見られるよう

な大きな劣化は見られなかった。これは、生成されているNb<sub>3</sub>Snの超伝導特性が、製法の違いがあっても変わらないことを示している。今後は、同じ線材を用いて $J_c$ の引張りひずみ依存性を調べ、フィラメントのクラックの影響があるのかを調べる必要があることが分かった。

#### 参考文献

- [1] J. W. Ekin, *Cryogenics* **20** (1980) 611-624
- [2] H. Oguro et al., *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 103913-1 - 103913-5
- [3] W. D. Markiewicz, *Cryogenics* **44** (2004) 895-908
- [4] 小黒英俊、平成20年度博士論文
- [5] Y. Nunoya et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **18**, (2008) 1055-1058