

Nb₃Sn 超伝導線材における臨界電流の 3 次元歪依存性

Three-dimensional strain dependence of the critical current for Nb₃Sn superconducting wires

東北大・金研 西島 元, 峯岸 一博, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄

G. Nishijima, K. Minegishi, H. Oguro, S. Awaji and K. Watanabe
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

1954年にMatthiasによって発見されたNb₃Snは硬くて脆かった[1]。硬くて脆い材料は「使えない」材料である。しかし、1970年に太刀川らがブロンズ法を発明し[2]、これがNb₃Snにも応用されたことで、Nb₃Snは「使える」材料になった。現在、Nb₃Sn複合多芯線材は、10 T以上超伝導マグネットの殆ど全てに使用されている。

磁場中に電流の流れている電線を置くと電磁力が働く。つまり、励磁中（磁場発生中）の超伝導コイルには電磁力が作用する。この電磁力は線材軸方向に引張り力として作用する。これによって線材の特性が変化する。従って、線材の超伝導特性と応力/歪の関係を知る事が必要になってくる。Nb₃Sn複合多芯線材の歪効果は、1980年にEkinによってスケールリングが試みられた[3]。それから四半世紀以上経過した現在、マグネットやコイルの大型化、強磁場化、大電磁力化に伴って、歪効果の理解はますます重要になってきている。

東北大金研では、実用Nb₃Sn複合多芯線材における事前曲げ効果を発見して以来[4]、Nb₃Sn線材の歪効果の詳細な研究を行ってきた。そして、線材軸方向だけでなく横方向（線材直径方向）の歪を含めた3次元歪を考えることでNb₃Snの超伝導特性の普遍的な記述が可能であることを明らかにした[5]。しかし、応用上最も重要な超伝導特性である臨界電流(I_c)の3次元歪効果の実験的検証には至っていない。

そこで、本研究では3次元歪が I_c に与える影響について考察することを目的とし、従来のクリップゲージによる線材軸方向歪- I_c 評価に加えて、歪ゲージ法による3次元歪評価を行った。

2. 実験方法

試料としてCuNb補強Nb₃Sn線材(CuNb/Nb₃Sn)を用いた。断面をFig. 1に、諸元をTable 1に示す。直径1 mmの線材の最内層にNb₃Sn、その外側に補強材CuNb、さらにその外側に安定化材Cuが配置されている。

I_c -応力/歪特性評価に用いた装置の概略をFig. 2に示す。片桐らによって開発された装置[6]を参考に製作した本装置を東北大学金属材料研究所附属強磁場センターの18 T超伝導マグネットと組み合わせることで、4.2 K、18 Tまでの磁場中で I_c -応力/歪の測定が可能である。応力は、負荷ロッドに印加する力

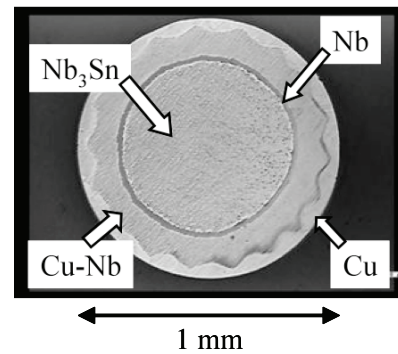


Fig. 1 Cross sectional view of the CuNb/Nb₃Sn wire.

Table 1 Specification of the CuNb/Nb₃Sn wire

	Cu-Nb/Nb ₃ Sn
Wire diameter (mm)	1.0
Bronze	Cu-14 wt%Sn-0.2 wt%Ti
Filament diameter (μm)	3.3
Number of filaments	11457
Barrier	Nb
Reinforcement material	in-situ Cu-20 wt%Nb
Cu / Reinforcement / SC (%)	17.7 / 35.4 / 46.9
Heat treatment	670 °C × 96 h

を室温部分でロードセルによって測定する。また、歪は線材の電流端子間距離をクリップゲージによってモニタし、初期長さで除して求める。 I_c は、線材に引張り歪を加えた状態で測定する。電圧端子間距離は10 mmなので、 I_c 決定には電界基準1 μV/cmを用いた。

線材の3次元歪は、線材軸方向歪と横方向（線材直径方向）歪を測定することにより評価した。線材の軸方向と横方向を測定する歪ゲージを、たわみ成分を除去できるよう2枚ずつ接着し、2アクティブ法で測定した。

3. 実験結果と考察

Fig. 3にCuNb/Nb₃Sn線材の応力-歪(σ - ϵ)特性および I_c -歪(I_c - ϵ)特性を示す。0.4%歪における塑性流動応力の値は248 MPaであった。この値は坂本らの結果[7]から読み取った値(205 MPa)の1.2倍である。この理由については現在検討中である。一方、破断歪は坂本らの結果と同程度(1.6%)であった。

一方、 I_c - ϵ 曲線において I_c が最大値 I_{cm} となる歪 ϵ_m は0.4%であった。一般的なブロンズ法Nb₃Sn線材で

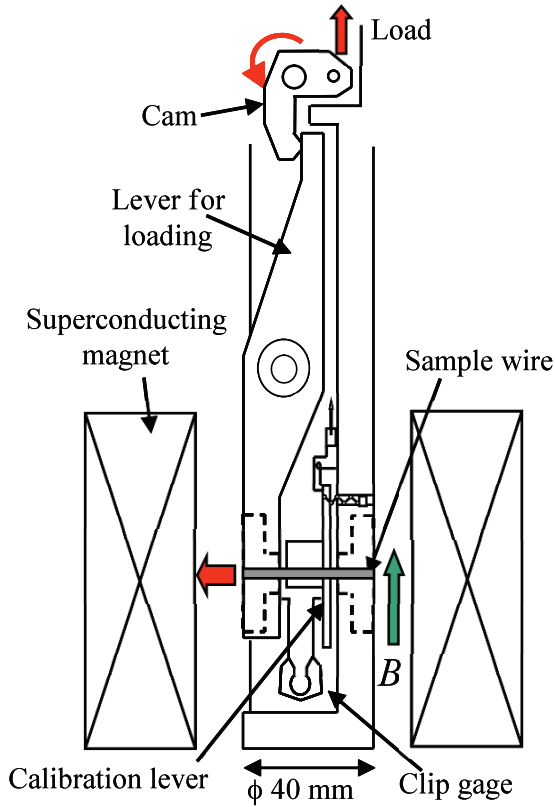


Fig. 2 Schematic view of the apparatus measuring I_c - tensile stress/strain.

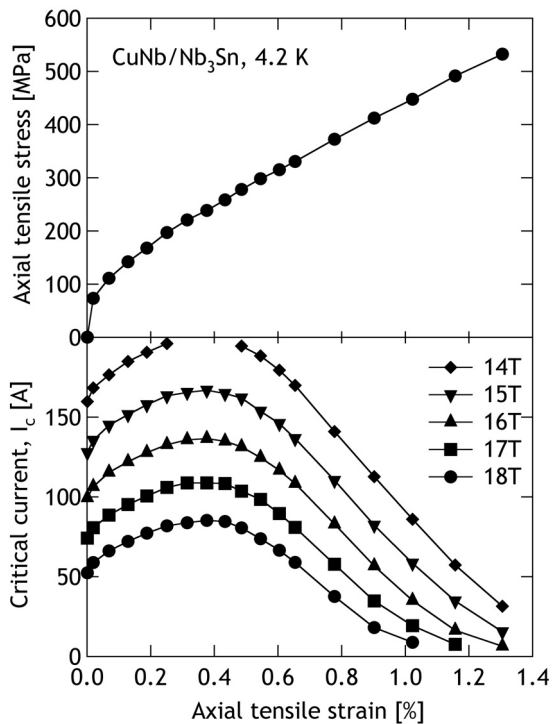


Fig. 3 Stress-strain and I_c -strain characteristics for CuNb/Nb₃Sn superconducting wire at 4.2 K.

は $\epsilon_m \sim 0.25\%$ であることを考えるとこの値は大きい。これは CuNb の熱膨張係数が Cu のそれよりも大きい

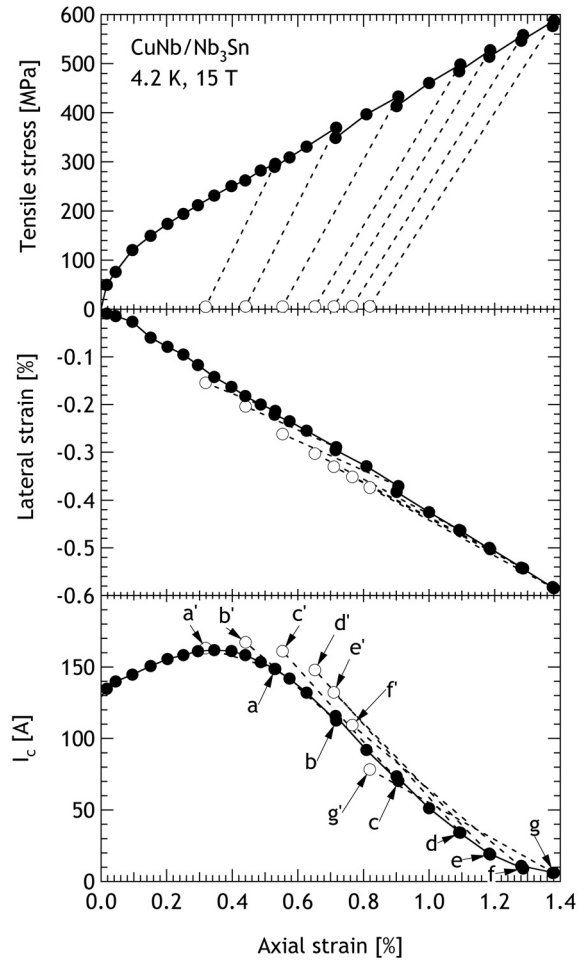


Fig. 4 Stress, Lateral strain and I_c as a function of axial strain at 15 T for CuNb/Nb₃Sn superconducting wire.

く、熱処理後の熱収縮量が大きいためと考えることができる。

I_c はある歪を超えると不可逆に劣化する。この I_c 可逆限界(ϵ_{irr})を調べるために、ある歪から負荷をゼロに(除荷)した状態で I_c を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。グラフ上のアルファベットは、除荷前 I_c と除荷時 I_c の対応を示す(ex. a \rightarrow a')。

一般に除荷時 I_c は負荷時の I_c - ϵ 曲線上に重なり、 $\epsilon > \epsilon_{irr}$ となる歪からの除荷 I_c は I_c - ϵ 曲線から外れると理解されているが、Fig. 4 では I_c - ϵ 曲線よりも高い値を示している。ここで、3次元歪を考える必要が出てくる。軸方向歪が同じでも横方向歪が変化することで偏差歪が変化することになるので I_c も変化することになる。そこで、横方向歪と軸方向歪との相関を調べた(Fig. 4b)。

負荷を増加させて軸方向歪を増加させると、横方向歪は圧縮側に増加していく。除荷時の横方向歪は、負荷時の値に比べて圧縮側に大きくなっている小さくなっていることがわかる。このことは、除荷時のほうが3次元歪が大きくなっていることを示唆する。一方で除荷時 I_c は負荷時よりも大きくなっており、

3 次元歪の傾向とは異なっている。この矛盾については、解析と実験の両面から検討を行っている。

4. まとめ

本研究では、臨界電流と3次元歪との関係を考察するために、CuNb/Nb₃Sn 超伝導線材の4.2 Kにおける I_c - σ - ε - B を調べた。歪については一軸歪だけでなく、横方向歪も評価し、 I_c との関連を調べた。詳細についてはまだ明らかになっていないが、今後、解析と実験の両面から検討を行っていく。

謝辞

本研究で用いた I_c -応力/歪評価装置は科学研究費補助金(17760554)の助成により製作しました。また、設計・製作にあたっては岩手大学片桐一宗教授のご指導を受けました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] B. T. Matthias, et al., Phys. Rev., 95 (1954) 1435.
- [2] K. Tachikawa, Proc. ICMC-3, (1970) 339.
- [3] J. Ekin, Cryogenics, 20 (1980) 611.
- [4] S. Awaji, et al., Supercond. Sci. Technol. 16 (2003) 733.
- [5] 小黒英俊, 東北大学博士論文 (2009)
- [6] K. Katagiri, et al., Adv. Cryog. Eng. 36 (1990) 69.
- [7] H. Sakamoto, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 12 (2002) 1067.