

Nb₃Sn 線材の超伝導特性に与える 3 次元歪の影響

Three dimensional strain effect for superconducting properties of Nb₃Sn wires

東北大・金研 小黑 英俊, 淡路 智, 西島 元, Petre Badica, 渡辺 和雄
岩手大・工 片桐 一宗

H. Oguro¹, S. Awaji¹, G. Nishijima¹, P. Badica¹, K. Watanabe¹, K. Katagiri²

¹Institute for Materials Research, Tohoku University

²Faculty of Engineering, Iwate University

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導線材の超伝導特性はわずかな歪で変化する [1]。そのため、Nb₃Sn 線材に加わる歪と超伝導特性との関係を理解することは、Nb₃Sn 線材の応用にとって非常に重要である。

その Nb₃Sn 線材に対して、室温で繰り返し曲げ戻し歪を与える処理 (事前曲げ処理) を行うことで、Nb₃Sn 線材の超伝導特性が大幅に向上すること (事前曲げ効果) を我々は発見した [2]。事前曲げ効果のメカニズムは、Nb₃Sn 線材に曲げ戻し歪を与えることで、Nb₃Sn の残留歪 (それ以外の構成材との熱収縮差によって受ける圧縮歪) が緩和されて起こると理解されている [3]。このとき、軸方向のみならず横方向 (径方向) も残留歪が緩和されることが、これまでの研究の中で明らかになった [3]。これは、軸方向歪のみで考えられてきた Nb₃Sn 線材の超伝導特性の歪効果が、実際には横方向に関してもその効果があることを示している。つまり、3 次元的な歪を考えることで、Nb₃Sn 線材の歪効果がより良く理解できる。

本研究の目的は、事前曲げ効果を含めた、歪と超伝導特性との関係を詳細に理解することである。本報では、Nb₃Sn 線材に引張り歪を与えた際の、超伝導特性 (B_{c2}) と軸方向歪、横方向歪を同時に測定し、それらの関係を調べた。その結果を用いて、歪と超伝導特性に関して考察を行った。

2. 実験方法

図 1 に装置の概略を示す。この装置では、Cu の電極に試料をハンダで固定し、その 2 枚の電極を動かすことで歪を与える。この電極の制御はステッピングモーターを使っており、印加する歪の精密なコントロールが可能となっている。

この装置の特徴として、その試料ホルダー部分が直径 30 mm とコンパクトに設計されていることにある。

このため、金研強磁場センターのハイブリッドマグネットでの測定が可能であり、27 T までの磁場中で引張り歪を印加しながら、電気抵抗測定が可能である。Nb₃Sn 線材の場合、今回作製した装置で直接 4.2 K の上部臨界磁場 B_{c2} を測定できることになる。

試料の歪測定は、ひずみゲージ法を用いた。このとき、ゲージ長 0.2 mm のひずみゲージを用いた。試料のたわみなどの影響をキャンセルするために、線材の軸方向、横方向へ表裏対称の位置にひずみゲージを貼って測定を行った。超伝導特性 (B_{c2}) の測定は、4 端子法を用いた電気抵抗測定から求めた。このとき、電圧端子間距離は 5 mm、通電電流は 100 mA とした。測定には 18T-超伝導マグネット、23T-冷凍機冷却ハイブリッドマグネット、28T-ハイブリッドマグネットを用いた。

表 1 に測定した CuNb/Nb₃Sn 線材の諸元を示す。この線材は、事前曲げ効果が大きい。すなわち、事前曲げ処理による残留歪の変化は大きくなる。事実、測定した中性子回折実験の結果から、線材の Nb₃Sn に加わる歪の大幅な変化が観測されている [3]。

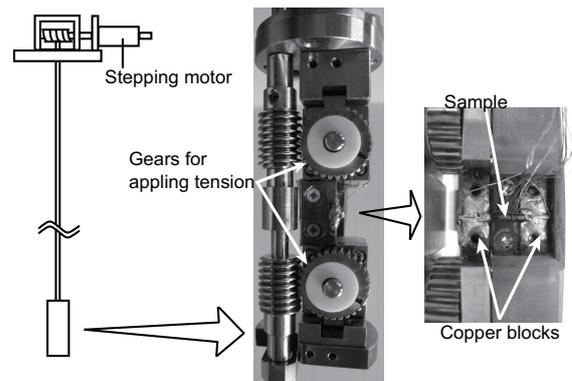
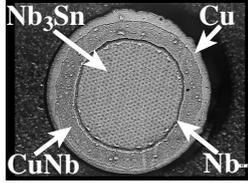


Fig. 1 The apparatus of the B_{c2} measurements under the applied tensile strain.

Table 1 Specification and cross sectional view of the CuNb/Nb₃Sn wire.

	CuNb/Nb ₃ Sn
Bronze	Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti
Filament diameter (μm)	3.3
Number of filaments	11457
Reinforcement material	in-situ Cu-20wt%Nb
Cu / Reinforcement materials / non Cu (%)	17.7 / 35.4 / 46.9
Heat treatment	670°C × 96 h
Cross section	

3. 実験結果と考察

図 2 に、作製した装置を用いて測定した、CuNb/Nb₃Sn 線材の B_{c2} と軸方向歪 (引張り歪)、横方向歪との関係を示す。この結果から、残留歪が 0.43% であることが分かる。測定では最大 0.76% まで引張り歪を印加したが、このとき歪を戻すことでその B_{c2} は回復しているのに、不可逆歪は 0.76% 以上となることが分かる。横方向歪は、軸方向歪に対して線形に変化することが分かった。

この結果は、図 3 に示した、同じ線材の I_c の引張

り歪依存性の結果とも良く合う。つまり、既存の装置と同様に正確な測定が可能であることが分かった。さらにこの装置で可能となった、7 K と 4.2 K (液体ヘリウム温度) での測定も行っており、このときの B_{c2} の値を直接実験から求めることができた。

今回は、熱処理直後の線材のみ測定を行ったが、今後は事前曲げ処理した線材でも実験を行う予定である。

この実験結果から、偏差歪モデルを用いて 3 次元歪と超伝導特性の関係を考える [4]。偏差歪モデルを用いて、熱処理直後の線材と事前曲げ処理後の線材との超伝導特性の差を説明できることは分かっているため [3]、これを引張り歪印加時の超伝導特性を表すために用いる。

線材に引張り歪を加えていない状態の残留歪の値は、中性子回折実験で得られている値を用いる。ここから、軸方向、横方向とも加えた歪を元に偏差歪

$$\epsilon_{\text{dev}} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

を計算する。

ここで、偏差歪と B_{c2} との関係として、偏差歪が最小のとき B_{c2} が最大になることが必要となる。これは、Nb₃Sn の結晶格子が立方晶となるときに最も良い超伝導特性を示すという物理的な側面からの性質があるためである。

今回の実験結果を用いて偏差歪と B_{c2} との関係を表すとき、上記の関係を満たすように横方向歪の値を補正した。これは、Nb₃Sn 線材の構成物質である Nb₃Sn, Cu, CuNb, Nb のヤング率やポアソン比がそれぞれ異なることから、ひずみゲージで測定した線材表面の歪と Nb₃Sn に加わる歪が、違うことが考えられるために、必要な補正である。

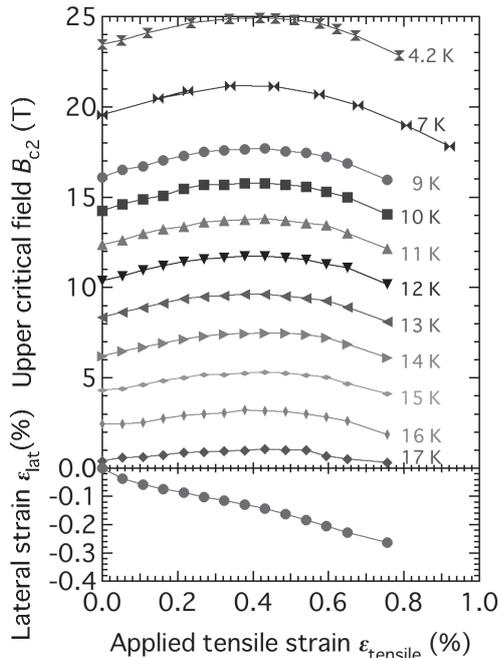


Fig. 2 The applied tensile strain dependence of B_{c2} and lateral strain for as-reacted CuNb/Nb₃Sn wires

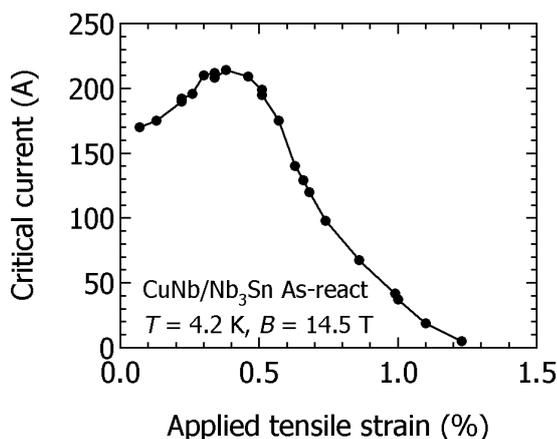


Fig. 3 The applied tensile strain dependence of I_c for as-reacted CuNb/Nb₃Sn wires .

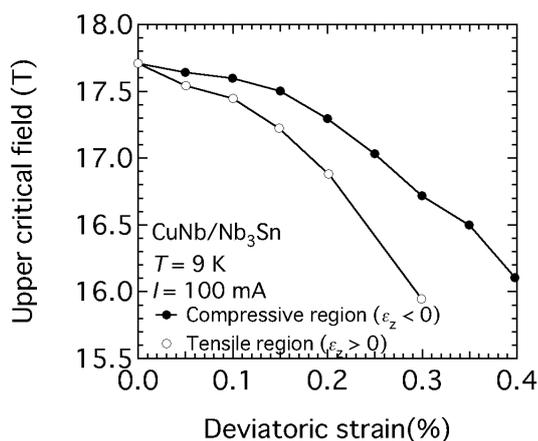


Fig. 4 The deviatoric strain dependence of B_{c2} for as-reacted CuNb/Nb₃Sn wires .

このときの偏差歪と B_{c2} との関係を図 4 に示す . この図から , 偏差歪によって B_{c2} が大きく変化することがよくわかる . このとき線材の圧縮領域 (残留歪が残っており , 線材の Nb₃Sn の軸方向に圧縮歪が加わっている状態) と引張り領域 (残留歪以上に線材を引張り , 線材の Nb₃Sn の軸方向に引張り歪が加わっている状態) とで , その振る舞いが異なる . これは , Nb₃Sn 線材の B_{c2} の歪効果を , 偏差歪だけで説明することができず , 他のファクターが必要となる . そのファクターとして , Nb₃Sn の超伝導特性を変化させる静水圧歪があり , 現在それを含めた解析を行っているところである .

4. まとめ

Nb₃Sn 超伝導線材の超伝導特性と 3 次元歪との関係を調べるため , 低温強磁場引張り歪印加装置を作製

し , 軸方向歪と横方向歪 , 上部臨界磁場の関係を調べた . この装置を用いて , 引張り歪を 0.8% まで , 温度を 4.2 K から 300 K まで , 磁場を 0 T から 27 T の領域で歪測定と電気抵抗測定を行った . 結果から , 軸 , 横方向歪と B_{c2} との関係が分かった . 結果を解析したところ , 測定した横方向歪に補正が必要なが分かった . そして , 偏差歪モデルでの解析の結果 , 偏差歪のみで Nb₃Sn 線材の超伝導特性を説明するには不十分であることが分かった . 偏差歪に加えて静水圧歪を考えると , Nb₃Sn 超伝導線材の超伝導特性と 3 次元歪に関して , より詳細な理解が得られることが期待される .

参考文献

- [1] J. W. Ekin, *Cryogenics*. **20** (1980) 611-624
- [2] 小黒ら , 低温工学 **39** (2004) 422-426
- [3] H. Oguro *et. al.*, *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 103913
- [4] B. ten Haken *et. al.*, *Ph. D thesis*