

実用 Nb₃Sn 線材における臨界電流の歪依存性に対する 3 次元歪モデルの適用 Application of three dimensional strain model for critical current of practical Nb₃Sn wires

東北大学・金研 峯岸 一博, 西島 元, 淡路 智, 渡辺 和雄
茨城大学 小黒 英俊
K.Minegishi¹, G. Nishijima¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹ and H. Oguro²
¹ Institute for Materials Research, Tohoku University
² Ibaraki University

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導線材は 10 T 以上の磁場を発生する超伝導マグネットの全てに使用されている。しかし、その超伝導特性はわずかな歪によって変化する。超伝導マグネット運転時に発生する電磁力により、線材の軸方向にフープ応力と呼ばれる応力が加わるため、Nb₃Sn 線材の臨界電流に対する軸方向引張り歪の効果を調べることでマグネットを設計する上で不可欠となる。

従来の研究では線材の歪については軸方向の 1 次元歪のみを考えていた。しかし、最近の研究により、Nb₃Sn 線材の超伝導特性に対する歪効果を完全に理解するためには、線材の横方向の歪も含めた 3 次元歪を考える必要があることが分かってきた[1,2]。

このような 3 次元歪の超伝導特性への効果を表すモデルとして偏差歪+静水圧歪モデルと実用歪不変量モデルという 2 つのモデルが提案され、この 2 つのモデルが上部臨界磁場(B_{c2})の 3 次元歪依存性を良く表せることが分かった[2]。

本研究では、偏差歪+静水圧歪モデルが I_c の 3 次元歪依存性に適用できるかについて検討した。異なる線材構造を持つ 2 種類の Nb₃Sn 線材について臨界電流(I_c)の 3 次元歪依存性を測定し、得られた結果を偏差歪+静水圧歪モデルに基づき解析した。

2. 試料および実験方法

2-1. 試料

ブロンズ法によって作製された 2 種類の Nb₃Sn 線材を試料とした。線材諸元を Table 1 に、断面写真を Fig. 1 に示す。

Fig. 1(a)の CuNb/Nb₃Sn は最内層に Nb₃Sn フィラメントとブロンズマトリックスがあり、その外側に補強材の CuNb が配置されている。Fig. 1(b)の ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn は、Nb₃Sn フィラメントの中心に Ta 繊維を配置することでフィラメントそのものが補強されている。さらに安定化 Cu の一部が、Al₂O₃ 繊維によって補強された Cu である ODS-Cu(Oxygen Dispersion Strengthened Copper)によって置き換えられている。

2-2. 実験

各線材における I_c の歪依存性の測定は、Fig. 2 に示すような装置を用いて行った。試料はレバー側とステイ側の 2 つの電極にハンダ付けされ、負荷レバーの運動によって引張り応力が加えられる。

この装置を東北大学金属材料研究所強磁場超伝導

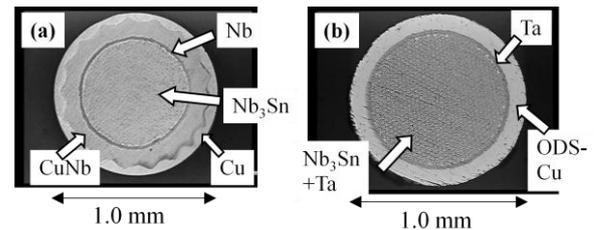


Fig. 1 Cross sectional views of (a) CuNb/Nb₃Sn (b) ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn wires.

Table 1 Specifications of CuNb/Nb₃Sn and ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn wires.

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

ODS-Cu/ Ta /Nb ₃ Sn	
Bronze	Cu-16wt%Ta-0.3wt%Ti
Barrier	Ta
Reinforcement	Ta filament, ODS-Cu
Wire diameter	1.0 mm
Filament diameter	8.0 μm
Cu/Reinforcement materials/non Cu(%)	13/40/47
Heat treatment	650 °C × 200 h

材料研究センターの 18 T 超伝導マグネットに挿入することにより、最高磁場 18 T、温度 4.2 K (液体 He 浸漬冷却)において線材に引張り歪を印加しながら I_c を測定した。電圧端子間距離は 10 mm、I_c 決定の電界基準は 1 μV/cm とした。

試料には軸方向歪と横方向歪を測定する歪ゲージを接着した(Fig. 3)。軸方向歪は同時にクリップゲージでも測定した。クリップゲージはキャリブレーションレバーを用いることで I_c 測定条件において毎回較正できる。歪ゲージとクリップゲージの測定値を比較することでより信頼性の高い歪を得た。

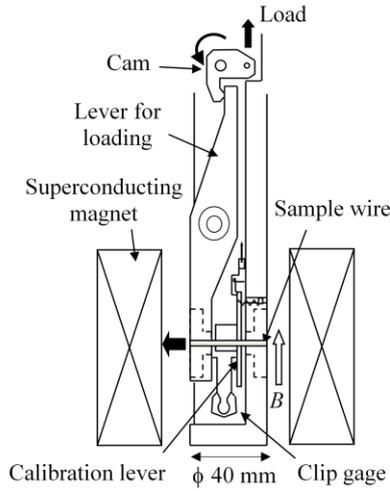


Fig.2 Schematic view of the apparatus for I_c -strain measurement.

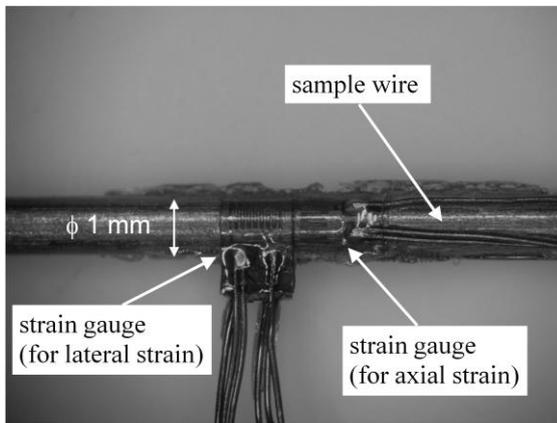


Fig.3 Strain gauges for measuring the strain of sample wire.

3. 実験結果および考察

3-1. 実験結果

CuNb/Nb₃Sn および ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn の I_c の軸方向引張り歪($\epsilon_{\text{tensile}}$)依存性を Fig.4 に示す。

CuNb/Nb₃Sn は $\epsilon_{\text{tensile}} = 0.41\%$ 、ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn は $\epsilon_{\text{tensile}} = 0.19\%$ のとき I_c が最大になった。 I_c が最大となるときの $\epsilon_{\text{tensile}}$ の値を ϵ_m とする。

I_c の $\epsilon_{\text{tensile}}$ 依存性にピークが現れる理由は引張り応力の印加によって Nb₃Sn に加わる圧縮残留歪が緩和されるためである。Cu の熱膨張係数 α は $-16.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ であり、Nb₃Sn の $-7.64 \times 10^{-6}/\text{K}$ に対して約 2 倍の大きさがある [3]。このため、Nb₃Sn の生成熱処理温度からの冷却時および室温から I_c 測定温度 4.2 K への冷却時に Cu が Nb₃Sn より大きく収縮しようとするため、Nb₃Sn に圧縮残留歪が加わる。

ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn 線材の方が ϵ_m が小さいので、軸方向の残留歪も小さい。これは、ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn において Nb₃Sn フィラメントと複合された Ta の α が $-6.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ と Nb₃Sn に近いことによるものだと考えられる。

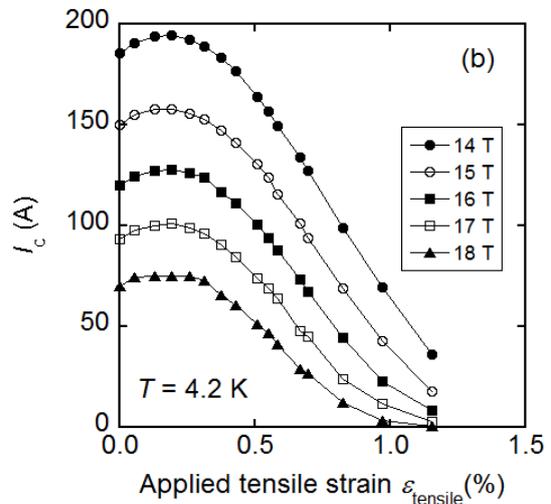
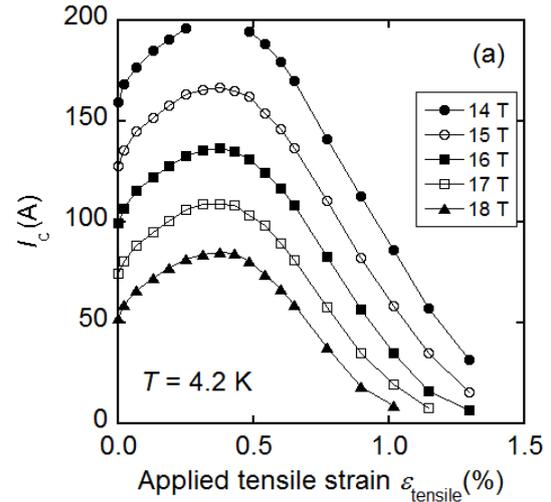


Fig.4 Tensile strain dependence of I_c of (a) CuNb/Nb₃Sn and (b) ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn wires.

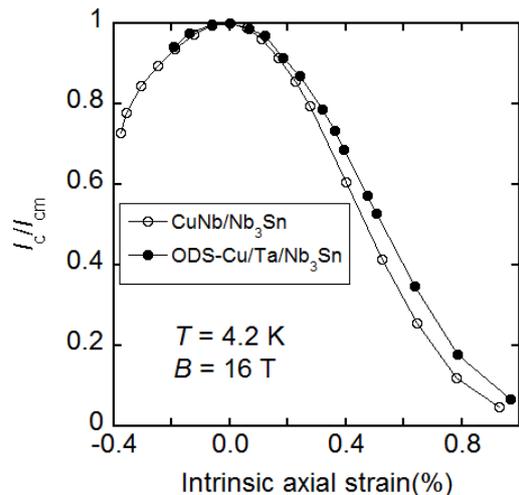


Fig.5 Intrinsic axial strain dependence of normalized I_c of CuNb/Nb₃Sn and ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn wires.

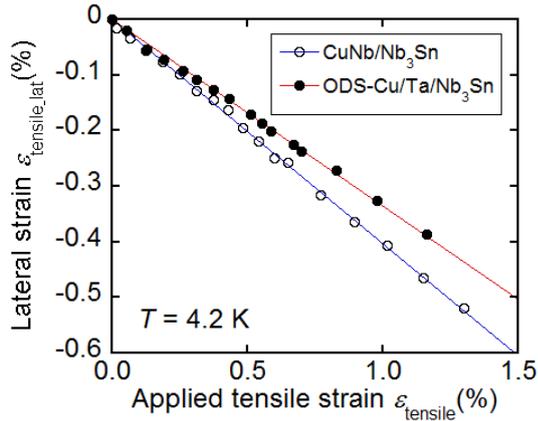


Fig.6 Relationship between tensile strain and lateral strain.

Fig.5に16 Tにおける規格化 I_c の軸方向歪依存性を示す。ただし、 I_c 最大となる点を合わせるため、横軸は $\varepsilon_{\text{tensile}} - \varepsilon_m$ とした。CuNb/Nb₃Snの方が軸方向歪による I_c 低下の割合が大きく、 I_c の歪感受性が大きいと言える。

Fig.6に I_c 測定点における $\varepsilon_{\text{tensile}}$ と引張りによって生じた横方向歪 $\varepsilon_{\text{tensile,lat}}$ の関係を示した。両試料とも $\varepsilon_{\text{tensile,lat}}$ は $\varepsilon_{\text{tensile}}$ に対して直線的に変化した。直線の傾きの絶対値は縦横比

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{tensile,lat}}}{\varepsilon_{\text{tensile}}} \right| \quad (1)$$

を表す。 ν はCuNb/Nb₃Sn線材で0.40、ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn線材で0.33であった。

3-2. 偏差歪+静水圧歪モデルによる解析

前節の実験結果について、 B_{c2} と3次元歪の関係を表す偏差歪+静水圧歪モデル[2]

$$B_{c2}(\varepsilon_{\text{dev}}, \varepsilon_{\text{hyd}}) = B_{c2m} - C_{\text{dev}2} \varepsilon_{\text{dev}}^2 + C_{\text{hyd}} \varepsilon_{\text{hyd}} + C_{\text{dev}4} \varepsilon_{\text{dev}}^4 \quad (2)$$

および I_c と B_{c2} の関係を表す式[4]

$$\frac{I_c}{I_{cm}} = \left\{ \frac{B_{c2}(\varepsilon)}{B_{c2m}} \right\}^{r/p} \left\{ \frac{1 - B/B_{c2}(\varepsilon)}{1 - B/B_{c2m}} \right\}^q \quad (3)$$

を用いてフィッティングを行った。

ここで、 ε_{dev} は変形によって生じた歪を一軸歪に換算した量である偏差歪、 ε_{hyd} は変形による体積変化を表す静水圧歪であり、

$$\varepsilon_{\text{dev}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{hyd}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (5)$$

と表せる。

$\varepsilon_{\text{tensile}}$ に軸方向残留歪 $\varepsilon_{\text{ax}0}$ を加えた値を軸方向真歪 ε_{ax} 、 $\varepsilon_{\text{tensile,lat}}$ に横方向残留歪 $\varepsilon_{\text{lat}0}$ を加えた値を横方向真歪 ε_{lat} とする。線材の軸方向を z 軸にとり、 $\varepsilon_{\text{ax}} = \varepsilon_z$ 、 $\varepsilon_{\text{lat}} = \varepsilon_x = \varepsilon_y$ として3次元歪を計算した。

式で表すと

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{\text{ax}} = \varepsilon_{\text{tensile}} + \varepsilon_{\text{ax}0} \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{\text{lat}} = \varepsilon_{\text{tensile,lat}} + \varepsilon_{\text{lat}0} \quad (7)$$

さらに、(1)式より $\varepsilon_{\text{tensile,lat}}$ は $\varepsilon_{\text{tensile,lat}} = \nu \varepsilon_{\text{tensile}}$ で表せるので、

(4)、(5)は

$$\varepsilon_{\text{dev}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} |(1+\nu)\varepsilon_{\text{tensile}} + \varepsilon_{\text{ax}0} - \varepsilon_{\text{lat}0}| \quad (4')$$

$$\varepsilon_{\text{hyd}} = (1-2\nu)\varepsilon_{\text{tensile}} + \varepsilon_{\text{ax}0} + 2\varepsilon_{\text{lat}0} \quad (5')$$

と、 $\varepsilon_{\text{tensile}}$ のみの関数として表せる。

残留歪の見積もりは、CuNb/Nb₃Snについては中性子回折測定による残留歪測定結果を用いて、-0.43%とした[1]。ODS-Cu/Ta/Nb₃Snについてはそのような測定結果がないため、 I_c が最大になるときの $\varepsilon_{\text{tensile}}$ の値を用いた。また、中性子回折で得られた横方向残留歪の値はゼロに近い値をとっていることから、どちらの線材についても横方向残留歪の値はゼロと仮定した。

(2)式の $B_{c2}(\varepsilon_{\text{dev}}, \varepsilon_{\text{hyd}})$ を(3)式の $B_{c2}(\varepsilon)$ に代入することで I_c と3次元歪依存性を表す式を得た。この式を用いてFig.4の測定結果をフィッティングした結果をFig.7に示す。各フィッティングパラメーターをTable 2にまとめた。

なお、Nb₃Sn線材の場合、一般的に軸方向真歪 ε_{ax} が+0.5%を超える領域(CuNb/Nb₃Snでは $\varepsilon_{\text{tensile}} > 0.93\%$ 、ODS-Cu/Ta/Nb₃Snでは $\varepsilon_{\text{tensile}} > 0.69\%$)においてはNb₃Snフィラメントの破断による、歪効果とは別の要因の I_c 低下が起こっている可能性がある[5]のでフィッティング範囲からは除外した。

Fig.7のように、偏差歪+静水圧歪モデルによるフィッティング曲線は実験結果を良く表していた。2つの線材の測定結果をフィッティングするにあたり用いたパラメーターは、 $\varepsilon_{\text{ax}0}$ と ν を除いては全て同一のものであり、2種類の線材における I_c の異なる軸方向依存性を残留歪と縦横比の違いによって表すことができた。

Table 2 Fitting parameters of deviatoric and hydrostatic strain model for Nb₃Sn wires.

B_{c2m} (T)	$C_{\text{dev}4}$	$C_{\text{dev}2}$	C_{hyd}	n	r	p	q
25.124	8.239	14.539	2.07	2.27	1	0.5	2

	CuNb/Nb ₃ Sn	ODS-Cu/Ta/Nb ₃ Sn
$\varepsilon_{\text{ax}0}$ (%)	-0.43	-0.19
ν	0.40	0.33
I_{cm} (A)	14 T	210.0
	15 T	176.3
	16 T	142.9
	17 T	118.7
	18 T	92.6

4. まとめ

CuNb/Nb₃Snと、ODS-Cu/Ta/Nb₃Snの2種類のNb₃Sn線材について、 I_c の3次元歪依存性を測定し、さらに得

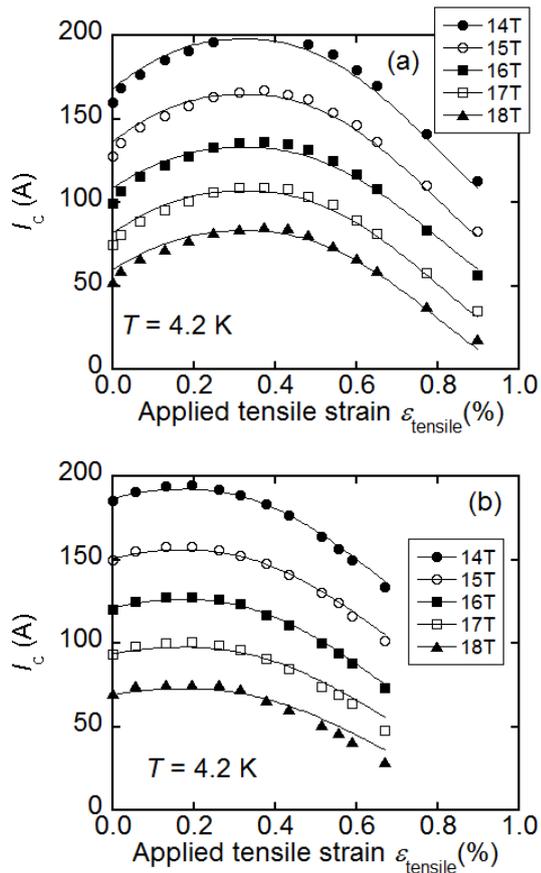


Fig.7 Tensile strain dependence of I_c with fitting curve calculated by deviatoric and hydrostatic strain model (solid line). (a) CuNb/Nb₃Sn wire (b) ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn wire.

られた結果について偏差歪+静水圧歪モデルおよび I_c と B_{c2} の関係を表す式を用いてフィッティングを行った。

CuNb/Nb₃Sn と、ODS-Cu/Ta/Nb₃Sn の I_c の軸方向引張り歪依存性はピーク位置や I_c の軸方向歪感受性において相違が見られた。

実験結果を偏差歪+静水圧歪モデルを用いて解析を行うことにより、2種類の線材の I_c の異なる軸方向歪依存性を良く表すことができた。

参考文献

- [1] H.Oguro, *et al.*, J. Appl. Phys., 101 (2007) 103913
- [2] 小黒英俊, 平成 20 年度東北大学工学部応用物理学専攻博士論文
- [3] D.S.Easton, *et al.*, J. Appl. Phys., 51 (1980) 2748
- [4] J. W. Ekin, Cryogenics, 20 (1980) 61
- [5] J. W. Ekin, "Experimental Techniques Low-Temperature Measurements" (2006)