

# Nb<sub>3</sub>Sn 線材の圧縮、引張りひずみ下における臨界電流特性

## Critical current property of Nb<sub>3</sub>Sn wires in compressive and tensile strain

東北大・金研 諏訪友音, 峯岸一博, 小黒英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄  
 T. Suwa, K. Minegishi, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe  
 Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 線材は、10 T 以上の磁場を発生することが可能な超伝導マグネットを作製する上で、重要な材料となる。しかし、Nb<sub>3</sub>Sn 線材は、わずかなひずみによって超伝導特性が大きく変化する[1]。この性質は、マグネット運転時の電磁力によって、コイルが膨張した際に、線材に加わる引張りひずみが、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の超伝導特性を劣化させる原因となる。また、線材は Nb<sub>3</sub>Sn の生成熱処理から液体 He 温度 4.2 K まで冷却されるので、熱収縮による残留ひずみが発生し、線材には圧縮ひずみも加わっている。これらのことから、Nb<sub>3</sub>Sn 線材は複雑なひずみ状態のもとで使用される。このために、Nb<sub>3</sub>Sn 線材を劣化させない状態で使用するためには、超伝導特性のひずみ依存性を圧縮と引張りの両方向で調べることが重要になる。

さらに、従来の研究では線材の長手方向のひずみのみを考えていたが、最近の研究で 3 次元ひずみを考えることで、より詳細に Nb<sub>3</sub>Sn 線材のひずみ依存性を表せることが分かってきている[2, 3]。

本研究では、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流  $I_c$  の 3 次元ひずみ依存性を圧縮ひずみから引張りひずみまでの広範囲にわたり測定し、解析した。

### 2. 試料および実験方法

#### 2-1. 試料

試料として、CuNb 内部補強ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を用いた。断面を Fig. 1、諸元を Table 1 に示す。

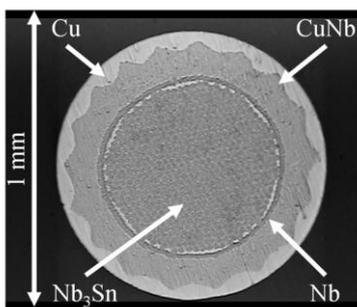


Fig.1 Cross section of CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn wire.

Table 1 Specification of CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn wire

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

この線材は、より強い応力に耐えられるように、安定化層である Cu と、バリア層である Nb の間に補強材として in-situ 法 CuNb 合金を配置している。超伝導層は極細多芯線構造をとった Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントとブロンズで構成されている。

#### 2-2. 実験方法

試料の  $I_c$  のひずみ依存性の測定は、パックマン式ひずみ印加装置(Fig. 3)[4]と、カム式ひずみ印加装置(Fig. 2)[5]を用いて行った。パックマン式ひずみ印加装置(以下では「パックマン式」と省略)によるひずみ印加方法は以下のようになる。装置の内管を回転することで、パックマンスプリングにひずみを与える。この時、試料はスプリングの外縁部にはんだ付けされているため、試料にひずみを与えることができる。内管の回転する方向により、圧縮ひずみと引張りひずみの両方を印加できることが

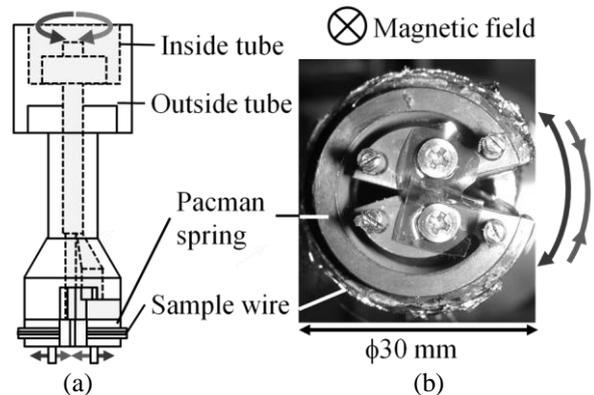


Fig.2 (a)A schematic illustration of Pacman type strain measurement apparatus. (b)A photograph of Pacman spring with a soldered sample wire.

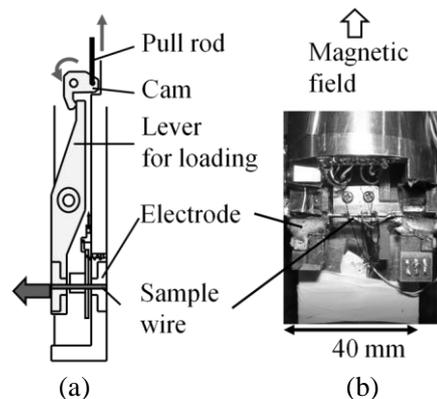


Fig.3 (a)A schematic illustration of Cam type strain measurement apparatus. (b)A photograph of the sample stage with a soldered sample wire.

特徴である。一方、カム式ひずみ印加装置(以下では「カム式」と省略)は、ロッドを引き上げることでカムによりレバーが回転し、試料に引張りひずみが加わる。特徴として、試料が電極のみで固定されているため、応力の測定が可能であることが挙げられる。

これらの装置を、18T 超伝導マグネットに挿入し、4.2 K において 14 T から 18 T の範囲で  $I_c$  測定を行った。

試料電圧は直流四端子法にて測定した。 $I_c$  決定には電界基準を用い、その値を  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  とした。電流は最大 200 A まで流した。ひずみの印加は、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材の圧縮側の  $I_c$  の変化は可逆的であるとして、パックマン式においては、圧縮側の測定から行い、その後引張り方向の測定を行った。

軸方向と横方向のひずみは、ひずみゲージ法により測定を行った。

### 3. 実験結果

試料の  $I_c$  と印加ひずみ  $\varepsilon_a$  との関係を Fig.4 に示す。この結果より、圧縮 0.8% から引張 0.8% までの広範囲にわたり  $I_c$  のひずみ依存性を測定することができた。18 T における  $I_c$  の最大値  $I_{cm}$  とそのときの  $\varepsilon_a$  の値  $\varepsilon_{am}$  は、

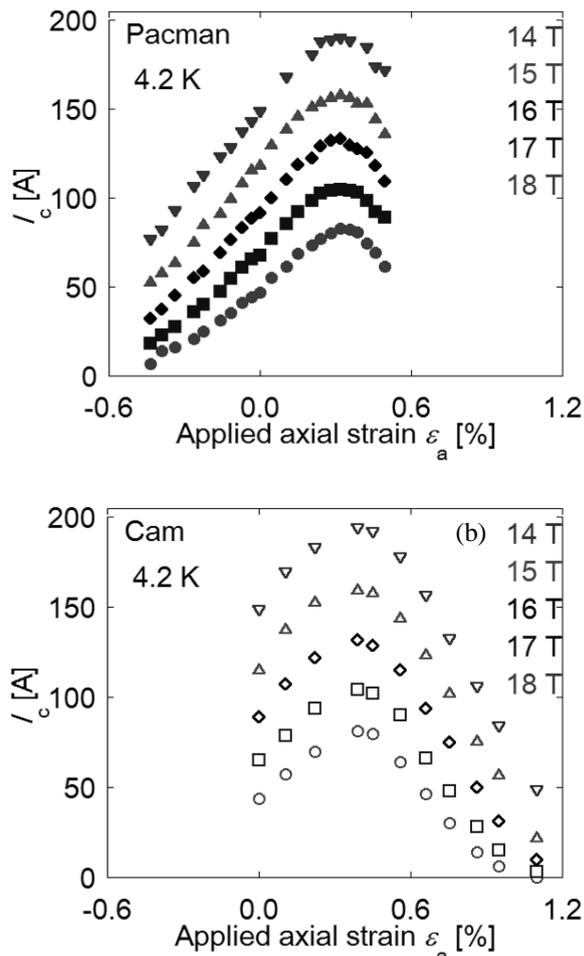


Fig.4 Applied axial strain dependence of  $I_c$  for the  $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  wires measured by Pacman type strain measurement apparatus (a) and Cam type strain measurement apparatus (b).

パックマン式で測定した結果では  $I_{cm} = 82.7 \text{ A}$ 、 $\varepsilon_{am} = 0.318\%$  となり、カム式で測定した場合  $I_{cm} = 81.1 \text{ A}$ 、 $\varepsilon_{am} = 0.389\%$  となっていた。二つの装置で  $\varepsilon_{0a}$  が異なるのは、パックマン式の試料が、パックマンスプリングの熱収縮の影響を受けているためと考えられる。 $I_c$  のひずみ依存性において、引張りひずみ側にピークが出るのは、残留ひずみが引張りひずみによって緩和されていくためである。

二つの装置で得られた結果を比較するために、Intrinsic strain を  $\varepsilon_{a0} = \varepsilon_a - \varepsilon_{am}$  と定義して、 $I_c$  を  $I_{cm}$  で割って規格化すると、Fig. 5 となった。この図からは、圧縮側においてパックマン式の方がカム式より  $I_c$  のひずみ感受性が大きくなることが分かった。

### 4. 考察

Fig. 5 の結果を詳細に解析するために、3次元ひずみを考える。Fig. 6 に、 $\varepsilon_a$  に対する横方向ひずみ  $\varepsilon_l$  を示す。パックマン式とカム式において、 $\varepsilon_a$  と  $\varepsilon_l$  の比、 $\nu$  が異なっている。これは、パックマン式の場合、試料がスプリングに固定されているため、パックマンスプリングの影響が表れているものと思われる。

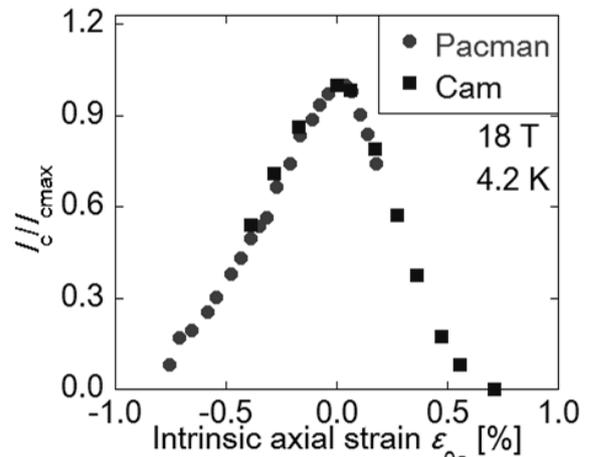


Fig.5 Comparison of normalized  $I_c$  as a function of the Intrinsic axial strain for  $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  wires.

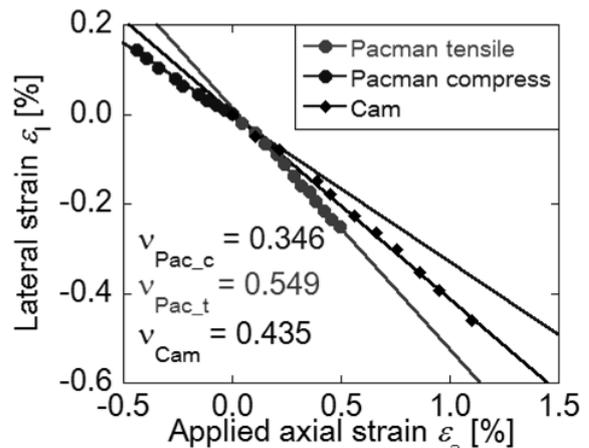


Fig.6 The relationship between the applied axial strain and lateral strain.  $\nu$  is the ratio average of the axial and lateral strain.

これ以後、3次元ひずみとして静水圧ひずみ $\varepsilon_{\text{hyd}}$ と偏差ひずみ $\varepsilon_{\text{dev}}$ の二つを考える。静水圧ひずみは体積変化を表し、偏差ひずみは格子の変形量を表す。 $\varepsilon_{a0} = 0$ の時に横方向ひずみもゼロになるように、 $\varepsilon_{i0} = \varepsilon_i - \varepsilon_{im}$ と仮定する。線材軸方向を $\varepsilon_z = \varepsilon_a$ 、線材横方向を $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ とし、円柱対称の条件から $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_i$ とおくと、静水圧ひずみは、

$$\varepsilon_{\text{hyd}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_{a0} + 2\varepsilon_{i0} \quad (1)$$

となり、偏差ひずみは、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{dev}} &= \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{3} |\varepsilon_{a0} - \varepsilon_{i0}| \end{aligned} \quad (2)$$

となる。それぞれ、Fig. 7、Fig. 8に示す。パックマン式において、静水圧ひずみがピークを持つのは、圧縮側と引張り側で $v$ が大きく変化しているためである。偏差ひずみはどちらも直線的に変化している。

ここからは、ひずみ不変量モデルをもとにして解析を

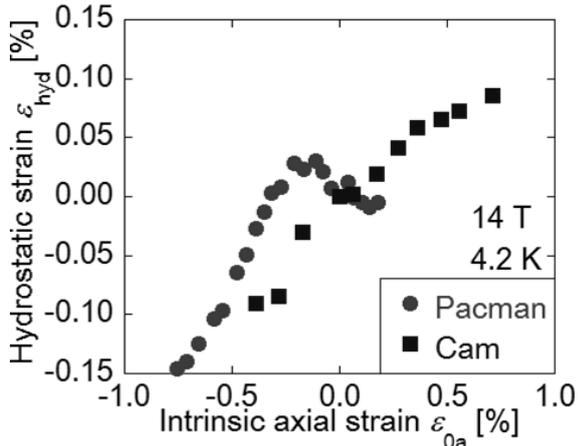


Fig.7 Hydrostatic strains as a function of intrinsic axial strain for CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn wires

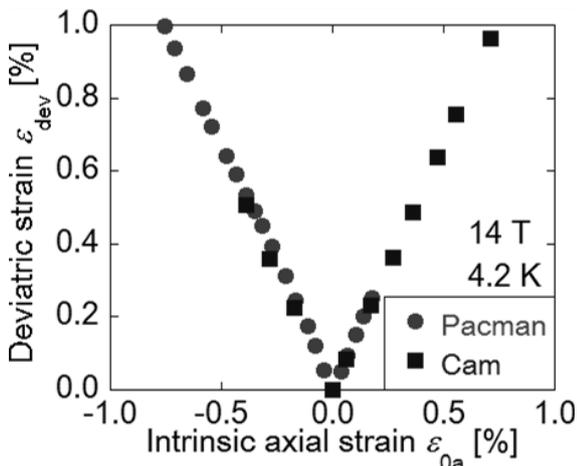


Fig.8 Deviatoric strains as a function of intrinsic axial strain for CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn wires.

行う。ひずみ不変量モデルとは、第一原理計算によって、Nb<sub>3</sub>Sn結晶格子のフォノン振動数の分布とひずみの関係を取り込んだシミュレーションである。このシミュレーション結果に合うように、第1次、第2次、第3次ひずみ不変量 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ を用いて、ひずみ不変量関数として提案された形が、

$$\begin{aligned} S_b &= \frac{B_{c2^*}(\varepsilon)}{B_{c2^*m}} \\ &= \frac{1}{(1 + a_1 J_1)(1 + a_2 J_2 + a_3 J_3 + a_4 J_3^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

となっている[6,7]。 $B_{c2^*}$ は上部臨界磁場で、 $B_{c2^*m}$ はその最大値である。 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ はフィッティングパラメータである。この式は、今回の実験においては $\varepsilon_{\text{hyd}}$ と $\varepsilon_{\text{dev}}$ を用いて、

$$\begin{aligned} B_{c2^*}(\varepsilon) &= B_{c2^*m} \times \frac{1}{(1 + a_1 \varepsilon_{\text{hyd}})} \times \\ &\frac{1}{\left(1 + \frac{3}{8} a_2 \varepsilon_{\text{dev}}^2 + \frac{1}{8\sqrt{2}} a_3 \varepsilon_{\text{dev}}^3 + \frac{9}{64} a_4 \varepsilon_{\text{dev}}^4\right)} \end{aligned} \quad (4)$$

と変形できる。今回の実験では、 $I_c$ を用いて(5)式で表されるKramerプロット[8]により外挿して求めた。

$$I_c^{\frac{1}{2}} B^{\frac{1}{4}} = K_s^{\frac{1}{2}} B_{c2}^{-\frac{1}{4}} \left(1 - \frac{B}{B_{c2}}\right). \quad (5)$$

(4)式を用いてフィッティングした結果をFig. 9に示す。この時のフィッティングパラメータをTable. 2に示す。フィッティングの精度向上のために圧縮側と引張り側で別々にフィッティングした。この時、二つの装置において、同じフィッティングパラメータを用いているので、得られた結果の違いは横方向ひずみの違いが原因と考えられる。二つの装置を用いて測定を行ったが、どちらの装置で

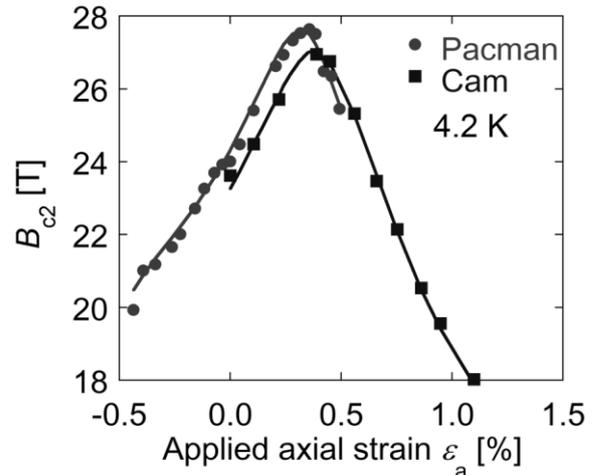


Fig.9 The applied axial strain dependence of the calculated upper critical field. Solid lines are calculated result by the function(4).

Table 2 Fitting parameters of function(4).

$\varepsilon_a$	compressive( $< \varepsilon_{am}$ )	tensile( $> \varepsilon_{am}$ )
$a_1$	-0.0732	-0.0732
$a_2$	3.38	4.40
$a_3$	-18.9	-20.0
$a_4$	5.22	4.59

も正確な測定ができており、そのひずみ依存性をモデルにより表すことができた。

## 5. まとめ

CuNb 内部補強ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の  $I_c$  の 3 次元ひずみ依存性を、パックマン式ひずみ印加装置とカム式ひずみ印加装置を用いて測定した。これにより、圧縮 0.8% から引張 0.8% までの広範囲にわたり  $I_c$  のひずみ依存性を測定することができた。結果では  $I_c$  が最大となる時の引張りひずみの値が異なっていたが、ひずみ不変量関数を用いることで、二つの装置で得られたひずみ依存性が同じものであることが分かった。

## 参考文献

- [1] J. W. Ekin, *Cryogenics*, **20** (1980) 611-624
- [2] B. ten Haken, *et al.*, *IEEE Trans.Supercond.* **5** (1995) 1909
- [3] A. Godeke, *et al.*, *Physica C*, **372-376** (2002) 1295-1298
- [4] A. Godeke, *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **75** (2004) 5112
- [5] K. Katagiri, *et al.*, *Adv. Cryog. Eng.* **36** (1990) 69
- [6] W. D. Markiewicz, *Cryogenics*, **44** (2004) 767-782
- [7] W. D. Markiewicz, *Cryogenics*, **46** (2006) 846-843
- [8] E. J. Kramer, *J. Appl. Phys.* **44** (1973) 1360