実用 Nb₃Sn 超伝導線材の 3 次元歪と超伝導特性に関する研究

Study on the three-dimensional strain and the superconducting properties for practical Nb₃Sn superconducting wires

東北大・金研 小黒英俊,淡路 智,西島 元,高橋弘紀,渡辺和雄

大同工大町屋修太郎物材機構土屋佳則原子力機構鈴木裕士応用科学研究所長村光造

片桐一宗

岩手大・工

H. Oguro¹, S. Awaji¹, G. Nishijima¹, K. Takahashi¹, K. Watanabe¹,

S. Machiya², Y. Tsuchiya³, H. Suzuki⁴, K. Osamura⁵, K. Katagiri⁶

¹HFLSM, Institute for Materials Research, Tohoku University

²Daido University

 3 National Institute for Materials Science

⁴Japan Atomic Energy Agency

⁵Research Institute for Applied Sciences

⁶Facility of Engineering, Iwate University

1. はじめに

本研究で扱う実用 Nb₃Sn 超伝導線材は, 10 T 以上 の強磁場発生用超伝導マグネットには欠かせない材料 である $. \, {
m Nb_3Sn} \,$ 線材の問題点として $. \,$ 変が加わると超 伝導特性が劣化することが挙げられる[1].特に,線 材の場合に想定される異方的な歪は,物理的な観点か らよく調べられている等方的な歪よりも大きく特性を 劣化させる事が知られているが,その詳細な機構は未 だに十分に理解されていない.また,線材の作製方法 や線材構造によって,歪依存性が異なる点も問題とし て残っている[2].したがって,超伝導特性と歪の関 係を統一的に表す事ができるモデルも存在しない、そ れは,線材内部の $\mathrm{Nb_3Sn}$ に加わる3 次元歪を考える 必要があると予想される.実際に,私の発見した事前 曲げ効果 (Nb₃Sn 線材に室温で繰り返し曲げ戻し処理 を行うと,線材に存在する熱歪(残留歪)が緩和され, 超伝導特性が大幅に向上する効果 [3]) のように,線材 の軸方向歪のみではなく,3次元歪を考えなければ説 明できない現象が起こる.しかし,3次元歪は実験的 に求める事が難しい.その1つの方法として,我々は ひずみゲージを用いて線材の軸方向と横方向の歪を測 定する方法を確立し,線材の対称性から3次元歪を求

めてきた [4]. また,中性子回折を用いると線材内部の $\mathrm{Nb_3Sn}$ に加わる 3 次元歪を簡単に測定することが可能である [5]. ただし,実用超伝導線材に対して歪に着目した中性子回折実験は数例しか行われていない.そして,超伝導特性と 3 次元歪との関係も分かっておらず,その関係を調べてモデル化して理解する必要がある.

本研究の目的は, $\mathrm{Nb_3Sn}$ 複合線材における超伝導特性の歪依存性を,3 次元歪に着目してその機構を解明する事である.そのため,ひずみゲージ法と中性子回折法から求めた 3 次元歪を用いて,超伝導特性との関係を表す統一的なモデルを構築することを目指した.

2. 実験方法

2-1. 試料

試料には超伝導体の体積分率と生成方法が同じ線材を用い,補強材 CuNb が最内層にあるもの (IS-1),最内層に超伝導層がありその外側に CuNb があるもの (IS-2),補強材が無い標準的な線材 (NR) の 3 つを用意した [6] . この 3 つは断面構造を変えることで残留歪の大きさを変えた内部歪制御した線材であり, Nb_3Sn に加わる歪だけが異なる.さらにこの 3 つの

線材に対し事前曲げ処理を加えて内部歪制御した線材を加え、熱処理直後の歪状態 (as-reacted) と、事前曲げ処理したときの歪状態 (prebent) とで、6 種類の残留歪の異なる線材を用意した、表 1 に各線材の諸元と断面図を示す。

2-2. B_{c2} の 3 次元歪依存性測定

各線材に対し,強磁場低温下引張り歪印加装置を用いて B_{c2} 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 次元歪の測定も行った.試料の長さは $15~\mathrm{mm}$,電圧端子間距離は $5~\mathrm{mm}$ とした.測定は東北大学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主に使用した.

2-3. 中性子回折を用いた Nb₃Sn 線材の残留歪測定

各線材の残留歪を調べるため,中性子回折を用いて線材内部の残留歪を直接測定した.試料は,線材を 10 mm の長さに切断し,それを 10 本づつ積み重ねることで, $10\times10\times10(\mathrm{mm}^3)$ の立方体状の試料形状にした.この試料の軸方向と,軸と垂直方向(側面方向)に対して,室温と低温($10~\mathrm{K}$)において中性子回折実験を行い,歪を求めた.また,線材 7 本をエポキシで固定し,これに引張り応力を与えて残留歪の変化を調べた.この実験は,日本原子力研究開発機構(JAEA)の残留応力解析装置 (RESA) を用いて実験を行った.

3. 実験結果と考察

3-1. B_{c2} の歪依存性

図 1 に全ての線材の,10 K における B_{c2} の引張り 歪依存性を示す.これを見ると,全て異なる歪依存性を示すことが分かる.さらに,図 2 に引張り歪印加時における横方向歪の変化を示した.この結果を,軸方向歪の変化と横方向歪の変化の比(縦横比 ν)として表すと図 3 のようになり,それぞれの線材によって縦横比が異なることが分かった.

3-2. 中性子回折を用いた Nb₃Sn 線材の残留歪測定

中性子回折法では,残留歪と引張り歪を与えた状態 での3次元歪測定を行った.この結果, Nb_3Sn 線材 の残留歪の絶対値を,3次元的に直接測定することに 世界で初めて成功した.図4にひずみゲージ法,中性 子回折法の2つの実験結果から求めた軸,横方向歪の 値を示した.ひずみゲージの結果は,残留歪の絶対値 を求めることができないので, 歪を与える前の残留歪 の値に中性子回折実験で求めた値を使用している.2 つの結果を比較すると, ひずみゲージで測定した線材 表面の歪と,中性子回折で測定した線材内部のNb₃Sn が受ける歪が同じであることが分かった. ひずみゲー ジ法の結果では、中性子回折では見えなかった詳細な 縦横比の変化も見ることができる.この結果から,ひ ずみゲージ法で軸,横方向歪の詳細な変化を測定し, 中性子回折法により残留歪の絶対値を測定すること で,3次元歪を高精度で定量的に測定する手法を確立 した.

Table 1 Specifications and cross sections of the bronze route Nb₃Sn wires.

	IS-1	IS-2	NR_3Sn
Bronze	Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti		
Filament diameter (µm)	3.3		
Number of filaments	9690	9690 11457	
Reinforcement material	in-situ Cu-20wt%Nb		-
Cu / Reinforcement materials	17.3 / 31.2 / 51.5	17.7 / 35.4 / 46.9	52.0 / 0 / 48.0
/ non Cu (%)			
Heat treatment	$670^{\circ}\mathrm{C} \times 96~\mathrm{h}$		
Cross section	CuNb Cu	CuNb Çu	.Cu
	Nb ₃ Sn Nb-	Nb ₃ Sn Nb-	Nb ₃ Sn Nb-

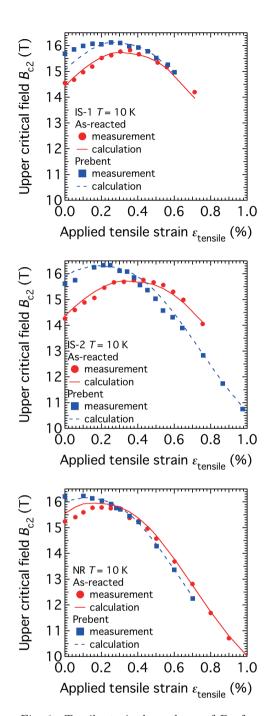


Fig. 1 Tensile strain dependence of $B_{\rm c2}$ for various kinds of the Nb₃Sn wires. The points are the experimental results. The solid lines are the calculation result by the three-dimensional strain model.

4. モデルを用いた考察

実験によって $B_{\rm c2}$ と 3 次元歪との関係が明らかになった.ここで,それらを統一的に考えるため,その関係をモデルを用いて表すことを試みた.このとき, ${
m Nb_3Sn}$ の超伝導特性に影響を与える歪として,変形を表す偏差歪 $arepsilon_{
m dev}$ と体積変化を表す静水圧歪 $arepsilon_{
m hyd}$ の 2

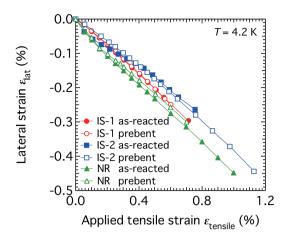


Fig. 2 Applied axial tensile strain dependence of the lateral strain for various kinds of the Nb_3Sn wires.

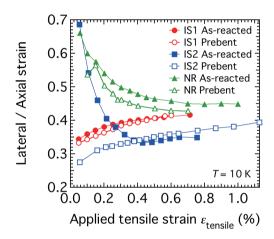


Fig. 3 Applied axial tensile strain dependence of the ratio of the lateral strain to the axial strain for various kinds of the Nb₃Sn wires.

つに初めて着目した.実験結果を基に偏差歪と静水圧 歪を求めると,これらが引張り歪 $\varepsilon_{\mathrm{tensile}}$ を与えること で変化することが分かった.この偏差歪,静水圧歪の 2 つを用いて B_{c2} の歪依存性を表すため,Markiewicz の提案したひずみ不変量モデル [7] を基に,以下のよう な式で表される実用ひずみ不変量モデルを構築した.

$$S_b = \frac{B_{c2}(\varepsilon_{\text{tensile}})}{B_{c2\text{max}}^*}$$

$$= \frac{1}{(1 + a_1 \varepsilon_{\text{hyd}})}.$$

$$\frac{1}{(1 + \frac{3}{8} a_{2\text{dev}}^2 + \frac{\text{sgn}(\varepsilon_{\text{tensile}} + \varepsilon_{\text{ax0}})}{8\sqrt{2}} a_3 \varepsilon_{\text{dev}}^3 + \frac{9}{64} a_4 \varepsilon_{\text{dev}}^4)}$$

この式で, $B_{
m c2max}^*$ は線材の最大の $B_{
m c2}$ の値, $arepsilon_{
m ax0}$ は軸方向残留歪の絶対値を表しており, a_1 , a_2 , a_3 , a_4

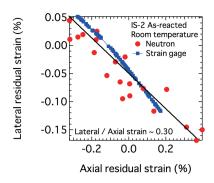


Fig. 4 The axial strain dependence of the lateral strain for IS-2. The circle points are the neutron diffraction results. The square points are the results of the strain gauge measurements.

はスケーリングパラメータである.このモデルと測定結果を用いて,6 種類の残留歪を持つ $\mathrm{Nb_3Sn}$ 線材の超伝導特性の歪依存性を,一組のパラメータで表す事に成功した.図 1 にモデルを用いてフィッティングを行った結果 (実線) を示したが,実験結果と良く一致することが分かった.このモデルから $\mathrm{Nb_3Sn}$ 線材における超伝導特性の歪依存性に影響する量を取り出すと,軸方向残留歪 $\varepsilon_{\mathrm{ax0}}$ と横方向残留歪 $\varepsilon_{\mathrm{lat0}}$ が B_{c2} の引張り歪依存性を表す曲線の B_{c2} - $\varepsilon_{\mathrm{tensile}}$ 平面における位置を決めることが分かった.さらに,縦横比(横方向歪の変化/軸方向歪の変化)は B_{c2} の歪感受性を変えることが分かった.つまり,3 つの値が $\mathrm{Nb_3Sn}$ 線材の多様な B_{c2} の歪依存性を決定することが分かった.

5. まとめ

 ${
m Nb_3Sn}$ 線材の B_{c2} と 3 次元歪との関係を調べるため,実験に基づいてモデルの構築を行った. B_{c2} の引張り歪依存性の測定時に,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.さらに,残留歪の絶対値を直接測定するため,中性子回折を用いて 3 次元の残留歪を測定した.この 2 つの実験によって,正確な B_{c2} と 3 次元歪との関係が求められた.この実験結果を用いて,実用ひずみ不変量モデルを構築し,様々な残留歪状態における ${
m Nb_3Sn}$ 線材の B_{c2} と引張り歪との関係を,1 組のパラメータで表すことができた.このモデルから, ${
m Nb_3Sn}$ 線材の種類によって異なる超伝導特性の歪依存性は,軸,横方向の残留歪と縦横比が異なることで現れることが

分かった.つまり,この3つの値を変化させることで, $\mathrm{Nb_3Sn}$ 線材の最適な構造を決めることが可能となった.

参考文献

- [1] J. W. Ekin, Cryogenics 20 (1980) 611-624
- [2] 久保 芳生 他,低温工学 39 (2004) 399-406
- [3] 小黒 英俊 他,低温工学 39 (2004) 422-426
- [4] H. Oguro et al., IEEE Trans. Appl. Supercond.8 (2008) 1047-1050
- [5] H. Oguro et al., J. Appl. Phys. 101 (2007) 103913-1 - 103913-5
- [6] P. Badica et al., Supercond. Sci. Technol., 20, (2007) 273-280
- [7] W. D. Markiewicz, Cryogenics 44 (2004) 895-908