

超電導機器応用に向けた実用超伝導線材の不均一性に関連した 応力／ひずみ問題の解明

Stress/strain problem relate to inhomogeneity of practical superconducting wires for application to superconducting devices

町屋 修太郎^a, 菅野 未知央^b, 長村 光造^c, 淡路 智^d, 小黒 英俊^d, 西島 元^e, 菖蒲 敬久^f,
式町 浩二^g, 花井 哲^h, 杉本 昌弘ⁱ, 藤上 純^j, 高畑 一也^k, 坂井 直道^l, 松井 元英^m,
小泉 徳潔^f, ステファヌス ハルヨ^f, 鈴木 裕士^f, 土屋 佳則^e, 中本 建志^b, 金 新哲^b,
S. Machiya^a, M. Sugano^b, K. Osamura^c, S. Awaji^d, H. Oguro^d, G. Nishijima^e, T. Shobu^f, K. Shikimachi^g,
T. Hanai^h, M. Sugimotoⁱ, J. Fujikami^j, K. Takahata^k, N. Sakai^l, M. Matsui^m, N. Koizumi^f,
S. Harjo^f, H. Suzuki^f, Y. Tsuchiya^e, T. Nakamoto^b, X. Jin^b

^a 大同大学, ^b 高エネルギー加速器研究機構, ^c 応用科学研究所, ^d 東北大学,
^e 物質・材料研究機構, ^f 日本原子力研究開発機構, ^g 中部電力(株), ^h (株)東芝,
ⁱ 古河電気工業(株), ^j 住友電気工業(株), ^k 自然科学研究機構,
^l 国際超電導産業技術研究センター, ^m 鉄道総合研究所

^aDaido University, ^bKEK, ^cRIAS, ^dTohoku University, ^eNIMS, ^fJAEA, ^gChubu Electric Power,
^hToshiba, ⁱFurukawa Electric, ^jSumitomo Electric Industries, ^kNIFS,
^lISTEC, ^mRailway Technical Research Institute

複合材料である実用 Nb₃Sn 超伝導線材および実用高温超伝導材である YBCO 線材に引張荷重をかけ、ひずみを印加した状態で、放射光を用いて線材内部の超伝導相である Nb₃Sn 相と YBCO 相の相ひずみの測定を行った。今期は主に ITER (国際熱核融合実験炉) 向の直径が約 0.8 mm の Nb₃Sn 線材の測定を行った。これを透過させるために X 線のエネルギーを上げる必要があったため、エネルギーを 69 keV として測定を行った。線材は交流損失の低下のため通常ツイスト処理を行うが、このツイストによる影響は、力学上の影響があることの認識はされていたが、具体的実験での議論はこれまでできてこなかった。今回は、ツイスト処理したものと、ツイスト処理を施さないものを特別に準備し、これの軸方向と横方向のひずみ測定を行った。この結果、ツイスト処理の有無によって、応力-ひずみ挙動に差異が見られることと、残留している相ひずみに差異が見られることが明らかになった。

キーワード： 超伝導線材、Nb₃Sn、YBCO、ひずみ測定

背景と研究目的：

実用超伝導線材は、機械的、熱的そして電氣的安定性を確保するために、銅や銀などの電気伝導、及び熱伝導の良い材料、あるいは高強度な基材などと複合化されている。その超伝導線材の応用として最も広く使われているのが、核融合などに代表される高磁場用の超伝導マグネットである。この超伝導マグネットで使用される線材には、磁場中において大電流を流すため、非常に強力な電磁力が加わることになる。このため、超伝導線材の機械特性評価は応用上において非常に重要となる。ほとんどの実用超伝導線材は、外力や内力に起因するひずみによってその超伝導特性が変化することが知られており、その関係の理解が強磁場超伝導マグネット応用には必要不可欠となっている。

我々のグループでは、量子ビームを用いた実用超伝導線材の残留ひずみ測定を数多く行ってきた[1]。特に、ITER 核融合プロジェクトに用いられる Nb₃Sn はひずみによる性能低下が現在予備実験においても問題視されてる。また、YBCO 線材では、超伝導相の薄膜の異方性が高く、軸方向引張挙動に対応する横方向のひずみ挙動の比較はされていなかった。

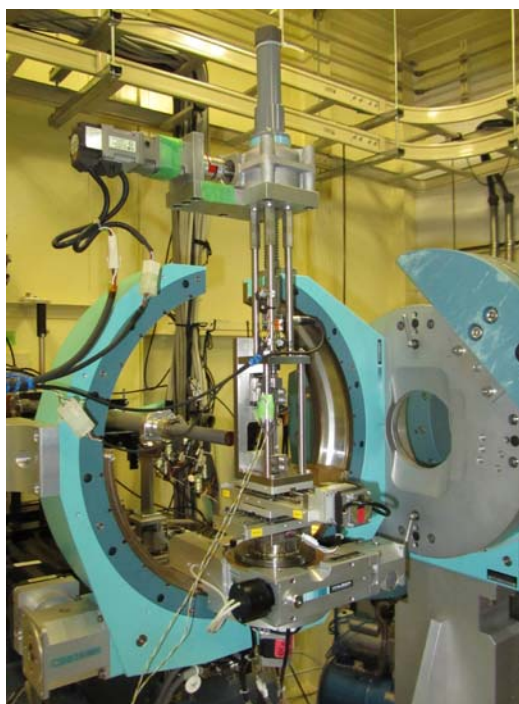


図1 Nb₃Sn 超伝導線材と自動引張試験装置
(線材の両端を固定し、上部を上へ動かすことで引張ひずみを与える。
ひずみは伸び計で測定している。)

一般に、超伝導線材は、その特性上複合化が避けられず、応力ひずみ状態は複雑である。軸方向荷重に対応する、超伝導フィラメントを直接的に計測可能な量子ビームによる測定は、その力学挙動を明らかにする上で大変重要である。そこで今回は、以前のコイル用の CuNb 補強 Nb₃Sn 線材に続き、核融合用に開発された Nb₃Sn 線材と、高温超伝導材である YBCO 線材の軸方向ひずみと横方向ひずみを測定することを試みた。

実験：

測定に用いる試料として、ITER 用 Nb₃Sn 線材を用意した。ITER 用 Nb₃Sn 線材は、交流での使用を前提に、直径約 0.8 mm の複合材内部においても、ツイスト処理されており、これが力学挙動に与える影響は知られていない。そこで、メーカーの協力も得てツイストがされていない試料も用意した。また、YBCO 線材の SuperPower 社のものを用いた。

測定は、SPring-8 の BL46XU で行った。このため、実験は Nb₃Sn については高次光成分を使い、それ以外の成分を CdTe 検出器で制限する事で 69 keV を用いた。YBCO については 19.5 keV の条件で行った。測定には、図 1 に示す今回我々が開発した小型自動引張り試験機を用いた。この装置では、ひずみ一定制御で保持を行う事が出来る量子ビーム施設としては初めての装置であり、塑性領域においても、「ひずみ一定」を保つ事ができ、また自動測定シーケンスをもつソフトウェアと連動した画期的な装置である。他にも、荷重一定、変位一定制御も可能である。また SPEC を使っているビームラインであれば他のビームラインでも使用可能であり、白色の BL28B2 でも自動測定を行った実績がある。図 1 の写真では、軸方向のひずみ測定のセットアップであるが、Chi クレドールを 90 度回転させることによって、引張り軸と直行方向の横方向の測定も可能である。BL46XU ではスプリングバランサーを用いることで、無人自動運転で軸方向、縦方向の切り替えが可能であり、測定効率の大きな向上を図っている。

測定時は線材に引張ひずみを印加した状態で、軸方向と横方向について Nb₃Sn の 210 回折の測定を行った。YBCO 線材については、200、020 回折について同様の測定を行った。Nb₃Sn のひず

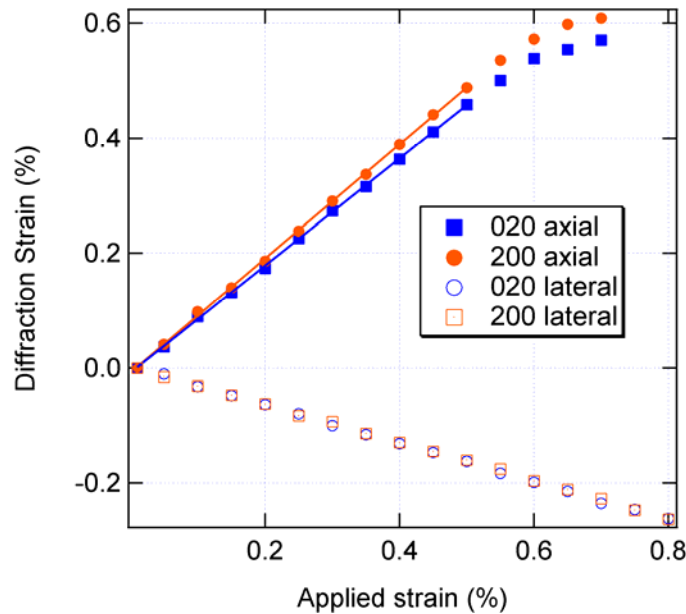


図2 SuperPower社 YBCO 線材の一定ひずみ下での結晶ひずみ測定結果。
(ひずみを与えた時の 020, 200 回折線の変化から結晶ひずみを求めている。)

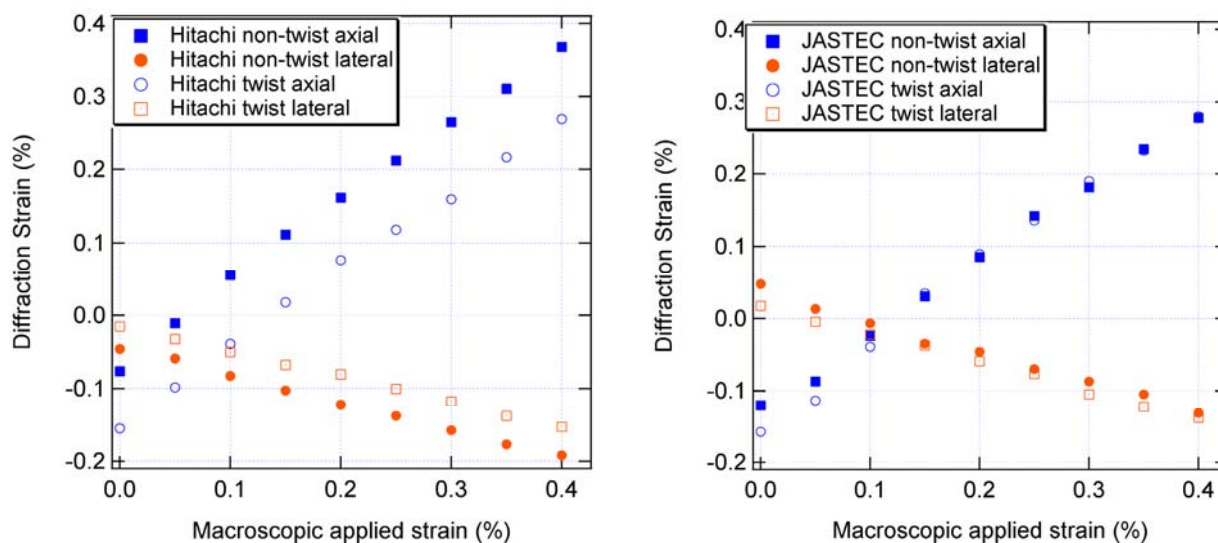
みの算出には、無ひずみの Nb_3Sn の格子定数が必要であるため、線材から取り出したフィラメントの測定も行った。この測定結果から格子定数を求め、各面の面間隔から求めた格子定数との比較により、ひずみを計算した。YBCO についても、エッチング後に剥離させたものを無ひずみ試料とし、測定を行った。

ひずみの算出には、ひずみゼロの値が必要となるため、線材から Nb_3Sn 超伝導フィラメント部のみ取り出し、これを測定した。フィラメントは、線材の Cu や補強材を酸で溶かすことで取り出した。これを測定した結果より格子定数を求め、各面の面間隔から求めた格子定数との比較を行い、ひずみの値を求めた。

結果および考察：

YBCO 線材の放射光を用いた一軸一定ひずみ下でのひずみ測定の結果を図 2 に示す。横軸が負荷したマクロなひずみで、縦軸は格子面間隔からもとめたひずみである。図中では軸方向ひずみと横方向ひずみの両方を表している。軸方向ひずみは、引張のひずみを生じるが横方向においては、ポアソン比に応じて圧縮ひずみが生じている事がわかる。また、200、020 回折でこう配が異なることは、回折弾性定数がわずかに異なることを示している。これは、YBCO 薄膜の弾性定数の異方性と双晶の粒内のひずみ分布によって説明できることを我々グループが提案している[2]。また、軸方向と横方向の比はポアソン比となるが、この場合のポアソン比は、0.34 となりテープの基材の Hastelloy-C のポアソン比とほぼ同じ値となることを明らかにした。これは、横方向については、基材に従属的に変形していることを示している。

次に、ITER 用 Nb_3Sn 線材の一軸一定ひずみ下でのひずみ測定の結果を図 3 に示す。図中の(a)に Hitachi 社製の結果、(b)に JASTEC 社製の結果を示している。図中では先と同様に、軸方向ひずみと横方向ひずみの両方を表している。先と同様に横方向では圧縮ひずみが徐々に増加する。図中では、得られた無ひずみの格子定数からフィラメントのひずみの絶対値を求めている。結果を見ると、同じブロンズ法で、同じ熱処理を行っているが、室温での残留ひずみが異なっていることがわかる。内部組成などは、微妙に異なっており、これらの差が性能に影響している可能性も考えられる。また、ツイストの有無により、回折弾性定数と残留ひずみがことなることが明らかとなり、精密な引張試験においても応力ひずみ挙動に差異が認められており、これらの結果からツイストによる力学挙動への影響の解析を今後進めて行く予定である。



(a) Hitachi 社製

(b) JASTEC 社製

図3 ITER 向け Nb₃Sn 線材のの一定ひずみ下での結晶ひずみ測定結果

今後の課題：

今期、国内の KEK と NIMS で開発が進められている Nb₃Al 線材についても、予備的測定を行ったが、69 keV エネルギーを使用したところ、Ta の吸収端と近くなってしまい統計精度の高いデータは取得できなかった。ひずみ特性の良さから核融合研究所や CERN も興味を持っている将来有望な線材であり、エネルギーをさらに上げて、今後測定を行っていききたい。

本研究では、実用 Nb₃Sn 超伝導線材のひずみ測定を、放射光を用いて行い、ツイストのある線とない線について、精密なひずみ測定の結果が得られた。今後は、力学モデルの構築と、内部拡散法などの異なる製作方法によって作られた Nb₃Sn 線材に対して、同様の実験を行うことが求められる。製作方法によって、超伝導特性のひずみ依存性に違いが現れることが、国際熱核融合実験炉(ITER)計画の中でも問題になっているが、原因ははっきりとしておらず、これらを解決できるのは放射光や中性子でのひずみ測定の外にない。今後、様々な種類の Nb₃Sn 線材の超伝導特性とひずみとの関連性を統計的に調べ、超伝導特性の差が現れる原因を突き止めるための研究を進めていきたい。

参考文献：

- [1] 菅野未知央他, 平成 22 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 2010A1798, 2010B1832
- [2] 町屋修太郎、長村光造、 菖蒲敬久ら、“YBCO 超伝導テープ線材における超伝導相の弾性定数解析および結晶のひずみ挙動” 低温工学 46(5), 233-238, 2011