

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

*菅野 未知央^a, 町屋 修太郎^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
M. Sugano^a, S. Machiya^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

^a京都大学, ^b大同大学, ^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
^aKyoto University, ^bDaido University, ^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 超伝導線材に引張り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体 Nb₃Sn のひずみ測定を行った。測定には線径 1 mm の CuNb 補強 Nb₃Sn 線材を用いたため、これを透過させるには X 線のエネルギーを上げる必要があり、エネルギーを 72 keV とし測定を行った。線材は熱処理直後のものと、事前曲げ処理を施したものを用意し、これの軸方向と横方向のひずみ測定を行った。Nb₃Sn の回折線の中でも強度の強い、211、320、321 回折を測定し、ひずみの精密測定に成功した。その結果、軸方向ひずみに関しては、線材に引張りひずみを印加した時の、Nb₃Sn に加わる軸方向ひずみの変化が各回折面で異なっており、Nb₃Sn 321 面が線材全体の伸びを測定している伸び計の値と、最も近いことが分かった。また、横方向ひずみの変化は、軸方向と横方向の比で約 0.33 となることが分かった。

キーワード： 超伝導線材、Nb₃Sn、内部ひずみ

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、Cu などの電気伝導、及び熱伝導の良い材料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、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。特に、Nb₃Sn 線材と REBCO 線材は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作製には必要不可欠となっている。そして、Nb₃Sn 線材に関しては、室温で繰り返し曲げひずみを与える「事前曲げ処理」を施すことで、線材内部のひずみ状態が変化し、超伝導特性が大幅に向上することが知られている。これは、線材の外側にある Cu 等のひずみを測定しているだけでは確認できず、超伝導体のひずみを直接測定する必要がある。ところが、先にも述べたように、実用超伝導線材は Cu などに覆われているため、測定できるひずみは表面の Cu のみであり、超伝導体そ

のものに加わるひずみは測定できない。そこで、これまでに中性子回折や放射光回折を利用して、ひずみを与えた時に超伝導体に加わるひずみがどう変化するかを調べてきた[1]。

これまでの研究で、高温超伝導線材である YBCO 線材や、Bi2223 線材に関しては放射光での測定経験があるが[2]、 Nb_3Sn 線材は線径が大きく(0.8-1.2 mm)超伝導層の外側の Cu 層が非常に厚いため、主に透過力の強い中性子回折で測定を行っていた。ところが、線材自体に含まれる超伝導層が 1 割にも満たないため、超伝導体からの回折線が非常に弱いために統計誤差が大きく、測定結果にばらつきが見られていた。今回の研究では、放射光を用いることで、 Nb_3Sn 線材内部での Nb_3Sn のひずみの変化を精度よく測定することを目的として実験を行った。放射光の実験結果から、回折面によるひずみ変化の違いを確認し、どの回折線の結果がひずみの全体像を良く表すのかを調べ、さらにひずみを線材軸方向と横方向に対して測定することで、3 次元ひずみの変化に関する知見を得たので、これを報告する。

実験：

試料には、CuNb 補強 Nb_3Sn 線材を用いた。線材は熱処理直後の状態と、事前曲げ処理を施した線材を用意した。これを SPring-8 の BL46XU で、ひずみの測定を行った。測定を行うにあたり、 Nb_3Sn 線材の超伝導層を覆う Cu と補強材 CuNb を透過して、 Nb_3Sn からの回折線を得るために必要な X 線のエネルギーを算出した。その結果、X 線のエネルギーは 50 keV 以上必要であることが分かった。このため、72 keV まで X 線のエネルギーを上げ測定を行った。

測定は線材に引張り荷重を印加した状態で、 Nb_3Sn の回折線の中でも強度が強い 211、320、321 回折の測定を行った。図 1 のように引張りジグに線材を取り付け、線材の両端を固定し、上部の固定部を上へ動かすことで引張りひずみを与える。このとき、線材中央部に放射光 X 線を当てて、 Nb_3Sn からの反射を観測する。線材上部のビームが当たらない場所に伸び計をセットし、これでひずみを測定した。回折線のピーク強度は、統計誤差を抑えるために 2000 カウント以上のカウント数が得られるように時間をかけて測定した。これによって、これまでに中性子回折では測定できなかった、精密なひずみ測定を試みた。これを線材の軸方向と横方向に対して行った。横方向はジグごと線材を 90 度回転させて測定を行った。

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。

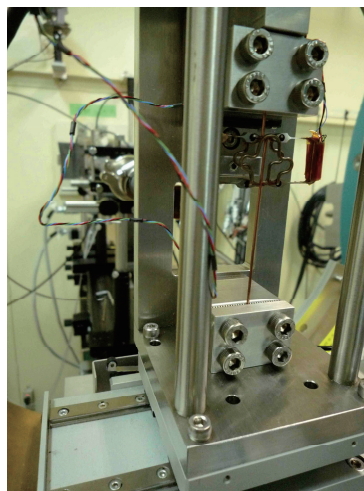


図 1. Nb_3Sn 超伝導線材を引張りジグに取り付けた様子。線材の両端を固定し、上部を上へ動かすことで引張りひずみを与える。ひずみの大きさは伸び計で測定している。

結果および考察：

図2に、放射光を用いた Nb₃Sn 線材の Nb₃Sn 321 回折の測定結果を示す。72 keV の X 線を用いることで、Nb₃Sn からの回折線を測定できている。ピーク位置は、与えるひずみを大きくしていくことで、低角側へシフトしている。この結果をフィラメントの格子定数の測定結果と比較して、ひずみを算出したものを図3、4に示す。図3は熱処理直後の線材、図4は事前曲げ処理を施した線材の結果である。どちらの結果でも、精度の良い結果が得られた。ひずみの変化は、与えた引張りひずみの値で 0-0.5% の範囲では、直線的になることが分かった。これは、このひずみ範囲では Nb₃Sn フィラメントが破断せず、弾性的に変化することが原因と考えられる。また、Cu や補強材の塑性変形の影響は見えないことから、670°C の超伝導層生成熱処理から室温へ冷却された時に、Cu がすでに塑性領域へ入っていることが考えられる。図では残留ひずみの値で示しているが、引張りひずみを与えていない状態では、熱処理直後は軸方向が圧縮方向に約 0.3%、横方向は約 0% であり、事前曲げ処理することで、軸方向は引張り方向に 0.1%、横方向は圧縮方向に 0.1% と変化した。これは、事前曲げ処理によって線材外側の Cu と補強材が塑性変形することで、Nb₃Sn に加わるひずみが増加したために起こった現象である。残留ひずみの値に関して、211 面のみひずみが引張り方向へ 0.1% だけ大きい値が観測された。この原因ははっきりとは分かっていないが、以下のことが考えられる。今回の測定系では 72 keV という非常に大きなエネルギーを使用するため、このエネルギー以外の波長を持った X 線が含まれてしまう。これが回折を起こし、72 keV での Nb₃Sn 211 回折の近傍に現れたことでピーク位置がずれた可能性があると考えている。このため、211 面のひずみの値が全て 0.1% ずれていることは測定上の問題であり、本質的な変化ではないと考えている。

引張りひずみ印加時の Nb₃Sn のひずみ変化は、熱処理直後の線材の軸方向に関しては伸び計の

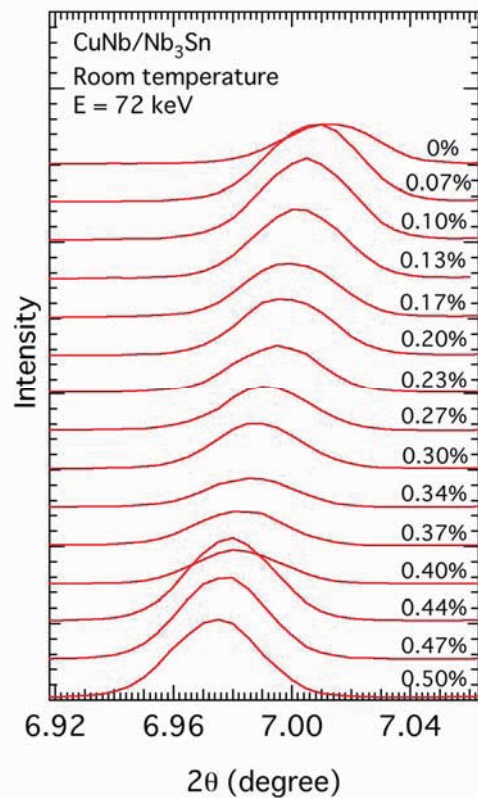


図2. CuNb 補強 Nb₃Sn 線材のひずみ測定結果。ひずみを与えた時の Nb₃Sn321 回折線の変化を示している。

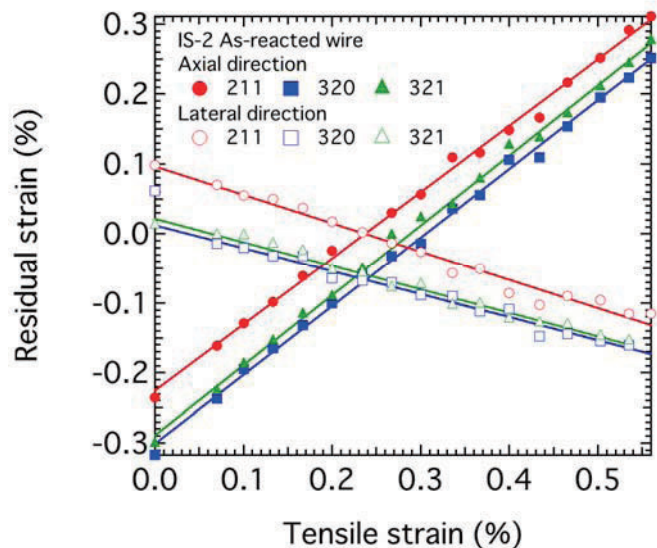


図3. 熱処理直後 CuNb/Nb₃Sn のひずみ変化。横軸は伸び計で測定したひずみを、縦軸は X 線回折から得られた結果を示す。

測定値と放射光の測定値の比がほぼ 1:1 となった。ただし、正確な値は回折面によって異なっており、211 面で 1:0.951、320 面では 1:0.984、321 面では 1:1.004 となった。この結果から、Nb₃Sn 線材全体のひずみを良く表すのは 321 面であることが分かった。事前曲げ処理後の線材は、伸び計の測定値と放射光の測定値の比が、211 面で 1:0.914、320 面で 1:0.877、321 面で 1:0.908 となり、1:1 からはずれた値となっていた。これは、元の線材を曲げているため、伸び計での測定がうまくいかなかった可能性もあるが、事前曲げ処理によって Cu が曲げ戻しのひずみを受け、弾性領域に戻った影響で変化している可能性もある。事前曲げ処理後の線材は、超伝導特性が大幅に向上した状態で使用できるため、応用上重要なデータとなるので、今後も継続的に調べる必要がある。

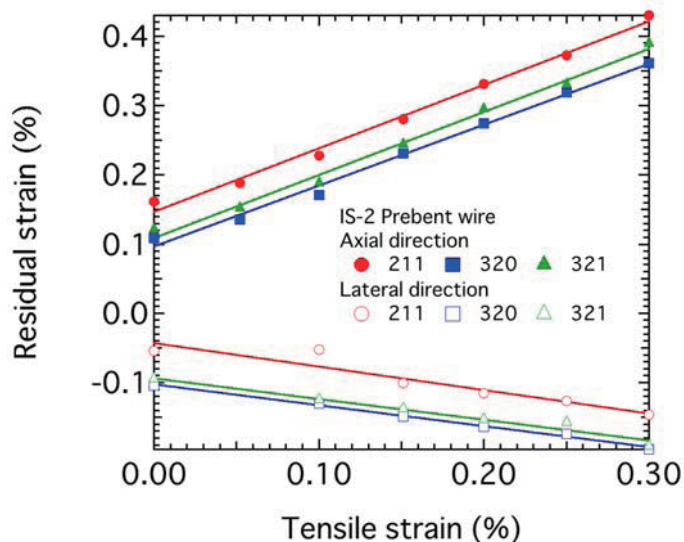


図 4. 事前曲げ処理後 CuNb/Nb₃Sn のひずみ変化。横軸は伸び計で測定したひずみを、縦軸は X 線回折から得られた結果を示す。

軸方向ひずみの変化に対する横方向ひずみの変化の仕方は、熱処理直後の線材で約 0.33、事前曲げ処理した線材で約 0.30 となった。これらの値は超伝導特性と密接に関係しており、値が大きいとひずみによる超伝導特性変化が大きくなり、逆に小さいと変化は小さくなる。今回の実験結果からは、事前曲げ処理した線材の方が、軸方向ひずみに対する横方向ひずみの変化が小さいので、ひずみによって超伝導特性が変化しにくい線材と言える。これは、マグネット应用には使いやすい線材であると言える。

今後の課題：

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、非常に精密な 3 次元ひずみ測定の結果が得られた。精密測定が実現できたことによって、引張りひずみ印加時には、Nb₃Sn の各回折面でひずみの変化量が異なることが分かり、321 面が線材全体とひずみの値が最も近いことが分かった。横方向ひずみの測定結果からは、軸方向と横方向のひずみの比が熱処理直後の線材で 0.33、事前曲げ処理後で 0.3 となることが分かった。今後は、様々な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。これを放射光で測定することで、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行っていきたい。

参考文献：

- [1] H. Oguro et al., J. Appl. Phys., Vol. 101 (2007) 103913.
- [2] 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 2010A, 2010A1798.

*2011 年 4 月～現所属：高エネルギー加速器研究機構