

超電導機器応用を指向した実用超伝導線材の内部ひずみ測定技術の開発 Development of internal strain measurement technique for practical superconducting composites 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, 菅蒲 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

複合材料である超伝導線材に曲げ変形を与えたときの超伝導体の内部ひずみ変化を実測した。本期間では、多層膜構造を有する Y 系高温超伝導酸化物 (YBCO) 線材に安定化層として Cu を複合化した場合について、負荷曲げひずみ量と YBCO 膜の (020) 面の格子定数変化から評価した内部ひずみ変化を実測し、実験的に中立軸の位置を決定した。また、前回測定を行った安定化層無しの場合を含めて、臨界電流の引張、曲げひずみ依存性を内部ひずみで整理した結果、臨界電流の内部ひずみ依存性は同一曲線上にスケールすることが明らかになった。今回得られた結果により、Y 系線材の曲げ、引張変形による臨界電流の変化は、内部ひずみの変化によって統一的に説明できることが明らかになった。

キーワード： 超伝導線材、YBCO、内部ひずみ、曲げひずみ

背景と研究目的：

超伝導体は電氣的、熱的、機械的安定化を目的として金属成分と複合化された複合材料として実用に供される。このような超伝導複合材料は、応用機器の製造段階で曲げ変形を経験するため機械的特性の把握は重要である。従来は、許容曲げ径の予測として複合則が用いられてきたが、金属成分の降伏や最大曲げひずみを経験する超伝導フィラメントの破断により、中立軸の移動が起り得るため、これらを含めて中立軸の位置を予測する手法の確立が求められている。前期間 (2009B1841) は、曲げ変形を解析する上で最も単純な構造を有する Y 系線材を用いて、放射光により曲げひずみが測定できることを確認した[1]。積層構造を有する Y 系線材において、YBCO 超伝導体は薄膜形状であり、超伝導体内部のひずみ分布は無視できる。また、主要な構成要素が実用上重要な曲げ径の範囲ではほぼ弾性変形のみであるため、中立軸の位置も各構成要素の弾性変形の足し合わせによる応力のつり合い式から決定できる。一方、実用超伝導線材では、安定化層として高電気、熱伝導性を有する金属層が複合化される。一般的に、こうした材料は降伏応力が低い場合が多く、線材の曲げ変形に伴って容易に塑性変形を起こす。このような場合、塑性変形の進行に伴って中立軸が移動することも予想され、より複雑な応力解析が必要になる。したがって、実験的に中立軸位置を決定することがより重要になる。そこで、本期間は Cu 安定化層を複合化した YBCO 線材について、引張および曲げ変形を与えた状態での超伝導体の内部ひずみ変化を放射光を利用して測定した。また、Cu 複合化層の有無の2種類の線材について、液体窒素中 (77K)

で臨界電流の引張、曲げひずみ依存性を測定した。線材構造によって異なるひずみ依存性を内部ひずみ変化で整理して比較した。

実験：

YBCO 線材に曲げ変形を与えた状態で YBCO 膜の格子定数を測定するために、一定曲率を有する D 型のアルミ製治具を用意した。Cu 複合化 YBCO 線材は、表面側から Cu 安定化層 (100 μm) / Ag 保護層 (10 μm) / YBCO (1 μm) / CeO₂/Gd₂Zr₂O₇ 中間層 (1.4 μm) / Hastelloy 基板 (100 μm) という構造を有している。線材を一定半径の円弧部分を有する D 型治具に沿わせて曲げることによって、超伝導体に曲げひずみを負荷した。異なる曲げひずみを与えるために、R=25、12.5、8.3、6mm の 4 種類の治具を用意した。線材構造が前述の通り厚さ方向に非対称であるので、曲げの方向による違いおよび直線状態を含めて 9 種類の異なるひずみ状態で測定を行った。内部ひずみ測定には、YBCO 膜の (020) 面を用い、透過配置を採用した。エネルギーは 19.5keV を選択した。また、一軸引張ひずみ負荷状態でも内部ひずみ測定を行った。ひずみ負荷には、前期間と同様の自作のネジ式引張試験治具を用いた。

液体窒素中 (77K) において、引張、曲げひずみを負荷した状態で臨界電流を測定した。引張ひずみ負荷にはインストロン型の引張試験機を用いた。また、図 1 に示すような Goldacker 型曲げ装置を用いて、液体窒素中で段階的に曲げ半径を変化させて臨界電流の測定を行った。



図 1. 臨界電流の曲げひずみ測定を行うための Goldacker 型曲げ装置。ギアの連結によって、試料ステージが左右対称に回転し、超伝導線材を一定曲率で曲げる仕組みになっている。

結果および考察：

図 2 に曲げ半径の逆数 ($1/R$) を横軸に、縦軸に YBCO 膜の b 軸のひずみを取ってプロットしたグラフを示す。比較のために前期間に測定した Cu 複合化が無い線材の結果も同時に示している。いずれも内部ひずみが $1/R$ に対して線形に変化していることがわかる。曲げひずみ (ϵ_b) は中立軸からの位置 (y) と曲率半径 (R) を用いて、 $\epsilon_b = y/R$ と表される。図 2 で線形関係が成り立っていることから、両線材について中立軸の位置はほぼ一定であり、グラフの傾きから y の値が得られる。それぞれのデータを最小二乗法で近似すると、Cu 複合化線材では $y=36.7\mu\text{m}$ 、Cu 複合化無し線材では $y=41.7\mu\text{m}$ と求められた。今回用いた線材は、厚さ 100 μm の Cu 層、Hastelloy 基板によって、中間層、超伝導層、Ag 保護層がはさまれた構造を取っている。超伝導体からみると幾何学的には対称に近い構造であるが、複合化されている Cu の降伏応力は低く、比較的大きな曲げ径で塑性変形を起こすために応力の大部分は Hastelloy 基板によって負担されている。このことが、基板と同じ厚さの Cu を複合化しても中立軸位置の違いが 5 μm 程度であったことの原因であると考えられる。

図 3 には、一軸引張ひずみ負荷状態で測定した Cu 複合化 YBCO 線材の内部ひずみを示す。高ひずみ領域で非線形な振る舞いが見られるが、これは超伝導層にクラックが発生することによる

内部ひずみの緩和によるものと考えられる。図中に示した直線は線形領域の最小二乗法によるフィッティング結果である。両線材について、内部ひずみと負荷ひずみの比を比較すると、0.873、0.877 とほぼ等しいことがわかる。これは、どちらの線材でも b 軸のひずみ変化は線材のマクロな負荷ひずみに対して 12~13% と小さいことを示している。

以上の実験結果から、超伝導層の内部ひずみと曲げ半径、または引張負荷ひずみの関係が得られた。一方、過去の研究から、臨界電流が一軸ひずみに対して放物線的な可逆変化を起こすことが報告されている。つまり、臨界電流はあるひずみ値で最大値を取る。臨界電流の最大値に対応するひずみ値が超伝導体のどのようなひずみ状態に対応しているかは現在のところ明らかになっていないが、最大臨界電流を与えるひずみ状態は等しいものとして以後の議論を行う。

臨界電流の引張ひずみ依存性に関しては、まず以下の式 (1) で臨界電流の最大を与えるひずみ値 (ε_p) を決定する。

$$I_c(\varepsilon_a) = I_{c,max} [1 - a(\varepsilon_a - \varepsilon_p)^2] \quad (1)$$

ここで、 $I_c(\varepsilon_a)$ は負荷ひずみ ε_a での臨界電流、 $I_{c,max}$ は臨界電流の最大値、 a はひずみ感受性である。次に、臨界電流のひずみ依存性を内部ひずみで比較するために、 $\varepsilon_a - \varepsilon_p$ を横軸にとり、縦軸は最大値で規格化した臨界電流 $I_c(\varepsilon_a) / I_{c,max}$ としてプロットする。このようなプロットを行うことによって、臨界電流の最大値を基準としたひずみ依存性の比較ができる。さらに、放射光によるひずみ測定で得られたマクロな負荷ひずみと内部ひずみの比をかけて、横軸を内部ひずみに変換する。

曲げひずみに関しては、実験によって臨界電流と $1/R$ の関係を得た後、放射光ひずみ測定により決定された中立軸から超伝導層までの距離 (y) を用いて、臨界電流と曲げ内部ひずみの関係が得られる。

以上のような方法により整理した臨界電流のひずみ依存性を図 4 に示す。図中には、Cu 安定化層の有無の線材の引張、曲げのデータを示している。このグラフから、全てのデータがほぼ同じ曲線上にスケールしていることがわかる。このことは、YBCO 線材における臨界電流の引張、曲げひずみ依存性は、軸方向の内部ひずみによって統一的に理解できることを示している。引張と

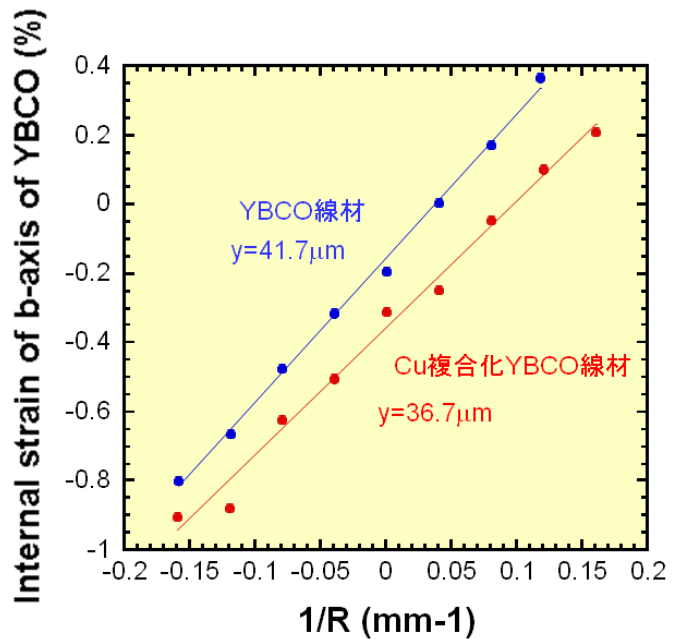


図 2. YBCO 膜の b 軸の曲げ内部ひずみと半径の逆数 ($1/R$) の関係。線形近似の傾きから中立軸から超伝導層までの距離 (y) が得られる。

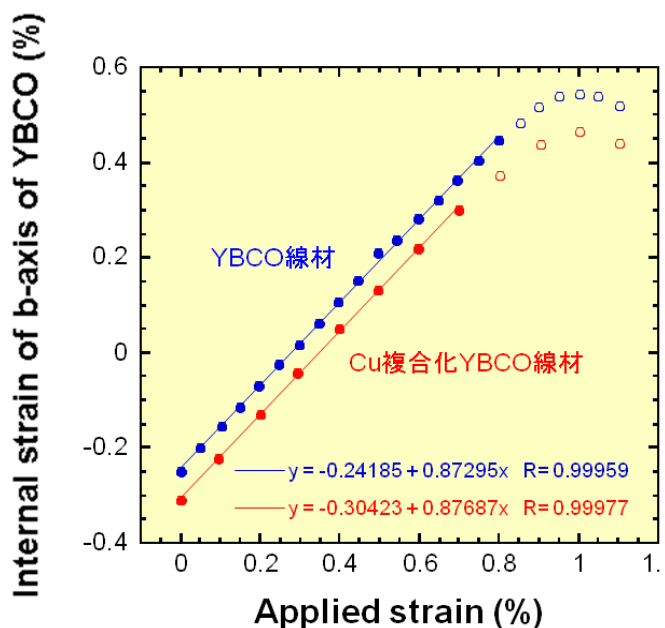


図 3. YBCO 膜の引張内部ひずみとマクロな負荷ひずみの関係。いずれの線材においても、傾きが 0.87~0.88 程度と 1 よりも小さい。

曲げのデータの間のこのような単純な関係は、YBCO 線材において超伝導層が薄膜形状であることに起因するものと考えられる。つまり、超伝導層内部のひずみ分布はほぼ無視できることによる。本研究の重要な点は、マクロな負荷ひずみではなく、内部ひずみで整理したという点であり、特に放射光によって直接内部ひずみを決定したことによって得られた成果であるといえる。

今後の課題：

本研究では、前期間よりもさらに複雑な構造を有する Cu 安定化 YBCO 超伝導線材の曲げひずみ測定を行った。その結果、曲げ、引張の臨界電流のひずみ依存性において、内部ひずみ状態の変化が本質的に重要であることを明らかにした。これにより、薄膜超伝導線材の曲げひずみ測定手法を確立することができた。今後は、超伝導体内部にもひずみ分布が存在するようなさらに複雑な系に対して、超伝導特性のひずみ特性を予測できるような手法を確立することを目指して研究を継続する予定である。

参考文献：

[1] 菅野未知央他, 平成 21 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 2009B, 2009B1841.

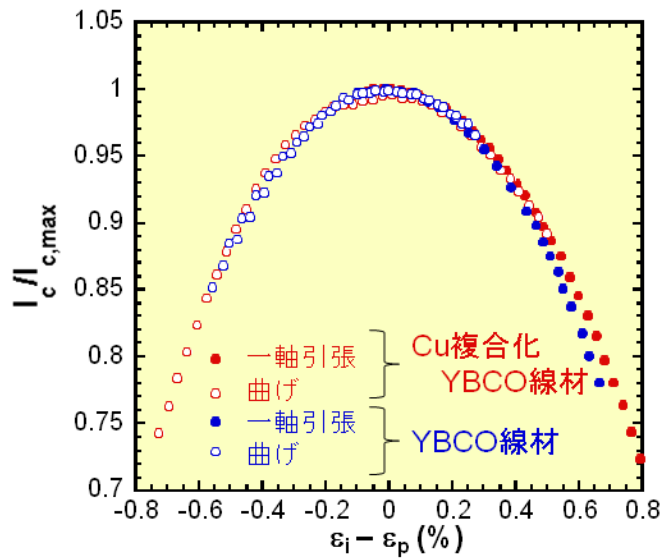


図 4. 内部ひずみで整理した臨界電流の引張、曲げひずみ依存性