研究論文

YBCO 超電導テープ線材における超電導相の弾性定数解析 および結晶のひずみ挙動

町屋 修太郎^{*1,†}, 長村 光造^{*2}, 菖蒲 敬久^{*3}, 桐山 幸治^{*4},
菅野 未知央^{*5}, 田中 啓介^{*6}

Macroscopic Elastic Constant Analysis and Strain Behavior of Crystal on the YBCO Layer in a YBCO-coated Conductor

Shutaro MACHIYA^{*1,†}, Kozo OSAMURA^{*2}, Takahisa SHOBU^{*3}, Kouji KIRIYAMA^{*4},
Michinaka SUGANO^{*5} and Keisuke TANAKA^{*6}

Synopsis: YBCO-coated conductor tape is a composite material that consists of two or more layers. The superconducting layer is generally a thin film. In this study, the YBCO consisted of columnar aggregates of orthorhombic crystals with a texture whose axis was 001 to the film surface. Due to the difficulty of obtaining such a thin film for mechanical testing, the mechanical elastic constant is unknown. The elastic constant of the thin film can be obtained only via analysis. In this study, finite element models of bi-textured thin films were constructed. Through the analysis, the uniaxial mechanical elastic constant and in-plane Poisson's ratio were obtained. The strain dependence of the elastic properties of the YBCO-coated conductor with surrounding Cu stabilized were investigated precisely using white X-ray diffraction. The diffraction elastic constants estimated from (0k0) were larger than those estimated from (h00), and this tendency corresponded to the FEM analysis. Using X-ray diffraction, the obtained diffraction strain was smaller than the macroscopic strain. The diffraction strain – macroscopic strain slope theoretically become one. Strain relaxation will result if the slope does not become one. Our observations strongly suggest that strain relaxation is caused in the interface of twin crystals. The effective mechanical elastic constant was predicted by correcting the calculated mechanical elastic constant.

Key words: superconductors, thin film, elastic constant

^{*1} Received February 7, 2011

大同大学工学部機械工学科
〒457-8530 愛知県名古屋南区滝春町 10-3
Department of Mechanical Engineering, Daido University,
Takiharu, Minami-ku, Nagoya, Aichi 457-8530, Japan

^{*2} (財)応用科学研究所
〒606-8202 京都府京都市左京区田中大堰町 49
Research Institute for Applied Sciences, Tanaka Ohi-cho 49,
Sakyo-ku, Kyoto 606-8202, Japan

^{*3} 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
Quantum beam science directorate, Japan Atomic Energy Agency,
Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

^{*4} 総合科学研究機構 研究開発部
〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根 162-1
Comprehensive Research Organization for Science and Society,
Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1106, Japan

^{*5} 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻
〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂
Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University,
Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8530, Japan

^{*6} 名城大学理工学部機械システム工学科
〒468-8502 愛知県名古屋市中白区塩釜口 1-501
Meijo University, Tenpaku-ku, Nagoya, Aichi 468-8502 Japan

† E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

1. はじめに

高温超電導テープである YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$) coated conductor は複数の特性が異なる層状の複合材であり、超電導層の厚さは非常に薄く、通常数 μm 程度である。複合材としての力学挙動を知る上で各レイヤーの弾性挙動を知ることが超伝導特性とひずみの関係を議論する上で重要であり、いままでは複合則を用いることで力学挙動は議論されてきた^{1,2)}。また、Coated conductor は特殊な 2 軸配向を有しており、さらに薄膜中の膜単体を得ることも難しいことから、実験的に正確な弾性定数は求めることができなかった。

実用化を踏まえ、YBCO 薄膜には高い信頼性が求められてきており、結晶のひずみを非破壊的に直接測定できる唯一の手法である中性子回折³⁾や X 線回折法^{1, 2, 4)}によるひずみ測定が提案されているが、力学特性の理論的な検討はあまり進んでいない。一般的な材料は大抵の場合

均質であり，かつ等方性であるという仮定のもとに解析を行っている．これらの近似は材料の寸法がその結晶組織よりもはるかに大きい場合にのみ適応できる．Coated conductor のような薄膜はこのような近似は適用できず，結晶とその結晶方位ごとの弾性異方性を考慮しなければならない．

Coated conductor 中 YBCO 層は，テープ法線方向に $\langle 001 \rangle$ 方向に配向し，YBCO 結晶の a , b 軸の方向とその相互関係を考える必要がある．YBCO では， $\langle 001 \rangle$ 配向の上， a 軸と b 軸が面内に 90 度方向に直行する形で交互に積層する特有な結晶組織を有している．そこで，本研究では，YBCO の結晶組織に着目し，双晶構造と二軸配向した結晶をマイクロメカニクスの手法を用いてモデル化を行い，一軸の一定変位を加えた場合の弾性変形の FEM による解析を行った．これにより軸方向のヤング率および面内のポアソン比の導出を行った．また，白色 X 線およびパルス中性子を用い双晶を持つ実材料の回折による結晶ひずみの測定実験からひずみの緩和に関する係数を得た．さらに，長村らが提案している双晶界面での独特なひずみ変形挙動⁵⁾を，膜全体としてのひずみ緩和としてとらえることで，ひずみ緩和を考慮した実効的な弾性定数を予測した．

2. 実験および解析方法

2.1 弾性定数

YBCO の結晶構造は斜方晶であり，斜方晶の独立な弾性スティフネス C_{ij} は 9 個であり，これらの弾性定数をモデルに与える必要がある．YBCO の単結晶のスティフネスは Ledbetter ら⁶⁾によって報告されており C_{ij} の 9 成分を実験と解析によって求めており，本研究ではその値である $C_{12}=211$ GPa, $C_{22}=244$ GPa, $C_{33}=138$ GPa, $C_{44}=61$ GPa, $C_{55}=47$ GPa, $C_{66}=97$ GPa, $C_{12}=37$ GPa, $C_{13}=89$ GPa, $C_{23}=93$ GPa を用いた．一般的に言われるように b 軸方向の弾性定数が最も大きくなっているのがわかる．この単結晶のスティフネスとフックの式から得られる単結晶のマクロなヤング率は結晶座標系における a , b , c 軸方向にそれぞれ $E_a=162.7$ GPa, $E_b=178.1$ GPa, $E_c=76.75$ GPa となる．

2.2 解析モデル

本研究で扱う YBCO 薄膜は，基本は $\langle 001 \rangle$ 配向である．長手方向に a , b 軸のどちらかが向いた状態で存在している．YBCO 薄膜は，上記のような特殊な二軸配向を持つ多結晶構造であり，さらに結晶方位の異なる YBCO 結晶の界面に双晶構造を形成している．そこで， a 軸と b 軸の結晶比率が同一と仮定し，Fig. 1 のようなバンド状の結晶モデルとした．グレー部が図中の縦方向に b 軸が向いた結晶，白抜き部が図中の縦方向に a 軸が向いた結晶となる．また厚さ方向にも要素分割を行い，2 層の要素とした．要素分割には 8 節点 1 次のアイソパラメトリック直方体要素を

Fig. 1 FE model.

Fig. 2 Schematic of FE model and constraints.

用いた．Fig. 1にFEモデル図を示す．

解析には汎用 FEM コードである NASTRAN 6.1 を用いた．Mullen ら⁷⁾は， $\langle 001 \rangle$ 繊維配向する立方晶の多結晶薄膜の弾性変形の有限要素法 (Finite element method) による二次元平面ひずみ解析を提案し，芹澤ら⁸⁾は，同様な解析を平面応力状態にて行っている．本解析では，芹澤ら同様，Fig. 2 に示すように，薄膜は平面応力状態が仮定できるものとして， y 方向に 0.1% ひずみとして，一定変位 Δ をせん断変形が生じないように与えた．拘束条件を次式に示す．

$$u_y = \Delta = 0.001d, \quad \text{at } y = d \quad (1)$$

$$u_x = 0, \quad \text{at } x = 0, x = d \quad (2)$$

$$u_y = 0, \quad \text{at } y = 0 \quad (3)$$

$$u_z : \text{free}, \quad \text{at } z = 0, z = t \quad (4)$$

2.3 ヤング率とポアソン比の導出

ある材料の弾性特性が等方性と仮定すると平面応力条件

でのフックの法則は、マクロなヤング率 E_M ，ポアソン比 ν_M を用いて次式のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\nu_M^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_M & 0 \\ \nu_M & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

これに、Fig. 2 に示すような有限要素法により得られる節点での反力 F_x ， F_y および強制変位量 Δ を代入すると次式のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} = F_x / td \\ \sigma_{yy} = F_y / td \\ \tau_{xy} = 0 \end{Bmatrix} = \frac{E_M}{1+\nu_M^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_M & 0 \\ \nu_M & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} = 0 \\ \varepsilon_{yy} = \Delta / d \\ \gamma_{xy} = 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) より，平面応力条件下でのポアソン比 ν_M とヤング率 E_M は次式のように表される。

$$\nu_M = \frac{F_x}{F_y} \quad (7)$$

$$E_M = \frac{1-\nu_M^2}{\nu_M} \frac{F_x}{t\Delta} \quad (8)$$

2.4 白色X線による回折測定方法

用いた試料は 銅安定化 YBCO 超電導線材であり，幅は4 mm(SCS4050)である．基材はHastelloy で厚さは50 μm ，その上にIBAD MgO(10 nm) + Homo-epi MgO(30 nm) + LMO(30 nm) + YBCO層(1 μm) + Ag cap層(2 μm)を順に製膜されたものである．最終的に，安定化層として銅を全面に20 μm を電気メッキし製膜されたものである．

実験は，SPRing-8の白色ビームラインであるBL28B2にて室温で行った．Fig. 3に示すように，このBLでは，回折角は固定とし，白色のX線を照射し，エネルギー分散型のGe検出器を用いることで30から150 keVのエネルギーの回折を得ることができる．回折角度は，見たい格子面間隔付近の分解能が良好な点として， $2\theta = 8^\circ$ とした．ビーム照射領域は $0.1 \times 1 \text{ mm}^2$ である．広範囲の格子面間隔を一度に測定でき，実験ではテープ軸方向の格子面が回折するセットアップとした．

実験では，ゴニオメータ上に引張試験装置を置き，軸方向に負荷を逐次かけながら実験を行った．この際のマクロなひずみは Nyilas 型伸び計により測定を行った．

3. 解析結果および実験結果

3.1 FEM 解析結果

上下方向に 0.1%ひずみを負荷した場合の FEM 解析によ

るひずみ分布の結果を Fig. 4 に示す．図はグレースケールでローカルなひずみ分布を示しており，図中黒色部分は，マクロひずみよりも，ひずみが大きい部位を示しており，図中の白色部分は，同様にひずみが小さい部位を示している．解析による Fig. 4 のひずみコンターを見るとわかるように弾性定数が小さく変形しやすい a 軸の方がやや大きいひずみを示している．解析で得られた結晶界面での詳細なひずみ分布を Fig. 5 に示す．結晶のひずみのマクロひずみの 0.1%に対し，解析でのひずみ分布の最大値は 0.1048%であり，最小値は 0.0952%であり， a 軸と b 軸のすべての結晶のひずみの平均値はマクロひずみとコンシステントであり 0.1%となる．また， a 軸のみの平均は 0.1017%， b 軸のみの平均は 0.0983%となり， a 軸と b 軸の引張方向のひずみには 3.5%ほど差が出るのが明らかになった．

Fig. 3 Diffraction condition for white X-ray.

Fig. 4 y-direction strain contour mapping.

Fig. 5 Calculated strain distribution (y-axis).

Fig. 6 Diffraction profiles of (040) and (400) planes of the YBCO layer under applied loads.

解析で得られた薄膜の機械的弾性定数は、 $E_M=170.1$ GPaである。ポアソン比については、YBCOの単結晶のように、単結晶の弾性異方性が強い材料の薄膜では、様々な値を取り得る。解析による引張に対する面内直交方向のポアソン比 ν は $\nu=0.1329$ であった。この値は、一般的な等方性材料に比べると、半分程度である。Ledbetterらの単結晶の値に近い。

3.2 白色X線測定結果

実験結果の詳細は、文献5に報告するが、テープの軸方向に、実験では、マクロひずみが無負荷から0.7%ひずみまで0.1%ひずみステップとなるよう荷重を負荷した。白色X線を用いた実験ではエネルギー分散であり、一度の測定で幅広いレンジの格子面間隔 d が測定できる。実験では、テープ軸方向に引張ひずみを負荷し、軸方向を向いている結晶面のうち(400)と(040)、(500)と(050)、(600)と(060)の6つの結晶面から得られる回折線について解析を行った。Fig. 6に(400)と(040)の回折プロファイルを示す。YBCOでは a と b 軸の格子定数がわずかに異なるため、図のように(400)と(040)のピークが2つに分かれる。解析

Fig. 7 Change of diffraction strain A_{040} and A_{400} planes as a function of macroscopic strain.

Fig. 8 Change of the (040) and (400) plane spacing as a function of macroscopic strain.

ではガウス関数を用いたダブルピークフィッティングを行い、格子面間隔を求めた。マクロひずみと(400)と(040)の格子面間隔の関係についてまとめたものをFig. 7に示す。

次に、マクロひずみ A を横軸、回折線から得られた結晶ひずみを A_{0k0} あるいは A_{h00} を縦軸にプロットした図をFig. 8に示す。残留ひずみは考慮せず、結晶ひずみは、無負荷の点をひずみ0とした。図では、無負荷から0.7%ひずみまで良好な直線性が得られた。単結晶様の試料に既知のひずみを負荷したとすれば、マクロ負荷ひずみと結晶のひずみを直接測定している回折ひずみの関係は1:1、つまりひずみ勾配 A は1となる。

他の回折線について、回折ひずみとマクロ負荷ひずみの比をTable 1に示す。得られた結果は、 A が0.81から0.85であり、 a 軸、 b 軸のどちらも1よりも低い数値となっている。これは、ひずみの緩和が生じていることを意味している。Ledbetterら⁶⁾も110面の双晶が存在することで、大幅な弾性定数の減少を生じさせることを述べており、また

Table 1 Diffraction strain – macroscopic strain slope

Lattice plane	Slope (A_{h00}/A or A_{0k0}/A)
(040)	0.840
(050)	0.813
(060)	0.813
(400)	0.885
(500)	0.891
(600)	0.843

Fig. 9 Schematic of YBCO crystal boundary.

長村ら⁵⁾は、双晶の界面での、酸素分子のふるまいで化学結合が低下することを予測している。

A のそれぞれの平均は($h00$)では 0.873, ($0k0$)では 0.822 であり、勾配の差は 5.8%である。FEM 解析による勾配の差は 3.5%であり、実験の方が差が大きくなる傾向が得られた。これらの差は、解析に用いた Ledbetter らの弾性定数と本実験で用いたテープ線材の YBCO の弾性定数が若干異なることに起因する可能性も否定できないが、応力緩和が発生していることは確かである。

YBCO 薄膜では、**Fig. 9** に示すような双晶が多数存在している。 a と b 軸の界面には、図のように酸素の位置が不確定な領域が存在する。長村らは提案する結晶界面の独特な挙動を、結晶の回転と化学的結合力の低下によって説明している。このような現象は、力学的には弾性定数の低下として、捉えることができる。このようにミクロ双晶の界面では完全な単結晶では見られないバンド状のひずみ緩和が生じ、マクロなひずみと、結晶ひずみが一致しないと考えられる。これらの緩和特性は、**Fig. 8** のような線形な関係が得られていることから、ひずみに依存するような非線形はないものと思われる。

3.3 機械的弾性定数

以上のように、双晶の界面にてひずみ緩和が起こってい

ると考えると、FEM 解析で求めた機械的ヤング率 E_M は真の値ではなく実効値は低下する。実際はひずみ緩和が起これば、YBCO 薄膜層はひずみを多く負担することで、フックの式において実際受け持っている応力は低くなる。多結晶体の力学変形には、各結晶の応力がマクロな応力と一致する Reuss モデル⁹⁾と、各結晶のひずみがマクロなひずみに一致する Voigt モデル¹⁰⁾があるが、本モデルのような 2 つの結晶方位をもつ単結晶からなる薄膜では、Voigt モデルに近く、一軸のフックの式を次式のように定義する。

$$\sigma = E_{\text{effec}} \varepsilon \quad (9)$$

Table 1 で得られたすべての回折ひずみとマクロ負荷ひずみの傾きを平均した値 A_{ave} は、 $A_{\text{ave}} = 0.847$ である。この緩和の分、弾性定数の低下が起こったと仮定すると、これから予測される、実効的なヤング率 E_{effec} は FEM 解析で得られた双晶での緩和がない状態でのヤング率 E_M と A_{ave} の積で表すことができ、その際、 $E_{\text{effec}} = 144.1 \text{ GPa}$ となる。

次に、実効的なポアソン比を考える。YBCO 薄膜では、 a 軸と b 軸の結晶の割合が等しいとすると、**Fig. 2** での y 方向と x 方向の弾性定数は等しくなる。 x と y 方向の弾性挙動が同じであれば、ひずみの緩和率においても x 方向と y 方向で等しくなり、実効的なポアソン比は解析で求めた値と等しく、 $\nu_{\text{effec}} = 0.1329$ と予測される。

本解析モデルでは、実効値としての弾性定数の予測は可能であるが、**Fig. 9** に示すような双晶の界面に生じるバンド状の弾性定数の緩和帯を再現できていない。これらの力学挙動を正確に再現するには、今後、緩和帯の領域の大きさや、局所での弾性定数の予測が必要である。

そもそも薄膜は、膜単体を得ることが難しく、また単体での引張試験ができない。ゆえに解析による手法でしか弾性定数を導出することができない。本研究で提案する解析と実験を組み合わせる手法を用いれば、今まで未知であった YBCO テープ線の実材料の YBCO 超電導層の弾性定数を予測することができる。ひずみ緩和は、双晶の比率など、結晶の微細組織に依存するため、正確な弾性定数を予測するには YBCO テープ線材ごとにマクロひずみと結晶ひずみの関係を求める必要がある。

4. 結論

本解析と実験に得られた知見をまとめると、以下のようである。YBCO 薄膜の結晶組織を考慮したモデルを作製し、FEM 解析により双晶による緩和がない場合の機械的弾性定数とポアソン比の導出を行った。その上で、銅安定化 YBCO 超電導線材の引張試験を白色 X 線回折装置中で行い、マクロひずみと結晶ひずみの関係を求めた。長村らが提案していた双晶界面での独特な振る舞いを全体としてのひずみ緩和ととらえ、解析によって得られた弾性定数と

ひずみ緩和率を考慮することで今まで薄膜単体を得ることができず、未知であった、実試料のマイクロメカニクスを考慮した実効的な機械的弾性定数の推定を行った。

参 考 文 献

- 1) K. Osamura, M. Sugano, S. Machiya, H. Adachi, S. Ochiai and M. Sato: "Internal residual strain and critical current maximum of surrounded Cu stabilized YBCO coated conductor", Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 065001-065006
- 2) K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, and H. Suzuki: "Force free strain exerted on a YBCO layer at 77 K in surround Cu stabilized YBCO coated conductors", Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 045020-045026
- 3) K. Osamura, S. Harjo, T. Itoh, K. Aizawa, S. Awaji, G. Nishijima, H. Takahashi, H. Oguro, T. Hemmi, K. Matsui, Y. Tsuchiya, S. Machiya, H. Suzuki, M. Tomita and K. Suzuki: "Investigation of stress/strains and related properties in superconducting wires and conductors by means of neutron diffraction at J-PARC", TEION KOGAKU **45** (2010) 135-147 (in Japanese)
長村光造, S. Harjo, 伊藤崇芳, 相澤一也, 淡路 智, 西島元, 高橋弘紀, 小黒英俊, 辺見 努, 松井邦浩, 土屋佳則, 町屋修太郎, 鈴木裕士, 富田 優, 鈴木賢次: 「J-PARC 中性子を用いた超電導材料・導体の研究」, 低温工学 **45** (2010) 135-147
- 4) K. Tanaka, Y. Akiniwa, T. Ito and K. Inoue: "Elastic constants and X-ray stress measurement of cubic thin films with fiber texture" JSME Int. J. Series A **42** (1999) 224-234
- 5) K. Osamura, S. Machiya, et al.: "Unusual internal strain behavior exerted on YBCO layer in the surround Cu stabilized YBCO coated conductor", IEEE Trans. Appl. Supercond. (accepted)
- 6) H. Ledbetter and M. Lei: "Monocrystal elastic constants of orthotropic $Y_1Ba_2Cu_3O_7$: an estimate", J. Mater. Res. **6** (1991) 2253-2255
- 7) R.L. Mullen, R. Ballarini, Y. Yin and A.H. Heuer: "Monte-Carlo simulation of effective elastic constants of polycrystalline thin films", Acta Mater. **45** (1997) 2247-2255
- 8) 芹澤一史, 田中啓介ら: 「<001>繊維配向した立方晶多結晶薄膜の弾性変形の有限要素法による解析」, Journal of the Society of Materials Science, Japan **53** (2004) 150-156
- 9) A. Reuss and Z. Angew: "Beriicksichtigung der Elastischen Formänderung in der Plastizitätstheorie", Math. Mech. **9** (1929) 49
- 10) W. Voigt: "Lehrbuch der Kristallphysik", Teubner, Leipzig (1928) 962

町 屋 修太郎 2006 年名古屋大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年より、独立行政法人 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門博士研究員。2008 年より、独立行政法人 物質・材料研究機構中性子散乱グループ NIMS ポスドク研究員。同年より大同工業大学機械工学科講師、現在に至る。超伝導複合材料の X 線や中性子を用いた応力・ひずみ評価に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、日本材料学会、日本中性子科学会会員。博士 (工学)。

長 村 光 造 1970 年京都大学大学院工学研究科博士課程冶金学専攻修了。同年より同大学工学部助手、同助教授を経て、1985 年より京都大学工学部教授、2006 年 3 月同大学名誉教授、退職、2006 年 4 月より (財)応用科学研究所 理事・特別研究員として現在に至る。この間主として超電導材料の組織制御とその機能性の最適化に関する研究を行ってきた。低温工学・超電導学会、日本金属学会、応用物理学会、日本軽金属学会会員。京大工博。

菫 蒲 敬 久 1996 年千葉大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。2001 年千葉大学大学院自然科学研究科物質科学専攻博士課程中退。同年スプリングエイトサービス (株) 入社後、日本原子力研究所出向、技術開発協力員を経て、2008 年日本原子力研究開発機構研究副主幹、現在に至る。放射光を用いた材料内部応力・ひずみ評価技術開発およびそれらを利用した応用研究に従事。日本放射光学会、日本材料学会、日本機械学会、日本原子力学会会員。博士 (工学)。

桐 山 幸 治 2002 年 3 月神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了、同年 7 月まで同大学院研究生、同年 8 月よりスプリングエイトサービス (株) 入社。2010 年 2 月より一般財団法人総合科学研究機構東海事業センター。日本材料学会会員。博士 (理学)。

菅 野 未知央 2003 年京都大学大学院工学研究科材料工学博士後期課程専攻修了。同年から物質・材料研究機構強磁場研究センター特別研究員。2005 年から京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の助手、2007 年から同助教。主に超伝導線材の電磁機械特性に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、日本金属学会、電気学会、日本機械学会会員。工学博士。

田 中 啓 介 1971 年京都大学大学院工学研究科博士課程機械工学第 2 専攻修了。同年より同大学工学部助手を経て 1983 年より京都大学工学部助教授。1991 年名古屋大学工学部教授、1997 年同大学大学院教授、2007 年 3 月同大学名誉教授。2007 年 4 月より名城大学理工学部教授となり現在に至る。X 線応力測定法を用いた残留応力評価、特にセラミックスや薄膜の評価を行っている。日本機械学会、日本材料学会に所属。京大工博。