

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：74301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360312

研究課題名（和文） 強磁場中における超伝導臨界電流の歪効果の解明
＝応力・歪問題の新しい展開をめざして＝研究課題名（英文） Strain Effect on Critical Current of Practical Superconductivity
Wires under High Magnetic Field

研究代表者

長村 光造 (OSAMURA KOZO)

公益財団法人 応用科学研究所

研究者番号：50026209

研究成果の概要（和文）：超伝導技術の真の実用化ため、超伝導線材の高臨界電流化、高強度化に不可欠な応力・歪問題を解決するための研究を行った。Nb₃Sn, BSCCO, YBCO 実用複合線材について磁場中における臨界電流の歪依存性のスケーリング則の根本となる熱歪および格子歪の実測に成功し、偏差歪、結晶粒界弱結合、微細双晶界面と臨界電流の相関を明らかにした。全体として複雑な複合線材中の超伝導層に加わる局所歪および線材強度の予測方法を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：In order to industrialize fully the superconductivity technology, it is indispensable to solve the stress / strain problems for improving the critical current and strengthening the practical superconducting wires. It has been succeeded to measure directly the thermal strain as well as lattice strain exerted on superconducting components of Nb₃Sn, BSCCO and YBCO wires by means of quantum beam techniques. On the basis of knowledge of local strains, it becomes possible to investigate the strain dependence and scaling rule of critical currents with respect to magnetic field, deviatoric strain, grain boundary weak link and micro-twin. Further the calculation methods have been proposed for the local strain and the strength of the practical composite superconducting wires.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
22 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
23 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：超伝導・高温超伝導

1. 研究開始当初の背景

人類が直面するエネルギー危機の解決のため、超伝導技術は最重要キーテクノロジーのひとつであり、これまで大容量送電ケーブル、エネルギー貯蔵、超伝導発電機等のプロトタイプが作製され、熱核融合炉 ITER 計画では原型炉の建設が今まさに開始されたと

ころである。しかしこのような状況においても超伝導技術の真の実用化にはまだ克服すべき広範でかつ共通する材料科学的技術課題が立ち塞がっている。その根本には高臨界電流、低交流損失、高強度等の全体の機能を最大化した高性能・低コスト超伝導複合体の設計とその実用化を図らねばならない。とく

に実用化のために最も重要となるのは臨界電流の応力・歪問題の解決である。

臨界電流の応力・歪問題の一つは、ITER計画で用いられる Nb₃Sn 超伝導素線の臨界電流は歪に敏感であり、製造過程で生ずる残留応力、強磁場中でのフープ力により、その歪量が容易に危険域まで達することである。さらに実用化が期待されている BSCCO ((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀) や YBCO (YBa₂Cu₃O_{6+d}) などの高温超伝導線材においても、セラミックスである脆弱な超伝導層の保持のため金属基材と複合した線材(テープ材)の形がとられるが、熱誘起残留応力、フープ力による臨界電流の劣化の問題が十分には解決されていない。このように臨界電流の応力・歪問題は実用上大きな問題となっているが、学問的見地からも、可逆領域における臨界電流の応力・歪依存性についての理論的解明が急がれている。このように工学的諸問題の解決とともに、臨界電流の歪依存性の統一的な完全な理解がなされることが急務と考えられる。

2. 研究の目的

以上に述べた工学的および基礎的な問題に対処するため次のような研究に注力することとした。

Nb₃Sn 線材の超伝導特性の力学応答の基礎的検討を行う。Nb₃Sn 超伝導素線では臨界電流の歪依存性は可逆領域では臨界電流の歪依存性は極大を示し、かつ真性歪、磁場、温度の関数として、スケール則に従うことが多くの研究者によって認められている。最近の理論によれば極大になる負荷歪は次式で示される、

$$\delta = (A_{axial}^T - A_{transv}^T) / (1 + \nu) \quad (1)$$

ここで ν は Poisson 比、 A^T は熱歪であり、添字 axial, transv は線材の軸方向および直角方向を示す。複合材料の熱歪はその構造に複雑に影響されるので、実際に熱歪を測定し理論の検証を行う。さらに ITER プロジェクトの重要性から、Nb₃Sn, Nb₃Al を含む A15 型超伝導複合線材に関して複合材料中の熱歪を定量的に計算する方法を提案し、圧縮性歪みを緩和する線材構造の検討を行う。

高温超伝導線材の臨界電流の歪依存性は Nb₃Sn 超伝導線材と類似点もあるが、相違点が多く観察されてきている。YBCO 系では製造方法のいかんにもかかわらず Nb₃Sn と同様な歪依存性に極大が出現する。しかし量子ビームを用いた実験で超伝導層中の残留歪が(1)式で示される臨界電流最大の歪と必ずしも一致しないことが明らかとなってきた。そこでこのような傾向が Gd, Sm 等の希土類系テープ線材でも出現するか確かめる。BSCCO では歪依存性に極大は出現しないが、最近の理論的検討から臨界電流の磁場、温度、

歪依存性は結晶粒界の構造に関連することが提案されているので、磁場中での負荷歪依存性を実験的に調べ理論の検証を行う。

このように物質により歪効果の挙動が異なることが明らかになってきているので、その総合的かつ統一的な解明を目的とする。

3. 研究の方法

磁場中での臨界電流の歪依存性については、液体窒素温度における引張および曲げ依存性は応用科学研究所で、ヘリウム温度での測定は原子力科学研究機構で実施した。東海研究所 JRR3-RESA および J-PARC 「匠」において中性子による歪測定を、また Spring-8 では放射光による歪測定を実施した。いくつかの試料についてはテープ状および線状の試料の「軸歪成分」と「横歪成分」の歪を計測した。

測定した残留歪、弾性定数、熱膨張係数等を総合して、定量性のある機械-電磁気特性解析モデルを完成するため、臨界電流の応力・歪依存性の材料毎の“全スケーリング”の検討と、それに基づく応力・歪問題の統一的解釈について考察を行った。複合則を基本とするモデルにより応力-歪関係を解析し、線材軸方向および直角方向の熱歪、force free strain(A_{ff}) および超伝導層の nominal fracture strain を決定することにした。

4. 研究成果

(1) 装置開発

超伝導線材の超伝導特性に及ぼす歪の効果の評価するために、中性子回折法による歪測定のため中性子回折測定用低温引張試験機を開発した。本試験機は日本原子力機構研究用原子炉 JRR-3 に設置された残留応力測定用中性子回折装置 RESA に同架できる設計とし、GM 冷凍機と真空容器、応力負荷・制御機構から構成されている。真空容器上部に GM 冷凍機一基を配置し、側面に中性子線透過のための窓が設けられている。真空容器内部は試料空間となっており、熱伝導を考慮したユニバーサルチャックにより種々の試験片に対応できる。また、伸び計、ひずみゲージなどを用いてマクロの情報を同時に測定できる。引張軸は水平で、最大荷重は 10kN である。特に荷重計を真空槽内に移動し、荷重シャフトをチタン製に置き換え、試料ホルダーをカセット式に置き換える等の改良をはかり性能向上をはかったところ、試料温度は約 5K に到達した。各国の中性子施設の類似装置の状況として、ISIS の ENGIN-X には 30K, Los Alamos の SMARTS では 90K まで冷却できる低温引張装置が稼働しているが、今回開発した試験機はこれらの各国の装置よりも冷却能力に優れることが明らかとなった。

(2) Nb₃Sn についての成果

国際熱核融合実験炉 (ITER) の次に計画されている原型炉用トロイダル磁場 (TF) コイルでは、磁場 16 T、電流 100 kA の性能が要求される。電磁力に換算すると、導体 1 m 当たり 160 ton になり、これまでに開発された ITER TF コイル用導体の 2 倍になる。導体は多数の超電導線とステンレス鋼製のジャケットから構成され、電磁力による歪に加えて超伝導生成熱処理から極低温までの熱歪に耐えることが求められる。そのため、導体内部の超伝導線の歪状態を把握することが重要である。そこで基礎となる導体を構成する Nb₃Sn 線材の特性を詳しく測定することが重要である。そこで熱歪を明らかにするために超伝導生成熱処理温度から極低温の運転温度までの特性及びその機械特性を明らかにした。

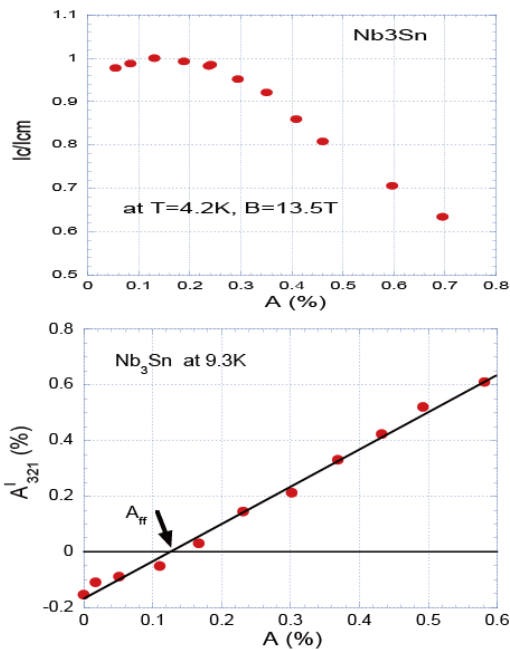


Fig. 1 Nb₃Sn 線材の臨界電流(上)と Nb₃Sn フィラメント加わる局所歪(下)の引張歪依存性

Fig. 1 上図に ITER-Nb₃Sn 線材の温度 4.2K、磁場 13.5T 中での規格化された臨界電流の負荷歪依存性を示す。ほぼ 0.14% の引張歪で極大歪 (δ) になることがわかる。一方 Fig.1 下図に 9.3K で測定した Nb₃Sn フィラメントに加わる線材軸方向の局所歪を示す。 $A=0$ の値は熱歪を示すが、-0.16% と圧縮歪であり、外部からの引張により圧縮歪は小さくなり A_{fr} の歪で局所歪はゼロとなり、それ以上の引張により引張歪が大きくなる。このように実験により $\delta \approx A_{fr}$ を実証したのは世界で最初である。さらに(1)式で示す熱歪の成立性について

て実験および計算により検討を行った。またこれらの研究をとおして局所歪の制御方法が解明されたので、Nb₃Sn 超伝導フィラメントに加わる圧縮歪を軽減させる新しい線材構造を提案した。

(3) BSCCO についての成果

BSCCO ((Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x) テープはマトリックスに銀を用いるため耐力が低いことである。そこで特性改良のために金属シートをラミネートする工夫がなされるようになってきている。

Table 1 BSCCO テープ中の超伝導成分にかかる熱残留歪 (A^T)、耐力および相当歪 ($R_{0.2}$ and $A_{0.2}$)、および 99% 可逆歪 ($A_{99\%}$)

その一つの黄銅をラミネートした Brass

試料	A^T at RT (%)		$R_{0.2}$ (MPa)	$A_{0.2}$ (%)	$A_{99\%}$ (%)
	Cal	Exp			
Insert	0.059	0.053	113	0.16	0.206
Brass 50	0.081	0.081	246	0.50	0.445

3Ply BSCCO テープを引張試験機に取付け、テープ面に向けて中性子線が入射し、直交方向に置かれた検出器で回折される条件で実験を行った。テープ軸方向で得られた主な Bragg ピークに指数付けしたところ、BSCCO については (220) 面が主として観測されたことから BSCCO の c 軸はテープ軸に直角、すなわちテープ面に平行であることがわかった。この実験により内部歪がゼロになる、force free strain の状態になるのは外部応力が $R_{fr}=125$ MPa であった。これをヤング率 $E=150$ GPa を用いて歪に換算すると $A_{fr}=0.081\%$ となる。実際にどの程度の圧縮歪が残留するか計算結果及び中性子回折を用いて測定した結果をまとめて Table 1 に示す。ここで Insert はラミネートされていないテープ、Brass50 は 50 μ m 厚さの黄銅をラミネートしたテープを示す。室温での熱誘起残留歪は、ほぼ計算値と実測値は一致する。BSCCO 超伝導成分は脆性であり、局所歪が A_{fr} より大きくなると破断しやすくなる。熱誘起残留歪 A^T がほぼ A_{fr} に比例するとすれば、Brass 3ply のようなラミネート材のほうが Table 1 に示すように耐力が改善されることが理解される。また液体窒素温度での臨界電流の可逆限界歪 $A_{99\%}$ についても大きく改善される。SUS 等の他のラミネート材についても興味ある結果が得られた。

Fig.2 に BSCCO テープの臨界電流の引張歪依存性を液体窒素温度で測定した結果である。なお測定中にテープ表面法線に平行に磁場を 0.1, 0.3T 印加したときの結果も示されている。全体に臨界電流は引張歪とともに

ゆっくりと減少し、可逆限界歪 0.4%を超えると急激に減少する。この急激な減少は超電導フィラメントの破断によるものである。可逆限界歪内では歪に対して直線的に減少するが、その勾配は磁場が大きくなると負に大きな値になることが明らかとなった。

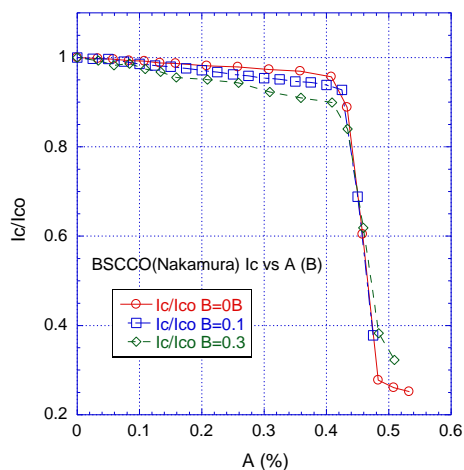


Fig. 2 BSCCO テープの臨界電流の引張歪み依存性、ここで磁場 0.1, 0.3T を印加した結果も示されている。

結晶粒界弱結合が臨界電流を支配しているとする、Fig.2 に示されるように磁場中で臨界電流の歪依存性が変化することを説明することが可能となる。

(4) YBCO についての成果

高温超電導テープである YBCO coated conductor の超電導層の厚さは非常に薄いもので、ここで報告する SuperPower 社製のテープでは 1 μm 程度である。Fig.3 は超電導層の軸方向と横方向の局所歪の引張歪依存性を示す。ここで特徴的なことは(040), (400)面で引張歪依存性、すなわち勾配が異なることである。さらに軸方向の勾配は1より小さいこと、(040)面の勾配のほうが(400)面より小さいことである。このような特徴は微細双晶の存在により説明がつくことを明らかにした[7]。双晶界面およびその付近では酸素原子の占有割合に不均質が生ずるとともに、原子配列が乱れ力学的に軟らかい領域になるのが原因すると考えられる。

同様の解析を他の格子面についても行った。いずれの格子歪の巨視的歪にたいする勾配は1より小さい。各格子歪の勾配を回帰分析からもとめると Table 2 のようになる。(0k0)面の勾配は(h00)面の勾配より小さい傾向が明らかとなった。また GdBCO, SmBCO テープ線材についても同様の結果が得られた。

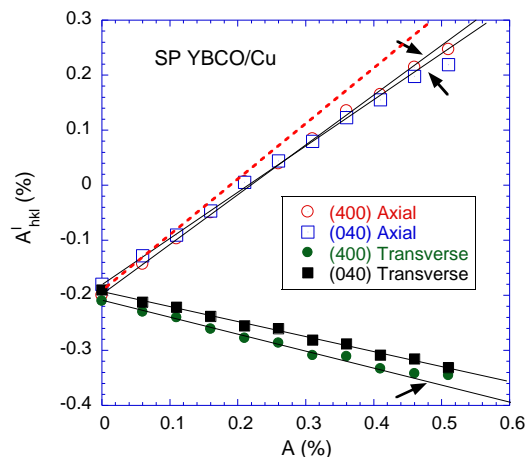


Fig. 3 YBCO テープの軸方向(axial)、テープ面内直角方向(transverse)の局所歪の負荷歪依存性

Table 2 SP-YBCO テープにおける格子歪の勾配の結晶面依存性

面	勾配
030	0.826
300	-
040	0.826
400	0.870
050	0.813
500	0.891
060	0.813
600	0.843

双晶関係にある結晶が双晶面で完全に整合しているときに期待される回転角は 0.96° であるが、実際にはどの程度回転するのか調べた。2つの分布のそれぞれにガウス関数で fitting し、その中心値を求めるとそれぞれ 1.38°, 1.44° となり、その差は 0.06° となった。

以上の実験結果より微細双晶が力学的性質に影響することを結論できた。

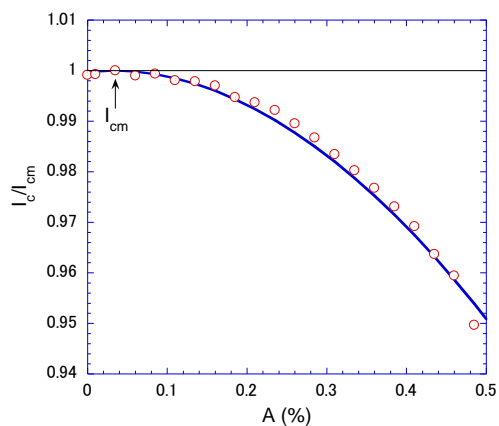


Fig. 4 SP YBCO の臨界電流の負荷歪依存性

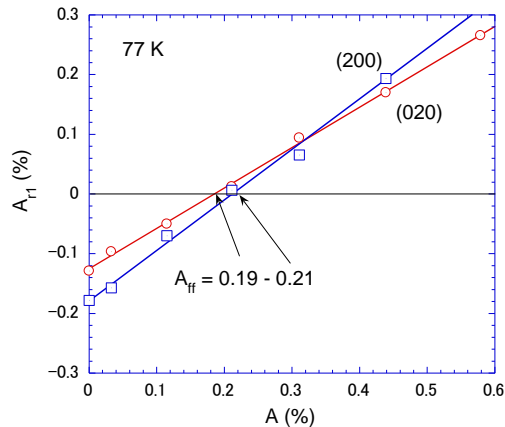


Fig. 5 YBCO層に加わる局所歪の引張歪依存性

次に Fig.4 に臨界電流の引張歪依存性を示す。A=0.02%付近で極大を経て減少するのがわかる。液体窒素温度で測定した局所歪の引張歪依存性を Fig.5 に示す。Force free strain はほぼ 0.19 - 0.21 であり、臨界電流極大の歪 0.02%は全く異なることが明らかとなった。

(5) 研究成果にもとづく提言

3 年間の本研究をとおして、広い温度および磁場領域で実験的に明らかにしてきた各成分の臨界電流、残留歪、弾性定数、熱膨張係数等を総合して、定量性のある機械-電磁気特性解析モデルを構築することを目指した。これによりある複合体構造を与えれば、その線材の機械-電磁気特性を予測することができるようになり、さらに可逆限界歪および応力の推定が可能となるような、線材の工学的設計手法を提案できた。たとえば共通のプログラムを用いて Nb₃Sn および Nb₃Al 線材の極低温における熱歪を計算し、その結果は実測値と一致した。これにより Nb₃Al 線材が何故歪特性が優れているかの本質を解明することができた。本方法を一般化してすべての実用超伝導線材の工学的設計に拡張することが望まれる。

さらに本質的な研究課題として、臨界電流の磁場、応力・歪依存性の材料毎の“全スケールリング”の検討を行い、それに基づく応力・歪問題の統一的解釈を得ることを試みた。現時点では少なくとも (1) 超伝導体に一軸性の弾性歪を与え、系の対称性を破ることにより、T_c、B₂、ピンニング力等に異方性を与えたときの温度依存性、磁場依存性の形から超伝導の発現機構の解明に足がかりを与える。(2) YBCO および Nb₃Sn 系と BSCCO 系では臨界電流の歪依存性が大きく異なり、YBCO と Nb₃Sn の間にも歪依存性に相違があることが実験的に明らかにできたが、その理解のためにはより上位の概念に基づき一

般化されたスケール則の構築が望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① K Osamura, S Machiya, Y Tsuchiya, H Suzuki, T Shobu, M Sato and S Ochiai “Microtwin Structure and Its Influence on the Mechanical Properties of REBCO Coated Conductors” IEEE Trans on Applied Supercond., **22** (2012) 8400809(9pp)
DOI:[10.1109/TASC.2011.2178847](https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2178847)
- ② K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, H. Suzuki, T. Shobu, M. Sato, T. Hemmi, Y. Nunoya and S. Ochiai, “Local strain and its influence on mechanical -electromagnetic properties of twisted and untwisted ITER Nb₃Sn strands” Supercond. Sci. Technol., **25** (2012)054010(9pp)
DOI:10.1088/0953-2048/25/5/054010
- ③ K Osamura, S Machiya, Y Tsuchiya, S Harjo, H Suzuki, T Shobu, K Kiriyama, and M Sugano “Internal Strain Behavior Exerted on YBCO Layer in the YBCO Coated Conductor” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, **21** (2011) 3090-3093
DOI:[10.1109/TASC.2010.2086038](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2086038)
- ④ K Osamura, S Machiya, Y Tsuchiya, H Suzuki, “Internal Strain and Mechanical Properties at Low Temperatures of Surround Cu Stabilized YBCO coated conductor” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, **20** (2010) 1532-1536.
DOI:10.1109/TASC.2010.2042437
- ⑤ Y Tsuchiya, H Suzuki, T Umeno, S Machiya and K Osamura “Development of a cryogenic load frame for a neutron diffractometer” Meas. Sci. Technol.,**21** (2010) 025904 -025907
[DOI:10.1088/0957-0233/21/2/025904](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/025904)
- ⑥ Osamura K, Sugano M, Nakao K, Siohara Y, Ibi A, Yamada Y, Nakashima N, Nagaya S, Saitoh T, Iijima Y, Aoki Y, Hasegawa T, and

- Kato T “Reversible Strain Limit of Critical Currents and Universality of Intrinsic Strain Effect for REBCO-Coated Conductors” Supercond. Sci. Technol., **22** (2009) 025015-025021
DOI:[10.1088/0953-2048/22/2/025015](https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/2/025015)
- ⑦ Osamura K, Sugano M, Nakao K, Siohara Y, Ibi A, Yamada Y, Nakashima N, Nagaya S, Saitoh T, Iijima Y, Aoki Y, Hasegawa T, and Kato T “REVERSIBLE STRAIN LIMIT OF CRITICAL CURRENTS AND THEIR UNIVERSAL ELASTIC STRAIN EFFECT FOR REBCO COATED CONDUCTORS FABRICATED BY DIFFERENT TECHNIQUES” Proceed. of ICEC22-ICMC (2008) 971-976. ed. by H.-M. Chang et al (Korea Inst. Appl. Supercond. Cryo)
DOI:[10.1088/0953-2048/22/2/025015](https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/2/025015)
- ⑧ K Osamura, S Machiya, H Suzuki, S Ochiai, H Adachi, N Ayai, K Hayashi and K Sato “Improvement of Reversible Strain Limit for Critical Current of DI-BSCCO due to Lamination Technique”, IEEE Transaction on Applied Superconductivity **19** (2009) 3026-3029
DOI:[10.1109/TASC.2009.2019020](https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2019020)
- ⑨ K Osamura, S Machiya, Y Tsuchiya, 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
DOI:[10.1088/0953-2048/23/4/045020](https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045020)
- ⑩ 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
DOI:[10.1088/0953-2048/22/6/065001](https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/6/065001)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 町屋修太郎、長村光造、ハルヨ ステファヌス、伊藤崇芳、鈴木裕士；パルスおよび定常中性子源を用いた BSCCO テープ線材の集合組織測定 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会 (2010.12.1) かごしま県民交流

センター

- ② 長村光造、町屋修太郎、土屋佳則、ハルヨ ステファヌス、鈴木裕士、菖蒲敬久、桐山幸治、菅野未知央；YBCO Coated Conductor における局所歪と双晶構造の相関 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会 (2010.5.12) 川崎市産業振興会館
- ③ K Osamura, S Machiya, Y Tsuchiya, H Suzuki “Internal Residual Strain Measurements by Means of Neutron Diffraction and Correlation with Critical Current Maximum of Surround Cu Stabilized YBCO Coated Conductors” (招待講演) 21st International Conference on Magnet Technology October 18-23 (2009) Hefei, Anhui, China
- ④ 長村光造、町屋修太郎、土屋佳則、鈴木裕士 YBCO C. C. の低温引張と中性子回折による内部歪変化のその場測定 第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学会 (2009.5.13) 早稲田大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長村 光造 (OSAMURA KOZO) (公財) 応用科学研究所 材料物理学 研究部 名誉教授 博士 (工学)
研究者番号：50026209

(2) 研究分担者

町屋 修太郎 (MACHIYA SHUTARO) 大同大学 中性子工学 工学部 准教授 博士 (工学)
研究者番号：40377841

鈴木 裕士 (SUZUKI HIROSHI) 日本原子力研究開発機構 中性子工学 研究員 博士 (工学)
研究者番号：10373242

土屋 佳則 (TSUCHIYA YOSHINORI) 物質・材料研究機構 量子ビームセンター 特別研究員 博士 (工学)
研究者番号：10455298