

平成 22 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（S）  
 研究期間：2006～2009  
 課題番号：18106011  
 研究課題名（和文） 超伝導複合材料の内部ひずみと臨界電流のその場測定法の開発および相  
 関定量評価  
 研究課題名（英文） Development of in-situ measurement method of internal strain and  
 critical current of composite superconductors and their quantitative evaluation  
 研究代表者  
 落合 庄治郎（OCHIAI SHOJIRO）  
 京都大学・工学研究科・教授  
 研究者番号：30111925

研究成果の概要（和文）：X線回折その場ひずみ測定法の開発と実験結果に基づくモデリングにより、超伝導複合テープの熱応力・外部応力による内部ひずみ変化とその超伝導特性との相関定量評価法の構築を目的として研究を行った。Bi2223系複合テープにおける、残留ひずみ集積過程、臨界電流とn値の引張/曲げひずみ依存性、負荷ひずみ下で誘発される試料ごとに異なる損傷に起因する臨界電流分布とその統計的性質、負荷ひずみ下での臨界電流とn値の試料長さ依存性、臨界電流の耐ひずみ特性に及ぼすラミネーション複合化効果などを解明・定量化した。

研究成果の概要（英文）：The present work aimed to construct a quantitative estimation method of correlation of thermal- and externally applied strains to superconducting property of superconducting composite tape by developing in-situ strain measurement method with X ray diffraction method and modeling based on the experimental results. The residual strain accumulation process, tensile/bending strain dependence of critical current and n-value, distribution of critical current under applied strain, which is different from specimen to specimen due to the difference in extent of damage, and its statistical feature, sample length-dependence of critical current and n-value under applied strain and effect of lamination of high modulus material to composite tape on strain tolerance of critical current in Bi2223 composite tapes were quantitatively elucidated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	41,900,000	12,570,000	54,470,000
2007年度	29,200,000	8,760,000	37,960,000
2008年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2009年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
総計	84,800,000	25,440,000	110,240,000

研究分野：工学

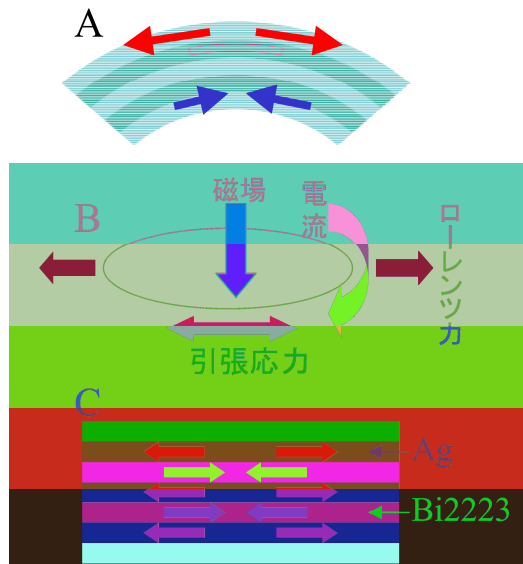
科研費の分科・細目：複合材料・物性

キーワード：超伝導複合材料、残留ひずみ、X線回折、モデリング、臨界電流

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導複合線材・テープ材は、作製時の冷却・加熱などの熱履歴過程で、構成材間の線膨張係数差により熱的応力が生じ、室温や極低温では各構成材 (Bi2223 フィラメント、安定化銀、銀合金シース) は残留応力を持つ。その後、巻取り時には引張および曲げ応力、稼働時には電磁気学的応力 (ローレンツ力) を受ける。さらに極低温での稼働・停止の繰り返しや点検のための極低温と室温間の熱サイクルなどが加わる。これらの多様な熱的・応力的環境により複合線材内部の応力状態や超伝導特性は変化する。そのため高温超伝導複合材の実応用に向けては、熱履歴や応力環境における変形破壊挙動およびその超伝導特性に及ぼす影響の定量評価法の開発は急務となっている。

図1 超伝導複合材料にかかる様々な応力



## 2. 研究の目的

X線回折によるその場ひずみ測定方法の開発、力学的見地からの材料特性評価・信頼性評価に必要な実測データの取得、材料内部での力学応答特性ならびに応力状態が超伝導特性や破壊特性に及ぼす影響の解明・モデリングと定量化を目的とした。力学的見地からの超伝導特性評価・モデリングについては、限られた構成材の限られた温度での内部ひずみ測定結果と提案する計算法を組み合わせ、熱的・応力的全履歴での全構成材の応力状態変化を評価する手法の提案、超伝導テープ材への高弾性フォイルのラミネーションによる残留ひずみ集積プロセスおよび超伝導臨界電流の耐ひずみ特性改善効果の定量化、曲げひずみ下での臨界電流の負荷曲げひずみ依存性の解明などを旨とした。

## 3. 研究の方法

まず放射光 (SPring8) を利用して、応力負荷モードが引張と曲げの両方の場合について、超伝導複合テープの内部ひずみを精密に測定するためのシステムと手順を構築した。次いで、そこで得たデータと本研究で開発してきたモデル、計算手法を組み合わせ、多彩な温度・応力環境でのひずみ集積過程を明確に把握した上で、内部ひずみと臨界電流の相関解析・モデリング・定量評価を行った。また、臨界電流値の統計的性質についても、フィラメントの超伝導電流輸送方向の破壊ひずみと残留ひずみの差の統計解析結果およびフィラメントの埋め込まれた中核部 (コア) の形態からモデル化して定量化を進めた。並行して、東北大学との共同研究で進めている2次元曲面回折レンズ結晶を応用した高強度・高精度回折装置実験室規模の高分解能 X線装置の開発に向けて、X線光学系の設計と設置、高強度化の鍵となる集光結晶についての性能評価を行った。対象超伝導複合テープと試料として、多芯 Bi2223/Ag/Ag 合金、ステンレス鋼をラミネートした多芯 Bi2223/Ag/Ag 合金、Bi2212/Ag/Ag 合金超伝導複合テープを用いた。

## 4. 研究成果

(1) 放射光を利用したひずみ測定手法の開発および in-situ 内部ひずみ測定

測定システムを構築し、アンジュレータ BL の多軸ゴニオメータに独自設計のその場引張試験機を搭載して、負荷ひずみ下での複合材中の Bi2223 フィラメントの試料長さ方向のひずみを、SPring8・ビームライン 46XU での X線回折により、(200), (220) 面を用いて、測定した。結果の一例を図 2 に示す。

また従来計算からの推測と事後の組織観察に頼っていた複合線材の曲げ変形に伴う超伝導フィラメントの損傷挙動について、最適な線吸収係数をもつ波長の X線を利用して試料への侵入長制御をおこなうことで、図 3 に示す幾何学的関係下で、曲げ変形の最内側 (圧縮側)、最外側 (引張側) の Bi2223 フィラメントひずみの曲げひずみ依存性を直接測定することに初めて成功した (図 4)。損傷の引張側と圧縮側での非対称性が的確に捉えられている。

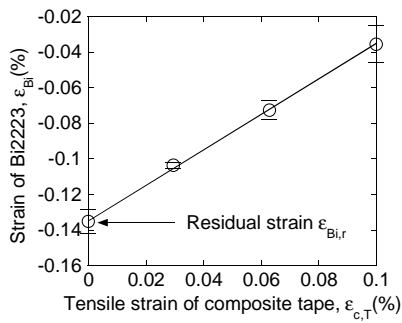


図2 引張負荷ひずみ下でBi2223 フィラメントのひずみ変化測定例

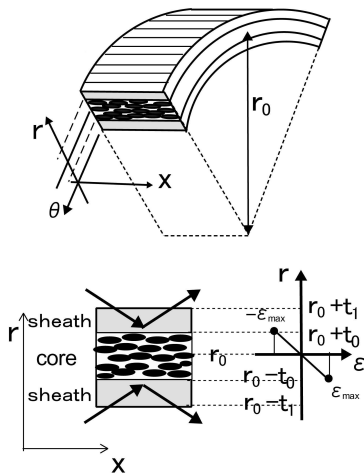


図3 曲げ負荷でのひずみ測定・解析に用いたコア、シースの幾何学的関係および方向の定義 (x: 試料幅方向、r: 試料幅方向、θ: 円弧方向)。

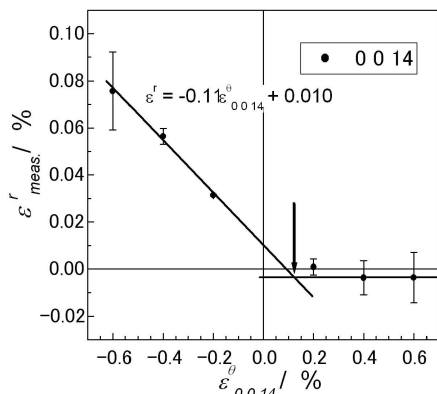


図4 測定結果。ε<sub>r</sub>, ε<sup>θ</sup>は、それぞれ、コア・シーす界面から25μmの距離内のBi2223フィラメントのr,θ方向の平均ひずみである。0014は実験で用いた結晶面を示す。

## (2) 熱的・機械的ひずみ集積過程のモデリング・定量評価

熱残留ひずみは臨界電流の耐ひずみ特性を支配する因子であるが、どのような過程を経て集積していくかを定量化した例は無い。本研究では、X線回折実験とモデリングにより、この課題に挑戦した。ラミネートテープを例にとるとその熱履歴およびラミネート前の負荷応力とラミネート後の応力緩和による機械的履歴において、鍵となる温度は図5に示すように多数ある。これらを組込んで履歴中に生じる現象を定式化し、X線回折実験で得られた室温残留ひずみの数値を使って全履歴中での各構成材のひずみ変化が求める手法を開発した。結果例を図6に示す。

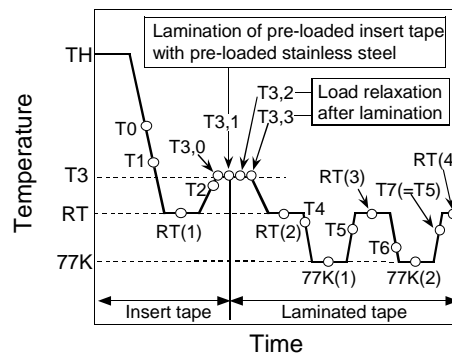


図5 ラミネートテープの残留ひずみ集積過程解析の鍵となる温度

Thermal history: TH→T0→T1→RT(1)→T2→T3(Lamination)→RT(2)→T4→77K(1)→T5→RT(3)→T6→77K(2)→T7→RT(4)  
Mechanical history at T3(Lamination): T3,0→T3,1→T3,2→T3,3

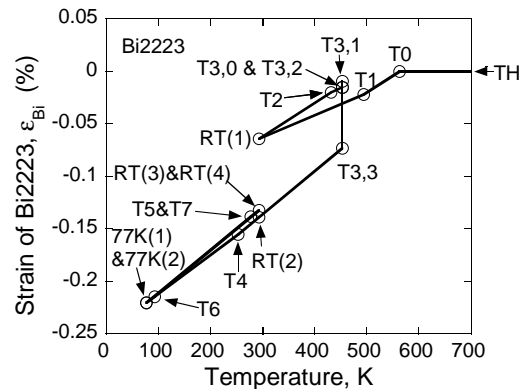


図6 X線測定結果と提案したモデルを組み合わせ求めたラミネートテープ中のBi2223フィラメントの残留ひずみ集積過程。

## (3) 曲げひずみ負荷下での内部ひずみ状態と臨界電流の相関のモデリング・定量評価

超伝導電流を輸送するBi2223フィラメントが銀に埋め込まれたコア部の形状を定量化して組み込み、フィラメントの引張破壊ひ

ずみ ( $\epsilon_r$ ) と残留ひずみ ( $\epsilon_r$ ) の差 ( $\epsilon_r - \epsilon_r$ ) をパラメータとして臨界電流を負荷ひずみの関数として計算できるモデルを提案し、図7のように実験結果を精度良く表せること、これまで経験的に求めていた不可逆曲げひずみ ( $\epsilon_{B, irr}$ ) を合理的に求められることを示した。

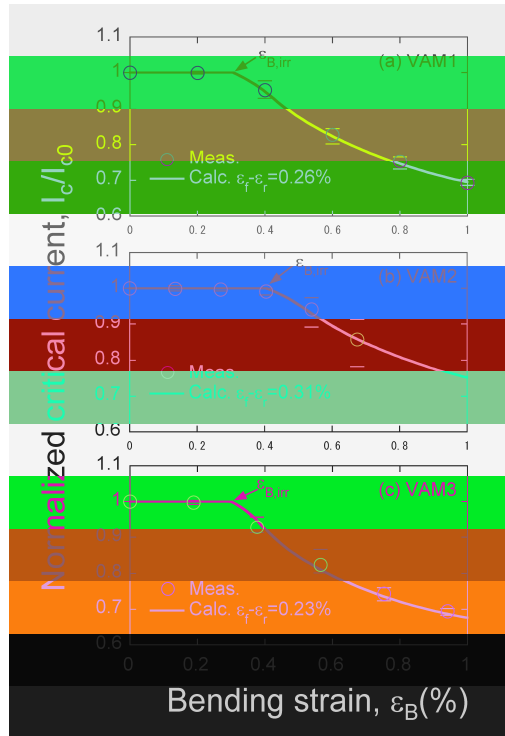


図7 本研究で提案した手法で、仕様の異なる3種類のBi2223超伝導複合テープについて、計算した臨界電流の曲げひずみ依存性コア形状と実測値の比較。

さらにこのモデルを試料間の臨界電流のばらつき記述に展開し、多数の試料の臨界電流測定値の分布は定量的に表現できることも示した。これらの成果は超伝導コイルにおいて必須の問題となる曲げ変形下の信頼性の評価手法としての展開も期待できる。

#### 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36件)

① S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他8名, Analysis of Critical Current Distribution of Bent Bi2223 Composite Tapes by Unifying Parameter Approach and Its Application to Description of Average Critical Current - Bending Strain Relation near the Average Irreversible Strain, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.23, No.2, 2010, Article No. 025006 (12 pp)

② S. Ochiai, M. Fujimoto, J. K. Shin, H. Okuda, 他2名, Distribution of Normalized Critical Current of Bent Multifilamentary Bi2223 Composite Tape, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.106, No.10, 2009, Article No. 103916 (11 pp)

③ S. Ochiai, H. Okuda, H. Matsubayashi, 他7名, Prediction of critical current-bending strain relation of Bi2223 composite tape using residual strain of filaments, load-strain curve and geometry of cross-section, Physica C: Superconductivity and its Applications, 査読有, Vol.469, No.15-20, 2009, 1480-1484.

④ S. Ochiai, H. Matsubayashi, H. Okuda, 他3名, Statistical Analysis of the Distribution of Critical Current and the Correlation of n value to the Critical Current of Bent Bi2223 Composite Tape, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.22, No.6, 2009, Article no.095012 (12 pp)

⑤ S. Ochiai, M. Fujimoto, H. Okuda, 他2名, Simulation on the Relation of Distribution of Overall Critical Transport Current to That of Local one in Bent-damaged Bi2223 Superconducting Composite Tape, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.105, 2009, Article no. 06912 (8pp)

⑥ H. Okuda, K. Nakajima, K. Fujiwara, K. Morishita and S. Ochiai, Point-focusing Monochromater Crystal Realized by Hot Plastic Deformation of a Ge Wafer, Journal of Applied Crystallography, 査読有, Vol.41, No.4, 2008, 798-799.

⑦ J. K. Shin, S. Ochiai, H. Okuda, 他2名, Change of the V-I curve and Critical Current with Applied Tensile Strain due to Fracture of Filaments in Bi2223 Composite Tape, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.21, No.11, 2008, Article no. 115007(6pp).

⑧ J.-K. Shin, S. Ochiai, M. Sugano, H. Okuda, 他2名, Direct measurement of difference in local deformation and its influence on critical current in Bi2223/Ag/Ag alloy composite tape, Scripta Materialia, 査読有, Vol.59, No.4, 2008, 448-450.

⑨ S. Ochiai, J. K. Shin, S. Iwamoto, H. Okuda, 他3名, Residual and Fracture Strains of Bi2223 Filaments and Their Relation to Critical Current under Applied Bending and Tensile Strains in

- Bi2223/Ag/Ag Alloy Composite Superconductor, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.103, No.12, 2008, Article no. 123911 (8 pp).
- ⑪ S. Ochiai, H. Rokkaku, J. K. Shin, S. Iwamoto, H. Okuda, 他 4 名, Thermally and Mechanically Induced Residual Strain and Strain Tolerance of Critical Current in Stainless Steel-laminated Bi2223/Ag/Ag Alloy Composite Superconductor, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.21, No.7, 2008, Article no. 075009 (pp.13).
- ⑫ J.-K. Shin, S. Ochiai, M. Sugano, H. Okuda, 他 5 名, Analysis of Residual Strain Change of Bi2212, Ag Alloy and Ag during Heating and Cooling Process in Bi2212/Ag/Ag Alloy Composite Wire, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.21, No.7, 2008, Article no. 075018(pp. 9).
- ⑬ J. K. Shin, S. Ochiai, H. Okuda, Y. Mukai, 他 5 名, Estimation of Young's Modulus, Residual Strain and Intrinsic Fracture Strain of Bi2212 Filaments in Bi2212/Ag/Ag Alloy Composite Wire, Physica C: Superconductivity and its Applications, 査読有, Vol.468, no.15-20, 2008, 1792-1795.
- ⑭ S. Ochiai, J. K. Shin, H. Okuda, M. Sugano, 他 5 名, Analysis of Distribution of Critical Current of Bent Bi2223 Composite Tape Based on a Unifying Parameter Approach, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.21, No.4, 2008, Article no. 54002(pp.14).
- ⑮ S. Ochiai, J. K. Shin, Y. Mukai, H. Matsubayashi, H. Okuda, 他 6 名, An Attempt to Estimate the Distribution of Irreversible Bending Strain for Critical Current in the Bi2223 Composite Tape by a Core Shape-incorporated Model, Physica C: Superconductivity and its Applications, 査読有, Vol.468, No.15-29, 2008, 1796-1800.
- ⑯ H. Okuda, J. K. Shin, S. Iwamoto, K. Morishita, Y. Mukai, H. Matsubayashi, S. Ochiai, 他 4 名, Assessment of Strain of Bi2223 Filaments in Bent Ag-sheathed Superconducting Composites by Synchrotron Radiation, Scripta Materialia, 査読有, Vol.58, No.8, 2008, 687-690.
- ⑰ S. Ochiai, T. Matsuoka, J. K. Shin, H. Okuda, 他 3 名, Modeling Analysis of Critical Current of Bent Bi2223 Composite Tape Based on the Damage Strain Parameter and Shape of the Core, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.20, No.10, 2007, 1076-1083.
- ⑱ S. Ochiai, M. Fujimoto, H. Okuda, 他 2 名, Sample-length Dependence of Critical Current of Slightly and Significantly Bent-damaged Bi2223 Superconducting Composite Tape, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.20, No.8, 2007, 800-809.
- ⑲ S. Ochiai, H. Rokkaku, K. Morishita, J. K. Shin, S. Iwamoto, H. Okuda, 他 6 名, Thermally Induced Residual Strain Accumulation in Bi2223/Ag/Ag Alloy Composite Superconductor, Superconductor Science and Technology, 査読有, Vol.20, No.3, 2007, 202-210.
- ⑳ H. Okuda, H. Rokkaku, K. Morishita, J. K. Shin, S. Iwamoto, S. Ochiai, 他 5 名, In-situ Synchrotron-radiation Measurements of Axial Strain in Laminated Bi2223 Superconducting Composite Tapes at Room Temperature, Scripta Materialia, 査読有, Vol.55, No.8, 2006, 691-694. (2006).
- [学会発表] (計 51 件)
- ① 落合庄治郎, 奥田浩司, 放射光による超伝導線材の応力ひずみ効果に関する研究, 日本材料学会第 45 回「X線材料強度に関する討論会: 放射光を用いた材料評価への取り組み、(東京都大田区産業プラザ、2009 年 12 月 5 日)
- ② S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 7 名, Modeling Analysis of Irreversible Bending Strain Distribution and Critical Current Distribution at Low Bending Strains of Bi2223- Composite tape, 22<sup>nd</sup> International Symposium on Superconductivity ISS(2009) (November 2-4, 2009, Tsukuba).
- ③ 落合庄治郎, 奥田浩司, 藤本真裕, 他 3 名, Bi2223 超伝導テープ材の平均不可逆曲げひずみ近傍での臨界電流分布の統計解析およびシミュレーション, 第 53 回日本学術会議材料工学連合講演会(京大会館 2009 年 10 月 20 日).
- ④ 落合庄治郎, 奥田浩司, 藤本真裕, 他 2 名, 曲げ変形された Bi2223 超伝導テープ材の不可逆ひずみ近傍の臨界電流分布, 日本金属学会 2009 年秋期 (第 145 回) 大会 (京都大学, 2009 年 9 月 16 日).
- ⑤ S. Ochiai, H. Okuda, H. Matsubayashi, 他 7 名, Prediction of Critical

Current-Bending Strain Relation of Bi2223 Composite Tape Using Residual Strain of Filaments, Load-Strain Curve and Geometry of Cross-section, 21<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity ISS(2008) (October27-29, 2008, Tsukuba).

- ⑥ 落合 庄治郎、六角 広介、SHIN JaeKyoung、岩本 壮平、奥田 浩司、他 6 名、BSCCO-2223 テープの残留ひずみ集積および臨界電流の耐引張りひずみ特性に及ぼすラミネーション効果、2008 年度春期低温工学・超電導学会、(明星大学、2008 年 5 月 28 日)
- ⑦ 落合庄治郎、六角広介、J. K. Shin、岩本壮平、奥田浩司、他 5 名、ステンレス鋼をラミネートした Bi2223 超伝導複合テープの残留ひずみと臨界電流の耐ひずみ特性、第 52 回日本学術会議材料工学連合講演会、(京大会館、2008 年 10 月 23 日)
- ⑧ J. K. Shin、S. Ochiai、H. Okuda、Y. Mukai、他 5 名、Estimation of Young's Modulus, Residual Strain and Intrinsic Fracture Strain of Bi2223 Filaments in Bi2212/Ag/Ag Alloy Composite Wire, 20<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity ISS(2007) (November 5-7, 2007, Tsukuba).
- ⑨ S. Ochiai、J. K. Shin、Y. Mukai、H. Matsubayashi、H. Okuda、他 6 名、An Attempt to Estimate the Distribution of Irreversible Bending Strain for Critical Current in the Bi2223 Composite Tape by a Core Shape-incorporated Model, 20<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity ISS (2007) (November 5-7, 2007, Tsukuba)
- ⑩ S. Ochiai、J. K. Shin、H. Okuda、M. Sugano、他 5 名、Analysis of Distribution of Critical Current of Bent Bi2223 Composite Tape Based on a Unifying Parameter Approach, 5<sup>th</sup> Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors (MEM' 07), (August 22-24, 2007, Nassau Inn, Princeton, New Jersey, USA).
- ⑪ S. Ochiai、H. Rokkaku、J. K. Shin、H. Okuda、他 5 名、Estimation of Residual- and Fracture- Strains of Bi2223 Filaments and Analysis of Stress-Strain Behavior of Bi2223/Ag/Ag Alloy Superconducting Composite Tape, 4<sup>th</sup> Workshop on Electro-Magnetic Properties of Composite Superconductors (MEM06) (July 2-5, 2006, Durham, England).

① S. Ochiai and H. Okuda, Mechanical behavior and its Relation to Critical Current of Bi2223-Superconducting Composite Tapes, Chapter 1, pp.1-32, in "Superconductivity and Superconducting Wires", edited by D. Matteri and L. Futino, NOVA Science Publishers, New York, USA, (2010)

[その他]  
ホームページ等  
<http://matdesign.iic.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

落合 庄治郎 (OCHIAI SHOJIRO)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：30111925

### (2) 研究分担者

奥田 浩司 (OKUDA HIROSHI)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：50214060

### (3) 連携研究者

無し