

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340098

研究課題名(和文)高温超伝導ルネサンス - 銅酸化物母物質はモット絶縁体か？

研究課題名(英文)Renaissance of high-Tc superconductivity - Undoped cuprates are a Mott insulator?

研究代表者

内藤 方夫(Naito, Michio)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40155643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：過去四半世紀、高温超伝導体をドーピングしたモット絶縁体とみなす描像が支持されてきた。一方、我々は、最近、 $T'-RE_2CuO_4$ がドーピングなしで超伝導化することを発見した。本研究は、 $T'-RE_2CuO_4$ がノンドーピングの超伝導体であることを確立し、上記描像を革新することを目的とした。アルカリ水酸化物溶融塩法により低温合成した $T'-La_{2-x}Sm_xCuO_4$ のバルク試料は100%の超伝導体積分率を示した。バルク超伝導は薄膜試料に対する低速 μ SRからも支持された。物性測定からもノンドーピング $T'-RE_2CuO_4$ と電子ドーピング $T'-(RE,Ce)_2CuO_4$ の変化は連続的であり、基底状態は同じであると結論された。

研究成果の概要(英文)：It has been believed for a long time that high-Tc superconductivity in cuprates develops only upon doping holes or electrons in the parent antiferromagnetic Mott insulators. Recently, however, we discovered that $T'-RE_2CuO_4$ becomes superconducting without doping. The purpose of this research project is to establish superconductivity in the true "undoped" state of $T'-RE_2CuO_4$ and thereby to renovate the previous "doped Mott-insulator" scenario for high-Tc superconductivity. In the course of the research, we achieved, for the first time, superconductivity in bulk samples of undoped $T'-La_{2-x}Sm_xCuO_4$, which was synthesized via a molten alkaline hydroxide route. The bulk nature of superconductivity was also confirmed by low-energy μ SR. Furthermore the systematic comparison of the Hall effect and upper critical fields between undoped $T'-RE_2CuO_4$ and electron-doped $T'-(RE,Ce)_2CuO_4$ revealed no discontinuity with doping, leading to the conclusion that both are in the same ground state.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：高温超伝導 モット絶縁体 MBE、エピタキシャル 銅酸化物 母物質超伝導

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究開発が開始した 2011 年は銅酸化物高温超伝導体が発見されてから四半世紀が経過した時期である。高温超伝導発現機構については決着がついていなかったが、「高温超伝導は母物質反強磁性絶縁体に正孔または電子のいずれかをドーピングすることにより発現する」という考えは多くの研究者のコンセンサスであった。例えば、ペドノルツ・ミュラーにより最初に発見された $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ は、母物質の K_2NiF_4 構造 La_2CuO_4 (八面体六配位構造で略称 T 構造) の La^{3+} を Ba^{2+} で置換した「正孔ドーピング超伝導体」($T_c \sim 30 \text{ K}$) である。逆に、 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ は、母物質の Nd_2CuO_4 構造 La_2CuO_4 (平面四配位構造で略称 T' 構造) の La^{3+} を Ce^{4+} で置換した「電子ドーピング超伝導体」($T_c \sim 30 \text{ K}$) である。正孔・電子ドーピングいずれによっても $T_c \sim 30\text{-}40 \text{ K}$ の超伝導が発現するため、「正孔・電子対称性」が主張され、高温超伝導体を「ドーピングしたモット・ハバード絶縁体」とみなす描像が広く支持されてきた。

(2) 一方、研究代表者らは、2008 年に、 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ ($RE: \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) がドーピングなしで超伝導化することに成功した (Matsumoto *et al.*, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 100508(R))。 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ が真にノンドーピング状態で超伝導となっていることが確立すれば、四半世紀の高温超伝導研究の柱「銅酸化物母物質はモット絶縁体」と捉える描像を見直さざるを得ない。まさに、高温超伝導ルネサンスの幕が切って落とされたのである。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第 1 の目的は、新超伝導体 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ が真にノンドーピングであることを立証することである。現段階では、 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ の超伝導が酸素欠損による電子ドーピング超伝導ではないかという疑念が根強くある。この可能性を否定し、ノンドーピング状態の超伝導を立証することが最優先課題である。

(2) 第 2 の目的は、もう一つの四配位銅酸化物である無限層構造銅酸化物に対して母物質超伝導の可能性を探ることである。

3. 研究の方法

(1) 母物質超伝導 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ がノンドーピングであることを化学的なアプローチにより立証する。母物質 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ の超伝導化のポイントは、クーパー対破壊 (ペアブレイキング) を引き起こす頂点位置の過剰酸素の徹底除去である。しかし、過剰酸素除去の還元プロセスで、 CuO_2 面の正規酸素の欠損が同時進行するため、プロセスの最適化は容易で

はない。これまで、薄膜に対しては c 軸長 (a) を指標に還元を最適化して

複雑な酸素ケミストリーを検証するには、バルク試料に対する精密な酸素不定比測定が必須である。予備的な結果であるが、申請者らは母物質超伝導体 $\text{T}'\text{-(La, Sm)}_2\text{CuO}_4$ のバルク試料の超伝導化に成功している。この物質は ~ 500 以下の低温合成が必要なため、通常の固相反応では作製できず、アルカリ水酸化物溶融塩法 (~ 400 で溶融した CsOH 中に原料を入れ低温で化学反応させる方法) により合成しなくてはならない。還元した試料に対して酸素不定比測定の測定を行い、酸素量と超伝導体積分率の系統的な相関を突き止め、 T' 銅酸化物の「酸素の化学」の全貌を明らかにする。

(2) 母物質超伝導 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ がノンドーピングであることを物理的なアプローチにより立証する。連携研究者 (産総研・大柳、NTT・山本) の協力を得て、光電子分光・X線吸収分光を行う。これらの測定からフェルミ面の大きさやケミカルポテンシャルのシフトを決め、ドーピングの有無を調べる。さらに、国内外との共同研究により酸素の K 吸収端の X 線分光やバルク敏感な光電子分光への展開も図る。一方、ホール係数・ゼーベック係数等の輸送測定からもキャリアの符号・密度を決め、キャリアの起源を明らかにする。

(3) 母物質が超伝導化するのは四配位銅酸化物のみであり、五配位・六配位銅酸化物の母物質 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ や $\text{T-La}_2\text{CuO}_4$) が絶縁体であることは疑うべくもない。 Nd_2CuO_4 構造と並ぶもう一つの四配位構造である無限層構造に対して、母物質の超伝導化を試みる。無限層構造のメリットは、銅酸化物高温超伝導体の中で最も単純な構造であり、 CuO_2 面以外に結晶構造中に酸素を含まないことである。この系での酸素欠損は CuO_2 面の酸素欠損以外になく、 CuO_2 面の酸素欠損は超伝導を破壊することが知られているから、この系で超伝導が発現すれば、 T' 構造で疑われた酸素欠損による電子ドーピング超伝導の可能性を排除することができる。

4. 研究成果

(1) 母物質 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ の超伝導特性の系統的な希土類元素 (RE) 依存性について述べる (発表論文 5、9)。 $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ は $RE = \text{Pr} \sim \text{Tb}$ に対して塗布熱分解法で薄膜合成が可能であるが、その T_c や超伝導化の難易は用いる RE に強く依存する。経験的にイオン半径の大きい RE^{3+} ほど T_c が高く、超伝導発現の合成・還元ウィンドウが広い。 $RE^{3+} = \text{Pr} \cdot \text{Nd} \cdot \text{Sm}$ では $T_{c\text{onset}}$ は 30 K を超え、超伝導転移もシャープである。 $RE^{3+} = \text{Eu}$ では $T_{c\text{onset}}$ はあまり変化しないものの、転移はプロードになり、 $RE^{3+} = \text{Gd}$ では $T_{c\text{onset}}$ は 20 K 以下になる。さらに、 $RE^{3+} = \text{Tb}$ では室温から 50

Kまでは金属的ふるまいを示すものの低温で弱局在をして超伝導化しない。

T'銅酸化物には、頂点位置の過剰酸素とCuO₂面の正規酸素欠損の2つの酸素欠陥がある。還元アニールにより過剰酸素を除去するが、この際にCuO₂面の正規酸素の欠損が同時進行する。不足還元では過剰酸素が残留し、過剰還元ではCuO₂面の酸素が欠損する。この還元の「匙加減」をサイエンスのレベルまで高めないと再現性は得られない。薄膜では酸素定量が難しいために、薄膜の還元状態を推測する目安としてc軸長(c₀)を用いてきた。還元を進める(還元温度を上げる、または、還元時間を長くすると、c₀は単調に減少するが、超伝導特性の変化は単調ではない。その鳥瞰図を図1に示した。各REに対して還元条件を変えて作製したT'-RE₂CuO₄のT_c(上)と室温抵抗率(下)をc₀に対してプロットしたものである。T_cの図ではT_{c_{onset}}・T_{c_{end}}を表す。抵抗率の図では、○はゼロ抵抗を示した試料、△は超伝導転移を示したもののゼロ抵抗にならなかった試料、×+は超伝導転移を示さなかった試料である。各REに対するふるまいはユニバーサルで、以下の3つの領域があることが見てとれる。

A) 不足還元領域

還元前のc₀の長い状態から出発して、還元を行うとc₀が減少する。それとともに室温抵抗率が減少し、超伝導転移が現れ始める。

B) 最適還元領域

還元を進め、c₀がさらに減少すると、T_{c_{onset}}

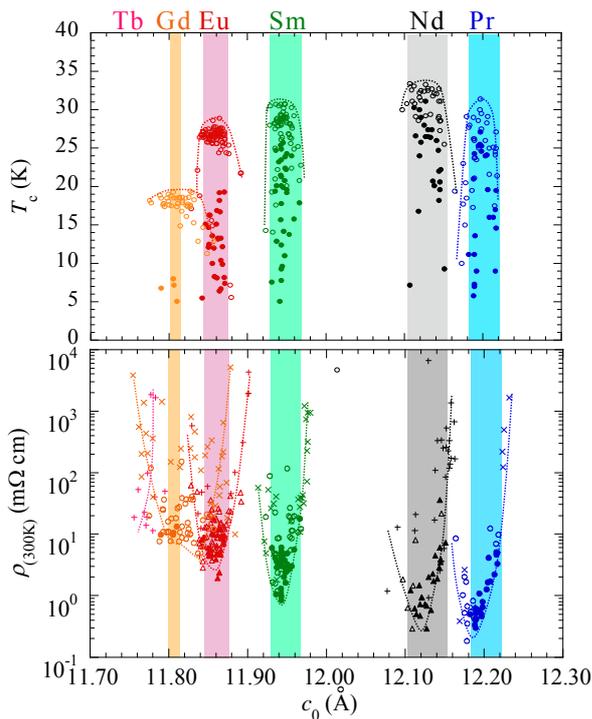


図1 . RE = Pr ~ Tb に対する T'-RE₂CuO₄ の T_c (上) と室温抵抗率 (下) の c₀ 依存性。c₀ は還元を強めるとともに単調に減少する。

が上昇し、ゼロ抵抗が観測される。

C) 過剰還元領域

上記 B) の領域を超えて還元を進めると、c₀ は減少するが、室温抵抗率が増大し始め、超伝導が消失する。

各 RE に対して超伝導性が最適化される c₀ は図1の影が付けられた領域である。酸素の微視的なふるまいの全貌をつかむには今後の体系的な研究を待たなくてはならないが、再現性のある超伝導特性を得る科学的な「道標」として c₀ が有用なパラメータであることを提示した。

(2)次に分子線エピタキシー法(MBE)によるT'-La₂CuO₄の合成とその超伝導化について述べる(論文投稿中)。上記(1)の結果は塗布熱分解法によって作製された薄膜に対して得られたものである。この研究の中で得られた「RE³⁺のイオン半径の大きいほど良好な超伝導特性が得られる」という傾向は、希土類元素の中で最もイオン半径の大きいLaに対してさらに高いT_cを期待させる。しかし、塗布法ではT'-La₂CuO₄の合成が困難である。理由は、合成温度500以上では競合するT相(K₂NiF₄構造)のLa₂CuO₄が安定だからである。T'-La₂CuO₄の合成には、低温合成とエピタキシーによる安定化が必須である。

連携研究者のNTT・物性基礎研(山本秀樹)グループはMBE法を用いて、格子整合基板(PrScO₃)上にT'-La₂CuO₄の合成および超伝導化に成功した。MBE法では、成長温度および基板を変えることにより、同じ化学式La₂CuO₄に対して、八面体六配位のT相、平面四配位のT'相だけでなく、両者の中間のピラミッド五配位のT*相も安定化できる(異性)。T、T*、T'-の3つのLa₂CuO₄の電気伝導特性は、図2に示すように、大きく異なる。T、T*相が絶縁体であるのに対して、T'相は

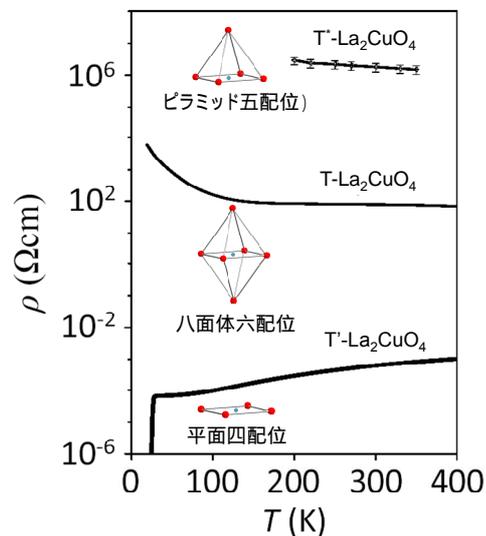


図2 . 3つのLa₂CuO₄の比較。

金属であり、かつ、低温で超伝導化する。現在までに得られている最高の T_c は約 20 K で、 $\text{Pr}_2\text{CuO}_4 \cdot \text{Nd}_2\text{CuO}_4$ の 30 K 超には及ばない。得られた結果は、従来行われてきた異なる結晶構造の銅酸化物への正孔ドーピングと電子ドーピングの電子相図を貼り合わせることは誤りであり、配位ごとにバイポーラドーピングの電子相図を作成しなくてはならないことを明示している。

(3) 母物質超伝導体のバルク合成および超伝導特性について述べる(発表論文 8)。研究の方法の欄でも述べたように、超伝導化に関わる複雑な酸素ケミストリーを解明するにはバルク試料の合成が必須である。これまでのところ、超伝導性を示す $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ は合成できていない。しかし、アルカリ水酸化物溶融塩法により、固溶系の $\text{T}'\text{-La}_{2-x}\text{Sm}_x\text{CuO}_4$ のバルク試料(固溶系であるが La、Sm はともに $3+$ のためノンドープである)に対して、合成雰囲気を変え、かつ、組成 x を振り、系統的な合成を行った。合成されたバルク試料は $x = 0.05 - 1.0$ の範囲で超伝導性を示す。 T_c は $x = 0.05$ での 25 K から $x = 1.0$ での 20 K へと x とともに緩やかに低下するのみであるが、超伝導体積分率は強い x 依存性を示す。図 3 は還元を最適化した試料の超伝導体積分率を x に対してプロットした。 $x = 0.3 - 0.7$ では超伝導体積分率がほぼ 100% であり、バルク超伝導を支持する。一方、 $x > 1.2$ の試料は非超伝導、また、 $x < 0.2$ の La_2CuO_4 に近い側でも体積分率は急速に低下する。前者の領域は頂点酸素の残留により、後者の領域は CuO_2 面の酸素の欠損により超伝導性が損なわれていると推測している。

(4) 母物質超伝導体の薄膜に対する物性測定についてまとめる(発表論文 1、3、5、7)。ノンドープ $\text{T}'\text{-RE}_2\text{CuO}_4$ 、電子ドープ $\text{T}'\text{-(RE,Ce)}_2\text{CuO}_4$ に対して、ホール係数および上部臨界磁場の測定を行い、ドーピングの有無による違いを系統的に調べた。図 4 は、

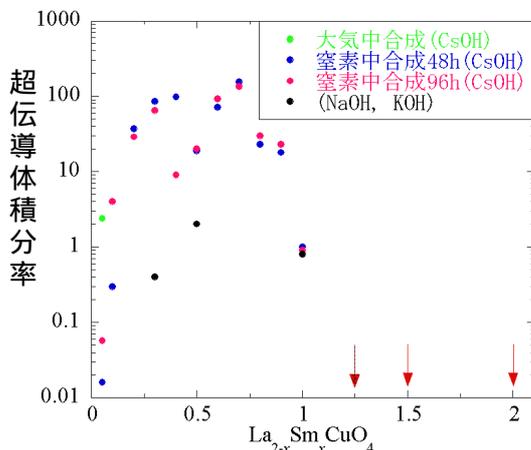


図 3. $\text{T}'\text{-La}_{2-x}\text{Sm}_x\text{CuO}_4$ のバルク試料の超伝導体積分率の x 依存性。

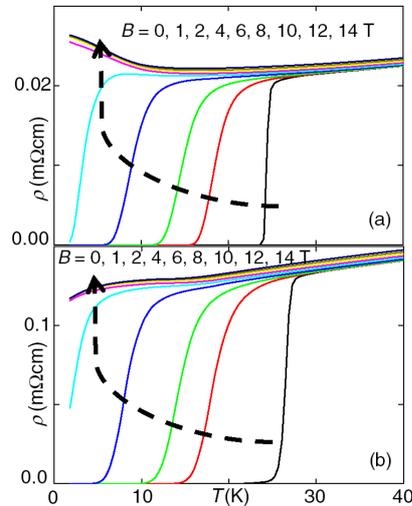


図 4. (a) $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ と (b) Nd_2CuO_4 の上部臨界磁場の比較。 T_c が Nd_2CuO_4 でやや高い以外は本質的な差異はない。

$\text{T}'\text{-Nd}_2\text{CuO}_4$ と $\text{T}'\text{-(Nd,Ce)}_2\text{CuO}_4$ の上部臨界磁場を比較したものであるが、両者に本質的な差異はない。すなわち、ノンドープ $\text{T}'\text{-Nd}_2\text{CuO}_4$ と電子ドープ $\text{T}'\text{-(Nd,Ce)}_2\text{CuO}_4$ の基底状態は同じであることが示唆される。従来、 $\text{T}'\text{-Nd}_2\text{CuO}_4$ がモット絶縁体と考えられてきたのは、過剰酸素が除去されていない不純な試料を用いて物性測定がなされてきたためである。

$\text{T}'\text{-(La,Y)}_2\text{CuO}_4$ 薄膜に対する低速ミュオン分光 (μSR) の実験結果も、 $\text{T}'\text{-(La,Y)}_2\text{CuO}_4$ の超伝導が薄膜内部全体におよぶバルク超伝導であることを示している。但し、表面は吸着した頂点酸素により磁性を帯びるとともに、超伝導性が弱くなっている。

(5) T' 構造と並ぶもう一つの四配位構造である無限層構造を取り上げ、その母物質の超伝導化を試みた。無限層構造銅酸化物は常圧合成できない。無限層構造の安定化には高压合成または薄膜合成が必要である。本研究ではスパッタ法を用いて無限層構造 $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{CuO}_2$ 薄膜を作製した。残念ながら母物質 ($x = 0.00$) の超伝導化は達成できなかった。超伝導化できた最も低ドーピングの薄膜は $x = 0.05$ である。再現性は乏しいが、成膜条件を詰めることにより、 $T_{c\text{onset}} \sim 30$ K の超伝導が観測された。

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 9 件)

K. M. Kojima, Y. Krockenberger, I. Yamauchi, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, R. Kadono, R. Kumai, H. Yamamoto, A. Ikeda, and M. Naito,

“Bulk superconductivity in undoped T'-La_{1.9}Y_{0.1}CuO₄ probed by muon spin rotation”, Physical Review, 査読有, 89, 2014, Art. No. 180508(R),

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.180508.

A. Ikeda, T. Manabe, M. Naito, “Improved conductivity of infinite-layer LaNiO₂ thin films by metal organic decomposition”, Physica C, 査読有, 495, 2013, 134-140,

DOI: 10.1016/j.physc.2013.09.007.

H. Yamamoto, Y. Krockenberger, M. Naito, “Multi-source MBE with high-precision rate control system as a synthesis method sui generis for multi-cation metal oxides”, Journal of Crystal Growth, 査読有, 378, 2013, 184-188,

DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.057.

Y. Krockenberger, H. Irie, O. Matsumoto, K. Yamagami, M. Mitsuhashi, A. Tsukada, M. Naito, H. Yamamoto, “Emerging superconductivity hidden beneath charge-transfer insulators”, Scientific Reports, 査読有, 3, 2013, Art. No. 2235,

DOI: 10.1038/srep02235.

M. Naito, A. Ikeda, T. Manabe, “RE dependence of superconductivity in parent T'-RE₂CuO₄ – implication on the nature of superconductivity”, MRS Proceedings, 査読有, vol. 1434, 2013, DOI: 10.1557/opl.2012.1316.

Y. Krockenberger, H. Yamamoto, A. Tsukada, M. Mitsuhashi, M. Naito, “Unconventional transport and superconducting properties in electron-doped cuprates”, Physical Review, 査読有, 85, 2012, Art. No. 184502,

DOI: 10.1103/PhysRevB.85.184502.

Y. Krockenberger, H. Yamamoto, M. Mitsuhashi, M. Naito, “Universal Superconducting Ground State in Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO₄ and Nd₂CuO₄”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 51, 2012, Art. No. 010106,

DOI: 10.1143/JJAP.51.010106.

S. Asai, S. Ueda, M. Naito, “Superconductivity in bulk T'-(La,Sm)₂CuO₄ prepared via a molten alkaline hydroxide route”, Physica C, 査読有, 471, 2011, 682-685, DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.026.

A. Ikeda, O. Matsumoto, H. Yamamoto, T. Manabe, M. Naito, “RE dependence of superconductivity in parent T'-RE₂CuO₄”, Physica C, 査読有, 471, 2011, 686-689,

DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.027.

[学会発表](計 21 件)

小嶋健児, 平石雅俊, 宮崎正範, 幸田章宏, 門野良典, Andreas Suter, Hubertus Luetkens, Yoshi Krockenberger, 山本秀樹, 池田愛, 内藤方夫, 「T'型 214 銅酸化物薄膜の低エネルギー μ SR 測定」, 日本物理学会第 69 回年次大会(東海大学), 2014.3.27.

池田愛, 真部高明, 内藤方夫, 「各種還元法により合成した無限層構造 LaNiO₂ 薄膜の比較」, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学), 2014.3.18.

A. Ikeda, T. Manabe, M. Naito, “Suppression of metal-insulator transition in PrNiO₃ by epitaxial strain”, International Symposium on Superconductivity (ISS2013). 2013.11.20, Tokyo.

七尾美子, 池田愛, 内藤方夫, 「無限層構造 Sr_{1-x}La_xCuO₂(x 0.05)薄膜の抵抗率異常」, 第 74 回応用物理学会春季学術講演会(同志社大学), 2013.9.17.

池田愛, 真部高明, 内藤方夫, 「無限層構造 LaNiO₂ 作製に向けた高品位ペロブスカイト LaNiO₃ 薄膜の作製」, 第 74 回応用物理学会春季学術講演会(同志社大学), 2013.9.17.

池田愛, 真部高明, 内藤方夫, 「無限層構造 LaNiO₂ 薄膜の金属的ふるまい」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会(神奈川工科大学), 2013.3.27.

小嶋健児, 門野良典, 平石雅俊, 宮崎正範, 幸田章宏, Andreas Suter, Hubertus Luetkens, Yoshiharu Krockenberger, 山本秀樹, 池田愛, 内藤方夫, 「T'型銅酸化物ノンドープ薄膜のバルク超伝導と表面磁性」, 日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学), 2013.3.27.

A. Ikeda, T. Manabe, M. Naito, “Infinite-layer LaNiO₂ Metallic oxide with square-planar coordination”, International Symposium on Superconductivity (ISS2012), 2012.12.05, Tokyo.

クロッケンバーガー賢治, 山本秀樹, 三橋将也, 内藤方夫, 「The signification of doping in square planar coordinated cuprates」, 第 73 回応用物理学会学術講演会(愛媛大学), 2012.9.12.

池田愛, 山本秀樹, 真部高明, 内藤方夫, 「水素還元及び酸素アニールによる T'-Ln₂CuO₄ 薄膜の合成」, 第 73 回応用物理学会学術講演会(愛媛大学), 2012.9.12.

M. Naito, A. Ikeda, H. Yamamoto and T. Manabe, “RE dependence of superconductivity in parent T'-RE₂CuO₄ – implication on the

nature of superconductivity”, 2012 MRS Spring Meeting, San Francisco.
浅井翔太, 上田真也, 内藤方夫, 「T'-La₂CuO₄の低温合成と超伝導化」, 第59回応用物理学会関係連合講演会(早稲田大学), 2012.3.16.

大田広大, 池田愛, 山崎圭介, 内藤方夫, 「スパッタリング法による無限層構造SrCuO₂薄膜の配向制御」, 第59回応用物理学会関係連合講演会(早稲田大学), 2012.3.16.

池田愛, 内藤方夫, 「基板による無限層構造LaNiO₂薄膜の配向制御」, 第59回応用物理学会関係連合講演会(早稲田大学), 2012.3.16.

A. Ikeda, H. Yamamoto, T. Manabe, M. Naito, “Ag-assisted low-temperature synthesis of T'-La₂CuO₄ films by metal organic decomposition”, International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011.10.26, Tokyo.

H. Yamamoto, Y. Krockenberger, M. Mistuhashi, K. Yamagami, M. Naito, “Preparation of superconducting Pr₂CuO₄ and Nd₂CuO₄ by molecular beam epitaxy”, International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011.10.26, Tokyo.

小嶋健児, 平石雅俊, 宮崎正範, 幸田章宏, 門野良典, Andreas Suter, Hubertus Luetkens, Yoshi Krockenberger, 山本秀樹, 池田愛, 内藤方夫, 「T'型ノンドープ薄膜超伝導体の低エネルギーμSR測定」, 日本物理学会 2011年秋季大会(富山大学), 2011.9.22.

池田愛, 山本秀樹, 真部高明, 内藤方夫, 「T'-La₂CuO₄塗布膜のAg添加効果」, 第72回応用物理学会学術講演会(山形大学), 2011.9.1.

山本秀樹, クロッケンバーガー賢治, 三橋将也, 松本理, 内藤方夫, 「MBE薄膜の精密アニールによる母物質超伝導体RE₂CuO₄の合成(5)」, 第72回応用物理学会学術講演会(山形大学), 2011.9.1.

クロッケンバーガー賢治, 山本秀樹, 束田昭雄, 三橋将也, 内藤方夫, 「T'-銅酸化物における普遍的な超伝導性」, 第72回応用物理学会学術講演会(山形大学), 2011.9.1.

- 21 内藤方夫, 「超伝導現象」, 第72回応用物理学会学術講演会(山形大学), 2011.8.30.

〔図書〕(計 3 件)

内藤方夫, 「高温超伝導体(上) - 物質と物理 - 第二版」, 応用物理学会(2014.2), p. 101-126, 137-158.

内藤方夫, 「超伝導現象と高温超伝導体」, エヌ・ディー・エス(2013.3), p.1-43.

H. Sato, A. Tsukada, Y. Krockenberger, H. Yamamoto, M. Naito, “Magnetic mechanism of superconductivity in copper-oxide”, edited by D. Das, Nova Science Publishers, Inc., New York (2011.11), p.235-397.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~naitolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 方夫 (NAITO, Michio)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 4 0 1 5 5 6 4 3

(2) 研究分担者

上田 真也 (UEDA, Shinya)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 6 0 4 4 2 7 2 9

(3) 連携研究者

大柳 宏之 (OYANAGI, Hiroyuki)

産業技術総合研究所・光技術研究部門・主幹研究員

研究者番号: 0 0 3 4 4 4 3 2

山本 秀樹 (YAMAMOTO, Hideki)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主幹研究員

研究者番号: 7 0 3 9 3 7 3 3