

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01844

研究課題名(和文) SrTiO₃における(強誘電)量子臨界点近傍の超伝導/強誘電相の探索研究課題名(英文) Superconductivity of SrTiO₃ near a non-magnetic quantum critical point

研究代表者

富岡 泰秀 (Tomioka, Yasuhide)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員

研究者番号：60357572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：チタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) の Sr(Ti) の一部を Ca/Ba(Nb) で置換し、強誘電体に電子ドーピングを施した (Sr,AE)(Ti,Nb)O₃ (AE = Ca and Ba) 単結晶を浮遊帯域溶融法により作製し、強誘電と超伝導の相互関係を探索した。キャリア濃度 n の増加とともに、強誘電キュリー温度 $T_C(\text{FE})$ は低下し、あるキャリア濃度 n^* 以上になると、強誘電が消失する。超伝導転移温度 T_c は、AE=Ba の場合、従来、 $T_c \sim 0.3$ K とされていたが、 n^* 近傍において、SrTiO₃系物質群の中で最高値となる 0.75 K に達することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SrTiO₃系の超伝導転移温度 T_c は、従来約 0.3 K であったが、元素置換によって強誘電を生成させると、 T_c が大きく上昇し、0.75 K に達することを見出した。これまで、微量な酸素欠損の導入による電子ドーピング等、乱れの導入を最小限に抑える手法が重要視されてきたが、本研究では、対照的に、Sr/Ti それぞれのサイトに元素置換を施す方法を採用して、強誘電キュリー温度/キャリア濃度それぞれを制御し、強誘電/超伝導の相互関係を系統的に探索した。本研究により、本系の超伝導は、強誘電の導入によって増強されることが明らかとなり、本系の超伝導のメカニズム解明に大きな貢献をもたらすと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Different-type of ferroelectrics, Sr_{1-y}Ca_yTiO₃ [$T_C(\text{FE}) = 25$ K] and Sr_{1-y}Ba_yTiO₃ [$T_C(\text{FE}) = 50$ K], show superconductivity by the systematic substitution of Nb⁵⁺ for Ti⁴⁺ for the electron doping. The two polar metals commonly exhibit a simple superconducting dome with a single convex on top, like Sr_{1-x}La_xTiO₃ and SrTi_{1-x}Nb_xO₃. The superconducting transition temperature T_c is enhanced in both polar metals compared with non-polar SrTi_{1-x}Nb_xO₃. Moreover, the maximum T_c reaches 0.75 K, the highest in the families of SrTiO₃ ever reported. Interestingly, the T_c enhancement is low in the vicinity of the ferroelectric quantum critical point but becomes much more prominent by further going into the polar region. The results suggest that the dominance of the inversion symmetry breaking may enhance the superconductivity rather than the actively discussed quantum fluctuation around the ferroelectric quantum critical point.

研究分野：固体物理

キーワード：超伝導 強誘電体 量子臨界点 チタン酸ストロンチウム 酸素同位体置換

1. 研究開始当初の背景

チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) は、非常に大きな誘電率 (量子常誘電) を有し、36%以上の酸素同位体置換 [$\text{SrTi}^{(16}\text{O}_{1-z}{}^{18}\text{O}_z)_3$, $z \geq 0.36$] を施すと強誘電体に変化する [1]。 z (置換量) - T (温度) 平面上において、 $(z_c, 0)$ ($z_c = 0.36$) は、強誘電キュリー温度が零 ($T_c^{\text{FE}} = 0$) となる (強誘電)量子臨界点 (Quantum Critical Point; QCP) である。 SrTiO_3 は、また、微量な酸素欠損の導入等による希薄な電子ドーピングによって金属となり、極低温では、超伝導 (臨界温度 $T_c \sim 300$ mK) を示す。 SrTiO_3 の超伝導は、キャリア濃度が低い領域で現れることに特徴があり、強誘電 QCP 近傍で増大する強誘電性量子揺らぎなどが、超伝導の発現に重要な役割を果たしているのではないかと考えられる。しかし、強誘電 QCP と超伝導の相互関係に関しては、これまでほとんど探索されてきていない。

2. 研究の目的

SrTiO_3 においては、酸素同位体置換以外に、Sr の一部を Ca, Ba 等で置換 [$\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{TiO}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}, \text{Ba}, \dots$)] しても、強誘電が現れ、また、Ti の一部を Nb で置換すると電子ドーピングを行うことができる。本研究では、このような元素置換によって、強誘電の生成と電子ドーピングを行い、強誘電/超伝導相境界 (強誘電 QCP) 近傍における電子相及び相転移を探索する。精密な組成制御と浮遊熔融 (Floating Zone; FZ) 法による大型良質単結晶育成を基軸として、希薄な電子ドーピング領域で現れる超伝導と強誘電の相互関係の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ における超伝導転移温度 (T_c) のキャリア濃度 (n) 依存性の確立

これまで、 SrTiO_3 への電子ドーピングは、主として、酸素欠損 (δ) の導入 ($\text{SrTiO}_{3-\delta}$)、または、Nbによる置換 ($\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$) によって行われ、広範囲にキャリア濃度を変化させたい場合には、前者が用いられ、後者において、Nb置換量を系統的に変化させながら超伝導を調べた例はない。これまでの研究では、ほぼ全ての場合、元素置換には不向きなベルヌーイ法で単結晶が作製されているという背景もある。そこで、本研究では、FZ法により、一連の $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 単結晶を作製し、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機を用いて、極低温における輸送現象の評価を行い、 $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ における T_c vs. n 曲線を確立する。

(2) $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}, \text{Ba}$) における強誘電QCP近傍の電子相の共存/競合の探索

$\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{TiO}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$) では、1%に満たない僅かなCa置換で強誘電相が誘起され、その強誘電キュリー温度は、 $T_c^{\text{FE}}(y) = A(y - y_c)^{1/2}$ ($A = 295$ K, $y_c = 0.0018$) のように変化し [2]、 $y - T$ 平面上、 $(y_c, 0)$ が強誘電QCPとなっている。 $\text{AE} = \text{Ba}$ の場合も同様である [3]。この強誘電QCP近傍では、強誘電性量子揺らぎが著しく増大していると考えられ、この特異な絶縁体状態に、電子ドーピングを施して金属化した場合、強い量子揺らぎに影響された金属状態が形成されると考えられる。本研究では、まず、FZ法により、 $\text{Sr}_{1-y}\text{Ba}_y\text{TiO}_3$ ($0 \leq y \leq 0.1$) 単結晶を作製し、誘電率の温度依存性測定を通じて、量子常誘電から強誘電への変化を調べて、Ba置換の場合の強誘電QCPを同定する。さらに $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{TiO}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}, \text{Ba}$) において、Tiの一部をNbで置換して電子ドーピングを施し、強誘電/超伝導の共存/競合を探索し、超伝導に与える強誘電の影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 単結晶のホール移動度

図1は、Nb置換によって電子ドーピングを施した $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($x = 0.0002 - 0.05$) 結晶の抵抗率 (ρ) の温度依存性 (a)、および、5Kにおけるホール移動度 [$\mu = (ne\rho)^{-1}$] (b) を示す。図1(a)において、残留抵抗率値は、 $x = 0.0002$ の場合を除き、全て、 $100 \mu\Omega\text{cm}$ 以下で、図1(b)に示されるように、移動度は、低キャリア濃度領域 ($n < 10^{19} \text{cm}^{-3}$) において、 $10,000 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を超え、キャリア濃度の増大と共に低下し、 $n \sim 10^{21} \text{cm}^{-3}$ において、 $100 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度になる。図1(b)には、比較のため、これまで報告されているベルヌーイ法で作製された $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ および $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 単結晶 [4-7] の移動度も

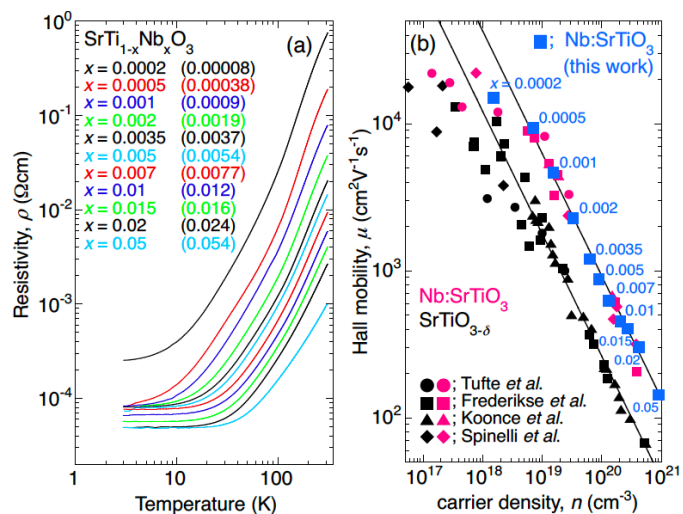


図1. (a) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($x = 0.0002 - 0.05$) 結晶の抵抗率 (ρ) の温度依存性, (b) 5Kにおけるホール移動度 (青色四角)

示されているが、本研究による結果とほぼ一致していることがわかる。また、図中黒色のデータ点は、酸素欠損の導入によって金属化した結晶 ($\text{SrTiO}_{3-\delta}$) の移動度を示すが、この図から、 $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ の移動度は、 $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ の移動度の数倍程度大きいことがわかる。さらに図中の直線は、 $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ 、 $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ についての移動度の計算結果を示す [8]。Nb 置換による電子ドーピングは、酸素欠損の導入よりも乱れの少ない方法であると言える。また、図 1 (a) における括弧内の数値は、ホール効果から得られた Ti 1 サイトあたりの電子数を示し、nominal の値とほぼ一致する。図 1 は、FZ 法を用いれば、高品質かつ、電子ドーピング量を自在に変化させた結晶の育成が可能であることを示している。

(2) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 単結晶の常伝導-超伝導転移と T_c vs. n 曲線

図 2(a) は、図 1 に示されている結晶の 1 K 以下における抵抗率の温度依存性を示す。図 2(a) 上段において、 $x = 0.0005$ では、0.2 K 以下で抵抗率の減少を示すものの零抵抗には至っていないが、 x を増加させると、明確な常伝導-超伝導転移が認められ、 $x = 0.005$ では、 T_c (mid point) ~ 0.5 K となる。さらに x を増加させると、図 2(a) 下段に示されるように、 T_c は低下し、 $x = 0.05$ になると、超伝導転移を示さなくなる。図 2(b) は、この $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 結晶の T_c を n に対してプロットした、 T_c vs. n 曲線を示す (青四角)。典型的な超伝導ドームが形成され、 $n \sim 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の辺りで、最高値 $T_c \sim 0.52$ K を示していることがわかる。図 2(b) には、比較のため、これまでに報告されている $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ (黒四角 [6] 黒丸 [9])、 $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (青丸 [10]) の T_c 、および、研究代表者らによる $\text{La}:\text{SrTi}(\text{O}_{1-z}\text{O}_z)_{2/3}$ の T_c (赤三角、赤四角、赤丸) [11,12] も示されている。本研究で得られた $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ の T_c は、酸素同位体置換を施した $\text{La}:\text{SrTi}(\text{O}_{1-z}\text{O}_z)_{2/3}$ の $T_c \sim 0.55$ K には及ばないものの、他の研究グループから報告されている値よりも高くなっていることがわかる。いずれにしろ、本研究によって、初めて、Nb 置換によって電子ドーピングされた $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ の T_c vs. n 曲線が確立された。

(3) $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) and Ba ($y = 0.05$)) における極性金属相 (Polar Metal)

まず、図 3(b) および 3(d) の挿入図は、 $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{TiO}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (b) および $\text{AE} = \text{Ba}$ ($y = 0.05$) (d) の誘電率の温度依存性を示す。それぞれの挿入図において、24, 50 K 付近に誘電率のピークが認められ、それぞれの結晶は、 $T_c^{\text{FE}} = 24, 50$ K の強誘電体になっていることがわかる。図 3(a) および 3(c) は、これらの強誘電体に対し、さらに、 Ti^{4+} を Nb^{5+} で置換し電子ドーピングを行った、 $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (a) および $\text{AE} = \text{Ba}$ ($y = 0.05$) (c) の抵抗率の温度依存性を示す。図 3(a) において、 $x = 0.0005, 0.001$ の抵抗率の 20 K 付近、また、図 3(c) では、 $x = 0.00025 - 0.005$ の抵抗率の 50 K 付近に、それぞれ異常が認められる。図 3(b) および 3(d) は、この異常を示す温度を T_K (赤丸、青丸) として、それぞれの場合について、 T_c^{FE} (赤四角、青四角) と共に、 n - T 平面上にプロットしたものである。(金属中では、伝導電子によって分極がスクリーニングされるので、強誘電転移に伴う分極を観測することはできないが、Ti イオンの変位等により、抵抗率に異常が現れると考えられます。本報告書では、この抵抗率の異常をもって強

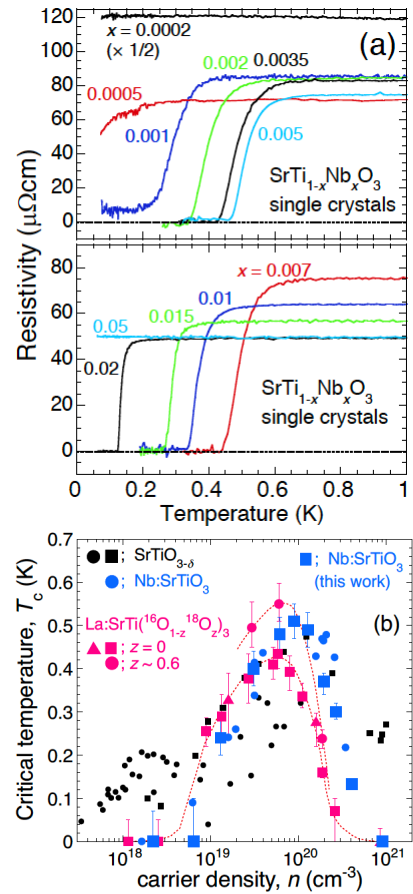


図 2. (a) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [$0.0002 \leq x \leq 0.005$ (上段), $0.007 \leq x \leq 0.05$ (下段)] の 1 K 以下における抵抗率。 (b) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ の T_c vs. n 曲線 (青四角)

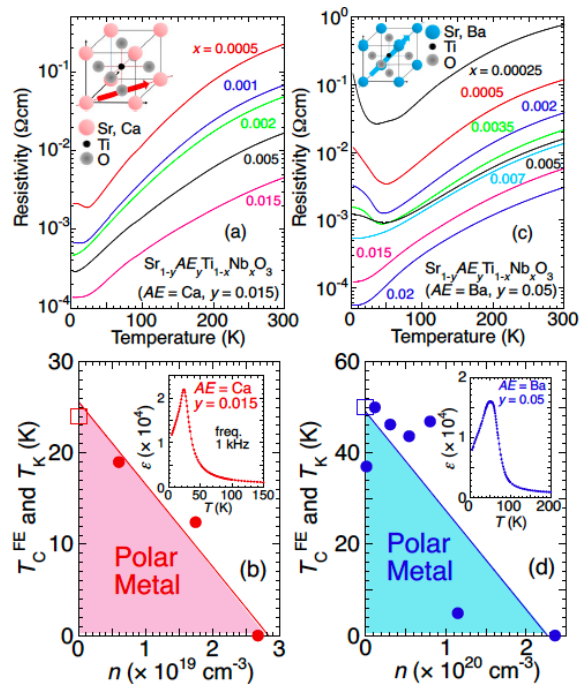


図 3. $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (a) and Ba ($y = 0.05$) (c) の抵抗率の温度依存性、 T_c^{FE} and T_K vs. n プロット [(b) and (d)]. 挿入図は、 $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{TiO}_3$ ($\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (b) and Ba ($y = 0.05$) (d) の誘電率の温度依存性。

誘電転移と呼称します。) 図 3(b)および 3(d)に示されているように、キャリア濃度の増加とともに、 T_K が低下し、ある臨界的なキャリア濃度 n^* 以上で、 $T_K=0$ 、すなわち強誘電転移を示さなくなる。逆にいうと、図中赤色および青色の領域では、極性金属 (Polar Metal) が生成されている。

(4) Polar Metal 生成と T_c のエンハンス

① $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$)

図 4(a)は、図 3(a)に示されている結晶の 1 K 以下における抵抗率の温度依存性を示す。図 2(a)上段において、Ca 置換を施していない $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($x=0.0005$) は、零抵抗に至っていないが、図 4(a)における、 $x = 0.0005$ の抵抗率は、 $T_c \sim 0.15$ K を示している。その他の組成についても、図 2(a)と図 4(a)を比較すると、 $x = 0.001, 0.002$ and 0.005 の T_c も上昇していることがわかる。

② $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ba}$ ($y = 0.05$)

図 4(b)は、図 3(c)に示されている結晶の 1 K 以下における抵抗率の温度依存性を示す。図 4(b)に示されているように、 $x = 0.00025$ という低いキャリア濃度でも抵抗率の減少が認められ、 $x = 0.005, 0.007$ になると、 $T_c = 0.75$ K にまで達していることがわかる。これは、 SrTiO_3 系における超伝導の最高値である。

③ $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$, $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) and Ba ($y = 0.05$) の T_c vs. n 曲線

図 4(c)は、本研究によって得られた、 $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (red), $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (light blue) and Ba ($y = 0.05$) (blue) 各結晶の T_c vs. n 曲線を示す。図 4(c)には、また、 $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$), Ba ($y = 0.05$) それぞれについての強誘電相 (Polar Metal) も示されている。図 4(c)において、Ca 置換を施した場合、 $n < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度領域において、Ba 置換を施した場合、 $n < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のほか、Polar Metal が消失する $n \sim 1 - 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の辺りで、 T_c のエンハンスメントが著しいことがわかる。本研究によって、驚くべきことであるが、“強誘電相 (Polar Metal) を生成させることによって超伝導転移温度が上昇する”、ことが実証された。今後、メカニズムの解明が待たれるところである。

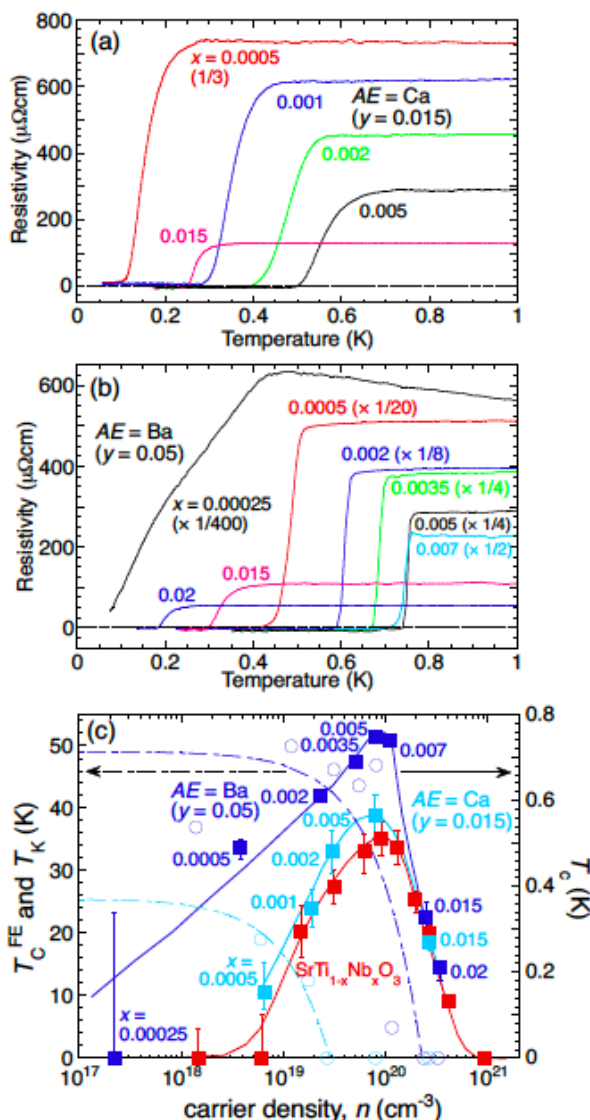


図 4. $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (a), Ba ($y = 0.05$) (b) 各結晶の 1 K 以下における抵抗率の温度依存性。(c) $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (red), $\text{Sr}_{1-y}\text{AE}_y\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$) (light blue), Ba ($y = 0.05$) (blue) 各結晶の T_c vs. n 曲線。 $\text{AE} = \text{Ca}$ ($y = 0.015$), Ba ($y = 0.05$) については、 T_K vs. n も示す。

以上に示す本研究で得られた結果を、*Nat. Phys.*, *Nat. Commun.* を経たのち、現在 (2022 年 6 月)、*npj Quantum Materials* に投稿中である。
preprint は、<https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.16208>

参考文献

- [1] M. Itoh and R. Wang, “Quantum ferroelectricity in SrTiO_3 induced by oxygen isotope exchange”, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 221-223 (2000).
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller, “ $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$: An XY Quantum Ferroelectric with Transition to Randomness”, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 2289-2292 (1984).
- [3] S. Miura, M. Marutake, H. Unoki, H. Uwe, and T. Sakudo, “Composition Dependence of the Phase Transition Temperatures in the Mixed Crystal Systems near SrTiO_3 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **38**, 1056-1060 (1975).
- [4] O. N. Tuffe and P. W. Chapman, “Electron Mobility in Semiconducting Strontium Titanate”, *Phys. Rev.* **155**, 796 (1967).
- [5] H. P. R. Frederikse and W. R. Hosler, “Hall Mobility in SrTiO_3 ”, *Phys. Rev.* **161**, 822 (1967).

- [6] C. S. Koonce, M. L. Cohen, J. F. Schooley, W. R. Hosler, and E. R. Pfeiffer, “Superconducting Transition Temperatures of Semiconducting SrTiO_3 ”, *Phys. Rev.* **163**, 380-390 (1967).
- [7] A. Spinelli, M. A. Torija, C. Liu, C. Jan and C. Leighton, “Electronic transport in doped SrTiO_3 : Conduction mechanisms and potential applications”, *Phys. Rev. B* **81**, 155110 (2010).
- [8] K. Behnia, “On mobility of electrons in a shallow Fermi sea over a rough seafloor”, *J. Phys. Condens. Matter* **27**, 375501 (2015).
- [9] C. W. Rischau, X. Lin, C. P. Grams, D. Finck, S. Harms, J. Engelmayer, T. Lorentz, Y. Gallais, B. Fauque, J. Hemberger, and K. Behnia, “A ferroelectric quantum phase transition inside the superconducting dome of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_{3-\delta}$ ”, *Nat. Phys.* **13**, 643-648 (2017).
- [10] C. Collignon, X. Lin, C. W. Rischau, B. Fauque, and K. Behnia, “Metallicity and Superconductivity in Doped Strontium Titanate”, *Ann. Rev. Cond. Mat. Phys.* **10**, 13 (2018).
- [11] H. Suzuki, H. Bando, Y. Ootsuka, I. H. Inoue, T. Yamamoto, K. Takahashi, and Y. Nishihara, “Superconductivity in Single-Crystalline $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **65**, 1529-1532 (1996).
- [12] Y. Tomioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue, “Enhanced superconductivity close to a non-magnetic quantum critical point in electron-doped strontium titanate”, *Nat. Commun.* **10**, 738 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Matsuura, H. Oike, V. Koscis, T. Sato, Y. Tomioka, Y. Kaneko, M. Nakamura, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Y. Tokura, and F. Kagawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Kinetic pathway facilitated by phase competition to metastable electronic phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 L041106-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L041106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Tomioka, T. Ito, E. Maruyama, S. Kimura, and I. Shindo	4. 巻 90
2. 論文標題 Magnetic and electronic properties of single crystals of perovskite nickelate oxide LaNiO ₃ prepared by the laser diode floating zone method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 034704-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.034704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Tomioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue	4. 巻 30
2. 論文標題 Superconductivity near a Ferroelectric Quantum Critical Point in La-doped SrTiO ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011036-1 -10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Nii, Y. Hirokane, S. Nakamura, S. Kimura, Y. Tomioka, T. Nojima, and Y. Onose	4. 巻 105
2. 論文標題 Elastic study of electric quadrupolar correlation in the paramagnetic state of a frustrated quantum magnet Tb ₂ dTi ₂ -dO ₇	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 094414-1 -9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.094414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Tomioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue
2. 発表標題 Superconductivity near a Ferroelectric Quantum Critical Point in La-doped SrTiO ₃
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (Okayama Convention Center, Okayama, Japan, Sep. 23-28, 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	白川 直樹 (Shirakawa Naoki)		
研究協力者	井上 公 (Inoue Isao)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------