

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03686

研究課題名（和文）金属絶縁体転移周辺の異常な物理現象の理解とニューロモルフィック素子開発の協奏

研究課題名（英文）Concerted research in physics of anomalous phenomena around metal-insulator transition and development of neuromorphic devices

研究代表者

井上 公（INOUE, ISAO）

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：00356502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,700,000円

研究成果の概要（和文）：SrTiO<sub>3</sub> FETのleaky-integrate (LI) 特性を利用しLIFニューロン回路の作製に成功。動作パラメータを抽出しFPGAで仮想的リザーバーを構築。長い時定数をもつ時系列信号(三角形の筆跡)の異常検知に成功しSrTiO<sub>3</sub>が脳型計算に貢献できることを実証。そのSrTiO<sub>3</sub>を強誘電体にしてから金属化すると、超伝導転移温度が大きく増大した。強誘電QCPとSrTiO<sub>3</sub>の超伝導の関係に再考を促す結果も得た。この研究はなぜSrTiO<sub>3</sub>でLIできるのかという問題の解明にも繋がりがつつある。空間反転対称性の破れた超伝導と非線形回路の研究との接点で新しい電子素子の研究が生まれる期待も高まっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は基礎と応用の研究者が、両者の最前線の課題と一緒に挑戦しようという、学術的意義の高い試みである。一方は、SrTiO<sub>3</sub>の強誘電と超伝導がどのようにつながっているのかを探る基礎研究であり、他方は、SrTiO<sub>3</sub> FETによる神経模倣素子の開発を進める応用研究である。しかし、両者が表裏一体をなしていることが実感できる研究成果が得られた。今後SrTiO<sub>3</sub>の大きな誘電率に根差す物理現象のさらなる探索と解明が進むにつれて長い時定数を持つSrTiO<sub>3</sub> FETの可能性が広がっていくのは間違いない。リザーバーのような非線形回路の研究が、空間反転対称性の破れた超伝導の使い方を示しつつあり、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：A LIF neuron circuit was successfully fabricated using the Leaky-Integrate (LI) property of SrTiO<sub>3</sub> FETs. The operating parameters of the SrTiO<sub>3</sub> LIF neuron circuit were extracted experimentally, and a virtual reservoir was constructed in FPGA using the parameters. The successful detection of anomalies in time-series input signals with long time constants (triangular brushstrokes) demonstrates that SrTiO<sub>3</sub> can contribute to brain-type computation. Conversion of SrTiO<sub>3</sub> to ferroelectrics and further metallisation significantly increased the superconducting transition temperature. The results also prompted a reconsideration of the relationship between ferroelectric QCP and superconductivity in SrTiO<sub>3</sub>. This study is leading to a clarification of why LI is possible in SrTiO<sub>3</sub>. Expectations are high for new electronic devices to emerge at the intersection between the study of space-reversal symmetry-breaking superconductivity and non-linear circuits.

研究分野：物性物理学

キーワード：ニューロモルフィック 強誘電金属 強誘電体 強誘電量子臨界点 超伝導 リーク付き積分 ニューラルネットワーク 電界効果トランジスタ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現代のエレクトロニクスの屋台骨である電子素子は、電界効果トランジスタ (FET) です。これは、シリコン半導体で作られた「チャンネル」を流れる電流を、ゲートに印加する電界 (電場、電圧) で制御することによって動作します。電流の元であるキャリアは、シリコン半導体中に人為的に導入された不純物 (ドーパント) から供給されます。ゆえに、チャンネルにドーパントが存在しなくなるほど素子の微細化が進むと、FET は動作しなくなります。これが半導体エレクトロニクスの深刻な問題「微細化の壁」です。一方、電子どうしに働くクーロン相互作用よりも電子の運動エネルギーが小さい物質 (電子相関が大きい物質=強相関物質と言います) の中には、電圧で電子相関を制御すると、金属絶縁体転移 (モット転移) を起こすものがあります。これを用いて、ゲート電圧でチャンネルを金属にしたり絶縁体にしたりできる FET を作れば、関与するチャンネル内の電子密度が 10 桁近くも大きくなる上に、そもそもモット転移にはドーパントが必要ないので、「微細化の壁」を克服できると考えられます。さらに面白いことに、モット転移は電子相転移なので、レーザー光を照射して局所的にモット転移を引き起こすと、フェムト秒オーダーの非常に高速な相転移を示します。したがって、非常に高速なスイッチングをする電子素子が作れるはずだという期待もなされています。

(2) そこで私は、平成 27~29 年度科研費基盤研究 (A) において、モット転移を利用した FET のプロトタイプ作製を目指した研究を行いました。ところが、モット転移を起こす物質で実際に FET を作製し、電場印加によって相転移を引き起こしたところ、純粋な電子相転移のみを起こすのは困難でした。 全ての場合で、モット転移は構造相転移を伴った緩やかなものになったのです。シリコン半導体 FET のように、同じ値のゲート電圧に対していつも同じ値のチャンネル電流が流れるというわけではありません。ヒステリシスを伴う、出来の悪い電子素子にしかならないという問題が残りました。

(3) そのころから私は、五億年も前に生物が創り出した「脳」が、動作が遅くて信頼性も低い「モット FET」と似たような素子を使っているのに、スパコンにも負けないハードウェアになっているということに強く興味を持ち始めました。そこで使われている出来の悪い素子とは、ニューロンという神経細胞と、それを接続するシナプスです。前者は「積分回路 + パルス発生器」、後者は「メモリ素子」のような働きをしますが、現在の半導体素子に比べると動作は著しく緩慢で、しばしば (半導体素子では致命的な) 履歴現象を伴う厄介な素子です。

(4) さらに同じころ、スパコン上で動作する「アルファ碁」が、囲碁の世界チャンピオンに勝利するという事件が起きました。世間では「人工知能の勝利」とニュースになりましたが、たかだか 20W のカロリー消費で 10Hz という超低速パルス信号で動く人間の脳が、200kW の大電力で 40GHz もの超高速クロックで動くスパコンと競い合えたということの方が私には驚きでした。スパコン上で動いていたのは「深層学習 (ディープラーニング)」というアルゴリズムで、最近では人工知能 (Artificial Intelligence: AI) と呼ばれることも多くなっています。しかし、深層学習は収集した膨大なデータから最適解を選択するための手法です。脳とは全く異なるハードウェアのスパコン上で、勾配法のような巨大な計算を行うため電力消費が膨大になりますが、本物の脳細胞はデジタル演算を行っているわけではありません。深層学習は、脳の持つ知能とは異なる技術だと考えた方が良いでしょう。

(5) 現代のエレクトロニクスを使って脳を模倣しようという試みはニューロモルフィックと呼ばれ、昔から盛んに研究されています。シナプスやニューロンの機能を、シリコン半導体素子の複雑な組み合わせで模倣しようという研究です。しかし、そのような素子でどのようなアーキテクチャを構築し、どのようなアルゴリズムを実装するのか (そもそも脳にはアルゴリズムはないのですが)、実はいまだにほとんど何もわかっていません。従来型 (ノイマン型) コンピュータで流行の深層学習を動作させることが前提の素子開発研究もニューロモルフィックと呼ばれたりしますが、これは、たとえ大量に電力を消費しても一秒間に何億回も正確にオンオフできる素子の研究なので、脳を模倣する研究とは言い難く、「遅くて信頼性も低い」我々の素子には活躍の場などありません。

(6) 我々が作ってきた「ヒステリシスを伴う、出来の悪い」酸化物の電子素子は、むしろ生体の神経素子に似ています。したがって脳型アルゴリズムを実装する脳型アーキテクチャへの応用を前提にした基礎研究に取り組むべきだと私は考えました。以上が研究開始当初の背景であり、そこに芽生えた本研究のアイデアです。

## 2. 研究の目的

(1) 研究代表者の井上は、平成 24~26 年度の科研費基盤研究 (A) において、FET のゲート絶縁膜と酸化物チャンネルとの間にジクロロジパラキシリレン (パリレン C、以下単にパリレン) の層を挟む方法を提案しました。その結果、ゲート電圧の印加によって引き起こされる酸化物チャンネル表面での元素欠損の生成が抑制されることがわかりました。 この方法をモット絶縁体に適用し「モット FET」

の開発に挑戦しましたが、元素欠損を抑えても上記のように出来の悪い素子しか作れないという壁は消えませんでした。しかし、強相関物質ではないものの、遷移金属酸化物としては古くから最も有名な研究対象でもある SrTiO<sub>3</sub> の上にこの二層絶縁膜 FET を作製すると、高易動度の電子が高濃度に誘起され、2次元絶縁体金属転移と超伝導が出現することを発見しました。さらに両者は SrTiO<sub>3</sub> が有している大きな誘電率(低温で比誘電率が 42,000 にもなるのに強誘電転移しないので、量子常誘電と呼ばれる)に関連していることがわかりました。

(2) 驚いたことに、この SrTiO<sub>3</sub> FET は、生体のニューロンやシナプスに似た特性を示すこともわかりました。ニューロンの活動は、**図 1 (a)** に示す Leaky-Integrate and Fire (LIF) と呼ばれるモデルで記述されます。これが SrTiO<sub>3</sub> FET ニューロンで模倣できるのです。生体のニューロンの膜電位の変化と違って、SrTiO<sub>3</sub> FET ニューロンの膜電位(ここではチャネル電流)の時定数はあらわではないのですが、**図 1 (b)** に示すように入力電圧パルスの時定数を変化させると、まるで Leaky Integrate 現象と同じことが起きます。ここで注目すべきことは、脳が対象にしている生体现象というのは、脈拍、呼吸、体温変化、重心移動、瞬きの間隔、インシュリンの分泌など、非常に長い時定数(現象の起こる頻度や発生する時系列データの周期)を持つものばかりです。遅い現象の扱いは一見簡単そうですが、電子素子で行う場合は電荷を蓄えておくための大きなコンデンサが必要になり、実はとても難しい問題です。コンデンサを使わず、遅い入力データをメモリに蓄えて(バッチ処理)、時間圧縮した加工データに対して、半導体回路が得意とする高速処理を行う方法も考えられます。しかし、このバッチ処理を行うたびに、回路の内部状態のメモリーへの書き込みと読み出しが必要になり、膨大なエネルギーを消費します。フォンノイマンボトルネックという問題です。したがって、脳のようなやり方を模倣するには、長い時定数のデータに対しては遅い動作で対応するのが、最も効率の良い方法になります。これを我々は スローエレクトロニクスと呼んでいます。しかし、技術的な困難から、そこに挑戦する研究はこれまでほとんどありませんでした。

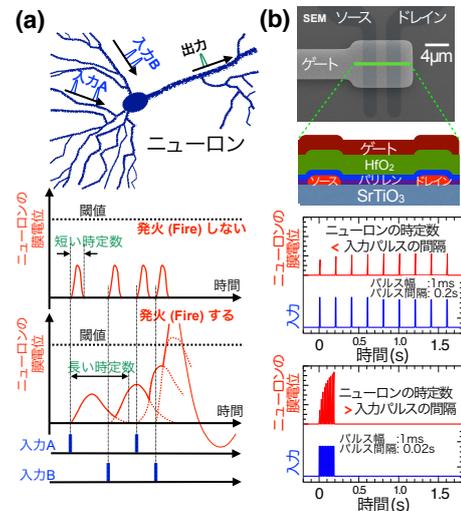


図 1. (a)、生体のニューロンの Leaky Integrate and Fire (LIF) モデル。入力パルスで上昇した膜電位はリークのために下降しますが、このリークの時定数が短いと、中段の図のように膜電位の上昇が積算されず、閾値に達しないので発火(次のニューロンにパルス信号を送ること)が起きません。下段の図のようにリークの時定数が長いと、積算が起これ、発火が起きます。(b)、我々の作製した SrTiO<sub>3</sub> FET のゲートに電圧パルスを入力すると、膜電位に相当するチャネル電流が増大します。生体ニューロンのように膜電位が徐々に減少するわけではありませんが、入力電圧パルスの間隔が長いと、中段の図のように積算が起きず、入力電圧パルスの間隔が短くと下段のようにチャネル電流の積算が起きます。メカニズムが異なるものの Leaky Integration 動作をしていると言えます。

(3) SrTiO<sub>3</sub> の強誘電と超伝導の関係を探る研究と、SrTiO<sub>3</sub> FET による神経模倣素子の開発を進める研究は、全く異なった研究に思えます。しかし私は、これらは実は表裏一体をなしている研究であると考えました。このスローエレクトロニクスの実現の鍵を握っているのは、SrTiO<sub>3</sub> の大きな誘電率ですが、関連する物理現象のさらなる探索は、SrTiO<sub>3</sub> FET の可能性を広げます。そこで**本研究の目的**に掲げたのは、**基礎と応用の研究者が強いコラボレーションを築きながら両者の最前線の課題に挑戦すること**です。思いもよらない新しい発想を創発できるとの確信がありましたが、実際にそのコラボは、私の最初の想定を遥かに超える大きな展開をみせ、大成功をもたらしました。

### 3. 研究の方法

(1) SrTiO<sub>3</sub> FET は 10mm 角基板上にフォトリソグラフィのプロセスを用いて作製します。素子からチップホルダにワイヤボンダで配線し**図 2 (a) 上**、閾値のフィルタや発火、リセットなどの機能を持たせる周辺回路**図 2 (a) 下**を繋いで、最終的に LIF ニューロンにしました。

(2) 次にこの SrTiO<sub>3</sub> LIF ニューロンを複数個結合してリザバーを構築することに挑戦しました。リザバーとは、非線形変換を行う装置です。入力データをまずリザバーを用いて高次元の特徴量空間に写像しておくことで、学習の負荷が軽くなります。適当な非線形物質や素子 1 個だけでもリザバーになりますが、制御性に優れません。ニューロンを組み合わせで作ったニューラルネットワークは大きな非線形性を持ち、時系列データに強く、制御性に優れたリザバーになります。この非線形変換を半導体回路(CPU や GPU などの演算回路)による計算で行うと、計算負荷が高く、電力消費が膨大になります。しかしこの非線形変換を、リザバーにやらせれば、劇的な低消費電力になります。

(3) 我々は、5個の SrTiO<sub>3</sub> LIF ニューロンを繋いでリザバー動作させることに成功しました。この成果は IEEE の 3 大旗艦会議のひとつである VLSI に採択されました [1]。もちろん SrTiO<sub>3</sub> LIF ニュー

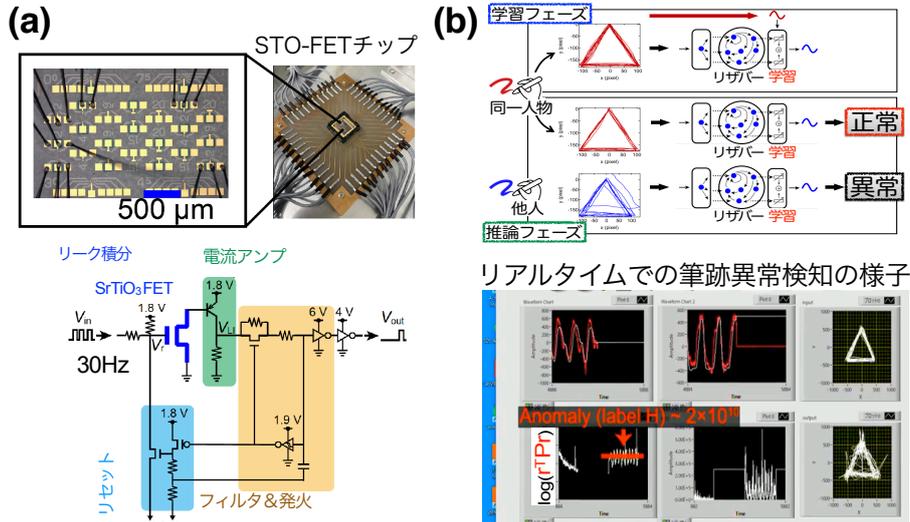


図 2. (a)、SrTiO<sub>3</sub> FET 素子 [図 1 (b) 上] は Leaky-Integrate 機能しか持たないので、まずこの素子にワイヤーボンダで結線し (左上)、チップホルダーから外部に配線を引き出し (右上)、その先に閾値のフィルタや発火とリセットのための電子回路をつけて、「LIF ニューロン動作」ができるようにします。(b)、SrTiO<sub>3</sub> LIF ニューロンの素子パラメータを用いた FPGA ニューロンを 256 個接続しリザバーと呼ばれるニューラルネットワークを構築しました。それを使い、手書き図形をリアルタイム学習し異常検知することにも成功しました。

ロンを 100 個や 1,000 個繋ぎ高次元で制御性の高いリザバーを作りたいのですが、これは容易ではありません。そこで本研究では、Field Programmable Gate Array (FPGA、プログラムで内部のロジックを書き換えられるデバイス)上にSrTiO<sub>3</sub> LIFニューロンの素子パラメータを用いた仮想SrTiO<sub>3</sub>ニューロンを256個作製し、これらを繋いだ中規模なりザバーも構築しました。

(4) このリザバーの動作検証のため、被験者にタッチパネル上に三角形を描いてもらい、筆跡の時系列データ(数十msの長い時定数)をリアルタイムにリザバーに入力しました。このリザバーには逐次最小二乗法 (Recursive Least Squares: RLS) という必要最小限の論理演算で学習を行うためのマイコンが付属しています。「学習」までをニューラルネットワークで行う方法は現在研究中ですが、このリザバーが機能し、入力データを高次元特徴量空間に写像できれば、RLS 計算は非常に小さなものになり、消費電力には大きな影響を与えません。学習直後に、再び本人や他人が三角形を描くようになるかというのがこの実験です [図 2 (b)]。入力データと出力データの誤差の 2 乗平均ではなく、リザバーの特性を示す値をモニターすれば簡単に本人と他人の違いを検知できることもわかり、それを適用したところ、ペン先の速度変化の癖が、仮想的とはいえ、SrTiO<sub>3</sub> LIFニューロンリザバーでほぼ完璧に識別(高次元特徴量空間に写像)できるという画期的な成果が得られました [1]。

(5) この研究と並行して、我々は、SrTiO<sub>3</sub> の Sr を Ca または Ba 置換で強誘電体にした上で、Ti を Nb に置換して金属化した試料についての研究を進めました。図 3 (a) に示すように、浮遊溶融帯法 (Floating Zone: FZ) を用いて、大型で高品質の単結晶を作製し、全ての物性測定を行いました。驚いたことに、常誘電体を金属化した Nb:SrTiO<sub>3</sub> に比べると、強誘電体を金属化した Nb:(Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> では、超伝導転移温度  $T_c$  が大きく上昇するということを明らかにできました [2, 3] [図 3 (b)]。

(6) 強誘電体になると空間反転対称性の破れが起きますが、ここにキャリアが入ると分極電荷が遮蔽されるので、通常は空間反転対称性が破れていない普通の金属になります。ところが SrTiO<sub>3</sub> 系の場合は、金属状態でも高調波 (Second Harmonic Generation: SHG) が観測されるので、空間反転対称性の破れた金属という珍しい状態になります [図 3 (c)]。これは SrTiO<sub>3</sub> 系では誘電率が非常に大きいため、電子 1 個当たりが占める実効半径 (誘電率に比例する) が増大し、分極電荷を遮蔽しきれないほどの非常にわずかなキャリア量でも金属化が起きるからだと考えられます。このことは、なぜ SrTiO<sub>3</sub> FET が Leaky Integration を示すのかという問題と関係しているのではないかと考えられます。現在数値計算によるシミュレーションを用いてこの謎に迫ろうとしているところです。

(7) この polar metal 相の相境界のうち、温度ゼロの点が量子臨界点 (Quantum Critical Point: QCP)です。QCP は Nb:(Sr,Ca)TiO<sub>3</sub> (Ca 1.5%) では  $3.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、Nb:(Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> (Ba 5%) では  $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  と 1 桁も異なっています [図 3 (c)]。金属磁性体の QCP では QCP 近傍で超伝導が出現していることから [図 3 (d) 左下]、その polar metal 版が、いまだにメカニズム未解明の SrTiO<sub>3</sub> の超伝導なのかもしれません。しかしその場合、QCP において  $T_c$  が極大になっても良さそうですが、図 3 (d) に示すように、Nb:(Sr,Ca)TiO<sub>3</sub> と Nb:(Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> で QCP はひと桁も異なるのに、 $T_c$  が極大になる  $n$  はほぼ一定で、QCP とは一致しません。Δ  $T_c$  にいたっては、ほぼ QCP

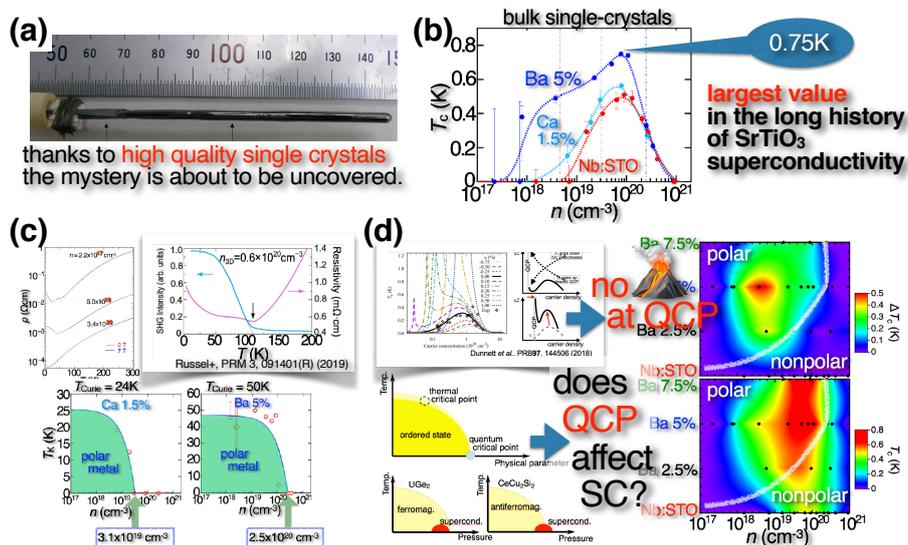


図 3. (a)、FZ 炉を用いて良質な単結晶を数多く作ったことが良い研究成果につながりました。(b)、Nb:SrTiO<sub>3</sub>、Nb:(Sr,Ca)TiO<sub>3</sub> (Ca 1.5%), Nb:(Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> (Ba 5%) の超伝導転移温度  $T_c$  とキャリア濃度  $n$  の関係。これまで SrTiO<sub>3</sub> の  $T_c$  は 0.35 K が最高でしたが、Ba 5% 置換の強誘電体 (Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> (キュリー温度  $T_{Curie}$  は 50 K) に Nb ドープでキャリアを入れると、 $T_c$  が 0.75 K まで上昇しました。(c)、キャリアは誘電分極を遮蔽するため、 $n > 0$  ならば常に  $T_{Curie} = 0$  になるはずですが、SrTiO<sub>3</sub> の場合は強誘電体のときの空間反転対称性の破れが金属相でも残っていて SHG で観測されます (右上)。この相を polar metal と呼びます (下)。Polar metal 相との相境界 ( $T_K$ ) で電気抵抗の温度係数が負に転じます (左上)。  $T_K$  がゼロになるキャリア濃度を量子臨界点 (QCP) と呼びます。(d)、金属磁性体の場合、強磁性 QCP で超伝導が出現することがあります (左下)。SrTiO<sub>3</sub> でも強誘電 QCP に向けて  $T_c$  が上昇するのと、 $n$  が小さくなると  $T_c$  が下降する効果が相まって、 $T_c$  が  $n$  に対してドーム状に変化するのだという理論があります (左上)。しかしながら我々の実験結果は  $T_c$  がほぼいつも同じ  $n$  の場所であって、最大値が QCP 上にあるわけではないこと (右下、白い線は QCP の変化)、さらに polar metal の Nb:(Sr,Ca)TiO<sub>3</sub> と Nb:(Sr,Ba)TiO<sub>3</sub> の  $T_c$  とそうでない Nb:SrTiO<sub>3</sub> の  $T_c$  との差  $\Delta T_c$  は、むしろ polar metal 相の中でだけ有意な値を持っていて、これも白線上 (QCP 上) で最も大きくなっているわけではありません (右上)。多くの理論に再考を促す興味深い結果になりました。

の内側 (polar metal の領域) でのみ有意な値をとっています。一般に、強誘電性は超伝導を破壊すると考えられるので、QCP において  $T_c$  が極大にならず、polar metal の領域でのみ  $T_c$  が増大するという我々の研究結果は、半世紀以上におよぶ SrTiO<sub>3</sub> の超伝導研究に、大きな衝撃を与えました [2, 3]。磁気抵抗にも興味深い特性が現れており、さらなる発展研究を計画中です。

#### 4. 研究成果

(1) **SrTiO<sub>3</sub> FET**は、電荷をため込む (コンデンサを使う) という従来の方法とは異なるメカニズムで leaky-integrate 特性を示すことがわかりました。それを用いて LIF ニューロン回路の作製にも成功。LIF 動作のパラメータも抽出できました。さらに将来の布石として FPGA で仮想的なリザーバーを作ったところ、非常に長い時定数をもつ時系列信号 (三角形の筆跡) を処理できることを示せました。SrTiO<sub>3</sub> が将来の脳型計算に大きく貢献できる物質であることを実証できました。

(2) SrTiO<sub>3</sub> を強誘電体にしてから金属化すると、本来超伝導と強誘電は折り合わないはずなのに  $T_c$  が大きく増大しました。多くの人が考えていた 強誘電 QCP との関係に再考を促す結果も得られました。現在、この基礎研究が、SrTiO<sub>3</sub> がなぜ leaky-integrate できるのか、大きな誘電率が関係しているのかという問題の解明に繋がります。さらに、空間反転対称性の破れた超伝導が新しい量子ビットの研究につながる可能性も考えられ、リザーバーなどの非線形回路の研究との接点で思いがけないアイデアが生まれるのではないかと期待も高まっているところです。

#### <引用文献>

- [1] Inoue, H. *et al.* Long-time-constant leaky-integrating oxygen-vacancy drift-diffusion FET for human-interactive spiking reservoir computing. In *Proceedings of 2023 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits*.
- [2] Tomioka, Y., Shirakawa, N., Shibuya, K. & Inoue, I. H. Enhanced superconductivity close to a non-magnetic quantum critical point in electron-doped strontium titanate. *Nat. Commun.* **10**, 738 (2019).
- [3] Tomioka, Y., Shirakawa, N. & Inoue, I. H. Superconductivity enhancement in polar metal regions of Sr<sub>0.95</sub>Ba<sub>0.05</sub>TiO<sub>3</sub> and Sr<sub>0.985</sub>Ca<sub>0.015</sub>TiO<sub>3</sub> revealed by systematic nb doping. *npj Quantum Materials* **7**, 111 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 28件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 20件）

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Tomioka Yasuhide, Shirakawa Naoki, Inoue Isao H.  | 4. 巻<br>7         |
| 2. 論文標題<br>Superconductivity enhancement in polar metal regions of Sr <sub>0.95</sub> Ba <sub>0.05</sub> TiO <sub>3</sub> and Sr <sub>0.985</sub> Ca <sub>0.015</sub> TiO <sub>3</sub> revealed by systematic Nb doping | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>npj Quantum Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>111 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41535-022-00524-9   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima T., Pati S. P.   | 4. 巻<br>120                   |
| 2. 論文標題<br>Controlling proton volatility in SiO <sub>2</sub> -capped TiO <sub>2</sub> thin films for neuromorphic functionality | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>241601 ~ 241601 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0094481  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Shibuya Keisuke, Sawa Akihito   | 4. 巻<br>12                    |
| 2. 論文標題<br>Epitaxial growth and polarized Raman scattering of niobium dioxide films | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>055103 ~ 055103 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0087610  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Chen Xiangyu, Byambadorj Zolboo, Yajima Takeaki, Inoue Hisashi, Inoue Isao H., Iizuka Tetsuya                   | 4. 巻<br>122                   |
| 2. 論文標題<br>CMOS-based area-and-power-efficient neuron and synapse circuits for time-domain analog spiking neural networks | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>074102 ~ 074102 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0136627  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Chen Xiangyu, Yajima Takeaki, Inoue Isao H., Iizuka Tetsuya  | 4. 巻<br>61                    |
| 2. 論文標題<br>An ultra-compact leaky integrate-and-fire neuron with long and tunable time constant utilizing pseudo resistors for spiking neural networks | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>SC1051 ~ SC1051 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac43e4  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Yasuhide Tomioka, Naoki Shirakawa, Isao H. Inoue  | 4. 巻<br>2203.16208 |
| 2. 論文標題<br>Superconductivity enhanced in the polar metal region of Sr <sub>0.95</sub> Ba <sub>0.05</sub> TiO <sub>3</sub> and Sr <sub>0.985</sub> Ca <sub>0.015</sub> TiO <sub>3</sub> revealed by the systematic Nb doping | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>arXiv:2203.16208 [cond-mat.supr-con]  | 6. 最初と最後の頁<br>1-30 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.48550/arXiv.2203.16208   | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima Takeaki, Toriumi Akira   | 4. 巻<br>8                       |
| 2. 論文標題<br>Observation of the Pinch Off Effect during Electrostatically Gating the Metal Insulator Transition | 5. 発行年<br>2021年                 |
| 3. 雑誌名<br>Advanced Electronic Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>2100842 ~ 2100842 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/aelm.202100842  | 査読の有無<br>有                      |
| オープンアクセス<br>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<br>-                       |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Nii Y., Hirokane Y., Nakamura S., Kabeya N., Kimura S., Tomioka Y., Nojima T., Onose Y.   | 4. 巻<br>105         |
| 2. 論文標題<br>Elastic study of electric quadrupolar correlation in the paramagnetic state of the frustrated quantum magnet Tb <sup>2+</sup> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>94414 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.105.094414   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Lee Jongjun M., Oshikawa Masaki, Cho Gil Young            | 4. 巻<br>126          |
| 2. 論文標題<br>Non-Fermi Liquids in Conducting Two-Dimensional Networks | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters                                   | 6. 最初と最後の頁<br>186601 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.126.186601          | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Li Zi-Long, Oshikawa Masaki, Wan Yuan   | 4. 巻<br>11          |
| 2. 論文標題<br>Photon Echo from Lensing of Fractional Excitations in Tomonaga-Luttinger Spin Liquid | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review X   | 6. 最初と最後の頁<br>31035 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevX.11.031035  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yamada Masahiko G., Oshikawa Masaki, Jackeli George               | 4. 巻<br>104          |
| 2. 論文標題<br>SU(4)-symmetric quantum spin-orbital liquids on various lattices | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>224436 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.104.224436                     | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Michimura Shinji, Kosaka Masashi, Machida Ayumi, Numakura Ryosuke, Iizuka Ryosuke, Katano Susumu, Imai Yoshiki, Shirakawa Naoki, Yamasaki Yuichi, Nakao Hironori, Sato Hitoshi, Ueda Shigenori, Mimura Kojiro | 4. 巻<br>90                    |
| 2. 論文標題<br>Charge-Ordered State and Low-Dimensional Magnetic Fluctuations in Yb5Ge4 Single Crystal  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>044703 ~ 044703 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.90.044703  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Shibuya Keisuke, Ishii Kiyoo, Atsumi Yuki, Yoshida Tomoya, Sakakibara Youichi, Mori Masahiko, Sawa Akihito  | 4. 巻<br>28                  |
| 2. 論文標題<br>Switching dynamics of silicon waveguide optical modulator driven by photothermally induced metal-insulator transition of vanadium dioxide cladding layer | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Optics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>37188 ~ 37188 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OE.409238   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima Takeaki, Nishimura Tomonori, Tanaka Takahisa, Uchida Ken, Toriumi Akira     | 4. 巻<br>6                       |
| 2. 論文標題<br>Modulation of V02 Metal-Insulator Transition by Ferroelectric HfO2 Gate Insulator | 5. 発行年<br>2020年                 |
| 3. 雑誌名<br>Advanced Electronic Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>1901356 ~ 1901356 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/aelm.201901356   | 査読の有無<br>有                      |
| オープンアクセス<br>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<br>-                       |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima T., Nishimura T., Migita S., Tanaka T., Uchida K., Toriumi A.                        | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>Regulating phase transformation kinetics via redox reaction in ferroelectric Ge-doped HfO2 | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>182902 ~ 182902 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0028620   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>矢嶋 昶彬                        | 4. 巻<br>J103-C        |
| 2. 論文標題<br>金属絶縁体転移材料を利用した回路技術の研究       | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>電子情報通信学会 和文論文誌C              | 6. 最初と最後の頁<br>420-427 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著<br>-             |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsuura Keisuke, Oike Hiroshi, Kocsis Vilmos, Sato Takuro, Tomioka Yasuhide, Kaneko Yoshio, Nakamura Masao, Taguchi Yasujiro, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori, Kagawa Fumitaka | 4. 巻<br>103               |
| 2. 論文標題<br>Kinetic pathway facilitated by a phase competition to achieve a metastable electronic phase   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>L041106-1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.103.L041106   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tomioka Yasuhide, Ito Toshimitsu, Maruyama Erika, Kimura Shinji, Shindo Isamu  | 4. 巻<br>90                    |
| 2. 論文標題<br>Magnetic and Electronic Properties of Single Crystals of Perovskite Nickelate Oxide LaNiO <sub>3</sub> Prepared by the Laser Diode Floating Zone Method | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan   | 6. 最初と最後の頁<br>034704 ~ 034704 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.90.034704   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Tomioka Yasuhide, Shirakawa Naoki, Shibuya Keisuke, Inoue Isao H.                             | 4. 巻<br>30          |
| 2. 論文標題<br>Superconductivity near a Ferroelectric Quantum Critical Point in La-doped SrTiO <sub>3</sub> | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conf. Proc.   | 6. 最初と最後の頁<br>11036 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSCP.30.011036   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Lee Jongjun M., Geng Chenhua, Park Jae Whan, Oshikawa Masaki, Lee Sung-Sik, Yeom Han Woong, Cho Gil Young | 4. 巻<br>124          |
| 2. 論文標題<br>Stable Flatbands, Topology, and Superconductivity of Magic Honeycomb Networks                            | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>137002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.124.137002  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Shibuya Keisuke, Atsumi Yuki, Yoshida Tomoya, Sakakibara Youichi, Mori Masahiko, Sawa Akihito                | 4. 巻<br>27                |
| 2. 論文標題<br>Silicon waveguide optical modulator driven by metal-insulator transition of vanadium dioxide cladding layer | 5. 発行年<br>2019年           |
| 3. 雑誌名<br>Optics Express   | 6. 最初と最後の頁<br>4147 ~ 4156 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OE.27.004147   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yamada Hiroyuki, Toyosaki Yoshikiyo, Sawa Akihito   | 4. 巻<br>124          |
| 2. 論文標題<br>Growth and ferroelectric properties of yttrium-doped hafnium oxide/indium-tin oxide polycrystalline heterostructures with sharp and uniform interfaces | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>105305 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5046866   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-            |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Tomioka Yasuhide, Ito Toshimitsu, Sawa Akihito  | 4. 巻<br>87          |
| 2. 論文標題<br>Magnetotransport Properties of $\text{Eu}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ ( $0 < x < 0.07$ ) Single Crystals | 5. 発行年<br>2018年     |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>94716 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.87.094716  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Tomioka Yasuhide, Shirakawa Naoki, Shibuya Keisuke, Inoue Isao H.   | 4. 巻<br>10        |
| 2. 論文標題<br>Enhanced superconductivity close to a non-magnetic quantum critical point in electron-doped strontium titanate | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>738 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-019-08693-1  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima T., Minohara M., Bell C., Hwang H. Y., Hikita Y.  | 4. 巻<br>113          |
| 2. 論文標題<br>Inhomogeneous barrier heights at dipole-controlled SrRuO <sub>3</sub> /Nb:SrTiO <sub>3</sub> Schottky junctions | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>221603 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5052712  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する         |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima T., Oike G., Yamaguchi S., Miyoshi S., Nishimura T., Toriumi A.   | 4. 巻<br>8            |
| 2. 論文標題<br>Hydrogenation of the wide-gap oxide semiconductor as a room-temperature and 3D-compatible electron doping technique | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances   | 6. 最初と最後の頁<br>115133 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5055302  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-            |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Yajima T., Nishimura T., Toriumi A.   | 4. 巻<br>2018          |
| 2. 論文標題<br>Analog Spike Processing with High Scalability and Low Energy Consumption Using Thermal Degree of Freedom in Phase Transition Materials | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>VLSI Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>27 ~ 28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/VLSIT.2018.8510649  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>FUJIOKA Masaya, KUBO Naoki, NAGAO Masanori, MSISKA Robin, SHIRAKAWA Naoki, DEMURA Satoshi, SAKATA Hideaki, KAIJU Hideo, NISHII Junji | 4. 巻<br>126             |
| 2. 論文標題<br>Superconductivity in AgxTaS <sub>2</sub> single crystals with stage structure obtained via proton-driven ion introduction           | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Ceramic Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>963 ~ 967 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2109/jcersj2.18148  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Yamada Masahiko G., Oshikawa Masaki, Jackeli George                        | 4. 巻<br>121         |
| 2. 論文標題<br>Emergent SU(4) Symmetry in $-ZrCl_3$ and Crystalline Spin-Orbital Liquids | 5. 発行年<br>2018年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>97201 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.121.097201                           | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する        |

[学会発表] 計38件 (うち招待講演 31件 / うち国際学会 30件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>浜砂 智, パティ サトウヤ プラカシュ, 矢嶋 赳彬              |
| 2. 発表標題<br>VO <sub>2</sub> 金属絶縁体転移における静特性と過渡特性の結びつき |
| 3. 学会等名<br>春季応用物理学会                                 |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takeaki Yajima   |
| 2. 発表標題<br>Next-generation switching devices based on metal-insulator transitions |
| 3. 学会等名<br>ISPlasma2022 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takeaki Yajima   |
| 2. 発表標題<br>Codesign of materials and circuits for neuromorphic edge computing |
| 3. 学会等名<br>ナノ学会 合同シンポジウム (招待講演)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takeaki Yajima   |
| 2. 発表標題<br>Ultra-sharp three-terminal switch using nano-scale phase transition material             |
| 3. 学会等名<br>34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渋谷圭介                                  |
| 2. 発表標題<br>強相関電子系における金属絶縁体転移の制御とその応用             |
| 3. 学会等名<br>第 5 回 TIA EXA 広域エレクトロニクス融合セミナー (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Yajima, T. Tanaka, K. Uchida, A. Toriumi   |
| 2. 発表標題<br>Operation Principles of V02 Mott Transistor: Local Electrostatic Modulation and Global Avalanche Effect |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)                                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue   |
| 2. 発表標題<br>Phenomenology of the phase diagram of SrTiO <sub>3</sub>  |
| 3. 学会等名<br>Microscopics of Superconductivity in Perovskite Oxides: Challenges, Hurdles and Enigmas 1 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity of SrTiO <sub>3</sub> enhanced by a ferroelectric quantum critical point.                    |
| 3. 学会等名<br>16th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity in (Sr, La)Ti <sub>160,180</sub> O <sub>3</sub> and (Sr, Ca)(Ti, Nb) <sub>3</sub> O <sub>7</sub> |
| 3. 学会等名<br>Microscopics of Superconductivity in Perovskite Oxides: Challenges, Hurdles and Enigmas 3 (招待講演) (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa   |
| 2. 発表標題<br>Applications of Adiabatic Flux Insertion to Quantum Many-Body Systems: A Pedagogical Introduction |
| 3. 学会等名<br>Condensed Matter Physics in All the Cities 2020 (招待講演) (国際学会)                                     |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa  |
| 2. 発表標題<br>Adiabatic vs Sudden Flux Insertion and Nonlinear Electric Conduction |
| 3. 学会等名<br>Condensed Matter Physics in All the Cities 2020 (招待講演) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa  |
| 2. 発表標題<br>Electrons in Honeycomb Network   |
| 3. 学会等名<br>UK-Japan Workshop on Strongly Correlated Systems & 18th Theoretical and Experimental Magnetism Meeting (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa                                       |
| 2. 発表標題<br>Transport in 2D Conducting Networks                   |
| 3. 学会等名<br>APCTP-NORDITA Meeting on Quantum Matter (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Keisuke Shibuya  |
| 2. 発表標題<br>Impact of electron doping on metal-insulator transition of VO <sub>2</sub> |
| 3. 学会等名<br>22nd International Conference on Solid State Ionics (招待講演) (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>井上 公                         |
| 2. 発表標題<br>コンデンサ不要の LIF ニューロン           |
| 3. 学会等名<br>日本応用物理学会 第80 回秋季学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yasuhide Tomioka   |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity near a ferroelectric quantum critical point in La-doped SrTiO <sub>3</sub> |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (招待講演) (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity enhanced by a ferroelectric quantum critical point                                 |
| 3. 学会等名<br>The 15th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Large enhancement of superconductivity close to a non-magnetic quantum critical point in Sr <sub>1-x</sub> LaxTiO <sub>3</sub> |
| 3. 学会等名<br>The 22nd International Conference of Solid State Ionics (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity enhanced by a ferroelectric quantum critical point             |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Materials Science and Engineering 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Isao H. Inoue   |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity enhanced by a ferroelectric quantum critical point      |
| 3. 学会等名<br>Electron Correlations in Superconductors and Nanostructures (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takeaki Yajima   |
| 2. 発表標題<br>Designing Neuron Functionality Based on Phase Transition Materials                                     |
| 3. 学会等名<br>Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Takeaki Yajima           |
| 2. 発表標題<br>材料特性を利用したニューロモルフィック素子の設計 |
| 3. 学会等名<br>電気情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa  |
| 2. 発表標題<br>Flat Bands in Honeycomb Network                              |
| 3. 学会等名<br>ICTS Workshop "Novel Phases of Quantum Matter" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa                                   |
| 2. 発表標題<br>Flat Bands in Honeycomb Network                   |
| 3. 学会等名<br>Max Planck-UBC-UTokyo Workshop 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa  |
| 2. 発表標題<br>Flat Bands in Honeycomb Network  |
| 3. 学会等名<br>KITP Program "Topological Quantum Matter: Concepts and Realizations" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa   |
| 2. 発表標題<br>Emergent SU(4) symmetry in $\text{A}_2\text{ZrCl}_3$ and spin-orbital liquids |
| 3. 学会等名<br>Aspen Summer Workshop 2019: Quantum Spin Liquids (招待講演) (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Tomioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Superconducting Transition Temperature of 500 mK for La-doped SrTiO <sub>3</sub> Single Crystals with Oxygen Isotope ( <sup>18</sup> O) Substitution |
| 3. 学会等名<br>12th Int. Nat. Conf. on Mat. and Mech. of Supercond. and High Temp. Superconductors (12th M2S-HTSC) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Tonioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue   |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity near a ferroelectric quantum critical point in La-doped SrTiO <sub>3</sub>              |
| 3. 学会等名<br>Int. Nat. Symp. on "Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (TPFC2019) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>I. H. Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Artificial synapses and neurons based on an insulator-to-2D metal transition of a SrTiO <sub>3</sub> surface           |
| 3. 学会等名<br>5th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>I. H, Inoue  |
| 2. 発表標題<br>Artificial synapses and neurons based on SrTiO <sub>3</sub>  |
| 3. 学会等名<br>Mini-Workshop on recent developments in oxide electronics: from 2DEGs to neuromorphic functionalities and beyond (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>井上 公                                      |
| 2. 発表標題<br>SrTiO <sub>3</sub> を用いた人工ニューロンとシナプス       |
| 3. 学会等名<br>新世代コンピューティングシンポジウム/第8回 電子光技術シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi  |
| 2. 発表標題<br>Analog Spike Processing with High Scalability and Low Energy Consumption Using Thermal Degree of Freedom in Phase Transition Materials |
| 3. 学会等名<br>2018 Symposia on VLSI Technology and Circuits (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Yajima, T. Nishimura, and A. Toriumi  |
| 2. 発表標題<br>Integrate-and-Fire of Input Spike Signals with High Scalability and Low Energy Consumption Using VO <sub>2</sub> Metal-Insulator Transition. |
| 3. 学会等名<br>2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>矢嶋 起彬                          |
| 2. 発表標題<br>相転移材料の熱自由度を利用した低消費電力アナログスパイク処理 |
| 3. 学会等名<br>シリコンテクノロジー分科会 第210回研究集会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>矢嶋 起彬、西村 知紀、鳥海 明   |
| 2. 発表標題<br>強誘電性HfO <sub>2</sub> ゲート3端子素子によるVO <sub>2</sub> 電気伝導度の変調 |
| 3. 学会等名<br>第66回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa   |
| 2. 発表標題<br>Emergent SU(4) symmetry in strong spin-orbit systems                                  |
| 3. 学会等名<br>NORDITA Workshop “Novel superconductors: materials and properties” 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa   |
| 2. 発表標題<br>Emergent SU(4) symmetry and quantum spin-orbital liquids  |
| 3. 学会等名<br>Frustration, Orbital Fluctuations, and Topology in Kondo Lattices and Their Relatives (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masaki Oshikawa  |
| 2. 発表標題<br>Emergent SU(4) symmetry in $\text{-ZrCl}_3$ and crystalline spin-orbital liquids |
| 3. 学会等名<br>Highlights in Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2018年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| Dr. Isao H. Inoue<br><a href="https://sites.google.com/view/isao">https://sites.google.com/view/isao</a> |
|--|

## 6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                          | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                  | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 山田 浩之<br>(Yamada Hiroyuki)<br><br>(00415762)       | 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・研究グループ長<br><br>(82626) |    |
| 研究分担者 | 渋谷 圭介<br>(Keisuke Shibuya)<br><br>(00564949)       | 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・主任研究員<br><br>(82626)   |    |
| 研究分担者 | 矢嶋 赳彬<br>(Takeaki Yajima)<br><br>(10644346)        | 九州大学・システム情報科学研究院・准教授<br><br>(17102)                    |    |
| 研究分担者 | 浅沼 周太郎<br>(Shutaro Asanuma)<br><br>(30409635)      | 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・主任研究員<br><br>(82626)   |    |
| 研究分担者 | 押川 正毅<br>(Masaki Oshikawa)<br><br>(50262043)       | 東京大学・物性研究所・教授<br><br>(12601)                           |    |
| 研究分担者 | 白川 直樹<br>(Naoki Shirakawa)<br><br>(60357241)       | 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・総括研究主幹<br><br>(82626)  |    |
| 研究分担者 | 富岡 泰秀<br>(Yasuhide Tomioka)<br><br>(60357572)      | 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<br><br>(82626) |    |
| 研究分担者 | Stoliar Pablo<br>(Stoliar Pable)<br><br>(40824545) | 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・主任研究員<br><br>(82626)   |    |

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2件

|  |                    |
|--|--------------------|
| 国際研究集会<br>INTERNATIONAL WORKSHOP IN AIST: FERROELECTRIC QCP, SUPERCONDUCTIVITY, AND MOTT<br>TRANSITION | 開催年<br>2018年～2018年 |
| 国際研究集会<br>THE 3RD NEUROMORPHIC RESEARCH RETREAT IN AIST  | 開催年<br>2018年～2018年 |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|