

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20H02704  
研究課題名（和文）電子相関系酸化物におけるアンダーソン局在の起源解明とその制御による超伝導体の探索

研究課題名（英文）Elucidation of the origin of Anderson localization and exploration of superconductivity by controlling it in electron-correlated oxides

研究代表者  
岡 大地（Oka, Daichi）  
東京都立大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20756514  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：Nb系酸化物および酸窒化物、V系層状酸化物、Ru酸化物、希土類単酸化物といった電子相関系導電性酸化物を対象に電子局在に由来する金属絶縁体転移を誘起する要因を詳細に評価した。その結果、アニオン配列の不規則性が電子間クーロン相互作用よりも顕著に働き得ること、電気伝導層や膜厚を低下させることで次元性誘起の金属絶縁体転移が発現するが、同時に層間相互作用によって弱局在の発現が決定づけられることを見出した。また、軌道分布の拡大は電気伝導性の向上につながる事が分かった。希土類単酸化物では局在4f電子の数に応じて遍歴的な5d電子の移動度に変化が見られるとともに、超伝導ヘテロ構造の作製に適用可能であった。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では電子相関系酸化物においてアニオン配列、層構造、格子歪み、膜厚、軌道分布の大きさといった要素が電子局在を引き起こす具体的な条件を実験的に検証することができ、これらのパラメータの制御方法が開発された。また、本研究では多様な酸化物を高品質なエピタキシャル薄膜として合成するための合成手法開発という面でも多様な手法を見出すことができ、理論的に高温超伝導を発現すると期待される層状酸化物のエピタキシャル合成も可能となった。これらの知見や技術は、今後、超伝導体をはじめとする導電性材料の開発に活用できると期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated the factors inducing the metal-insulator transition due to electron localization in electron-correlated conductive oxides, such as Nb-based oxides and oxynitrides, V-based layered oxides, Ru oxides, and rare-earth monoxides. As a result, we found that the disorder of the anion arrangement can be more significant than the Coulomb interaction between electrons, and that the dimensionality-induced metal-insulator transition appears by reducing the conductive layer or film thickness, but at the same time, the emergence of weak localization is determined by the interlayer interaction. We also found that the expansion of the orbital distribution leads to improved electrical conductivity. In rare-earth monoxides, the mobility of the itinerant 5d electrons changes depending on the number of the localized 4f electrons, and superconducting heterostructures were successfully fabricated.

研究分野：固体化学

キーワード：アンダーソン局在 金属絶縁体転移 酸化物 酸窒化物 エピタキシー 複合アニオン 超伝導

### 1. 研究開始当初の背景

高温超伝導体開発の指針として、安定なクーパー対の形成のために熱エネルギーに匹敵する強い電子相関の導入が必要と考えられるため、これまで電子相関の強い遷移金属酸化物モット絶縁体の相転移現象が盛んに研究されてきた。一方、バンド理論において金属的な状態にあると予想される物質が絶縁化するもう一つの原因として、アンダーソン絶縁化機構が考えられる。超伝導体相とアンダーソン絶縁体相が隣接する例も存在するため、電子相関系酸化物において電子局在を抑制できれば新たな超伝導体探索の指針になり得る。この指針を実験的に検証するためには局在の要因となり得る不規則性、次元性、および軌道分布の大きさを系統的に変化させて電気伝導特性を評価する必要がある。研究代表者はこれまでに単結晶基板上に格子整合した高品質な薄膜を成長させるエピタキシー技術を用いて多様な組成の酸化物や酸窒化物の合成に取り組んできており、本技術を用いることで不規則性・次元性・軌道分布が導電性酸化物の電気伝導性に与える影響を調査することができると期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では局在を決定づけるパラメータとして、理論で検討されてきた不規則性・次元性に加えて軌道分布に着目し、導電性酸化物の金属・絶縁体相図を実験的に作成する。得られた相図から局在による絶縁化を抑制するための指針を見出し、超伝導体をはじめとする機能性材料の開発を行う。くわえて、発見した超伝導体を用いたエピタキシャル接合素子の作成にも取り組む。

### 3. 研究の方法

本研究では化学組成と結晶構造を合理的に制御することにより不規則性・次元性・軌道分布を系統的に変化させた一連の導電性酸化物を高品質なエピタキシャル薄膜として合成し、電気伝導性の変化を評価する。合成にはパルスレーザー堆積法を主に活用する。並行して、簡便に高品質な薄膜を合成するための溶液プロセスの開発にも取り組む。

不規則性の制御には複合アニオン化の手法を活用する。アニオンサイトの酸素の一部を窒素などの異種アニオンで置換することで電気伝導パスにランダムネスを導入し、置換量によってランダムポテンシャルの大きさを制御する。次元性の制御には、薄膜の厚さや層状酸化物の電気伝導層の厚さを変化させるとともに、異なる格子定数の単結晶基板から薄膜に印加されるエピタキシャル応力などに由来する構造歪みを導入して制御する。軌道分布の大きさは、価電子が収容される電子軌道のサイズによって制御する。たとえば、5族に属するバナジウムからニオブに遷移金属の種類を変化させることによって、3d軌道から4d軌道に空間的広がりを大きくすることができる。

### 4. 研究成果

#### (1) 酸窒化物における不規則性誘起金属絶縁体転移

一般に、絶縁体にキャリアをドーピングすると、少量のキャリアドーピングでは電子間の相互作用によって絶縁性が保たれ、物質固有の閾値を超える密度のキャリアを導入することで金属層へと相転移する。1950年代にMottにより、このキャリア密度の閾値 $n_c$ は有効ボーア半径 $a_H$ との間に $n_c^{1/3} a_H = 0.26$ の関係が成り立つことが理論的に予想され[1]、その後、多くの物質でこのモット則が成り立つことが実験的に示された(図1)[2]。これは、ほとんどの物質で金属絶縁体転移が電子間のクーロン相互作用によって誘起されることを示している。最近、相変化材料のような条件によって結晶構造および構造欠陥時の状態が大きく変化する材料においてモット則から大きく外れる $n_c$ において不規則性に誘起される金属絶縁体転移が観察された。しかしながら、金属絶縁体転移を誘起するほど大きな不規則性を欠陥によって導入することは一般の物質では難しく、また、欠陥によって発生する多様な局所構造によってバンド構造が大きく変化してしまうことから、バンド理論に基づく物性理解が困難である。そこで、本研究では酸化物中の酸素の一部を窒素で置換して結晶構造を保ったまま、欠陥ではなくアニオン配列の不規則性が金属絶縁体転移の相転移点に与える影響を評価した。

窒素を導入する酸化物としてペロブスカイト型 $SrNbO_3$ を採用した。金属状態の物性を評価するためにパルスレーザー堆積法による薄膜合成に取り組んだところ、最適条件において極めて正規組成に近いエピタキシャル薄膜の合成に成功した[3]。4d軌道の大きな軌道分布を反映してニオブと同族のバナジウムから成る $SrVO_3$ に比べて高い電気伝導性を示す一方、低温ではフェルミ液体的な挙動が観察された

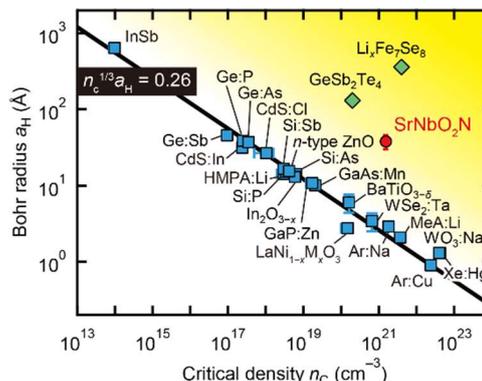


図 1. 導電性固体の有効ボーア半径とキャリア密度閾値のログプロット。

ことから、依然として電子相関が顕著であることも明らかとなった。実際に、電子相関を反映して一般的な金属材料よりもプラズマ周波数が低エネルギー側に位置することに加え、酸素 2p 軌道と Nb4d 軌道の大きなエネルギー差を反映して可視光領域から紫外領域まで広い範囲における透明性も観察され、深紫外領域まで活用可能な透明電極としての応用の可能性が示唆された[4]。

ついで、合成時にプラズマ化した窒素を供給することで異なる濃度の窒素を導入した一連の酸窒化物  $\text{SrNbO}_{3-x}\text{N}_x$  のエピタキシャル薄膜を合成した。プラズマ源の出力を制御することで  $0 \leq x \leq 1$  の範囲でペロブスカイト構造を維持したまま高品質なエピタキシャル薄膜の合成に成功した[5]。得られた薄膜の抵抗率の温度依存性を評価したところ、 $\text{SrNbO}_3$  ( $x = 0$ ) 薄膜から  $\text{SrNbO}_2\text{N}$  ( $x = 1.02$ ) 薄膜に向けて金属絶縁体転移が観察された[6]。 $\text{SrNbO}_2\text{N}$  は正規組成ではバンド絶縁体だが、酸素欠損に由来すると考えられる電子キャリアによって電気伝導性を示した。極低温の振る舞いに注目すると、 $x = 1.02$  では 0 K に向かって抵抗率が発散する挙動が観察されたのに対し、 $x = 0.96$  では測定範囲内において発散挙動が見られなかった。この結果は、 $x = 0.96$  の組成近傍に金属絶縁体転移の相転移点が存在することを示している。これらの薄膜の窒素組成は互いに近い値にあり、アニオン配列に由来する不規則性は同程度であることから、 $x = 0.96$  においてキャリア密度が閾値  $n_c$  に近い値を取っていると考えられる。絶縁体組成である  $\text{SrNbO}_2\text{N}$  ( $x = 1.02$ ) 薄膜の磁気抵抗効果から有効ボーア半径を決定し、図 1 にプロットしたところ、明瞭にモット則から外れる点に相転移点が存在することから、電子間のクーロン相互作用ではなくアニオン配列の不規則性によって金属絶縁体転移が誘起されたことが明らかとなった。この結果はアニオン配列がアンダーソン局在の制御に有効であることを示している。

電子物性とバンド構造の対応を検証するために  $\text{SrNbO}_2\text{N}$  ( $x = 1.02$ ) 薄膜の磁気抵抗効果の異方性を観察した。図 2 に示すようにペロブスカイト構造中の  $\text{NbO}_4$  八面体構造を反映して磁場の印加方向に対して磁気抵抗の大きさが変化した。ここで、2 K においては  $\langle 110 \rangle$  方向に磁気抵抗の極大が観察されたのに対し、10 K においては  $\langle 001 \rangle$  方向で極大となった。第一原理計算との比較によって、ニオブの 4d 軌道の結晶場分裂を反映して、電子エネルギーをパラメータとして軌道の空間的広がりが変化していることに対応していることが分かった。以上のように、アニオン配列の不規則性による電子局在制御では、強いランダムポテンシャル下においてもバンド理論を用いて電気伝導性の議論が可能であることが示された。

(2) 層状酸化物における電気伝導層の次元性制御による金属絶縁体転移

ペロブスカイト型  $\text{SrVO}_3$  は典型的な強相関電子系酸化物であり、金属的な電気伝導性を示す。次元性が電子局在に与える影響を評価するため、カチオン組成を変化させ、同じ  $3d^1$  電子配置をとる Ruddlesden-Popper 型  $\text{Sr}_{n+1}\text{V}_n\text{O}_{3n+1}$  ( $n = 1, 2$ ) のエピタキシャル薄膜を合成した[7]。Ruddlesden-Popper 構造は絶縁性岩塩層と導電性ペロブスカイト層から成り、組成  $n$  がペロブスカイト層に含まれる  $\text{VO}_2$  平面の数に対応するため、 $n$  が小さいほど 2 次元的な構造となる。本研究では、さらに、格子定数の異なる単結晶基板上に  $\text{Sr}_{n+1}\text{V}_n\text{O}_{3n+1}$  ( $n = 1, 2$ ) を  $c$  軸配向膜としてエピタキシャル成長させることで、格子歪みを変化させて導電性ペロブスカイト層の層間距離を制御した。これまでに V 系 Ruddlesden-Popper 型酸化物の  $c$  軸配向エピタキシャル合成の報告例はなかったが、化学的に不活性な Ar をプロセスガスとして導入することで  $\text{Sr}_{n+1}\text{V}_n\text{O}_{3n+1}$  ( $n = 1, 2$ ) エピタキシャル薄膜の合成に成功した。図 3a に  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) および  $\text{LaSrGaO}_4$  (LSGO) 基板上に合成した  $\text{Sr}_{n+1}\text{V}_n\text{O}_{3n+1}$  ( $n = 1, 2$ ) (001) エピタキシャル薄膜の電気伝導度の温度依存性を示す。層間距離の小さい  $\text{Sr}_3\text{V}_2\text{O}_7/\text{LSGO}$  は 3 K まで金属的な負の傾きを維持したのに対し、層間距離の大きな  $\text{Sr}_3\text{V}_2\text{O}_7/\text{LAO}$  は 12 K で極大を取り、低温では正の傾きを

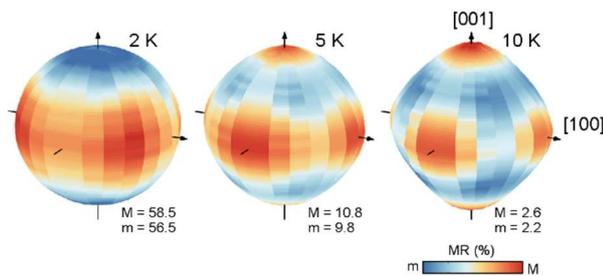


図 2. 異なる温度における  $\text{SrNbO}_2\text{N}$  エピタキシャル薄膜の磁気抵抗の磁場印加方向に対するマッピング。

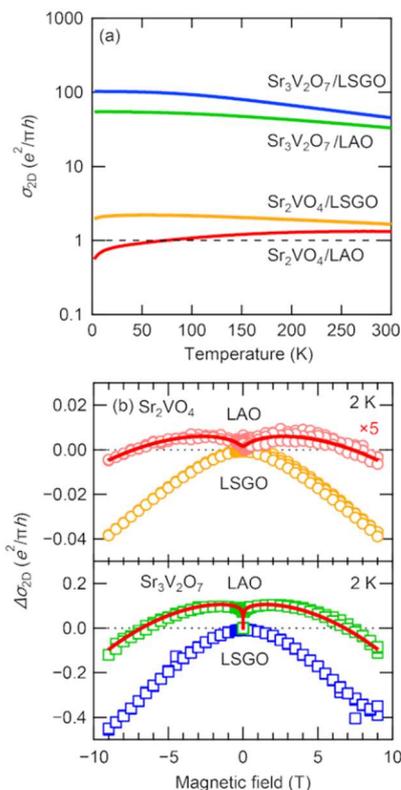


図 3. LAO および LSGO 基板上に合成した  $\text{Sr}_2\text{VO}_4$  および  $\text{Sr}_3\text{V}_2\text{O}_7$  エピタキシャル薄膜の (a) シード伝導度の温度依存性、(b) 磁気伝導度。(a) の点線は Ioffe-Regel 限界を、(b) の赤線は弱局在効果に対する Hikami-Larkin-Nagaoka 式によるフィッティング結果をそれぞれ表す。

示した。電気伝導層の厚さが小さい Sr<sub>2</sub>VO<sub>4</sub>/LSGO はより電気伝導度が小さく、54 K で極大を示した。さらに、層間距離の大きな Sr<sub>2</sub>VO<sub>4</sub>/LAO は低温から 300 K まで絶縁体的な負の傾きを示した。ここで、電気伝導度は電気伝導層 1 層分のシート伝導度に換算してあり、観察された金属絶縁体転移の境界が Ioffe-Regel 限界に一致したことから、擬 2 次元的な電気伝導が実現されており、金属絶縁体転移が次元性の精密な制御によって誘起されたことを示している。一方、磁気伝導度においては基板依存性が観察された。図 3b に示すように薄膜の組成に依らず、LSGO 基板上では負の磁気伝導度のみが観察されたのに対し、LAO 基板上では弱局在に由来する正の伝導度が低磁場領域で観察された。この結果は、電気伝導層の厚さに依らず、層間距離が大きくなると伝導層間の電子ホッピングが大きく抑制され、局在が誘起されることを示している。したがって、同じ低次元的な結晶構造でも伝導層間の相互作用によって局在の大きさを制御できることが明らかとなった。本研究で開発した層状酸化物のエピタキシャル合成手法は他の遷移金属酸化物にも適用でき、理論的に超伝導の発現が予測された Cr 系の酸化物のエピタキシャル合成も実現した。

### (3) 導電性酸化物における次元性制御による金属絶縁体転移と構造歪み効果

ルチル型 RuO<sub>2</sub> は高い電気伝導性を示す金属的な酸化物である。イットリア安定化ジルコニア (YSZ) 基板上で膜厚  $t$  を 8 nm から 73 nm まで変化させた一連の RuO<sub>2</sub> (100) エピタキシャル薄膜を合成したところ、図 4 に示すように  $t = 20$  nm 以下で弱局在の効果が見られ、低温での抵抗上昇が生じ始め、 $t = 8$  nm では 300 K 以下の温度領域で絶縁体的挙動が観察され、金属絶縁体転移が誘起された[8]。そこで、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 基板上において一定の膜厚で合成温度を変化させてエピタキシャル薄膜を合成したところ、0.5% から 6.3% の巨大歪みまで、系統的に格子歪みを制御することに成功した[9]。これらの薄膜では電気抵抗率の値や温度依存性に大きな変化が見られなかったことから、上記の金属絶縁体転移は低次元化によって誘起されたものであることが明らかとなった。最近、(110) 配向エピタキシャル薄膜において歪み印加による超伝導発現が報告されたことから[10]、本研究で開発した格子歪み印加手法による超伝導体の開発が期待される。

### (4) 希土類単酸化物における金属絶縁体転移

希土類金属は通常、3 価または 4 価のイオンとして安定な絶縁性酸化物を形成するが、2 価の異常原子価状態になると 5d 軌道に価電子が導入され、電気伝導性を示し得る。最近、研究代表者らは一連の岩塩型希土類単酸化物 REO (RE = 希土類金属) のエピタキシャル合成に成功した。前期ランタノイドから成る REO は導電性が高い金属状態にあり、LaO は超伝導、CeO は重い電子状態、PrO・NdO は強磁性を示した[11-14]。NdO は RuO<sub>2</sub> と同様に膜厚を減少させることで金属絶縁体転移を示すとともに、金属的伝導を示す高膜厚の薄膜に比べて高いキュリー温度を持つ新たな強磁性相が発現した[15]。一方、後期ランタノイドから成る GdO、HoO、TbO は強磁性だが半導体的な電気伝導性を示した[16-18]。これらの結果から、局在性の高い 4f 電子が 5d 電子の電気伝導に影響を与え、金属性と絶縁性を決定している可能性がある。ただし、後期ランタノイドから成る REO には不純物として RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が含まれており、REO のイントリンジックな電気伝導性については更なる研究を要する。不純物を取り除くための指針として、安定な岩塩型酸化物をバッファー層に用いる方法が考えられる。実際に CaO をバッファー層にして GdO をエピタキシャル成長させたところ、不純物の存在率が低減し、移動度が向上するとともに室温を越えるキュリー温度が観察された[19]。単純な岩塩構造を取る希土類単酸化物の多様な物性は超伝導体を含むヘテロ構造の作製にも有用であり、強磁性体である EuO や PrO との積層構造において強磁性との相互作用が見出された[20]。

### (5) 溶液プロセスによる 3 元系酸化物正規組成薄膜合成手法の開発

パルスレーザー堆積法は幅広い組成の酸化物に適用できる有用な薄膜合成手法だが、カチオンを複数含む多元系酸化物に適用すると出発原料からの組成転写が不完全になり、厳密に正規組成の薄膜を合成することが困難であるという課題がある。そこで、本研究では 3 元系酸化物 SrTiO<sub>3</sub> を対象に、溶液プロセスで簡便に正規組成の薄膜を合成するための手法開発に取り組んだ[21]。前駆体として、図 5 に示すように Sr と Ti を 1:1 で含む 2 核ペロキソ錯体 [Sr(H<sub>2</sub>O)<sub>5</sub>]<sub>2</sub>[Ti<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>)<sub>2</sub>O(NC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>6</sub>)<sub>2</sub>] を合成したところ、高い安定性を示した。この錯体を酸性水溶液に溶解し、SrTiO<sub>3</sub> および LSAT 基板に塗布して焼結したところ、原子レベルで平坦な表面構造を持つ正規組成 SrTiO<sub>3</sub>

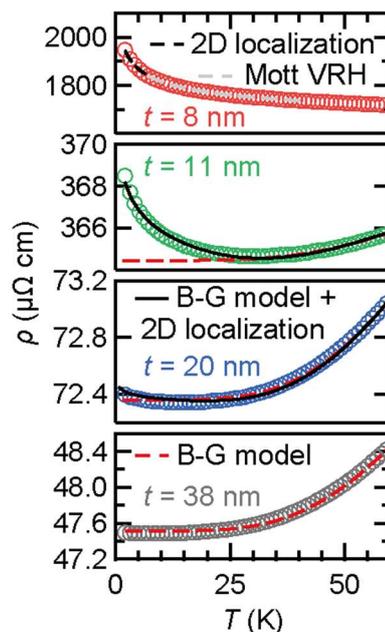


図 4. 異なる膜厚で合成した RuO<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜の抵抗率の温度依存性とフィッティングによる電気伝導機構の推定結果。

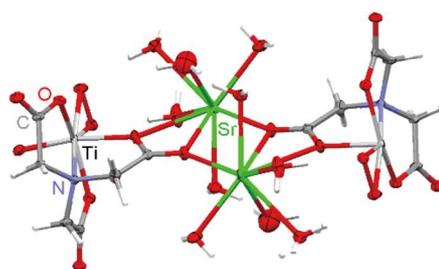


図 5. 単結晶 X 線回折により決定した Sr-Ti 2 核錯体の結晶構造。

エピタキシャル薄膜の合成に成功した。本手法は酸化物の正確な物性評価に活用できると期待される。

<引用文献>

- [1] N. F. Mott, *Can. J. Phys.* **34**, 1356-1368 (1956).
- [2] P. P. Edwards and M. J. Sienko, *Phys. Rev. B* **17**, 2575-2581 (1978)
- [3] D. Oka, Y. Hirose, S. Nakao, T. Fukumura, and T. Hasegawa, *Phys. Rev. B* **92**, 205102 (2015).
- [4] Y. Park, J. Roth, D. Oka, Y. Hirose, T. Hasegawa, A. Paul, A. Pogrebnnyakov, V. Gopalan, T. Biroł, and R. Engel-Herbert, *Commun. Phys.* **3**, 102 (2020).
- [5] D. Oka, Y. Hirose, M. Kaneko, S. Nakao, T. Fukumura, K. Yamashita, and T. Hasegawa, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 35008 (2018).
- [6] D. Oka, Y. Hirose, S. Nakao, T. Fukumura, and T. Hasegawa, *Commun. Phys.* **4**, 269 (2021).
- [7] S. Fukuda, D. Oka, and T. Fukumura, *Appl. Phys. Lett.* **116**, 123101 (2020). (Editor's Pick)
- [8] D. Kutsuzawa, D. Oka, and T. Fukumura, *Phys. Status Solidi* **257**, 2000188 (2020).
- [9] Z. Fatima, D. Oka, and T. Fukumura, *Cryst. Growth Des.* **21**, 4083 (2021).
- [10] M. Uchida, T. Nomoto, M. Musashi, R. Arita, and M. Kawasaki, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 147001 (2020).
- [11] K. Kaminaga, D. Oka, T. Hasegawa, and T. Fukumura, *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 6754 (2018).
- [12] N. Abe, D. Oka, K. Kaminaga, D. Shiga, D. Saito, T. Yamamoto, N. Kimura, H. Kumigashira, and T. Fukumura, *Phys. Rev. B* **106**, 125106 (2022).
- [13] H. Shimizu, D. Oka, K. Kaminaga, D. Saito, T. Yamamoto, N. Abe, N. Kimura, D. Shiga, H. Kumigashira, and T. Fukumura, *Phys. Rev. B* **105**, 014442 (2022).
- [14] D. Saito, K. Kaminaga, D. Oka, and T. Fukumura, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 064407 (2019).
- [15] D. Saito, D. Oka, K. Kaminaga, M. Kitamura, D. Shiga, H. Kumigashira, and T. Fukumura, *J. Mater. Chem. C* **11**, 12400 (2023).
- [16] T. Yamamoto, K. Kaminaga, D. Saito, D. Oka, and T. Fukumura, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 052402 (2020).
- [17] T. Amrillah, D. Oka, H. Shimizu, S. Sasaki, D. Saito, K. Kaminaga, and T. Fukumura, *Appl. Phys. Lett.* **120**, 082403 (2022).
- [18] S. Sasaki, D. Oka, K. Kaminaga, D. Saito, T. Yamamoto, N. Abe, H. Shimizu, and T. Fukumura, *Dalt. Trans.* **51**, 16648 (2022).
- [19] T. Fukasawa, D. Kutsuzawa, D. Oka, K. Kaminaga, D. Saito, H. Shimizu, H. Naganuma, and T. Fukumura, *J. Mater. Chem. C* **12**, 7652 (2024).
- [20] K. Kaminaga, D. Oka, H. Oka, and T. Fukumura, *Chem. Lett.* **48**, 1244 (2019).
- [21] E. E. Oyeka, D. Oka, E. Kwon, and T. Fukumura, *Inorg. Chem.* **60**, 1277 (2021). (Featured Article)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sasaki Satoshi, Oka Daichi, Kaminaga Kenichi, Saito Daichi, Yamamoto Taku, Abe Nobuto, Shimizu Hirokazu, Fukumura Tomoteru	4. 巻 51
2. 論文標題 A high-TC heavy rare earth monoxide semiconductor TbO with a more than half-filled 4f orbital	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 16648 ~ 16652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2DT02710K	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Abe Nobuto, Oka Daichi, Kaminaga Kenichi, Shiga Daisuke, Saito Daichi, Yamamoto Taku, Kimura Noriaki, Kumigashira Hiroshi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 106
2. 論文標題 Rocksalt CeO epitaxial thin film as a heavy-fermion system transiting from p-type metal to partially compensated n-type metal by 4f delocalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.125106	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Amrillah Tahta, Oka Daichi, Shimizu Hirokazu, Sasaki Satoshi, Saito Daichi, Kaminaga Kenichi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 120
2. 論文標題 Rock salt-type HoO epitaxial thin film as a heavy rare-earth monoxide ferromagnetic semiconductor with a Curie temperature above 130 K	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 082403 ~ 082403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0081040	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Shimizu Hirokazu, Oka Daichi, Kaminaga Kenichi, Saito Daichi, Yamamoto Taku, Abe Nobuto, Kimura Noriaki, Shiga Daisuke, Kumigashira Hiroshi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 105
2. 論文標題 Rocksalt-type PrO epitaxial thin film as a weak ferromagnetic Kondo lattice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 14442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.014442	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fatima Zainab, Oka Daichi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 21
2. 論文標題 Systematic Application of Extremely Large Strain to Rutile-Type RuO <sub>2</sub> (100) Epitaxial Thin Films on Substrates with Large Lattice Mismatches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 4083 ~ 4089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.1c00377	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Oka Daichi, Hirose Yasushi, Nakao Shoichiro, Fukumura Tomoteru, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 4
2. 論文標題 Electron localization induced by intrinsic anion disorder in a transition metal oxynitride	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00777-z	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 Oyeka Ebube E., Oka Daichi, Kwon Eunsang, Fukumura Tomoteru	4. 巻 60
2. 論文標題 Synthesis of Stoichiometric SrTiO <sub>3</sub> and Its Carrier Doping from Air-Stable Bimetallic Complexes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 1277 ~ 1283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c03457	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fukasawa Takato, Kutsuzawa Dai, Oka Daichi, Kaminaga Kenichi, Saito Daichi, Shimizu Hirokazu, Naganuma Hiroshi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 12
2. 論文標題 Enhanced Curie temperature near 300 K in highly crystalline GdO epitaxial thin films concomitant with an anomalous Hall effect	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 7652 ~ 7657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D4TC00738G	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fukuda Shintaro, Oka Daichi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 116
2. 論文標題 Metal-to-insulator transition in Ruddlesden-Popper-type $Sr_{n+1}V_nO_{3n+1}$ ( $n = 1, 2$ ) epitaxial thin films as a function of strain and $VO_2$ stacking layer number	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 123101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5136319	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Park Yoonsang, Roth Joseph, Oka Daichi, Hirose Yasushi, Hasegawa Tetsuya, Paul Arpita, Pogrebnjakov Alexej, Gopalan Venkatraman, Birol Turan, Engel-Herbert Roman	4. 巻 3
2. 論文標題 $SrNbO_3$ as a transparent conductor in the visible and ultraviolet spectra	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-020-0372-9	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 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Zhaochen Ma, Daichi Oka, Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Annealing effect on electrical conductivity in $Sr_3Cr_2O_7$ epitaxial thin films
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 智視、岡 大地、齋藤 大地、清水 宙一、福村 知昭
2. 発表標題 重希土類単酸化物強磁性半導体: $DyO \cdot ErO$ エピタキシャル薄膜
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 智視、岡 大地、神永 健一、齋藤 大地、清水 宙一、福村 知昭
2. 発表標題 岩塩構造テルビウム酸化物TbOの薄膜合成および物性評価
3. 学会等名 第38回希土類討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zainab Fatima, Daichi Oka, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Extremely large strain in rutile-type RuO <sub>2</sub> (100) epitaxial thin films
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 宙一、齋藤 大地、神永 健一、岡 大地、福村 知昭
2. 発表標題 PrOエピタキシャル薄膜における多様な磁性相の制御
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Sasaki, Daichi Oka, Kenichi Kaminaga, Daichi Saito, Nobuto Abe, Hirokazu Shimizu, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 New heavy rare earth ferromagnetic semiconductor: Rocksalt-type TbO
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 宙一, 阿部 展人, 山本 卓, 齋藤 大地, 神永 健一, 岡 大地, 木村 憲彰, 福村 知昭
2. 発表標題 近藤格子PrO エピタキシャル薄膜の低温物性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirokazu Shimizu, Nobuto Abe, Daichi Saito, Kenichi Kaminaga, Daichi Oka, Noriaki Kimura, Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Competing magnetic orders in PrO epitaxial thin films
3. 学会等名 PASPS-25 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daichi Saito, Daichi Oka, Kenichi Kaminaga, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Thickness Dependence of Magnetotransport Properties of Rocksalt NdO Epitaxial Thin Films
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 大地, Ebube E. Oyeka, 権 垠相, 福村 知昭
2. 発表標題 二核錯体を用いた正規組成SrTiO <sub>3</sub> エピタキシャル薄膜の合成
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hongming Zhang, Masamichi Negishi, Daichi Oka, and Tomoteru Fukumura
2. 発表標題 Epitaxial thin film growth and properties of perovskite-type Ir-doped SrVO <sub>3</sub>
3. 学会等名 令和5年度化学系協会東北大会及び日本化学会東北支部80周年記念国際会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉村 英竜、岡 大地、根岸 真通、佐々木 智視、福村 知昭
2. 発表標題 新希土類単酸化物TmOの薄膜合成と物性
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐々木 智視、岡 大地、志賀 大亮、中田 勝、和達 大樹、組頭 広志、福村 知昭
2. 発表標題 重希土類単酸化物エピタキシャル薄膜の単相化と電子・磁気物性
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐々木 智視、岡 大地、根岸 真通、福村 知昭
2. 発表標題 単相の重希土類単酸化物エピタキシャル薄膜の電子輸送特性
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 深沢 崇人, 岡 大地, 神永健一, 齋藤大地, 清水宙一, 福村 知昭
2. 発表標題 高温強磁性半導体GdOエピタキシャル薄膜の結晶性と物性の改善
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 大地, 岡 大地, Z. C. Sun, B. C. Mei, 福村 知昭
2. 発表標題 CaF <sub>2</sub> 基板上でのNdOエピタキシャル薄膜の合成と物性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022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	福村 知昭  (Fukumura Tomoteru)  (90333880)	東北大学・理学研究科・教授    (11301)	

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			
米国	The Pennsylvania State University			
中国	武漢理工大学			