

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02588

研究課題名（和文）薄膜格子歪みによるTi2O3の金属絶縁体転移制御と応用

研究課題名（英文）Control of metal-insulator transition of Ti2O3 films by epitaxial strain

研究代表者

吉松 公平（Yoshimatsu, Kohei）

東北大学・多元物質科学研究所・講師

研究者番号：30711030

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、典型的な遷移金属酸化物である三酸化チタン（Ti2O3）の薄膜を用いることで、Ti2O3で発現する金属絶縁体転移の起源を明らかにすることを目的とした。Ti2O3薄膜では、合成温度により室温での格子変形度合いが大きく異なることを見出した。特に低温成長した薄膜では面直方向に伸長し、バルク体で見られる金属絶縁体転移が発現せずに金属的な基底状態を持つことが明らかとなった。得られたTi2O3薄膜の角度分解光電子分光測定から、電子構造の直接観測を行なった。その結果、運動量空間での電子状態が初めて明らかになり、理論計算とよく一致するフェルミ面やバンド分散が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

典型的なd1電子系の単純酸化物にも関わらず、三酸化チタン（Ti2O3）では温度変化で示す相転移の起源は未だ明らかになっていない。Ti2O3は温度変化による結晶格子の変形も大きいため、相転移が温度で発現する現象なのか、格子変形で発現する現象なのか明らかになっていない。本研究では基板応力により格子変形が可能な薄膜を用いることで、今までのバルク体研究では解明不可能な相転移と格子変形の関係を明らかにした。合成条件により室温での格子変形度合いを任意に制御することで、Ti2O3で発現する金属絶縁体転移が温度によらず、特定の格子変形度合いで発現することを見出した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the mechanism of the metal-insulator transition of Ti2O3, which is one of the typical transition-metal oxides, using a thin-film form. We found that the degree of lattice deformation was modulated in the growth conditions. Especially, the film grown on low temperatures extended along the out-of-plane direction and exhibited metallic ground states without showing the metal-insulator transition. We also performed angle-resolved photoemission spectroscopy to reveal the electronic structures in momentum space. We found that the experimental and calculated band structures were in good agreement with each other in Ti2O3.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：Ti2O3 金属絶縁体転移 薄膜 パルスレーザー堆積法 強相関酸化物

## 1. 研究開始当初の背景

Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はコランダム型構造を持ち、室温における *c* 軸長と *a* 軸長の比 (*c/a* 比) は 2.639 と、典型的なコランダム型構造を持つ酸化物のサファイア ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の *c/a* 比である 2.73 よりも遥かに小さい。これは、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が *c* 軸方向に Ti<sup>3+</sup>-Ti<sup>3+</sup> の強い *a*<sub>1g</sub>-*a*<sub>1g</sub> 結合を形成し、*c* 軸方向に大きく縮むためである。Ti 3*d* 電子は *a*<sub>1g</sub> 軌道由来のバンドに局在し、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は Mott 絶縁体となる。温度上昇により *c/a* 比は増加し、~450 K で金属絶縁体転移を示す。Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の金属絶縁体転移は 1950 年代に既に報告されており[1]、*c/a* 比の増減に伴うバンド構造の変化が金属絶縁体転移の起源と考えられていた[2]。しかし近年、*c/a* 比の変化に伴う Ti 3*d* 電子の軌道占有率の増減が金属絶縁体転移の起源とする新たな説も提唱されている[3]。そのため、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は典型的な *d* 電子系の遷移金属酸化物にも関わらず、その金属絶縁体転移の起源は未だ明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、薄膜形状を用いて Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の金属絶縁体転移の起源に迫ることを目的とする。薄膜は基板応力によりバルク体では不可能な結晶格子の変形が実現可能であり、結晶構造と電子構造が密接に関係した相転移研究に対して有効である。基板を適切に選択することで、同一組成の薄膜でも基板との格子ミスマッチにより面内・面直の格子定数が変調可能である。そのため、同一温度で *c/a* 比の異なる Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜試料が合成可能であり、測定温度の影響を排除した純粋な *c/a* 比と金属絶縁体転移の関係を明らかにできる。

金属絶縁体転移には電子状態を明らかにすることが重要である。三次元的なコランダム型構造は劈開面を持たないが、表面がよく定義された Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を用いることで表面敏感な電子分光測定が可能となる。特に、運動量空間の電子構造が直接決定可能な角度分解光電子分光測定により、電子物性に直接関係するフェルミ面が実験的に決定できる。これら薄膜の特徴を生かし、バルク体では実現不可能であった Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の *c/a* 比と金属絶縁体転移の関係を明らかにすることを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の合成と評価

Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜はパルスレーザー堆積法を用いて合成を行なった。基板には  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001)面と、4H-SiC (0001)面を用いた。ターゲットに TiO 焼結体を用い、酸素ガスを  $5 \times 10^{-7}$  Torr 導入することで単相の Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を合成した。基板温度は 500°C から 1050°C の間で変化させた。薄膜が Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相を持つことは Raman 分光測定から明らかにした。Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の *a* 軸長と *c* 軸長は X 線回折測定の逆格子マッピングから明らかにした。Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の電子物性は、10 K から 650 K までの温度範囲での抵抗率の温度依存性から明らかにした。得られた抵抗率曲線を微分することで金属絶縁体転移温度 ( $T_{MIT}$ ) と金属伝導温度 ( $T_{MC}$ ) を決定した。

### (2) Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の角度分解光電子分光

$\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001)面基板上に 1000°C で堆積した薄膜に関して、軟 X 線を用いた角度分解光電子分光(SX-ARPES)測定を行なった。SX-ARPES は KEK-PF の BL2 に Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜試料を高真空下で搬送することで、試料合成から ARPES 測定までを Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を大気にさらすことなく行なった。測定温度は 100 K に設定し、エネルギー分解能はおよそ 200 meV とした。

### (3) 密度汎関数法による Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の電子状態計算

DFT + *U* 法を用いて Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の電子状態計算を行なった。計算には Quantum ESPRESSO[4]を用いた。単位格子には計算コストを減らすために rhombohedral 構造を用い、ARPES 測定との比較ではコランダム型構造に単位格子の変換を行なった。様々な *c/a* 比を持つ Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に対し、self-consistent 計算では格子定数を固定したまま Ti と O の原子位置を最適化した。その後、non-self-consistent 計算により状態密度やバンド分散を計算した。

## 4. 研究成果

### (1) $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001)基板上の Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の金属絶縁体転移

$\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001)基板上へ  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜を低温 (500°C) と高温 (1000°C) の両条件で堆積した。両薄膜が(0001)面直配向の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  であることは Raman 分光測定と対称面 X 線回折測定から明らかにした。4 軸 X 線回折測定から薄膜の  $a$  軸長と  $c$  軸長を決定し  $c/a$  比を求めたところ、高温成長した薄膜では  $c/a = 2.696$ 、低温成長した薄膜では  $c/a = 2.781$  と大きく異なることが明らかとなった。対称面 X 線回折測定の薄膜ピークの  $2\theta$  半値幅や、薄膜の表面形状(図 1 挿入図)から、成長温度で薄膜のグレインサイズが大きく異なることが明らかとなった。 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  ナノ粒子の先行研究[5]から、 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  では結晶のグレインサイズが小さくなると  $c/a$  比が大きくなることが知られており、薄膜においても成長温度の低下により薄膜グレインが小さくなり、 $c/a$  比が増大したと考えられる。これらグレインサイズが異なる  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の抵抗率の温度依存性を図 1 に示す。高温成長したグレインサイズの大きな ( $c/a$  比の小さな)  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜では、~200 K で 1 桁の抵抗変化が観測された。転移温度はバルク体と比較して 200 K 以上低いものの、緩やかな抵抗変化の特徴から金属絶縁体転移が発現したと考えられる。一方で、高温成長したグレインサイズの小さな ( $c/a$  比の大きな)  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜では、金属的な伝導が極低温まで観測され、金属絶縁体転移が消失した。 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  バルク体の金属絶縁体転移と  $c/a$  比の相関から、低温成長した  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜では大きく伸張した  $c$  軸長により金属状態が全温度領域で安定となったと結論づけた。

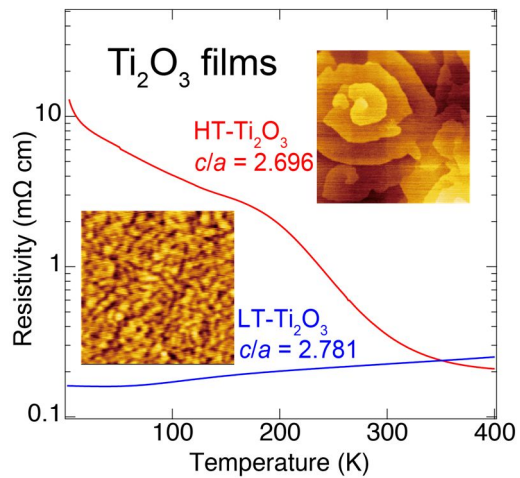


図 1.  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の抵抗率の温度依存性。挿入図は原子間力顕微鏡で測定した薄膜の表面形状像。

## (2) 4H-SiC (0001)基板上の $\text{Ti}_2\text{O}_3$ 薄膜の金属絶縁体転移

$\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001)基板上の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜では、低温 (500°C) と高温 (1000°C) での合成により、 $c/a$  比の異なる  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜が得られた。しかしながら、その中間温度では異相が生成し、単相の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜が得られていない。そのため、系統的な  $c/a$  比の制御が不完全という問題が残されていた。そこで、広い合成温度で単相の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜が成長可能な基板の検討を行なった。局所的な構造のマッチングまで考慮に入れることで、4H-SiC 基板が  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の成長に適していると考えられる。

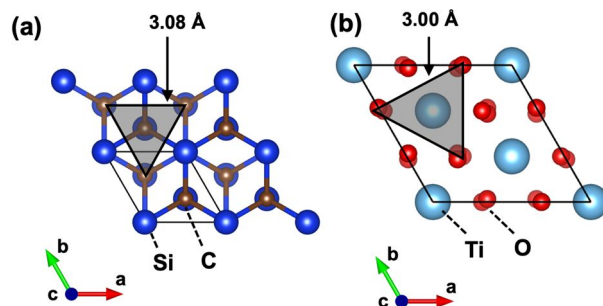


図 2. (a) 4H-SiC と (b)  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の(0001)面の投影図。両者の格子定数は大きく異なるが、図中の三角形の構造に着目すると、そのミスマッチは約 3% と小さい。

図 2 に 4H-SiC と  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の(0001)面の投影図を示す。4H-SiC の  $a$  軸長は 3.08 Å と  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の  $a$  軸長 ( $a = 5.157$  Å) とは大きく異なるが、図 2 中の三角構造に着目すると、両者のミスマッチはおよそ 3% となり、 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001)面との格子ミスマッチの 8.3% よりも小さい。そのため、4H-SiC (0001)面上には  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  相が安定して成長すると期待される。そこでパルスレーザー堆積法を用いて、4H-SiC (0001)基板上に様々な温度で  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の合成を行なった。その結果、Raman 分光測定と対称面 X 線回折測定から、成長温度 500 ~1050 の範囲で(0001)面直配向の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜が得られることが明らかとなった。また逆格子マッピング測定から薄膜の室温における  $c/a$  比を算出したところ、1000 °C で成長した薄膜が  $c/a = 2.672$  と最も小さく、500 °C で成長した薄膜が  $c/a = 2.821$  と最も大きいことが明らかとなった。この結果は、室温における  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の  $c/a$  比を、成長温度を変えることで 2.672~2.821 の範囲で任意に制御できることを意味している。

合成した薄膜の電気特性を抵抗率の温度依存性から明らかにした。その結果を図 3 に示す。700 °C 以上で成長した薄膜では、 $T_{\text{MIT}}$  はバルク  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  と比較して低いものの、1 桁の抵抗変化を伴う緩やかな金属絶縁体転移が観測された。転移温度の違いは  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001)基板上

の薄膜と同様に室温での  $c/a$  比の違いによるものと考察される。一方 650 以下で成長した薄膜では、測定した温度領域では 1 桁の抵抗変化が見られず、金属絶縁体転移が消失した。実際、これら低温成長した薄膜の室温での  $c/a$  比は大きく、 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) 基板上的薄膜の結果とも一致する。

$\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の金属絶縁体転移を定量的に評価するため、抵抗率曲線を一回微分することで  $T_{\text{MIT}}$  (一回微分が極小値を示す温度) と  $T_{\text{MC}}$  (一回微分が 0 になる温度) を算出した。  $T_{\text{MIT}}$  と  $T_{\text{MC}}$  を室温の  $c/a$  比に対してプロットした結果を図 4(a) に示す。薄膜の  $T_{\text{MIT}}$  と室温の  $c/a$  比が直線上にあり、その係数は  $-3 \times 10^3$  [K/( $c/a$ )] であった。この係数を用い小さな  $c/a$  比の方に直線を外挿すると、バルクのデータ ( $c/a = 2.639$ ,  $T_{\text{MIT}} = 433$  K) が直線上に乗ることがわかる。一方で、この直線を大きな  $c/a$  比の方に外挿すると、 $c/a = 2.77$  で 0 K となることがわかる。すなわち、室温で  $c/a \geq 2.77$  の  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜では金属絶縁体転移が消失することを意味している。実際に 650 以下で成長し金属絶縁体転移を示さない薄膜では  $c/a \geq 2.77$  となっており、実験結果とよく一致している。

$T_{\text{MC}}$  も  $c/a$  が小さい領域では係数が  $-3 \times 10^3$  [K/( $c/a$ )] の直線関係にあり、金属絶縁体転移と同様の現象を見ていることがわかる。一方で、金属絶縁体転移が消失する  $c/a \geq 2.77$  では直線の傾向から外れており、転移温度の上昇は欠陥でのキャリアの局在によるものと考察される。

$\text{Ti}_2\text{O}_3$  は温度による結晶格子の変形度合いが大きく、室温での  $c/a$  比で別の温度で発現する相転移の議論を行うことは適切ではない。そこで、 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  バルク体の格子定数の温度依存性から結晶格子の熱膨張係数[7]を算出し、 $c/a$  比の温度補正をしたのちに  $T_{\text{MIT}}$  と  $T_{\text{MC}}$  を再度プロットした。その結果を図 4(b) に示す。  $T_{\text{MIT}}$ ,  $T_{\text{MC}}$  とともに  $c/a$  が一定の直線上に乗っていることがわかる。この結果は、薄膜の室温における  $c/a$  比の値にかかわらず、 $c/a = 2.68$  となる温度で金属絶縁体転移が発現することを意味している。

$\text{Ti}_2\text{O}_3$  における臨界  $c/a$  比による金属絶縁体転移の発現を検証するため、DFT +  $U$  法による理論計算を行なった。ここでは、 $c/a$  比のみを様々に変化させた  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の状態密度を計算し、フェルミ準位上に形成するギャップサイズを見積もった。その結果を図 5 に示す。  $c/a = 2.639$  (室温におけるバルク値) では、80 meV のエネルギーギャップがフェルミ準位上に形成し、このギャップサイズは実

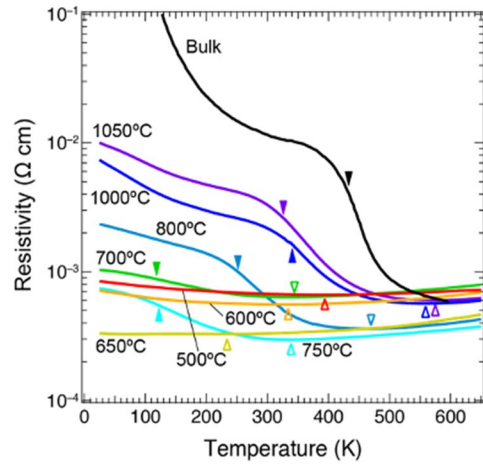


図 3. 4H-SiC(0001) 基板上に合成した  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の抵抗率の温度依存性。参考に  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  バルクの結果[6]も同時に示した。

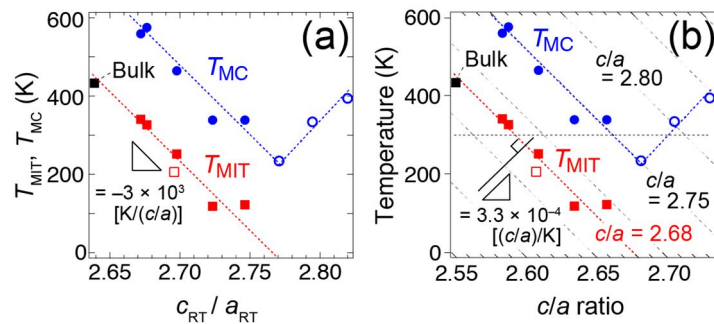


図 4. (a) 室温での  $c/a$  比 ( $c_{\text{RT}}/a_{\text{RT}}$ ) に対する金属絶縁体転移温度 ( $T_{\text{MIT}}$ ) と金属伝導温度 ( $T_{\text{MC}}$ ) のプロット。(b)  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  バルク体の熱膨張係数を考慮した  $c/a$  比と  $T_{\text{MIT}}$ ,  $T_{\text{C}}$  のプロット。

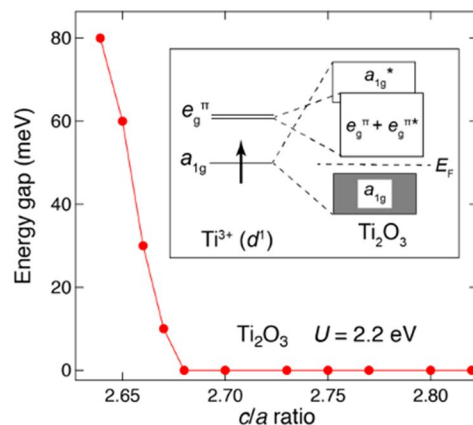


図 5. 様々な  $c/a$  比を持つ  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  のフェルミ準位上のエネルギーギャップ。臨界  $c/a$  比である 2.68 でギャップが閉じ、金属絶縁体転移が発現する。挿入図は  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  のフェルミ準位近傍のエネルギーダイアグラムの模式図。



験と一致している[8]。 $c/a$  比が大きくなるとギャップサイズが小さくなり、 $c/a = 2.68$  でちょうどギャップが閉じて金属状態となる結果が得られた。すなわち、DFT +  $U$  法による電子状態計算においても  $c/a$  比による金属絶縁体転移が再現され、金属絶縁体転移を起こす臨界  $c/a$  比が 2.68 である点もよく一致した。これら実験と計算結果から、 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の金属絶縁体転移は格子変形に伴う  $c/a$  比に支配されるものと結論づけた。

本結果は、基板との格子マッチングや成長温度による薄膜のドメインサイズ制御を活用した薄膜特有の結果であり、従来バルク体のみを用いて行われてきた  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  研究に新しい視点をもたらし、金属絶縁体転移の起源に関する決定的な実験事実を提示した重要な成果である。

### (3) $\text{Ti}_2\text{O}_3$ 薄膜の角度分解光電子分光測定によるバンド分散の直接観測

$\text{Ti}_2\text{O}_3$  の金属絶縁体転移を議論する上で、電子状態の直接観測は重要である。特に角度分解光電子分光は、運動量空間におけるバンド分散が直接決定可能な実験手法である。しかし 3 次元構造を持つ  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  では、劈開面がないためにバルク体では清浄表面が得られず、角度分解光電子分光測定が実現してこなかった。そこで表面がよく定義された  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜を用い、角度分解光電子分光測定を行なった。得られたバンド分散と、DFT +  $U$  法 ( $U = 2.2$  eV) を用いた計算結果を図 6 に示す。図 6 左の実験結果から明瞭なバンド分散が観測されており、 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の角度分解光電子分光測定に初めて成功したことを示している。本測定は  $e_g^\pi$  軌道由来のバンドが観測される実験配置であり、実験と  $e_g^\pi$  軌道由来のバンド計算とを比較するとバンド分散が非常によく一致していることが見て取れる。一方で、クーロン反発を考慮しない単純な DFT 法による  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  のバンド計算[9]では、実験的に得られたバンド分散は全く再現されなかった。これらの結果から、 $\text{Ti}_2\text{O}_3$  の電子状態を記述するには電子相関が非常に重要であると結論づけた。

#### 参考文献

- [1] F. J. Morin, Phys. Rev. Lett. **3**, 34 (1959).
- [2] L. L. Van Zandt *et al.*, J. Appl. Phys. **39**, 594 (1968).
- [3] C. F. Chang *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 021004 (2018).
- [4] P. Giannozzi *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **21**, 395502 (2009).
- [5] Y. Tsujimoto *et al.*, J. Asian Ceram. Soc. **3**, 325 (2015).
- [6] M. Uchida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 066406 (2008).
- [7] J. J. Capponi *et al.*, Solid State Commun. **20**, 893 (1976).
- [8] J. M. Honig *et al.*, Phys. Rev. **174**, 1020 (1968).
- [9] L. F. Mattheiss, J. Phys.: Condens. Matter **8**, 5987 (1996).

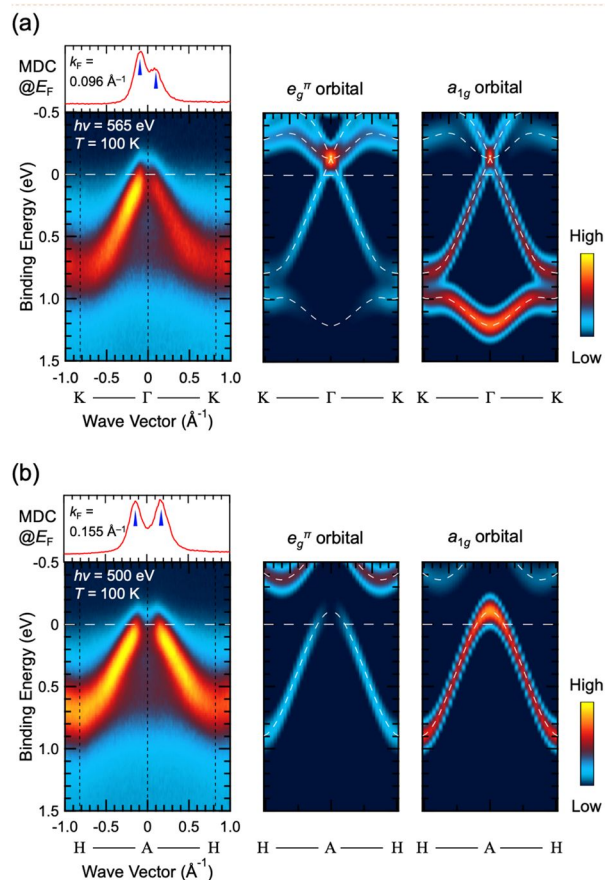


図 6.  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  薄膜の(a)  $\Gamma$ -K 方向と(b) A-H 方向のバンド分散。比較のため、DFT +  $U$  法で計算した  $e_g^\pi$  と  $a_{1g}$  軌道由来のバンド分散も同時に示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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<br>Mizushiro Jun, Yoshimatsu Kohei, Ohashi Naoki, Tanaka Masahiko, Sakata Osami, Ohtomo Akira  | 4. 巻<br>127                   |
| 2. 論文標題<br>Optical and structural investigations on titanium oxynitride films for visible-UV photocatalytic applications                            | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>135301 ~ 135301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5143609   | 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>Shiga D., Yang B. E., Hasegawa N., Kanda T., Tokunaga R., Yoshimatsu K., Yukawa R., Kitamura M., Horiba K., Kumigashira H.                | 4. 巻<br>102                   |
| 2. 論文標題<br>Thickness dependence of electronic structures in VO <sub>2</sub> ultrathin films: Suppression of the cooperative Mott-Peierls transition | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>115114 ~ 115114 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.102.115114   | 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>Soma Takuto, Yoshimatsu Kohei, Ohtomo Akira   | 4. 巻<br>6                     |
| 2. 論文標題<br>p-type transparent superconductivity in a layered oxide  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Science Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>eabb8570        |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1126/sciadv.abb8570  | 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>Yoshimatsu K., Hasegawa N., Nambu Y., Ishii Y., Wakabayashi Y., Kumigashira H.  | 4. 巻<br>10                    |
| 2. 論文標題<br>Metallic ground states of undoped Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> films induced by elongated c-axis lattice constant                      | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>22109 ~ 22109   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-020-79182-5  | 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>Soma Takuto, Kobayashi Tomohiro, Yoshimatsu Kohei, Ohtomo Akira                                     | 4. 巻<br>90                    |
| 2. 論文標題<br>Superconducting Dome Underlying Bipolaronic Insulating State in Charge-doped Ti407 Epitaxial Films | 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>023705 ~ 023705 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.90.023705  | 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>Mizushiro Jun, Yoshimatsu Kohei, Ohashi Naoki, Tanaka Masahiko, Sakata Osami, Ohtomo Akira                     | 4. 巻<br>127                   |
| 2. 論文標題<br>Optical and structural investigations on titanium oxynitride films for visible-UV photocatalytic applications | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>135301 ~ 135301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5143609  | 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>G. Shibata, K. Yoshimatsu, E. Sakai, K. Ishigami, S. Sakamoto, Y. Nonaka, F. -H. Chang, H. -J. Lin, D. -J. Huang, C. -T. Chen, H. Kumigashira, and A. Fujimori                      | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Temperature evolution of magnetic phases near the thickness-dependent metal-insulator transition in La <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> MnO <sub>3</sub> thin films observed by XMCD | 5. 発行年<br>2020年 |
| 3. 雑誌名<br>J. Phys. Conf. Proc.  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 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>該当する    |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Yoshimatsu K., Ishimaru J., Watarai K., Yamamoto K., Hirata Y., Wadati H., Takeda Y., Horiba K., Kumigashira H., Sakata O., Ohtomo A. | 4. 巻<br>99        |
| 2. 論文標題<br>Magnetic and electronic properties of B-site-ordered double-perovskite oxide La <sub>2</sub> CrMnO <sub>6</sub> thin films           | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.99.235129  | 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>-         |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉松 公平、長谷川 直人、南部 雄亮、石井 祐太、若林 裕助、組頭 広志 |
| 2. 発表標題<br>金属伝導を示すTi2O3薄膜                       |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                    |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Yoshimatsu   |
| 2. 発表標題<br>Investigation of Electronic and Magnetic Properties for Complex Transition-Metal Oxides using Soft X-ray Spectroscopy |
| 3. 学会等名<br>GP-Spin Student Organized Seminar 2020 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Yoshimatsu  |
| 2. 発表標題<br>Superconducting titanate films, epitaxial growth and distinction of crystal phases                               |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19), Symposium on Epitaxy of Complex Oxides (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Yoshimatsu, O. Sakata, A. Ohtomo                              |
| 2. 発表標題<br>Superconductivity in higher titanates of g-Ti3O5 and Ti4O7 films |
| 3. 学会等名<br>26th International Conference on Oxide Electronics (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2019年   |



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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