

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01805

研究課題名(和文) 表面内バンド傾斜によるキャリアフロー制御と光触媒活性の可視化による相関解析研究

研究課題名(英文) Control of photocatalytic activity by designing the carrier flow using a lateral potential gradient and visualization of photocatalytic characteristics by correlation analysis

研究代表者

小澤 健一 (Kenichi, Ozawa)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号：00282822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：光触媒である二酸化チタンの結晶表面に、表面平行方向のバンド傾斜を導入して光励起キャリアのフローを制御することで光触媒の高活性化を狙った研究である。表面電子構造の評価と局所的な光触媒活性の評価は、マイクロ集光した軟X線放射光ビームを使った顕微分光測定により行った。結晶表面にバンド傾斜を導入する方法として最も効果的だったのが、二酸化チタンのアナターゼ相とルチル相の接合をアナターゼ結晶表面上に作ることであった。そしてこの接合領域では、バンド傾斜のない領域に比べて光触媒活性が有意に高くなっていることを明らかにした。バンド傾斜によるキャリアフロー制御が、光触媒活性化に結び付いていることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化チタンの光触媒活性は、アナターゼ結晶とルチル結晶が混晶を作った時に高くなることが知られている。二相でエネルギー準位が異なるため相界面で不連続的なエネルギー準位接続あり、それが光励起キャリアを効率的に分離させて高活性化に寄与しているとするモデルが提案され受け入れられてきた。本研究は、界面でのエネルギー準位接続を実験的に決定し、界面の光触媒活性を他の領域と区別して評価した初めての例であり、学術的に意義のある成果である。一方、光励起キャリアのフロー制御は、光触媒の高活性化だけでなく、太陽電池の変換効率の向上にも応用可能な技術であり、再生可能エネルギーの利用効率化に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to enhance photocatalytic activity by artificially creating a potential gradient in a direction parallel to the photocatalyst surface to control the flow of photoexcited carriers. The surface electronic structure and local photocatalytic activity were evaluated by microscopic spectroscopy using a micro-focused soft X-ray synchrotron radiation beam. The most effective way to create a potential gradient on the crystal surface was to fabricate a junction between the anatase and rutile phases of titanium dioxide on the anatase crystal surface. Photocatalytic activity at the junction was found to be higher than in the region without the potential gradient. This indicates that the flow of carriers parallel to the surface can be controlled by the potential gradient, leading to improved photocatalytic activity.

研究分野：表面科学

キーワード：キャリアフロー 顕微測定 軟X線分光 可視化 多量変数解析 光触媒 光電子分光 エネルギー準位接続

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

2030年までに達成すべき持続可能な開発目標のうち、目標7では再生可能エネルギーの利用拡大が目標達成に大きな役割を果たす。その最大のターゲットが太陽光であり、太陽電池や光触媒は太陽エネルギーを電気エネルギーや化学エネルギーに変換するデバイス(材料)として実用化されている。現在でもより高い変換効率を目指した研究開発が続けられており[1],その中心課題が光励起キャリア(電子と正孔)の“フロー(拡散・ドリフト)”制御である。

従来より、バンドエンジニアリングでキャリアフローを制御する試みがあったが、光吸収材料のバルクと表面の間で電子準位にエネルギー差を作りバンド傾斜を導入する方法がその一例である[2](図1a)。基板表面上に調製した光吸収材料の薄膜は代表的かつ一般的な例であり、表面垂直方向にポテンシャル傾斜を持つバンドが自発的に形成され得る。この場合、光励起キャリアは表面-バルク間(あるいは表面-界面間)の“垂直”方向に移動することになる。太陽電池では光吸収材料を正極と負極の二つの電極でサンドイッチするため、垂直方向のキャリアフローは問題にならない(むしろ理想的である)。しかし光触媒では、電子と正孔のどちらかのキャリアが先に表面に出てくるため、過渡的に光触媒反応として常に対で起こる酸化反応・還元反応の不均化が生じてしまい、必ずしも好ましい状況ではない。

これに対して、表面内(平行方向)のバンド傾斜(図1b)では、局所的な電荷不均衡は起こるが巨視的には電気的中性が保たれ、酸化反応と還元反応の回転数(turnover number)が時間的に等しいまま光触媒反応が進行する。そのため垂直バンド傾斜に比べて高活性が期待できる。表面内バンド傾斜が実現できているだろう表面系として、二つのドメインや結晶面の接合界面[3]や不均一元素ドーピングされた表面が候補として挙げられる。こういった場所では、傾斜バンドの“上”と“下”で酸化反応と還元反応がそれぞれ進行するだろう(図1b)。しかし、このような酸化還元反応に基づく光触媒活性の発現は、表面の局所的なバンド傾斜と光触媒活性を結び付けることが困難であるため、いまだに実証されていない。表面で何が起きているのかという問いに対して正しい解答を与え、光触媒設計に指針を示すためには、光触媒反応に参与する諸物性を系統的に分析して、それらの相互関係を明らかにすることが必須である。

2. 研究の目的

本研究は、光触媒結晶表面に表面平行方向のバンド傾斜を人為的に導入し、光励起キャリアのフローを制御して光触媒反応の活性化の実現に向けた取り組みを行う。バンド傾斜の導入には、(1)異なる結晶面の接合(結晶方位の異なるドメインの接合)、(2)異なる結晶構造を持つドメインの接合、(3)アルカリ金属の表面不均一ドーピング、の3方式を取り入れる。表面の評価と光触媒活性の評価は、マイクロ集光した軟X線放射光ビームを使った顕微光電子分光測定と顕微X線吸収分光測定により行う。表面組成、電子構造、化学活性といった実験から得られた諸物性を二次元可視化し、データの多量変数解析により諸物性と光触媒反応との相関を検証する。これにより、バンド傾斜によるキャリアフローの制御により光触媒活性が決まるか否かを実験的に証明するとともに、高活性な光触媒表面の設計につなげる指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

顕微光電子分光と顕微X線吸収分光測定は、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設のビームラインBL-13Bで行った。このビームラインでは、トロイダル集光ミラーを用いて軟X線領域のエネルギーを持つ放射光を $15\ \mu\text{m}$ (垂直方向) $\times 80\ \mu\text{m}$ (水平方向)に絞り顕微測定ができる[4]。 $1\ \mu\text{m}$ 以下の高精度で試料位置を変えることのできる試料マニピュレータ[5]を用いて、内殻光電子ピークの強度あるいはX線吸収端の吸収強度をモニターしながら、表面の元素分布、電子構造、あるいは結晶構造の分布を測定した。

測定試料は、二酸化チタン(TiO_2)単結晶をベースに3種類を調製した。一つ、天然アナターゼ型 TiO_2 単結晶の(101)面と(001)面が接して直線エッジを形成している試料であり、メーカー(SurfaceNet GmbH社)へオーダーして作製した特注品である。二つ目は、アナターゼ型 TiO_2 とルチル型 TiO_2 が接合した試料である。バルクの天然アナターゼ型 TiO_2 単結晶を購入し(エヌ

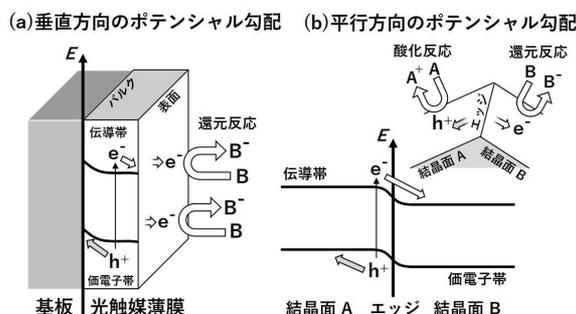


図1: 表面垂直方向(a)と水平方向(b)のバンド傾斜と表面での酸化還元反応の模式図。

ズミネラル社), 4 mm × 5 mm × 1 mm に切り出して表面研磨したものである。この結晶を電気炉で加熱して(900 設定), 表面の一部を溶融・再結晶化させ, さらに表面研磨をして平坦化させた。溶融・再結晶化した領域がルチル相に転移していることは, X 線吸収分光測定により確かめた。三つ目は, ルチル型 TiO₂(110)単結晶表面にカリウムを蒸着させた試料である。いずれのTiO₂ 試料も, 酸素ガス雰囲気下での 600 °C アニールと Ar⁺スパッタリングを繰り返すことで, TiO₂ 表面の清浄化を行った。ルチル型 TiO₂(110)表面への不均一カリウム吸着では, マスクを併用しながら, ディスペンサー (SAES 社) への通電加熱によりカリウムを飛散させて表面に蒸着させた。

光触媒活性は, 375 nm の紫外光レーザー (Obis375LX) を照射させることで表面に吸着させた酢酸分子が時間と共に脱離して減少する速さを調べることで評価した。酢酸は, 室温で蒸気となった酢酸ガスを超高真空チャンバーに導入して, 試料表面に室温で飽和量を吸着させた。

4. 研究成果

4 - 1. TiO₂(101)/(001)エッジ試料

(101)と(001)面では, 価電子バンドや構成元素 (Ti, O) の内殻準位の結合エネルギーが異なる。図 5 は, (101)面からエッジを経て(001)面に至る 500 μm ほどの領域を一次元走査しながら測定した O 1s と Ti 2p_{3/2} 内殻準位光電子スペクトルである。(101)面での O 1s と Ti 2p 準位は, (001)面より約 0.2 eV 大きな結合エネルギーを持っており, エッジで急激にそのエネルギーが変わっていることが分かる。両準位のエッジ位置からの距離に対する結合エネルギーの変化(図 2 の挿入図)を比べると, 二つの内殻準位でほぼ同じである。価電子バンドでも同様の結果を得ている。内殻準位と価電子バンドで同じエネルギーシフトを示すことから, その原因はバンドベンディングによるものだと結論できる。さらに, バルクは共通なので, 観測されているバンドベンディングは純粋に表面原子配列の違いで生じたものと言える。

光励起キャリアの挙動を考察すると, 価電子帯と伝導帯にある正孔と電子は, ポテンシャルを感じながら運動するため, エッジでは電子は(101)面側に, 正孔は(001)面側にドリフトすることが予想できる。一方, どちらのテラス面もエッジから離れた位置ではポテンシャル勾配はほぼないため, キャリアは熱ドリフトで拡散する。つまり, エッジでは効率的に電子と正孔の分離が行われているため, 光触媒活性はテラスに比べると高くなると予想された。

エッジ領域と二つのテラス面で, 光触媒活性を評価した結果を図 3 に示す。ここではプローブ分子として酢酸を用い, 表面に酢酸を飽和吸着させたのち, 紫外光レーザーを照射しながら C 1s スペクトルを測定した。吸着酢酸が光触媒反応で分解脱離すると C 1s スペクトル強度が減衰するため, 活性が高く分解脱離の速度が大きいと C 1s 強度の減衰も早いことになる。図 3 左側の三パネルは, 上から(001)テラス面, エッジ, (101)テラス面での C 1s スペクトルの時間変化を示している。二つのピークは, 酢酸, あるいはアセテート (CH₃COO) のメチル基炭素 (低結合エネルギー側) とカルボキシル基炭素 (高結合エネルギー側) に帰属される。200 min の紫外光照射でもピーク強度の減衰は小さいが, 確実に減少した。図 3 右側の図が, 照射前の強度を 1.0 とした時の照射時間に対する減衰の割合である。最も大きく減衰するのが(101)テラス面で, 最も減衰が小さいのが(001)面であり, エッジはその中間であった。(101)テラス面が最も光触媒活性が高く, エッジの活性は必ずしも高くはないことが明らかになった。これは当初の予想に反したものであった。

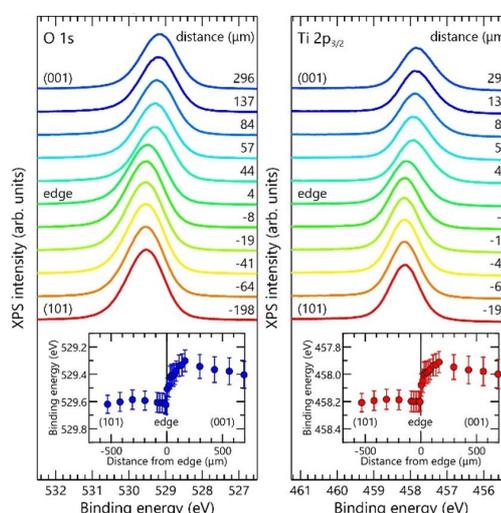


図 2: アナターゼ TiO₂ 結晶の, (101)面からエッジを経て(001)面に至る直線上で測定した O 1s と Ti 2p_{3/2} 内殻準位の光電子分光スペクトル。光エネルギーは 764 eV。挿入図は, エッジからの距離に対する内殻準位の結合エネルギーをプロットした結果。

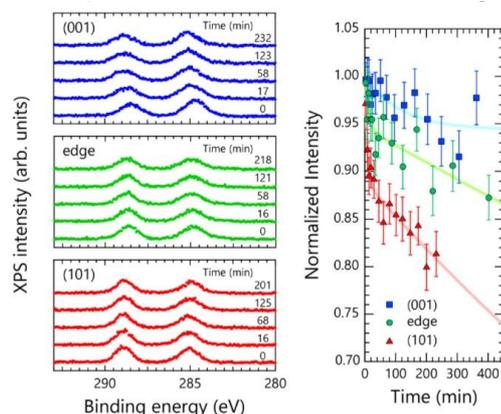


図 3: (左) 酢酸飽和面の C 1s スペクトルの紫外光レーザー照射時間依存スペクトル。上から(001)テラス, エッジ, (101)テラス。光エネルギーは 413 eV。(右) 紫外光レーザー照射で減衰する C 1s ピーク強度の照射時間依存性。

ポテンシャル勾配のあるエッジで光触媒活性が高くなかなかたのは、次の二つの理由が考えられる。一つは、ポテンシャル勾配が十分に大きくないことが挙げられる。エッジでのポテンシャル勾配は $1 \times 10^{-2} \text{ eV } \mu\text{m}^{-1}$ である。電子や正孔はこのポテンシャル勾配を感じてドリフトしている。二つ目の理由は、この表面には電荷蓄積層が形成されており、バルクから表面にかけてのポテンシャル勾配も存在することである。電荷蓄積層のポテンシャルの形状を三角ポテンシャルで単純化した場合、(101)面のポテンシャル勾配は $100 \text{ eV } \mu\text{m}^{-1}$ 、(001)面は $40 \text{ eV } \mu\text{m}^{-1}$ で、エッジでは $80 \text{ eV } \mu\text{m}^{-1}$ となる。エッジ領域の水平方向と垂直方向のポテンシャル勾配を比較すると、垂直方向のポテンシャル勾配は3~4桁も大きい。つまり、エッジ領域の光励起キャリアは表面垂直方向のポテンシャルを強く感じて運動する。テラス面では表面平行方向のポテンシャル勾配はほぼないが、垂直方向では大きな値を持つため、テラス面の光励起キャリアもこのポテンシャル勾配を感じて運動している。電荷蓄積層のポテンシャル勾配が大きいほど光触媒活性が高いことが報告されているため[6]、今回の試料で観測された光触媒活性の違いは、表面平行方向ではなく垂直方向のポテンシャル勾配の大きさを反映したものだ結論できる。

4 - 2. アナターゼ/ルチル相境界試料

TiO₂ 光触媒の特徴の一つとして知られていることに、アナターゼ結晶試料とルチル結晶試料を混合させた試料は、それぞれの結晶試料に比べて高い活性を示すというものがある。その原因として、アナターゼ相とルチル相のそれぞれでエネルギー準位が異なっているために、二つの結晶相が接合する界面でポテンシャル勾配ができて、光励起キャリアが効率的に分離されるためだと言われている[7]。しかし、アナターゼ/ルチル相境界でのエネルギー準位の接続がどのようになっているかを直接観察した例はこれまでなく、さらに相境界が他の領域に比べて実際に光触媒活性が高いのか否かを調べた例もない。そこで、本研究ではモデル試料を作製して、顕微分光測定により検証した。

モデル試料はアナターゼ型 TiO₂ 単結晶の一部をルチル相に転移させたものであるが、実際に相転移が起こっているかを顕微 X 線吸収分光により調べた(図4)。Ti L 吸収端は、アナターゼ相とルチル相で異なるスペクトル形状を示すことが知られている。特に 460 eV 付近の吸収ピークは Ti 原子周りの O 原子の対称性を敏感に反映しており、アナターゼ相では低エネルギー側のピーク(ピンクの矢印)が、ルチル相では高エネルギー側のピーク(水色の矢印)の強度が高くなる。これら二つのピーク強度を試料表面の場所ごとに測定して、強度比をプロットしたのが図4下のパネルである。赤い領域は強度比が1より大きい所でアナターゼ相があるところ、青い領域は1より小さいルチル相がある領域を示す。接合界面は白い領域となっており、アナターゼ/ルチル相境界が出来ていることが示された。

図5上図は、接合界面を横断する領域で測定した価電子スペクトルの強度プロットである。強度の低い紫~青の領域から強度の高い黄緑に変化するエネルギー領域を見ると、アナターゼ相がルチル相より高結合エネルギー側にあり、界面では不連続的に接続していることが分かる。二つの相のエネルギー差は約 0.4 eV であり、この相境界でも表面平行方向にポテンシャル勾配が形成されていることが分かった。

このモデル表面でも、アナターゼ相、ルチ

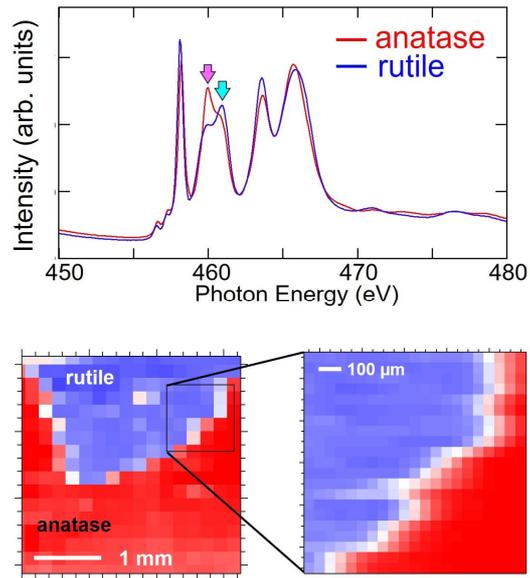


図4: (上) アナターゼとルチル領域で測定した Ti L 吸収端 X 線吸収スペクトル。(下) 矢印で示したエネルギーでの吸収強度の比をプロットした二次元分布図。赤い領域がアナターゼ相、青い領域がルチル相を示している。

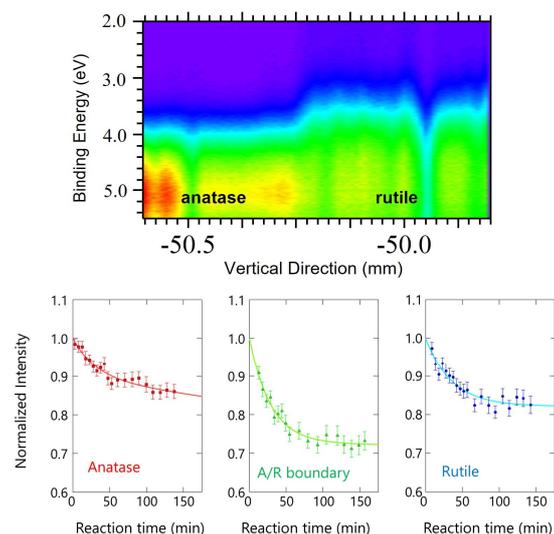


図5: (上) アナターゼ相からルチル相に横断する領域で走査しながら価電子スペクトルを測定し、その強度をプロットした図。(下) アナターゼ相、ルチル相、相境界での光触媒活性評価の結果。データの取得方法は図3右図と同じ。

ル相,相境界の三か所で光触媒活性を比較した。図5下図がその結果である。この系でも,酢酸をプローブ分子として,紫外光レーザー照射による分解脱離の速さを検証した。最も活性が高かったのは相境界であり,ルチル相,アナターゼ相の順に活性が低下していることが分かった。酢酸の光触媒分解脱離では,ルチル相の方がアナターゼ相より活性が高いというのは,先行研究[4]と同じであった。

相境界で活性が高くなったのは,表面水平方向のポテンシャル勾配が効いているという説明が可能であるが,4-1節と同様に,図5上図で観測されているポテンシャル勾配の大きさは空間電荷層のポテンシャル勾配に比べるとはるかに小さい。この原因として,顕微光電子分光測定空間分解能(15 μm)の制限によって,実際のポテンシャル勾配より小さい値を与えている可能性を考えた。そこで,SPring-8のBL-25SUで光電子顕微鏡を用いてモデル試料表面をより高空間分解能で評価した。その結果,アナターゼ相からルチル相への移行は光電子顕微鏡の空間分解能である500 nmより狭い範囲で起こっていることが示された。この程度の幅でポテンシャルが変わっていれば,表面垂直方向と水平方向のポテンシャル勾配は同程度になってくるため,相境界のポテンシャル勾配が光触媒活性に寄与しているという結果は妥当である。

4-3. 不均一カリウムドーブ試料

アルカリ金属は電気陰性度が低い元素であり,表面に吸着した時やバルクにドーブされた時は良い電子ドナーとして機能する。この性質を利用して,ルチル型TiO₂(110)表面にアルカリ金属を吸着させて電子ドーブをさせることで,下方バンドベンディングを誘起させた。カリウム吸着によりTi 2p_{3/2}準位は低結合エネルギー側にシフトするが,そのシフト量は最大でも0.3 eV程度であった。吸着カリウムの表面上での分布を検証すると,吸着領域と非吸着領域の境界が明確ではなく,吸着後にカリウム原子が拡散,あるいは吸着時にマスクを回り込んで吸着したものがあることが分かる。そのため,ポテンシャル勾配は0.2~0.4 mmの幅広い領域で観測されており,勾配の大きさは10⁻³ eV μm⁻¹とかなり小さくなった。

この表面で光触媒活性を評価したところ,カリウム吸着面,非吸着面,および境界付近の3か所で有意な差を見出すことが出来なかった。境界での表面水平方向のポテンシャル勾配は表面垂直方向のそれに比べて小さいため,境界が他の場所に比べて優位に光励起キャリアのドリフトがあるわけではないことが理由の一つである。また,カリウム吸着により下方バンドベンディングが誘起されたという事は,この領域ではポテンシャルの深い電荷蓄積層が出来ていることを意味するが,カリウムイオンが光励起電子をトラップするために,カリウムのない領域と比べて活性が高くならなかったというのが二つ目の理由である。いずれにせよ,アルカリ金属の吸着は光触媒の高活性化にはつながりにくいという結論が得られた。

4-4. まとめと展望

TiO₂光触媒の高活性化を目指し,表面水平方向のキャリアフローを制御する3つの方法を検証した。超高真空環境下で清浄化をしたTiO₂表面で形成される電荷蓄積層のポテンシャル勾配は表面垂直方向にキャリアをフローさせる役割を持つが,それと同等の大きさの急峻なポテンシャル勾配をアナターゼ相とルチル相が接合する相境界で実現できることが明らかとなった。そのため,この相境界で生成する光励起エキシトンは効率的に電子と正孔に分離され,それらはポテンシャル勾配に沿ってアナターゼ相とルチル相にそれぞれフローしてゆく。この結果,アナターゼ/ルチル相境界での光触媒活性はそれ以外の領域より活性が高くなり,実験的にもそれを確かめることが出来た。

アナターゼ/ルチル相境界の調製は比較的容易であり,アナターゼ結晶の一部を溶融させることで達成できる。今回は電気炉で結晶全体を加熱したが,集光レーザーを用いる事でも溶融と再結晶化によるルチル相への転移が可能である。レーザー走査により任意に相境界の密度を高くすることができるため,光触媒の高活性化技術として期待できる。

参考文献

- [1] W. Shen, Y. Zhao, F. Liu, *Front. Energy* **18**, 8 (2024).
- [2] K. Ozawa, M. Emori, S. Yamamoto, R. Yukawa, S. Yamamoto, R. Hobara, K. Fujikawa, H. Sakama, I. Matsuda, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 1953 (2014).
- [3] S. Kashiwaya, T. Toupance, A. Klein, W. Jaegermann, *Adv. Energy Mater.* **8**, 1802195 (2018).
- [4] K. Ozawa, Y. Aiura, D. Wakabayashi, H. Tanaka, T. Kikuchi, A. Toyoshima, K. Mase, *J. Synchrotron Radiat.* **29**, 400 (2022).
- [5] Y. Aiura, K. Ozawa, K. Mase, M. Minohara, S. Suzuki, *J. Synchrotron Radiat.* **27**, 923 (2020).
- [6] K. Ozawa, S. Yamamoto, K. Mase, I. Matsuda, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **17**, 130 (2019).
- [7] D. O. Scanlon, C. W. Dunnill, J. Buckeridge *et al.*, *Nat. Mater* **12**, 798 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Aiura Yoshihiro, Ozawa Kenichi, Minohara Makoto	4. 巻 -
2. 論文標題 A wide-angle drivable and high-precision sample goniometer for angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 112866 ~ 112866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measurement.2023.112866	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 Yukawa Ryu, Yamamoto Susumu, Arita Ren, Minami Yuki, Yamanoi Kohei, Ozawa Kenichi, Sakamoto Kazuyuki, Shimizu Toshihiko, Sarukura Nobuhiko, Matsuda Iwao	4. 巻 6
2. 論文標題 Resolving decay-time dependent photoluminescence induced by phonon-dressed excitons in ZnO	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104607 ~ 104607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.104607	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 Wang Liang, Chen Mengmeng, Yang Shuzhang, Uezono Namiki, Miao Qingqing, Kapil Gaurav, Baranwal Ajay Kumar, Sanehira Yoshitaka, Wang Dandan, Liu Dong, Ma Tingli, Ozawa Kenichi, Sakurai Takeaki, Zhang Zheng, Shen Qing, Hayase Shuzi	4. 巻 7
2. 論文標題 SnOx as Bottom Hole Extraction Layer and Top In Situ Protection Layer Yields over 14% Efficiency in Sn-Based Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 3703 ~ 3708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.2c01659	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 該当する
1. 著者名 Minohara Makoto, Asanuma Shutaro, Asai Hidehiro, Dobashi Yuka, Samizo Akane, Tezuka Yasuhisa, Ozawa Kenichi, Mase Kazuhiko, Hase Izumi, Kikuchi Naoto, Aiura Yoshihiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Elaboration of near valence band defect states leading deterioration of ambipolar operation in SnO thin film transistors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Select	6. 最初と最後の頁 1012 ~ 1020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nano.202100272	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 Ozawa Kenichi, Aiura Yoshihiro, Wakabayashi Daisuke, Tanaka Hirokazu, Kikuchi Takashi, Toyoshima Akio, Mase Kazuhiko	4. 巻 29
2. 論文標題 Beamline commissioning for microscopic measurements with ultraviolet and soft X-ray beam at the upgraded beamline BL-13B of the Photon Factory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 400 ~ 408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S160057752200090X	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16件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Keita Hiromori, Ayame Shimoyama, Nobuo Nakajima, Takumi Hasegawa, Kazuhiko Mase, Kenichi Ozawa
2. 発表標題 Comparison of photocatalytic activity of edge and terrace sites of anatase TiO ₂ single crystal by micro-X-ray photoelectron spectroscopy
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Ozawa, Keita Hiromori, Nobuo Nakajima, Kazuhiko Mase
2. 発表標題 Verification of surface irregularities by a photoelectron spectrometer
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Ozawa
2. 発表標題 Time-resolved soft X-ray photoelectron spectroscopy for understanding the photocatalytic phenomenon
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣森慧太, 下山絢女, 中島伸夫, 長谷川巧, 間瀬一彦, 小澤健一
2. 発表標題 顕微分光測定を用いたアナターゼ/ルチルヘテロ界面のバンドベンディングと光触媒活性の評価
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣森慧太, 中島伸夫, 下山絢女, 長谷川巧, 和田真一, 高橋修, 間瀬一彦, 小澤健一
2. 発表標題 顕微分光測定によるアナターゼ/ルチル界面の光触媒活性の研究
3. 学会等名 NanospecFY2022mini
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣森慧太, 中島伸夫, 下山絢女, 長谷川巧, 和田真一, 高橋修, 間瀬一彦, 小澤健一
2. 発表標題 顕微分光測定によるアナターゼ/ルチル界面の光触媒活性と電子構造の評価
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤健一, 相浦義弘, 岩澤英明, 枝元一之, 大野真也, 近藤寛, 櫻井岳暁, 中山泰生, 間瀬一彦, 箕原誠人, 山田洋一, 吉信淳
2. 発表標題 顕微X線分光による機能性材料の電子状態可視化と物性・反応との相関研究
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下山絢女, 廣森慧太, 中島伸夫, 間瀬一彦, 長谷川巧, 小澤健一
2. 発表標題 TiO ₂ 単結晶を用いたアナターゼ/ルチル相境界の作成と評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣森慧太, 下山絢女, 中島伸夫, 間瀬一彦, 長谷川巧, 小澤健一
2. 発表標題 顕微光電子分光によるTiO ₂ 結晶表面のアナターゼ/ルチル相境界における光触媒活性の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤健一, 相浦義弘, 枝元一之, 大野真也, 近藤寛, 櫻井岳暁, 中山泰生, 間瀬一彦, 簀原誠人, 山田洋一, 吉信淳
2. 発表標題 顕微軟X線分光における機能性材料の電子状態可視化と物性・反応との相関研究
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤健一, 相浦義弘, 枝元一之, 大野真也, 近藤寛, 富重圭一, 中山泰生, 間瀬一彦, 簀原誠人, 山田洋一, 吉信淳
2. 発表標題 BL-13B光電子分光システムのマイクロ測定を目指した高度化と機能性材料の精密物性評価研究
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤健一
2. 発表標題 光触媒活性と光励起キャリア寿命を結び付ける時間分解・顕微X線光電子分光研究
3. 学会等名 NanospecFY2021mini (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Ozawa, Yoshihiro Aiura, Makoto Minohara, Keita Hiromori, Ayame Shimoyama, Nobuo Nakajima, Kazuhiko Mase
2. 発表標題 Microscopic XPS and ARPES Measurements of Oxide Semiconductors Using A Wide-Angle Drivable and High-Precision Positioning Sample Goniometer
3. 学会等名 MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣森慧太, 下山絢女, 中島伸夫, 長谷川巧, 和田真一, 高橋修, 間瀬一彦, 小澤健一
2. 発表標題 二酸化チタン界面における光触媒活性向上の起源
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小澤健一, 相浦義弘, 簀原誠人, 廣森慧太, 下山絢女, 中島伸夫, 間瀬一彦
2. 発表標題 広角駆動の二軸試料ゴニオメータの開発と 顕微光電子分光測定への応用
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小澤健一
2. 発表標題 マイクロ放射光ビームを用いた光電子分光による触媒表面の物性研究
3. 学会等名 東京理科大学界面科学研究部門2023年度成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Spyridon Zafeiratos (ed.)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 World Scientific Publishing Europe Ltd.	5. 総ページ数 507
3. 書名 Application of X-ray Photoelectron Spectroscopy to Catalytic Studies	

〔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
研究分担者	山田 洋一 (Yamada Yoichi) (20435598)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	
研究分担者	相浦 義弘 (Aiura Yoshihiro) (80356328)	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 (82626)	
研究分担者	間瀬 一彦 (Mase Kazuhiko) (40241244)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 (82118)	

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
---------	---------