



タンタル酸アルカリ光触媒 : 金属カチオンドーピングによる量子収率向上メカニズム

大西, 洋

(Citation)

触媒, 63(2):108-114

(Issue Date)

2021-04

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2021 Catalysis Society of Japan

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90009019>



解 説

タンタル酸アルカリ光触媒：金属カチオンドーピングによる量子収率向上メカニズム

大 西 洋*

高い量子収率で水を全分解する光触媒が次々に開発されている。その多くはペロブスカイト型構造をもつ金属酸化物であり、金属カチオンのドーピングが収率向上の鍵となる。本稿では NaTaO_3 と KTaO_3 にドーピングしたアルカリ土類金属カチオンが、励起電子と正孔の再結合を抑制して収率を向上させるしくみを解説する。

1. はじめに

タンタル酸ナトリウム (NaTaO_3) とタンタル酸カリウム (KTaO_3) 光触媒は犠牲剤を用いない人工光合成反応、とりわけ水の全分解反応に高い活性を示す。 La^{3+} (濃度 2 mol%) をドーピングして NiO 助触媒を加えた NaTaO_3 が、みかけ量子収率 50% 超で水を全分解する世界初の光触媒となることは 2000 年に報告された^{1,2)}。アルカリ土類金属カチオンのドーピングによっても La^{3+} ドーピングに匹敵する収率が得られる (Table 1)^{2,3)}。

チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) 光触媒の量子収率も金属カチオンドーピング⁴⁾によって著しく向上し、2020 年にはついに 96% に達した^{5,6)}。 $\text{NaTaO}_3 \cdot \text{KTaO}_3 \cdot \text{SrTiO}_3$ はいずれもペロブスカイト型構造をとり (Fig. 1)⁷⁾ 金属カチオンドーピングによって収率が向上する共通点をもつ。ドーピングする金属元素ごとに異なるかもしれない収率向上の

しくみをひとつひとつ検討し、相似点と相違点を抽出して金属カチオンドーピングが光触媒反応に果たす役割の全体像を描きたい⁸⁾。このような意図で私たちが進めている研究の中間報告として Sr^{2+} と Ca^{2+} をドーピングした NaTaO_3 と KTaO_3 についての知見を紹介する。

Table 1 NaTaO_3 photocatalysts doped with metal cations through the solid-state method.

Doping cation	H_2 production ^a / mmol h^{-1}	O_2 production ^a / mmol h^{-1}	NiO cocatalyst loading / wt%	ref.
none	1.7	0.8	0.05	3
Mg^{2+} (2 mol%)	1.0	0.5	0.1	3
Ca^{2+} (2 mol%)	4.9	2.4	0.2	3
Sr^{2+} (2 mol%)	9.5	4.7	0.2	3
Ba^{2+} (2 mol%)	9.3	4.7	0.2	3
La^{3+} (2 mol%)	19.8	9.7	0.2	2

^aAqueous suspension of the photocatalyst (0.5 g) was irradiated in an inner irradiation vessel with a 400 W high-pressure Hg lamp.

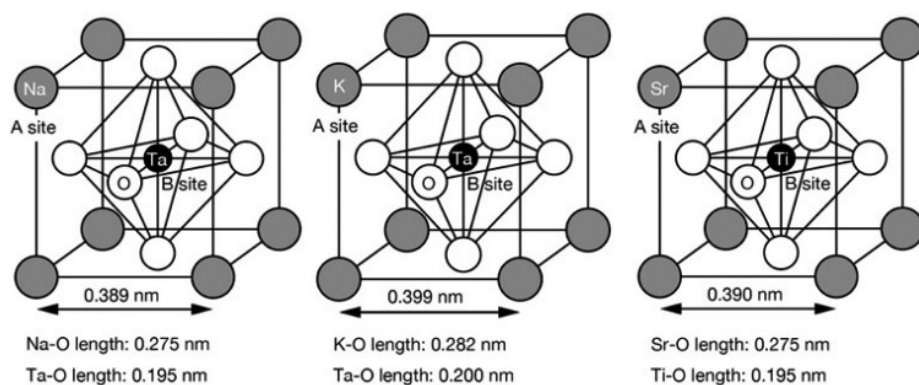


Fig. 1 Perovskite-structured semiconductors, NaTaO_3 , KTaO_3 and SrTiO_3 , feasible for the photocatalytic overall water splitting reaction. NaTaO_3 is slightly distorted in orthorhombic symmetry ($Pbnm$, $a = 0.548$, $b = 0.552$, $c = 0.779$ nm) at room temperature and an orthorhombic cell contains four NaTaO_3 units⁷⁾. A cube with sides of 0.389 nm, the volume of which corresponds to one fourth of the orthorhombic cell volume, is effectively assigned to one unit and illustrated in the figure.

*神戸大学理学研究科

2. 金属カチオンドーピングの方法

NaTaO₃への金属カチオンドーピングでは(1)原料混合物を大気中焼成する固相合成⁹⁾, (2)原料混合物にNaCl融剤を加えて加熱する熔融塩合成¹⁰⁾, (3)原料混合物をNaOH水溶液に懸濁して密閉加熱する水熱合成¹¹⁾が主に用いられている¹²⁾。私たちの経験では, たとえエックス線回折(XRD)で不純物相を検出できなかったとしても, ドーピングした元素(アルカリ土類金属やランタノイド)による蛍光エックス線(EDX)信号の強度が希塩酸洗浄によって有意に低下し, 洗液から信号が得られることが多い。NaTaO₃結晶に取り込まれないドーピング元素が相当量存在して希塩酸に溶解したと推定している。

3. NaTaO₃-Sr(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃固溶体の形成

金属カチオンをドーピングすればNaTaO₃の結晶格子体積が変化してXRDピークがシフトするであろう。固相合成法でSr²⁺をドーピングすると, ドーピング濃度(Sr/Taモル比)に応じて結晶格子体積が直線的に増加した(Fig. 2)⁸⁾。濃度に対する直線的な体積変化はドーピングによる固溶体生成を示している。

固溶体組成は低濃度極限ではNaTaO₃(直方晶として計算した格子体積0.236 nm³)であり, 高濃度極限はSr(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃(同0.282 nm³)であった。Sr(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃は

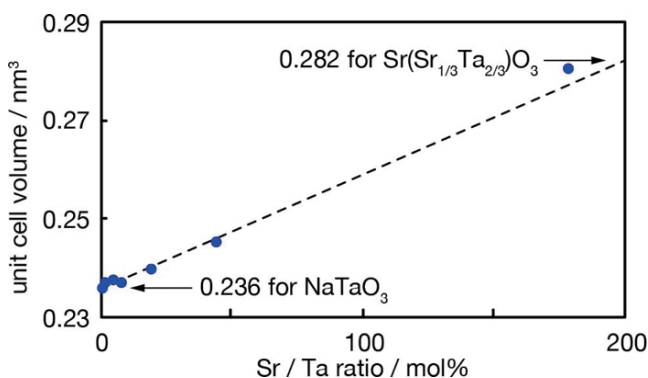


Fig. 2 The orthorhombic unit cell volume of solid-state-prepared NaTaO₃ photocatalysts doped with Sr cations. The straight line shows the linear relation predicted in the NaTaO₃-Sr(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃ solid solution⁸⁾.

Table 2 Effective ionic radii of the related elements according to ref. 14.

Element	Radius when 6-fold coordinated / nm	Radius when 12-fold coordinated / nm
Na ⁺	0.10	0.14
Ta ⁵⁺	0.06	not reported
Sr ²⁺	0.12	0.14
La ³⁺	0.10	0.14
O ²⁻	0.14	not reported

ペロブスカイト型格子のAサイト全てとBサイトの1/3をSr²⁺が占有し, 残り2/3をTa⁵⁺が占有する既知化合物¹³⁾である。このような固溶体では任意のSr²⁺濃度においてカチオン電荷とアニオン電荷はバランスする。電荷バランスをとるためにカチオン欠陥やアニオン欠陥を作る必要はない。

サイズの大きなSr²⁺がTa⁵⁺を部分的にでも置換することは奇異に感じられるが, Table 2¹⁴⁾に掲示したイオン半径から tolerance factor を計算すると NaTaO₃ は 0.99, Sr(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃ は 0.90 である。固溶体の tolerance factor はそれらの中間値をとるから, 立方晶ペロブスカイト格子を形成できる範囲¹⁵⁾ (0.9~1) に収まっている。

4. ドーピングした元素の局所構造

ドーピングによる固溶体形成の確証を得るためには構造解析が必要である。光触媒反応で高い収率を発揮する濃度(5 mol%未満)でドーピングした金属カチオンは長距離秩序を作らないからXRDによる構造決定は難しい。ドーピングした元素周辺の局所構造を決定しなければならない。

4.1 広域エックス線吸収微細構造(EXAFS)による解析

濃度2, 20, 50 mol%でSr²⁺をドーピングしたNaTaO₃のSr K吸収端スペクトルは濃度によらず同型であったため, 信号強度が最も大きい50 mol%の光触媒を解析した¹⁶⁾。透過法で測定したSr K吸収端およびTa L₃吸収端のk³χ(k)スペクトルと, それらをフーリエ変換した動径分布関数をFig. 3に示す。Ta⁵⁺からみた動径分布関数には0.18 nmにTaO₆八面体の酸素アニオンによるピークがあらわれた。Sr²⁺からみた動径分布には距離0.17 nmと0.20 nmにピークがあらわれて, 二つの異なる環境におかれたSr²⁺の存在が証明された。カーブフィッティングで求めた結合距離と配位数(Table 3の上段)は, NaTaO₃格子のBサイトをSr²⁺が置換して作るSrO₆八面体と, Aサイトを置換して作るSrO₁₂立方八面体から予想される値と一致した。

KTaO₃に濃度1 mol%でSr²⁺をドーピングし, 蛍光法で測定したSr K吸収端スペクトルからもAサイトとBサイトを占有する2種類のSr²⁺を検出した¹⁷⁾。カーブフィッティングで得た結合距離(Table 3の中段)は, ホスト結晶の格子定数がNaTaO₃より2.6%大きいことを考慮すれば妥当な値である。

パルスレーザー堆積法(PLD)を用いると, LaAlO₃基板上にNaTaO₃結晶をエピタキシャル製膜できる。Sr²⁺(濃度10 mol%)をドーピングした堆積膜(厚さ100 nm)のSr K吸収端スペクトル(蛍光法)からも同等の結果(Table 3の下段)を得た¹⁸⁾。

4.2 蛍光エックス線ホログラフィによる三次元構造解析

EXAFSは選択した元素近傍の構造を解析する強力な手段であるが, 結合距離と配位数という一次元の構造情報のみを与える。蛍光エックス線ホログラフィは, 選択した元

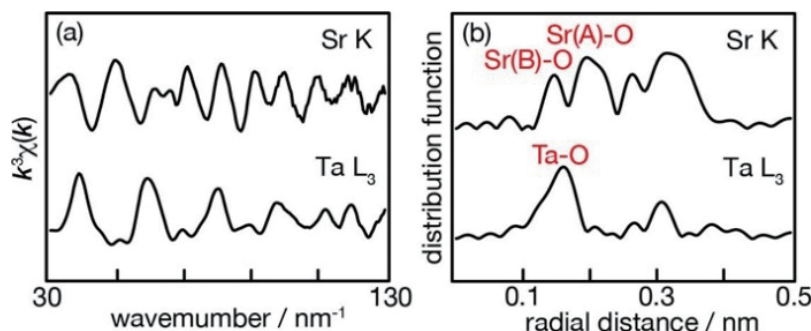


Fig. 3 Extended X-ray absorption fine structures at the Sr K-edge and Ta L₃-edge observed for a NaTaO₃ photocatalyst doped with Sr cations through the solid-state reaction. Sr concentration: 50 mol%. (a) k^3 -weighted absorbance spectra. (b) Radial distribution functions. Reprinted with permission from ref. 16.

Table 3 Metal–oxygen shells deduced from extended X-ray absorption fine structures.

Photocatalyst	Shell	Shell length / nm	Coordination number	ref.
NaTaO ₃ particles doped with Sr ²⁺ (50 mol%)	Sr (B site)–O	0.196	1.1	16
	Sr (A site)–O	0.260	6.6	
	Ta–O	0.197	5.9	
KTaO ₃ particles doped with Sr ²⁺ (1 mol%)	Sr (B site)–O	0.224	1.3	17
	Sr (A site)–O	0.273	8.2	
	Ta–O	0.198	3.3	
NaTaO ₃ film doped with Sr ²⁺ (10 mol%) deposited on LaAlO ₃ wafer	Sr (B site)–O	0.216	2.1	18
	Sr (A site)–O	0.266	7.1	

素の周囲に存在するエックス線散乱体の三次元分布をモデルフリーに決定できる手法である¹⁹⁾。平面波として入射したエックス線と、原子Xによって散乱された球面波が重なった定在波が原子Aを励起して蛍光エックス線を放出させる (Fig. 4)。定在波強度は平面波の入射角度 (θ と ϕ) に応じて変化し、定在波強度に比例した強度の蛍光エックス線が発生する。入射角度を変えながら蛍光エックス線強度を測定し1枚のホログラムを得る。入射エックス線エネルギーの異なる複数のホログラムを取得し、フーリエ変換に類似した解析を施すと散乱原子Xの三次元分布を得ることができる。

固相合成に類似した方法でCa²⁺ (濃度 15 mol%) をKTaO₃ (100) 単結晶にドーピングした光触媒モデルを作製してCa K β 線によるホログラムを大気中室温で測定した結果²⁰⁾をFig. 5に示す。重元素であるTa⁵⁺が入射エックス線の散乱を支配すると仮定して、三次元分布にあらわれる散乱体はCa²⁺近傍のTa⁵⁺であると解釈する。Ca²⁺を含む $z=0$ の平面上では4個の第一近接Ta⁵⁺が $(x, y) = (\pm 0.46 \text{ nm}, 0)$ と $(0, \pm 0.46 \text{ nm})$ に存在した。Ta⁵⁺のつくる正方形の中心にCa²⁺が位置し、Ca²⁺-Ta⁵⁺距離がKTaO₃の格子定数に近いことは、Ta⁵⁺を置換してBサイトを占有するCa²⁺の存在を示している。これに加えて、 $z=0.2 \text{ nm}$ の平面では4個の第一近接Ta⁵⁺が $(\pm 0.18 \text{ nm}, \pm 0.18 \text{ nm})$ にあらわれた。Ca²⁺がK⁺を置換してAサイトを占有すれ

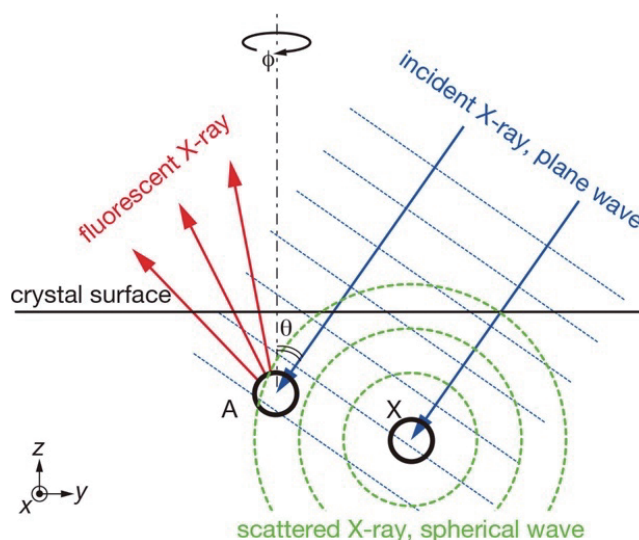


Fig. 4 X-ray fluorescence induced by the X-ray standing wave.

ば、この位置にTa⁵⁺が存在してよい。このようにしてKTaO₃にドーピングしたCa²⁺がAサイトとBサイトを同時に置換することを確認できた。

5. Sr²⁺ ドーピングによるバンドギャップ拡張

Sr²⁺ ドーピングによってNaTaO₃とKTaO₃のバンドギャ

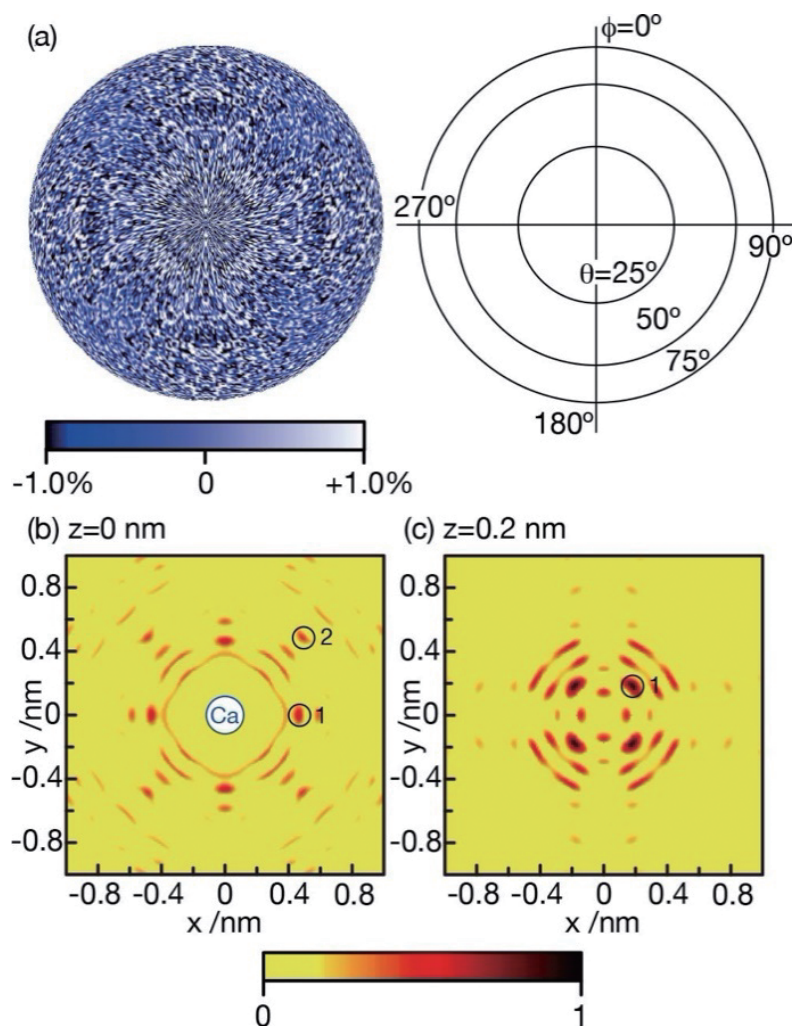


Fig. 5 Ca $K\beta$ fluorescence holography applied to the KTaO_3 wafer doped with Ca. (a) Orthographic projection of the hologram with an incident X-ray energy of 8.0 keV. Intense and weak fluorescence are shown as bright and dark blue colors. The scale bar shows hologram intensity relative to the background intensity. The (θ, ϕ) coordinate in the orthographic projection is illustrated. The spatial distribution of X-ray scattering atoms reconstructed with eight holograms (incident X-ray energies of 6.0–9.5 keV) are presented on a plane of $z =$ (b) 0 and (c) 0.2 nm. The fluorescing Ca cation is located at (0, 0, 0) and labeled as “Ca”. The first- and second-nearest Ta cations are marked with numbered circles in (b) and (c). Reprinted with permission from ref. 20.

ップは0.1 eV程度広がり、バンドギャップ励起に必要な紫外光波長は10 nmほど短波長シフトする^{9,17)}。酸素アニオンの2p軌道が混成して作る価電子帯はカチオンドーピングの影響を受けにくい。Ta⁵⁺の5d軌道によって形成される伝導帯は、Ta⁵⁺がSr²⁺に置き換わることによって隣接するTa⁵⁺がもつ5d軌道のオーバーラップが断ち切られるためにエネルギー幅が狭くなる。エネルギー幅が狭くなると伝導帯下端のエネルギーは引き上げられる。すなわち、Sr²⁺がBサイトを置換するためにバンドギャップが拡張する。

6. ドーピングしたSr²⁺の表面偏析

固相合成・溶融塩合成・水熱合成いずれの方法で合成してもドーピングしたSr²⁺はNaTaO₃¹⁰⁾とKTaO₃¹⁷⁾微粒子の表面に偏析する。エックス線光電子分光(XPS)で測定した

Sr²⁺の表面濃度はEDXで求めたバルク濃度の2ないし3倍に達する。走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用いて観測した固相合成法でドーピングした微粒子の元素マッピング(Fig. 6)によると、直径100 nm程度の微粒子の表層(厚さ3 nm)にSr²⁺が偏析して、あたかもcore-shell構造をとっているかのように見える¹⁰⁾。

7. 表面偏析が駆動する電荷分離と収率向上

このような表面偏析をもつ微粒子に紫外光を入射したとき何が起きるだろうか？ 紫外光波長が光触媒の吸収端波長より十分短い場合には(この条件は高圧水銀灯を光源とするとき成立する)吸収係数が大きいために紫外光は光触媒微粒の表層ですべて吸収される。NaTaO₃の吸収係数は不明だがTiO₂²¹⁾にならって10⁸ m⁻¹と推定すると紫外光の浸透深さは10 nm程度となる。

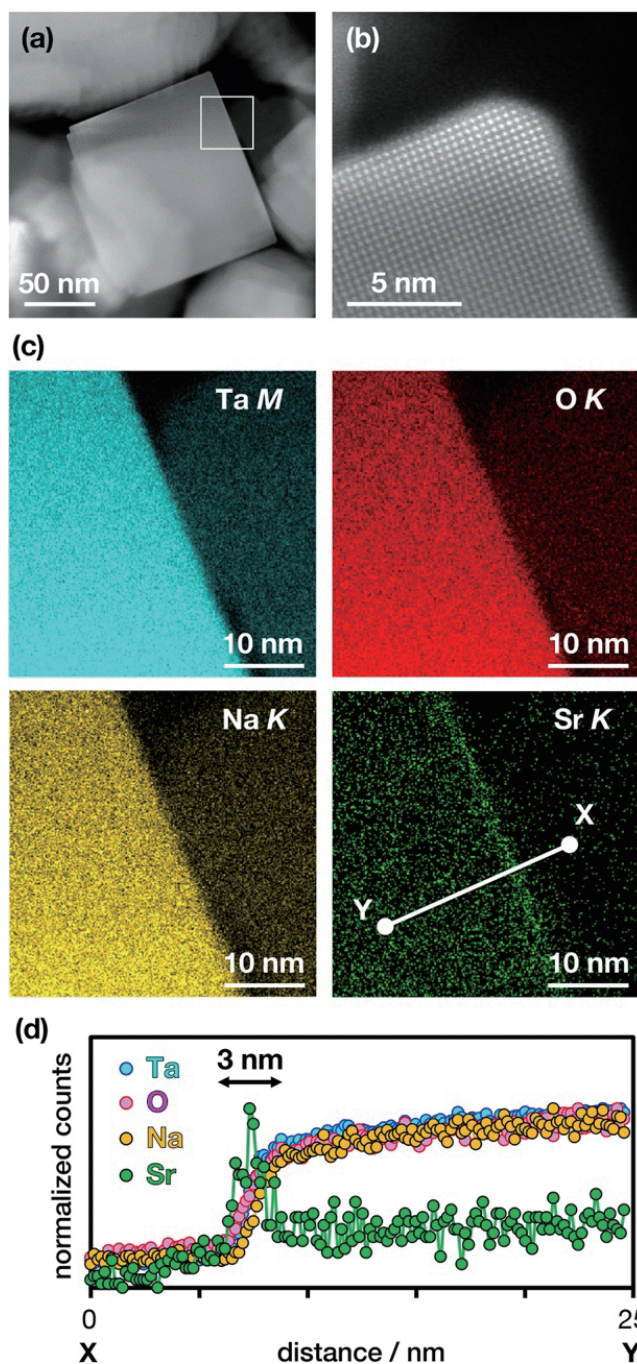


Fig. 6 Scanning transmission electron micrographs of the photocatalyst immersed in the NaCl flux for 1 h. (a) Angular dark field image. (b) Ta atom columns in a particle. (c) Element maps obtained with Ta M, O K, Na K, and Sr K emissions. The analyzed portion is marked with a white square in (a). (d) X-ray count profiles along line X-Y. Reprinted with permission from ref. 10.

5で述べたように、 Sr^{2+} によるBサイト置換によって微粒子表面の伝導帯下端は引き上げられるから、 Sr^{2+} 濃度傾斜に応じて伝導帯下端のエネルギーは傾斜する (Fig. 7)。紫外光照射によって伝導帯に励起された電子は、伝導帯下端の傾きに導かれて粒子内部へ移動する。エネルギー傾斜をもたない価電子帯に生成した正孔は移動しないので、励

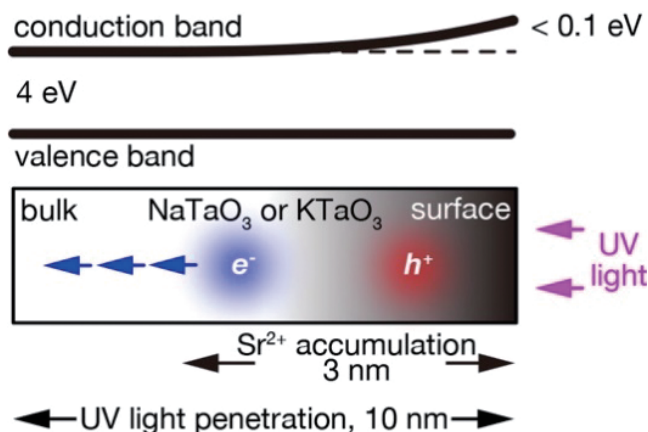


Fig. 7 Photoexcited electrons driven away from the complementary holes in NaTaO_3 or KTaO_3 photocatalysts doped with Sr^{2+} cations.

起電子と正孔が空間的に引き離される。引き離された励起電子と正孔が再結合消滅する確率は減少し、光触媒反応に利用できる励起電子と正孔が増えて量子収率が增大する。

8. ドーピングによる励起電子量の増大

Fig. 7で提案したしくみから予想されるように、アルカリ土類金属カチオン (Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+}) を NaTaO_3 にドーピングすると、励起電子と正孔が再結合消滅する速度が低下することが、ナノ秒パルスレーザーを用いた赤外吸収スペクトルの時間分解測定から明らかになっている²²⁾。紫外光を用いてバンドギャップをまたいで励起した電子が、さらに赤外光を吸収する性質を利用した計測である。

現実の光触媒反応を模擬するために、水銀灯を光源とする定常光照射下で測定した赤外吸収スペクトル⁹⁾を Fig. 8に示す。 Sr^{2+} ドーピングの濃度を増やすとともに赤外吸収が強くなり、濃度 1.8 mol% の光触媒の吸収強度 (スペクトルの面積強度) は、ドーピングしていない光触媒の 180 倍となった。吸光度が励起電子数に比例するとすれば、ドーピングによって励起電子数が 180 倍に増えたことになる。

Sr^{2+} 濃度をさらに上げると吸収強度は低下し、高濃度極限 (40 mol% 超) ではドーピングしていない光触媒と同等ないしそれ以下になった。微粒子表面の Sr^{2+} 濃度勾配は高濃度極限でゼロに近づくことを考慮すると、吸収強度 (すなわち励起電子量) の Sr^{2+} 濃度依存性を自然に理解できる。

9. お わ り に

これまで述べてきたように、 NaTaO_3 と KTaO_3 光触媒に Sr^{2+} をドーピングしたとき自発的に発生する表面偏析が量子収率向上の鍵となる。この視点に立て、もう一度 Table 1 を見てみよう。ドーピングするアルカリ土類金属カチオンを $\text{Sr}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$ と変えていくと反応速度 (すなわち量子収率) が低下する。ドーピングする元素のイオン半径はこの順番で小さくなるから、ホスト結晶内での移

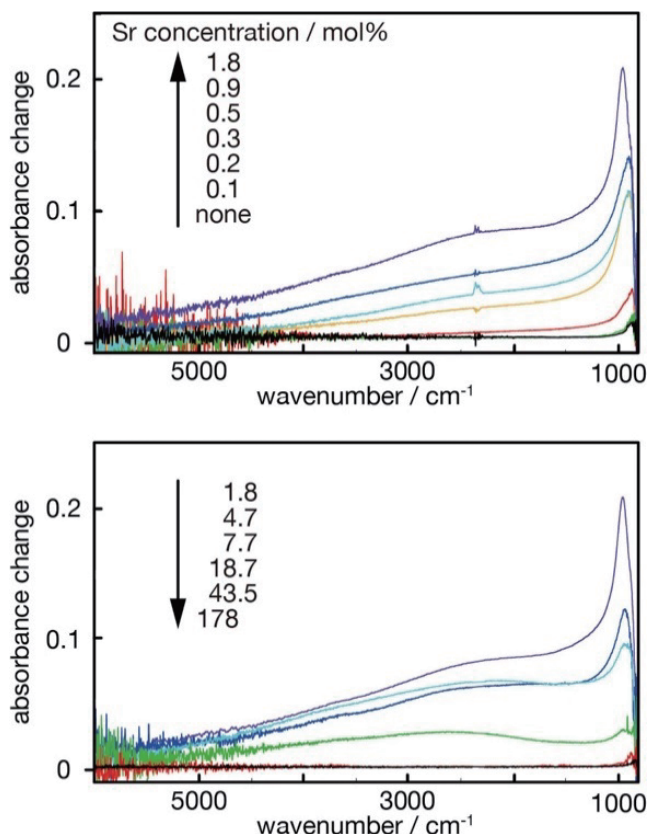


Fig. 8 Infrared absorbance change induced by steady UV light irradiation. Thirteen NaTaO₃ photocatalysts doped with Sr²⁺ were irradiated in a vacuum with a Hg-Xe lamp (200 W). UV light flux at wavelengths of 370 nm or shorter: 60 mW cm⁻². Photocatalysts were prepared in a solid-state reaction. Reprinted with permission from ref. 9.

動が容易になって表面偏析は弱くなるだろう。偏析が弱ければ伝導帯下端のエネルギー傾斜は小さくなり、励起電子と正孔の空間分離が不十分だから量子収率は上がらない。Fig. 7で提案したしくみでうまく説明できそうである。

Table 1でもっとも高い量子収率を示すLa³⁺に同じメカニズムをあてはめることができるだろうか？ 私たちの最近の研究²³⁾によると、ドーピングしたLa³⁺の表面偏析と励起電子量の増大は、アルカリ土類金属の場合と同様におきている。表面偏析したLa³⁺が伝導帯下端を傾斜させて電子と正孔を空間的に分離し、量子収率を引き上げていることはまちがいない。ただし、EXAFS解析で得られたLa-O結合距離は0.25 nmのみであった。これはLa³⁺がNa⁺のみを置換してAサイトを占有することを暗示している。La³⁺がAサイトののみを置換するならば、カチオン電荷とアニオン電荷のバランスをとるためにカチオン欠陥が生じなければならない。Aサイト欠陥では(La_{1/3}□_{2/3})TaO₃が生じ、Bサイト欠陥ならLa(Ta_{3/5}□_{2/5})O₃が想定される。ここで□は欠陥サイトをあらわす。

一方で、SrTiO₃光触媒では金属カチオンドーピングによ

って生じる酸素アニオン欠陥（たとえばSrAlO_{5/2}□_{1/2}）が量子収率を向上させるメカニズムが提案されている^{6,24)}。実在のペロブスカイト型結晶に生じるイオン欠陥（濃度数mol%）を検出し、さらにその構造を決定する実験手法があれば、金属カチオンドーピングによる構造変化の全体像を解明できそうである。よい方法はないだろうか？

本稿で紹介した成果は神戸大学を中心に千葉大学・産業技術総合研究所・ジェンベル大学（インドネシア）・東北大学・名古屋工業大学・広島市立大学・大阪市立大学・東京理科大学・タンマサート大学（タイ）・日本大学・北海道大学・カールスルーエ工科大学（ドイツ）に所属する学生ならびに教職員との共同研究によって得られた。放射光を用いた計測はPhoton Factory（課題番号2016G057・2018G078）ならびにSPring-8（課題番号2016B1107・2017A1079）で実施した。科学研究費（15H01046・16H02250・18F18029・18KK0161・19H00915）と大阪市立大学人工光合成共同研究拠点共同研究・北海道大学触媒科学研究所共同利用共同研究による支援に感謝する。

文 献

- 1) A. Kudo, H. Kato, *Chem. Phys. Lett.*, **331**, 373 (2000)
- 2) H. Kato, K. Asakura, A. Kudo, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 3082 (2003)
- 3) A. Iwase, H. Kato, H. Okutomi, A. Kudo, *Chem. Lett.*, **33**, 1260 (2004)
- 4) Y. Sakata, Y. Miyoshi, T. Maeda, K. Ishikiriya, Y. Yamazaki, H. Imamura, Y. Ham, T. Hisatomi, J. Kubota, A. Yamakata, K. Domen, *Appl. Catal. A*, **521**, 227 (2016)
- 5) T. Takata, J. Jiang, Y. Sakata, M. Nakabayashi, N. Shibata, V. Nandal, K. Seki, T. Hisatomi, K. Domen, *Nature*, **581**, 411 (2020)
- 6) 高田剛, 堂免一成, 触媒, **62**, 217 (2020)
- 7) B. J. Kennedy, A. K. Prodjosantoto, C. J. Howard, *J. Phys. Condens. Matter*, **11**, 6319 (1999)
- 8) H. Onishi, *ChemSusChem*, **12**, 1825 (2019)
- 9) L. An, H. Onishi, *ACS Catal.*, **5**, 3196 (2015)
- 10) L. An, M. Kitta, A. Iwase, A. Kudo, N. Ichikuni, H. Onishi, *ACS Catal.*, **8**, 9334 (2018)
- 11) Y. Lee, T. Watanabe, T. Takata, M. Hara, M. Yoshimura, K. Domen, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **80**, 423 (2007)
- 12) ペロブスカイト型構造をとるタンタル酸塩光触媒に関する学術論文をリストしたデータベースを<http://www.edu.kobe-u.ac.jp/sci-onishi/Outcomes/natao3.html>で公開している
- 13) K. Yoshioka, V. Petrykin, M. Kakihana, H. Kato, A. Kudo, *J. Catal.*, **232**, 102 (2005)
- 14) R. D. Shannon, *Acta Cryst. A*, **32**, 751 (1976)
- 15) R. J. D. Tilley, 陰山洋（訳）, ペロブスカイト物質の科学, 化学同人（2018）
- 16) L. An, T. Sasaki, P. Weidler, C. Wöll, N. Ichikuni, H. Onishi, *ACS Catal.*, **8**, 880 (2018)
- 17) H. Sudrajat, D. Dhakal, M. Kitta, T. Sasaki, A. Ozawa, S. Babel, T. Yoshida, N. Ichikuni, H. Onishi, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 18387 (2019)
- 18) R. Konno, S. Maruyama, T. Kosaka, R. Katoh, R. Takahashi, H. Kumigashira, N. Ichikuni, H. Onishi, Y. Matsumoto, *Chem. Mater.*, **33**, 226 (2021)

- 19) 石井宏幸, 岡大地, 久保園芳博, 機能構造科学入門, 丸善 (2016)
- 20) T. Fujiwara, A. Sasahara, N. Happon, K. Kimura, K. Hayashi, H. Onishi, *Chem. Mater.*, **32**, 1439 (2020)
- 21) N. S. Lewis, M. L. Rosenbluth, Theory of Semiconductor Materials. In Photocatalysis, Fundamentals and Applications, N. Serpone, E. Pelizzetti, eds., John Wiley and Sons, New York, 1989, pp. 60-62 and Fig. 3.8.
- 22) M. Maruyama, A. Iwase, H. Kato, A. Kudo, H. Onishi, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 13918 (2009)
- 23) H. Sudrajat, M. Kitta, R. Ito, S. Nagai, T. Yoshida, R. Katoh, B. Ohtani, N. Ichikuni, H. Onishi, *J. Phys. Chem. C*, **124**, 15285 (2020)
- 24) T. Takata, K. Domen, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 19386 (2009)

Alkali Tantalate Photocatalysts: How Are They Activated by Doping with Metal Cations. Hiroshi ONISHI (School of Science, Kobe University, Rokko-dai, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan)

A number of perovskite-structured metal oxides are feasible for highly efficient overall splitting of water. Doping with hetero metal cations always provides the key to enhance quantum yield of the splitting reaction. The present review is focused on NaTaO₃ and KTaO₃ doped with alkali earth metal cations to show how bandgap-excited electrons and holes are well separated in photocatalyst particles.

Key-words: Photocatalysis, Semiconductor, Doping, Perovskite structure, Short-range ordered structure



大西 洋 (おおにし ひろし)

神戸大学理学研究科教授 (正会員)

[最終学歴] 1989年東京大学理学系研究科博士課程中退. 博士 (理学). [趣味] スキー, 観劇, 料理. [連絡先] 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 E-mail: oni@kobe-u.ac.jp (勤務先)

(© 2021 Catalysis Society of Japan)