ハロゲン化金属ペロブスカイト
～未来を拓く新規半導体の物性解明～

山田　泰裕　Yamada Yasuhiro

大学院理学研究院准教授
専門分野：光物性物理学
2008年　京都大学大学院理学研究科博士課程修了ならびに博士（理学）取得。
京都大学化学研究所博士研究員・同ナノ界面光機能寄付研究部門（住友電工グループ社会貢献基金）特定准教授などを経て、2015年より現職。
2015年　応用物理学会優秀論文賞、2016年　日本物理学会若手奨励賞（領域５）、2018年　文部科学大臣表彰（若手科学者省）受賞。

—— どのような研究内容か？

ハロゲン化金属ペロブスカイトABX3［A = Cs^+, $CH_3NH_3^+$; B = Pb^{2+}, Sn^{2+}; X = I^-, Br^-, Cl^-］は、高い注目を浴びている新しい高品質半導体材料です。この新材料を用いて作製された太陽電池は、2009年の最初の報告から数年で既存の実用太陽電池に匹敵する変換効率を実現し、一大センセーションを巻き起こしました。最近では、太陽電池に限らない様々な応用が模索されているとともに、そのユニークな性質が基礎物理学の分野でも興味を持たれています。私たちは、この物質がもつユニークな性質の起源を明らかにすべく、最先端のレーザーシステムを用いた光学特性の研究や電気伝導特性の精密評価を行っています。

—— 何の役に立つ研究なのか？

歴史を振り返ると、新しい高品質半導体の登場は基礎物理学における新概念の創出やデバイス開発のブレークスルーをもたらしてきました。近年の例では、窒化ガリウムによる青色発光ダイオードやグラフェン（炭素原子のシート）におけるディラック電子のようにノーベル賞級の成果があります。ハロゲン化金属ペロブスカイトがそこまでのインパクトを与えられるかはまだまだ分かりませんが、その機能的な性質と低欠陥な高品質半導体が容易に作製できるという特徴から、様々な半導体デバイスに利用することでこれまでにない画期的なデバイスが実現するかもしれません。

私自身は、この物質を何かの役に立てようというよりも、その背後にある物理の解明のほうに興味があります。これまで研究されていない新材料だったので、研究の初期においては、何を測定しても世界初！何をやっても最先端！という面白さがありました。現在は、ハロゲン化金属ペロブスカイトの高品質性と機能的性質をうまく使って、従来の半導体ではできなかったユニークな物理現象の実現が期待されています。そのためにはまだまだ解決すべき課題があるのですが、世界的な競争の中で戦略的に考えながら研究を進めるのも面白いことの一つです。

—— 今後の計画は？

半導体には、シリコンや砒化ガリウムなどが現代のエレクトロニクスの基盤となるまでの長い長い研究の歴史があり、いまも新しい研究が続いています。しかし、ハロゲン化金属ペロブスカイトは、既存の半導体材料とは一線を画すユニー

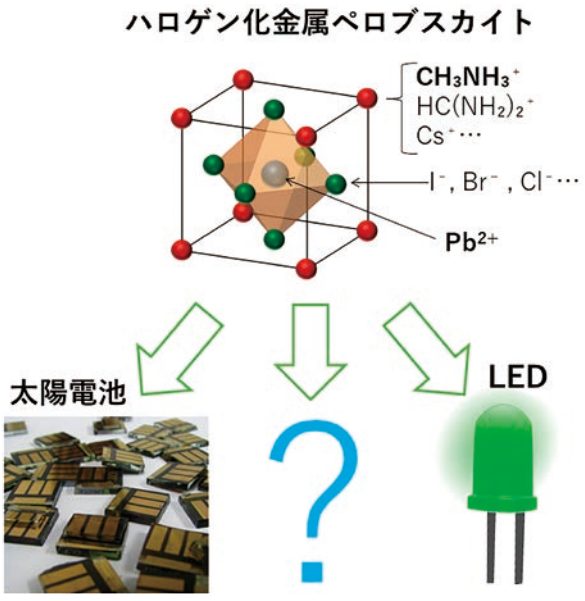

図１：ハロゲン化金属ペロブスカイトの結晶構造。立方体の中心にPb^{2+}やSn^{2+}、角には様々な有機物・無機物イオン、面の中心にはハロゲンイオン（I^-, Br^-, Cl^-）が入ります。構成イオンを変えることで、多様な物質を作り出すことができるのもこの物質の特徴です。高い発光効率や簡便な作製プロセスから、太陽電池やLED材料として研究が進められています。さらに先にはどんな展開が待っているでしょうか。

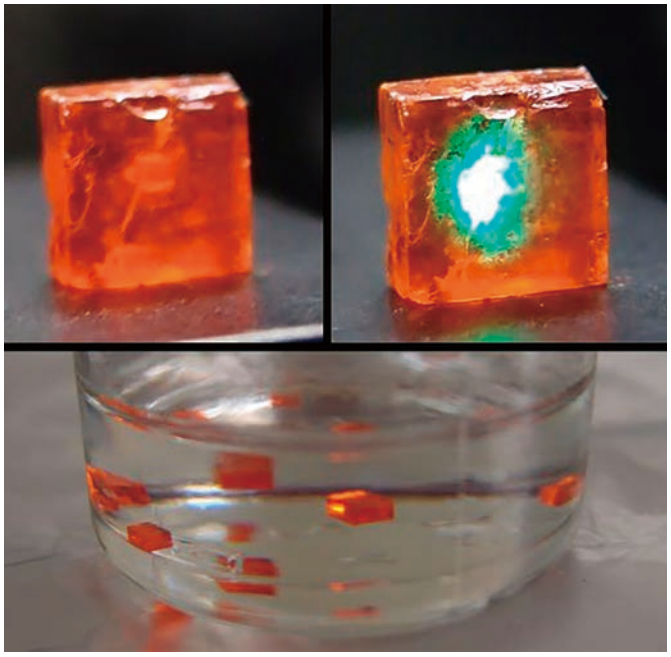

図２：作製した$CH_3NH_3PbBr_3$単結晶（左上）。紫外線を照射することで緑色の強い発光を示します（右上）。高品質単結晶を溶液を用いた簡便な手法で作製することができます（下）。

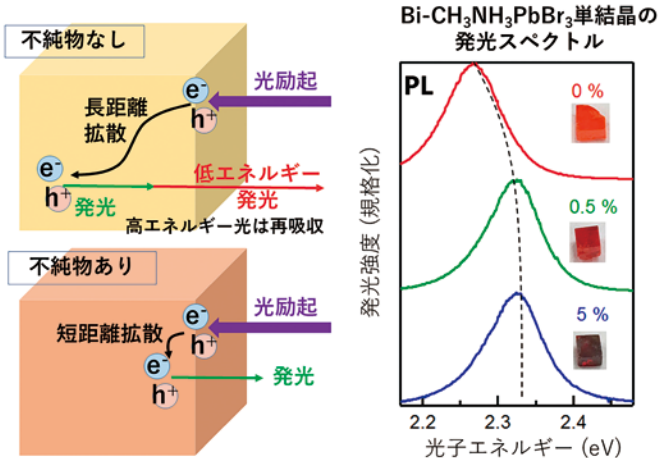

図３：我々は、高品質な半導体でのみ観測されるフォトンリサイクリング効果をこの物質で初めて報告しました。発光と再吸収が結晶中で何度も繰り返されることが、光学的性質を決定しています（左図）。右図は、我々のグループで作製した$CH_3NH_3Pb_{1-x}Bi_xBr_3$単結晶とその発光スペクトルです。不純物としてBi_{3+}を導入することで電気的・光学的な特性を変えることができます。

クな物質です。ペロブスカイトに特有の機能的性質を活かして、これまではできなかった新しい物理現象の実現を目指していこうと思っています。特に、スピン（電子の持つ磁石としての性質）の関わる興味深い現象の発現が理論的に予測されており、我々のグループで作製できる高品質な単結晶試料を用いて研究を進めていきたいと考えています。

—— 関連ウェブサイトへのリンクURL

▶光物性・量子伝導研究室HP

—— 成果を客観的に示す論文や新聞等での掲載の紹介

YAMADA, Yasuhiro, et al. Dynamic optical properties of $CH_3NH_3PbI_3$ single crystals as revealed by one-and two-photon excited photoluminescence measurements. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137.33: 10456-10459.
YAMADA, Yasuhiro, et al. Impact of Chemical Doping on Optical Responses in Bismuth-Doped $CH_3NH_3PbBr_3$ Single Crystals: Carrier Lifetime and Photon Recycling. The journal of physical chemistry letters, 2017, 8.23: 5798-5803.

—— 研究への意気込みは？

この研究の先に何があるのかはまだ全く分かりませんが、新しい小さな発見を積み重ねながら、少しづつ前進できているという実感があります。ハロゲンの中にはヨウ素も含まれますが、千葉はヨウ素の世界的な産地であり、千葉大学にはヨウ素科学に精通した研究者が多数おられるなど、地の利もあります。この環境を活かして研究を進めていきたいと思っています。

—— 学生や若手研究者へのメッセージ

“No fun, no gain.”が私のモットーです。これは、辛いことは避けて楽しいことだけしていればいいよ、というアドバイスではなく、自分の周りで起こる様々な出来事を、あるいは取り巻く環境を、楽しむ姿勢、楽しみにする努力が成長には不可欠だという思いを表したものです。イヤイヤやっていては何も身に付きません。好きこそものの上手なれ。楽しむことが大事です。