

# 地球を救う環境材料

## 材料工学専攻 中島・松下 研究室

中島 章 教授 1962年東京都生まれ。ペンシルベニア州立大学大学院材料工学専攻博士課程修了 (Ph.D)。2009年より、東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻教授。



効率のいいものを作るには、性能のいい材料が必要である。今日では、性能のみならず、環境にやさしいものづくりの必要性が高まっており、中島・松下研究室では、社会のニーズに答えるために環境材料研究を行なっている。その研究は、自然現象が起こる理由とともにどう材料に応用するかを考える、理学的でかつ工学的なものである。その奥深い材料研究を行う中島・松下研究室を紹介しよう。

### 環境材料とは？

科学技術が発展した現代において、環境問題は徐々に深刻化している。環境問題の根源をたどると、さまざまなものに使われる材料を効率よく、環境にやさしくすることが必要不可欠であることがわかる。例えば、自動車の二酸化硫黄、二酸化窒素などの排気ガスを無害な気体にするセラミックス薄膜フィルターなどが挙げられる。このような材料——環境材料を用いてものをつくることにより、環境にやさしいものづくりができる。

中島・松下研究室では、材料科学の分野で環境・エネルギー・資源の研究を行なっている。そして、その研究成果によってできる材料で環境にやさしいものづくりを支えることを目的とする。研究内容が多岐にわたるため、中島先生、松下先生、磯部先生は、固体の材料という共通の観点から、それぞれの知識を生かし、いろいろな環境材

料研究を行なっている。

3人の先生方の行なっている代表的な研究を簡略に述べると、中島先生は材料の表面科学、松下先生は光の性質を利用した機能性材料、磯部先生は機能性セラミックス材料である。3人の先生方の研究がどのようなものか、具体的に見てみよう。

### 中島先生の研究——表面科学

中島先生は主に、表面科学に関する研究を行なっている。表面科学とは、材料の表面もしくは薄膜に起こる現象を調べる学問である。材料の構成物質は同じでも、厚さを $\mu\text{m}$ 単位以下に薄くすることによって、 $\text{cm}$ 単位以上の厚さの材料からは想像できない特異な現象が起こる。

材料の分類の仕方はさまざまであるが、本稿ではマクロな場合とマイクロな場合に分類する。人の手で触れられるほどのサイズの材料をバルク材料



松下 祥子 准教授 1972年神奈川県生まれ。東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻博士課程修了。工学博士。2010年より、東京工業大学理工学研究科材料工学専攻准教授。



磯部 敏宏 助教 1979年愛知県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻博士課程修了。工学博士。2010年より、同大学理工学研究科材料工学専攻助教。

と呼ぶ。一般的に、バルク材料においては、化学組成、結晶構造がわかれば、強度、導電性、透明度などの物性が予測できる。

一方、マクロなサイズのバルク材料に起こる現象に比べ、マイクロなナノサイエンスの一分野である表面、薄膜に起こる現象は複雑である。そのため、薄い材料の化学組成、結晶構造がわかっても、物性は容易に予測できない。つまり、表面の物性と粒子の大きさ、組成、位置との関係は極めて限定的にしかわかっていない。このように、表面科学は未知な部分が多い。例えば、摩擦力の発現要因とその寄与の程度や、物質の表面と高分子の結合様式などが挙げられる。もし表面科学を学問として体系付けることができれば、既存の知識をひっくり返すようなことが起こるかもしれない。

このように、研究する内容の多い表面科学の中で中島先生は、表面に不思議な性質をもつ酸化チタンに注目し、研究を行なっている。酸化チタンは、紫外線や太陽光を当てることで触媒反応を生じる光触媒として多用される。酸化チタンの光触媒としての注目すべき2つの性質と環境材料への応用を具体的に見てみよう。

1つ目は、強い酸化力である。酸化チタンに紫外線や太陽光を照射すると正孔と電子ができる。そのほとんどは再結合するものの、一部は表面まで拡散する。表面にまで正孔と電子が拡散すると、外にある酸素、水と酸化還元反応をして、 $\text{O}_2$ 、 $\text{OH}^-$ のようなラジカル種ができ、強い酸化力が生じる (図1)。そのため、酸化チタンの表面に紫外線や太陽光を当てると、環境問題になっているダイオキシンやにおいの成分など、地球上のほとんどの有機物を環境に無害な物質に分解できる、環境浄化材料として利用できる。

しかしこの性質は、分解する物質の性質をきちんと調べ、酸化チタンの性質がよく働くように材料の制御をしなければ、効率よく作用しない。そこで、中島先生は酸化チタンの形態制御、他物質や外場との組み合わせなどにより、酸化チタンの環境浄化効果の効率を上げ、その応用に関する研究を広範囲に行なっている。

2つ目の性質は、超親水性である。酸化チタンの表面に紫外線を当てると、水が強く引きつけられる性質である。油などの汚れが付いたとき、水が表面に強く引き付けられるので、汚れの界面に水が入り込み、汚れが浮く (図2)。そのため、酸化チタンはセルフクリーニングの性質をもつ材料になる。つまり、太陽光が当たって雨さえ降れば、綺麗な状態が維持される。実際に、酸化チタンは掃除しづらい東京ドームの天井などに用いられている。また、酸化チタン薄膜を用いれば、雨の日でも曇らないガラスを作ることができる。これはすでに実用化されており、交通事故防止のため、車の窓ガラスに使われている。しかし、この超親水性のメカニズムはいまだにわかっていないため、中島先生はその発現理由に関する研究をしている。

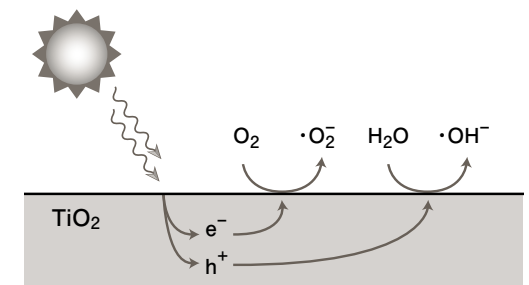


図1 酸化チタンの強い酸化力

紫外線や太陽光が酸化チタンの表面に当てられると、正孔( $\text{h}^+$ )と電子( $\text{e}^-$ )が生じるため、酸化力の強い、ラジカル種ができる。

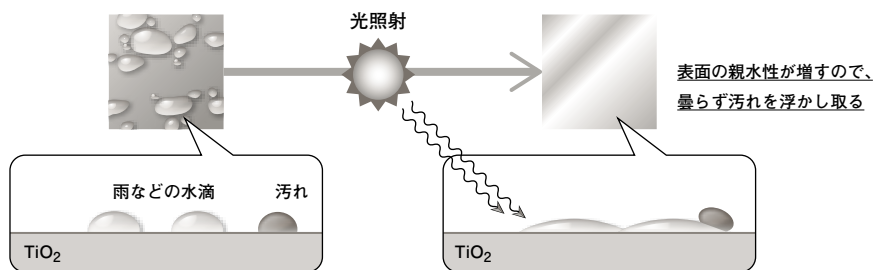


図2 酸化チタンの超親水性

酸化チタンの表面に太陽光が当たると、水滴が表面に強く引きつけられる。そのため、表面上に水滴が広がるため、曇らず、汚れが取れる。

中島先生は、酸化チタンの親水化機構を研究するとともに、撥水表面研究にも注目した。撥水性とは、水をはじく性質をいい、親水性の反対の性質である。今まで撥水性に関する議論は、表面と水滴の形状など、水滴の運動を含まない議論がほとんどであった。そのため、撥水性のある表面上で水滴が転がる運動に関しては、今までほとんど研究されていなかった。水滴の運動の様子がわかれば、撥水性のある表面上で水滴を制御できるようになり、独特な材料ができる可能性がある。そのため、中島先生は、動撥水の研究を最前線に立って行っている。

動撥水は中島先生が独自に考案した研究テーマである。では、動撥水はどのような研究なのだろうか。まず、テフロンなどの撥水性物質を表面に付ける。その表面上に水滴を乗せて、どれくらいの速さで動くか、その界面の流動抵抗はどれくらいかなどを調べるのである。

動撥水研究の様子の紹介をしよう。まず、斜めの撥水性表面上に水滴を乗せ、高速度カメラで水滴の速度、形などをとらえる。さらに、水滴に蛍光粒子を少し入れ、レーザーを当てることによって発光させる。それを高速度カメラでとらえることで、水滴内部の運動も知ることができる。この観測結果により、撥水性表面上の水滴の運動がわかる。

この撥水性表面の種類と水滴の運動がどのような相関関係をもつかを知ることで、水滴の運動を制御することができる。また、その材料を用いた、よりエネルギー効率のよいエアコンの開発や着雪着水防止も期待されている。水滴の制御をすることで、電力の無駄を減らし、省エネルギーに貢献できるのだ。

### 松下先生の研究——光学デバイス

自然エネルギーといえば、太陽電池が代表的である。太陽電池には大きく分けて5つの種類があり、シリコン型、化合物型、有機薄膜型、量子ドット型、色素増感型太陽電池がある。そのなかで松下先生は、安全、安価、デザイン性に優れた特徴をもった色素増感型太陽電池に注目して、その研究を行なっている。

色素増感型太陽電池は、どのような原理で電気を生み出しているのだろうか。色素増感型は、色素と酸化チタンを極として作られる。太陽光により励起された色素の電子が酸化チタンのほうに流れることで、太陽電池となる。

しかし、この太陽電池には課題がある。それは発電効率が低いことである。太陽光によって色素の電子が励起され、酸化チタンのほうに効率よく流れれば問題は生じない。しかし、その途中で多くの励起された電子が光や熱を放出して、基底状態に戻ってしまう(図3-左)。基底状態にいる電子は酸化チタンのほうに流れないため、電流が小さくなり、発電効率が悪くなる。

松下先生は、その課題を解決する策として、基底状態に戻る際に生じる光を生じさせないことで、励起状態の電子を基底状態に落とさない方法を採用した。そのときに用いるのが、フォトニック結晶と呼ばれるものである。

フォトニック結晶とは、直訳すると光の結晶という意味で、屈折率が周期的に変化する構造体のことである。これは、粒子が光の波長ほどの間隔で規則正しく並んでいる結晶になっている。フォトニック結晶の身近な例として、オパールという

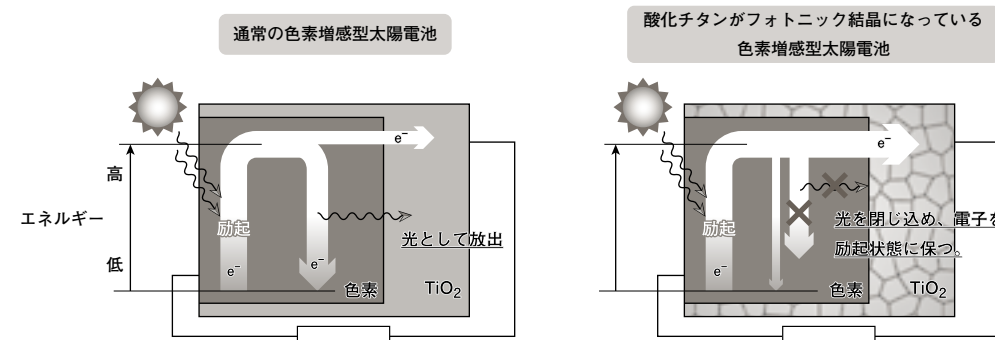


図3 色素増感型太陽電池

ある特定の波長領域内の光はフォトニック結晶内では存在できないため、励起状態の電子は基底状態に落ちることができない。すると、励起状態にいる電子の割合は増えるため、発電効率が上がる。

宝石がある。その宝石はフォトニック結晶として存在し、虹色に輝いている。オパールが虹色に輝く理由は、屈折率が周期的に変化するからである。

フォトニック結晶は、ある特定の波長領域の光を閉じ込めることができる。そのため、色素増感型太陽電池の酸化チタンをフォトニック結晶にすると不思議な現象が起こる。電子が励起状態から基底状態へ落ちるときに生じる光の波長が、フォトニック結晶で閉じ込められる範囲内である時、電子は光を放出することができない。これにより、励起状態にいる電子は基底状態に落ちることができないため、励起状態にいる電子の割合は増える。そのため、発電効率が上昇する(図3-右)。その結果、松下先生は、従来の色素増感型太陽電池の発電効率を、色素分子1個あたり約13%上昇させることに成功した。

フォトニック結晶と関連する光学デバイス研究の中に、メタマテリアルの研究がある。金属棒を等間隔に並べると、メタマテリアルという、屈折

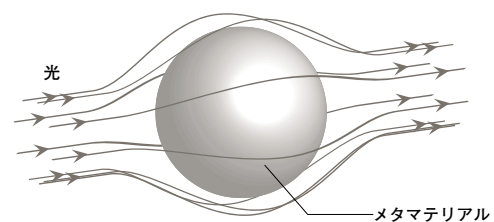


図4 メタマテリアル

光はメタマテリアルの表面を避けるように伝わる。そのため、反射光が生じず、メタマテリアル内の物体は見えなくなる。

率が負の材料になる。メタとは、訳すと高次元の、超越した、という意味である。これは、人工的に今までにない、超越した材料を作ろうとする研究である。

マクスウェル方程式によって物質の屈折率は、物質の比誘電率を $\epsilon$ 、比透磁率を $\mu$ とすれば、 $\sqrt{\epsilon} \cdot \sqrt{\mu}$ と再定義される。ここで、金属は外部から電場をかけると金属内で逆向きの電場を作るため、金属の比誘電率は負である。また、円形金属に外部磁場をかけて電磁誘導が起きると、逆向きの磁場をつくるので、比透磁率も負になる。すると、ルートの中が双方とも負になるので、屈折率が負になる。このことから、従来までの光学では不可能とされていた負の屈折率の実現が理論的に可能であることがわかる。

屈折率が負であるため、メタマテリアルは2つの特別な性質をもつ。1つ目は、透明になる性質である。メタマテリアルの表面に沿って光が伝搬していくので、中身が見えなくする透明マントの作成が期待されている(図4)。理論的には完全に透明になるとされるが、実用化までには至っていない。2つ目は、収束レンズの性質である。メタマテリアルを用いて、光を1点に集め、感光性物質の表面に光の波長ほどの大きさのものを安く作製できると期待されている。科学技術が発達した現代でも、50nmほどのナノサイズの物質作製には膨大な費用がかかる。そのため、ナノサイズの物質作製の実用的な材料として、松下先生はメタマテリアルに着目しているのだ。

## 磯部先生の研究——機能材料

セラミックスはさまざまな環境保全や環境浄化などに応用されている。磯部先生は、これまで取り扱われてきたものづくりの方法を科学的に検証し、セラミックス材料をさらに高機能化することに取り組んでいる。

セラミックスは基本的に粉末を形作り、焼くことで作製される。形を作る際、セラミックス粒子と水、有機添加剤を混ぜ、ペースト状にしてから目的の形に成形する。有機添加剤は、その効果によって結合剤、分散剤、可塑剤、潤滑剤などに分類される。一般的に、セラミックスの形を作る際、複数の有機添加剤を組み合わせることで、成形に最適なペーストに調製する。有機添加剤を入れることで、どのような効果が得られるかは知られているが、有機添加剤が効果を発現するメカニズムはペーストの性質から推測することにとどまり、科学的なメカニズムの解明は不完全である。

磯部先生は、有機添加剤の分子一つひとつが、セラミックスの粒子に対してどのように作用を及ぼすかという理学的な研究を行なっている。これらの研究を通じて、ものづくりの高効率化および、少量で効果的に機能を発現する有機添加剤の開発を目指している。その研究成果によって、環境負荷の少ない材料作製過程を構築できると磯部先生は考えている。

まず、上記の研究を利用して作製した環境対応型セラミックスを紹介しよう。その代表的なものはCO<sub>2</sub>ガス分離フィルタおよび樹木の打ち水効果をもつセラミックスである。

CO<sub>2</sub>ガス分離フィルタは、二酸化炭素だけが通りやすく設計されてあるセラミックス多孔体である。その孔の直径は約50~100 nmである。このセラミックスの孔の壁は、二酸化炭素が化学結合しやすい性質をもっているため、フィルタの孔を通る二酸化炭素の移動速度を下げるができる。そのため、二酸化炭素だけを分離できる。

このフィルタで分離して回収した二酸化炭素は、地中や海底に埋めることで見かけの二酸化炭素排出量を減らすことができるほか、燃料として再利用することが検討されている。

次に、打ち水効果をもつセラミックスについて紹介しよう。打ち水効果とは、樹木が水を吸い上げ、水滴を発散させる効果である。先生の開発したセラミックスは、樹木の導管、篩管に似た構造を作ることで、樹木が水を吸い上げる毛細管現象を再現したものである。このセラミックスは、電力なしで水を吸い上げることができる。さらに吸い上げた水滴を発散させるため、このセラミックスの周辺は涼しくなる。

このセラミックスはすでに実用化され、大型マンションや大規模オフィス街に施工中である。このほか、人の多い駅の地上ホームなど、エアコンが使用しにくい施設に設置することで、電力なしで夏の暑さを軽減できると期待されている。

## 中島・松下研究室のこれから

これまで述べたように、中島・松下研究室は固体の材料という共通点を持ち、環境材料という視点をもっていろいろな材料研究を行なっている。そしてその研究は、自然現象が起こる理由を考え、ものづくりに応用する、理学的でかつ工学的な研究である。そのため、中島・松下研究室の材料研究には、幅広い知識が要求される。

これからも中島・松下研究室では、深刻化する環境問題を緩和する環境材料研究をするだろう。そして中島・松下研究室の研究は環境にやさしいものづくりを支えるとともに、表面科学の研究の土台となる学問を確立し、これから表面科学を学ぶ多くの研究者の架け橋となっていく。中島・松下研究室の環境材料研究が、かけがえのない地球の環境を維持し続けていこう。

### 執筆者より

先生方の研究はとても興味深く、環境材料研究の面白さを知り、学科志望にも繋がりました。取材中には、中島先生の表面科学への情熱を感じ、私も表面科学に携わる研究者になりたいと強く思いました。大変お忙しい中、親切に対応してくださり、誠にありがとうございました。

(望月 泰英)