

「ナノドット構造」は 世界を変える可能性を 秘めた研究分野

研究成果や知見は社会実装されてこそ
——研究成果の「アウトカム」が必要

東海大学 総合科学技術研究所
特任教授 橋田 昌樹 氏



半導体や太陽電池、バイオマテリアルをはじめとしたさまざまな最新技術の製造・開発には、微細な加工を施すレーザー技術が不可欠と言われている。そうした中、物質にごくわずかな時間だけレーザーを照射し、その照射痕に生じる微細構造物を制御することで、材料表面に新たな機能を付与する新技術の開発が進められている。しかし微細構造物ができるメカニズムや詳しい制御方法については未だ解明されていない部分が多い。

東海大学・橋田昌樹特任教授は2000年頃から物質表面に高品位なレーザーを照射することで形成されるナノ構造についての研究を進めてきた。量子科学技術研究開発機構(QST)、大阪大学(接合科学研究所)、京都大学(化学研

究所、エネルギー理工学研究所)、大阪産業大学などの大学・研究機関との共同研究や国内外の企業との共同研究にも積極的に取り組んでいる。また、公益財団法人天田財団の研究助成に応募、2018年には重点研究開発助成、2022年には一般研究助成に採択されている。

現在は材料表面に微細構造を付加することで「ウイルスラップや不活化・抗菌効果向上」「太陽電池の反射率低減による性能効率向上」「リチウムイオン電池の性能向上」などの応用研究を進める一方、材料表面に新たな機能を付与することを目的とした光源開発などにも取り組んでいる。

機能性材料の可能性とその応用について、橋田教授に話を聞いた。

■ レーザ加工で材料表面に新たな機能を付与する

——橋田先生は材料表面に高品位なレーザーを照射することで微細構造物を形成し、材料に新たな機能を付与する新技術の研究を進めています。

橋田昌樹教授(以下、姓のみ) 機能性材料の設計製作では、材料の表面の幾何学的形状・結晶の組成が重要な役割を果たすことが知られています。特に表面に所望の幾何学的形状(高さ・大きさ・密度)を付加することで、その「かたち」により決まる電気・熱の伝導性、磁性、光物性、



① 2023年11月に導入したフェムト秒レーザー。研究室には2台のフェムト秒レーザーが設置されている／② 3台あるYAGレーザーのうちの1台。精度を一定に保つため温度を管理、湿気対策なども行っている

結晶性によって新しい材料特性を付加できるようになることが期待されています。

材料表面に材料の破壊閾値を超えるエネルギーの短パルスレーザーを照射すると、アブレーション（飛散剥離）し、短パルスレーザー特有の周期的な微細構造物が材料表面に自己組織的に形成されます。この微細構造物はレーザー波長より短いピッチの格子間隔を持っています。しかし、その形成機構についてはわかっていないことも多く、微細構造物をどこまで小さくできるか、どのようにして周期の均一性を高めるか、どのように制御するかなどの糸口がつかめませんでした。

そこで私は微細構造物の形成機構解明を目的として、レーザーと物質の相互作用の観点から研究に取り組みました。そして、レーザー照射された金属表面から放出されるイオンは多光子吸収と光電場による電子放出が関わっていることや、微細周期構造の形成時に放出されるイオンのエネルギースペクトルと類似している微小空間からクーロン爆発によりイオンが放出されていることを明らかにしました。また、微細構造物の格子間隔がレーザーフルエンスに依存することを発見、形成機構にはレーザーとレーザー生成プラズマとの相互作用が関わっていることがわかりました。

加えて、材料の結晶性はアブレーションにより制御できることを明らかにし、役割の異なる複数のパルスからなる複合レーザー照射により周期的微細構造物の大きさをレーザー波長 λ の1/13程度まで微細化することに成功。照射条件を最適化することで極めて高い周期性（均一な周期性）の微細構造物が形成されるなどさまざまな新しい現象を見出しました。

このように材料表面に所望の微細加工を施すにはレーザーと材料との相互作用を理解し、制御することが求められます。

■ 医療機器や太陽電池、リチウム電池などへの応用が可能

——この研究成果によってどのような社会実装が考えられるのでしょうか。

橋田 材料表面に微細構造を付加することで「ウイルストラップや不活化・抗菌効果向上」「微細構造の新奇応用」「太陽電池の反射率低減による性能効率向上」「リチウムイオン電池の性能向上」「がん治療のための薄膜炭素の製作」「自動走行車開発のための異種材料接合」などの応用研究を進めています。また、材料表面に新規な機能を付与することを目的に「高強度レーザー開発」「高強度THz波発生」といった光源開発にも取り組んでいます。

プロフィール

橋田昌樹（はした・まさき）

東海大学・特任教授（兼京都大学・研究員）。

1996年3月に大阪大学大学院 工学研究科 電磁エネルギー工学専攻で博士（工学）を取得。1986年以降、レーザー学会レーザー技術振興センター・技術員、大阪大学レーザー核融合研究センター・技術補佐員、レーザー技術総合研究所・研究員、フランス原子力研究所・研究員、レーザー技術総合研究所・研究員、京都大学化学研究所 先端ビームナノ科学センター・レーザー物質科学研究領域准教授、同複合基盤化学研究系・特定准教授などを歴任し、2021年10月より現職。

専門分野はレーザー物質相互作用物理、レーザー微細加工、高強度レーザー科学、レーザー生成量子ビーム発生、レーザー科学技術など。

※研究室Webサイト：

<https://laser.rist.u-tokai.ac.jp/>



現在は最小で10nm (0.00001 mm) のドットまで形成できます (特許申請済み)。実験を行う中で、微細構造ができるメカニズムや、フェムト秒レーザーだけでなくナノ秒レーザーでも十分な効果を得られることがわかってきました。今後はどこまで小さくできるか、ドット構造ができる時間スケール (特にレーザーが当たって何秒後に構造が変化をはじめるか) を調べていきたい。そこがわかれば成長の度合いをコントロールできるようになり、望んだ微細構造を自由に加工できるようになるはずで

す。材料については今のところ、金属と半導体は確認しました。これから量子科学技術研究開発機構 (QST) および京都大学 (化学研究所) と協力して絶縁物を材料とした研究を進めていきます。関西大学の伊藤健教授によると、セミの羽根の透明な部分は100nmほどのドット構造になっていて菌を剣山のように突き刺すことで抗菌効果を持っているそうです。セロハンのような素材でもドット構造になるだけで菌が成長しなくなる。素材によって発生条件が異なると考えられるのでバイオメタル分野の研究も展開したい。東海大学には医学部もあるので、医工連携にも役立てプレゼンスを示したいと考えています。

■ シリコン系太陽電池の性能効率向上にも貢献する

——カーボンニュートラルに向け、再生可能エネルギーへの注目が高まっています。太陽光発電への応用についても少し詳しく聞かせてください。

橋田 太陽電池は「シリコン系」「化合物系」「有機系」の3種類に大別されます。このうち95%のシェアを占める「シリコン系」は安価ですが、エネルギー変換効率は27%程度と高くありません。単結晶シリコン太陽電池の場合、表面に1~10 μ mのピラミッド構造が付与されることで、太陽光波長500nmの反射率が20%程度改善され発電効率が10%程度向上し、エネルギー変換効率27%を達成しています。さらなる改善を目指すため、ピラミッド構造表面に1 μ m以下のナノ微細構造を形成させ、ダブルテクスチャー構造にした太陽電池の研究が注目されています。

太陽電池のピラミッド構造表面に高品位レーザー加工を施すことができれば、高速で、大面積の反射率を低減する加工の実現が期待できます。実験ではパルスレーザーを用いてシリコン太陽電池のピラミッド構造の表面にナノ微細構造を形成させ、結晶性を保持しつつ反射率の低減をはかります。私は微細構造を形成させるために重要なパラメータのアブレーション閾値に着目し、その測定を行いました。測定したアブレーション閾値をもとにシリコン太陽電池の表面に

微細構造の形成を行い、表面形状のレーザー照射パラメータ依存性を調べました。また、微細構造を形成させた太陽電池の結晶構造はラマン分光法で評価し、反射特性は反射スペクトルもしくは表面形状から評価しました。

太陽電池に6nmくらいのドット構造ができると、バンドギャップが大きくなり変換効率が上がる可能性があります。シリコン太陽電池のバンドギャップは1.1eV。光の波長は1000nm程度に対応しますので、この波長では一番分光感度が高くなり変換効率も良くなります。しかし、太陽光の最大強度の500nm (2.48eV) とこのバンドギャップが一致せず、エネルギー変換効率が27%程度と低くなっていました。太陽光の最大強度に一致するようにバンドギャップを制御できれば、変換効率を2倍以上に高めることができると考えられます。

注目を集めている「有機系」のペロブスカイト太陽電池は、エネルギー変換効率は良いものの劣化が早いというデメリットがあります。それならば今あるシリコン系にレーザーを当てて変換効率を上げた方が効率も良いのではないのでしょうか。材料自身の持つ特性を生かして、エネルギー変換効率が最適な幾何学的形状を太陽電池に付与することが狙いです。

■ 2000年から短パルスレーザーの応用研究を開始

——橋田先生がこの研究をはじめたきっかけやこれまでの経歴についても教えてください。

橋田 1996年3月に大阪大学大学院 工学研究科 電磁エネルギー工学専攻で博士 (工学) を取得。レーザー学会レーザー技術振興センター・技術員、大阪大学レーザー核融合研究センター・技術補佐員、レーザー技術総合研究所・研究員を担当しました。1999年4月~2000年9月には阪部周二先生 (現・京都大学 学際融合教育推進センター 名誉教授) からの提案でフランス原子力研究所へ行き、短パルスレーザーの応用研究について学ぶ中で、レーザーを照射することで材料表面に微細構造物を生成できることを知りました。

日本に戻って短パルスレーザーを活用した研究をスタート。2000年10月~2003年4月にレーザー技術総合研究所・研究員、2003年5月~2006年3月に京都大学化学研究所レーザー物質科学研究領域・助手、2006年4月に同・准教授、2020年4月に同・特定准教授を経て、2021年10月から現職の東海大学総合科学技術研究所・特任教授となりました。

東海大学に来て2年。学部、M1、M2、博士課程を含めた学生数が京都大学の約10倍なので、得られる実験



①工学系に組み込むステージやミラーなどがいつでも使えるように用途ごとに整理されている／②卓上電子顕微鏡、コーター装置、データ集積用サーバーなどが並び／③材料表面にナノ微細構造を形成した加工サンプル

データの量も10倍になります。パラメーターランなどさまざまなデータを収集できるので、研究が一気に加速し研究テーマが広がりました。研究室にはフェムト秒レーザー2台、YAGレーザー3台、レーザー顕微鏡、卓上電子顕微鏡など、必要な設備がそろっています。研究室に配属された学生は、最初にレーザーの基礎と実験設備の使い方の研修を受け、その後は3時間単位で自由に予約し、レーザー実験を実施します。卒業・修了研究テーマはドット構造に関する基礎的なものか、応用的なものかを選んでもらいます。学生たちができる限り主体的に実験できるよう、デジタル化を駆使して研究環境を整備しました。

ここで学んだ学生もいずれ卒業し就職しますが、研究で得た知見を企業で活用してほしいと考えています。知見は使ってこそ意味があるからです。

■「ナノドット構造は世界を変える」

——共同研究や産学連携についてはいかがですか。

橋田 国内外のさまざまな大学・研究機関らと共同研究を行っています。現在はQSTが2件、大阪大学(接合科学研究所)が1件、京都大学(エネルギー理工学研究所)が1件、大阪産業大学が1件の計5件が動いています。毎週1回は京都大学の業務をこなしつつ大阪産業大学との共同研究も進めています。

京都大学・水落教授のグループとはレーザーパルスをダイヤモンドに照射することで窒素-空孔(NV)中心を形成する研究をしています。NVセンターは高い感度が要求される医療機器、化学分析、素粒子探索研究への応用など、幅広い分野での適用が期待できます。高強度のレーザーをごく短時間照射するだけでできるので安価につくることができるのも特徴です。私はナノドット構造は世界を変える可能性も

秘めた研究分野であると期待しています。

産学連携は日本法人のある米国・韓国などの大手企業と行っています。海外企業の場合、いきなり「明日行くから時間をください」と電話がかかってきて対面で話したその場で共同研究の予算、守秘契約について決まる——すぐ決断が早いです。日本の企業からも連絡がくることがありますが、前向きに検討しているのですが、決定権のない社員がほとんどで上司に相談して許可が下りず企画が消えてしまうことが多いです。企業の場合は利益を出さなければいけません。ただ成果だけを優先するのではなく、先を見て果敢に挑戦していかないと日本は世界から取り残されてしまうのではと思います。

■研究成果の「アウトカム」が必要

——研究を進めるうえで大切にしていることはなんですか。

橋田 「いつもチャレンジャーであれ」という心持ちは重要だと思っています。私はフランスでレーザーアブレーションに携わってから23年間、ずっとレーザー加工による表面構造の付与に関する研究に従事してきました。ほかの先生から「まだやっているのか」と言われることもありましたが、ずっと研究してきたことで今ようやくナノドット構造がつくれるところまで微小化しました。どこで芽が出るかは誰にもわかりません。継続することは大変ですがとても大切なことだと思います。

ただ、研究成果や知見は社会実装されなくては意味がありません。プロジェクトに成功し適切にアウトプットするのは当たり前で、その後のアウトカムにどのようにつながられるかがとても重要です。次世代レーザー加工として認められるには社会に有用性に気づいてもらい、役立てもらう必要があります。そうした技術に発展させるためにはどうすれば良いのか——私たち研究者は日々考えなければなりません。