

新しいレーザーで新しい分野を拓く

緑川克美

理化学研究所レーザー物理工学研究室主任研究員

総研大ジャーナル 8号 2005秋 SOKENDAI Journal No.8
無断で転載することはお断りします。journal@soken.ac.jp

波長が数十nmの軟X線は、現在、レーザーで作り出せるいちばん波長の短い光だ。
波長が短いほど短いパルスをつくれることから、この光で新たな研究分野が開けると期待されている。

「光で観る」ことは科学の基本だと思います。望遠鏡と顕微鏡の発明以来、光による観察や計測は科学の進歩に大きな役割を果たしてきました。しかし、そのために使われてきた光は、可視域がほとんどでした。可視域ではレーザー光も簡単につくり出すことができ、レンズ、ミラー、ファイバーなどの光学素子も極限近くまで開発されています。

これからは、光の波長範囲*1を可視域周辺からもっと外側へと広げることで、科学の先端分野を切り開いていく時代で

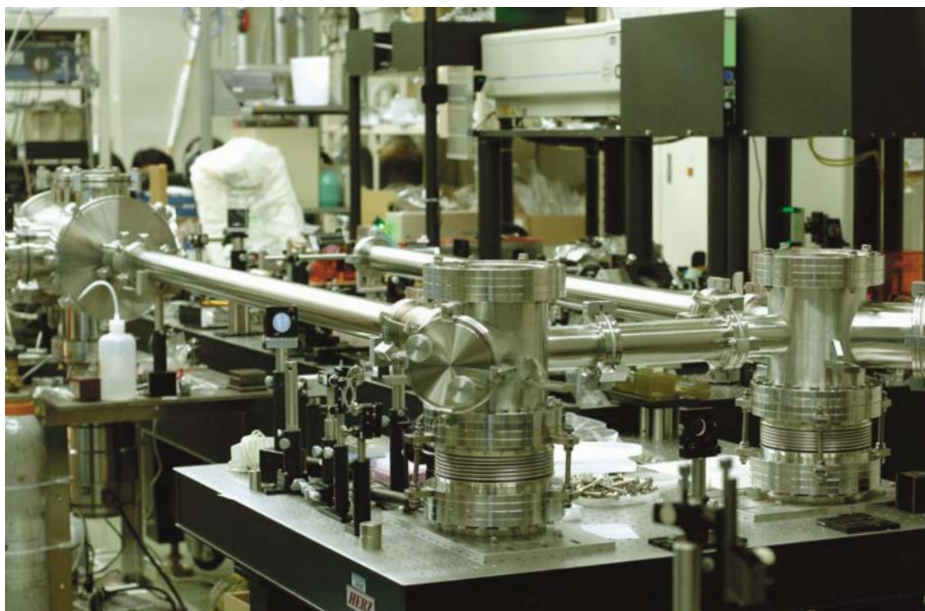
す。ところが、この領域では、光源も、光学素子もないに等しい。ですから、まず光源を開発し、同時に、「どんな手法を使えば、何がどのように見えるのか」を研究しなければなりません。

そのために、今年度から「エクストリームフォトリクス」というプロジェクトが始まりました。これまで光源開発や生体イメージングなどを行ってきた理化学研究所のいくつかの研究グループがまとめ、さらに、分子研や東大などのグループにも加わっていただいて、共通の目

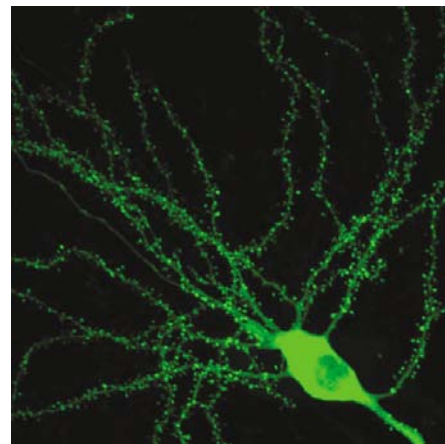
標に向けた研究を進めています。

新しい光で「観る」対象はいろいろ考えられますが、特に期待されるのは生物試料です。生物は、小さな分子、タンパク質などの高分子、それらが集まってできたオルガネラ（細胞器官）、細胞、細胞が集まった組織という階層構造をもっています。「より短い波長で観察すれば、より小さい階層を観察できる」のはもちろんですが、同じ階層をさまざまな波長と手法で観察できれば、異なった空間・時間スケールの情報が得られ、いろいろな

この装置で、軟X線レーザーのアト秒パルスをつくり出す研究が行われている。振動や気流を嫌うレーザー研究のために、装置を設置する建物の設計段階から、さまざまな配慮がなされた。撮影：由利修一



二光子レーザー走査顕微鏡により、神経細胞の中で蛍光タンパク質が光るようすを詳細にとらえることができる。脳科学総合研究センターの宮脇敦史チームリーダーとの共同研究。写真提供：宮脇敦史



生物現象の一部始終が明らかになるものと期待しています。

レーザー研究者の夢を実現

私自身の担当は、軟X線（波長の長いX線）レーザーの開発です。1960年にレーザーが発明されて以来、発振波長をX線にまで短くすることは研究者の大きな夢でした。X線レーザーは、大出力の励起光源を必要とすることが大きなネックであり、レーザーを励起光源として1980年代初めによく実現されました。しかし、そのときの装置は体育館のように巨大なものでした。

その後、フェムト秒レーザー^{*2}が開発され、そのパルスのエネルギーを圧縮する技術も開発されて励起光源に使えるようになりました。フェムト秒レーザーをうまく使うと、発振波長をもとの光の100分の1程度にまで短くできます。この波長変換技術により、卓上に置ける大きさの装置でX線レーザーを実現できるようになりました。ただし、実現された当初は、物理学的にはおもしろいものの、効率が低く、光源としては使い物になりませんでした。

波長変換の効率を落とさないためには、もとの波長の光と、変換後の波長の光の速さを揃えることが重要です。しかし、波長が異なるとレーザー媒質中での屈折率が異なるため、変換の前後で速さが変わってしまうのです。そこで私は、レーザーの集光方式や、媒質として用いるガスを入れるセル、ガス圧などを工夫することで、波長による速さの差をうまく解消する方法を開発しました。同時に、軟X線を反射させるのに適したミラーなども開発し、2003年に、従来の100～1000倍の強度をもつ世界最高瞬間輝度の軟X線レーザーの発振に成功しました。

新たな光で新たな現象を

このように強い光は、入力が2倍になると出力が4倍以上になるといった「非線形現象」を引き起こすので、超高速のスイッチなどさまざまなデバイスへの応用が考えられます。さらに、軟X線の波長は

緑川克美（みどりかわ・かつみ）
もともとは核融合に興味をもっていたが、レーザー核融合というのを知り、レーザーの研究室へ。そこでレーザーの魅力にとりつかれる。軟X線レーザーの高出力化、短パルス化に取り組む一方、「エクストリームフォトニクス」研究推進グループのリーダーとして、理化学研究所内の関係グループを束ね、分子科学研究所や東京大学との連携を進めている。

撮影：由利修一



短いので、可視光で実現できるフェムト秒に比べてずっと短いアト秒^{*3}のパルスがつくれます。フェムト秒レーザーでは、分子の回転や振動を見ることができ、化学反応の解析が進みましたが、アト秒レーザーでは原子の中の電子の運動が見えるはずです。

また、「水の窓」と呼ばれる波長領域の軟X線は、水には吸収されないのに炭素や窒素の原子には吸収されるので、水を含んだ生物試料の観察にたいへん適しています。生きた細胞の中のオルガネラ間でエネルギー輸送や情報伝達が起こるようすを、アト秒のパルスでストロボ写真のようにとらえられる日も近いと思います。

光源開発の一方で、これまでに蓄積したフェムト秒レーザーの制御技術を生体イメージングに生かすための共同研究も行っています。その一つが、二光子レーザー走査顕微鏡による神経細胞の観察です。目的の試料に蛍光タンパク質を組み込み、細胞内で光らせて観察するという手法がありますが、大脳皮質の神経細胞

はたくさん積み重なっており、奥の細胞の蛍光タンパク質だけに焦点を絞って励起光をあてるのが難しいのです。

フェムト秒レーザーを励起光に用いると、ある波長の光子が2個まとまってその半分の波長の光子1個と同じ働きをするという現象が起こり、奥まで届きやすい長波長の光で励起することができます。さらに、パルスに含まれる光の波長を調節して蛍光タンパク質の劣化を極力防ぎ、顕微鏡の視野を走査し終えるまで光らせることができました。

今回のプロジェクトでも、光を使ってさまざまなものを観ようとするグループとの連携を深めつつ、新たな光源を開発していくことになります。この強みを生かして新たな研究分野を開けるよう、微力を尽くしたいと思っています。

（取材・構成 青山聖子）

*1 p.3参照。

*2 10フェムト秒程度のパルスをつくれるレーザー。1フェムト秒＝ 10^{-15} 秒（1000兆分の1秒）。

*3 1アト秒＝ 10^{-18} 秒（100京分の1秒）。

光の力を活かしたナノテクノロジー

増原 宏

大阪大学大学院工学研究科教授

光をうまく使って物質の性質を調べる研究はずいぶん進んだ。
これからは、物質を反応させ、加工し、操るための道具として光を使いこなす時代である。

光はほんとうに不思議です。実体がなく、重さもないのに、物質と相互作用すると現れる。そして、光を受けた物質は突然、変化する。そこに魅入られ、長く研究を続けてきました。

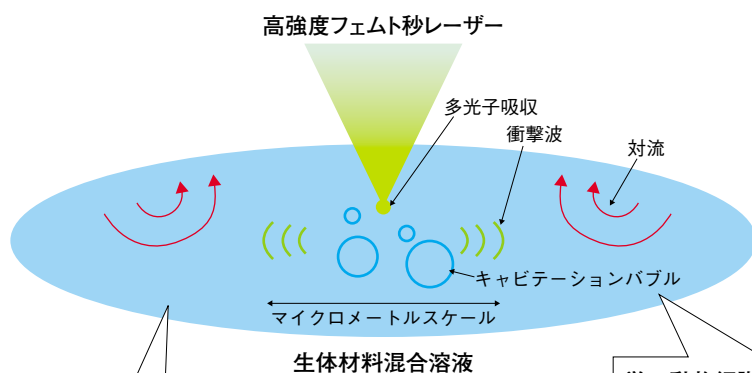
光科学の研究には、二つの意義があると考えています。一つは、どなたも賛同して下さることですが、新たな概念を生み出し、学問のフロンティアを切り開く

ことです。もう一つは、まったく新しい実際に役に立つ技術や手法を生み出すということです。藤嶋先生の光触媒は実用化に至ったすばらしい例ですが、まだそういう例は少ない。古くはナイロンの光重合*1もありましたが、残念ながら、光を使わない効率的な重合が開発され、消えてしまいました。でも、熱や圧力をかけて反応させる手法は長い研究の歴史

があるのに対し、光を使う手法は研究が始まったばかり。もう少し時間をいただければ、たくさんのヒントと実用的にも成果が出せると思います。

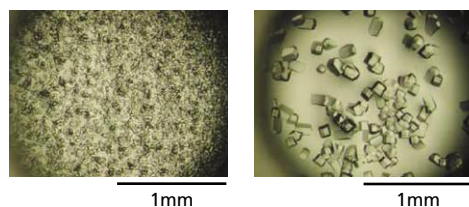
反応が起これば形が変わる

私自身は、二つめの意義につながることを意識しつつ、一つめの「フロンティアを開く」ことに貢献したいと思っています。



新しい可能性を生み出したフェムト秒レーザー
左は結晶化の例。レーザーをあてると、あてないときに比べて大きな結晶ができる。右は単一細胞操作の例。細胞が基板に伸ばした「足」をレーザーで切ってから、衝撃波で浮き上がらせる。

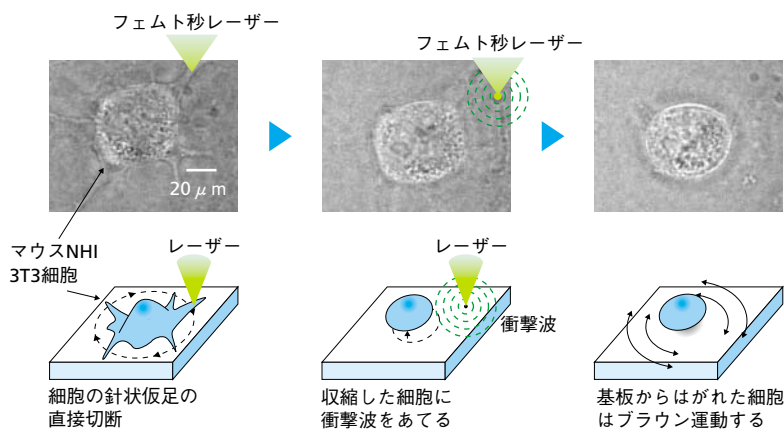
タンパク質の結晶化制御



レーザー未照射時
結晶核が自然にできて成長

レーザー照射時
照射でできた結晶核が大きく成長

単一動物細胞の非破壊単離



写真提供：増原宏／細川陽一郎

ます。光で「観たり」、「制御したり」する研究は着実に進展していますが、なかでも、私は「光ならではのナノテクノロジー」を目指しています。大きさが数nmから数十nmのナノ粒子は、分子とバルク（ある大きさをもったかたまり）の材料との「かけ橋」になるからです。研究の大きな柱は、①ナノ分光、②集光レーザービームの力によるナノ会合、③光によるナノ加工やナノ操作の三つです。

①のナノ分光の最近の代表的な成果は、ナノ結晶1粒の反応解析です。大きな結晶とは違い、ナノ結晶では光を結晶内全体に均一にあてて光反応を起こすことができます。また、光反応に伴う形状変化を原子間力顕微鏡という装置で調べることができるのが、ナノ結晶の利点です。

反応の追跡によく使われる吸収分光法は、さまざまな波長の光を物質にあて、どの波長の光が吸収されるかということから物質の中にどんな分子が含まれているのかを知る方法です。しかし、ナノ結晶は小さすぎて光の吸収が非常に少ない。このため、「レーリー散乱」という現象に目をつけました。ナノ結晶が散乱する光の波長と吸収する波長の間には一定の関係がある。これを利用し、散乱光から吸収スペクトルの情報を求め、分子の状態を調べることにしたのです。

こうして、固体の中で反応がどのくらい進んだときに、どのような形の変化が起こるかを調べる手法ができました。固体中で分子が反応すれば、その固体の形は変わるはずですが。これがナノ結晶で初めて具体的に示された。今後の研究のための道筋をつくれたと思っています。

レーザーで結晶化や細胞を操る

②は、ナノ粒子を思いのままに並べるという研究です。光は電磁波ですから、レーザーの光をレンズで強く絞ると、焦点のあたりにはとても強い電場ができます。液体中に浮遊しているナノ粒子は、ふだんは激しくブラウン運動していますが、この電場には捕まってしまいます。こうして捕らえた粒子を基板上に運び、

増原 宏（ますはら・ひろし）
大学院修士課程までは光化学反応
中間体の理論計算を研究していた
が、博士課程でレーザーを使う実
験を始め、その後は一貫してレー
ザーを用いた光化学の研究を行っ
ている。従来の手法には飽きたら
ず、1988年からの新技術事業団
（現・科学技術振興機構）ERATO
プロジェクトでは、光で分子を動
かす研究に着手。その後も、斬新
な手法を次々に生み出している。
光化学の研究拠点の3極化（アジ
ア・アメリカ・ヨーロッパ）を目
指してアジア光化学協会を設立す
るなど、この分野の国際的な牽引
車としても奮闘中。

撮影：由利修一



別の光で粒子と基板の境目を溶かして接着すれば固定できる。これを繰り返せば、基板上にナノ粒子で望みのパターンを描くことができます。

この手法の特徴は、室温下、液体中でパターンをつくれることです。温度変化や乾燥に弱いタンパク質も、この手法なら配列させることができます。種々のタンパク質を並べた病気診断用のプロテインチップもつくれると思っています。

③は、フェムト秒レーザーを強く絞って液体にあてると、衝撃波が発生することを利用した研究です。衝撃波は3次元の津波のようなもので、強い力をもっていきます。いちばん注目しているのは、タンパク質の結晶づくりへの応用です。

タンパク質の分子の形は結晶にX線をあてて調べるのが一般的ですが、きれいで大きい結晶をつくるのはとてもたいへんなのです。濃度を調節した溶液を何週間も放置して、ひたすら結晶ができるのを待つ。それでも、小さな結晶がたくさんできてくることもある。ところが、フェムト秒レーザーをあてると、結晶のタ

ネがすぐにできてそれが大きく育つ。あて方によって結晶の数や大きさを加減することもできるのです。

衝撃波では、細胞を1個ずつ動かすこともできます。細胞は、基板とも他の細胞ともくっつきやすく、ふつうの方法では引き離すことができませんが、フェムト秒レーザーをあてると、ふわっと浮き上がるのです。細胞の脇にあてるようにするので、細胞自身を損ねることはありません。単一細胞の操作ができるわけで、生物学研究に大いに役立つと期待しています。

ここでお話したような研究を、科研費のプロジェクト（特定領域研究「極微構造反応」）では大勢のメンバーにより、さらに広範に展開しています。このような光分子科学の研究は、従来の光化学、物理化学という枠組みを越え、新たなインパクトを与える段階に入ったと考えています。

（取材・構成 青山聖子）

*1 重合とは、小さな分子（単量体という）が次々につながって高分子をつくる反応のこと。反応を起こすきっかけが光の場合を光重合という。

光触媒が応用技術をリードする

藤嶋 昭

財団法人 神奈川科学技術アカデミー理事長

光分子科学の応用として、最も身近なのが光触媒だ。
その発見と開発の歴史には、第2、第3の応用例を生み出すヒントがたくさん隠れている。

酸化チタンと出会ったのは大学院の時です。当時は、光を感じる半導体の研究が世界的にさかんでした。酸化亜鉛を水に入れて光をあてると酸素ガスが発生するという報告に刺激され、先輩が別の研究に使っていた酸化チタンの結晶を譲り受けて同様の実験をしました。すると、やはり酸素が出た。ただし、酸化亜鉛の場合はそれ自身が分解されて酸素ができたのに、酸化チタンは分解しなかった。水の分解で酸素が発生していたのです。一方、酸化チタンとつないでおいた白金電極のほうでは、水素が発生しました。

1972年にこの結果を*Nature*誌に発表す

ると、たいへんな注目を浴びました。私自身は、植物の光合成と同じように太陽の光で酸素をつくれたことに感動したのですが、世間は、クリーンなエネルギーである水素ガスをつくれることに期待を寄せた。その期待に応えるべく、水から大量の水素をつくる研究に取り組みました。しかし、太陽のエネルギーは密度が低く、かなり広い面積の酸化チタンを使っても、水素はたいしてつけれないことがわかりました。

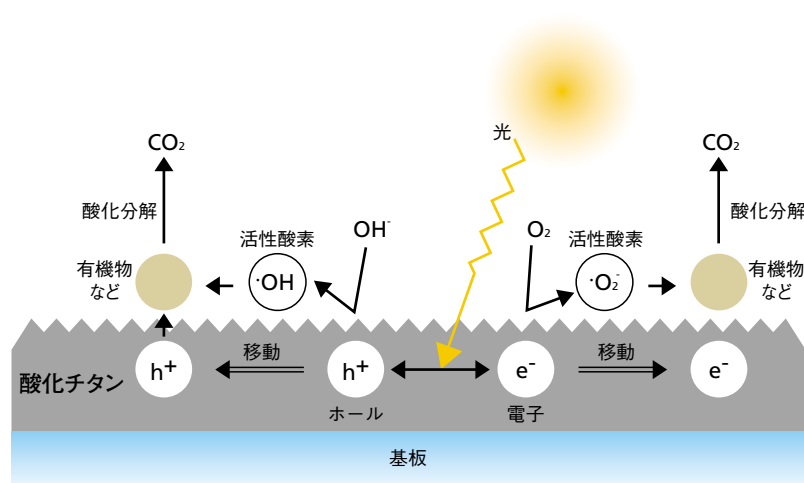
簡単には進まなかった実用化

転機が訪れたのは1989年でした。分子研にいた橋本和仁君（現・東京大学教授）を

講師に迎え、別の使い道はないかと模索しました。酸化チタンには、水を分解するほどの強い分解力がある。少量のものを分解することが有効な場面で使おうと、環境浄化への応用を思いつきました。

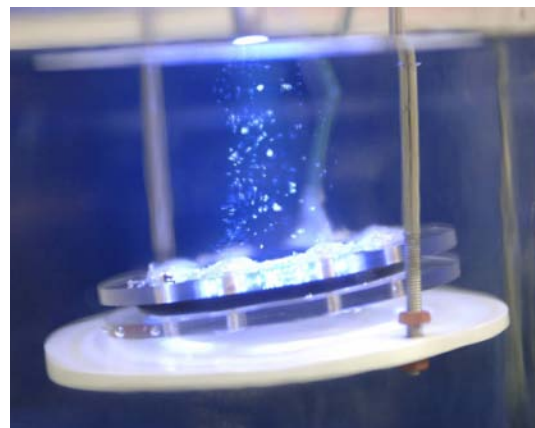
最初に取り組んだのは、細菌の除去でした。東陶機器の渡部俊也さん（現・東京大学教授）が共同研究のために来て、タイルの表面に酸化チタンをコーティングしてくれました。このタイルを手術室の床と壁に貼ったところ、空中浮遊細菌が蛍光灯の光で見事に除去されました。トイレの機器の表面に使えば、消臭や防汚の効果があることもわかりました。

そこで、私は北九州市まで東陶機器の



光触媒の働き

酸化チタンは半導体で、紫外線があたると電子とホールができる。この電子が水に溶けている酸素分子 (O_2) に渡され、また、ホールが水酸化イオン (OH^-) に渡されて活性酸素ができる。活性酸素やホールが汚れやにおいなどのもとである有機物を分解する。



最初に酸素の発生を確認した実験装置。光触媒ミュージアムに展示されている。紫外線をあてると、酸化チタンから酸素の細かい泡が立ち上る。撮影：由利修一

藤嶋 昭（ふじしま・あきら）
大学院生の時、本多健一助教授とともに、酸化チタンへの光照射で水の電気分解が起こることを発見。この現象は「ホンダーフジシマ効果」と呼ばれ、世界的に有名になった。光触媒としての応用を切り開いてからは、企業との共同研究、留学生の受け入れなどを活発に行い、大きな研究プロジェクトを次々に組織してこの分野を引っ張っている。東京大学教授を退官した2003年、現職に。子供たちの理科離れを防ぐ一助にしたいと、神奈川科学技術アカデミー内に「光触媒ミュージアム」を設けた。

撮影：由利修一



江副茂社長に会いに行きました。新しい技術を実用化するときは、トップに話をもっていくほうがいい。下のほうの人はサラリーマンですから、「製品化して失敗したら困る」となって、そこで話が止まってしまうがちです。江副社長はご母堂を院内感染で亡くされたらしく、この技術に感動し、企業化を精力的に進めてくれました。

その後、タバコのおいをとる空気清浄機にも、高速道路のトンネル照明のカバーガラスにも使われるようになりました。トント拍子に見えるかもしれませんが、おもに粉末での応用が試みられていた酸化チタンを、「コーティング」という形で固定して使ったところに大きなブレイクスルーがあったと思っています。また、どれも実用化にはネックがありました。

例えば、カバーガラスの場合、酸化チタンをコーティングしても最初は効果が出ませんでした。熱処理をして密着させるため、ガラスの中のナトリウムイオンが拡散ってきて酸化チタンにとけ込み、分解力のない物質に変化してしまったのです。ナトリウムイオンの移動を防ぐためにガラスの表面を透明なシリカでカバ

ーしてから酸化チタンをコーティングし、ようやく実用化にこぎつけることができました。

広がり続ける応用範囲

10年前、東陶機器で鏡の表面へのコーティングを研究していたとき、酸化チタンのもう一つの性質が明らかになりました。汚れが除去されてきれいになっただけでなく、水が水滴にならずに広がったのです。その理由を詳しく調べたところ、酸化チタンが光を受けたときにいちばん表面にある酸素原子がとれ、水が吸着しやすくなったことがわかりました。

この「超親水性」の発見により、酸化チタン光触媒の応用範囲はさらに広がりました。建物の外装材料に使うと、雨が水滴にならずに流れるため汚れがとれやすくなり、常にきれいに保てるのです。ガラスはすでに、ルーブル美術館のピラミッドや中部国際空港の窓に使われています。外壁や屋根にうっすらと水を流すこともできるので、その「打ち水効果」で室温上昇を防ごうという研究も愛知万博内で行われました。

私は、科学技術は誰もが天寿をまっとうできるような社会の実現に貢献すべき

だと考えています。酸化チタンはその理想にかなり近いものですが、もっと貢献できるように、医学部の研究者と共同で医療面への応用も進めています。カテーテルの表面にコーティングして清潔さを保つとか、分解力をがん治療のために使おうという研究をしています。

酸化チタンの弱みは、光のうちでも紫外線でしか分解力を発揮しないことです。可視光でも働くようにするため、酸素原子の一部を窒素などほかの原子に置き換える研究も行われています。そうなれば、白熱電球の光でも働くので、さらに応用が広がります。

科学上のすばらしい発見は、発見者が一人で成し遂げたように思われがちですが、背景には必ず、時代の風や研究仲間の熱気があったはずです。私自身も、世界的な研究の流れの中で、酸化チタンの結晶に出会えたことで大きな発見ができました。現在、私が率いる研究グループは熱気に満ちているし、ほかにも、たくさんの熱いグループがある。その中から、思わぬ発想が生まれ、斬新な応用や新たな物質が次々に見つかるものと期待しています。

（取材・構成 青山聖子）