

この人にきく

京都大学教授

平尾 一之氏



(ひらお かずゆき) 1979年京都大学工学部助手、1987年同工業化学教室助教授、1994年科学技術振興事業団創造科学プロジェクト(ERATO)総括責任者(5年間)、1998年京都大学工学研究科材料化学専攻教授、2001年NEDOナノテクノロジープログラムナノガラスプロジェクトリーダー(5年間)、2006年京都市イノベーションセンター長兼任、2008年京都環境ナノクラスター副研究統括および研究代表者、現在、日本セラミックス協会副会長を務める。無機材料科学、応用物理学、理論化学、レーザー化学、フォトリソグラフィの開発、光機能無機材料の機能発現の手法などを研究。

本日はご多用中、お時間をいただきまして、ありがとうございます。また、この度は紫綬褒章の御受賞誠にありがとうございます。さて以前より、ガラスに関する一連のご研究から、多くのことを勉強させていただいておりましたが、今回は、それらの優れた発想を生み出された経緯や、さらには今後のご展望などについて、お話を伺いたいと思います。

—まずはじめに、先生のご研究に関わるルーツについて、伺っていきたいと思います。ガラスヘレーザ照射することで、光情報メモリなどを開発する一連のご研究について、当初の状況などを聞かせていただけますでしょうか。

それではまず、基礎的な現象や当時の背景についてご説明しましょう。たとえば、希土類イオンをドープしたガラスに、ある波長のレーザ光を照射したとします。すると、その光エネルギーに相当する配位子場を持っている、特定の希土類イオンのみが励起されますよね。そうすると、レーザ照射後に蛍光スペクトルを測定したときには、その波長に相当する部位だけが欠如する形で、いわゆるホールバーニングスペクトルが得られます。このレーザ光の波長を掃引しながら、ガラスに当てたり当てなかったりすると、1, 0, 0, 1, 1のように、蛍光スペクトルへ多くのホールをあけることができますから、それ自体を波長多重メモリにすることができるのです。ところが、励起された電子は非輻射過程、例えば室温程度の熱環境で、すぐに基底状態にもどってしまいます。そのため、この現象は極低温でしかおきず、それまで実用化されていませんでした。ところが、 Sm^{2+} をドープしたガラスでは、そのホールが室温でも形成することを発見しまして、論文として発表したところ、特に海外から大きな反響がありました。当時、この研究を一緒にやっていた、大学院生の轟眞市君(現NIMS研究主幹)をはじめ藤田晃司君(現京大准教授)や西正之君(現京大助教)らの努力のたまものでした。

—なるほど。基礎原理についてよくわかりました。先生はその後の研究の中で、当時は珍しかった、フェムト秒レーザを光源として採用されましたが、そのように研究を展開された経緯について、詳しく伺えますでしょうか。

基礎的な現象の発見から、さらに研究を進めるにつれて、ガラス内部に3次元構造を作れば、ホールバーニングの波長軸も含めて4次元メモリをつくれるのでは、と考えたことがきっかけです。ところが、何の変哲もないガラ

ス材料へ、思うがままに望んだ位置へ局所構造をつくりこむには、外場からのエネルギーを利用する必要がありました。なんとかガラス内部に構造を誘起しようと、しきりに考えをめぐらしました。さまざまな外場に関して、構造を変化させる閾値を探索したところ、最終的に行き着いたのは、瞬間的に大量のエネルギーを投入できる超短パルスレーザだったのです。そのなかでも、格子振動の1周期であるピコ秒領域よりも短いパルス幅をもち、電場強度が各段に高いフェムト秒レーザは、極めて有用であることがわかりました。それまでに私は、さまざまなガラスの比熱測定を行い、ガラスの格子振動周期をフェムト(10^{-15})秒領域で調べていたので、フェムト秒という単位そのものはよく知っていました。ところがその当時は、フェムト秒レーザ装置を国内で探してもほとんどなく、もちろん私も所有していません。そこで、この特殊で高価なレーザ装置を、ぜひ自分で購入しようと思い立ったのです。その効果を立証するために、分子動力学といったコンピュータシミュレーションを用いて、ガラス構造にフェムト秒という、ほんの瞬間に高い電場を与えた場合の電離現象、すなわちガラス構造にフェムト秒レーザを当てた時に、どのような現象が誘起されるかなど、基礎的な理論研究を繰り返しました。

—他に例を見ない、フェムト秒レーザによるガラス加工ですから、そもそもの実現可能性を周囲に理解させるところから、スタートをされたわけですね。その後の研究における道のりは、やはり困難だったのでしょうか。

そうですね。とにかく、科研費などのプロポーザルを必死に書き続けました。ちょうど40歳になる前です。これが幸いなことに、オリジナリティがあると判断されたのか、JST(当時の科学技術振興事業団)のERATOプロジェクトに総括責任者として選ばれました。採択されると、今とは違って、研究場所はオフキャンパスでやりなさい、ということでしたので、京都府最南部にある関西学術研究都市の「けいはんなプラザ」で活動開始となりました。まずは、研究員が来てくれないと何もはじまらないので、さまざまな方をお願いして募集をしたところ、大学・企業・海外から多くの推薦をいただき、すばらしいポストドク諸君が当プロジェクトに参加してくれました。このときほど、自分が周りに支えられているのだと、大変感謝するとともに、期待に応えて成果を出さねばと、気持ちを奮い立たせたことはありません。

当初のメンバーとしては、国内からですと、三浦清貴君（現京大工学研究科教授）、田中耕一郎君（現京大理学研究科教授）、神原浩久君（NTT）、杉本直樹君（旭硝子）、岸本正一君（NSG）などであり、海外からですと、邱建荣君（現浙江大学教授）、司金海君（現西安交通大学教授）、Davis 君（IBM）らが集まってくれました。また後には、Kazansky 君（現英国サザンプトン大学教授）、Jain 君（米国リーハイ大学教授）なども、頻繁に訪れてくれました。そのころを思い起こすと、フェムト秒レーザー技術はまだまだ発展途上であり、装置自体の開発も必要な状況でした。これについては、井上英幸君（現コヒーレント社）、澤口直哉君（現室蘭工大准教授）、清水川豊君（現SPRING-8）らが非常に大きな力を発揮してくれました。さらに加えて、三露常男さん（パナソニック）、土田芳樹さん、富田礼子さん（現京大産官学連携本部特定研究員）には、マネージメント方面でずいぶんサポートしていただき、そのおかげで研究はとても順調に進みその後も、多くの優秀なポストドクや企業研究員が集まってきてくれました。結果として、フェムト秒レーザーの構造を誘起する能力はすばらしく、照射するとガラス内部の焦点位置に、レンズのような屈折率の高い構造をクラックの発生なしに作ることができました。さらに、それを直線的に移動すると、光ファイバーと同じ構造も得られることがわかりました。これにより、直角に光の方向を変換できる直角光変換導波路や、さまざまな光回折格子が実用化されることになりました。誘起構造という名前まで頂戴しまして、当時のNatureに二度紹介されました。また、米国Morey賞、独国Otto-Shott賞、経済産業大臣賞を始め多数の賞を頂くことができました。

一まさに黄金時代という感じがありますね。当時は私達もさまざまなメディアで先生のご研究成果を目の当たりにし、新しい時代がきたなと感じていたことを思い出します。その後も順風満帆だったのでしょうか。

とんでもない。実はその後に、とても困難な時期が訪れたのです。確かに、フェムト秒レーザーを用いたガラス加工は、さまざまな分野にも引き継がれたのですが、商品化に際して大きな壁にあたりました。何かというと、レーザー掃引をひと筆書きのように焦点位置を動かすだけでは、レーザーのフォトンコストが高く、事業的に採算がとれないという指摘です。この後しばらくは、フェムト秒レーザー加工の実用化に一定の空白期間が生じました。私自身、どうしたらこの問題をクリアできるのか、さまざまな考えをめぐらせ悶々とした日々を

過ごしました。結局、これを解決したのが、浜松ホトニクスとの共同プロジェクトにおいて開発した、フェムト秒レーザー光にも耐える空間変調器の開発であり、3次元一括加工をするための新型デバイスでした。描きたい図形を、即座にコンピュータ制御でホログラム変換し、それにレーザー光をあてると、その方向や位相を自在に変えることができる光学素子で、ガラス試料を機械的に動かさなくても3次元加工ができるすぐれモノです。一昨年には製品としても、浜松ホトニクスから発売もされました。このように、山あり谷ありの道筋だったわけですが、年表にまとめてみましたので見て下さい（図1参照）。

現在は京都大学の三浦清貴教授や下間靖彦准教授、坂倉政明特定准教授が、さまざまな分野への応用を検討しています（図2参照）。光情報分野だけでなく、センサ・医学・再生可能エネルギーなどの部品やデバイス作製に展開されはじめています。

—ありがとうございます。これまでのご苦労も含めよく理解できました。ところで、その後のご研究におかれまして、先生はナノガラスプロジェクトリーダーもされており、「ナノガラス」の名付け親でもありますね。そのあたりについても、ご紹介いただけますでしょうか。

はい。機能性ガラスで強みを発揮する日本のガラス産業を見てみると、2000年頃では、光学ガラスで50%、ディスプレイ用ガラスで70%、マイクロレンズで80%、特に磁気ディスク用ガラスに至っては、ほぼ100%と、軒並み高いシェアを有していました。ところがゆくゆくは、中国や台湾はじめ各国のガラス産業が攻勢をかけてくるぞ、と当時から緊張感のある予想がなされていました。このような状況を反映して、強い材料をもっと強く、というコンセプトで日本の総力を結集したのが、NEDO ナノテクノロジープログラムのナノガラスプロジェクトでした。2001年度から5年間、ガラス関係や光技術関連の企業9社が参画し、6大学の技術支援を受けて12テーマの研究開発に、ニューガラスフォーラムと産総研関西センターが取り組みました。ガラスの微細構造をナノレベルで制御し、これまでになかった新規な高機能ガラスを創出しようとする「ナノガラス」の研究開発を経て、その成果が事業化にもつながっています。ナノガラスの応用製品は、軽くて強度を高め、さらに、欠陥や不純物などをナノレベルで制御し、気泡が数10ナノメートル以下にした大面積薄型ディスプレイに象徴されます。最近ですと、厚

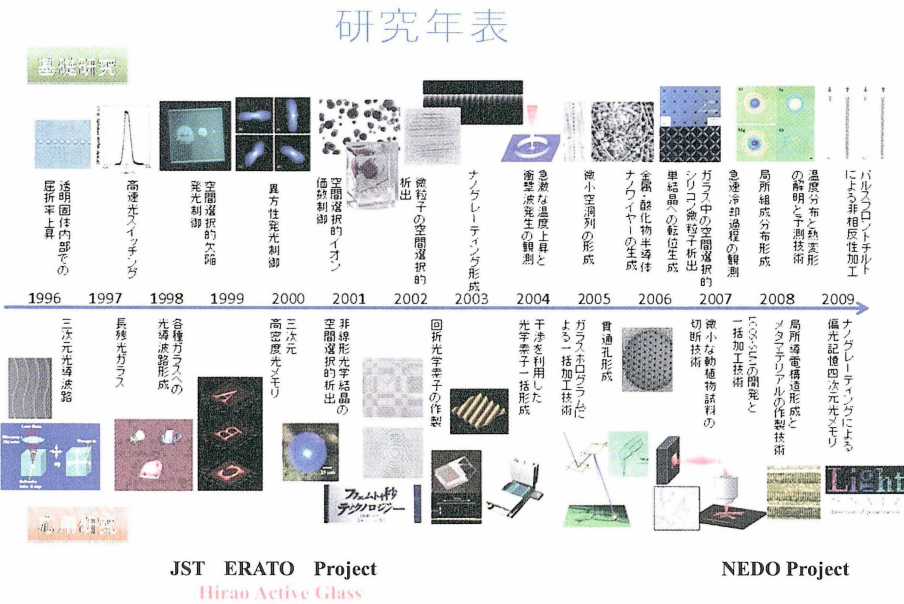


図1 平尾グループによるフェムト秒レーザー加工の研究年表

さが5マイクロメートルのフレキシブルガラスも登場しています。また、記憶容量を大幅に増やした、ナノガラス薄膜コーティングハードディスクも開発されました。さらに、有機無機ハイブリッドを用いた、各種導電膜や気体分離膜等も燃料電池用として開発されています。これらは高分子材料に比べて、耐熱性が各段に良い利点を有しています。また、ナノサイズの量子ドットをガラス中に分散させた、シースルー透明太陽電池も開発が進められています。いろいろお話ししましたが、全部紹介はできないので、詳しくは「機能性ナノガラス技術と応用」（シーエムシー出版、2009年）を見ていただけたらと思います。

一まさに、我が国におけるガラス技術の粋ここに集まり、という感じですね。それでは、これまでのご活動を踏まえまして、今後のガラス工学におけるご展望と、セラミックス関連の若手研究者に向けたご提言などを、伺えますでしょうか。

わかりました。フェムト秒レーザーや高機能ナノガラス、そしてセラミックス材料の基礎研究が一段落し、いよいよ産業化に向けて走り出します。太陽電池や光通信デバイスなどの世界市場が激変する中で、国内企業の立ち位置は必ずしも楽観できる状態ではありません。今後も、これらの市場の重要度が増すにつれ、この傾向は顕著になると言えます。その中で活路を拓くために、先端光加工のプラットフォームを作ることを計画しまして、京都大学桂キャンパスに隣接する桂イノベーションパーク地域を中心に、光通信やセラミックスなどに強みを持つ企業に参画いただき、それらの企業からの寄付をもとに、新しく技術研究組合を作りました。その基金をもとにして、三浦清貴教授の研究室と一緒に、産学連携の共同研究を強力に促進していこうと考えています。設備についてご紹介しますと、フェムト秒レーザーによる3次元一括加工装置のみならず、多品種のレーザー微細加工装置を取り揃えています。また、有機ELディスプレイや色素太陽電池のキーテクノロジーとなる、封止のためのレーザー封止加工装置をはじめ、それらに必要なスクリーン印刷機や真空張り合わせ装置、ならびに焼成炉を所有しています。さらに、さまざまな材料で光造形したり加工したりするための、3次元光造形装置や金属光造形複合加工装置をはじめ、集束イオンビームなどナノ加工装置やレーザー切断・穴あけ加工装置も備えています。これらに加えて最近、吉田キャンパスでもMEMS加工を中心とした低炭素ナノデバイス創製プラットフォームが立ち上がりました。単に装置の貸し出しにとどまらず、必要に応じてプラットフォームをサポートする教員や技術員による技術指導や相談、人材育成なども兼平真悟さん（現京大大学際融合教育研究推進センター）や田原美紀さん（現同センター）と力を合わせて行っております。最先端の技術を、大学だけでなく企業と共有することで、これまでにない製品を開発し、真に競争力のある産業を作る必要があると考えています。このプラットフォームは道場内にある土俵のようなものであり、多くの若い研究者や技術者のニーズとシーズの出会いや、異分野間の出会いが多頻度で起こるよう、さまざまなイベントも企画しています。セラミックス関連の若手研究者諸君は、ぜひ一度遊びに来てください。

—たいへん魅力のあるご提案をありがとうございました。興味を持つ若手は多いと思います。最後になりましたが、まとめとしまして、先生が研究に対して抱いておられる、理想のイメージなどについて、お話しただけないでしょうか。



図2 フェムト秒レーザー加工の応用展開

それでは、最近考えていることの中からお話しさせていただきます。ご存知かもしれませんが、比叡山延暦寺に1200年ともっているローソクの灯があります。これをもとにして、昔は「伝統」を「伝灯」というていたそうです。灯を維持するためには、常に油を注ぐ必要があり、油を絶てはいけなく、とどえと伝灯が消える、ということで「油断」してはいけないという言葉があるそうです。セラミックスやガラスは、紀元前から存在する最古の、いわゆる長い間に培われてきたすぐれた人工材料ですので、不断の努力でその伝統を守ってほしいと願っています。具体的には、45～50歳位までは基礎研究をしっかりと、そのあとは、それをもとに社会還元するような研究者が望ましいのではないのでしょうか。長期間にわたる、人生設計のような研究シナリオをつくるのが大切でしょうね。また、若い学生らに刺激を与えるような場を提供してほしいと思います。わたしの周辺での取り組みをご紹介しますと、現在は、京都大学で無機化学に関する研究をおこなっている、工学研究科の三浦清貴研究室と田中勝久研究室、総合人間学部の田部勢津久研究室、化学研究所の横尾俊信研究室らと、研究会や卒論発表会と一緒にいるなどしており、それぞれに所属している学生や若い教員が、さまざまな無機化学の研究の醍醐味に触れられるようにしています。

とにかく最近では、研究開発における競争力や成果の創出が早急に求められがちです。これらはもちろん重要なのですが、最初から目指すものではなく、同じ志を抱いた仲間が協力し合い、お互いを高めあいながら、自然に生まれてくる結果であると思います。若手にいろいろと求めるだけでなく、むしろわたくしたちの世代こそ奮起して、皆にとって良い環境を提供し、ガラスやセラミックスなどの分野で、ともに咲き誇るようなコミュニティを作っていけたらなと思います。

最後に、今日の話では紹介できませんでしたが、京大関係者以外にも、日本各地のさまざまな大学はじめ研究機関からの共同研究者にお力添えを頂いております。この場をお借りして御礼を申し上げます。ありがとうございました。

—聞き手としまして先生のお話を伺いましたが、今後の研究において道標になるような考え方をたくさんいただきました。読者であるセラミックス協会員にとりましても、多くの希望と元気を届けられると思います。本日は貴重なお話をいただきまして、ありがとうございました。

（インタビュー：協会誌編集委員：桐原聡秀、土屋哲男）