

特別講演「豊かな生活環境を支える光触媒の現状」



ふじ しま あきら
藤嶋 昭
東京理科大学 名誉教授

※本稿は、オンデマンド配信された講演内容を、再構成したものである。

■1. 光触媒とは

光触媒の実用例としては、例えば建物の汚れを防ぐのに使います。最初の私たちの応用例は丸の内ビルディングのタイルで、これはもう30年近く経ちますが、まだきれいなままです。東京駅八重洲口にあるグランループにも光触媒のテント材料が使われており、これも真っ白なままです。それから、雨の日でも運転しやすいように、車のサイドミラーにも光触媒が使われています(写真1)。

光触媒ですから光が大事ですが、一番大事な光は太陽です。水素がヘリウムになり、そのエネルギーで太陽が燃えています。太陽の中では1秒間に6億tの水素がヘリウ

ムになり、そのエネルギーの22億分の1が地球に来ているのです。それでも1年のうち1時間だけ変換できれば、エネルギー問題はすべて解決できます。これが太陽エネルギーです(図1)。

水素がヘリウムになる核融合反応が起こると、重さが変化します。 $E = mc^2$ という式によってエネルギーが出てくるのですが、これは皆さんもご存じのとおり、アインシュタインが導出した式です。これは太陽エネルギーのすごさを説明すると同時に、原子爆弾の原理でもあるわけです。ウランが分解されると質量が変化し、それが



写真1 光触媒の実用例

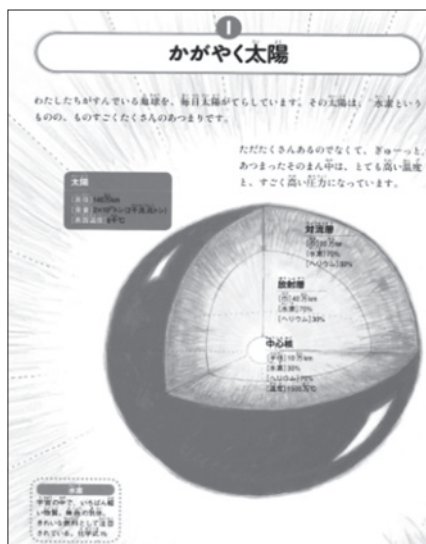


図1 太陽の構造

エネルギーになり、原子爆弾になってしまいました。アインシュタインは昭和30年4月まで生きていたのですが、広島に原子爆弾が落ちたことにショックを受け、10年後に平和宣言にサインしました。いずれにしても、この核融合反応を含めた $E = mc^2$ という式は簡単ですが、すごい式です。

太陽エネルギーは地球に降り注いでいます。葉っぱの表面に太陽が当たると、皆さんもよくご存じの光合成反応が起こります。葉っぱの中の葉緑素が太陽の光を受けて、反応が進行し、根から吸った水を分解して酸素を出します。それで私たちは生きています。そして、私たちが吐き出した炭酸ガスを還元して植物が成長するというので、光合成反応という一番大事な反応が起こっています。その反応機構はZ-schemeというもので説明されています。葉緑素には2種類の色素があり、太陽の光によって電子がたたき出されて、その電子は最終的に炭酸ガスを還元するのに使われます。そして酸素が出てきて、炭酸ガスが還元されるというのが、光合成の基本的な反応です（図2）。

この光合成反応を人工的にできるかどうかという試みが、光触媒の基になりました。私は葉緑素の代わりに酸化チタンを使いました。当時は世界で誰も使っていなかった酸化チタンですが、その単結晶を神戸の中住さんが作っておられたのです。私が手紙を書いて、それを使わせていただいたのは、東京大学の大学院生のときでした。それで本多健一先生と私で実験をしたのです。

酸化チタンを水の中に入れて光を当てると、その表面からガスが出てきて、それを集めてみると酸素でした。それで水から酸素が出た、分解したと学会で発表したのですが、誰も信用しませんでした。水を分解するには電気分解しかない、光だけで起こ

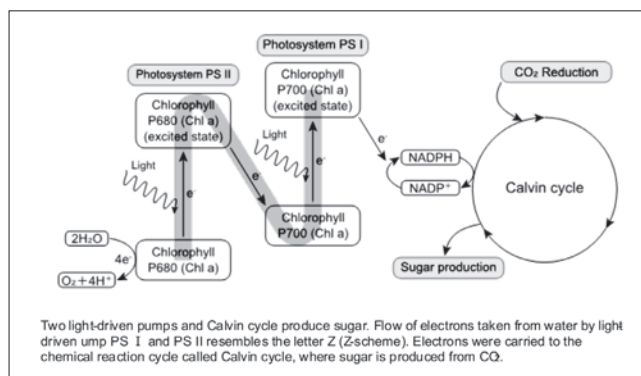


図2 光合成反応による炭酸ガス固定のしくみ

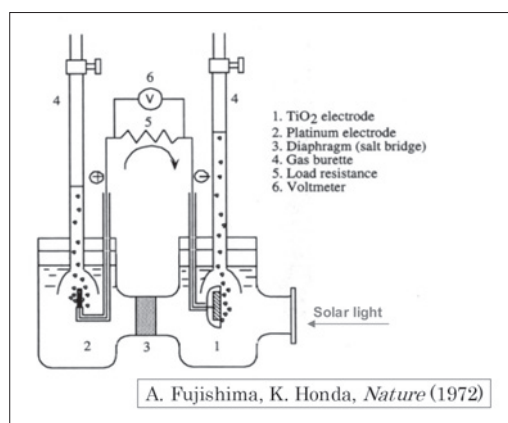


図3 水から酸素を抽出する研究論文が『Nature』に掲載

ることはあり得ないと言われました。葉っぱの表面で起こっているのではないかと私は言いましたが、あれは神様が作ったものだと言われて、私の発表はコテンパンにやられました。もっと勉強してから発表しろと、学会の方々には言われました。酸化チタンの単結晶を使って、それを電極にして水の中に入れて光を当てると酸素が出てきたので、私はすごく感動して、植物がやっている光合成反応を人工的に真似ることができてうれしく思ったのですが、学会では全く信用してもらえませんでした。

学会で反対されたので、私は思いきってその論文をイギリスの世界一権威ある論文誌『Nature』に出してみました。そうすると、普通は『Nature』に論文を出して

も審査になかなか入ってくれないのですが、この論文は「送ったら即、印刷します」と言われました。1972年の『Nature』の論文を見ていただくとわかるのですが、校正する時間がなかったので、図の説明がすべて抜けてしまっているのです（図3）。それほど短期間で出してもらえたということです。これが光触媒の基になった論文で、今では引用回数が数万件にもなっており、皆さんに読んでいただいています。

■2. 太陽で水素をつくる

また、私は酸素が出ることに感動したのですが、水素も出るので、水が酸素と水素になるということを『Nature』で発表しました。その論文を見たヨーロッパの方が、日本人が太陽エネルギーで水を分解して水素を採取したと国際会議で紹介して、評判になりました。

それを聞きつけた朝日新聞の若手女性記者の大熊由紀子さんが取材に来られて、47年前に元旦の1面トップ記事になりました（写真2）。これで学会の様子が変わりました。今までは「おまえ、何だ」と言われていたのが、「おまえ、すごいじゃないか」と言われるようになりました。

朝日新聞の方に聞いたところでは、元旦の1面トップになった科学技術の記事はこれだけだそうです。そうして皆さんに評価していただけるようになりました。

最初は理想的な単結晶を使ったのですが、これは高価で大面積を作れないので、簡単に大面積のものを作ろうと思って、チタン板を買ってきてはさみで切り、パーナーであぶって表面に酸化皮膜を作り、それを敷き詰めて太陽光の下で実験しました。1m²のもので、白金を対極にして太陽光の下で水素を取る実験をしたわけですが（図4）。

これは東京大学の本郷キャンパスの屋上でやりました。朝6時から夕方6時までやって7Lの水素を採取できましたが、これは燃やすと一瞬なのです。酸化チタンは太陽光の3%しか吸収できず、エネルギー変換効率が低いからです。これは今でも世界中の人がもっと効率を上げて大面積でやりたいと思って取り組んでくれていますが、私自身は難しいと思って



写真2 元旦の1面トップ記事に
(朝日新聞、1974年)

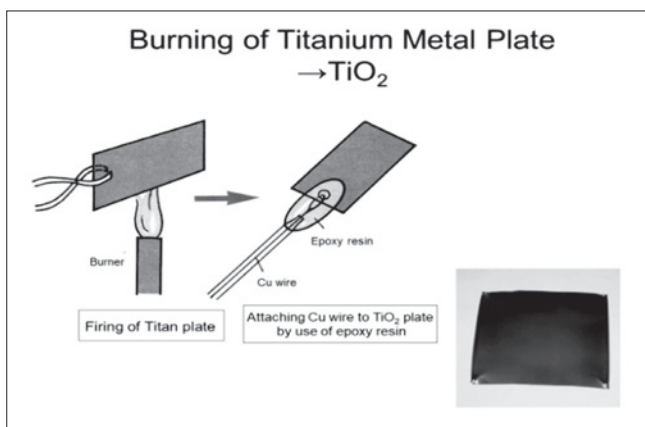


図4 チタン板をあぶり、酸化被膜を作る

います。チタン板をあぶっただけですべてしてしまうのですが、酸化チタンは太陽光の一部しか吸収できないので、効率は低いのです。ただ、今でも東京理科大学の葛飾キャンパスでは、酸化チタンの電極に上から太陽光を当てて、水素を取る実験をしています。こちらは皆さんにも見ていただけるので、機会があったらお出掛けいただければと思います。

■ 3. エネルギー以外への光触媒の応用

エネルギー問題は大事ですが、水素を大量に得るのは難しいと実感したので、微量でも困るものを相手にしようという方針を変更しました。それは大腸菌などの菌、タバコの臭い、あるいは油汚れです。これらを相手にするのに光触媒を応用できるのではないかと考え、研究の方向を変えてみました。

最初に試みたのは、殺菌ができるかどうかです。大腸菌やMRSA、緑膿菌などはどんどん増えるので、微量でも困ります。酸化チタンをコーティングした上で菌を培養して、それに光を当てると、水を分解できる力があるのですから菌もすべて簡単に分解できて、これは応用できるということになりました（写真3）。

また、がん細胞でも試して、これも簡単に殺せることがわかりました。実験にはヒラセルという典型的ながん細胞を使いました。がん細胞にはブレーキがなく、どんどん増えてしまうのが怖い点なのですが、酸化チタンの上で培養したものに光を当てると、がん細胞は死んでしまいました（写真4）。今、医学における光触媒の応用としてはいろいろなことが行われていますが、例えば手術室の壁は酸化チタンでコーティングされています。手術室は光が強いので、壁の表面に付いた菌は自動的に殺菌できるのです。これは今、日本の半分ぐらいの手術室で使われています。

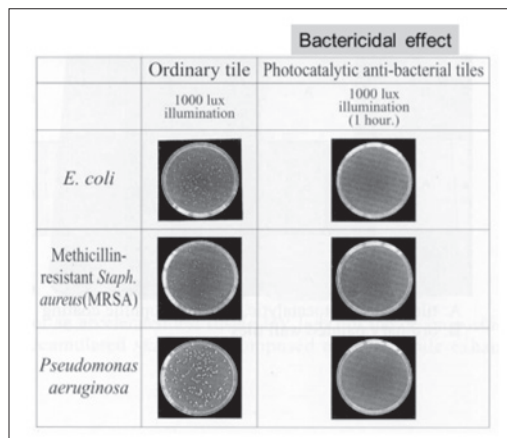


写真3 バクテリア殺菌効果の検証の例

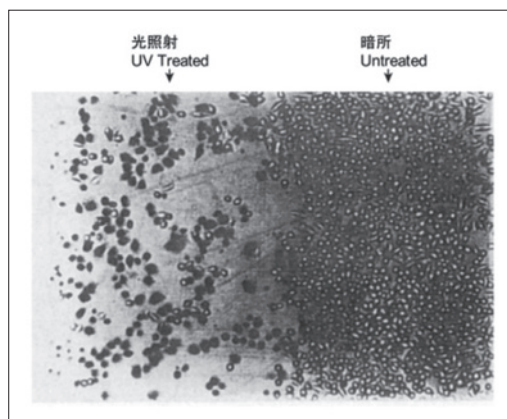


写真4 光触媒によるがん細胞の殺菌実験

最初はエネルギー問題で注目していただきましたが、環境改善に使い、それを光触媒の中心にしようという研究を続けてきました。もう一つ例を挙げると、新幹線には喫煙ルームが1編成当たり4カ所ありますが、この上方では光触媒空気清浄機が働いていて、たばこの臭いを取っています。

さらに光触媒の新しい応用として、今から30年近く前に見つけた現象があります。シャワーを浴びると鏡は曇りますが、鏡に酸化チタンを透明にコーティングして、強い蛍光灯の光を当てておくと、曇らなくなるのです。曇るという現象は水滴が粒になって付いて光を散乱させるから起こるのですが、酸化チタンでコーティングして光

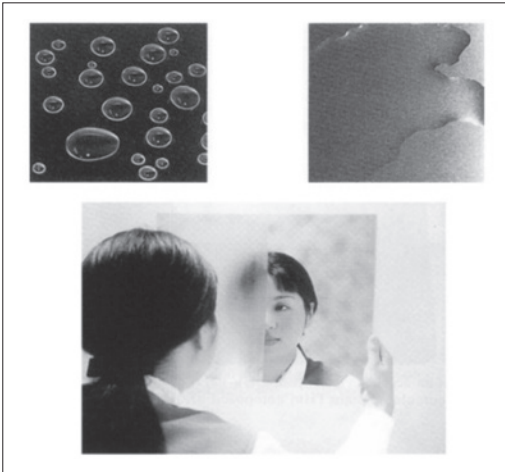


写真5 光触媒でコーティングされた鏡は曇らない

を当てると、水が粒になりません。接触角 (contact angle) が限りなく0度になることで水になじみやすくなり、鏡が曇らなくなるのです (写真5)。これも酸化チタンが持っている、もう一つの性質です。酸化チタンには強い酸化力があると同時に、水になじみやすくなるという性質があることから、今ではサイドミラーにも応用されていて、交通事故が減っている一つのものになっているのではないかと考えています。

酸化チタンに光を当てることによって起こる強い酸化分解力は、何でも分解してしまいます。水も有機物も分解できます。同時に、水になじみやすくなるという性質も起こるわけです。酸化チタンを透明にコーティングしたタイルとコーティングしていないタイルを用意して、それぞれに油污れを乗せ、そこに雨が降ってくると、酸化チタンでコーティングしたほうは自然に汚れが取れてしまうのです。自分できれいになってしまうので、私たちはセルフクリーニング効果と呼んでいます。それで丸の内ビルディングをはじめ、今ではいろいろな建物のタイルやガラスに使っていただけるようになりました。日本では、7万棟の大きなビル・マンションで使われていると聞



写真6 東京理科大学 サイエンス道場 (東京葛飾区) の前に立つ筆者

いています。東京駅八重洲口にあるグランルーフには、幅30m・長さ200~300mぐらいの光触媒がコーティングされたテント材料が貼ってありますが、時間がたっても真っ白です。

これは世界中で使っていただいております、その一つであるアメリカのフットボールスタジアムもきれいなままです。中は明るく、涼しいです。また、フランスのルーブル美術館のピラミッド型の入り口も、ガラスの上に酸化チタンがコーティングされているので汚れません。さらに中国の天安門広場の横にできた国家大劇院の屋根も、すべて光触媒です。汚れない建物ということで、どんどん利用されています。

私たちは今、世界遺産もきれいにしたいと思っています。日光東照宮では黒いカビが生えて困っているということだったので、光触媒でコーティングしようということで共同研究をしました。今は世界遺産であるインドのタージマハルをきれいにできないかという相談があり、インドの方とも共同研究をしています。

■4. 広がりを見せる光触媒

私は4年前に『光触媒のすべて』という本を出して、文化勲章もいただきました。さ

らに1月10日に皇居の松の間で行われた講書始で、「太陽エネルギーと光触媒」というタイトルで全皇室の方々にお話しさせていただく機会をいただきました。そこには今の上皇様と天皇陛下がいらっしゃって、女性皇族の方々はずごくカラフルな装いでした。

つい最近では、光触媒をどうやって作っていくか、どのようなことがあるかを書いた『光触媒実験法』という本も出しており、現在は英文版の印刷にも取り掛かろうとしています。さらに東京理科大学では、光触媒国際研究センターを日本政府のお金で造っていただき、私がセンター長を務めています（写真6）。

光触媒というのは簡単で、キーワードはたった二つです。酸化チタンという材料をいろいろなものの上にコーティングして、そこに光が当たればいいのです。太陽光があれば一番良いのですが、それによって抗菌・抗ウイルス、防汚、防曇、脱臭、大気浄化（NO_x除去）、それか

ら難しいのですが、水浄化もできます（表1）。こういったことで利用されており、日本の光触媒工業会には100社以上が加入しています。

今、私たちはコロナウイルスを殺そうと思っています。その前はインフルエンザをなくそうと思って、そのための光触媒フィルターを作りました。がん細胞のような細胞から始まって、標的はどんどん小さくなっていくわけですが、今の一番の話題はコロナウイルスです。今、私たちはコロナウイルスに効く光触媒空気清浄機を作ろうと一生懸命取り組んでおり、10社以上の日






標的					
	低分子有機物	巨大分子 (タンパク、DNAなど)	ウイルス	バクテリア	細胞
TiO ₂ photocatalysisの効果	○ 分解	○ 分解	○ 抗ウイルス効果 <small>タンパクの分解 DNA(RNA)の分解</small>	○ 抗菌(殺菌)効果 <small>細胞壁破壊 細胞膜破壊</small>	○ 殺細胞効果 (癌細胞など) <small>細胞膜破壊 アポトーシス誘導など</small>

表1 光触媒の効果の利用対象

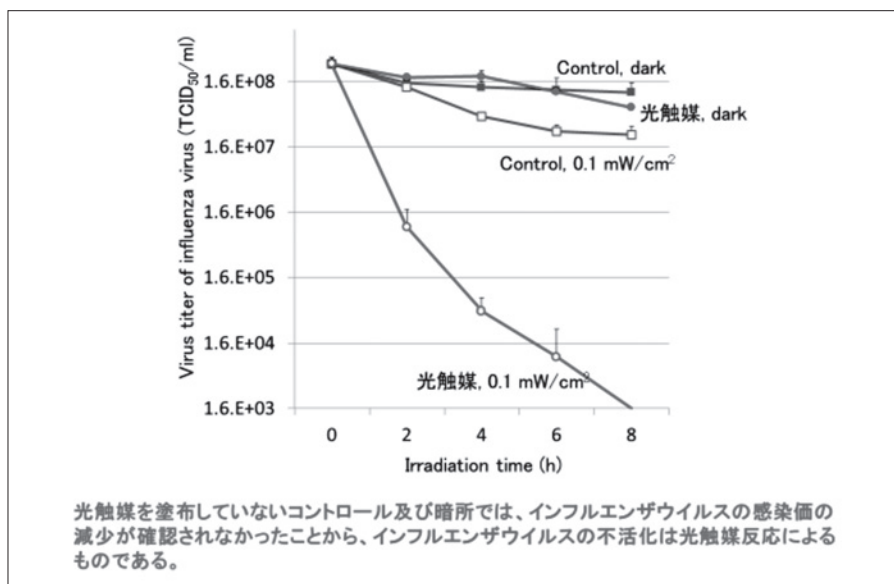


図5 光触媒反応によるインフルエンザウイルスの感染価の減少



写真7 光触媒空気清浄機を寄付した記事
(東京新聞、2020年5月)

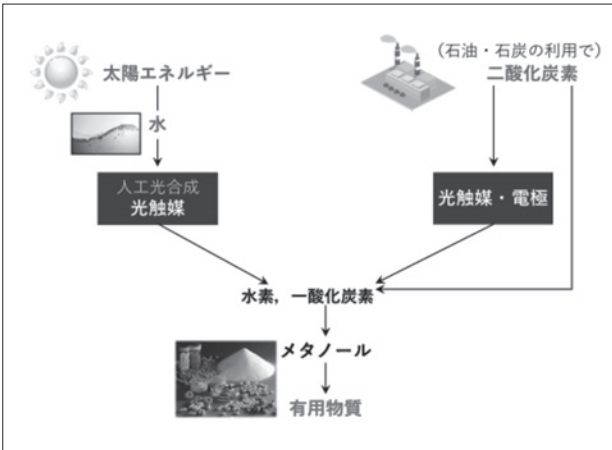


図6 カーボンニュートラルと光触媒

本企業が製品を出しつつあるのが現状です。実験では、インフルエンザウイルスの数が徐々に減る様子が確認できました(図5)。酸化チタンがあって、光を当てるとインフルエンザウイルスも死んでくれますが、これはコロナウイルスも同様です。私は川崎市に住んでいて、1年前に医療従事者の控え室用として川崎市に光触媒空気清浄機を寄付しており、今年の春はワクチン会場にも寄付しました(写真7)。

医療への応用も本当に大事ですから、今、

いろいろなことを考えています。例えば身体の中を見る内視鏡はすぐに曇ってしまうので、曇らずに使えないとか、歯科治療をより快適にしたいとか、そういうことで医師の皆さんと一緒に光触媒の医療への応用についてもいろいろ考えています。

また、東京理科大学の特任副学長であり宇宙飛行士である向井千秋さんを先頭にしてスペース・コロニー研究拠点というものが進められていますが、将来、人が月に住むときは限られたスペースで生活しなければいけないので、空気をどうするか、水をどうするか、食料をどうするかということが大事なテーマになってきます。ここでも光触媒が応用できるということで、その研究を一生懸命行っています。

さらに光触媒の最近の動きとして、ノーベル物理学賞を受賞した眞鍋先生がいろいろ予測されて、炭酸ガスと地球温暖化ということを前から言っておられますが、地球温暖化を防ぐためには炭酸ガスをいかに出さないようにするか、出してもいかにうまく利用するかということが大事になります。そこで、私たちもそれをずっと研究してきました。光触媒で炭酸ガスを還元して、有用なものを

を作っていくという研究をしています。また、自分たちでダイヤモンドを作って、それを使って炭酸ガスを還元するという研究もずっと進めてきています。光触媒とダイヤモンド電極を使って炭酸ガスを還元し、そのエネルギー源としては太陽エネルギーを使って、炭酸ガスを出さずに、地球を温めることなくCO₂からメタノール、あるいはもっと有用な有機物を作っていくという研究です(図6)。日本もあと何年か後にはカーボンニュートラルの時代を目

標にすると宣言していますが、それにも光触媒を活用したいと思っています。

私たちが取り組んでいるもう一つのテーマはダイヤモンドで、天然のダイヤモンドは宝石ですが、私たちは人工ダイヤモンドを作っています。マイクロ波プラズマCVD法というもので、アルコールからダイヤモンドを作るのです(図7)。水素キャリアで、装置の中にアルコール分を導入して、そこにマイクロ波を導入すると、基板の上にダイヤモンドの薄膜ができます。ダイヤモンドはもともと絶縁体で、電気を通しません。そこにboronという元素を入れると、色は透明ではなくて少し青あるいは黒くなるのですが、ダイヤモンドの性質を持っていて、それを使うと炭酸ガスを還元できるのです。

ですから、光触媒とダイヤモンド電極を応用することで、炭酸ガスを有用なものに持っていきけるのではないかと考えています。例えば、濃い炭酸ガスを火力発電所の煙突などから持ってきて、それを溶液に溶かし込み、ダイヤモンド電極を使ってマイナスの電圧をかけると、有用なものができます。例えばCOやギ酸になります(図8)。そういうことができると、地球温暖化を防ぐこともできます。

光触媒で空気や水をきれいにしながら、炭酸ガスもうまく利用して有用な資源にしようと考えているのが、私たちの研究です。

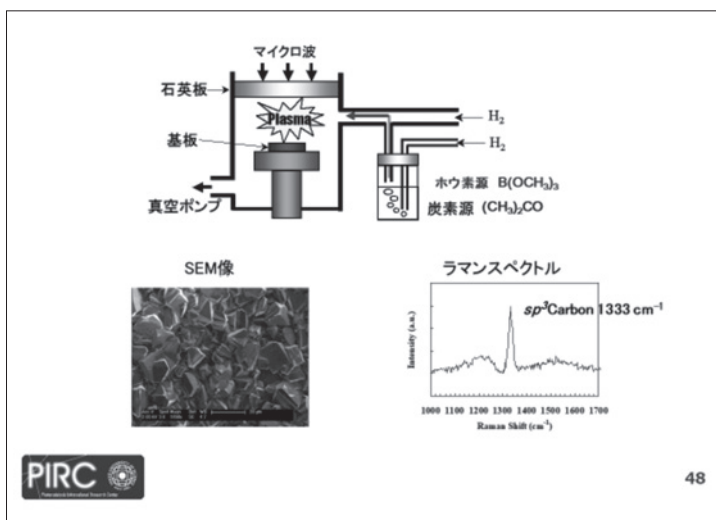


図7 マイクロ波プラズマCVDによるダイヤモンド合成

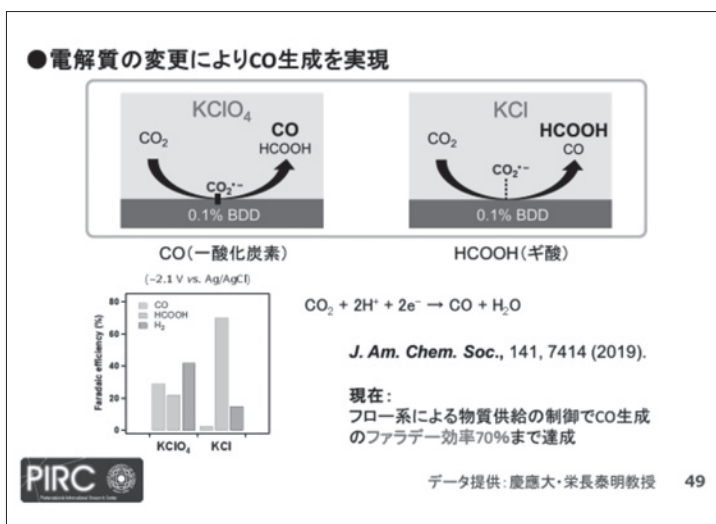


図8 ダイヤモンドによるCO₂還元

■5. 中国古典の教え

私は中国によく行くのですが、私の弟子たちが中国で大活躍してくれています。東京大学の卒業生3人が院士になり、中国化学会の会長をしたりして、中国の学会で大活躍しています。

中国の古典で私が一番好きな言葉は「物華天宝、人傑地靈」です。これは中国の人



写真8 孔子の教えを心に刻んでください

が旧正月のときに玄関に出す言葉で、王勃の詩の一節です。その地方の物産は天がくれた宝であり、その地方の人も雰囲気も大事だというのが本来の意味ですが、私の解釈は違います。「物」は物理化学、「華」は研究成果だと考えています。物理化学の研究成果は天に隠されており、その原理を研究によって探し出し、それを利用して世の中に役立つようにすることが大事だと思っています。それには「人傑」、すなわち人が大事なのです。一生懸命やる研究者がどうしても必要です。ただし、1人の研究者では駄目で、やはり数人が集まって良い雰囲気の下で研究すると、天に隠されているものを見つけることができ、その成果を皆さんの役に立つようにすることができるのです。「物華天宝、人傑地靈」は良い言葉だと思って、私はよく使っています。

また、孔子の『論語』は素晴らしいと思っています。「之を知る者は、之を好む者に如かず。之を好む者は、之を楽しむ者に如かず」という言葉があります。ここには「知」「好」「楽」という漢字があります。私は中

学や高校で出前授業をよくやるのですが、まずは勉強しなければ駄目だと言っています。数学でも、英語でも、理科でも何でもいけれども、まずは勉強して知ることが大事で、次はその分野を好きにならなければ駄目で、さらにそれだけではまだ不十分であって、楽しいという境地になって初めて本物だと言っています。この「之を知る者は、之を好む者に如かず。之を好む者は、之を楽しむ者に如かず」は本当に良い言葉だと思っています（写真8）。

やはり人間は一生勉強です。『管子』には「一年の計は穀を樹うるに如くはなく、十年の計は木を樹うるに如くはなく、終身の計は人を樹うるに如くはなし」という言葉があります。米は1年で採れます。ちゃんとした木が育つには10年かかります。しかし、私たち人間は一生勉強ということで、100年間たゆまず勉強しなければ駄目だという教えです。このように、中国の古典からは多くのいろいろなことを教えていただいています。