

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

自然エネルギーを利用する環境技術：光触媒

著者	橋本 和仁
出版者	法政大学人間環境学会
雑誌名	人間環境論集
巻	8
号	特集号
ページ	53-64
発行年	2008-03-31
URL	http://hdl.handle.net/10114/5285

自然エネルギーを利用する環境技術：光触媒

橋本和仁

東京大学大学院先端科学技術研究センター

私は物理化学が専門で、環境問題を技術の立場から研究しています。そういうことをやり出したのはここ7、8年ですが、環境技術を政策的にも研究している1人となっています。今日は科学者としての立場から、どのような研究をしているかということをお話します。

まず、最初にエネルギー消費と環境問題という一般論から入り、それから私の専門である光触媒の話します。そして、環境にやさしい技術として太陽光を利用する光触媒を使う私の仕事をご紹介します。

1. 化石燃料消費の歴史

産業革命以降、人類は化石燃料を使うようになりました。そして、消費量が急にふえ出したのは、第二次世界大戦後です。私が生まれたのは1955年です。それ以前の人類はエネルギーをほとんど消費していません。これまで世界で消費されたエネルギーは、ほとんど私が生まれた以降に消費されたものです。

エネルギー資源があとどれほど残されているかということ、一番多いといわれている石炭でも200~300年です。50年前から急激に使い出して、残りはどんなに多くても数百年です。

人間は使いやすいものから使います。最も使いやすいのは石油です。石油はあと40年とか50年といわれています。もちろん、使い方にもよりますし、新しいのがみつかってまだ伸びるかもわからない。ただし、確実にいえることは、とりやすい石油は採り尽くしつつあります。とりづらい、採掘しづらい、あるいは使いづらいものだけが残っている。本当に私たちが使いやすいものがどれくらい残っているかということ、せいぜいあと20~30年です。

もちろんそこから先も石油は残ります。石炭だってありますが、使いやすいものは20~30年でほとんど取り尽くしてしまおう。私たちは違った視点で化石燃料をみていかなければいけないという時代が、まもなくやって来ます。20~30年というと、私は51歳だから多分まだ生きています。皆さんはまさにばりばりで生きています。その時代が確実にターニングポイントになります。ここでは、これからエネルギーがどうかという話はしません。言いたいことは、今のようにわずか50年前から急激に使い出して、本当に使いやすいところは、あと20年ぐらいで使い終わってしまうということです。

人類がいつから生まれたかということ、猿人が生まれたのは650万年前です。火を使い出したのは原人です。約50万年前といわれています。私たちの直接の祖先であるホモ・サピエンスが出現したのは15万年ぐらい前です。

そのような視点で見ると、人類の長い歴史の中で化石燃料の消費はほとんど一瞬です。50年前から本格的に使い出して、あと20年ぐらいで使いやすいところは終わり、その後、残っていたにしてもせいぜい数百年です。ほんの一瞬のことです。この時代認識を、しっかりもつ必要があります。

ここまで人類の歴史で考えてきましたが、地球の歴史は46億年あります。化石燃料は光合成でつくられた有機物が10億年ぐらい前からたまったものです。地球の歴史から見ると化石燃料が消費できたのは、さらにごく短い一瞬です。私たちはとても運のいい、そういう時代を生きています。しかし、あと20年ぐらしか続きません。

20世紀後半、私たちは大変便利な社会をつく

ってきましたが、それは化石燃料の大量消費によるものです。例えばプラスチックは、私が子供のころは余りありませんでした。いつがターニングポイントか。1960年代の後半です。プラスチックは生活をとても便利にしました。けれども、いうまでもなく汚染の問題も伴ってきました。

人口増加はなぜおきたか。基本は化石燃料の大量消費です。都心部への人口集中もそうです。これによって本当にいろいろな環境問題が出ています。

20世紀後半に私たちは化石燃料を使うことによって便利な社会、余裕のある社会を得たけれど、いろいろな問題を起こしました。何が原因かと言えば、地球の中の自然サイクルを破壊したということにすべて起因しています。ここはしっかり理解しないといけない。あと20年すると、エネルギーがなくなってくるということで大変な問題が来ているのです。

2. 有機塩素系溶剤

環境問題というのは、化石燃料の急激な消費による自然サイクルの破壊です。そうすると、環境技術というのは、これを意識しつつ自然の循環の中でエネルギーや物質を考えて環境改善を行う技術であるということはわかってもらえらると思います。

現在の多くの対策は、目の前の汚染物質を見えないところに移すということを行っているにすぎません。その結果、環境を浄化することが新たな環境問題を引き起こします。

例えば、テトラクロロエチレンやトリクロロエチレンなどの有機塩素系溶剤による汚染は大変な問題です。これらは洗浄力も揮発力も大きいので、1970年代から洗浄剤として使っていました。それ以前の洗浄剤は何かというと、もちろん水です。

私が学生時代に実験をやっていた頃、ピーカーを洗うときには、まず水で洗いました。その後、アセトンで洗い、最後は蒸発しやすいトリクロレンで洗うのです。それを全部流しに捨てていました。1970年代は法規制がなかったのです。

クリーニング屋さんも使っていました。そし

て、みんな捨てていました。工場で何か洗うときにも有機塩素溶剤を使い、捨てていました。70年代はみんな捨てていたのです。

ところが、80年代になるとこれらに発がん性があることがわかりました。70年代には私は、学生実験で暑いとき、手の上にかけていたのです。そうしたら、蒸発するから涼しくなる。今では、法規制で捨ててはいけなくなっています。研究所でも扱わない。もちろん、化学の学生実験室にもこんなものを置いているはずありません。それぐらい厳しく規制されています。

それが82年からです。つまり有機塩素系溶剤を使っていたのはわずか10年間でした。その10年間にどんどん捨てました。その結果、難分解性で浸透性も高いので、土壤汚染を起こしました。典型的な負の遺産です。どれぐらい汚染されているかは、調査されています。いろいろなところでかなり高濃度にあります。土壤汚染対策法が成立してからは、土地を売るときには、それをきれいにしておかないと後でわかったら罰せられます。

図1は有機塩素系溶剤による土壤汚染の対策現場です。汚染土壌を掘り起こしてブルーシートをかけているところ。ドラム缶の中に活性炭が入っています。有機塩素は120度以上になると蒸発するので、熱風を入れます。石灰を入れます。石灰を入れると水と反応して温度が上がりますから、やはり蒸発するからです。こうして蒸発した汚染物質を吸引してドラム缶の中の活性炭に吸着させます。そうすると、確かに土はきれいになります。ではドラム缶をどうするかといったら、産廃業者に渡すのです。

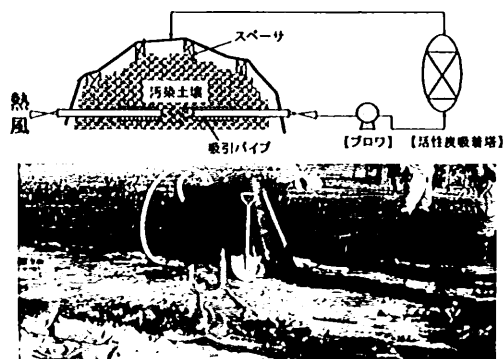


図1 有機塩素系溶剤による土壤汚染の対策

産廃業者はどうしなければいけないかということまでは、土壤汚染対策法は規定していません。産廃業者を規定する法律は別があって、再生処理などが行われます。ここでは加熱して処理されます。900℃以上で熱すれば、有機塩素は燃えます。けれども、900℃になるまでに活性炭に吸着された有機塩素は蒸発してしまいます。つまり、土の中であっておとなしくしていたものを、わざわざ空気中に出していることになるのです。

土壌を入れかえることも良く行われます。では、汚染された土壌をどうするのかといたら、どこかに捨てるか、あるいは燃やすのです。そうすると、活性炭のとときと同じことが起きます。

3. 農業による汚染

違った例としてトマトをご紹介します。都市近郊にはトマトをつくる畑がたくさんあります。トマトは連作が効きません。3年作ると何年間かは土地を休ませないといけません。

福島県に土ではなく、約10ヘクタールの栽培ベッドでトマト栽培をしているところがあります。工場と同じです。栽培ベッドには栄養液を注入しますが、高濃度の窒素と磷とカリウムが入っています。これを全部トマトが吸収してくれるのですが、実際には20%ぐらい残ります。これは捨てられます。そうすると、土壌の富栄養化がおきます。

このようなトマトの栽培方法を、ヨーロッパで一番先に取り入れたのはオランダです。しかし、オランダでは、栄養液の残りを捨てるのが法律によって何年か前に禁止されました。そのため、オランダのトマトの生産量が減りました。その代わりに、イタリアの生産量が増えました。法規制がないイタリアで育てるようになったのです。地球全体でみたら何も変わっていないわけです。日本もまだ法規制はかかっていないのですけれども、法規制をかけても同じようなことがおきるのでしょうか。

米作にも問題があります。米農家は、種もみをまく前に農薬で消毒します。そして、全国で年間50万トンの農薬の廃液が出ます。こういうことをやり出したのは1965年ぐらいからです。

それまでは化学薬品がありませんから、お湯で消毒していました。けれども、お湯ですと温度コントロールが難しく大変でした。温度が高過ぎると発芽してしまうし、低過ぎると効きません。農薬ができてからは、ただ漬けるだけでよくなったのです。

この廃液が年間50万トン出ます。関係者は廃液処理に活性炭を使うと言います。液中に活性炭を入れて攪拌し、凝集剤を入れてまた攪拌して、ろ過するのだそうです。そうすると、水はきれいになるので、きれいになった水を捨てるということです。では、残った活性炭はどうするのかということ、乾燥させて、やはり産廃業者に預けるといのです。

でも、こんな面倒くさいことを農家が本当にやると思いますか？ 実は、こんなことをやっている農家は殆どない。四日市では、川の魚が浮かんだことがあります。農家にインタビューもしてみましたが、「うちは問題ありませんよ。土地が広いからそこに捨てているので」という話になります。

また、農業では塩化ビニル（塩ビ）のシートも使います。農業から出る塩ビシートは結構多量です。

昔は塩ビシートなんかありませんでした。障子紙に菜種油を浸した油紙を自分たちでつくっていました。だから、使い終わったら燃やしました。でも、つくるのは大変だったし、破れやすいものでした。そこに塩ビが出てきて大変便利になりました。しかし、環境問題になったわけです。これも1960年代の半ばぐらいからののです。

4. 21世紀に求められる科学技術

以前は自然にあるものを使っていた。それが1960年代に化学物質に変わり、生活は便利になりました。しかし、それが10年、20年、30年ぐらいのタイム・スケールで、環境問題に変化してきました。20世紀、科学技術が便利な社会を作ってきましたが、代償としてかけがえのない地球を汚し続けてきたということに、私たちはやっと気づいたのです。

僕も高校や中学などに頼まれて時々講演に行

きます。そういうところで話すとすぐく食いつきがいいのです。みなさんのような若い人たちには、説明しなくても、そういう認識があるのですね。

では、21世紀に求められている科学技術は何かというと、環境に負荷をかけないで便利な社会を持続するための技術です。

人間はいったん便利になったことは、なかなか捨てられないです。最終的に捨てざるを得ないところまで追い込まなければ、捨てたくないです。ですから、私たち科学者は、いかに環境に負荷をかけないで同じように便利な社会を持続できるか。そういう科学技術を開発しなければいけません。

5. 酸化チタン

結局、環境問題を解決するためには、自然エネルギーを使うしかありません。自然エネルギーには、太陽光、風力、地熱、地震、台風のエネギーなどがあります。しかし、巨大なエネルギーは人間がコントロールできません。

人間が利用できるのは太陽光、風力、地熱などになりますが、どれも希薄なエネルギーです。だから私たちは生きていけるわけで、もし太陽光がものすごいエネルギーだったら生きていけません。そのような希薄なエネルギーを使って環境を浄化する技術が必要だということを私はあちこちで言っています。

けれども、言っているだけではだめで、実際にそれを示してみなければいけません。私自身は光化学をやってきました。自分ができることは限られているけれど、たまたま光触媒というのをやっていたので、光化学者の立場で太陽エネルギーを使って環境改善しようと考えました。ここから先は具体的な光触媒技術の話をしします。しかし、化学式は一回も出てきません。

私が使っている光触媒は酸化チタンです(図2)。白いので、おしろいの原料にもなります。飲んでも食べても大丈夫なので、白色顔料として薬の増量剤にも使われています。ただし、そういうものはルチル型という結晶系で、粒子の大きさは1ミクロン弱(1ミクロンは1ミリの1000分の1)ぐらいです。



白色顔料(おしろい、塗料) 酸化チタン
結晶: ルチル型 化学的に安定
粒径: 0.5 ~ 1ミクロン
光触媒酸化チタン
結晶: アナターゼ型 紫外光吸収による強い酸化力
粒径: 5 ~ 30ナノメートル

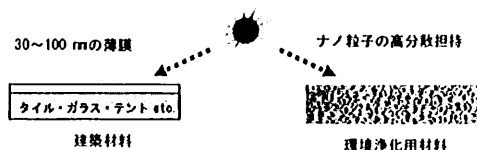


図2 酸化チタン

同じ酸化チタンにもアナターゼ型という結晶のものがああります。粒径がルチル型より2桁小さく、5ないし30ナノメートルです(1ナノメートルは1ミリの100万分の1)。ナノテクノロジーという言葉がはやっていますけれども、まさにナノスケールの粒子です。

アナターゼ型の酸化チタンは、自然界にもあります。海辺の砂の中に含まれています。ただし、光に対して活性があり、光を受けるといろいろな化学反応をしてしまうので、あまり使われていませんでした。化学的に安定で余り反応しないルチル型が、おしろいに使われたりしていたのです。もともとあったけれども見捨てられていたアナターゼ型に、私たちが目をつけたわけです。

アナターゼ型の酸化チタンは紫外線を吸収すると、大変強い酸化力一物を分解する力が発生します。粉の状態では使いづらいので、いろいろな材料の上に薄膜としてコーティングする。100ナノメートル以下でコーティングして建築材料にします。それから、ナノの粒子を表面積の大きな活性炭などの上に、粉の状態で分散させたものも使います。

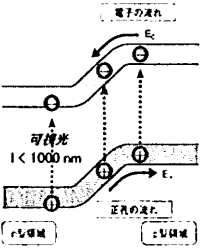
どちらの方法も私が考えたのですが、建築材料の方は15年ほど前にアイデアが浮かんで始めました。

6. 光触媒の動作原理

原理を簡単に話します。図3左側の太陽電池の図を見てください。

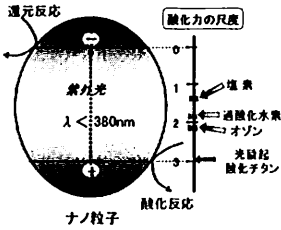
太陽電池にはシリコンが使われています。これに光が当たるとシリコン中の電子がエネルギ

シリコン太陽電池の原理



1 mW/cm² の紫外線
⇒ 約10¹⁵個/秒・cm²

ナノ微粒子酸化チタン
光触媒反応の原理



光触媒 ⇒ 大変強い酸化力
但し光の量(光子数)の分だけ

図3 光触媒の原理

一的に高いところに上がります。そのエネルギーが使われるわけです。エネルギー的に高いところに上がるというのは、2階建ての駐車場の2階に車を上げるとしてください。

2階建て駐車場の1階にある車が電子です。これを2階に上げて手を放すと、穴にすんと落ちてしまいます。落とさないようにするためには、穴の横に動かさないとはいけません。電子も同じです。上げたらすんと落ちてしましますから、空間的に移動させないとはいけません。

そのためにどうするかというと、電位勾配をつくります。そうすれば、マイナスの電気を持つ電子はプラスの方向に動きます。電位勾配をつくるためには、半導体のpn接合を作ります。そして、道路がついていれば、2階に上がった車はエンジンをかけなくても道路で物を運ぶことができます。光のエネルギーで仕事をしたということです。この場合は、光のエネルギーで電気をつくりました。このように、光エネルギーを電気エネルギーに変えるのが、太陽電池の原理です。

図3右側の光触媒の場合には、酸化チタン中の電子が光を当てられて2階に上がります。太陽電池のシリコンと違うところは、エネルギー差が大きいので、電子を2階まで上げることのできる光は紫外線しかありません。エネルギーの大きな紫外線しか吸わないのです。

太陽電池の場合には、2階に上がった電子を動かすには大きな電位勾配が必要でした。しかし、光触媒の場合には電子が熱拡散で横に動い

て、粒子表面に到達します。電子が表面に到達すると、表面にある物質—通常酸素ですけど—の原子に電子が渡ります。化学の言葉では、物質が電子をもらうことを還元されると言います。還元反応が起きるわけです。

残った正孔(ホール)はプラスの電気を持っています。これもすぐ表面に行きます。そうすると、表面にある物質から電子を引き抜く。物質が電子を引き抜かれるというのは、化学の言葉では酸化です。

このように光触媒は、光が当たることで酸化還元反応を行わせます。光のエネルギーで化学反応を起こさせるというのが光触媒で、特徴的なのは電子を引き抜く力—酸化力—がとても強いことです。塩素や過酸化水素、オゾンも酸化剤ですが、こういうものよりもずっと強い酸化力があります。有機物だったら、基本的に全部二酸化炭素になってしまう。ただし、当たり前ですが、光の量に比例した分しか反応しません。

7. 有機物の分解

図4はステアリン酸という有機分子です。長さは2ナノメートルです。1ミリの100万分の2の長さの分子を、酸化チタンの表面に1列に立てて並べたところです。それを紫外線のもとに置いておくと、下の酸化チタンが光を吸って強い酸化力を出し、有機物を分解して二酸化炭素にします。

紫外線の強さは1平方センチメートル当たり1ミリワットです。太陽光に含まれている紫外

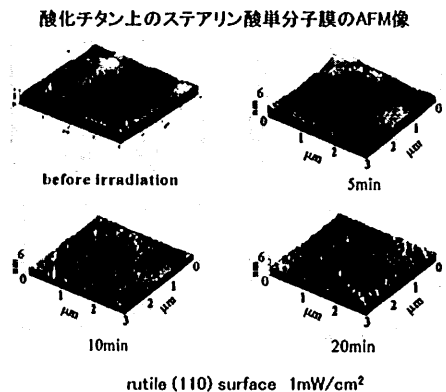


図4 酸化チタン上のステアリン酸単分子膜

線の2倍弱です。戸外に置いといたと想像していただくと結構です。

これを、AFMという特殊な原子間力顕微鏡を使って観察します。5分後に穴があいているのがみえますか。10分後、大きな穴があいてきたでしょう。20分後、ステアリン酸はほとんどなくなりました。有機物質が二酸化炭素になってしまったのです。2ナノメートルの厚さの有機物が1ミリワットの紫外線のもとに置いておくと、これぐらいの速度で消えてなくなります。

図5は大腸菌です。大腸菌は、縦が2ミクロン、厚さが1ミクロンぐらいです。1ミクロンというと、光学顕微鏡で1000倍の顕微鏡にしたときに見えるぐらい。私たちの肉眼では見えないけれど、ちょっと工夫すれば見えるという世界です。

図4の分子の世界は肉眼では全然見えません。どんなに頑張っても私たちは見えなくて、特殊な顕微鏡でやっと見ることができる。大腸菌になると、普通の光学顕微鏡で見える。

この大腸菌を酸化チタンの上に乗せて、同じく1ミリワットの紫外線のもとに置いておくとどうなるか。さっきのは2ナノメートルで、20分で全部消えました。今度は1ミクロンだから500倍厚くなっていて、1日たっても消えません。

しかし、よく見ると、大腸菌の外側に薄い白い線が入っています。これは外膜です。大腸菌が外からの攻撃に対して守るための皮です。それが全部なくなっています。そして、このまま続けると、大腸菌も6日間で全部消えてなくな

ります。

大腸菌の厚みはステアリン酸膜の500倍あります。光強度は同じです。当てている時間は、先ほど20分だったけど、今度は6日間。厚さが500倍になったら、光を当てている時間も500倍になれば消えてなくなるということです。

ゴキブリを分解してみたこともあります。フラスコの中に5ミリぐらいの小さなゴキブリと酸化チタンの粉を入れて光を当てる。そうすると、ゴキブリも完全になくなって二酸化炭素になります。ただし、2年間かかりました。

計算してみましよう。ゴキブリは私たちの目に見える大きさです。それが2年間です。大きさは5ミリですけれども、両方から光を当てましたので厚さでいうと2.5ミリ。ゴキブリの厚さは大腸菌の2500倍ということになります。

さて、全部分解するまで大腸菌は6日間で、ゴキブリは2年間です。かかった時間は120倍ということになります。実は、このときには20ミリワットの強い紫外線ががんがん当てたのです。大腸菌のときの20倍です。当てた紫外線の量は $120(\text{時間}) \times 20(\text{強さ}) = 2400(\text{倍})$ 、厚さは1ミクロンの2500倍、ぴったり合っているでしょう。というように、合うように数字を少しずついじっているのです。

重要なのはオーダー・エスティメーションです。私たち環境をやる人には特に重要です。それによって、私たちはどのレベルのことをやっているのかを知ることが重要なのです。

光触媒で太陽光のエネルギーを相手にするときには、紫外線しか使えません。紫外線は太陽光全体の3%しかありません。そのエネルギーだけでも、分子の世界だったらあっという間に分解できます。大腸菌の世界だったら数日かかります。ゴキブリなら2年です。分子の世界だったらすぐ。目にみえないぐらいの小さい世界だったら数日。けれども、私たちの生活感覚でいうと年という単位で、すごく時間がかかります。

最初にいったように、太陽光というのは薄いエネルギーなのです。だから、私たちは生活ができます。ゴキブリが一瞬でなくなったら、私たちも外を歩くだけで死んでしまいま

酸化チタン上の大腸菌のAFM像

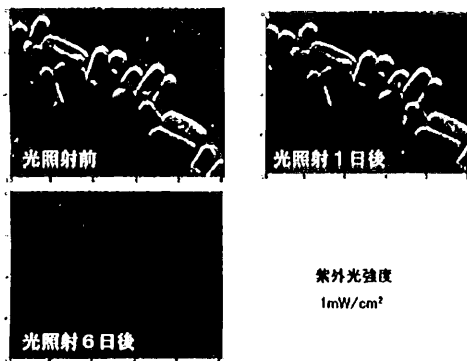


図5 酸化チタン上の大腸菌

す。

その太陽エネルギーの濃縮されたものが化石燃料です。何億年という時間をかけて濃縮された太陽エネルギーからできた化石燃料を私たちは50年で使っているわけです。そういう時代認識を持たないといけない。私たちがいかに難しいことにこれから挑戦しなければいけないかということが、わかるかと思います。

8. 酸化チタンコーティング

さて、あるときトイレで便器が黄ばんで汚いのを見て、ふと思いつきました。ゴキブリも分解できるのだから、トイレの黄ばみだって分解できるだろう。粉では無理だから、便器に酸化チタンをコーティングしたらどうだろうと。紫外線は必要なので、便器の上に紫外線ランプをつけてやろうというジョークで始めました(図6)。

そこで、酸化チタンをコーティングしたものと、そうでないものを比べました。どちらにも表面に紫外線に対して耐久性のある塗料を塗り、紫外線を当てます。紫外線ランプの強度は太陽光ぐらいなので、戸外に置いたのと同じくらいです。そうしたら、普通の材料の上では塗料は全然消えませんでした、酸化チタンの上ではどんどん消えました。最後には完全に消えていることが分かりました。

目にみえる世界のものを分解するには、年の単位で時間がかかると言いました。けれども、目にみえる世界であっても、色素はごく少量で

も私たちは簡単に検知できる。だから、実際に使われている量は非常に少ない。

それから、色が消えるということイコール物質としてなくなったということではありません。ここでは色を消しているわけですがけれども、二酸化炭素になって消滅するまでには6時間ぐらいいかかります。おしよゆは10時間ぐらいいれば完全に分解します。コーヒーも10時間ぐらいいれば完全に分解します。コーヒーも10時間ぐらいいれば完全に分解します。

こういう材料があれば、太陽光という自然にある光だけで、洗剤を使わなくても自動的に色素を消すことができるのです。

これを最初に実用化したのはトンネル照明です。トンネル照明は黄色い色を使っています。ナトリウムランプというもので、500ナノメートルぐらいの波長の光を出しています。これにも紫外線が結構含まれています。紫外線は目に見えないですから、照明としては全く役に立っていませんけれども。

トンネルの中は排気ガス中のカーボンやオイルが充満していますから、照明器具はすぐ汚れます。そこに私たちの材料をコーティングしておく、無色透明に塗れて、自動的にセルフクリーニングできるのです。

手術室にも応用が効きます。手術室は菌があってはいけないので、ふだんは薬剤を使って清掃しています。それでも菌を完全に切り切ることにはできません。どんなに清掃しても普通のタイルを使っていれば、1平方センチメートル当たり1個ぐらいの菌がどうしても床や壁に残ります。それを私たちの光触媒のタイルに変えた途端に、壁はゼロ、床が1、2個ぐらいになる。しかも、水ぶきだけです。あとは光が殺菌してくれます。

このように酸化チタンをコーティング材料にすると、紫外線が当たるだけで物質が分解され、セルフクリーニングや抗菌が行われます。

9. 光誘起親水化反応

サイエンスがおもしろいのは、そういう遊びの中から偶然に発見が生まれてくることにあります。私はこういう光分解反応の研究を進めていく中で、酸化チタンがこれまで知られていたのとは全く違う現象を起こすことを発見し、「ネ

吸着物質の分解反応に⇒酸化チタンコーティング膜

(1989年)

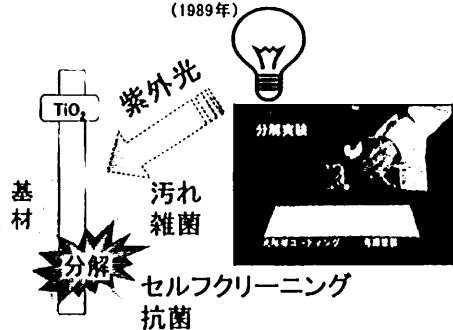


図6 酸化チタンコーティング膜

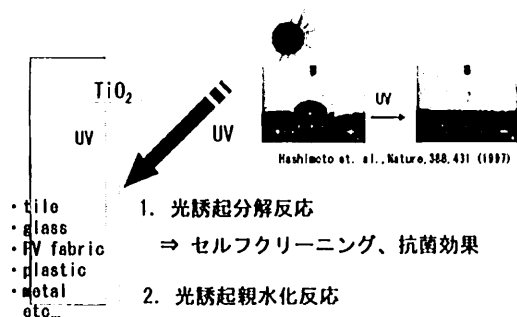


図7 酸化チタンコーティング材料

イチャー」に97年に発表しました。

図7は材料の上に水滴を落としたときに横からみたところですが、あるときは水滴が丸まって、あるときは水滴が広がる。こういう変な現象をみつけたのです。

酸化チタンを塗った材料に光を当てたら、表面が大変濡れやすくなり、かつ、その状態が光をとめても2、3日持続するという現象を偶然見出したのです。もとに戻っても、光を当ててやると、また濡れやすくなります。普通にあるようなことですが、全く新しい発見であったのと同時に、サイエンスとしても非常に不思議な現象でした。

油を普通の材料の上ののせて少し傾け、上から水を流しても水と油だからまざらないし、油は動きません。油汚れは落ちないということです。

ところが、酸化チタンでコーティングした材料に光を当てると、水と油は混ざりませんが、油が下に向かって動きだします。水が油の下に入り込むのです。コーティングによって材料が異常なぐらい水になじみやすくなるので、油の下に水が入り込んで、油を洗い流してしまいません。

排ガスで汚れたものがあるとします。これを光で分解することもできますが、そのためには時間がかかります。でも光のかわりに霧吹きですっすつと水をかけてやると、簡単に汚れが洗い流される。

光化学をやっている人間は光を当てたときの

反応に興味があるわけですが、光が当たっているときしか反応しない。けれども、私たちは光というリミテーションを取り除くことができました。外に置いておくと雨水が当たりますから、雨できれいにするという現象を見つけることができましたのです。

太陽光も弱いもので良く、雨水が当たると光誘起分解反応と光誘起親水化反応の両方が起きて、いろいろなことができます。重要なことは、太陽の光も雨も全部自然のものだということです。

全部自然のものでどれぐらい効果があるかという、トンネルの出口のところのガードレールに塗った例があります。何ヶ月がするかなり差が出てきます。コーティングしたテントもかなり効果があります。

PETフィルムにもコーティングできます。電信柱に張っておいた普通のPETフィルムも酸化チタンをコーティングしたらきれいな状態が持続します。

この技術はいろいろなところで使われています。大阪ターミナルビル、名古屋のビル、この近くでは松下の本社ビルなどです。中部国際空港の窓ガラス2万平米には全部使われていますし、東京駅前の丸の内ビルにも使われています。

海外でも使われています。小説の『ダヴィンチコード』で有名になった。ルーブル美術館のピラミッドもそうです。これにも光触媒が塗られています。

それから、水滴がつかなくなる効果もありますので、バックミラーにつけておくと便利です。トヨタ車の80%ぐらいには入っていますし、ヨーロッパ車にも入っています。視認性という車の安全性に直接関係することですから、よく使われています。

ただし、フロントガラスはだめでした。雨水が均一に流れてくれないために、凹凸ができてしまい、運転しづらくなりました。フロントガラスは撥水性にして雨滴は風で飛ばす。バックミラーは風が当たらないから、撥水ではなくて親水でやるべきなのです。他にも、カーブミラーなど、いろいろな応用例があります。

10. 環境問題への応用

ここまでは酸化チタンをコーティングした材料でした。セルフクリーニングとか、抗菌とか、防曇がある。ポイントは、洗剤とか薬品を使わないでこういう機能を出しているということです。20世紀型の技術だったら、新しい洗剤を使う、抗菌剤を使う、曇り止めの高分子を使うという発想になります。21世紀には、こういうものを一切使わないで、自然のエネルギーと自然のものだけで機能を出すという環境にやさしい材料が必要です。

だけど、それだけではなく、有害物質を分解するというような、もっと積極的に環境をきれいにしたいと考えました。

簡単ではありません。セルフクリーニングとか抗菌は材料の表面での現象です。材料の表面は二次元です。きれいにしたのは二次元の世界です。それに対して環境をきれいにする場合には、対象は水とか、空気とか、土壌です。こういうものをきれいにするというのは三次元をきれいにするということです。今までの話よりも圧倒的に難しくなります。

具体的な課題としては、三次元空間にある物質を酸化チタンの表面までいかに持っていくかということです。もっと大変なのは二次元から三次元になった途端に、反応させるべき物質量が圧倒的に多くなるということです。三次元空間にあるものを二次元に載せたらものすごい量になります。

トンネル照明を汚しているススも、すり落として重さをはかったらせいぜいミリグラムです。ガラス面にゴキブリを乗せても絶対分解できません。三次元のものには分解できない。二次元であるから分解できたのです。

具体的にみてみましょう。例えばトリクロロエチレンという洗剤です。この1モル(130グラム)を1リットルの容器に入れます。1リットルというと、10センチ×10センチ×10センチです。図8を見てください。

1モル、130グラムを1リットル容器に入れたときに、分解するのにどれだけ時間がかかるのかは、掛け算と割り算だけで計算できます。光の受光面積は10×10の100平方センチメートルで

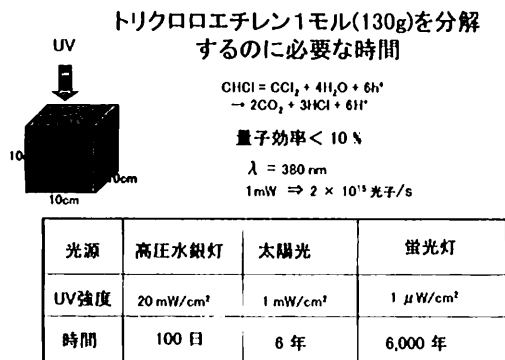


図8 トリクロロエチレンの分解時間

す。ゴキブリを分解するときに使った紫外線をたくさん出す高圧水銀灯を使うと、1モルを分解するのに100日かかります。ゴキブリは2年だったでしょう。太陽光だったら6年かかります。蛍光灯を使うとすれば、130グラムを分解するのに6000年かかります。

でも、私たちは太陽光を使わないといけな。でも、130グラムを分解するのに6年もかかっては使い物になりません。ここに難しさがあります。太陽光を利用する環境浄化を行いたくても、100グラムぐらいのものを分解するのも難しい。どうしたらいいかといろいろ考えました。

太陽光というのは希薄なエネルギーです。けれども、庭の雑草は、あっという間に太陽光で育ちます。どうして太陽光の希薄なエネルギーで植物は育つことができるのか。可視光を使っているからです。それでも可視光のエネルギーにしても紫外線のたかだか10倍です。これに加えて、大地を反応場に行っています。二次元で反応しているのです。三次元のものと考えていたけれども、実は反応は二次元で行われていて、それが三次元に育っているということに気づいたのです。

11. 農業廃液の処理

このことに気づいたのは、トマトの廃液を光触媒で何とか処理してほしいと、私のところに農業試験場の人が持ち込んだときです。

トマトは温室で育ちます。養液の8割はトマトに使われ、残り2割は廃液として出てきます。ということは、ハウスの内側で使われている太

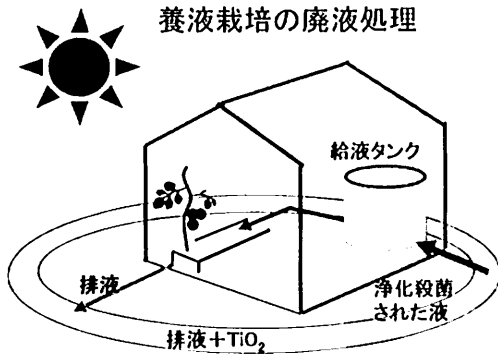


図9 廃液処理のイメージについて

陽光で養液の8割が使われるのだから、その4分の1に相当する2割ぐらいの面積の溝を作れば、残り2割も処理できるのではないかと思ったわけです(図9)。

これも、全くのオーダー・エスティメーションです。でも、こういう分野では全く新鮮な発想でした。それまでは光触媒で何かやるときにはフラスコの中で処理するという発想しかありませんでした。そうではなくて大地で処理してやる。トマトが育つように、地面で処理してやるということを考えてのです。

実際には温室の横に地面を掘らないで反応槽を作りました。ポイントは、反応槽が底浅だということです。浅い分、横に広く作らないといけないのですが、実際には温室の3%ぐらいの面積を外に確保しました。トマトの栽培面積の4分の1ではなくて3%ぐらいの面積を外に作り、そこに別の用途で使われた光触媒の酸化チタンがコーティングされたフィルターを薄く敷き詰めました。

その水槽に汚い水を入れて、そのまま何もしないで置いておく。上からは太陽光が当たります。最初は本当に廃水が処理できているのか不安でした。でも大丈夫でした。6時間ぐらいで廃液がきれいになってしまいました。底浅にしたから太陽光を面でとらえているのです。電力を一切使わなくても菌や不要な有機物が分解されます。しかも、窒素、磷、カリという栄養素はもともと酸化状態にあるからそのままです。不要なものだけが分解されて養分は残り、繰り返し使えるようになりました。ポイントは太陽

光だけで処理できるということです。

この方法はまだ実用段階に達していません。フィルターの価格が高く、1平米当たり数万円するのです。これを1桁落せば、使いたいという意見がたくさんあります。今は農水省から委託を受けて、価格を10分の1にする研究をしています。近い将来、私たちの装置を使って作られたトマトが皆さんの口に入るかもわかりません。

次に、水稻種子消毒です。同じように底浅の反応槽をつくり、ガラス繊維の不織布を入れます。そして、蒸発しないようにビニールシートをかけます。水が蒸発するのは構わないのですが、濃度を測定するため、水の蒸発や雨水の浸入を防ぐ必要があったからです。

図10は実験を開始してから1週間の濃度です。田植えが終わった後、廃液中の有機物濃度は、酸化チタンがなかったら変化しませんが、光触媒をやると減っていきます。ゼロにならないのではないかと言われますが、これはTOC(全炭素量)で有機物濃度をみていますので、ごみなどの混入があってゼロにならないのです。農薬は2、3日でほぼゼロになります。

天気が悪くても濃度は減少します。今日のような曇りの日でも紫外線はあります。雨の日だってあります。

不要な農薬を全部まとめた廃液処理もやってみました。10万ppmくらいの高濃度にしたのですが、1ヵ月たつと数百ppmくらいまで下がります。太陽光の力ってすごいですね。

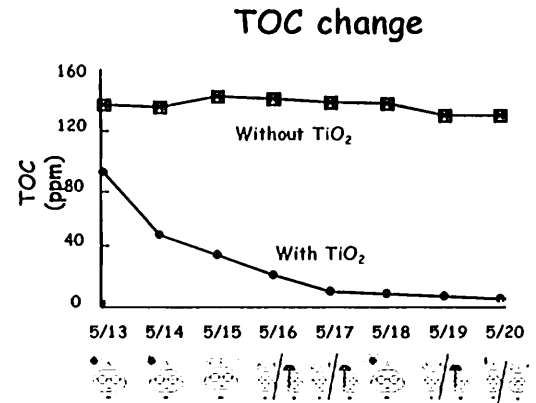


図10 TOC変化

12. シートによる汚染土壌処理

シートも作ってみました。吸湿剤を芯にして、周りに酸化チタンを入れたものです。これに水をかけます。吸湿性があるので、有機物はこの中に全部トラップ（捕捉）されます。あとは光触媒で分解します。

これを農家で地面に広げて、廃液をその上に捨ててもらえればいいのです。毛布1枚ぐらいの大きさで1万円から2万円ぐらいになっています。けれども、その値段でも農家は買いません。今までタダで捨ててきたものを処理するために、それだけのお金は使いません。だれが費用負担するのかというのが今後の課題です。

図11は活性炭の表面に酸化チタンをくっつけたところの電子顕微鏡写真です。これは、活性炭と酸化チタンの粉をまぜてふるだけでできます。これを段ボール状のシートの中に入れる。上は透明フィルムで光が当たるようになって、下は不織布で気体が通過するようになっています。

汚染土壌をブルーシートのかわりにこのシートで覆ってやります。汚染土壌は生石灰とまぜます。そうすると土壌が発熱して有機物質が蒸発し、覆っているシート中の活性炭に捕まります。後は放っておくだけで、太陽光で分解されて二酸化炭素になります。西東京市で行ったときには、2週間ぐらいで完全に浄化できました。

クリーニング店は、土壌がトリクロロエチレンなどの有機溶剤で汚染されていると、廃棄したくてもできません。しかも、汚染土壌の上に

は建物が建っていますから太陽光があたりません。私たちが提案しているのは、汚染部分をみつけたら、そこから空気を吸い上げ、ぐるぐる巻きに丸めた光触媒シートが入っているタンクに汚染された空気を入れる方法です。

タンクには活性炭が入っていますから、ここから出てきた汚染された空気はきれいになっています。タンクの中に光はありませんので光触媒は機能しませんから、10日間も使っていると飽和して、出口のトリクロロエチレン濃度も上がります。

そうなったら、タンクからシートを出して干してあげる。そうすると太陽光でトリクロロエチレンが分解されてもとに戻ります。そして、出口濃度はまたゼロになります。小規模の汚染であれば、洗濯屋さんに自分たちでやってもらっています。みんなが少しずつ工夫することによって処理できています。

トリクロロエチレン1モル130グラムを分解するのに6年もかかるといういましたが、なぜここでは短時間で処理できたのでしょうか？

1リットルの容器を10センチ×10センチ×10センチで考えました。こんどは、1リットルを縦横10倍にして、高さを100分の1にしたのです。100センチ×100センチ×1ミリ。これも1リットルの容器です。何が違うかということ、受光面積が100倍にふえています。光を受ける面積が100倍になると分解に要する時間も100分の1になります。6年の100分の1というのは20日です。限りなく二次元に近づけて、植物と同じように大地を反応場に行っているのです。

13. まとめ

今日は、有機物を光触媒反応によって、太陽光で二酸化炭素と水に分解することについて、お話ししました。汚染物質が酸素と反応して二酸化炭素と水になったのです。

これと逆の反応は、二酸化炭素と水が反応して有機物と酸素になる光合成です。そのときにも太陽光が使われます。地球上では光合成によって有機物が合成されてきましたが、ほとんどが燃焼や腐敗、発酵で二酸化炭素に戻りました。そのうちのごく一部だけが化石燃料として10億

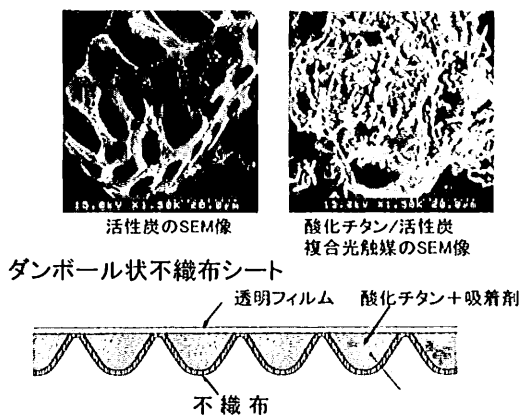


図11 ダンボール状のシートについて

年かけて、地球上にたまってきました。しかし、それを20世紀後半から、私たちの世代が急激に使うようになり、大量の二酸化炭素を出し、地球温暖化という問題が出てきました。

私たちは光触媒反応という、光合成とは逆反応のパスを人工的につくっています。人工的ですが、太陽光と自然界にある物質を使ってもとに戻しています。こういうバイパスをつくることによって、地球上の物質バランスを戻しているという位置づけができると私は考えています。

このシートを小さく切って冷蔵庫に入れると良い脱臭剤になります。活性炭が入っているから当たり前です。冷蔵庫の脱臭剤はなぜ箱に入っているか？においをとるのだったら広げて、シートにした方がいいに決まっているわけです。なぜ箱に入っているかという、長持ちさせるためなのです。効果を薄めて長持ちさせているのです。

私たちののはそうではなくて、冷蔵庫の内側にぺたっと張っておくだけですごくよく効きます。ただし、2週間もすると効果がなくなります。そうなったら外に干すと、もとに戻ります。こうして繰り返し使えます。

干すだけでいい。簡単なことを繰り返すことが大切なのです。私たちは干すという操作を日常生活の中で毎日のようにやっています。人間というのは、みんなが少しずつ工夫しないといけないのだけど、自分がふだんやっていないことは、なかなかやろうとしません。

エアコンのクレームの99%はフィルターの汚れだそうです。だから、エアコン業界では、いかにフィルターの交換を簡単にできるかという開発をずっとやってきました。それで、とうとう昨年あたりから、自動でエアコンのフィルターを清掃する製品が出てきたでしょう。

最後になりました。環境問題は、自然サイクルの中でやらないと解決しないということを繰り返しておきます。光触媒は、太陽光を用いる環境保全、浄化ということで説明しました。光触媒でできることは本当に限られています。だけでも、科学者も、それから皆さんも、科学者ではない人も含めて、みんなが少しずつ自分のできることをやっていくということによって、

21世紀を、サステナブルな世界にする必要があるということをお話して終わります。

○学生 お話ありがとうございました。さっきのグッズについてですが、あれはどれぐらい再生可能というか、何回ぐらい使えるのでしょうか。

○橋本 原理的には何回でもできるのです。あとは物理的な強さだけであって、シートの強度によります。シートを強いものに入れたら、もう半永久的に使えます。だけどそうすると、一回買ったならもう二度と買わないということになって、商売上がったりでしょう(笑)。

実際にはどうやって干すかによるのだけど、10回や20回干してもどうってことはないです。雨に当たらないでくださいと書いてあるけれども、雨に当たっても干せばどうってことありません。物理的に紙が破れなければいつまでも使えます。

〈編集責任者：藤倉 良〉