



講演 2

合成化学：未来を創る科学技術

京都大学化学研究所教授 山子 茂



皆さん、おはようございます。ただ今ご紹介にあずかりました京都大学化学研究所の山子です。今日はこのような大勢の皆様の前で発表させていただける機会をいただきまして、本当にありがたいと思います。紹介がありましたように、合成化学についての話で、先ほどの河合先生の話の内容とは随分違った話になると思いますけども、気楽に聞いていただければと思います。

あと1か月ぐらいたちますと京都の市内は桜がいっぱいになりまして、これは私の通勤経路で、いつもこの前あたりの橋を渡って通っているのですが、あと1か月で京都も春になります。一方、こちらの東北は本当に震災の後、長くこういう寒い冬と同じような日々を送っていると思いますが、東北にも本当の春が早く来ることを祈って、この講演を捧げさせていただきたいと思っております。

合成化学と聞いても何なのか、あまりわからないのではないかなと思いますので、簡単に、これは私の個人的な意見ですので、必ずしもジェネライズされたものではないんですけども、どういうものかというものをここに簡単に紹介させていただきました。

基本的には、合成化学はものづくりの化学ですけども、特に合成という場合には、有機分子とか、そういう有機材料のつくり方を研究する学問であります。特に、ものづくりと申しますと、一番簡単なのは建築で家を建てるといったようなイメージがあるのですが、我々が、そういうものづくりする場所というのは、ナノサイズという非常に小さなものです。ですので、後でもう一回スライドが出てきますけども、例えば、橋をつくるとか建物を建てるといえるときには、直接皆さん手に持って建てることはできますが、こういう分

京都大学附属研究所・センターシンポジウム 京都大学山台講演会
京都からの提言 21世紀の日本を考える (第9回)



合成化学：未来を創る科学技術

京都大学化学研究所 山子 茂

合成化学

- ・有機分子・材料の「作り方」を研究する学問
- ・ナノサイズにおける「モノ作り」に関する科学技術
 - ・既存のものを効率的に作る事ができる
 - ・新しい化合物を生み出すことができる
 - ・新しい機能や材料を作ることができる
 - ・現代の錬金術
 - ・技術立国に必要な基盤技術

新しいアイデア
ヒラメキ
新発見



新しい反応
新しい概念



新しい合成プロセス
新しい分子
新しい分子機能



新しい化学
新しい産業

子をつくるというときには、本当に小さいので、そういう方法を使えません。そういうところに新しいサイエンス、ケミストリーが必要になってくるということです。

具体的には、今ある薬とか、そういうものをもっと有効につくることができるようになりますし、特にこの二つ、私がこの研究をずっと学生のときからやっているモチベーションは、ここに示していますけども、やっぱり今までにない新しいものをつくることです。新しい今までにない機能や材料をつくることできる、非常に創造的な学問分野であります。

こういうところに興味を持って進めていますので、今日は特に、この研究分野の雰囲気を知っていただければ、特に今日は若い方が多くいらっしゃるということですので、ぜひ若い方に、こういう分野に進んでもらうモチベーションになってもらえればと思っています。

ただ、こういうことが実際の世の中に、どういうふうに関係するということになりますと、これは言ってみれば安価な原料から非常に価値のあるものを生み出す学問でもありますので、言いようによっては錬金術に似たようなところがあります。金属ではありませんけども、そういうコンセプトとしては錬金術に似たようなものがありますし、やはり日本は、これからは技術立国として、この世の中で、世界の中でプレゼンスを発揮していく必要がありますが、そういう技術立国としてあり続けるための非常に必要な基盤技術であるということにもなっていると思っています。

大体のイメージとして、「風が吹けば桶屋が儲かる」ふうに書きますと、やっぱりこういうときに一番重要なのは、アイデア、ひらめき、新発見といったようなものです。こういうものは、なかなか教科書には書いてありませんので、自分で何とかして見つけてくる必要があります。

そういうところから、新しい反応、新しい概念を導き出して、新しい合成プロセス、既存のものを効率的につくることができるプロセスとか、新しい分子とか新しい分子機能を見つけて、そういうことを通じて新しい科学とか新しい産業を生み出していこうというのが、我々の先ほど言った、「風が吹けば桶屋が儲かる」的な研究の進展の仕方です。

それで、特に今日は材料ということに注目してご紹介していきます。ちょっと昔の時代の流れをひも解いてみますと、昔は石器があり、その後、青銅があり、基本的には、その後には金属の時代が来ます。そして20世紀になってから、プラスチックの材料が生まれてきて、今はプラスチックがかなり幅を利かせています。

そういう意味で見ると、この石器、無機とでもいうことができますけども、昔は、



ここに示したように、例えば、こういう神殿をつくる建築材料として用いられていますけれども、当然、最近ではこういうガラスとか光ファイバーのような最先端な材料にも用いられていますし、これから、この金属に時代が移ってきて、重いもの、さらに非常に丈夫ですので、飛行機とか、昔はこういう甲冑などに使われますし、やはりこの鉄器時代の到来を象徴するのがヒッタイト族というのが鉄器を持ってきて、メソポタミアあたりの人類を征服したということがわかりますように、こういう非常に丈夫な材料を提供してきています。

それに対して、プラスチックは、例えばこのバケツですけれども、恐らくお年を召した方には、昔は当然バケツといえば金属のバケツだったのではと思います。今はなかなか金属のバケツを見つけることができず、大抵こういうプラスチックになっています。それは安い、成形が簡単だ、さらに丈夫だといったようなプラスチックの特徴が出ています。

それに、これはユニクロのヒートテックですけれども、実は私も今日下に着ていますが、一度冬にこれを着てしまうと、暖かいのでなかなか手放せないんですけども、やはりこれも後から出てくるアクリル樹脂といったような、最近の高分子、人工高分子を使った材料です。

また、光学材料というのは、もともとガラスが中心でしたが、最近では、こういうプラスチックも非常にいい材料となってきていますし、そういう一つの典型が有機ELテレビでもあり、このように新しい材料が出てくることによって生活が変わってくるという例であります。そして、それを支える技術が合成化学だということです。

モノをつくるときに、やはり重要なのは反応を開発するということです。これは有機の反応ではありませんが、ここに一例を示します。「Nature」という非常に有名な雑誌があります。これは「Nature」が1999年に、20世紀の発見で何が重要であったかということ、議論した解説記事ですが、このタイトルは、日本語で訳しますと「人口爆発の引き金」となります。ここに書いてありますの

新しい反応開発のインパクト:「人口爆発」の引き金
Detonator of the population explosion
 Without ammonia, there would be no inorganic fertilizers, and nearly half the world would go hungry. Of all the century's technological marvels, the Haber-Bosch process has made the most difference to our survival.
 アンモニアがなければ肥料が作れない。そうすると、世界の半分が飢えてしまう。今世紀(20世紀)において、ハーバー・ボッシュ法は我々の生存に影響を与えた最大の技術革新である。

$$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \xrightarrow[\text{400-600 } ^\circ\text{C}]{\text{Fe cat.}, \text{200-1000 atm}} 2\text{NH}_3$$

 (1918年) (1931年) **ハーバル化学賞**
 But BASF's leaders to...
 Fritz Haber Carl Bosch
 © 1999 Macmillan Magazines Ltd

が、私が簡単に訳しますと、アンモニアがなければ肥料がつかれない、そうすると世界の半分が飢えてしまう。それは、20世紀において、ハーバー・ボッシュ法が、我々の生存に影響を与えた最大の技術革新である、とこのニュースでは言っています。

このあたりをよく読めば書いてありますが、20世紀の発見、皆さんどういうことを思い出すかといいますと、コンピューターとか飛行機とか宇宙産業とか、そういうことを思い浮かべると思いますが、このハーバー・ボッシュ法が一番重要なんだということ、それによって人口が、今我々が、これだけ地球上で生き長らえていくことができるんだとい

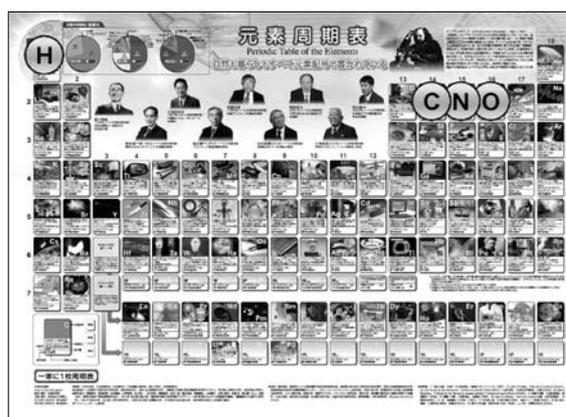
うことを述べています。

ハーバー・ボッシュ法というのは、どんな方法かといいますと、これは実は高校の化学でよく習う反応です。窒素と水素を鉄触媒を用いて非常に高圧、高温で、いわゆる還元反応という反応を行いますと、アンモニアがつくられるという反応です。この方法で合成されたアンモニアの約80%がアンモニア肥料として実際使われて、農作物を育てるのに使われています。

また、これは非常に高温なプロセスですので、非常にエネルギーが要ります。現在の石油の産出量の数パーセントがこのハーバー・ボッシュ法のために使われている、といわれているような反応です。

ちなみに、これを初めに見つけたハーバーさんは、1918年に、このコア反応を見つけたということでノーベル化学賞を受賞していますし、ボッシュさんは、それを実際の工業プロセスにして、1931年に高圧反応に関する業績でノーベル賞を受賞しています。この例からわかりますように、良い反応を見つけるということは、社会に非常にインパクトを与えることを、ちょっと頭の中に入れておいてください。

これは周期表ですが、我々はこういう周期リスト表に載っている元素を使って、いろいろなものをつくったりしていますが、特に、今日の私の話は有機化学に関係するものです。そのときに重要なのは、水素、あとは特に炭素、窒素、酸素というようところが重要となってきます。このあたりの周期リスト表の上にある元素でもものをつくっているのだなということも頭の中に入れておいてください。



それで皆さん、やはり科学とか化学とか言いますと、何か難しそうで嫌だと思われる方が多くいらっしゃるのではないかと思います。もしくは、昔は何か嫌だった。でも、意外とそうでもないのです。例えば、ロバート・ウッドワードといって、20世紀を代表する有機化学者ですけども、彼は1965年にノーベル化学賞を受賞していますが、そのときの彼の功績は、art of organic synthesis ということで、芸術的な有機合成に対して、その功績によってノーベル賞を受賞しています。

彼は、かなり変わっている人で、恐らく先ほどのロールシャッハ・テストをやったりすると、どういうふうに判断されるのかな、なんてちょっと非常に興味がありますが、彼は非常に青が好きで、この写真でも青のネクタイをしていますし、彼はハーバード大学の先生だったのですが、ハーバード大学の彼の駐車場は青のペイントで塗られていたといったような人です。

これはクロロフィルという分子で、光合成に重要な分子ですけども、彼は、こういう炭素、

水素、窒素といった元素を持つ分子を原料に、
 こういう複雑なものを合成しました。それで、
 その合成法が芸術的だという理由でノーベル
 賞を受賞しています。

皆さん、これを見て芸術的だと思われる
 方はいますか。なかなか難しいのではないか
 と思います。私はこれを見るといつも思うの
 が、我々が現代美術を見ているのと同じでは
 ないかということです。ピカソや岡本太郎さん
 は素晴らしいといわれていますが、なかなか
 この絵を見て、どこが素晴らしいのかという
 のは、正直芸術に関する素養のない私にはわ
 かりかねるところがあります。

実際は、先ほど言った有機化学の彼の芸術
 もそれに似たところがありまして、こうやっ
 てトレーニングしますと、やっぱり彼の合成
 はきれいだということがわかりますし、また
 分子を見ても、すごく美しい分子だなというふう
 に思います。ですので、今日はちょっと
 違う世界の芸術の話をしているのだなというふう
 に聞いてもらえればと思います。

私は岡本太郎さんが好きですけども、彼はよく「芸術は爆発」だと言っていました。私
 もいつも、この研究は創造、爆発、そういうものが必要で、それなくして新しいものは生
 まれないのではないかと考えています。

それで私の研究室では、いつも学生さんに、「創造、創造」と言っていて、もう学生さん
 は大体右耳から左へすっと抜けて何も残っていないのですが、最近いろんな人が同じよ
 うなことを言ってくれているなということがわかってきました。

例えば、これは皆さんご存じのアインシュタインですが、彼は、“Imagination is
 more important than knowledge”、いわゆる想像とか発想というのは知識よりも重要
 だと言っています。当然これは勉強しなくて
 いいよと言っているわけではなくて、新しい
 ものを見つけるためには勉強を超えて想像し
 ないといけないと言っているのではないかと
 思いまして、このウェブサイトを見つけたと
 き、すぐにプリントアウトして研究室に貼っ
 て、学生さんに毎日これを見ろと言っていま
 すので、きっと創造性を発揮してくれている

化学（科学）は芸術？

ノーベル化学賞 (1965年)
 "for his outstanding achievements
 in the art of organic synthesis"

Robert B. Woodward

クロロフィル
 (1960年合成に成功)

(原料)

化学（科学）は芸術？

ノーベル化学賞 (1965年)
 "for his outstanding achievements
 in the art of organic synthesis"

Robert B. Woodward

研究は創造・爆発！？

近く女 (1937年) Pablo Picasso

太陽の塔 (1970年) 岡本太郎
 “芸術は爆発だ！”

**IMAGINATION IS MORE
 important than knowledge**

ALBERT EINSTEIN
 German THEORETICAL PHYSICIST

ものといつも期待しています。

さて、本題のほうに移っていきますけども、まず先ほど言いましたように、我々が取り扱っている世界は非常に小さな世界で、いわゆるナノメートルサイズの世界です。それを表わすためにちょっとスライドを1枚準備しました。

ここに書いてありますように、我々は1メートルレベルの世界で生きていますけども、

それが例えば、髪の毛の厚さとか、赤血球とか、ウイルスといったようなものになりますと、どんどん小さくなって、元素になると、ナノメートルよりも小さな世界、ピコメートルという世界になります。ナノというのは大体10億分の1というレベルのサイズです。

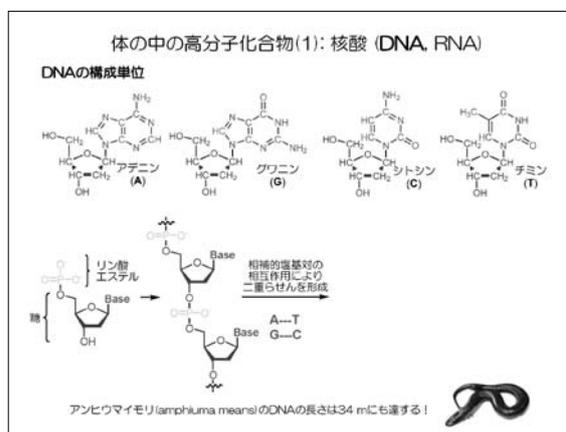
これは、地球の大きさに例えますと、地球の直径を1メートルとしますと、1円玉ぐらいの大きさが1ナノメートルに相当するということです。これが、元素が幾つか連なって、例えば、ここにはカーボンナノチューブとか、後で出てきますDNAといったようなものになります。こういうものを人工的につくるためには、我々の手を使うことはできませんので、代わりにいろんな触媒とかを使って反応をさせていくということになります。

それで、今日は特に高分子という大きな分子について、それをつくる方法を紹介させていただきますが、そういうものは我々が人工的につくるものしかないのかといいますと、そうではなくて、実は皆さんも分子でできていまして、皆さんの中にも高分子はいっぱいあります。

代表的なものを二つ示します。一つはDNAとかRNAなどの核酸と呼ばれているもので、我々の遺伝情報を司っている化合物です。

この構成要素、このあたりも皆さんよくご存じのことだと思いますが、構成要素は実は4つしかなくて、アデニン、グアニン、シトシン、チミン、よくAGCTといわれるもので、それは、こういう構造です。アデニンですと、酸素、炭素がいっぱいで、窒素、炭素というような感じです。

それで、有機化学者は、これを見るとちょっと鬱陶しいと思います。ですので、有機化学の基本は炭素ですので、こういうのを見るときに我々、C(炭素)は書きません。それで、炭素というのは普通手を4本持っていますので、手の数が合うように勝手に水素がついているというふうに想像します。大学に入って、もし有機化学を勉強するような機会が



あったら、AGCTはこういうふうにすっきりした形で書かれることになります。

それで、炭素以外のいわゆる官能基と言われるものですが、そういうものを例えば、OH、NH₂というふうに書きます。例えば、OHというのは、水がH₂Oということですので、水と似たような性質を持っているというようなことになります。

それで、皆さんの体の中では、ここは塩基と言いますのでBであらわしますと、このものがリン酸エステルというものを介してつながって、ポリマーになって、それがよく言われるAとT、GとCというのが、いわゆる相補的な塩基対をつなぐことで、この絵ではこの黄緑のところはリン酸で、赤のところは、いわゆる糖といわれる場合で、この青いところがベースに相当するところですが、こういう二重らせんになります。

これはウェブからとってきたのですが、よく映画などでDNAが2重らせんになっていて、この後ろにAGCTとか、いろいろ字が並んでいることが多いと思うんですけど、これはこういう塩基が、どういう順番で並んでいるか、そういうものが並ぶことで遺伝子情報をコードして、それが例えば、たんぱく質なんかにトランスファーされるということになっているわけです。

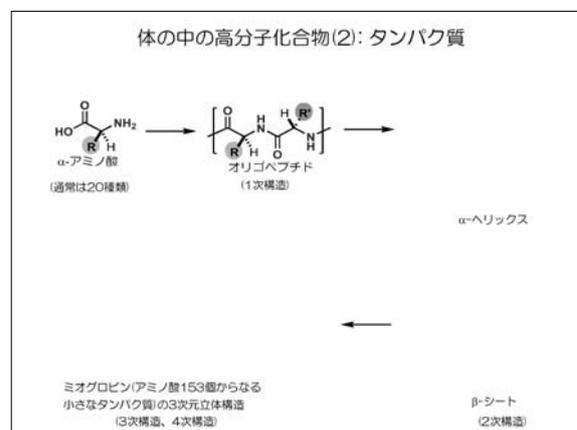
ちなみに、このアンヒワマイモリという両生類の生き物のDNAは、先ほど言いました10億分の1ぐらいのものがつながって34メートルにも達するとも言われていますので、本当にちりも積もれば山となるということがわかっていただけだと思います。

もう一つの代表的な生体の高分子というのはたんぱく質です。それは、皆さんも聞いたことがあると思いますが、アミノ酸といわれるものからできています。基本的な骨格は、ここにカルボン酸というお酢と同じような成分とアミンという窒素のある成分がありまして、ここに色でつけたRという部分が必須アミノ酸ですと、大体20種類ぐらいがあります。

これがカルボン酸とアミンで結合して、いわゆるオリゴペプチドというものをつくり、これが並んでいきますと、あるときには、こういうαヘリックスというような、くるくる巻いた構造をとりますし、ある場合にはβシートという平面構造をとります。

例えば、頭の中で、我々の脳で、αヘリックスになっていたたんぱく質が、いつの間にかβシートになっているということもよくありますが、例えば、アルツハイマーの人には、こういうβシートのたんぱく質、いわゆるアミロイドたんぱく質というのが沈着してしまって、そのために機能が失われるということもよく知られていると思います。

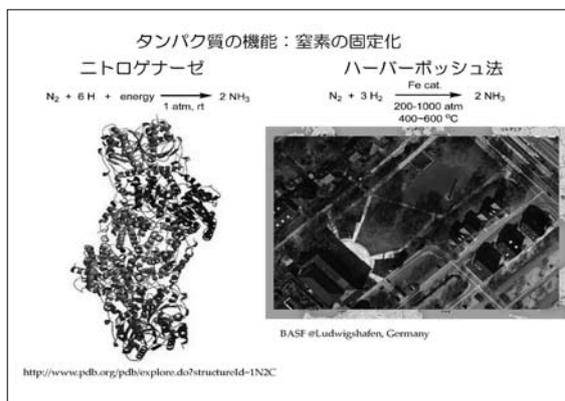
アミノ酸がつながっていくと、こういうふうに、これはαヘリックスが、ここに書かれているのですが、非常にきれいな構造をと



ます。これが例えば、ミオグロビンといわれるたんぱくで、これは我々の赤血球の中にあつて酸素を運ぶ役割をしています。この分子は大体このアミノ酸が153個ぐらいから成る、たんぱく質の中では小さなものであるということになります。

これも、もっと大きくなると、例えば、これはニトロゲナーゼというたんぱく質ですけども、さっきのくるくる回ったものがいっぱい、それと、いわゆるドメインといわれるものが幾つか並んで構成されています。

そうしますと、例えば、これは酵素と呼ばれるたんぱく質ですけども、これは例えば、窒素をアンモニアに変換します。いわゆる根粒菌に、こういうものがいて、窒素を固定化しており、1気圧、室温でこういうことをやってのけます。



それで、先ほど一番初めに紹介しましたハーバー・ボッシュ法も、窒素をアンモニアに変換しますが、こちらは先ほども言いましたように、200 から 1,000 気圧という非常な高圧と 400 度から 600 度と非常に高温が必要になります。自然はこういう非常に美しい高分子をつくることによって、こんな反応を室温で簡単にやってしまうということになっています。

これはどういうことかと言いますと、高分子の構造を制御してつくれば、今までにないような新しい機能をつくり出すことができるということを示唆している結果であるということです。そういう意味で、我々の研究室の半分ぐらいは、こういう高分子の構造をいかに制御してつくって、おもしろい機能を出していくかということをやっていますので、後半でちょっと紹介させていただきたいと思います。

ちなみに、このハーバー・ボッシュ法の開発は、ハーバーさんはドイツ人なんですが、一番初めにドイツでなされました。フランクフルトのそばのヴィットリッヒシャーフェンというところに B S F という大きな化学会社の工場があります。Google マップでアップしていきますと、この後ろにライン川が流れていて、ここに広大な工場がありまして、その道を隔てたところに、B S F のレストランがあります。このレストランはドイツのレストランの中で白ワインのリストが一番充実しているそうですので、興味がある方がいれば、ぜひ行ってみられればいかと思います。

私もこの会社を最初に訪問したとき、ここで昼食をごちそうしてもらったのですが、その後、ここの中庭を歩いていると、何か電柱みたいなものが立っています。何でこんなところに電柱が立っているのかと言いますと、実はこれがハーバー・ボッシュ法を一番初めに検討したプラントの跡で、記念碑として残しているとのこと。これは Google マップからでも十分、これは本当にグーグルの写真から取ったのですけれども、ちゃんと見え

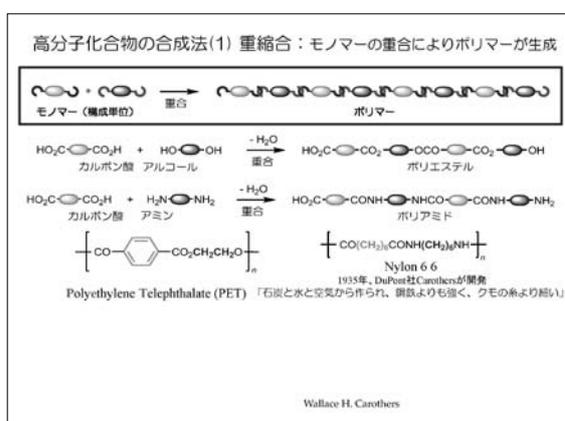
ます。これが記念すべきハーバー・ボッシュ法の第1号の反応塔ということになります。

なかなか観光では行けないところかもしれませんが、もし興味のある方がいれば、おいしいワインと、こういう記念すべき化学反応塔を見るのにはいいのではないかと思います。

さてようやく、ではどうやって高分子をつくるのか、ということをしつずつ紹介させていただきます。

基本的には、先ほど言いましたDNAでしたら、オリゴ核酸塩基、たんぱく質でしたらアミノ酸といったような構成要素をつなげていけば高分子になります。そういうものをモノマーと言います。そして、そのモノマーのつなげ方で、いろんな種類の重合法というものが開発されて、それによって違うものができて、当然違う性質が生まれてくるということになります。

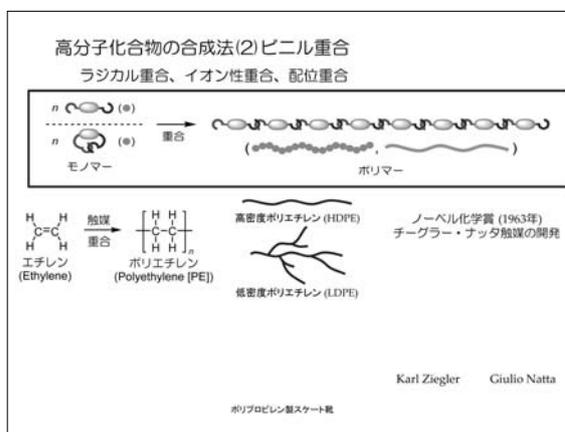
例えば、これはAとBというものの、この赤と青が選択的にくっつくような重合法を行いますと、重縮合というような方法になりますけども、ポリマーができます。例えば、カルボン酸とアルコールとを脱水しますと、いわゆるポリエステルというものができますし、同じくカルボン酸ですけども、こちらのアルコールの代わりにアミン、こういう窒素を持っているものを使ってあげますとポリアミンというものができます。



例えば、ポリエステルですと、恐らく一番ポピュラーなのはPET、ポリエチレンテレフタレートと呼ばれるいわゆるペットボトルと言っているPETだと思います。これはベンゼン環という亀の甲の形を含む高分子です。これを見ると化学のことを思い出して嫌だという方もいらっしゃるかと思いますけれども、非常にファッションナブルな分子ですので、そう嫌いにならないでください。

アミドの場合は例えばナイロン66といったようなものがありまして、これは1935年に初めてできた人工繊維で、アメリカ、デュポン社のカロザースがつくったもので、当時、「石炭と水と空気からつくられ、鉄鋼よりも強く、クモの糸よりも細い」というキャッチフレーズでこれで作ったストッキングが売り出され、セレブの女性がこれを買うために列をなしたということは有名な話です。

もう一つの違うタイプの重合としては、ビニル重合といわれている、これは同じものをつなげてポリマーにするといったような方法です。その一番シンプルな系はエチレンと



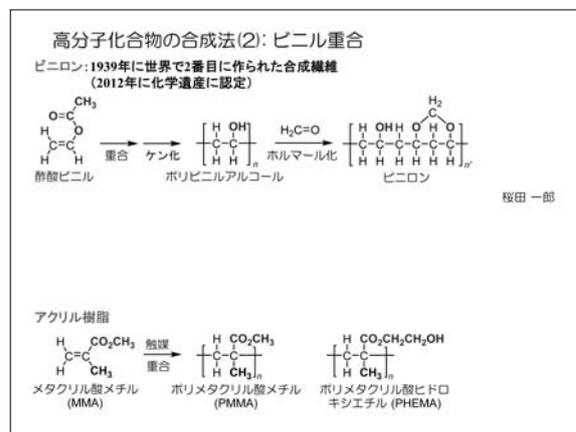
いわれる化合物ですけども、ここは、CとCの間にこう手が2本ある2重結合というものになりますけれども、これに触媒を加えることでポリエチレンというものができます。

有名なのは、このチーグラール・ナッタ触媒ということです。この触媒開発の契機は、ツィーグラールさんが実験していたときに、ある不純物が入っていて偶然見つかったというのがきっかけですが、この触媒を用いますと、ポリエチレンがうまくできるということを見つけて1963年にノーベル化学賞を受賞しています。

これは、例えば、ポリエチレンもつくり方によって、この分岐がない、いわゆる高密度ポリエチレンというものが、また、ある条件ではこのような分岐のある低密度ポリエチレンというものができます。チーグラール・ナッタ触媒を使いますと、こちらの高密度ポリエチレンができます。例えば、スーパーの袋は大体この高密度ポリエチレンが多いのではないかと思います。最近はスーパーでもらうと3円か5円払わなければいけません、それまでは当然ただでもらえると思って使っていたと思います。いつも思うのですが、あの薄さですごく重い物を保持できるということは、やはりすごいと思います。それは、この高密度ポリエチレンがそういう非常に丈夫な性質を持っているということになります。

ちなみに、このナッタさんというのは、エチレンに1個メチル基というものがついたものを、うまく重合するという触媒を見つけて同時にノーベル賞を受賞したのですが、それがポリプロピレンというもので、いろいろなものに応用されて、例えばスケート靴などにも使われているということです。

ビニル重合の代表的なものを二つほど紹介させていただきたいのですが、その一つがこのビニロンというものです。これは日本で開発された繊維で、先ほどのナイロン66に続いて世界で2番目につくられた合成繊維です。そういう意味から、2年前に日本化学会が化学の遺産であるということで化学遺産に認定しました。



この研究を率いたのは桜田一郎さんという京都大学の教授で、方法としては酢酸ビニルというものを重合してけん化というプロセスをやりますと、こういうポリビニルアルコールというものができまして、そこをホルムアルデヒドと反応を行うことでビニロンというものができます。実際この研究は私が現在所属している化学研究所が中心を担っており、これは当時の実験ノートとサンプルですが、これらと紡糸した機械が化学遺産として認定されました。これから長く我々の研究所で保管していくものです。

今はこのポリビニルアルコールやそれからつくるフィルムというのは、光学フィルムとしてテレビの液晶ディスプレイをつくるときに重要ですが、ここにオリジンがあります。

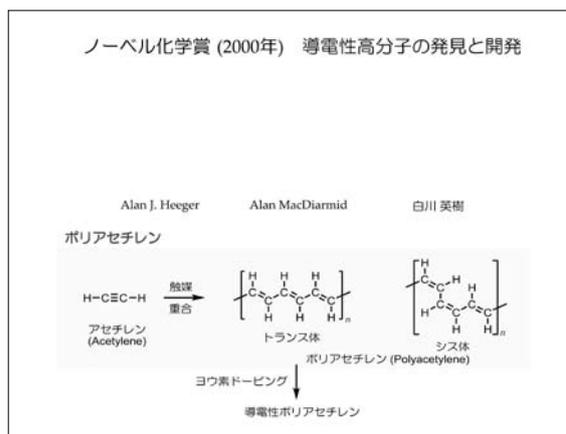
それで、もう一つ代表的なポリマーとしてはアクリル樹脂といわれるもので、これはポリメタクリル酸メチルというのですが、こういう構造を持っているものを一般にアクリルといいます。20～30年ぐらい前までは、眼鏡にはガラスのレンズを入れていたと思うのですが、今はガラスのレンズを入れている方はほとんどいらっしゃらないのではないかと思います。重いですもんね。ポリメタクリル酸メチルは軽いと共に非常に光学材料として優れているので、これに置き換わってきています。

また、これは昔のハードコンタクトレンズにも使われていましたが、ハードコンタクトレンズは、装着感が悪いという問題がありました。そこで、水酸基というものをつけると、これは水の分子構造と似ていますので、水に対する親和性が高くなります。

そうしますと、例えば、このポリメタクリル酸ヒドロキシエチルというのは、今度はソフトコンタクトレンズになり、そうすると装着感も上がって負荷が小さくなるということです。

現在は酸素透過性を増やすにはどうしたら良いのか、といった研究も進められており、どういう分子をつくるのかということをも合理的に予想してつくれる時代になってきています。

また、もう一つの代表的な高分子としては、ポリアセチレンというものを紹介します。これはアセチレンを先ほど紹介したチーグラー・ナッタ触媒で重合させますと、このようなポリマーができて、それに例えば、ヨウ素をドーピングすると導電性アセチレンができます。白川先生が初めてこれを合成して、その後ヒーガーやマクダミドがこの導電性を見つけたことから、この3名が2000年にノーベル賞を受賞されたのは、皆さんもよくご存じのことではないかと思います。



そのときにいろんな新聞に掲載されていたのでご存じの方も多いと思いますが、白川先生の研究室で実際に実験をした韓国の人が、あまりコミュニケーションがうまくいかなかったので、本来は触媒でいいはずなのに金属をたくさん使ってしまったので、ポリアセチレンが初めてできた、ということだそうです。

そういう意味で、若い人も失敗を恐れずいろいろ試してみるということが新しい発見につながるという一つのいい例だと思います。

もともと有機化合物というのは電気を通さないのが常識だったのですが、現在はこういう高分子が電気を通す、有機化合物が電気を通すということがわかって、有機太陽電池とか有機ELとか有機トランジスターとか、いろいろなものに有機物が利用されるようになっています。

そのようなものをつくる鍵反応が、これも2010年にノーベル賞を受賞したカップリング反応です。ここでは、ベンゼン環二つの間に結合を使って、いわゆるビフェニールというものをつくった反応を示していますけども、基本的にAとBと違うものを使って、A、Bというものを使えるということでありませ

す。ただ、時代を順番に追ってみますと、実は1972年にMとしてマグネシウム、この触媒としてニッケルを使って、京都大学の玉尾先生、熊田先生とフランスのモンペリエのコリユー先生が、この反応を一番初めに発表しており、玉尾・熊田・コリユー反応とすでに名前がついています。玉尾先生は、我々の研究所の3代か4代前の所長です。

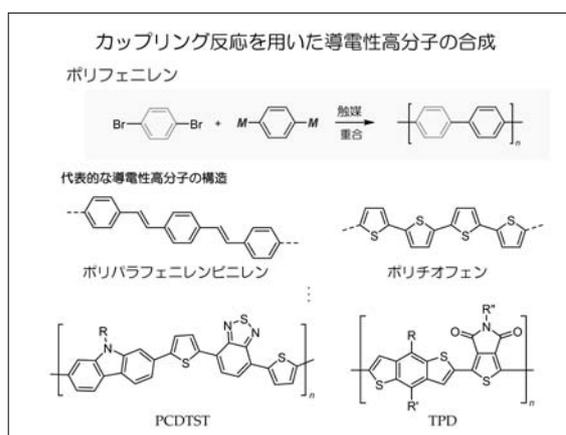
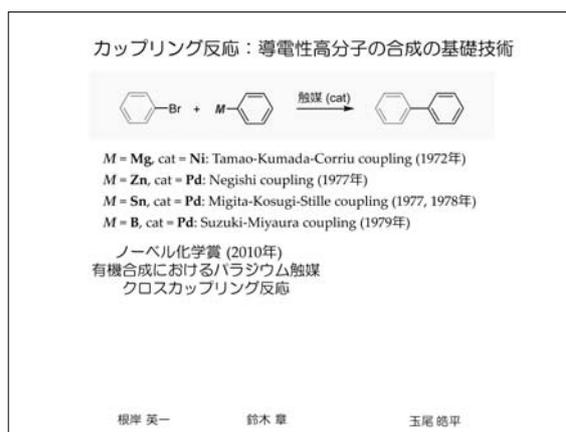
その後、根岸先生が亜鉛とパラジウム、その後、右田先生、小杉先生は群馬大の先生ですけども、それとアメリカのスティレ先生がスズとパラジウムの組み合わせで、そして1979年に鈴木先生と宮浦先生がホウ素とパラジウムを用いました。実際、この反応は非常に有効ですので、パラジウム触媒を用いたクロスカップリングリアクションの開発で、このお二方の貢献が認められました。なお、もう一人、ヘック先生が同時に賞をもらいましたが、それはちょっと反応が違うので、ここには載せておりません。

そういう意味では、京都人間としては非常にもったいないと思っています。

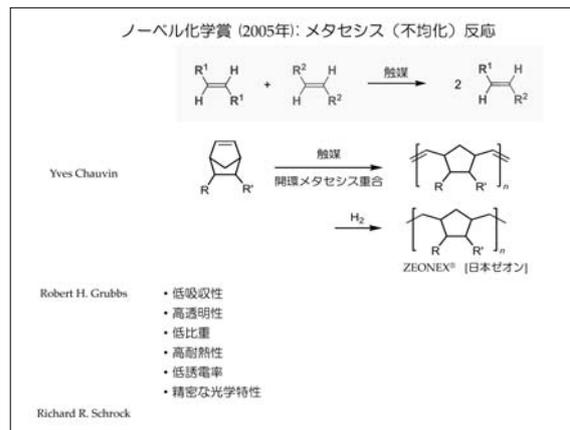
それで、その反応を用いますと、今言いましたように、例えば、先ほどは片方に臭素だったのですが、両方に臭素があるものを使って両方に金属を持つベンゼンを使いますと、いわゆるポリフェニレンといった高分子ができてきますし、この方法を応用すれば、こういうポリパラフェニレンビニレンとかポリチオフェンといったものができます。このあたりは、まだ構造は簡単なのですが、

最近は特に有機太陽電池用の導電性ポリマーとして、いろんな化合物が世界中で研究されておりまして、これは最近の論文から取ってきたものなのですが、見た感じ複雑そうに見えますけども、このような化合物が現在、世界中でみんなが競争して合成されている状況です。

また、これはメタシセスという別の重合法ですけども、いわゆる不均化反応を用いて、この3名の方、イブ・ショーヴァンさんが一番初めに会社で研究して、このグラブスさん



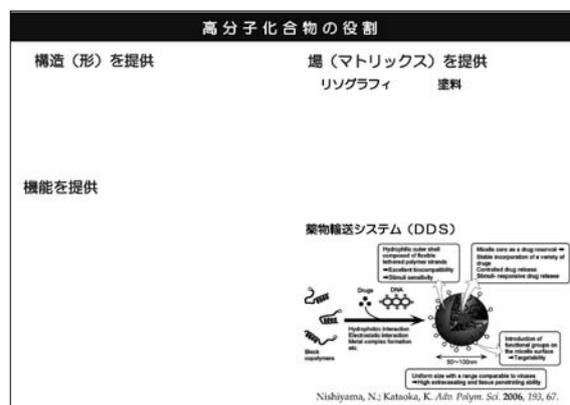
とシュロックさんは、それぞれカルテック、MITの現役の教授ですけれども、この反応に優れた触媒を見つけまして、それを用いると、いわゆる開環メタセシス重合といったものができます。重合の後、このオレフィンのところをいわゆる水素化という反応をしますと、非常にいい光学材料のプラスチックができますので、ある日本の会社はカメラ用のレンズになるような、非常にいい材料をつくっています。



大体今お話ししたことでわかりますように、高分子はいろいろなところに使われていますが、それを私の主観で三つの役割に分けてみました。一つは構造を提供する、形を提供する役割です。例えば、一番初めに言ったポリバケツ、タイヤ、これはちょっと何かわからないと思われませんが、これは人工血管です。

もう一つは場を提供する役割です。これは例えば、コンピューターのチップをつくる時に、ポリマーを塗って光で線を引いて、そこをエッチングして、とといったいわゆるリソグラフィというテクニックを用います。最後にポリマーは溶かして除いてしまいますので、残りませんので、いわゆる場を提供するということになります。

もう少し身近な例では、例えば、塗料でも、この色のついた顔料をポリマーで保護して、分散性をよくするといったようなことがあります。これは無機とか有機の顔料をポリマーが働く場を提供しているのですけれども、それがもっと小さくなりますと、現在、世界中で研究されております薬物輸送システム、いわゆるDDSといわれるようなものになります。この場合は、薬やDNAをポリマーで包



んで、ミセルと言ったりしますが、そういうものをつくって、例えば、病気のところにミセルを輸送して、そこで初めて働かせることで副作用の少ない薬の輸送ができる、ということが期待されています。

もう一つは、機能の提供ということです。例えば、吸水性のポリマーはおむつに使われていますし、先ほど言いました温かい服とか有機ELテレビとかコンタクトレンズとかいった類が、これに含まれます。

現在は高分子のターゲットも小さくなって、例えば、人工血管をもっと精密にしよう、コンタクトレンズをもっとユーザーフレンドリーなものにしよう、DDSでもっと正確に

薬物を輸送しようといったときに、では何が
必要かという、高分子の形をきちんと制御
して合成ということが重要であり、我々の研
究室ではそのことを一生懸命研究していま
す。

そのための重要な技術がリビング重合とい
うもので、それを用いると高分子の長さを揃
えることができます。一番初めに言いました

が、天然の高分子というのは大抵分子の大きさが決まっていますが、残念ながら、まだまだ我々の合成の技術では、その長さを揃えることができません。ですが、このリビング重合というものをを用いると、かなり制御できるようになります。そういうことをやると、ブロック共重合体といったものも合成が可能になってきます。

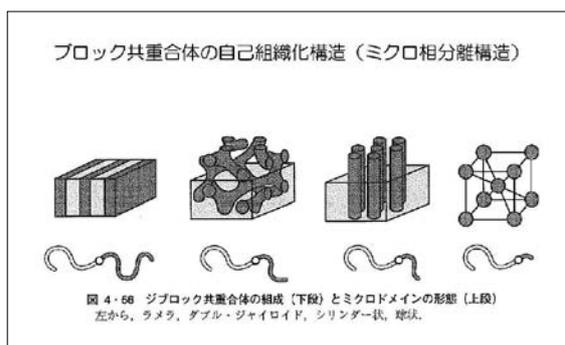
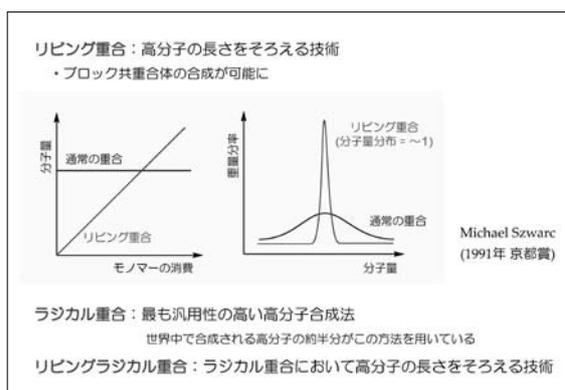
一番初めにリビング重合というものを発見した人がマイケル・シュワルツで、本当にノーベル賞に十分匹敵するような仕事をしました。残念ながらノーベル賞は受賞されませんが、1991年に京都賞を授与されております。

そのような方法を用いますと、モノマーが消費するのに比例して分子量を制御して大きくできますし、これは分散を示していますが、例えば、こちら側は分子量が大きい、こちらは小さいものを表しておりますが、普通の重合ですと分子量の小さいものから、すなわち分子の短いものから長いものまで、いろいろなものができます。しかし、リビング重合というものをを用いますと、本当に分布が少ない、1に近いものができるということになります。

このシュワルツさんは、アニオン重合という重合でリビング重合を発見して、この技術は現在ではタイヤの原料となる高分子の合成に幅広く使われています。しかし、汎用性は少ないというのが現状です。

現在、世界中で取り組まれていることは、ラジカル重合という最も汎用性の高い高分子合成法、どのくらい汎用性が高いかということ、世界中で合成される高分子の約半分がこの方法を用いてつくられているのですが、この方法でリビング重合を行う研究です。それがリビングラジカル重合という方法で、この20年ぐらいの間、世界中で非常に活発に研究されている分野で、我々もそういうことに
関与して研究を行っています。

このスライドは、ブロック共重合体という
ものをつくと非常におもしろいという例な
のですが、時間の都合により割愛させていた
だきます。ここで示した構造を用いると、例
えば、磁気記憶媒体の記憶容量を格段に向上



できたりするという事もできるということで、いろんな会社がこういう研究をしております。

新しい反応をやるときに、これだけ元素がありますので、これは全部我々の武器です。これをいかにうまく使うかが鍵となります。我々の研究室では、ここに示したテルルという元素が偶然うまく働くということを見つけて、これを使って今、重合を制御することを行っております。これが我々の研究室で開発したリビングラジカル重合というものを制御する分子で、有機テルル、オーガノテリリウムというTEとラジカルポリメリゼーションという名前をとってタープと呼んでいます。

それと、これは、我々の研究所でなく、共同研究している会社で行った反応をここに示していますが、テルル化合物を用い普通のモノマーとOHという水に似たような性質を持つモノマーとを一緒に重合した後に架橋反応をやりますと、この写真のような粘着材ができてきます。

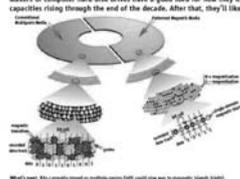
これは先ほど示しました分子の分布を示すグラフですが、従来法、すなわちリビング系ではないものでやりますと、分子量の大きいものから小さいものまでいろいろできるのですが、このテルルの方法を用いますと、分子量分布が1に近づいて狭い単峰性を持ったものができます。

この粘着材は現在では液晶パネルにおける光学フィルムの張り合わせのための粘着材として使われていまして、特に液晶パネルのサイズが大きくなりますと、どうしてもひずみがかかってうまく画面を表示することができないんですが、我々の技術でつくったものを用いますと、非常にきれいなものができます。非常に大きなスクリーンパネルには、この我々の技術が使われていると考えていただければと思います。

こういうものを使いますと、いろんな可能性があります。例えば、これは京大理学部の高森先生との共同研究の結果ですが、二つ反応点のある化合物と重合させますと、こういういわゆる多孔質の材料ができます。これを焼いて炭素以外のものをなくしてしまします

ブロック共重合体の応用的利用の可能性

記憶媒体の容量拡張
Is the Terabit Within Reach?
 DATA STORAGE
 Makers of computer hard disk drives have a good idea for how they'll keep disk capacities rising through the end of the decade. After that, they'll likely have to...



Service, R. F. Science 2006, 314, 1868.

ブロック共重合体リソグラフィー
 Block Copolymer Lithography: Periodic Arrays of $\sim 10^{11}$ Holes in 1 Square Centimeter
 Wei Park, Christopher Harrison, Paul M. Chalkin, Richard A. Register, Douglas H. Adamson
 Dense periodic arrays of holes and dots have been fabricated in a silicon nitride-coated silicon wafer. The holes are 20 nanometers across, 40 nanometers apart, and heterogeneously ordered with a periodic structure that has an average grain size of 92 by 10. Spin-coated block copolymer thin films with well-ordered...

Science 1997, 276, 1401.

ナノパターンニング
 Nano-Patterning for Patterned Media using Block-Copolymer
 Koji Aoshima*, Toshiki Mizuno*, Minoru Ikeda**, Masamichi Ishizaki**, Yoshiaki Kawano**, and Kenzoichi Kawai**
 (1) Coat (2) Generate Phase Separated Structure (3) Etch (4) Remove Polymer Film by Aiming



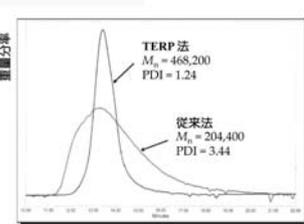
J. Photopolym. Sci. Technol. 2002, 15, 465.

元素周期表
 Periodic Table of the Elements
 (1) 元素周期表の活用と化学の発展



— 100% 100% 100% —

有機テルル化合物を用いるリビングラジカル重合 (TERP)

$$\begin{array}{c} \text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_3 \\ | \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{Te}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} + \begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{C}=\text{C} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \xrightarrow{\text{モノマーとの重合}} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CO}_2(\text{CH}_2)_6\text{H} \\ | \quad | \\ \text{C}=\text{C} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} + \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CO}_2(\text{CH}_2)_6\text{OH} \\ | \quad | \\ \text{C}=\text{C} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \xrightarrow{\text{架橋反応}} \text{粘着剤}$$



TERP法で合成した粘着剤

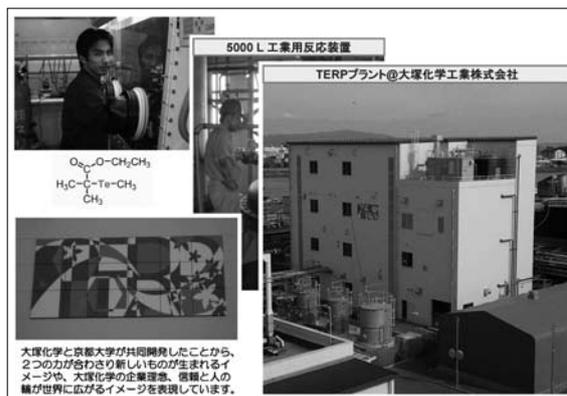
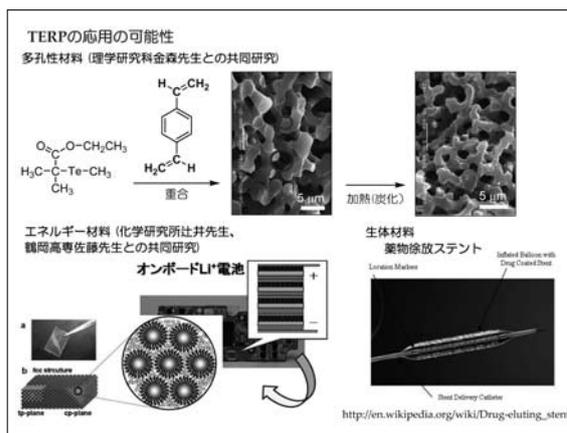
と、いわゆる炭素材料ができます。非常に被表面積の高い炭素材料が細孔のサイズを制御してできるということで、電池材料を始め、様々な材料への応用について共同研究者の方は検討されております。

これは、我々の研究所の辻井先生との共同研究です。実は、この絵自身は辻井先生の結果で、我々の結果は入っておりませんが、似たようなことをやっているということで、この絵を使わせていただいています。

例えば、辻井先生のグループでは、こういうシリカとといったようなものに先に高分子の長さをそろえてポリマーブラシというものをつくりますと、例えば全部固体で電池ができることを発見しています。リチウム電池は、よく液漏れで燃えたりする事故が起き、大きな問題となっていますが、これですと、もう液体成分が無い、固体だけのリチウムバッテリーができる可能性を開いています。さらに、心臓発作の治療などでよく使われるステントの表面にポリマーを塗って、その上にさらに薬物を塗りますと、徐々に薬が徐放されるために非常に術後の成績が良くなる、との結果も出てきています。実際、この写真はアメリカのグループのホームページから取ってきたものですが、我々の方法を用いても、よりよくできるのではないかと考えています。

実際にどうやって実験しているのか、という例を最後に紹介します。我々のところではグローボックスとあって、この中はほとんど酸素と水のない箱のような実験装置を使っています。この写真は初めのテルルの化合物をつかって実験した飯田君という学生さん、15年ぐらい前の学生さんですが、当時は1ミリリットルぐらい、本当に試験管ぐらいの規模で反応をやっていました。しかし、産学共同研究を続けますと、今度は人より大きいような反応容器で、同じ重合ができるようになります。共同研究をやっています大塚化学さんにおかれましては、現在、プラントを建設中であり、これはまだ来月完成なので、完成間近というところですが、こういうところで我々の技術を使って役に立つポリマーをいっぱいつくろうとしているところです。

ちなみに、ここに絵が描いてありまして、大塚の方の説明ですと、大塚化学と京都大学が共同開発したことから二つの力が混ざり合い、新しいものが生まれるイメージや大塚化学さんの企業理念、信頼と人の輪が世界に広がるイメージを表現しています、と説明していただいています。が、これもやはり現代美術の領域に入るのかなという感じで、ちょっ



と私にはよくわかりません。

最後に、若い方にメッセージを一つお贈りしたいと思います。やはりアインシュタインの言葉ですが、彼が“Anyone who has never made a mistake has never tried anything new”と言っています。ぜひ、どんどん失敗して、それを糧にどんどん新しいものにチャレンジして、新しいものを生み出していただければと思っております。

皆さん、ご清聴ありがとうございました。

**Anyone who has never made a
mistake has never tried anything new**

ALBERT EINSTEIN
German THEORETICAL PHYSICIST