

特別寄稿：シリーズ 先端科学技術爽やか対談 (12)

触 媒 を 語 る

高知工科大学教授
元三井化学株式会社New Polymers開発室長
島根県産業技術センター所長，大阪大学名誉教授

杉本 隆一
吉野 勝美

(平成 28 年 2 月 8 日)

(吉野) 杉本さん，高知から二つの山脈と瀬戸内海を越えて遠い所まで来て頂きました。汽車ですか，車か飛行機ですか。汽車と云うのは今では一寸と変ですね。電車ですね。

(杉本) いえ，それが高知ではJRはディーゼル機関車しか走っていませんので今でも汽車と云うんですよ。電車と云うのは路面電車の「とさでん交通」です。電車の行先表示が「ごめん」になっているのでご存知かもしれませんが，今日は高知から岡山に出て，岡山から特急「やくも」で来ましたので，汽車と電車と云うことになります。特急「やくも」は噂の通りよく揺れますね。振り子電車なんでしょうね。何度か岡山からの新幹線に乗った時先生に会いましたが，あの時はいつも松江からあの揺れる「やくも」に乗って岡山まで来られていたんですね。私は高知から岡山まで出るのにやはり振り子電車に乗りますが，ディーゼルカーのせいか，あの「やくも」ほどには揺れませんね。

(吉野) 二人とも似たパターンで移動してるんですね。私は阪大定年後ずっと月曜日に岸和田を出て，松江までJRを乗り継いで来て，土曜日に帰りますが，杉本さんもなんですね。

(杉本) 私も三井化学から高知工科大に移って以来，先生の近くの大阪堺から月にJRで高知に行って，やはり金か土に堺の浜寺公園へ帰るパターンです。たまに車で行き来します。

私，岡山から大阪までの新幹線の中で先生とお話すると随分いろいろな刺激を受けて有難いんです。ハット気が付くこと，ヒントがいっぱいあるんです。

(吉野) そう云って頂けると非常に嬉しいですが，私の方も杉本さんと話していると色々新しい知見が入るし，面白いことに気が付くんです。

(杉本) この前新幹線でご一緒して，“近々松江に行ってもよろしいですか”，と伺いました時，快諾頂きましたので，お言葉に甘えて今日来ました。今日は学生さんも一人一緒です。この学生さん，高木さんには先生の所で学ばせて頂きました導電性高分子，先生の発見に端を発しています有機太陽電池を視野に導電性高分子ポリチオフェンとC₆₀を組み合わせた導電性高分子を作って研究を始めてもらっ

ております。

(高木) 是非，私も島根に行きたいと云って付いてきました。いつもお話を聞いている先生にお会いできて光栄です。

(吉野) よくいらっしやいました。嬉しいですね。杉本さんは触媒の専門家と云うより，大家ですから，それに私の専門と全く違うことが凄くいい形になって非常に面白い仕事が可能になり，色々良い実を結んできました。これからももう一仕事一緒にやりたいですね。私，随分高齢になりましたが，そう思ってます。いつも云うんです，人間が出会った時，組合せが良くて，条件が良くて，きっかけがあると凄いことが起こることがあると，何か触媒のような作用をするんですね。

(杉本) 吉野先生は確かに色々な方と出会われる度に面白い着想が生まれて，素晴らしい成果が出ますから，先生が触媒そのものかもしれませんね。

(吉野) それはまた身に余る光栄です。私なんかそんなものではありません。導電性子高分子の研究も応用も，杉本さんが阪大の私の所に来られて一年余り居られた頃から比べると随分多様化したみたいですね。私自身は最近の状況に疎いところがあるので，この機会に色々教えてもらえ



杉本隆一教授(右)と吉野勝美所長(左)
—島根県産業技術センター所長室にて—

たら有難いと思っています。

(杉本) 私も高知工科大に移って改めて触媒に視点を置いて導電性高分子の研究も行っていましたが、面白い展開になりつつあると思っています。導電性高分子の研究は32年前に先生とご一緒にポリチオフェンを酸化触媒で簡単に重合できることが分かってから色々研究が進みました。5年前に高知工科大に移って、20年ぶりに導電性高分子の研究をもう一度やってみようと思ったのです。応用研究が広がって今さらと思ったのですが、その時ポリチオフェンの実用化が未だに広がらないのは、その製造コストが非常に高いことが大きな理由の一つではないかと思いました。それで触媒の観点から見直してみたところ、この30年間、ほとんど重合反応機構に目を向けた研究がなされていないことが分かり、安価に作る方法を考えることも必要ではないかと思い、基本的な重合速度や活性化エネルギーを測定する実験を行っています。塩化鉄を用いた酸化重合反応では磁性を示す塩化鉄が溶媒に溶解せず、固体微粒子のまま分散していて、さらに重合が進むとポリチオフェンが塩化鉄表面を覆う様にして析出するため、NMRなどの均一系では普通使える分析手段が使えないため反応機構の解明は未だになされていない状態です。最近では九州大学の平井智康先生らとの共同研究で、固体表面の原子状態が分かる放射光X線吸収分光を利用して重合反応機構の解明も進めています。

(吉野) そうですか、是非話を聞きたいですね。偶然なのですが、この間、私が定年まで関わっていた仕事に関係する資料や試料が段ボール箱から沢山出てきて、処分したり改めて読んで懐かしく思ったり、楽しんだり、何かがもつとできそうに思ったりしています。杉本さんが三井東圧化学(株)から一年余り私の所に来ておられる頃、(株)リコーから大澤利幸さん、花王(株)から佐藤正春さん、ホシデン(株)から滋野安広さんをはじめ多くの方が来られていて、楽しい日々を過ごしましたね。

(杉本) そうですね。楽しかった思い出が強く残っています。

(吉野) その頃本当に沢山の方々が企業から来て頂いて随分研究がうまく進みました。外国からの方、色々な大学から国内留学で来られた方も多かったですね。

(杉本) 尹文殊さん、金相賢さん、具轄本さん、朴大熙さんシュミットさんは覚えています。

(吉野) 本当にいい頃でしたが、実は、資料の中に私が花王に行った時の資料がありました。杉本さんが東京工業大学の博士課程で指導を受けられた触媒の先生、辻二郎先生に花王でお会いした時の資料がありました。当時、花王の丸田芳郎会長、常盤文克社長などが「姿なき研究所構想」を云い出され、花王で優秀な若い方7、8人を毎年選抜して、日本と欧米の大学などの色々な研究分野の第一線の先生の所に研究に行かせるとうことをなされていたんで

す。そのことから佐藤さんが私の所に来られたんです。それで受け入れた先生とそこに行っている若手研究者が一年に一回花王に集まり、講演会、発表会、会議を行うんです。その時のレポートや写真があり、中に辻二郎先生の名前が載っていたんです。辻先生の所に派遣されていた研究者のテーマはカルボキシル基還元触媒となっていました。

その時知ったんですが、私以外の受け入れをなされた先生はそれぞれの分野で世界的な大変な先生だったんですね。私だけ風変わりとうことで選ばれただけのことと思います。当時、有機物質を活用してエレクトロニクスを展開する、今で云う有機エレクトロニクス研究の先駆けのようなことを提案していたのは私しかいなかったからかも知れません。辻先生は触媒でノーベル賞の可能性も高かった大変なバイオニアだったんですね。そこで指導を受けられた杉本さんが素晴らしいわけですね。

その時は何気なく話を聞いていたんですが、東京大学の別府輝彦先生、駒形和男先生は微生物の日本の代表となる方、やはり東大の大沢利昭先生は免疫学で有名な先生、MITの不整合成で有名な正宗悟先生、若くして亡くなられ残念でしたがゲルの理論などで大変な業績を上げられた田中豊一先生など素晴らしい先生方で、これらの先生にお会いできたことは私にとって非常に有難いことだったと今も思っています。特別講演で呼ばれる先生がまた素晴らしい方で数学の広中平祐先生、私と専門が少し重なる分子研究所を立ち上げられ、その後文化勲章をお受けになられた井口洋夫先生のお話もお聞きしました。井口先生にはその後、それ以前からもでしたが個人的にも色々かわいがってもらいました。

辻先生、触媒研究のバイオニアで炭素-炭素の結合、クロスカップリングをパラジウム金属を使って世界で最初になされたと聞いていますし、お仕事之余に早かったんではと云う方もありましたが、先生ご自身は私がお会いした印象では非常に温和で優しい先生だなど云う印象を持っています。具体的にはどう云うお仕事をなされたんですか。

(杉本) 辻先生は凄い先生なんです。先生は京都大学を卒業後、アメリカのコロンビア大学に留学して博士号を取得して、東レ基礎研究所に行かれて世界で最初にパラジウム化合物を用いる炭素-炭素結合生成反応を発見すると云う素晴らしいお仕事をなされ、その後東京工業大学に来られました。ご専門は遷移金属触媒を用いた合成反応でカルボニル挿入を伴うクロスカップリングや、辻-トレスト反応と云う人名反応で知られている π -アリルパラジウム中間体を介する触媒的アリル位置換反応を開発しておられます。

10年ほど前に「パラジウム触媒を活用する新有機合成反応の研究」で日本学士院賞を受賞されています。今ではパラジウム触媒を用いた有機合成反応の先駆者としてパ

ラジウム化学の父と云われています。ノーベル化学賞候補に何回も上がっておられ、2010年のパラジウム触媒を用いたカップリング反応の開発で受賞されると思ったのですが残念です。

有名な辻トロスト反応はもともと1965年に辻先生が報告しているのですが、その8年後に、この同じ反応でトロストらが不斉反応を行ったので二人の名前を冠して呼ばれている反応です。その反応の要点は図1の様に書くことができるんですよ。

もう少し詳しく云いますと、辻トロスト反応は図2のようにパラジウム錯体にアリル化合物が付加して、生成した π -アリル錯体のアリル炭素に対し求核剤が付加し、それと同時に脱離が起こって生成物が得られます。パラジウムは元に戻って再び触媒となります。

吉野先生と一緒に研究させて頂いたポリチオフェン誘導体も、初めに“チオフェン環の炭素についている水素を長い炭化水素に置き換えた分子を作れないか”と先生に聞かれて、このパラジウム触媒を用いたカップリング反応がすぐ頭に浮かび、簡単にできるグリニャール試薬を用いる熊田・玉尾カップリング反応でチオフェンに色々なアルキル基を付けていったんです。

辻先生は大変早い時代に凄いい仕事をなされましたが、皆さんから本当に評価を頂いて表に目立つには早すぎたんですね。後からこんなことを先駆者としてやられていたんだ、と皆さんが知ることになるんですが、その後何代かの研究者に亘って次々と触媒研究が進み、やがて実用上有効になり多くの企業で使われるようになって、日の目を見

て高い評価となり檜舞台に上がられると云うことになることが多いと思います。パラジウム触媒を用いたカップリング反応の開発でノーベル賞を貰われた鈴木先生、根岸先生のお仕事なども遡れば辻先生の触媒研究に繋がると思っています。先ほどのポリチオフェンのお仕事でもそうですが吉野先生の分野でも、吉野先生の仕事は余りに早すぎた、と云う方が多いです。

(吉野) そうですね、やはり辻先生は素晴らしい先生ですね。私、共役系の発達した有機分子や導電性高分子などの研究、その応用研究を1970年前後からやっていましたが、世の中でそのような仕事をやっている人は余り無かったので、分子や高分子を我々自身が作らなければならないとどうにもならないと云う状況でした。我々本当に素人でしたから、最初は教科書を読んで、参考にして作ったり、直感でこうすればできるんじゃないかと考えてやりました。勿論、危ないかどうかは色々考えて避けてきたので事故は全く有りませんでした。その間多くの方に学びもしました。

導電性高分子の研究の最初の頃、超導性を調べる目的もあってポリチアジル(SN)_xの合成も行いました。これは合成の過程が危険だと云う噂も立っていました。実は私がヨーロッパに滞在していた頃にドイツのシュトゥットガルトの大学を訪れた際ドラフトの中に黄色い粉が落ちていたのを見て、“これは何ですか”、と尋ねると、“ポリチアジルを作っている”、と話してくれましたが、その瞬間、そうかこの程度の僅かの量であれば安全で心配ないな、と思いました。丁度一年余りの滞在が終わって帰国した直後、アメリカからマクダイアミド教授が日本に来られて、元々は京大にご用事があったんですが、大阪にもその後東京にも行かれて、その時のお話も参考になりました。(SN)_xポリチアジル単結晶の作成を日本で初めて成功したと云う訳です。この時、当時助手をやってくれていた金藤敬一君に随分頑張ってもらいました。これは当時、私の上司であった犬石嘉雄教授には一切お話しせずにアンダーテーブルでやっていたのですが、面白い結果となったので、初めて教授に話して許可をもらって三名連名で東大物性研究所であった研究会に出して発表したんです。その後、教授から云われました。“吉野君、(SN)_xと云うのは危険らしいじゃないの、応用化学の三川礼教授から云われたよ、先生の所で凄いい仕事されましたね、私たちもやりたかったですが怖くて手が出ませんでした”と。それで答えました、“大丈夫です、安全な範囲の量でしかやっていませんし、学生さんにはやらせていませんから”。(SN)_xの時は触媒としてAg銀ウールを使ってやりました。

実はこの(SN)_xの関係で国内の色々な会合に出たことがあるんです。確か窒素Nを含む材料関係の会議があってそれに出て講演したんですが、その時にも辻二郎先生とご一緒した記憶があります。

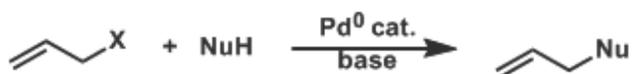


図1 辻トロスト反応の要点

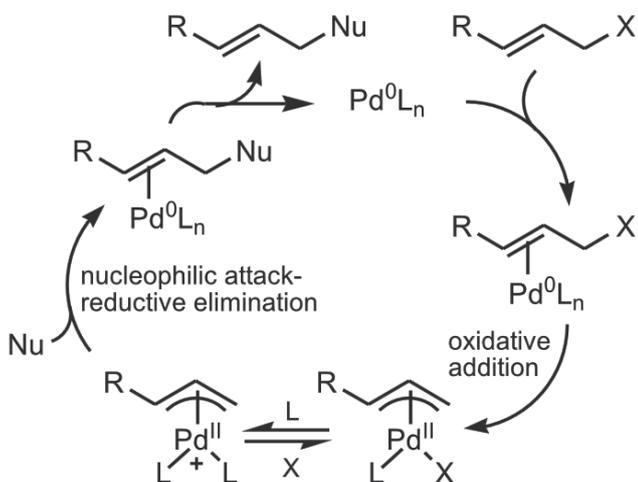


図2 辻トロスト反応の詳細

導電性高分子で一番有名なものの一つであるポリアセチレンの重合もその後ノーベル賞を貰われた白川英樹先生に教わってやりました。今考えるとまあ不十分な道具で、実験環境で、事故も無く危険な触媒を使ってやったものだと今になって我ながら感心します。基本的にはポリアセチレンの重合はチーグラール・ナッタ触媒でしたから遷移金属化合物とI, II, またはIII族の金属を含む有機金属化合物との錯体ですが、テトラブトキシチタニウム $[\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4]$ とトリエチルアルミニウム $[\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3]$ の錯体系の触媒を用いました。

(杉本) その頃吉野先生はポリアセチレンより安定で実用的な導電性高分子の研究もやられていましたね。それに応用の提案も次々発表されていました。それで三井東圧も先生とコンタクトをとらせて貰ったと云うわけなんです。その時から先生の研究室で導電性高分子(図3)の研究をさせて頂くようになったのですが、初めて先生の実験室に同わせて頂いた時、本当に驚いたことがあります。

ポリアセチレンの重合に用いる触媒ではアルキルアルミニウムを助触媒に用いるのですが、アルキルアルミニウムは通常、特別な取り扱い方法に熟練した方が、安全な方法で取り扱わないと、一旦燃え出したら消すことができません。水を掛けようものなら爆発的に反応する大変危険な化合物です。今ではそのような危ない物質を扱うような大学は数えるほどですが、当時でも、しかも化学系ではない研究室でアルキルアルミを用いてポリアセチレンの重合

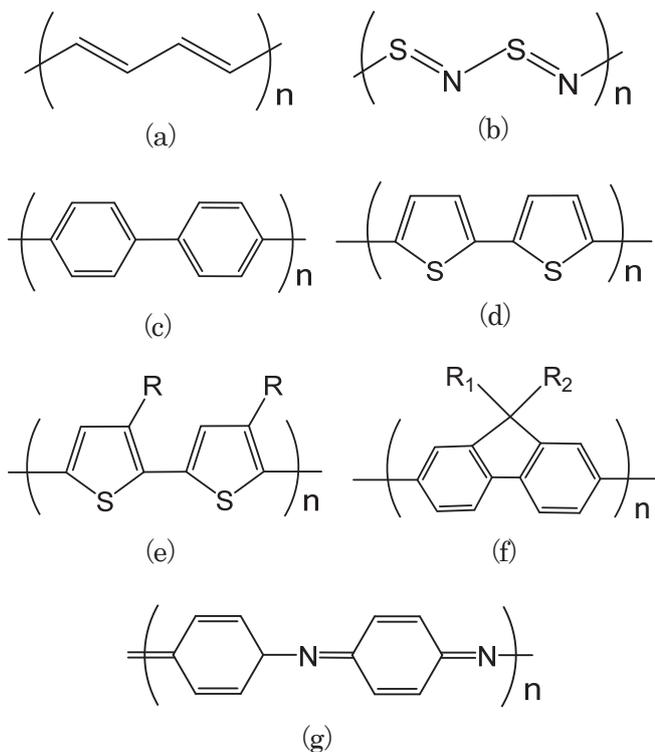
を行っているのを知って大変驚きました。その後も先生には色々なことで驚かされてばかりでしたが、しばらくしてから慣れましたが。

(吉野) その頃私はポリチオフェンをやっていましたが、最初は電気化学的重合、電解重合でした。電解重合のポリチオフェンは溶媒にも溶けず、加熱しても溶融しませんので、何とか加工性を上げるため、可溶性、溶解性のあるものを作りたいと思っていました。

その時フツと気が付いたんですね。“そうか、ポリチオフェンの共役系を作っている炭素は、自分が長い共役系の一員と考えて融ける筈がないと思っているから融けないのかもしれない、もしこのチオフェン環の炭素に長いパラフィンのような側鎖を付ければ、自分はパラフィンの一部だと思って融けるかもしれない、パラフィンは低温で融けるから”と、変なことを考えたんですね。それでチオフェン環の炭素についている水素を長い炭化水素に置き換えた分子を作ってこれを重合すれば融ける導電性高分子ができるかもしれないと思ったわけなんです。

丁度その頃杉本さんが私の所に来てくれたと云うわけです。チオフェンにパラフィン類を付けるのはグリニャール反応で比較的簡単にできますが、その後の重合をどうするかです。電解重合でも勿論できるが架橋反応も進んでよくないかもしれない、触媒でできないか、と思ったんです。それで杉本さんに、“できるだけ簡単にこれを重合させる方法はないですか”と。そうしたら杉本さんが、“塩化鉄 FeCl_3 でできると思いますよ。やりましょうか”、と云うことになって一緒に始めることになったと云う次第でした。その後この延長上で面白い仕事一杯できることになった訳です。溶解性、溶解性はもちろん、温度による色変化サーモクロミズム、溶媒雰囲気による色変化ソルバトクロミズム、ゲル特性、ゲルクロミズム等本当に面白かったですね。応用の視点から云っても大事でした。

(杉本) そうですね。導電性高分子の研究は32年前に先生とご一緒にポリチオフェンを酸化触媒で簡単に重合できることが分かって、しかも私がそれまで三井化学でたまたまポリオレフィンの開発を行っていたのですが、先生が“ポリチオフェンの側鎖にポリオレフィンのようにパラフィンを付けたら、融ける導電性高分子ができるかもしれない”と云われたことがきっかけで、チオフェンの3位に炭素が一つのメチル基から炭素が22個のドコシル基がついたドコシルチオフェンまですべて合成して順番に重合していったのですが、こんなに長いものをつける必要が無かったんですね。4個か5個でポリチオフェンがクロロホルムに溶けましたし、加熱すると溶融しましたね。特に炭素が6個付いたポリ3ヘキシルチオフェンはいろいろな溶媒に溶けて融点も汎用ポリマー並みでしたので、その後色々な応用研究が進みました。先生が御提案者でもある太陽電池として注目される導電性高分子と C_{60} の複合体も



(a) ポリアセチレン, (b) ポリチアズル, (c) ポリパラフェニレン, (d) ポリチオフェン, (e) ポリ(3-アルキルチオフェン), (f) ポリ(9,9-ジアルキルフルオレン), (g) ポリアニリン

図3 導電性高分子の例

この可溶性が有効に生かされて可能となったんですね。それで三井化学に戻ってから実用化の検討を進めました。しかし、10年以上頑張りましたが結局製品化までできずに断念してしまいました。ほとんど先生のアイディアに負うところが大きかったのですが、今から思うと10年いや20年早過ぎましたね。

(吉野) それから出光興産(株)から福田雅彦さんが来られました。福田さんは東北大学の非水溶液化学研究所の幡野昌弘教授のところで博士号を取って入社すぐこちらに来られたので、私、尋ねたんです。“福田さん、幡野先生の所でどんなことに関わっていましたの”、“フルオレンです、円偏光二色性です”、“そうですか、一寸分子式を書いて頂きます”。それは私も知っているフルオレンでシンチレーター用色素としても知られているものでした。それで云いました、“福田さん、この場所にアルキル基が入られますか”、“入られます”、と云う経過を経て、そのアルキルフルオレンを FeCl_3 を触媒に使うて重合してポリ(9-アルキルフルオレン)を作ったんです。それが有機EL材料、特に青色発光材料として非常に有名になりました。面白いもので幡野先生とは私面識が元々ありましたし、幡野先生が東京工大でポリアセチレンの研究を始められ、白川先生がそれを引き継がれたんです。その後、この FeCl_3 の系統の触媒とその利用は大きく変化しているんですか。

(杉本) そうなんです。その後大きな進展が見られました。私、当時は反応させて物を作ると云うことで手いっぱいでしたので、メカニズムのことを余り詳細に詰めなかったんです。高知に移ってから余裕ができましたので、色々調べたんですが、面白いことが沢山分かったんですね。ポリチオフェンの重合に用いられる塩化鉄は、触媒ではなく実は酸化剤として働いています。酸化剤を用いると芳香族化合物から水素を引き抜くことによって芳香族化合物同士が結合するので、チオフェンも芳香族化合物ですから重合ができたと云うわけです。ただし、3位に置換基を持ったチオフェンから水素を引き抜こうとすると酸化ポテンシャルが非常に高いため、普通の酸化剤では反応が起きません。それで酸化力の大きな塩化鉄を用いたのです。今でも3アルキルチオフェンをこの方法で簡単に重合できるのは塩化鉄くらいしか報告されていません。

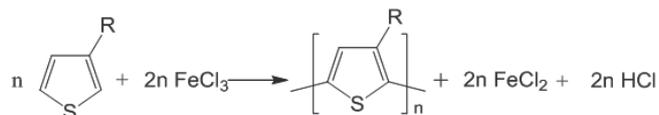
この反応では塩化鉄が酸化剤ですからチオフェン1分子に対して最低でも塩化鉄が2分子必要になります。

鉄の化合物を用いる反応はグリーンケミストリーの面からも好ましいのですが、原料の2倍使うのは好ましい反応ではありません。少ない塩化鉄で触媒として使えるようにする必要がありますが、酸化剤として働いた塩化鉄は3価の3塩化鉄から2価の2塩化鉄に還元されてしまうので2塩化鉄には酸化作用がなくなってしまいます。

無置換のチオフェンであれば酸化ポテンシャルが低いので塩化鉄以外の酸化剤でも重合できるので、その場合には酸化剤による触媒重合は非常に簡単ですが3アルキルチオフェンの重合に塩化鉄を触媒として働かせるのは非常に難しいのです。それが最近、3アルキルチオフェンを塩化鉄で重合した時の重合中の塩化鉄の価数の変化を放射光X線吸収分光で解析をすることができたのですが、クロロホルム中で重合すると2塩化鉄が3塩化鉄に戻っていることが分かったんです。これは表面だけの反応ですが全体的に2塩化鉄を3塩化鉄に戻すことができれば、触媒反応になることができると考えました。

現在は研究室の博士課程の学生がこの反応の研究を進めていますが、2塩化鉄を3塩化鉄に戻すことができる酸化剤を用いることで、既に少しの触媒量の塩化鉄で重合が進行することを確認して論文を書いているところです。

FeCl_3 による3ヘキシルチオフェンの重合反応は次の式のように起こります



FeCl_3 を酸化剤に用いるチオフェンの重合機構は図4のように①ラジカル重合、②カチオン重合そして③ラジカルカチオン重合の3つの重合機構が提案されているのですが、実はいまだに明らかになっていません。最近の私たちの研究結果からは従来提案されている、これらの重合機構とは異なる機構ではないかと考えています。

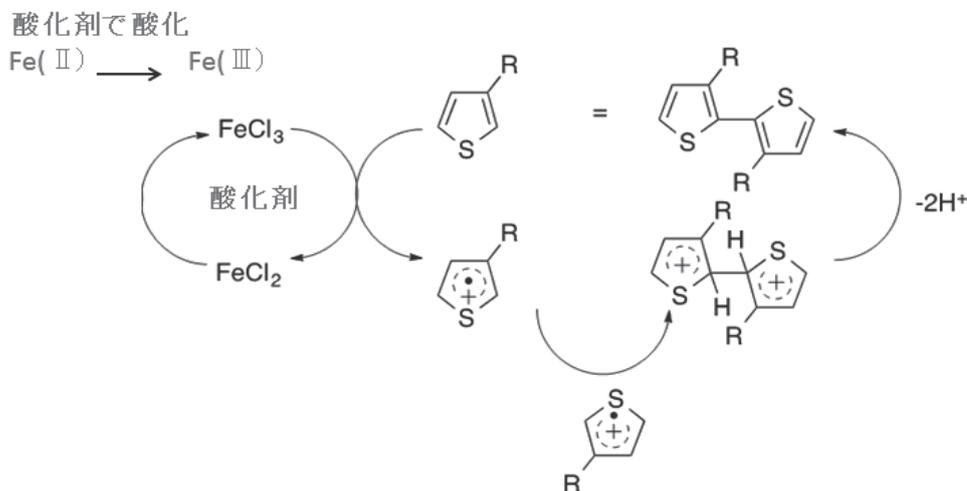


図4 FeCl_3 による重合機構と触媒機能の説明

(吉野) メカニズムなんか分かってくるとさらに色んなものを作ることが可能になってくるのではないですか。

(杉本) そうなんです。随分色々なものが、比較的簡単に、反応の段階数も少なく作れるようになってきているんですよ。高知工科大に移った当初は FeCl_3 を用いたポリチオフェンの重合機構を色々調べていましたが、重合速度に及ぼす溶媒効果の実験を行っていた時に、芳香族系溶媒を使うとポリチオフェン主鎖の中に芳香族分子が入っていたんですね。ベンゼンなどが FeCl_3 で重合することは分かっていたのですが、それは高温条件で重合すると云う報告で、室温以下ではほとんど重合しません。ところが 0°C でチオフェンを重合するとベンゼンもポリマー中に入っていたのです。

それで先生が行われたアルキルフルオレンを FeCl_3 を触媒に使って重合してポリ(9-アルキルフルオレン)を合成していたことを思い出して、チオフェンとフルオレンの共重合を行ってみると当たり前ですが共重合体が得られました。特に高分子の特徴は機能性を持たせるために官能基をモノマーに持たせて重合するのですが、モノマーに官能基を付けることは、そう簡単ではありません。そこで塩化鉄を使ってチオフェンと芳香族化合物を共重合できるのであれば、すでに機能が分かっているものや、変わった性質を持った芳香族化合物が簡単に手に入りますので、あとは両者を混ぜて重合すればポリチオフェン主鎖の中に直接必要な官能基を入れることができるわけです。それで色々な芳香族系化合物をチオフェンと共重合してみたところ、単独では重合が難しい化合物でもチオフェンと簡単に共重合してポリマーが得られることがわかりました。

例えば、今こんなもの(図5)を作れるようになっていきます。この方法はいろいろな共重合体が簡単に合成できる非常に便利な反応なのですが、文献を調べても、不思議なことに殆どこの方法での共重合反応が検討されていませんでした。考えてみると当たり前な方法なので、この結

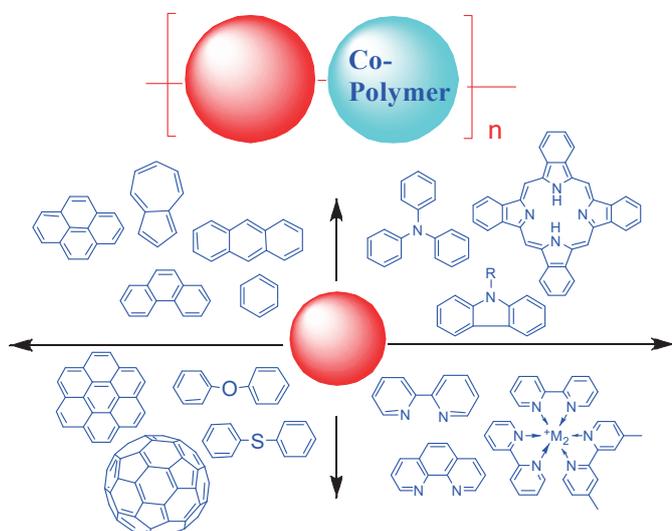


図5 FeCl_3 触媒で作った導電性高分子の例

果を論文にしようとするすると査読者レビューから必ず、3塩化鉄の重合は時代遅れで共重合反応も当たり前と言う理由で拒絶されるので参っています。実際には3アルキルチオフェンと他の芳香族化合物を酸化反応で重合している報告は殆ど無く、合成した共重合体の性質も特徴が有ることを良く説明すれば分かってくれるのですが、時代遅れだからこそ誰もやっていなかったと云うことなんです。

この重合反応ではチオフェンを必ずしも用いる必要が無いことも分かり、最近では2種類以上の芳香族系化合物を用いて新しい性質を示す共重合体の合成も行っています。(吉野) 触媒によって反応速度を上げることは分かりますが、そもそもなぜ反応速度は上がるんでしょう。反応のポテンシャルの山を触媒が低めるのでしょうか。それから触媒反応は選択的に進めることができるのでしょうか、と云うのは触媒反応の結果できるものの構造を選択して実現することができるのでしょうか。すなわち分子構造の制御、分子配向の制御など色々できるものなのでしょうか。また、触媒反応を液体中で進めることが多いかもしれませんが、液晶の場合など異方性の中で進めることができるのでしょうか。

(杉本) 触媒の教科書だけではなく、最近では高校の化学の教科書にも触媒による活性化エネルギーの低下と云うことで図6のような絵が描かれているのですが、おそらく高校生には触媒の役割はあまり理解できないと思います。触媒の役割は確かに活性化エネルギーを下げるのですが、実際には反応のメカニズムを変えていることが多いのです。例えば誤解を恐れずに云うと富士山を越えて北側の御殿場から南側の三島まで行くのは非常に大変ですが、御殿場から三島まで行くと云うことが目的であれば、何も大変な思いをして富士山を登る必要はなくて、電車に乗って迂回して行けば楽です。バスで行く方法もあります。

身近な化学反応例で説明すると水素ガスに火を着けると爆発的に燃焼しますよね。水素の燃焼を化学式で書くと、 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ となる反応ですが、この反応はラジカル反応と言って非常に複雑な反応が起

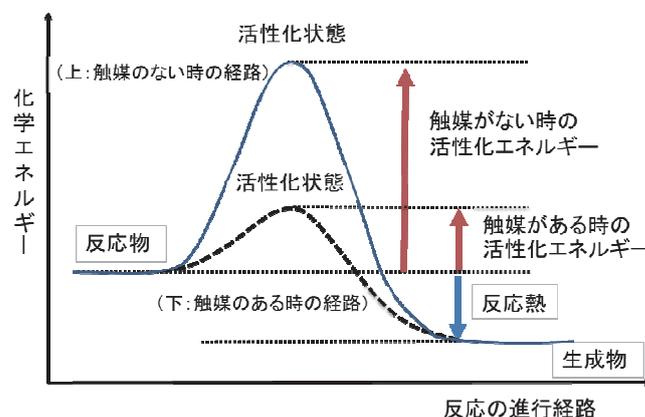


図6 触媒反応を説明するエネルギーダイアグラム

- 「 $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HOO}\cdot + \text{H}\cdot$ 」
(「 \cdot 」はラジカルの不対電子を表す)
- 「 $\text{H}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{O}\cdot$ 」
- 「 $\text{O}\cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}\cdot$ 」
- 「 $\text{OH}\cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}\cdot$ 」

図7 水素と酸素のラジカル反応

こっています。例えば図7の様な反応が考えられています。

一方、最近トヨタとホンダが販売を始めた燃料電池自動車は水素と酸素を反応させて熱エネルギーではなく電気エネルギーとして取り出してモーターを回して走ります。基本的にはどちらも水素と酸素を反応させていわゆる「燃やしている」だけですが、燃料電池ではプラチナを成分とする触媒を用いているのです。

先ほどの水素の燃焼反応式にはラジカルしか生成していませんよね、これでは電気エネルギーを取り出せません。そこで触媒を用いることで水素と酸素を水素イオンと酸素イオンに変えて、これから電子を取り出して電気エネルギーとして取り出しているのです。

実は純粋な水素と酸素だけをきれいな容器に入れておくといつまでたっても反応は始まりません、勿論、爆発もしません。先ほど説明したように活性化エネルギーが大きく、反応するためのポテンシャルが非常に高いからなのです。そこでその中に白金などの触媒を入れてやるとポテンシャルの低い別の反応機構で室温でも反応が進むのです。

エチレンやポリエチレンを重合する触媒はチーグラー・ナッタ触媒ですが、この触媒は構造を少し変えるだけでアセチレンも重合します。白川先生が東工大におられた時にこの触媒でポリアセチレンフィルムを合成して、その後初めてドーピングによる絶縁体—金属転移による導電性の発現と云う大発見をしてノーベル賞を受賞したのは有名な話です。私がポリアセチレンのフィルムを見たのは実は吉野先生の研究室を訪問して先生に見せて頂いたのが初めてだったのです。

この触媒は液体ですから液晶の場など異方性の場に浸み込ませるなどして共存させることで異方性を持ったポリアセチレンの合成ができたと云う報告もあります

(吉野) 塩化鉄触媒を使うようになって随分やり易くなりましたが、考えると、トリエチルアルミニウムなど色んなものを私ら素人がよう使ったもんだと感心しますよ。事故が全く無くて良かったと思っています。勿論、当時も細心の注意を払っていましたがね。チーグラー・ナッタ触媒使う時なんか、空気に触れると火を噴きますものね。

(杉本) 凄いことをやられていたと思いますよ。この重合に使うトリエチルアルミニウムは非常に危険な化合物で空気に触れた途端に激しく燃えてしまいます。それでまさか電気工学科の研究室でアセチレンの重合を行っている

などは全く想像していなかったので非常に驚きました。

私はトリエチルアルミニウムを専門に扱っていたので慣れています、今でも日本でトリエチルアルミニウムを扱うことのできる人は余りいませんよ。重合触媒としてまだ色々と興味深い化合物なので、我々の研究室の学生達にはトリエチルアルミニウムを製造している会社の方に特別にお願いして、安全に取り扱う方法を学ばせています。(吉野) 考えてみると、考えるまでもないですが、導電性高分子の研究の決め手は触媒ですね。導電性高分子だけでなく、もしかしたら化学反応、化学合成の殆どが触媒と云うことになるのではないのでしょうか。私自身は素人ですので、よく耳にするハーバー法でのアンモニア合成、チーグラー・ナッタ触媒を用いたポリエチレンの重合から始めて、触媒のことを少し素人に分かり易く説明して頂けませんか。

(杉本) 触媒反応と言うと温和な条件でも反応速度が速くなって高活性化すると云うことになるので勿論それも大きな効果なのです。ところが、さらに分子構造の制御など色々なことができるようになりました。高分子の世界では触媒を用いることで立体構造の制御が簡単にできるようになりましたし、合成高分子を蛋白質のように精密にシーケンス制御することもできるようになりました。吉野先生と一緒にポリプロピレンの絶縁ケーブルの共同研究をさせて頂いた時に用いたシンジオタクチックポリプロピレンも触媒が無ければできませんでした。

シンジオタクチックポリプロピレンは、単なるポリプロピレンなのに透明性が非常に高い樹脂だったので初めは透明樹脂材料として開発を行っていたのですが、吉野先生に“何かに使えないでしょうか”と相談に行った時に、“絶縁性が良さそうだから電線ケーブルの絶縁体には使えるのでは”と云うことで電線会社との共同研究を始めましたね。

ところで人類にとって触媒の歴史はとても古いですよ。すでに数千年前から酵素触媒によるアルコール発酵が行われています。触媒と云うものが実際に工業的に使われ始めるのは19世紀の後半で、ハーバー法で鉄を触媒に用いるアンモニア合成が工業化されたのが20世紀の初めです。

ポリエチレンやポリプロピレンを製造する方法は幾つかあるのですが、エチレン重合反応ではエチレンガスを容器に詰めて放置していてもそのままでは全く反応が進行しないのでポリエチレンができません。重合するためには300℃以上、100Mpa以上の圧力と云う高温高压下でラジカルを発生させる必要があります。



(「 \cdot 」はラジカルの不対電子を表す)

今でもこれは高压法低密度ポリエチレン(LDPE)の製造方法として工業的に行われていますが不安定な高温高压下での反応なので、未だに安定に生産するために苦勞し

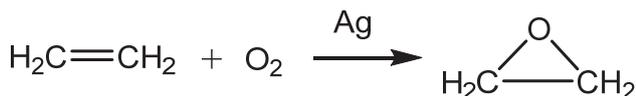
ていると聞いています。またこの方法ではプロピレンやヘキセンなどは重合できません。

有名なチーグラール・ナッタ触媒はこの反応をラジカル重合ではなく配位イオン重合と云う触媒による反応機構に変えることで80℃、30Mpa以下でも重合ができるようになり、さらにプロピレンの立体規則性重合ができるようになったのです。

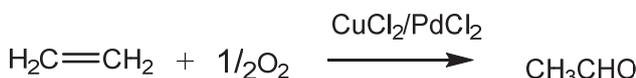
ポリエチレン PE の重合に使われたチーグラール・ナッタ触媒は基本成分として塩化チタンと有機アルミニウム化合物(有機Al)からなる触媒で、トリエチルアルミニウムと四塩化チタン $TiCl_4$ との組み合わせによって低温低圧でもポリエチレン PE が生成します。PE をラジカル重合で作ると側鎖が多い PE しか得られないのですが、触媒を使うと側鎖のない PE が得られ、このポリエチレンは高密度ポリエチレン HDPE と呼ばれています。

これらの触媒はいずれもノーベル賞に繋がっています。工業的にも良く使われている触媒の例をいくつか挙げてみます。

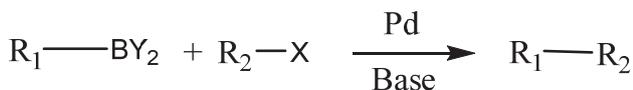
エチレンオキシドの製造には銀触媒が使われています。



アセトアルデヒドの合成法はワッカー反応と呼ばれていてパラジウム触媒が使われます。



鈴木-宮浦炭素-炭素カップリング反応ではパラジウム触媒が使われます。



私が米国で研究したメタロセン触媒はチーグラール・ナッタ触媒とは異なり、分子触媒と呼ばれるメタロセン分子とアルキルアルミニウムと水を反応させたアルミノキサラン(MAO)を組み合わせた触媒です。図8の触媒がカミンス

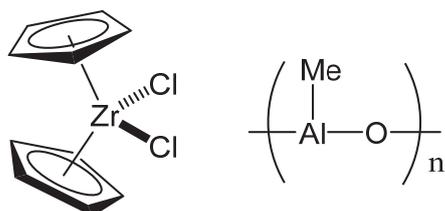


図8 カミンスキー触媒

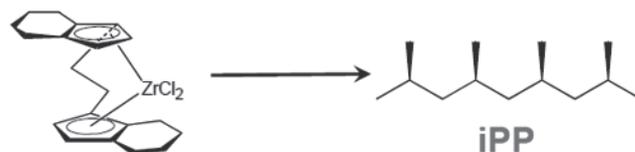


図9 メタロセン触媒を用いたアイソタクチックポリプロピレンの合成

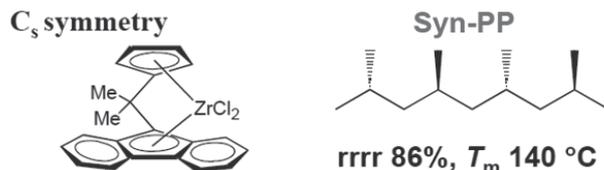


図10 メタロセン触媒を用いたシンジオタクチックポリプロピレンの合成

キー触媒と呼ばれてエチレンが非常に高収率で得られますが、プロピレンの立体規則性を制御できませんでした。

その後、ジルコニウムに配位しているシクロペンタジエン配位子を変えることでメタロセン分子に対称性を導入してポリプロピレンの立体制御ができるようになりました。

このような C_2 対称を持つメタロセン触媒からはアイソタクチックポリプロピレンが得られます(図9)。

C_5 対称を持つメタロセン触媒からはシンジオタクチックポリプロピレンを合成することができます(図10)。

ところで有機化合物の中には、図11のアミノ酸のように同じ組成でも立体構造が人間の右手、左手と同様、鏡に映したように対称的な2つの形(鏡像体)を持つ化合物(キラル)があります。通常の合成反応では両方の鏡像体が出てしまいますが、一方の鏡像体だけを選んで作ることができるような分子触媒も開発されています。

触媒のことを Wiseman's Stone (賢者の石) とも云って、西洋中世の錬金術師が、卑金属を金に変化させる夢を探し求めた話に似ています。ただし触媒のほうが金よりも価値の有るものを得ることができます。

たとえば先ほどの空中の窒素をアンモニアの形で固定するアンモニア合成ですが、窒素は、空気中には約80%も含まれているにもかかわらず植物はガス状窒素をその

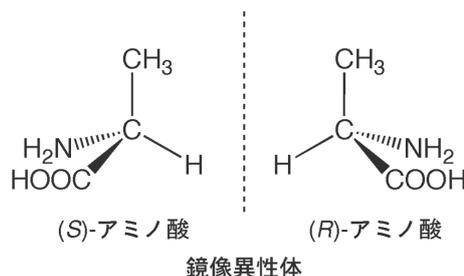


図11 アミノ酸の鏡像異性体

まま吸収することができないので硝酸等の無機窒素として吸収して、さらに酵素と云う触媒を使ってアミノ酸を作ります。

ベルリンのダーレムにあるハーバー記念碑の碑文には「空気からパンを作った人」と書かれているんですが、現在殆どの人はその恩恵を意識していないと思います。空気中の窒素の固定にハーバーが成功して窒素肥料を作れるようになったお蔭で何十億もの人が飢餓から救われているんです。

少しオーバーに云うと今後人類が将来生き残る為のエネルギー問題、資源や環境の問題などを解決するためにも触媒作用が不可欠であるとも云えます。

(吉野) 私の阪大工学部での同期、と云っても応用化学ですが、柏典夫君と云う人が三井化学に行って、彼はその後チーグラー・ナッタ触媒関係でいい仕事をして結構大きな特許収入を三井化学にもたらしたとして非常に評判が良かったのですが、彼は何をしたのですか。

(杉本) 柏さんはチーグラー・ナッタ触媒の活性を飛躍的に向上させることができる触媒を開発しました。それまでの触媒活性は小さかったため得られたポリマーに対してポリマー中に残留している触媒残渣の量が多くてそのままではポリマーとして使えないので重合後にポリマーから触媒残渣を取り除かないといけなかったのです。それが高活性化したため重合後にポリマーから触媒残渣を取り除く必要が無くなったのです。そうするとプロセスも変えることができるようになって、溶媒を使うプロセスから溶媒を使わない気相重合ができるようになり現在のプロセスの多くがこの方法に変わりました。

柏さんが出した特許のすぐ後にハイモントからも特許が出されたのですが、技術的に微妙な点があったので特許紛争を避けるために共同契約を結んで両社でそれぞれ事業を展開することになったと聞いています

(吉野) なるほど、分かりました。その頃、いろいろな化学分野の人にアプローチして頂き、様々な触媒を使って導電性高分子などを作りましたね。だから東大理学部の高橋寛教授など多くの方との共著論文も有ります。本当に多くの方との出会いが有難かったですね。

杉本さんは私のところにおられた後三井東圧に帰られて、その後アメリカに行かれて新しい触媒研究をされましたね。

(杉本) そうです、マサチューセッツ大学に行って Chen 先生の所で、今お話ししましたメタロセン触媒の研究をやりました。あそこではシニアの研究者がいませんでしたので、私が助手、助教授代わりのように色々な仕事をやり、大学院生、ポスドクの面倒も見ました。メタロセン触媒の研究は、導電性高分子の仕事の後、新しい研究テーマを探しにドイツのハンブルグ大学にいたカミンスキー先生の所に行く予定でしたが、直前になって事務的な手違いが

あって行けなくなり、代わりに米国の UMAS (マサチューセッツ大学) の Chen 先生のところでメタロセン触媒の研究をすることになったんです。このことが運良くシンジオタクチックポリプロピレンの研究を始めるきっかけになりました。

米国には8月に行ったのですが、その時アメリカ化学会の JACS と云う雑誌でメタロセン触媒で初めて高立体規則性のシンジオタクチックポリプロピレンの合成ができたという論文を見つけました。それがアメリカに行つてすぐでしたが、その秋のアメリカ化学会年会で、著者の Ewen さんがその発表をするのを見つけて参加しました。残念ながら発表の時間には別の用件があって発表そのものは聞けなかったのですが、夜、喉が渴いたのでホテルのバーで何か飲もうと思って行ったら Ewen さんが一人で何か飲んでいたのでね。講演を聞きそびれてしまったので、詳しく内容を聞きたかったので一緒に飲みながら聞いている内に意気投合してしまい、シンジオタクチックポリプロピレンの工業化を目指して共同研究をやろうと云うことになったんです。これがシンジオタクチックポリプロピレンの開発を始めることになったきっかけです。

このポリプロピレンは従来のポリプロピレンとは立体構造が異なっていて、そのため高次構造が異なり、物性もかなり違うことが分かりました。

ある程度は新しい素材として使えそうだと云うことが分かって、製造方法もほぼ確立できてきたのですが、ポリプロピレンはマスマークトですから三井化学では数千トン位の需要では製品化へのゴーサインが出ません。最低一万トン以上の市場が必要なんですね。その頃に別件で先生に色々なことをご相談に行っていたのですが、ある時の会話の中で絶縁体として使えるのではないかと提案して頂いたのです。

(吉野) 凄かったですね。帰国されてしばらくしてコンデンサ用のポリプロピレンのことで来られた時のことをよく覚えています。確か、大手電力用コンデンサメーカーで使われるポリプロピレンが他社のメーカーに大分シェアを奪われて大変なんだろうとどうしたらいいかと云うご相談でした。

要するに三井さんを始めポリプロピレンのメーカーさんは粉末の状態フィルムメーカーさんに出されて、そこで絶縁用フィルムとして加工し最後にコンデンサメーカーに渡されるんだけど、そのフィルムメーカーが他社の素材を採用するようになったからと云うことでしたね。“当然コストの違いか、フィルムの絶縁性能の違いからそうなったんでしょう”と云いましたら、“コストはほとんど変わらないので、絶縁性能が劣ったと云うことだと思います”，と云われましたね。それで、絶縁材料、高電圧の研究者としての私の考えとして異物管理を徹底的にしっかりやるのが一番だろうと云いました。その結果、数か月

後に、“絶縁性能が高くなって再びうちのポリプロピレンが受け入れられるようになって、以前よりむしろシェアが高くなりました”，と喜んでご報告に来られたことを覚えています。

その時、“杉本さんポリプロピレンをやられていたんですか”，と話しかけました。そうすると、“いえ、私がやっていると云うわけではないですが、わが社にとって大事な素材ですので”，とお話になった後、“実は私がアメリカで研究をしていたメタロセン触媒でポリプロピレンも作っていました。”とお話になって、がぜん興味をもってじっくりお聞きしたことも覚えています。

“確か従来はポリエチレンと同様、チーグラール・ナッタ触媒でポリプロピレンも作っていたように思いますが、メタロセン触媒で作った場合はどう違うんですか”，と尋ねました。杉本さんは“立体規則性が違うのができます”，と仰ったので、“通常のポリプロピレンはアクタクチックかアイソタクチックかですが、メタロセンではなんですか”，と問うと、立体規則性を制御して作れて、特にシンジオタクチックポリプロピレンもできるんです”，と答えられましたね。“全く性質が違います”と云うことでしたので、これは新しい展開ができると思って“ケーブル絶縁材料として研究開発してみませんか”，と提言しました。

しかし、それは電気屋にとっても化学屋にとっても非常識とみなされることだったですね。「ポリプロピレンは銅と接触すると劣化する」と云うことが常識になっていたから、ケーブルなど電線の銅と接触するところには原理的に使えないと云うことになっていたんですね。それでその時、杉本さんに私云ったことを鮮明に覚えています。“私、化学屋でないですから、ポリプロピレンと銅が接触したら自動的に劣化が進むと云うのは信じられません。何でそんなんですか”と聞くと杉本さんは“ポリプロピレンが三級炭素を含むのでラジカルで分解するからなんです”と仰って、“私、やっぱり信じられません。勿論ポリプロピレンの炭素と銅が電子のやり取りを凄く確率でやったとしたらそうなるかもしれませんが、私のような化学の素人では信じ難いです。むしろチーグラール・ナッタ触媒からできたポリプロピレンの構造、高次構造なんかがまずいんじゃないですか。それに何か不純物の影響かもしれませんよ。もしかしてメタロセン触媒で作ったポリプロピレンではそうはならないかもしれませんよ”，と云いました。

それから数か月後にご報告に来られて、“メタロセンで作ったポリプロピレンでは銅と接触させても劣化は激しく起こりませんでした”と云うことだったですね。どうもメタロセン触媒は重合効率が非常に高いので、触媒量が少なく、従って触媒残渣も大幅に少なく、またポリプロピレンの中に銅をイオン化させる成分が非常に少なくなっているためではないかと云う結論となりましたね。

その後、材料の研究を進め、電線メーカーさん、関西電

力さんも巻き込んで高圧ケーブルの開発を行い、耐熱性のある良いケーブルができましたよね。しかし、丁度その頃の経済状態が余り良くなく、メーカーも長期間にわたって研究開発を進める余裕が無いと云うことでいったん開発は中断になっているのが実際ですが、ただ電気学会に投稿した論文が掲載され論文賞は頂きましたね。

(杉本) あの時はいびつくりしましたよ。我々の常識だったポリプロピレンと銅が接触すると劣化すると云うことを、“信じられない”，と云われて、しかもメタロセン触媒で重合したポリプロピレンを実際にテストしてみると、その通りでしたから。私、素人の人は凄くと思いましたよ。先生がいつも云われている脱常識が大事と云われるのがよく分かりました。

(吉野) 私のような素人もたまには役に立つことも有ると云う程度のことで、私ら化学のこと、触媒のことは本当に分かりません。難しいですよ。分かる人を尊敬します。今のポリプロピレンと銅の話ではないですが、いろいろな金属が触媒に使われていますよね。

例えば白金や銀などもずいぶん使われていますね。私自身も(SN)_xポリチアジルを作る時に銀とS₂N₄の接触で反応させて作りました。

それから殺菌にAgの微粒子が活用されているのも良く知られていますね。金属原子の中の電子、特にたくさん電子がある金属の電子は取り出しやすく、色々なものと反応し易いことは明らかですね。それが実際に有効に産業に利用されるとなるとかなり限られてくるかもしれませんが、確かに金属触媒は重要ですね。杉本さん、触媒の定義はどうなっているんですか。素人判断では化学反応の場に存在していて化学反応を促進するが、自らは変化しない物質と云うように聞いてますが、大まかにはそんなことですか。生物では酵素が触媒の役をしており、酵素反応が触媒反応に当たると聞きますが。

(杉本) ほぼそんな理解でいいと思いますが、もう少しきっちりと云いますと、化学辞典などには、①少量で、反応速度を促進させ、それ自身は反応中消費されない物質、②一定温度における化学反応速度を増大し、化学量論式に現れない物質、③活性化エネルギーを低くする作用を持つ物質、それが存在することによってエネルギーの峠を低め、新しい原子の組み換えの経路を作り出す物質、と云うようなことがエネルギーポテンシャルの図と一緒に書かれています。触媒はそれぞれの反応の経路を変えて速度を早くするんです。

少し難しくなりますが反応の速度定数kはアレニウス式で示されます。

$$k = A \exp(-E_a / RT)$$

この式は簡単に言うと、活性化エネルギーE_aを下げたり、反応温度Tを高くすると反応速度が速くなると云うことを意味しています。ここで触媒は、活性化エネルギーを下

げる反応経路を作ることによって反応速度を数桁も増大させる働きがあります。

しかし触媒の働きは反応を速くするだけではないんです。反応と云うのは色々な副反応が起こることが多いのですが、複数の反応が起こり得る状態でも、特定の反応のみ高速化させて目的とする物質だけを選択的に得るために触媒を用いることができます。例えば一酸化炭素 (CO) と水素を反応させると触媒によりメタン (ルテニウム触媒)、エタン (コバルト触媒 (FT 合成)), メタノール (銅触媒) などのように変化させることができるんです。また、光学活性体の合成ができる立体選択性を発現させる触媒も有ります。

触媒を使うときの欠点としては化学反応の種類によって使われる触媒が異なる、すなわち反応の数だけ触媒の種類が必要であることかもしれませんね。

私たちの体内の複雑な酵素反応も触媒反応です。酵素は遺伝子から作られる高分子触媒です。これらが触媒と云われるのは酵素にはやはり金属が含まれていて反応はそこで起こっているのですが、その金属の周囲を蛋白質が取り囲んでいます。

酵素も含めて生体内で進行する化学反応を触媒する物質をまとめて生体触媒と呼んでいます。生体触媒は環境負荷の低い触媒として期待されており、ブタの肝臓などから得られる酵素は工業的にも触媒として利用されています。触媒は金属を含むものがほとんどですが、金属を含まない有機化合物が触媒作用を示す触媒として有用であることも見出されています。

最近では先ほどの触媒の定義には含まれないような反応も触媒反応と云われています。例えば光触媒はこの定義では触媒ではないと云うことになってしまいます。今後新しい反応が出てきて触媒的な振舞いをするとそれも触媒反応と云われるかもしれません。そのうちに定義の方が変わってくるのでしょうかね。普通触媒反応は先ほども説明したように図6のポテンシャル曲線を用いて理解されます。(吉野) なるほど、化学反応が進むためにはポテンシャルの山を越えないといけませんが、触媒がこの山を低くする訳ですね。すなわち触媒存在下では活性化エネルギーが小さくなるんですね。温度が高いほど反応が進むと云うことは、熱エネルギーをもらってこの山を越えると云う訳ですね。光のエネルギーをもらって超える場合は光触媒と云うことになる訳ですか。

ところでゆで卵が水の温度を上げるとできると云うのは温度で山を越えるわけですが、一方では圧力をかけると卵が固まりゆで卵と同じものができる訳ですが、これは圧力で山を越えると云うことですね。もしかして圧力で山が低くなると云うことでしょうかね。だから余り熱をかけなくても山を越えられる。最近熱をかけずに高圧力で食品素材を処理する研究を私少し手がけていますが、面白い

ですね。

(杉本) 考え方の基本はそれでいいと思います。圧力で反応を進める場合、ずいぶん高い圧力が必要ではないですか。(吉野) 我々は数千気圧、例えば海底 60,000 メートルに相当するくらいの水圧、600MPa 位の超高压をかける仕事もしています、実際の海の深さは 10,000 メートル位ですが、このくらいの超高压になると容易に室温でも短時間でゆで卵ができます。

(杉本) そうでしょうね、そのくらいは必要でしょうね。吉野先生は相変わらず本当に色んなことに取り組みますね。ますます盛んですね、感心します。

(吉野) 私、若い時、よく分からないくせに講演で色んなことを話してきましたが、大分間違いも有るかもしれませんが、応用などに関する突飛なアイデアなんかは自分でもびっくりするくらい色々湧いて出てきたんですが、反応などの本質的なことについてはかなり今考えると無茶なことも云ってきたような気がします。

(杉本) 私が先生のお話を聞いた時、随分刺激になる話は聞きましたが、そんな間違っただ話なんかは記憶にないですね。

(吉野) 間違っただことは皆さんよく忘れて下さると云うことでしょう。変な話の例では、こんなのが有るんです。ある所で講演を依頼されて“電子デバイスと云うのは電子の移動とかやり取りとかに関係しているので、電子を取り出し易いもの、入れ易いもの、動かし易いものなどが新しいデバイスの可能性に繋がるんです。これは無機物でも有機物でも同じで、だから不安定なもの、危ないもの、薬や毒になるようなものなどがいいんですね。反応でも爆発でもきっかけ、始まりは電子のやり取りからですし、薬も体との電子のやり取りがきっかけでしょう。農業も虫を殺すと云うことは、虫の体、細胞と電子をやり取りするからでしょうから、電子デバイスの可能性があるとうことなんですよ”。

当時化学関係の企業が電子デバイス関係に出たいと云う流れがありましたから、この話を聞いて色んな方が来られたんですよ。固有名詞を挙げたらまずいかもしれませんが、確か日本農薬、日本化薬など色んな企業の研究者、技術者、経営者が話を聞きにいらっしやいました。中には物を持ってこられる方もあって一時期私の部屋には農薬や、薬、爆発物なんか一杯集まったんです。

(杉本) そうですか。凄いですね。

(吉野) 今の話私自身はあながち間違ってもいないような気もしています。勿論取り扱いや過程でミスがあったらいけないと思いますが、最終的にはうまく持って行けば色々な画期的デバイスの可能性があるとうことでも思っています。光デバイスについても同じで、光が当たって電子が飛び出したり、取り込まれたり、大きなエネルギーを得て活性化されるようなものからも面白いデバイスができる可能性

があると思います。他に色々ありますが、磁氣的に面白いもの、磁石になったり、磁石で色々性質が制御できるものなんかと同じような考えに繋がると思うんです。ですから有機物で強磁性体、いわゆる鉄を引っ付けるような磁石ができる可能性もあると思いますし、逆にそんなものは爆発しそうなもののような気もします。磁氣的な過程にはスピンは関係しますが、触媒機能を持つようなもの、触媒機能を発揮するプロセスからも色々な機能素子、デバイスの可能性が出てくるとも思いますよ。

(杉本) 面白いですね、もう一寸私も若かったら、得意の触媒機能を使った色々な新規なことに取り組みたいですね。関連することで何かそれを想定させるようなことをやられたことがありますか。

(吉野) ある時、導電性高分子、具体的にはポリチアジールと云う硫黄と窒素からできた高分子 (SN)_x ですが、それに n 型ドーピングと云って Na などのアルカリ金属を入れて性質を制御しようと実験をしたことがあります。実際の実験はテフロンシートの上にサンプルをのせてそれをテトラヒドロフラン THF のナフタライド溶液、ナフタレンと Na を溶かしたものの溶液につけてドーピングします。ドーピングを加速するために超音波をかけたんです。要するにピーカーなどを洗浄液につけて洗浄する超音波装置なんです。結果として上手く n 型ドーピングができて、めでたしめでたしだったんですが、その時テフロンが少し茶色になっていることに気が付きました。おや、なんだろうと思って考えたんですね、そうか、もしかしてテフロンの構造からフッ素 F がとれたのではないかと思ったんですね。そうするとポリアセチレンのフッ素置換体ができる可能性があるので非常に面白いことになるかも知れないとがぜん興味がわきました。

なぜフッ素がとれるかと云うと、炭素とフッ素の結合の反結合軌道に電子が入る可能性があり、そうすれば結合が切れてしまうと思われるからです。たとえば、電気絶縁性の気体として六フッ化硫黄 SF₆ が有名ですが、これは電気絶縁破壊のきっかけとなる注入された電子がこの分子に捕まるからなんです。するとこの分子が分解することが明らかになったんです。やはり反結合軌道に電子が入ったためと思われるのです。と云うことは、同じことがテフロンで起こる可能性があると考えたんですね。それで n 型ドーピングのことは忘れて THF のナフタライド溶液にテフロンを漬けて超音波を激しく照射したんですね、するとテフロンが真っ黒になった訳です。フッ素が抜けて炭素間に二重結合ができ共役系が発達したと云う訳です。これで簡単な論文も書いておきました。

(杉本) そうですか、Na でテフロンから水素を外す、見事です。われわれもスターラーでテフロンを廻しているとそのうち真っ黒になることは知っていましたが、当たり前だと思っていて、何でそうなるかを考えたこともありません

でしたね。素人とは云え凄いですね、いや素人だから考えられたんでしょうね。

(吉野) 同様にテフロンに電子を真空中で加速して打ち込んでも、放電に曝して電子を当てても黒くなっていくと思います。こうすると逆にテフロンの表面が活性になると思います。

(杉本) 先生のことだからその辺りも論文にされたんじゃないですか。

(吉野) この延長でいろいろな溶液を作って実験をしましたが、電気電子工学の専門の私が論文を書くのもどうかと思って、化学が専門の柳田祥三助教授にこの話を伝えたところ、彼も大いに興味を持って実験を続けてくれましたので、彼のグループの若い人を筆頭者として連名の論文を発表しました。これには後日談があって、この話を柳田君は同じ化学で同年の野村正勝教授に話したそうなんですが、彼も興味を持って彼のやっている石炭溶解に応用しこの溶液と超音波照射を使って実験すると石炭が溶けて面白い結果が出た、と報告したそうです。柳田君が、“彼(野村君)、私が云ったもんで Yanagida method (柳田法) と論文の中に書いていたけど、本当はこれ Yoshino method と云わないといけなかったね”、と云っていたんですわ。彼には“構わん、構わん”と云っておいたけど。

(杉本) 本当に最初はちょっと怖いのではないかと思います。今この超音波照射は化学屋でも当たり前のように使い始めています。最初に吉野先生のグループで始まったと云うことは誰も知りませんけど。

(吉野) 触媒と云えば光触媒が有りますね。一番有名なのは東大にいた藤島昭教授が若い頃にやられた酸化チタン TiO₂ の光触媒ですね。実は今話した柳田君は元々油脂が専門だったんですが、ある時から産業科学研究所にもおられた桜井洗教授のもとに助教授として移籍して光関係の仕事を始めましたよ。それで、ある時私に、“自分と学生に光と半導体、その相互作用の話をして欲しい”と云われ、下手な話を彼のグループのため二日位したことがあるんです。その時の会話を明瞭に覚えています。“柳田君、何をやるの”、“CdS や ZnS などの半導体微粒子を使って光触媒の研究なんだ。元々専門ではないからゼロからの出発なんでね”、“そうなの、半導体に光を照射して触媒作用させようと云うからにはまず半導体の電子を励起状態に上げるんだらうけど、微粒子を使うと云うことは、表面積を大きくし反応を進めようとするものとの接触面積を大きくすること、恐らく微粒であれば半導体に表面準位と云う電子状態ができるので、励起電子などがその準位を通じて緩和、元の状態に戻る間にその準位を経由するだろうから、その電子準位が反応をさせようとする分子の電子状態とエネルギー的に一致すると高い効率で電子移動が起こって反応が高効率で進むと云う考えでしょう。要は半導体の価電子帯と伝導体の間の禁止帯、化学屋さ

んの云うホモ (HOMO) ルモ (LUMO) ギャップの中にできる局在電子準位を有効に生かすと云うことでしょう。そうであればもちろん半導体を使って行う研究も重要だけれど、誰もがやっていないような材料を使ってやるのも面白いのではない。僕だったら導電性高分子を使うね。導電性高分子は禁止帯幅は適当だし、励起したものが緩和する過程でポーラロン、バイポーラロン、ソリトンなどの色々な準位ができるから、しかもエネルギー的に緩和しながらできるだろうから、反応する物質の電子状態と一致した時、高効率で移動が起こり、反応が進むように思うね。もしやる気がある様だったら、僕ポリパラフェニレンやポリチオフェンなど色々な導電性高分子を持っているから渡そうか。高分子だから表面積も本質的に広いし、面白いと思うよ。誰も気が付いていないだろうな”。

と云うような経緯があって、ポリパラフェニレンを持ち込んで導電性高分子の光触媒としての可能性の共同研究を始めたんです。水からの水素発生、重水からの重水素の発生、その他光異性化反応を始めいろんな光触媒効果による反応の研究を進めたんです。幾つか論文も書いたし、絶対に物真似でない面白い研究だったと今でも思っています。

(杉本) 面白い発想ですね。さすがです。その後続けておられます。

(吉野) とてもとても色々なことに手を出したので、本気になって自分は進められなかったですよ。今でも関心を持っているけど、私、導電性高分子の関係で心に残っているもう一つの仕事があります。少し長くなりますが聞いてもらえますか。

それは、導電性高分子から液体中への電子注入の実験をやろうとしていたことがきっかけです。まず光照射によって電子を液体中に注入しようと云う実験です。導電性高分子であるポリチオフェンの膜を ITO (透明導電ガラス) の上に形成してそれを液体中に入れて光を照射するんです。大学院の学生さんに装置を渡して、簡単な手作りの装置でしたが、それに可視の光、確か緑くらいだったと思います。それを照射して光電子放出による電気伝導を測ろうとしたんです。ところが、学生さんが来て云うんですね、“シグナルが出ません”。それで見に行ってみると確かにシグナルが出ませんが、測定セルの中を覗いてみるとサンプルであるポリチオフェンが見えないんです。“あれ、サンプルがないけど最初間違いなくサンプルを付けていたね”。“はい、間違いありません”。そこでハッと気が付いたんですね。もしかして、普通溶けることがないポリチオフェンが溶けたんじゃないのかと。試料セルは一旦真空に引いたつもりだったが、もしかしたら液体の中に少し溶存酸素があったかもしれないな、と思い、可能なストーリーを次のように考えたんです。

光照射されたポリチオフェンから電子が液中に放出さ

れ、この電子が液体中に残っていた酸素分子 O_2 につかまり、 O_2^- になった。これがポリチオフェン膜自体を攻撃して反応が起こり、ポリチオフェンが分解し低分子となり液体に溶けてしまった。このシナリオを確かめるために液体の溶存酸素をほぼ完全に取除いて光照射した場合ポリチオフェンは溶けなかったです。念のために、液体から酸素を除いた後、窒素ガス N_2 、アルゴン Ar ガスなどを導入して実験したが矢張り溶けなかった。空気を入れたり、窒素ガスに少し酸素を混ぜて封入し照射すると矢張りポリチオフェンが溶けてしまった。シナリオの正しさが分かったが、これで終わることなく念のためしつこいことをやるのが私の性格です。

次にその他の色々なガスを封入して光照射したところ、何と炭酸ガス CO_2 を封入した場合もポリチオフェンが溶けました。通常炭酸ガスは電子を受け入れ難いので、反応が殆ど進まない、だから大気中に炭酸ガスが溜まると減ることがなく溜まり続ける一方なので大変な問題が起こり、地球温暖化もこれで議論されることが多いですね。

私が、炭酸ガスが電子を捕まえて、それがポリチオフェンをアタックした筈と云っても誰も、勿論、化学者は認めてくれなかったですね。それで“炭酸ガスが電子を捕まえてマイナスイオンができたとして何かと反応する可能性がないの”と、私の所にいた河合君に尋ねると“フェノールと反応するかもしれないです”，と云うんです。早速、液体中にフェノールを微量入れて炭酸ガス雰囲気中で光照射するとなんとサリチル酸ができました。河合君は元々化学が専門であるので、“河合君サリチル酸ができたようだけど化学的に考えておかしくない”と云うと、“おかしくないと思います”と云うことでした。

その結果はある化学系の学会が関西であった時に、私自身が発表しました。その時或る大学の教授が“大気圧で、可視光でサリチル酸ができると云うのは凄いことだと思います”。とコメントして下さったことを覚えています。どうも化学の常識からは信じ難いことのようにでした。後で“さっきの質問の先生の専門は何ですか”，と司会者に尋ねると、“化学がご専門ですよ”，と云うことでしたのでまんざらでもない気がしました。サリチル酸は確か薬との関係に興味を持たれているから、何かの役になるのではと思いました。

私、元々液体も専門の一つで、液体中の電子状態の研究もやっていたことがあったので、古い知識を絞り出して、恐らく液体中に炭酸ガスを溶かしたから、すなわち CO_2 が液体中にあるからその電子状態が変化して飛び出した電子を捕まえることができたのだろうと云う筋書きによる論文を書いて発表したことがあります。通常は不活性な炭酸ガスに活性を与えることができるので、炭酸ガス削減に効果を発揮する可能性があると考えたわけです。

これなど、触媒効果のポテンシャルを下げるような役割

を担っているのではないかと云う気がするが、考え方おかしくないでしょうか。すなわち触媒効果は触媒の電子状態がもちろん大事だが周囲環境、周囲媒体自体によって電子状態、ポテンシャルの山などが変化すると云うことだろうと考えました。ただ、私は化学屋でなく電気屋なので考えがおかしいかどうか是非杉本さんにお聞きしたいです。

(杉本) 全くおかしくないですね。コルベ・シュミット反応の光反応での応用に近いと思います。コルベ・シュミット反応は100気圧くらいの炭酸ガスによりフェノールと反応してサリチル酸ができる反応ですが、それが光を当てると大気圧でできると云うことは本当に凄い反応を見つけられたと思います。

(吉野) 変な話ですけど、昔、私が所属していた講座の犬石嘉雄教授から、しばしば云われたことがあります。私が普通のひとと少し変わっているからであろうし、次々と色々なことを云いだし、のべつまくなしに色んな方が訪ねて来るからであったでしょう、それに、“元々、論文は読むものですか、書くものですか”などとんでもない発言をする常識はずれのところもあったからでしょう。人前で、と云うか人に私を紹介する時に、“吉野君は思い付き博士で、次から次へと面白いことを云いだします。それに吉野君は人間触媒みたいで、いろいろな人と出会いがあって、それがいい具合になっているみたいです”。

その時、人間触媒とはどう云うことだろうと考えたんです。自分のことであるし、自分の性格から、自分に都合の良いように考えたんです。人間触媒と云われる人は、次のような人である可能性が有るのではないかと。

○その人が居るだけで何かが起こる、○その人の語りかけがきっかけで何かが起こる、○その人の周りに拮がっている雰囲気がかきかけで何かが起こる、○その人の高いポテンシャルがかきかけとなって何かが起こる、○その人と接するもう一人の人の組み合わせの妙がかきかけで何かが起こる、○その人の周りにたくさんの人が集まってくるため何かが起こる、○その人と一緒に居る人の場に外から何らかの刺激があって何かが起こる、○その人が激しく動くことがきっかけとなって何かが起こる、○その人と一緒に居る人の周りの場が原因で何かが起こる。要するに何かが起こるために必要な活性化エネルギーがその人が居るため低くなるからと云うことになる、と云うようなことかなと思いました。

まあ、妥当かどうかわかりませんが、いずれにしても起こる何かがいい方向のものであって欲しいと思っています。案外、小生の批判として、いい方向でないものもあって触媒人間と呼ばれたことも有るかもしれません。

大した能力がないのに佐々木正大先生に故郷島根の産業振興のために島根県産業技術センター所長として尽力してくれと頼まれたのは、実は私の研究、マネジメント能力と云うよりも触媒能を期待されたためかも知れない、と

思っているんです、この頃。

(杉本) 犬石先生を始め多くの大先生方は吉野先生の性格を良く見抜いておられたんですね。触媒を英語で言うとCATALYSTですが、英語辞書でCATALYSTを引くと「相手に刺激を与える人」すなわち触媒の働きをする人と云う意味なんですね。私を始め、本当に多くの方々が吉野先生の間触媒としての触媒能に刺激されて色々興味深いことをさせて頂いております。

(吉野) 杉本さん、1986年京都で導電性高分子などを含む「合成金属の科学と技術の国際会議」と云うのを、筑波大学の白川英樹先生、京大の山邊時雄先生と私の三人が中心になって開いたんですが、その前後から三人で非常に親しくしていました。白川さんと山邊さんが組織委員長、私が実行委員長兼総務幹事でやったんです。白川さんはその後ノーベル賞を貰われたのでよく知っていると思いますが、山邊先生の先生は福井謙一先生でやはりノーベル賞を貰われています。山邊先生は福井先生の愛弟子で後継者ですが、色々な話をよく聞きました。

(杉本) よく存じております。福井先生は確かフロンティア電子論でしたね。それに白川先生、山邊先生、吉野先生の3人が仲良しと云うのは皆んなが知っています。

(吉野) 実は山邊先生がいつも話されるフロンティア電子論は化学反応のスタートを理解する上で非常に重要で、しかも触媒反応にも基本的に関わってくると考えていい訳ですね。

山邊先生のお弟子さん、従って福井先生の孫弟子さんの一人に九州大学の吉澤一成先生がおられるのですが、この先生も非常に優秀で巨大な分子である酵素を対象に酵素反応の理論をやられています。“凄い成果を出されているからそのうち大変高く評価されると思います”，と山邊先生は仰っています。実際、量子力学のシュレディンガー方程式から様々な触媒反応を理論的に解明するとともに理論結果から新たな合成法を提案されており、また酵素反応についても素晴らしい仕事をなされています。友人の何人かは燃料電池の触媒、特に白金触媒などと関連することもやられています。

(杉本) そうですか、酵素を触媒としての研究は非常に重要だと思いますし、面白いですね。私も機会があったらもっと勉強してみたいですね。

(吉野) 今日は触媒の色んなことがお聞きできて非常に有難かったですが、考えてみると生物、生命そのものが室温で信じられないようなことが起こることで存在している訳ですので、さっきの酵素の話を含めて生命全体を触媒と云う観点でこれから研究することも極めて大事なように思いますね。

(杉本) そうですね。私が若くて今くらいの触媒に関する知識と経験を持っていたら、そんな目で生体機能、生命現象を研究テーマに選んだら面白いだろうなと思っています

す。

(吉野) もう一つだけこの機会にお聞きしておきたいことが有ります。実は、外見から分かるかもしれないですが、この頃だいたい腰とか背中とか痛くて、骨なのか筋肉なのか衰えてきているようです。若い時からもっと鍛えて、気を付けていたら、余りに重いものをいつも持っていなかったら良かったかなと反省していますが、どうやら手遅れのようなようです。それで、できるだけ歩いたり、体を動かしたりして筋肉を鍛えようと云う気持ちもあり、ほんの少しだけやっていますが、時にはむしろ余計痛めるようなことも有ります。こんなことを元味の素の有名な研究者で、今信州大学の特任教授をされているバクテリアセルロース研究開発の開拓者山中茂さんに島根に来られた時に話したら、云われました、“筋肉を鍛える運動だけでは片手落ちですよ。ある年齢になると体、筋肉なんかを作る機能が落ちてきてしまっているから元には戻りにくいんですよ。私もそんな状況で朝起き上がることもだんだん大変になってきたので、考えたんです。高齢になると筋肉などを作るのに不可欠だけど自ら補給することができない必須アミノ酸、ロイシンなどを補うためサプリメントを摂ったらいいのではないかと思ったんです。それならと思って私のいた味の素で作っているもので大ヒットしているものを探して購入して飲みだして三か月ほどして朝フツと気が付いたんです。あれ、あんまり痛くない”と、それでちょっと聞きたいんですが、こんな必須アミノ酸やロイシン、これらは筋肉を作る材料として利用されるだけでなく、何か触媒的な役割を果たしている可能性は有るんですか、無いんでしょうか。

(杉本) そう云えば先生は昔から信じられないくらい重い靴や袋をいつも持ち歩いておられましたね。今もそうみたいですが、アミノ酸類は筋肉の蛋白質を作るのに不可欠なんですが、その他、いろんな機能を持っています。最近ではそれらの機能を持ったアミノ酸を何種類か組み合わせることでより効果を高めるようなものが有るようです。私は高知でハイキング程度ですが、よく歩き回っていますが、どうも膝の筋力が低下してきた気がします。

疲れたときに側鎖アミノ酸を含んだ飲料が抗疲労効果が有ると云われているので、飲んでみたら即効的に効きました。これなんかはアミノ酸がエネルギーを発生させる触媒作用を持っているのではないのでしょうか。アミノ酸だけではそれらの機能を発揮できないような気がします。アミノ酸と共にエネルギーになる糖類を摂ると、身体や脳機能のバランスを保つためのアミノ酸の触媒作用効果がさらに高まると思います。

(吉野) なるほどそうですか。よく分かりました。自分のことでもありますし、もう少し続けたいと思います。今日は本当に有難うございました。触媒の本質が少し分かりかけたような気がしますし、自分自身のためにも役立ちそう

な感じがしてきました。

ところで、私の記憶が正しければ杉本さんは長野県の出身でしたね。でも誰か東京の出身じゃないですか、と云っていた人も有ったけど、どちらですか。

(杉本) 半分正しいですね。父の故郷が長野だったので長野から私の従妹が良く遊びに来ていました。生まれは浅草で、高等学校は東京の小石川高校を卒業しました。親戚が住んでいるのは日本のまほろば信州の佐久地方です。先生のご出身の出雲も日本のまほろばと云われていますね。

(吉野) じゃあ長野の思い出は余り無いんですか。私はこの地、島根の出雲地方、八束郡玉湯村と云う所の出身です。玉造温泉のある村と云った方がいいかもしれませんが、私が子供の頃は随分田舎でした。出雲国風土記にも有るような由緒のある地ですが、宍道湖の横でしたんで、学校のことより宍道湖で魚釣りや魚取りをやったことの記憶が殆どですね。時々、“先生の研究の原点は何ですか”，と聞かれることが有りますので、そのたびに“魚釣りです”，と答えることにしています。“魚釣りのコツは”と問われますと，“魚のいる所で釣ることです。直感で魚がおるかどうかわかるようになります”，と答えます。杉本さんは長野に縁が有って、それに確か山岳部かどっかに所属されていたと聞いたように思いますが、子供から高等学校くらいまでの経験が、その後の、研究、開発などに関係していることが有りますの。

(杉本) 自分は長野で過ごしたことは無いのですが、自然相手が好きだったので高校では山岳部に所属して日本中の山に登りました。特に長野の山は殆ど登っています。一緒にいつも山に登っていた非常に気が合った友人がいます。ただし同じものを見ても、例えば晩秋の山で一面に積もった落ち葉を見て彼はその美しい色彩や落ち葉の匂いで秋の山を体感している一方で、私のほうは同じ木の落ち葉なのに黄色や赤色や緑色になるのは何故とか、落ち葉が醗酵すると良い匂いになるのはなんでかとか変なことばかり考えていましたね。その後友人は早稲田大学の文系の教授になり私は理系に進んだのですが、だから先生が突拍子もないように思える話をされてもいつも非常に興味が有りました。

(吉野) 面白いですね。共通の思いが色々有りますね。ところで長野も色々な地域から成っているでしょうが、諏訪は実は出雲と強い関係があるんですよ。

(杉本) 出雲と諏訪の関係と云うのはどんなことですか。

(吉野) 実は国譲りと云うんですが、出雲の国が天照大神に国を譲ることになって、それで天照大神の孫の瓊瓊杵尊が地上に降りてこられる天孫降臨が有って、やがて天皇家に繋がるんですね。その過程で天照大神が出雲の大国主命に三人の使者を送るんです。最初の二人の神様は出雲の魅力にひかれて居ついてしまうんですが、三人目の使者、武御雷神(タケミカズチノカミ)が“出雲を譲れ”と迫る

と大国主命の二男の建御名方神（タケミナカタノカミ）が“だめだ”と云うことで争うんですね、その結果、建御名方神は負けて、結局出雲の国が譲られることになるんですが、その時建御名方神は諏訪に移るんですね。ですから諏訪大社の御祭神でもあります。要するに諏訪は出雲族である訳です。

（杉本）そうだったのですか、私は諏訪の近くの佐久ですが、長い間に当然長野の地域で人は混じっていますから、私も出雲の血を少し引いていることになるかも知れませんね。次にこの地に来た時は改めてゆっくりこの地を廻ってみたいと思っています。そのためにもぜひ先生がここにおられる間にもう一仕事一緒に何かやりたいですね。

（吉野）こちらこそ是非、よろしく願います。楽しみが増えました。

対談者略歴

【杉本隆一】

昭和27年12月5日東京都台東区浅草生まれ。都立小石川高校、東京工業大学化学工学科、同大学院総合理工学研究科博士課程を経て、昭和56年三井東圧化学（株）に入社。昭和59年4月から1年余り大阪大学に派遣され工学部電気工学科吉野研究室の客員研究生として導電性高分子の合成と応用研究を実施。同じく昭和63年9月から米国マサチューセッツ州立大学ポリマーサイエンス科客員研究員としてメタセロン触媒によるオレフィン重合の研究を実施。その後、平成9年10月からは三井化学（株）生産技術研究所開発4Gリーダーとして、PVC、PS、ABS、PP樹脂開発に従事。平成11年から10年間三井化学と住友化学によるABS樹脂の新規JV会社である日本A&L株式

会社に技術部長として出向した後、平成21年9月から三井化学（株）New Polymers 開発室長として、機能性ポリマーの次世代製品開発に注力。平成24年4月から高知県公立大学法人高知工科大学環境理工学群教授を務める。大阪府堺市在住。趣味は山登りと映画鑑賞。

【吉野勝美】

昭和16年12月10日島根県八束郡玉湯町生まれ。松江高等学校、大阪大学工学部電気工学科、同大学院を経て、昭和44年大阪大学に勤務。昭和63年大阪大学工学部電子工学科教授、その後大阪大学大学院工学研究科教授に配置換え、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻教授併任、平成17年大阪大学名誉教授。その間、ベルリン、ハーンマイトナー原子核研究所客員研究員、工学博士、電気学会副会長、日本液晶学会会長などを歴任、多数の国際会議の議長、役員などを努める。

現在、島根県産業技術センター所長を務めるかたわら、島根大学客員教授、長崎総合科学大学客員教授、大阪大学招聘教授、関西電気保安協会理事、電気材料技術懇談会会長、経産省中国地域太陽電池フォーラム座長なども務める。論文1300編、著書50冊、特許150件を超え、大阪科学賞、応用物理学会賞、電気学会功績賞、高分子学会高分子科学功績賞、日本液晶学会功績賞、IEEE（米国電気電子学会）フェロー、電子情報通信学会フェロー、電気学会フェロー、応用物理学会フェローをはじめ多数受賞するものの、生涯研究者をモットーに電気電子に関わらず広い分野の課題、自然に関わる課題に関心を持っている。趣味は里歩き、故郷宍道湖でのたまの釣り。