

産学官との連携



取材日：2022年5月9日
公益社団法人 化学工学会

早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 応用化学科 教授

まつかた まさひこ

松方 正彦 先生 に聞く

カーボンフリー社会時代の実現へ。
生活にも工業生産にも直接寄与する
触媒化学と膜分離工学を研究 上

聞き手：西岡光利 日本科学機器協会 広報副委員長
岡田康弘 日本科学機器協会 事務局長
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

松方 正彦 先生のプロフィール

【学 歴】

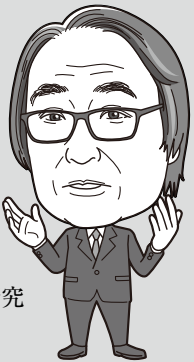
1984年 3月 早稲田大学理工学部応用化学科 卒業
1984年 4月 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程応用化学専攻 入学
1986年 3月 同課程修了
1986年 4月 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程応用化学専攻 入学
1989年 3月 同課程修了
工学博士

【職 歴】

1989年 4月 成蹊大学工学部工業化学科助手
1992年 1月 大阪大学助手(基礎工学部化学工学科)
1996年 4月 大阪大学助教授(基礎工学研究科化学系専攻改組による)
1997年 4月 早稲田大学理工学部応用化学科助教授
2001年 4月 同 教授
現在に至る

【受賞歴】

1995年 3月 平成7年度・化学工学会奨励賞
気相輸送法によるゼオライト合成法の開発と薄膜化
1996年 5月 平成7年度・石油学会奨励賞
高機能性表面をもつ無機材料の合成とその作用に関する研究
1998年12月 平成10年度・触媒学会奨励賞
ドライゲルコンバージョン法によるゼオライトの合成と薄膜化
2001年 2月 平成12年度・日本エネルギー学会進歩賞
石灰石と硫黄および塩素化合物との高温反応に関する基礎研究
2014年 1月 ナノテク大賞プロジェクト賞(グリーンナノテクノロジー部門)
「規則性ナノ多孔体精密分離膜部材基盤技術の開発」



化学プロセスに欠かせない
触媒と膜分離の両輪から
社会に寄与する技術を研究

松方先生は、世界的な課題であるエネルギー問題や、カーボンニュートラル社会の実現などに密接に関係する研究に取り組まれています。主要な研究テーマについて教えてください。

松方 大きくくりで言うとエネルギーや化学品製造にかかわる応用化学・化学工学の分野になり、その中でも「触媒化学」と「膜分離工学」の2つを大きな研究テーマとしています。触媒と膜分離は、化学反応のプロセスで、非常に多くの場合で必要になるものです。化学プロセスは簡単に言うと「反応させ、出来たものを分ける」というものです。その中で触媒は、ある物質を反応させて別の物質に変換するという作用を持ちます。そして出来上がったものは100%の純度ではないので、欲しいものを得るには分離しないといけません。そこで膜分離を行うということになります。

そういうプロセスが化学プラントなどに使われて色々な化学製品が生み出されているわけですが、皆さんご存知のように、カーボンフリー社会の実現ということが世界的な課題になっています。そうした環境問題を社会的な 이슈にして、それらに対応するサイエンスを、触媒と膜分離の視点から生み出すことが、私の研究室の役割だと考えています。

産学官との連携

ちなみに今の研究室は私が学生時代に所属していた研究室です。途中で他大学に移るなどを経て、出身の研究室を引き継いだ形になっていますが、学生当時は「燃料化学研究室」という石油の有効利用技術を研究する研究室でした。

1980年代後半は第2次オイルショックの名残があり、石油についての問題が注目されて、私も興味を持っていました。また、早稲田大学の応用化学は、大正時代から石油の有効利用を研究の大きなテーマにしてきた面があります。そういったことで、石油の有効利用技術という事にも長年取り組み、今も研究テーマの1つとしています。

そうした中、ここ数年、カーボンニュートラルが国際的な課題となってきた中で、30年ほど前から取り組んできたゼオライトという物質を使った触媒利用と分離膜の研究にフォーカスしてきています。

実は化学産業の分野では
分離精製のプロセスで
約40%のエネルギーを消費

先生の研究が、環境面の問題解決にどのような形で寄与してくるのでしょうか。

松方 良い触媒を生み出すことで反応は効率的になり、さらに反応によって得られた生成物を省エネで分離出来る技術を生み出す事で、省エネ型の化学プロセスを作ることが出来ます。そのような新しい化学プロセスを作っていく、あ

るいは大規模に省エネルギーが出来る膜分離技術を作っていくという研究に取り組んでいるわけです。

もしかすると、膜分離技術の研究する事と環境面への貢献が結びつきにくい方もいるかもしれませんが、実は化学産業では、分離精製のプロセスで約40%のエネルギーを消費しています。それは非常に膨大で、この分離精製で省エネが出来なくてははいけません。それがすなわち、化学プロセス全体を省エネルギー型にすることにつながります。

ちなみに触媒と膜分離のどちらか片方だけを研究している研究室はたくさんあるのですが、両方をテーマにしている研究室は、世界中を見てもほとんど無いと思います。

また、CO₂をゼオライトを使った吸着材や膜で分離回収し、さらには回収したCO₂をもう1度資源として循環させるために、例えば燃料や化学製品の原料になるような炭化水素類などに変換する触媒技術の研究にも取り組んでいます。

その他、排気ガスの浄化技術など様々な研究に取り組んでいて、仲間を作って大きな動きにしていきたいという思いを持っています。

以前、化学工学を専門とする先生から、「化学プラントに使われている色々な要素をオーケストラの指揮者のようにまとめる学問が化学工学だ」と、うかがいました。先生の研究も化学工学の分野と重なるように感じます。

松方 そうですね、触媒で起きる

産学官との連携

反応自体を理解することや、分離膜を合成する事はいわゆるケミストリーになりますが、それをいかにデザインして、また化学プロセスに使うためにはどういう事が必要なのか、そもそもどういう化学プロセスを作りたいのかという事を考える面は、化学工学の領域と重なってきます。ですので、化学工学と応用化学の境界領域なのかなと思います。

新しい化学反応を見つける 触媒化学は100年経っても 新しい学問

触媒化学とは、そもそもどのような領域なのでしょうか。

松方 触媒には色々なものがあり、医薬品の合成などに使われる分子触媒といったものもあれば、バイオマスの分野で使われる酵素も触媒に入りますが、私達が対象にしている触媒は無機の固体で「固体触媒化学」になります。例えばアンモニアは、窒素と水素から合成しますが、両者をただ混ぜてもアンモニアは出来ません。

ですが、鉄という固体触媒の上で400℃～500℃の温度でさらしておくとも反応が起き、アンモニアが合成されます。その仕組みとしては、窒素分子のNとNの結合が切断され、そのNが水素のHと結びつくわけです。このように触媒がないと起こり得ない反応を、固体表面を介在させることによって実現するサイエンスが触媒化学です。固体触媒を用いた反応は、大規模なエネルギーに関わる事、あるいは基幹化学原料を作る反応の主流となっています。アンモニア合成について補足すると、1900年頃、窒素と水素から本当にアンモニアが出来るのかという事は、世界の科学界の論争の的でした。その後、いくつかのノーベル賞を受賞するような功績を経て、1930年頃にアンモニア合成は確立されたわけですが、90年～100年が経っても、新しい触媒を使った新しいアンモニアの製造法が研究されていて、今なおホットな研究分野なのです。100年経っても新しいというのが触媒化学と言えるのです。

また、名称が似た学問分野に、触媒反応工学があります。こちらは実際の化学プラントなどで使えるように、社会実装を実現するための学問のことを言います。

では、膜分離工学とはどういうものなのか、ご教示いただけますか。

松方 プロパンとプロピレンの分離が分かりやすいので、それを例にお話します。石油精製時などには、プロパンとプロピレンが混じったガスが発生します。このうちプロパンは燃料になり、プロピレンはプラスチックなどの原料になります。ですから両者を分けて、化学製品の原料であるプロピレンを得るために分離精製がされるわけです。その方法は、一度冷やして気体を液体にし、その後で再び熱を加えて蒸留する手法です。プロパンとプロピレンの沸点が違う事を利用して分離するわけですが、これはエネルギーの面で大変非効率であることにお気づきでしょうか。なぜかという、高温だった気体を冷やし、またもう一度熱を加えるということを行っているわけです。さらに、エネルギーのロスだけでなく、設備も大がかりで、高い蒸留塔が必要になります。羽田空港近くでは建物の高さ制限があり、蒸留塔を少し低くして2本にしています。この分離を膜で行えるようになれば、非常に良いメリットが生まれます。気体を冷やす必要がなく、ガスのままでプロパンとプロピレンを分けられるので、ほぼエネルギー消費はゼロに近くなります。必要エネ

産学官との連携

が開きます。このマイクロ細孔の中で反応をさせたり、膜に利用したりすることで、省エネに繋がるのが生まれるのです。ゼオライトで分離する原理は2つで、1つは分子の大きさで分離する、もう1つはマイクロ細孔ならではの吸着力の違いで分離します。また、ゼオライトは色々な種類があり、いくつかのゼオライトは強い親水性を示すので、水を選択的に集めてくれて、バイオエタノールを脱水する時などには大いに役立っています。実際に燃料用エタノールの製造では、工業用に大規模に使われるようになってきました。ゼオライトを膜として利用するにはフィルム状に成型することが必要で、その成型技術も長年研究してきました。そして出来たゼオライトを使用して機能を検証し、さらになぜ検証されたような触媒性能が得られるのか、膜としての分離機能が発現するのかということの研究を繰り返しているわけです。ゼオライトで膜を作るには、マイクロ細孔のサイズを揃えたりすることが大変なのでしょうか。松方 そうではありません。マイクロ細孔は結晶の中に開いているものですので、きちんと結晶を作れば同じ大きさにしかありません。ゼオライトのマイクロ細孔は、結晶の隙間に出来るというのではなく結晶学的に開いている穴なのです。ただし膜の面で見ると、ゼオライトを使った分離膜は極めて特殊な

膜だと言えます。例えば、海水と淡水を分けるような膜で有機高分子膜というものがあります。これは非晶質の材料なので、例えばロール成型のようにして、膜のサイズを伸ばしていくことが出来ます。しかしゼオライトは結晶なので、そうしたことは出来ず、結晶を緻密に隙間なくきちんと積み重ねて膜にする事が必要になります。もし隙間があると、それはゼオライトのマイクロ細孔よりも大きいものになることはほぼ間違いないので、分離で得ようとする目的の物質が隙間の方に流れていき、正しい分離は出来なくなります。

当初、ゼオライトの研究は 猛烈な批判と苦闘の連続

ゼオライトの研究はいつ頃始められたのでしょうか。

松方 もともと大学4年生の時に研究テーマにしていました。それを触媒として使うことを思い出し、もしも膜にすることが出来たら面白いのではないだろうかと考えて、1992年頃からゼオライトの研究を始めました。当時、ゼオライトを膜にするとといったような学術論文は1つもなかったのです。分離工学が研究分野になったのはこの頃からで、今も取り組んでいる「触媒、膜、ゼオライト」という研究内容が固まってきたわけです。しかし、当初は猛烈な否定、批判と厳しい言葉ばかり浴びました。それは、高名な化学工学の先生によるもので、ゼオライトで膜を

ルギーはプロパンとプロピレンの混合物を膜分離装置に送り込むための送風機の動力程度で、非常に大きな省エネになります。プロピレン、さらにエチレン等は基幹の化学製品で、それだけで世界の約0.3%前後ものエネルギーを消費していると言われ、大変なエネルギー多消費産業なのです。これが膜分離によって、ガスを常温で分離出来るようになると、環境への負荷は格段に減り、大変な省資源にもなるのです。膜分離の研究を始めた若い頃は、こうした有用性まで考えていたわけではありませんでしたが、今は「分離技術に膜を使うことで、他の技術では出来ないレベルの大規模な省エネが出来る」ということは、世界的なコンセンサスになっていると言っていると思います。触媒にも膜にも活用されCO₂回収などに役立つ特性を持つゼオライトゼオライトという物質をよくお使いだということでした。どのような物質でどう役立つのですか。松方 触媒と膜のことを話してきましたが、私はその大部分にゼオライトを使っています。ゼオライトはケイ素・アルミニウム・酸素・ナトリウムというような土と同じようなありふれた元素で出来ているもので、非常に面白い物質なのです。高分子の状態になると複雑な構造を持ち、分子を取り込むことが出来るような微小な「マイクロ細孔」というの

産学官との連携

作ろうという私のような研究の動きがある事を知って、詳細な計算までして、強烈に否定をしたわけです。先ほど話した、ゼオライトを膜にする時に出来てはいけない隙間の穴をピンホールというのですが、その先生は、ピンホールがこれだけ出来る事で分離性能は失われることになり、ゼオライトで膜は不可能だということを示しました。私だけでなく世界中のゼオライトの研究者が、このような猛烈な否定、批判を浴びたのです。

しかしゼオライトで膜を合成した結果、出来たのです。つまり否定は正しくなくて、良い結果が得られました。

今話したようにゼオライトの研究分野は、否定され続けたものを「いや、出来ました」と示して見せる繰り返してでした。正直、悪口めいた否定にも負けない強い心というのも、この研究には必要なものだったと思います（笑）。

ゼオライトの結晶や膜の大きさはどのくらいなのでしょう。

松方 ゼオライトの種類により多少違いはありますが、ゼオライトの結晶は1 μm から数 μm で、そこにあるマイクロ細孔を物質が通らなければいけません。

そのゼオライト膜に対して有機高分子膜は10分の1から100分の1の薄さです。ゼオライト膜の方が分厚いわけですが、この事についても膜が出来るわけがないという否定の声があがりました。有機高分子の膜より断然分厚いゼオライト

の中を、有効に物質が通るわけがないというものでした。これも結果としては、きちんと物質の選択制があって分離が出来るという結果となりました。

しかし否定の声にはまだ続きがあり、今度はゼオライトのような厚い材料で、工業的な分離膜に使えるような透過速度が出せるわけがない、というものでした。

先生は結果で証明してこられたわけですね。

松方 そうなりますね。そして私だけでなく、同じテーマで研究していたアメリカやヨーロッパの友人も皆言われてきました（苦笑）。

猛烈に否定された透過速度ですが、特にバイオエタノールの脱水膜で言うと、ゼオライト膜は有機高分子膜よりも1桁から2桁も透過流量が大きく、より早い分離が出来るという、否定の声と真逆の結果を導き出せました。これは恐らく、ゼオライトの強い親水性によるものだと思います。

そういった苦しさや困難が多々ありましたが、新しい研究がどう評価されていくのかは、やはり結果論という事があります。最初にゼオライト膜を作ろうとした時に、ピンホールがなく合成が出来る確証があるのかと問い詰められても、取り組んでいる最中には分かりませんでしたし、透過性能について否定的な意見を出された時も、理論的にはこれだけ可能だという事が言えるわけでもありませんでした。

当時は、透過のメカニズムが分

かっていなくて、それを明らかにしようとしていた段階でした。しかし、やったら出来た！というのは幸いだったと思います。

**ゼオライトの合成技術と膜に応用する着眼点を評価
化学工学会・奨励賞を受賞**

挑戦なくして得られなかったことであり、新発見だったわけですね。

松方 そういうことになるのでしょうか。私は最初にゼオライトの合成の研究から始めたのですが、日本で合成の研究をしている先生がほぼ皆無だった時代でした。当初から膜に応用したいという事を考えていましたが、合成が出来ないと膜にも出来ませんので、そういう順序で研究を進めていた中で、“膜に応用したい”という展望までの事柄をまとめた論文で「化学工学会奨励賞」をいただきました。この時、実証出来ていた事柄は、完全にケミストリーの内容でしたので、今思うと化学工学会がよく奨励賞に選んでくれたと思うのですが、当時はそれが励みになりました。

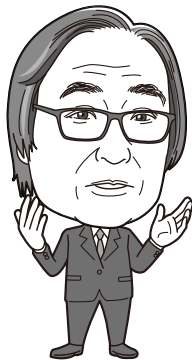
この頃、世界中には同じ事を考える人達がたくさんいるものなのだなあ…とも感じました。私が1992年にゼオライトを膜に応用していこうという研究を始めると、まさにその頃から、次々にゼオライトを膜にするという論文が世界中で発表されたのです。その1つがオランダのデルフト工科大学のグループでした。彼らは元々アムステルダム大学にいて、私は“石炭のガス化

の研究”の仲間として旧知でした。そんな彼らが専門分野を切り替えて、いきなりゼオライト膜の論文を出したので、「地球の反対側のオランダで自分と全く同じようなことを考えて、専門まで変えて研究を始めて、それが友達だった」事に大変驚いた思い出があります。

触媒と膜分離の両方を研究している研究室は、ほとんど例がないということでした。両方の研究で生まれるメリットを教えてくださいませんか。

松方 反応と膜の両方を一緒にすることで得られる例を、改めてアンモニア合成の例でお話しします。アンモニアの合成が難しい理由に、熱力学の制約があるため、どんなに温度を上げても大量に作れないということがあります。アンモニアになることに寄っていけないのです。そこを今は、高い圧力をかけることで強引に進めています。しかし膜を活用すると違うことが起きます。本来、熱力学の制約で出来ない生成物が膜の働きで寄っていく事が起きて、一気に生成物の収率を上げることが出来るのです。

また、反応と膜を組み合わせた



産学官との連携

メンブレンリアクターというものがあります。私は、この研究をしたくて、触媒と膜の両方の研究を行ってきたというところがあります。

では、今例を出したメンブレンリアクターの中で触媒と膜と一緒にやっていくかということ、そこはまた別の話になります。なぜかという触媒と膜は、発揮する機能が違うので、寿命が違うという問題があるのです。仮に、触媒と膜に同じゼオライトを使っていたとしても、機能が違うために寿命は違います。その両者を組み合わせて実用的な物を作り上げることは困難であろうというか、良いことにはならないだろうと思うのです。基本的には触媒を膜の周りに充填する形で、触媒は触媒、膜は膜で別に扱う形をとっています。

触媒、膜、両方の研究が出来ていて知見があって、化学プロセスに組み入れていく時に両者の面から良い解決法を導きだせるというのがメリットだと言えるでしょう。

CCUには、松方研究室で取り組む触媒化学、膜分離、両面が重要に

地球環境問題について、松方先

生の研究がどのような形で寄与していくのか、例えばCO₂の問題に関して、教えていただけますか。

松方 幸いなことにゼオライトがCO₂の問題に関して、色々な局面で役に立ちそうだということが分かっています。研究をやり始めた30年ほど前は分かっていたなかった働きなのですが、研究しているうちに明らかになってきた嬉しい特性が色々あったわけです。

まずCO₂の回収です。この方法は色々あるのですが、1つの方法がゼオライトのマイクロ細孔、あるいはそれに似たマイクロ多孔体材料を使って集めることが出来ます。そして回収したCO₂を化学原料に転換していき、さらにその生成物を分離するステップがあります。そのステップごとにゼオライトが色々活躍が出来るのです。

CO₂を再利用しようというCCU（Carbon Capture and Utilization）という言葉を目にしたことがある方もいると思います。そのことに対する触媒や分離技術に色々チャレンジしています。言い方を変えると、CO₂から燃料を作る時には、触媒の力も分離技術の力も必要だと言えます。

**触媒化学と膜分離を活用し
環境問題に対応するサイエンスを
生み出す事が私の役割です**

次号「科学の峰々」では、引き続き **松方 正彦**先生にお話を伺います。