

産学官との連携

産学官との連携

CO₂を化学的に変換することで 工業原料を生成。 カーボンニュートラル社会の実現に寄与

科学の萌芽 11

東京理科大学 工学部工業化学科 助教

本田 正義先生



本田 正義 先生のプロフィール

2008年 3月 筑波大学 第三学群 工学基礎学類 卒業

2008年 4月 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻
博士前期課程 入学

2010年 3月 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻
博士前期課程 修了

2010年 4月 東北大学大学院 工学研究科 応用化学専攻博士後期課程 入学

2013年 3月 東北大学大学院 工学研究科 応用化学専攻博士後期課程 修了

2012年 4月 日本学術振興会特別研究員 (DC2)

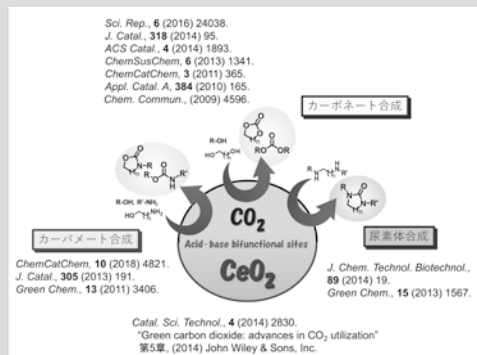
2014年 4月 学校法人中央大学研究開発機構 機構助教

2015年10月 国立研究開発法人理化学研究所 特別研究員

2019年 4月 東京理科大学工学部工業化学科 嘱託助教 現在に至る

〈研究テーマ〉

二酸化炭素から有用化合物を合成する固体触媒の開発
バイオマス由来化合物からのモノマー、ポリマー合成



酸化セリウム触媒によるCO₂変換

聞き手：

梅垣 喜通 日本科学機器協会 広報委員長

高橋 秀雄 〃 広報副委員長

岡田 康弘 〃 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)

CO₂を変換～活用できれば 豊富な工業原料になりうる

本田先生はCO₂を有効利用する研究に携わってきたとお聞きしています。これまでの研究の概要を門外漢向けに教えていただけますでしょうか。

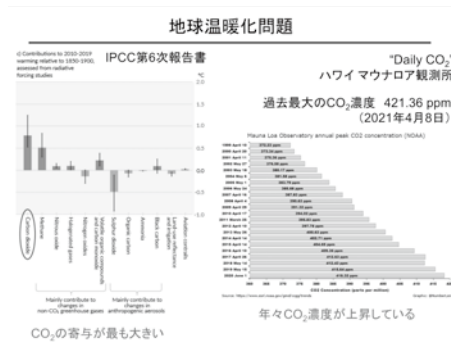
本田 大雑把に私の研究テーマについて述べると「CO₂を化学的に有用な化合物に変換する」事になります。研究のキーワードとしては「二酸化炭素、すなわちCO₂」そして「触媒」、さらに「バイオマス」、また少し専門的ですが「重合」が挙げられます。

今日は主にCO₂関連の事についてお話しいたします。まず、学生時代から取り組んでいるのが「二酸化炭素とアルコールからの有機カーボネート合成触媒とプロセスの開発」です。この研究を始めたのは2012年で、当時は東北大学工学部の修士課程で、また、日本学術振興会特別研究員でもあるという立場でした。

カーボンニュートラル社会の実現が産業界にも社会全体にも大きな課題となっている今、とても興味深いテーマです。

本田 折しも昨年2021年8月9日に、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）による、第1作業部会の第6次報告書が発表されましたので、気候変動問題の背景を簡単におさえておきます。産業革命以後、大気中のCO₂濃度は上

昇の一途をたどっています。継続的にCO₂濃度を計測しているハワイのマウナロア観測所のデータによると、去年2021年4月、過去最大のCO₂濃度421.36ppmが記録されています。



大気中に存在するこのCO₂を活用出来ればよいわけですが、現状、CO₂がどれくらい化学原料に使われているかという非常に乏しいものです。2017年のデータでは、世界の総CO₂排出量は368億トンとなっていますが、CO₂を変換して化学原料に活用出来ている量はその1%にも満たないものです。最も多いのが尿素で、ほぼ全てCO₂を原料としています。2017年の年間生産量は1億6900万トン程度に過ぎません。

しかし見方を変えると、大気中のCO₂から有用な化合物をたくさん作ることが出来るようになれば、極めて豊富に化学原料があることになるわけです。

CO₂を原料・資源と見るわけですね。

本田 CO₂は不燃性で、無毒でもあり、活用出来れば有益な化学原料になるわけです。

それにはCO₂を化学的に変換しなければいけませんが、大きく2つ

の手法があります。

1つが還元的手法で、もう1つが非還元的手法です。私が学生の頃から一貫して研究しているのは非還元的手法で、一方で世界的に圧倒的に研究者が多いのは還元的手法です。

還元的手法をごく簡単に言うと、水素を持ってきてCO₂を変換します。主にCO₂のOを外していく考え方と例えてもよいかもしれません。それにより、ギ酸やメタノール、メタン、炭化水素などを生成します。しかし水素を持ってきて変換する時にエネルギーを消費してしまうのがネックなのです。

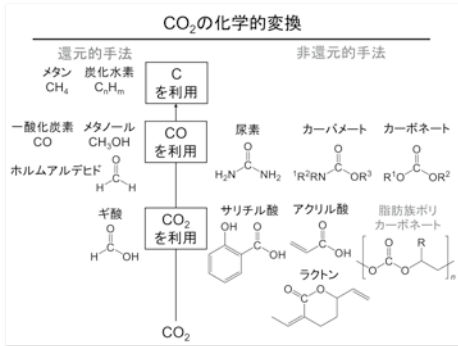
その一方で非還元的手法は、CO₂を“取り込んで組み込むことで別の化合物を作る”アプローチです。こちらですと外部からそれほどエネルギーを必要とすることがなく変換できます。このアプローチで、サリチル酸、アクリル酸等が出来、そこからさらにCO₂の中のCとOだけを利用することで、先ほども話に出た尿素、さらにカーバメート、カーボネートといったものが得られます。尿素は既に工業的に活用されています。そしてカーバメート、カーボネートも工業的に有用になる化合物です。私がターゲットとしているのは「脂肪族ポリカーボネート」と言うもので、いわゆるポリマーのことになります。ポリマーは10年、20年と長いスパンで使用できる工業製品になりえるので、その長い期間、CO₂を製品の中に閉じ込めておきながら生活用品に利用出来るので、大気中への放出を防ぐことが出来ます。

『科学の萌芽』とは

各分野で活躍する次世代の科学技術の担い手にご登壇いただき、成功までの軌跡や知られざるエピソードなど、サイエンスの“今”と“未来”が見えてくる企画です。

取材日：2021年10月21日
株式会社池田理化学会議室

産学官との連携



ポリマーにCO₂を閉じ込めて利用する事で、大気中のCO₂を削減出来るわけですね。

本田 はい。ポリマー以外の非還元的手法でCO₂を変換して生成したものは、それよりも短い期間で消費されてCO₂が外に出てしまいます。また還元的手法で作ったものは、さらにもっと短く、ほとんどが燃焼されるため、使用時にはすぐにCO₂が大気中に放出されるようなものになってしまいます。

さらにポリマーの長所は、原料として高い付加価値を付けられる可能性も有していることです。工業製品として広く活用される可能性を持っていると考えています。

樹脂の原料物質をCO₂から高収率で生成する事に成功

ポリマーを「二酸化炭素とアルコールから」合成するという事ですが、詳しくお聞かせいただけますか。

本田 CO₂からポリマーを合成する一般的な方法にはホスゲン法というものがありますが、ホスゲンが猛毒なために特殊な設備が必要であり、また、合成に伴って不要

である塩が副生物として出来てしまうこと等が問題点となっています。

私はそれとは別のアプローチをとっています。CO₂とメタノールを、酸化セリウムという触媒により反応させて、炭酸ジメチルというモノマーを合成するという方法です。炭酸ジメチルは、ポリカーボネートの原料になります。つまり高機能樹脂を作る原料となるわけです。

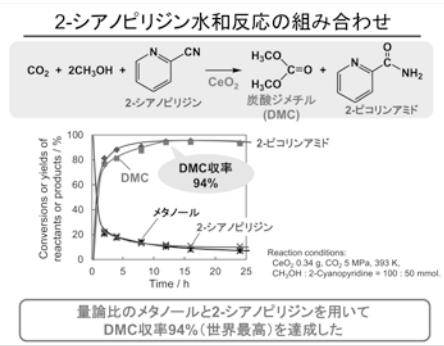
しかしこの反応をそのまま行っても、実は炭酸ジメチルの収率はわずか0.7%にすぎません。つまりたくさんCO₂とメタノールを使っても0.7%しかターゲットの炭酸ジメチルが出来ず、残りは未反応のままになってしまいます。

そこで反応で副生する水を除去することによって収率を上げようを試みました。水を除去する場合、普通はまず無機脱水剤を組み合わせることが頭に浮かぶのですが、これは大体100℃以下でのみ脱水能力を持ちます。私のアプローチの120℃の反応系にはマッチしませんでした。では有機脱水反応を用いようかと試みたのですが、反応しなくてもよいメタノールの方と反応するなど、上手くいきませんでした。

非常に悩んで色々試行錯誤をした結果、脱水反応の進行を制御しなくてはならず、それを制御するために、触媒上で進行する「ニトリル水和反応」というものが良いのではないかと考えました。

ニトリルというのはシアノ基(-CN)を持つ有機化合物の総称です。色々なニトリルを試したところ、2-シアノピリジンというもので、非常に

素晴らしい結果が得られたのです。もともと0.7%しかなかった炭酸ジメチルの収率が一気に94%にも高まったのです。



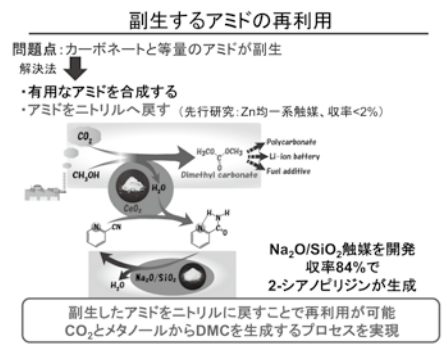
0.7%が94%にまでとは劇的な向上ですね。

本田 これは炭酸ジメチルの収率の世界最高数値でした。実はこの間に2年から3年を要しまして、94%という数値を見た時は、本当に嬉しかったです。この反応は、内容的にも非常に優れていました。専門的な事になるので詳細は省きますが、普通は脱水剤をたくさん入れて収率を上げるというようなアプローチが多いのですが、そうした考え方とは違って、副生するであろう水と等量のニトリルを用いる言わばきれいな反応で水を取り去ることに成功出来たのです。

ここで、収率は劇的に上がりましたがアミドが副生されるという課題がありました。このアミドから別の有用なものを作ることは考えにくく、どうしようかと思案した末、アミドを反応の中で再利用することを考えました。「ニトリル水和反応」を利用したと言いましたが、そのニトリルに、副生したアミドを戻すわけですね。これを、新しい触媒であ

るナトリウムシリカ触媒というものを開発したことで、成功することが出来ました。

まとめると、CO₂とメタノールの反応にニトリルの水和反応を組み合わせると炭酸ジメチルが出来る、その時アミドが副生するがニトリルに再利用出来るというサイクルを構築出来たのです。



その炭酸ジメチルはポリカーボネートの原料になるので、CO₂からポリカーボネートを作る道筋を立てることが出来たわけですね。

本田 ということになります。今話したのは、少し化学的に言うと直鎖状のカーボネートというのになります。それだけでなく環状のカーボネート、あるいはアミンを入れることによってカーバメートというものも合成出来、さらにはアミンとCO₂を使った尿素体合成といったことも出来る、ということも明らかになりました。

さらにその後、直鎖の長いジオールという物質とCO₂からポリマーを作ることも作るアプローチも出来ました。しかしながら、出来たポリマーは分子量が小さく、こちらの方は実用には少し難しいかなと感じています。

産学官との連携

また、そうした合成のことだけでなく、色々な物性を測ったり、構造が変わる事による反応の変化などを検証したりなどの研究もしてまいりました。

CO₂から生成されたポリマーは、既に実用化その一方で課題も

CO₂からポリマーを作っていく研究を現在も深めているわけですね。

本田 主にそういうことになります。現在は東京理科大の工学部工業化学科の杉本裕教授の研究室に所属しています。この研究室は、世界で初めてCO₂とプロピレンオキシドというものから、触媒を使いポリマーを作ることが出来ることを論文発表した井上祥平先生（故人）の流れを汲む研究室です。井上先生のその論文は1969年の発表で、当時は日本も高度経済成長期の真ただ中であり、CO₂の反応としての注目度は低かったと聞いています。環境問題が世界的な課題となってからクローズアップされるようになったということです。

その研究を受け継ぎながら、触媒を変えてより効率的な合成を探求しています。現在、40℃くらいの温度で1～2日反応をすることでCO₂からポリプロピレンカーボネートを得られるようになりました。

しかし、その研究を始めた頃から「ガラス転移温度が低い」という課題がありました。ガラス転移温度とは、柔らかい状態から“ガラス状態”と言われる固化した状態に

変化する温度です。これが34℃なので、室温程度で変形してしまうために扱いづらく、ガラス転移温度を上げていこうという研究に取り組んできました。そして、少し専門的な言葉になりますが「側鎖に嵩高い置換基を持つポリカーボネート」の構造を作っていくことで、それが可能になるだろうという考えの下、試してきました。34℃から最初は54.7℃、さらに70.4℃…と上げることが出来、「アダマンチル」という側鎖を持つものにおいて157.5℃のガラス転移温度にまで高められました。これは最も広く使われてきた“芳香族のポリカーボネート”のガラス転移温度、154℃と比べてもほぼ同等で、実用化にも有益なものを生み出せました。

それは、今後実用化されていく話もあるのでしょうか。

本田 実はこちらは、もう実用化されています。小規模ながら、住友精化でポリプロピレンカーボネートを製造しています。従来からある芳香族のポリカーボネートは、ヘルメットやスーツケース、CDやDVDの基盤などエンジニアリング・プラスチックとして使われてきました。上手くすれば、CO₂から作ることが出来た私たちのポリカーボネートも、そうした様々なものへ活用されていく形が期待できます。ただし現時点では、企業で使っていたいているものの、規模が少量にとどまっています。ここは企業ごとの生産体制の事情なども絡んできますが、使える用途を広げ、量を

産学官との連携

増やしていくことが課題であると言えます。海外では、例えばアメリカやヨーロッパでは、プラントを作って大規模に生産するようなことが始まっていて、中国でも同様の事が行われているということは耳にしています。

付け加えると、今お話ししたCO₂からのポリカーボネート合成では、使える触媒が、私たちの研究室で複数種類発見出来ていますので、企業の状況などに合わせて、色々と試してもいけるかなと思っています。

先生がこれから取り組んでいきたい研究テーマをお聞かせください。

本田 これまで行ってきたCO₂を有用な化学物質に変換していく、そして社会に活用出来るようにしていくということは、これからもやっていきたいと思います。

また今日はあまり話すことが出来なかったのですが、バイオマス変換にも取り組んできていますので、そちらの方も深めたいと思います。私の履歴として、固体の触媒の分野、そして高分子の分野にも取り組んできたので、せっかくですのでそれらを活かしバイオマス由来のプラスチックなどの研究も行っていきたいと思っています。

もう1つ、汚水や汚物をポリカーボネートで上手に吸収出来ないものだろうかとも考えています。そのように環境に寄与する研究を追求していければと思っています。

カーボンニュートラル社会の実現に向けて感じる懸念は

日本を含めた世界120以上の国と地域が、2050年のカーボンニュートラルの実現を目指しています。研究者の目線から、目標達成の現実性をどうお感じなのか、お聞かせいただけますか。

本田 悩ましいのが、石油はとても使い勝手が良く、色々なものが安価に、高品質に作れてしまうのです。この点を踏まえたうえで、世界が本腰を上げて取り組めるのかというところを解決出来ないとか、机上の空論になってしまうかもしれない危うさはあると思います。

そもそも、自然界に存在している原料から製品を製造し、それが最終的に問題なく土に還ることが出来ればカーボンニュートラルは保たれるのですが、“自然に還る”点を追求すると耐久性の低いものが出来てしまいがちです。石油で作られている丈夫なものをバイオマス由来のポリ乳酸で作ると2、3年でボロボロになってしまうといったことがあるのです。ですので、いかに実用的なポリマーを作っていくのかは今後の課題です。方向性としては、例えば特定の光や熱を当てた時だけポリマーが分解することが出来るようにする等、工夫すべき手段は考えられます。

コロナ禍でテイクアウトが多くなり、弁当の使い捨て容器の消費が激増したというニュースを思い出しました。ペットボトルも、便利であ

るがゆえに使われ続けています。技術だけでなく、その便利さに対して感じている意識の転換が必要なのですね。

本田 その通りだと思います。過剰包装をなくしていくことが、ヨーロッパではいち早く進んでいた事を考えると、そのあたりは政策次第で方向付けをしていく事も出来ると思います。

また、ペットボトルの話が出ましたが、分解して循環していくために、化学の力だけでなく微生物の力も注目されています。微生物の中にペットボトルを分解してくれるような菌がいて、日本の研究者の方が発表しています。(編集部注・吉田昭介奈良先端科学技術大学院大特任准教授らの研究)。正直なところ、プラスチックやCO₂の絶対量を減らす事を化学分野の技術だけで行うことは不可能と言えます。今お話ししたように、我々も努力を重ねながら、それを他の分野の方の成果と併せていくことで、2050年のカーボンニュートラル実現という目標に向かって、社会をより良くできたらと考えています。

脱炭素の試みは、試行錯誤の過程にあるということですね。

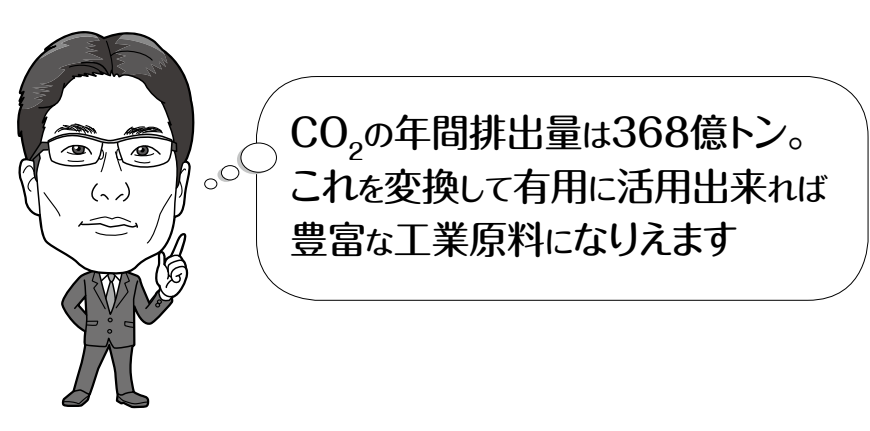
本田 そう言えます。「これを作る事さえ出来れば必ずCO₂を削減出来る」という絶対的な方法が存在するわけではありませんし、企業によって置かれている立場も違います。そして力を発揮できる得意分野がそれぞれあります。なので、

色々な分野の方がアイデアを出し合って、用途に合わせたアプローチを試みていくことが大切な氣がしています。

優秀な人材の確保・育成は企業と同じく学会でも課題

ご自身をはじめ、日本の若い研究者が置かれている研究環境について思う事や、感じている課題をお聞かせいただけますか。

本田 私は国立大学で研究をスタートして、その後は一時期国の研究機関で、そして現在は私立大学で研究にあたっている履歴があり、色々な研究現場を体験してきました。ひと言で言うと、全てが大満足という環境は現実的になかなか無いものだと感じています。資金、人員、設備、時間的な自由等、どれかが十分であればどれかが不足しがちということが起こります。その大変さを肌で感じて来ただけに、その困難を乗り越えて立派な成果を挙げられている研究者の方々は、率直に凄いという敬意を覚えます。



産学官との連携

そうした中、最近では国の政策として、若い研究者に比較的手厚い研究費を配分していこうという動きがあり、感謝しております。ただ、長い目で研究を考えていくと、今後の研究の資金面はどうなっていくのだろうと不安を感じるのが正直なところ です。

海外各国の研究費に目を向けると、ある調べではアメリカが50兆円、中国が45兆円、それに対して日本は1/2000以下の18億円というほど規模が違います。近年、やはり中国の勢いは著しく、日本の優秀な人材を引き抜くようなオファーがあるといったことも耳にします。限りがある国家予算をどう使っていくのかには色々な考えや議論が、この予算にあるわけですが、研究というものが大切なものでありお金をかけるべき分野であるという姿勢の違いが現れているのかなとは思っています。

社会や未来に対して有益で、また国益にもつながっていくような、いわゆる良い研究成果が生まれるには、やはりある程度「伸び伸びと研究出来る環境」が必要になるのではないかと感じています。

大学生や若い世代が科学を学ぶ姿勢や環境について、感じられることはございますか。

本田 私も大学では教員という立場にあります。優秀な学生が多数いる一方で、どうしても遊びに来ている感覚で大学に来ている学生もかなりいます。そんな中、少子化の問題は今後も大きな課題としてあり続けるので、どう興味を持ってもらうのか、またどのように良い人材を確保するかが、大学のみならず学会の課題としてもあります。

私は主に触媒学会という学会で活動していますが、触媒に興味を持ってもらうために高校の授業で取り上げてもらうべく、高校の授業1コマ分の指導案を作って高校の先生が授業をしやすくするようなアイデアなどを試んでいます。そして触媒に触れる機会があれば、若者にも興味が芽生えるきっかけが増えると思います。

企業が人材確保に大変ご苦労されていますように、学会としても、従来の形にあぐらをかいているような事ではいけなくて、新しい取り組みをしていかなければいけないのだと感じる次第です。そうした中で、今後、科学機器協会にお力をいただくことがあるかもしれません。これからも色々ご協力をお願い出来れば嬉しい次第です。

今後のご活躍に期待いたします。

次号「科学の峰々」では、京都大学白眉センター 科学技術振興機構 JST 馬場 基彰先生にお話を伺います。