

実験でわかる 触媒のひみつ

博士(工学) 廣木 一
博士(工学) 里川 重 共著

コロナ社

発刊によせて

私たちは沢山のモノに囲まれて生活しています。家や家具の材料となる材木、新聞紙や書籍などの原料となるパルプ、身にまとう衣類の原料となる綿や絹、羊毛などの自然素材を除いて、日常生活用品のほとんどが化学反応により作られています。その化学反応を順調に進めるのに欠かせないのが触媒です。

例えば、レジ袋に使われているポリエチレンは、触媒の働きでエチレンを相互に結合してきわめて長い分子に変化させることで作り出されているし、飲み水やお茶などを入れるペットボトルはエチレングリコールとテレフタル酸ジメチルという物質（化合物）を触媒で相互に結合して合成されています。触媒なしではポリエチレンもペットボトルもできませんし、あらゆる化学製品も合成することができません。

元素の周期表で最初に出てくる原子番号が1の水素はきわめて反応性が高い危険な物質です。水素は酸素と反応して水になりますが、身の回りの温度（室温程度）で酸素と混ぜただけではまったく反応は起こりません。しかし、ごく少量の白金ブラックを加えると、温度を高くしなくても爆発的に反応して水になります。白金ブラックは水素と酸素の反応の触媒としての役割を果たしているのです。

本書では取り扱わなかったようですが、私たちの体の中で起こる化学反応のほとんどは酵素と呼ばれる触媒が重要な役割を果たしており、あらゆる生物の生命維持や繁殖などにはなくてはならない物質です。

では触媒ってなんだろう。どんな働きをするのだろうか。どんなところで使われているのだろうか。その正体はなんだろう。これらの疑問に答えるために書かれたのが本書です。少しばかりの薬品や実験器具を使って、小学校の中学年以上ならば誰にでもできるやさしい実験を通して、触媒がかかわる化学反応を体

験して欲しいと願っています。

第2章「触媒とはなにかを体感する実験」に先立って「触媒」という言葉を辞書で調べてみましょう。まずは自然科学関係の用語を詳しく解説している理化学辞典（第5版）を見ると、「熱力学的にみて化学反応の進行が可能である物質系に、比較的少量を添加して反応を促進させ、あるいはいくつかの可能な反応のうちで特定のものを選択的に進行させる物質。」と説明されていますが、難しい言葉（化学用語）や表現で説明されているので、かえって分からなくなるかも知れません。では、身近にある辞書、例えば、三省堂国語辞典（第七版）には「それ自身はすこしも化学的変化をしないが、それがまじると化学反応の速度が〈はやく/おそく〉なる物質。」広辞苑（第六版）には「化学反応に際し、反応物質以外のもので、それ自身は化学変化を受けず、しかも反応速度を変化させる物質。」などと記されています。要約すると、触媒は自分自身の姿やかたちに変化を起こさないが、他の物質同士の反応を円滑に進める物質であると言えます。

ところが、話はそれほど簡単ではありません。姿かたちを変えてしまう触媒もあり、しかも、ほとんどの触媒は特定の化学反応だけに有効だからです。千の化学反応があるとすれば千種類の触媒があるといえるのです。ところで、化学の英語はもちろん chemistry です。ところが、chemistry の意味するところは「化学」だけでなく「化学的性質」や「化学反応」も含まれており、会話では人と人との相性や共通点など「相性が良い」と言うときに chemistry という言葉を使うようです。一見複雑そうに思える触媒も相性が良い物質同士を結びつける chemistry なのです。

2020年1月

白川 英樹

（筑波大学名誉教授，日本学士院会員）

ま え が き

本書は子供たちに理科の面白さを知ってもらい実験レシピを提供するために作られました。子供たちに実験する機会を提供するのは、学校の先生、保護者の方、地域のボランティアの方などを想定しています。ただし、化学実験ですので化学の基礎知識がある方でないとわかりにくいこともあるかと思います。読み進める中でわからない物質や用語があった場合は、ぜひ化学の基礎知識がある方にご相談ください。必ずしも化学の専門教育を受けている必要はありませんが、化学物質を扱いますので化学物質を安全に使用するための知識や技能は必要です。

本書では、実験をするのは小学生から一般の大学生や社会人までを想定しています。未就学児の場合には、保護者のサポートが必要です。実験教室というと小学生向けの行事と思う方が多いと思います。しかし、実際に実験教室を行ってみると興味を持ってくれるのは子供たちよりもむしろ保護者の方々であることも多くあります。本書で取り上げた実験レシピはそんな化学の知識のない方でも五感で感じて楽しめる実験です。さらに化学の知識や経験のある方であれば、より一層楽しめます。ましてや化学の専門家の方々は驚きさえ感じてくれるかもしれません。化学を「面白い」と思うことから、化学を「不思議」だと思い、さらに「なぜ、どうして」と考えをめぐらせ、「知りたい」気持ちを醸成できれば、本書の目的を達成できたと考えます。

また、本書には各実験ごとに動画サイトにアクセスできるQRコードがっています[†]。著者は触媒化学を専門にしていますが、論文に書いてある手順をトレースしても実験を再現できないことがよくあります。実験には文字になら

[†] コロナ社の本書の紹介ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339067606>) からアクセスできます。

ないノウハウがつきもので、化学実験は勘と経験によるところが大きいのです。そのような難点を補う役割をしてくれるのが動画です。最近の若い人たちにとって動画を見たり撮ったりすることはごく日常的なことです。そこで本書でも実験動画による解説を取り入れました。文章で実験レシピを正確に紹介し、動画で実験のノウハウを視覚的にとらえることで、実際に実験を指導する先生や保護者、地域ボランティアの方々に、より正しく、安全に実験を指導していただくことができると考えました。この動画情報も有効にご活用いただきたいと思います。

本書のテーマは触媒です。触媒は生活にかかわるエネルギーやモノ作りに欠かせない材料で、そのことは第1章で説明しています。ただ、残念ながら日々の生活の中で触媒の効果を感じることはできません。それは触媒がエネルギーやモノ作りの根幹に関わっていて、おもに化学工場や反応装置の中で働いているためです。そのため2～9章で取り上げた反応は実際の暮らしの中で使われている反応ではありません。しかし、本書では簡単に実験できて効果が目で見てわかる反応を選んだことで、化学の知識の有無にかかわらず多くの人の興味を引くものが提供できたと考えます。

現在、地球温暖化問題が世界中で議論されています。二酸化炭素をこれ以上排出しないためには、資源・エネルギーの新しい使い方を発明・発見する必要があります。触媒はこれまでも資源・エネルギーを安全かつ効率的に利用する技術に大いに役立ってきました。その役割は今後も変わりません。多くの子供たちが、化学の面白さを感じるころからスタートして、触媒を使って持続可能な世の中を作っていく大人になってくれることを祈っています。

2020年1月

里川 重夫

目 次

1 章 触媒について知ろう

1.1 私たちの暮らしと触媒	1
1.2 人工的に肥料を作る	2
1.3 石油を上手に利用する	3
1.4 プラスチックや繊維を作る	4
1.5 空気をきれいにする	6
ブレイク 私たちの未来と触媒	8

2 章 触媒とはなにかを体感する実験

—— 過酸化水素の分解 ——

2.1 過酸化水素の分解	9
2.2 実 験	10

3 章 触媒のしくみを観察する実験

—— B-Z 反応 ——

3.1 B-Z 反 応	19
3.2 実 験	22

4 章 香りを作る実験

—— エステルの合成 ——

4.1 香料合成と触媒	30
-------------------	----

4.2	フィッシャーのエステル合成法	31
4.3	実 験	38
	ブレイク 不思議な酸, 固体酸触媒のひみつ	50

5 章 光を生み出す実験

—— 蛍光物質の合成 ——

5.1	光と色にあふれる世界	54
5.2	蛍光発光と蛍光物質	56
5.3	実 験	61
5.3.1	クマリン誘導体の合成	62
5.3.2	フルオレセインの合成	66
5.3.3	ローダミン B の合成	70
5.3.4	アクリジン誘導体の合成	73
5.3.5	フルオレセインの合成 (固体酸バージョン)	76
5.3.6	蛍光発光の強さについて	79
	ブレイク 魅惑の触媒, ゼオライトのひみつ	82

6 章 電気をとおすプラスチックの合成

—— ノーベル賞と触媒 1 ——

6.1	電気をとおすプラスチック	86
6.2	ピロールの重合反応と触媒のはたらき	89
6.3	実 験	91

7 章 Suzuki クロスカップリング

—— ノーベル賞と触媒 2 ——

7.1	クロスカップリング反応	104
7.2	突然の解説トークから実験教室まで	109
7.2.1	5年前の実験, 10年前の予感	109
7.2.2	実験教室ができるまで	110

7.3	実 験	112
7.3.1	二つの反応とバリエーション	112
7.3.2	ビフェニルカルボン酸（別名： <i>p</i> -フェニル安息香酸）の合成	113
7.3.3	テルフェニルジカルボン酸の合成	118
ブレイク	ノーベル賞と触媒	123

8 章 よごれを分解する実験

—— 光触媒 ——

8.1	光 触 媒	126
8.2	実 験	129
8.2.1	光触媒によるメチレンブルーの退色	129
8.2.2	酸化チタンの合成と光触媒反応	131

9 章 工業触媒の実験

9.1	触媒活性評価実験	139
9.2	反応機構を調べる	142
ブレイク	グリーンケミストリーと触媒	143

引用・参考文献		146
---------------	--	-----

あ と が き		150
---------------	--	-----

索 引		152
-----------	--	-----

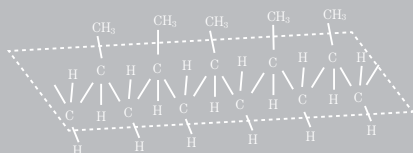
執 筆 分 担

廣木一亮：2～8章，ブレイク（7，9章）

里川重夫：1，9章，ブレイク（1，4，5章）

1

触媒について知ろう



私たちが毎日のように使用している衣服や日用品，食べ物や飲み物，移動に使う電車や自動車，これらは私たちが豊かに生活していくために欠かせないモノ（製品）ばかりである。本章ではこれらのモノと触媒の関わりについて紹介する。

1.1 私たちの暮らしと触媒

モノを作るには原料が必要である。私たちは原油や鉄鉱石などの地下資源，太陽光や水や植物など自然の恵みを原料にしてモノを作っている。ではどうやってそれらの原料からモノを作っているのだろうか。この問いには首をかしげてしまう人も多いと思う。じつは，本書のタイトルである触媒（catalyst）はさまざまな原料から生活に必要なモノを作るところで使われている。しかも驚くことに工場で生産される化学製品のほとんどは触媒を用いて作られており，触媒は原料からモノを作るために必要不可欠な道具といえる。

触媒とは，それ自身は変化せず化学反応を促進させるモノと定義されている^{1)†}。それは本当なのであろうか。どこでどのように使われているのだろうか。一般の人々の触媒に対するイメージを図 1.1 に描いてみた。

なぜ？ どうして？ はこのあと説明するとして，触媒は私たちの暮らしに欠かせないモノであることをわかっていただけたであろう。第 2 章からはモノ

† 肩付き数字は，巻末の文献番号を示す。

2 1. 触媒について知ろう

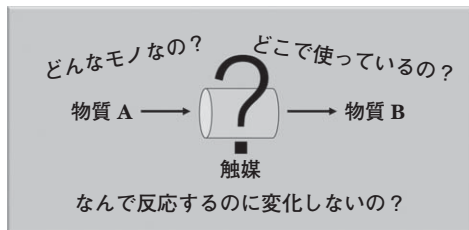


図 1.1 触媒に対する一般の人々のイメージ

づくりのための道具である触媒の効果を、直感的に感じるための簡単な化学実験をいくつか紹介する。その中から興味のある実験を試していただき、化学や触媒のすごさと面白さを実感していただきたい。その前に、本章では少しだけ触媒とはどんなモノであるかを解説する。

1.2 人工的に肥料を作る

私たちの暮らしに最も大切なモノは食料である。食料を作るには肥料となるアンモニアが必要である。ではアンモニアはどのようにするのであろうか。アンモニアは植物の成長に欠かせない栄養素の一つであるが、天然資源からでは供給が不十分であった。1900年代の初頭には、人類の持続的な発展のためには空気中の窒素からアンモニアを製造する技術の開発が必要であると警鐘が鳴らされた。

そんな中ドイツのハーバーは理論的な解析から、窒素と水素からアンモニアを製造するには、それまで経験のないほどの超高压条件にすることが必要であるが、適切な触媒を見出せば達成できるのではないかと考えた。そして大変多くの実験を行った結果、現在でも使用されている二重促進鉄触媒（鉄にカルシウムやアルミナが混合された触媒）を開発した²⁾。

この技術を工業化するためにドイツのボッシュは化学プロセスにおける高温高压製造技術を開発し、500℃以上、200気圧という当時としては常識はずれの超高温高压下で行うアンモニア製造技術を完成させた。その結果、空気中の

窒素から大量のアンモニアを製造できるようになり、大量の化学肥料が製造されて人類の持続的な発展のための食料生産に貢献した。二人には1918年および1931年にそれぞれノーベル化学賞が授与されている¹⁾。

現在では、天然ガスと水と空気をおもな原料として年間1億トンを超す大量のアンモニアが生産されており、その大部分は肥料生産のために使われている。また、化石燃料を用いずにアンモニアを合成する技術の研究開発も活発に行われており³⁾、カーボンニュートラルな液体エネルギー燃料としての期待も高い。

1.3 石油を上手に利用する

人が豊かに暮らすためには燃料や多くの化学製品が必要である。18世紀から始まった産業革命により石炭を燃料とした蒸気機関が作られ、それまで水車や風車といった自然エネルギーを利用していた機械などは、石炭を利用した蒸気機関に置き換えられていった。

そして石油の発見により化石資源は多様な使われ方をするようになる。石油をエネルギー資源として利用する場合、地中から掘り出された原油から不純物を取り除き、さらに使いやすい形に変換されてから使用する。原油は図1.2に示す常圧蒸留装置で沸点別の成分に分離され、LPガス、ガソリン、灯油、軽油、重油はそれぞれ燃料として利用される。

蒸留された成分の中から不要な元素である硫黄を除去するために、脱硫触媒

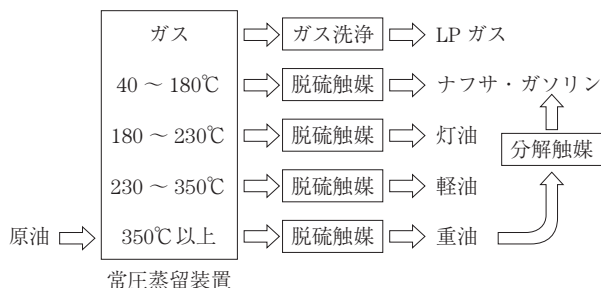


図1.2 原油の処理方法と石油製品の種類

4 1. 触媒について知ろう

を用いて脱硫装置で分解し、燃料から硫黄を除去する。また需要の少ない重油から需要の多いガソリンを製造するために、ゼオライトを主成分とした接触分解触媒を用いた分解装置で重油を分解してガソリンを製造する²⁾。

この接触分解触媒は世界中で最も多く製造されている触媒で、世界のガソリン供給に大きく貢献している。写真(図 1.3)の左にある黒く固まった重油から右の透明でサラサラしたガソリンを製造することができる。

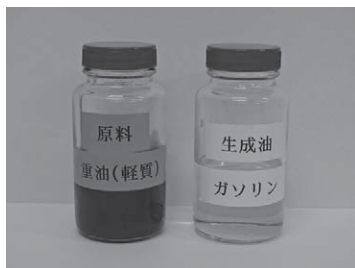


図 1.3 重油とガソリン

1.4 プラスチックや繊維を作る

石油がほかの化石資源に比べて優れている点はプラスチックや合成繊維など暮らしに必要なモノを容易に作れることである。ナフサと呼ばれる成分(原油の1割程度)を熱分解すると、エチレン C_2H_4 、プロペン C_3H_6 、ブテン C_4H_8 、ベンゼン C_6H_6 、トルエン C_7H_8 、キシレン C_8H_{10} などプラスチックの部品となる化学物質が得られる。これらの部品を組み合わせることでプラスチックを作ることができる。これらを組み合わせる過程で、触媒が重要な役割を果たしている。

エチレンばかりをつないでいくとポリエチレンというプラスチックを合成することができる。これはポリ袋の原料となる。以前は高温高压でラジカル反応によってこれを合成していた。しかし、1953年にドイツのチーグラーは四塩化チタン $TiCl_4$ とトリエチルアルミニウム $Al(C_2H_5)_3$ を組み合わせた触媒が常

温常圧でエチレンを重合させ、直鎖状の品質の良いポリエチレンを作れることを見出した。

イタリアのナッタは四塩化チタンの代わりに三塩化チタン TiCl_3 を触媒に用いることでプロピレンの重合によるポリプロピレンの合成に成功した。この方法で合成するとポリプロピレンのメチル基の向きが一定のイソタクチック構造 (図 1.4) になることから高品質なプラスチックを作ることができた^{2),4)}。これらの触媒の発明によりチーグラとナッタには 1963 年にノーベル化学賞が授与された。

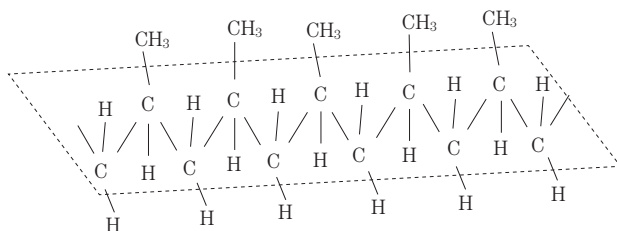


図 1.4 イソタクチック構造のポリプロピレン

このように石油から作った化学物質をプラスチックや合成繊維のようなモノにしていく過程でさまざまな触媒が使われている。触媒はモノを作り分けるためのガイドのような役割を果たしている。触媒を使って作ったモノはペレットと呼ばれる粒々の形で化学工場から出荷され、その後は加熱による成型加工を経て私たちの使うプラスチック製品となる (図 1.5)。



図 1.5 原料ペレットとプラスチック製品

あ　と　が　き

人間は争いを続けてきた。古くは食料や水を求めて、やがて貨幣経済の成立をみて、富を生み出す土地や利権を求めて。ときに民族的な問題や宗教的な対立も絡み合い、これらの争いは苛烈を極めてきた。そんな争いの究極の形が戦争であるが、近代以降に起きたほとんどの戦争が直接的もしくは間接的に資源やエネルギーを求めてのものであることは間違いないように思う。

この現実を目の当たりにして、化学者には何ができるであろうか。化学者も国家なり社会なりの一員であり、一人きりでは生きられないことを思うとき、所属する集団を崩壊させかねない戦争が起こった場合には戦争への参加を正当化したくなるだろうが、それは誤りである。また、戦争が科学技術の発展を加速するという主張は事実かもしれないが、受け入れることはできない。戦争は絶対悪であり、良い戦争などありはしないのだから。

本書が取り扱ってきたテーマである触媒は、化学反応を効率化し、エネルギーを節約してくれる。自然や環境とうまく折り合うアイデアを与えてくれる。またエネルギーを生み出す燃料、健康を守る医薬品、食料の供給を安定化する肥料などの製造に、触媒は欠かすことができない。さまざまな工業製品に应用される機能性材料を生み出し、私たちの便利で文化的な生活を守ってくれるものなのだ。

化学は誰のためにあるのだろうか。化学は「人類すべてのため」にある。化学をはじめとした、人類の知は何者かに独占されるべきではない。知を共有するための第一歩は、まずそれを知ることだ。

しかし化学は難しいと敬遠されがちで、知る機会は少ない。だからこそ化学を知るための入り口として、化学実験は大きな役割をもつ。この本で紹介した実験を行って、触媒および化学そのものの楽しさや面白さを伝えたいという考

えに少しでも共感していただけたなら、筆者としては望外の喜びである。

話は戻るが、戦争というものはお金がかかる。お金を使って人を傷つけ、命を奪い、ものを破壊するのだ。このお金の使い方はたして賢いであろうか。どうせお金を払うならば戦争という破壊行為よりも、資源やエネルギーの問題を知識と技術で解決してくれる化学の研究や教育に投資してみてもはどうだろうか。触媒を知れば、そんな発想がけっして突拍子もないものではないことが理解できるであろう。その点で本書は、化学者による、化学に興味を抱くすべての人に向けた平和の書であるといえる。

この先、私たちが環境やエネルギーの問題から逃れることは難しい。そんな今だからこそ、化学を知ろう。争いを始める前にまず化学を学ぼう。これこそが未来を賢く幸せに生きるための近道であると、筆者らは信じる。

最後に、以下の方々に感謝の意を表す。

触媒学会で長く教育啓発活動に尽力されてきた服部英先生（北海道大学名誉教授）、上田渉先生（神奈川大学教授）、松橋博美先生（北海道教育大学教授）、若林文高先生（国立科学博物館理化学グループ）など本書執筆のきっかけをくれた方々、および10年にわたってキャット・ケム実験室の企画・運営・実施に当たられてきた方々に感謝申し上げます。皆さんのお力がなければ、本書は完成しなかった。

本書に記載された画像や動画の制作に協力してくれた津山工業高等専門学校総合理工学科 山中裕葵、土居諒、松倉銀志、井上智美、Dang Thoa、大田美優、藤田大輔、電気電子工学科 大山凌平、同卒業生佐藤良ら、廣木ゼミに所属する学生諸君に感謝する。彼らはつねに献身的に本書の完成に尽くしてくれた。皆の労を多として、感謝申し上げます。

2020年1月

廣木 一亮

【英字】					
B-Z 反応	19	Negishi クロスカップリング		Suzuki-Miyaura クロス	
CO	6	NO _x	6	カップリング	109
HC	6	<i>n</i> -ブチルアルコール	39	Suzuki クロスカップリング	105
Heck 反応	108	<i>n</i> -プロピルアルコール	39	<i>tert</i> -ブチルアルコール	39
<i>iso</i> -アミルアルコール	39	<i>n</i> -ペンチルアルコール	39	TsOH	40
<i>iso</i> -プロピルアルコール	39	PEDOT	88	w/v	10
M	25	PVA	102		
mmol	24	<i>p</i> -トルエンスルホン酸	40	【ギリシャ文字】	
				φ	12

—著者略歴—

廣木 一 亮 (ひろき かずあき)

2000年 筑波大学第三学群基礎工学類卒業
2006年 筑波大学大学院一貫性博士課程
数理解物科学研究科修了
博士(工学)
2006年 独立行政法人産業技術総合研究所
環境化学技術研究部門特別研究員
2008年 独立行政法人科学技術振興機構
日本科学未来館
科学コミュニケーター
2008年 独立行政法人理化学研究所
基幹研究所客員研究員(兼任)
2011年 津山工業高等専門学校講師
2013年 津山工業高等専門学校准教授
現在に至る

里川 重夫 (さとかわ しげお)

1986年 早稲田大学理工学部応用化学科卒業
1988年 早稲田大学大学院理工学研究科
修士課程修了(応用化学専攻)
1988年 東ソー株式会社化学研究所研究員
1994年 東京ガス株式会社基礎技術研究所主任
研究員
1999年 博士(工学)(早稲田大学)
2005年 社団法人日本ガス協会技術開発部課長
2006年 成蹊大学理工学部助教授
2007年 成蹊大学理工学部教授
現在に至る

実験でわかる 触媒のひみつ

Understanding Catalysts Through Experiments © Kazuaki Hiroki, Shigeo Satokawa 2020

2020年3月18日 初版第1刷発行



検印省略

著 者 廣 木 一 亮
里 川 重 夫
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来真也
印 刷 所 壮光舎印刷株式会社
製 本 所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06760-6 C3043 Printed in Japan

(柏原)



©COPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。