

陰山 洋 博士に聞く 無機化合物の無限の可能性

——Mixed is different——

現代化学編集グループ

マグカップに注いだコーヒーを飲みながら、この記事を読み始めた方もいるだろう。唐突だが、みなさんに一つ質問がある。なぜ、そのコーヒーを安心して飲むことができるのだろうか。コーヒーとマグカップが化学反応を起こして、体に悪い成分が生じることはないのだろうか。

実際には、そのような化学反応が起こることはない。なぜかという、マグカップなどのセラミックス（通常は酸化物のことをさすが、一般には炭化物、窒化物などの無機化合物を含む）は化学的に（熱的にも力学的にも）非常に安定だからだ。そのため、ガラスをはじめ、私たちの身のまわりでいろいろな用途に使われている。しかしこの性質、視点を変えると、安定だからこそ反応が起こりにくい、反応させるには高温が必要といったデメリットにもなりうる。また、高温で反応させるということは物質の基本骨格をも壊すことになるため、有機化学者が行っているような分子の設計は到底できない。

このようなセラミックス、なかでも酸化物の可能性を広げる研究を行っているのが京都大学の陰山 洋博士だ。有機化学者が分子を構成する特定の原子を別の原子に置換するように、酸化物の中の酸素（酸化物イオン）を別の負電荷をもつ元素に変え、新しい機能をもった無機化合物をつくっている。このように酸素とそれ以外のアニオン（陰イオン）をもつ無機固体のことを複合アニオン化合物と

いうが、今、複合アニオンの化学は、無機化学に新しい次元をもたらそうとしている。

有機化学から超伝導へ

——陰山先生は、京都大学理学部化学教室ご出身で、小菅皓二先生（現 京都大学名誉教授）のもとで固体の無機化合物の研究をスタートされました。はじめからこの分野にご興味があったのですか。陰山 実は、学部生のときは有機化学をやりたいと思っていました。有機化学の“分子を設計できる”ところがいいなと思っていたのです。3回生までは大型バイクで遊んでばかりでほとんど学校には行っていなかったのですが、有機化学だけは勉強していたのですよ（笑）。研究室を選ぶ際、当時は超伝導*が流行っていて、特に有機超伝導で一世を風靡した齋藤軍治先生（現 京都大学名誉教授）の研究は、有機化学のなかでも物性が入っていて面白いなと思っていました。齋藤先生は有機超伝導で世界記録をもっていたのですが、それは10 Kほどでした。一方で無機物の超伝導では100 Kを超えるような銅酸化物が1986年に見つかっていました。はじめは有機化学に興味があったのですが、次第に超伝導に興味をもち、室温超伝導物質を見つきたいと考えるようになったのです。

また、有機化学は教科書も体系だっていて、それらをひとつおろ勉強しないと新しい研究ができないイメージがありま

した。けれど、無機化学の場合はいい発見が眠っていて、それを探し当ててくるという宝探しのようなイメージがあったのです。コツコツやるよりは一発当てたい、自分にも大きな発見ができるかもしれないという希望がありました。こうして、無機物の超伝導を研究されていた小菅先生の研究室に入ることにしたのです（実は、小菅先生の研究室（現在の吉村一良研究室）を見学に行ったときに鍋をやっていた、それが楽しかったことも決め手です）。ですから崇高な意識があってこの分野を選んだわけではないのですよ。

——研究室に入られてからは、実際に超伝導の研究を始められたのですか。

陰山 銅酸化物の超伝導の研究は1980年代の後半にブームがありました。高温超伝導の機構を解明しようとする物理の実験や理論の分野ではそのブームはずっと続くのですが、モノづくりの観点だとメジャーなものはすでにだいたい発見されていて、実は私が研究室に入ったころには新しい物質の発見がすでに難しく

* 金属的な電子状態にある物質の電気抵抗が、ある温度でゼロになる現象。1911年にオランダの物理学者 H. K. オンネスが発見した。液体窒素の沸点である $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K) 以上で超伝導現象を起こすものは特に高温超伝導物質とよばれる。最近では200万気圧を超える高圧下において硫化水素が $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ を超える温度で超伝導現象を示すことがわかり、注目されている。

なっていることを知りました。小菅先生は放任主義で、こんなことを言うと失礼ですが、ほとんど指導された覚えはないのですよ。けれど修士2年のときに、「このままだと学位を取るのは難しいからテーマを変えなさい」と唯一の指導をしてくださって(笑)。そこで、銅酸化物の超伝導は磁性と深い関係があったので、研究テーマを超伝導から磁性へと変えることにしました。

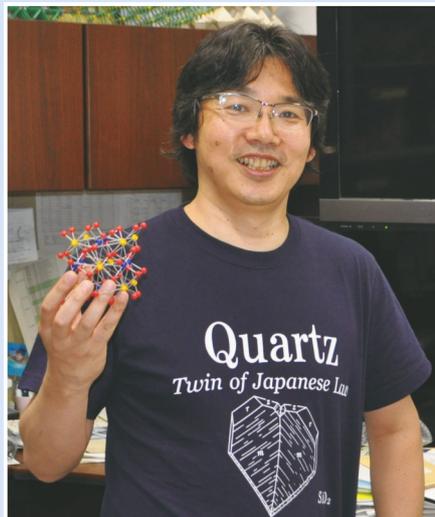
けれど、その後は博士2年の夏まで結果が出ませんでした。先輩も後輩も結果を出しているのに自分だけ結果が出ず、論文もまったく書けませんでした。このときはかなり辛かったです。結果を出さないと学位は取れません。もちろん学位を取っても就職できるわけではありませんが、結果を出さないと何も始まらない。とりあえず、やり続けるしかない、そんな状況でした。

——結果の出ない状況を、どう打開されたのですか。

陰山 当時、論文は紙がメインだったので、図書館に行って面白そうなフラストレート磁性格子をもつ物質を文献で探しました。JSPDSカード(X線回折の紙のデータベース)を探しに工学部の研究室を訪ねたりもしました。そして、磁性の観点からつくれたら面白そうだなという物質や、理論家が面白いと言っている物質を探したのです。そして二つ面白いものを見つけました。一つは三角格子をもつコバルトの酸化物です。この研究がやっと花開き、その後、博士3年のときは毎月のように論文や解説記事を書くことができました(陰山 洋ほか, 固体物理 32, 993 (1997))。そのころ、小菅先生のお弟子さんでもある東京大学物性研究所の上田 寛先生(現 東京大学名誉教授)の研究室にちょうど助手のポジションが空き、募集があったので応募したところ採用され、学位取得と同時に移ることになったのです。

東大では、図書館で発見したもう一つの物質(銅の酸化物 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$)をつくりました(図1)。そしたらこれがブ

「15年前は、これから物理と化学はどんどん融合していく、これからは俺の時代だと思っていました(笑)。けれど、化学を(今はそれほど)必要としないトポロジカル系の物理が流行ったこともあり実際はどんどん離れていってしまったのですよ。私は物理と化学両方の分野にいたので、間を少しでもつなげられるといいなと思っています」



京都大学大学院工学研究科教授。博士(理学)。1969年島根県に生まれ、1998年京都大学大学院理学研究科化学専攻博士課程を修了。同年、東京大学物性研究所附属物質設計評価施設助手。2003年京都大学大学院理学研究科化学専攻助教授。2007年同准教授を経て2010年より現職。物質-細胞統合システム拠点(iCeMS)連携教授。2016年より新学術領域研究「複合アニオン化合物の創製と新機能」領域代表。2001年井上研究奨励賞、2014年日本学術振興会賞、2017年日本化学会学術賞など多くの賞を受賞。

陰山 洋(かげやま・ひろし) 博士

レイクしたのです。これは1981年に理論家が考察した厳密な解をもつ理論モデル(Shastry-Sutherlandモデル)に関係しています(B. S. Shastryほか, *Physica* 108B, 1069 (1981))。厳密解をもつ水素原子と違って、量子多体系は一般に解けないので近似を使う必要がありますが、単なる理論家のおもちゃ(絵に描いた餅)と見なされていた厳密なモデルが現実の物質で見いだされたことで、これまでに知られていなかった量子現象が次々と明らかになりました(H. Kageyamaほか, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 3168 (1999))。この研究によって、物理の分野では少し注目してもらえるようになりました。その後も論文をコンスタントに出すことができ、表向きは好調でした。しかし、実は悩みながら研究をする毎日でした。

——どのような悩みがあったのですか。

陰山 私がやったことは、文献を検索して見つけた物質をつくただけです。つまり、文献を調べれば誰でもできるので、なかなか新しいものはつくれず、

ある物質の鉄を銅に変えてみたとか、モノづくりに関してはありふれた研究しかできていませんでした。ですから限界を感じたのです。このままやっても楽しくないなと。

無機化合物を設計してつくる

陰山 新しい物質をつくりたいといっても、酸化物は有機物と違って(一般に)設計ができません。有機化学者は化学の力を使い、考えて分子をつくっています。しかし、私たちの場合は陶芸をイメージしていただければよいのですが、1000~1500℃の高温で焼くだけ(通常、固相反応とよばれます)なのです。する



図1 助手時代に育成した $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 単結晶



トポケミカル反応では、出発系と生成系で組成は変化するが、構造はほとんど変化しない。そのため、物質設計という点では非常に有効な合成法である。この反応では、結晶格子中のイオン結合など、比較的弱い結合をもつ部分のみが反応し、共有結合性が強い部分は基本骨格として残る。

図2 トポケミカル反応

と10の何十乗個もの原子が整列した結晶がいきにくでしてしまいます。超分子の世界では自己組織化といいますが、酸化物で起こっていることは究極の自己組織化でもあるのです。ですが、超分子とは違い考えてつくっているわけではありません。もちろん、細かい設定などがありますが、基本的にはできた者勝ちなのですよ。たとえば二つの層からなる物質

ができたとしたら、温度や圧力を変えて3層にするなどの制御はできることもあります。ですが、ほとんどの場合は設計という概念がないのです。

そもそも、固相反応でなぜ高温が必要かという、固体の結晶だからです。数種類の出発原料の結合を切り、それら（通常ミクロンサイズ）が原子レベルで混ざらないといけません。ですから高温

が必要なのです。ただ、このつくり方では、物質の基本骨格すらも壊すことになるので、材料の設計は到底できません。このようなジレンマがあり悩んでいたのですが、そのときにトポケミカル反応を使った論文（T. A. Kodenkandathほか、*J. Am. Chem. Soc.*, 121, 10743 (1999)）に出会ったのです。

——それはどのような反応ですか。

陰山 構造の一部を維持したまま、低温で別の物質にすることです（図2）。たとえば、強い共有結合でつながった層の間に金属イオンが入った構造があったとします。300℃程度の低温（有機化学者にとっては高温だと思いますが、私たちの分野では低温なのです）で熱すると、この強い結合をもつ層の構造（トポロジー）は維持したまま、間にある金属イオンだけを別のものに変えることができます。先ほど酸化物は設計できないと言いましたが、これはある意味設計といえます。ですから、トポケミカル反応を使えば酸化物でも有機化学のように設計が自在にできるかもしれないと思いました。

もう一つ驚いたことに、この論文（私が初めて読んだJACSの論文です）では出発物質は磁性がないのに、できた物質は磁性をもつことを報告していました。私は博士課程からずっと磁性の研究をしていたのですが、磁性を出すには磁性イオンがなくては意味がないと思っていたので、目からうろこでした。こうしてトポケミカル反応には多くの可能性があることを知ったのです。この論文は米国ニューオーリンズ大学のジョン・ワイリー先生が書かれており、上田先生にお願いして、2カ月ほど、ワイリー先生のもとに留学させてもらいました。この2カ月間は人生を変えるくらい充実していました。そして、トポケミカル反応を使って酸化物の化学を展開すると決意したのです。

——米国から帰国後は京都大学理学部化学教室に移られました。

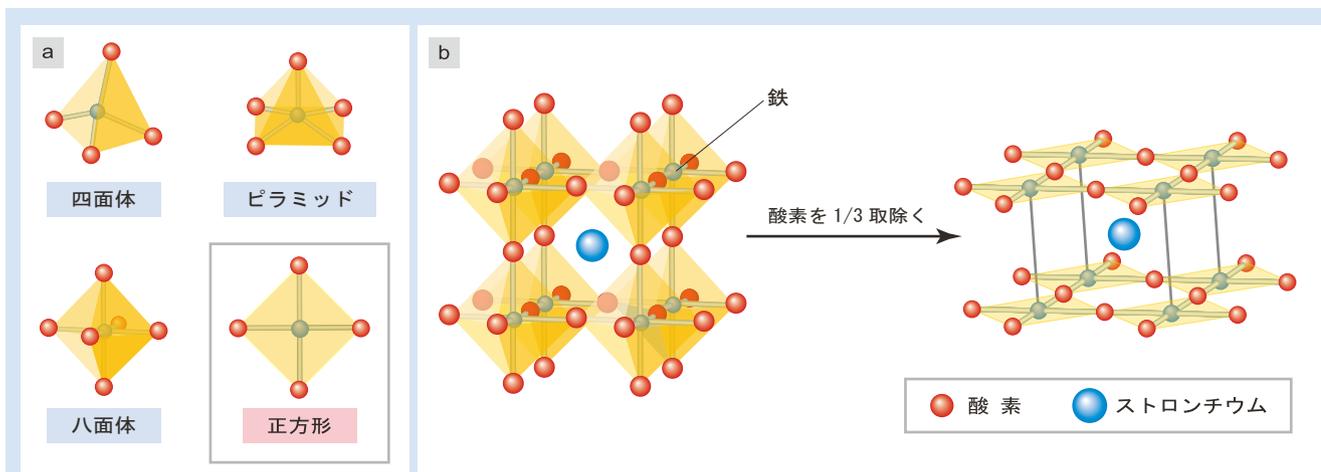
陰山 こうして物理から化学の分野に戻ったのですが、分野を変えるというこ

コラム 本当の融合研究

陰山 学部1年生の授業で、複合アニオンを使ってやりたいことを妄想でもいいから考えてみてと宿題にしました。そうしたら面白いアイデアがたくさん出てきました。たとえば、複合アニオン化合物でチャーハンをパラパラにしたいという下宿を始めた学生ならでは、ほのほのとする案から、宇宙で希少金属探索をする（以前に出した論文（T. Yajimaほか、*Nat. Commun.*, 7, 13809 (2016)）で書きたかった）とか、普通は決まっているはずの電気陰性度の値を複合アニオンで変化させてみせるとか、私がまったく思いつかないことを提案してくれたのです。常識がまだないからこそその発想で、こういった若者たちにもぜひ複合アニオンの研究へ参入してほしいなと思いました。

——新しい分野ですので、若い方や分野のまったく異なる方も入りやすいのではないのでしょうか。

陰山 そのとおりです。酸化物の論理が通用しないことも多く、学生さんも一緒になってフラットに考えられるというメリットがあります。また、いろんな分野で融合研究が叫ばれていますが、正直なところ予算をとるための形だけにみえる場合もありますよね。けれど、この分野は本当に分野を融合しないと進まないことだらけですよ。ですから、実際に共同研究もどんどん進んでいます。これは新しい分野だからこそできていることだと思いますよ。ただ、今後さらなる発展のために、もっとさまざまな分野の方に参入していただきたいと思っています。



これまで、鉄酸化物の鉄と酸素の結合には、四面体、ピラミッド、八面体の三つの形態しか存在しなかった。しかし、鉄酸化物の酸素を1/3取除いたところ、四つの酸素が正方形に配位した、二次元物質ができることがわかった。

図3 平らな鉄酸化物ができた

とはゼロから始めることになるので非常に苦労しました。このときは齋藤軍治先生が励ましてくださいました。若手でシンポジウムなど、いろいろやりなさいとおっしゃってください、京大の若手の准教授（安部武志先生、邑瀬邦明先生、中西和樹先生ほか）に声をかけて「低温合成研究会（通称）」をつくりました。ここでは、おもに電池や触媒を含む無機材料のエキスパートを広くよんで講演してもらいました。そこでいろんな方と知り合うことができ、名前を知ってもらうと同時に各無機分野の最先端の結果や考え方を学ぶことができました。私が今、化学の分野にいられるのは、ここでの経験が大きいのですよ。

複合アニオンの化学へ

陰山 帰国後コツコツと行っていた研究を2005年に発表しました（H. Kageyamaほか、*J. Phys. Soc. Jpn.*, 74, 1702 (2005)）。これは合成に関していえばワイリー先生の真似事のような仕事だったのですが、トボケミカル反応を使った化学を進めていこうという自信につながる研究になりました。そして転機になったのが2007年の研究です。あまり高度な合成ではないのですが、高温ではふつう

できないような面白い系を見つけることができました。

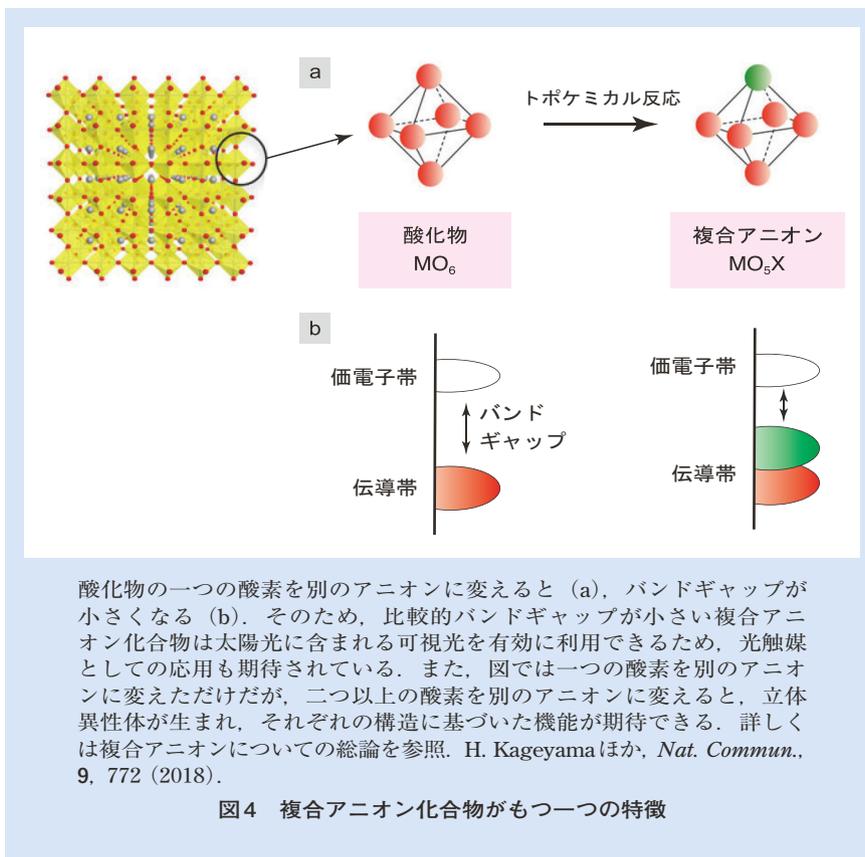
鉄酸化物の鉄原子のまわりの酸素は、四面体や八面体、ピラミッドのような立体的な結合形態をとります。ところが、低温合成によってペロブスカイト構造をもつ鉄酸化物の酸素を構造を壊すことなく1/3取除くことで、平面四配位をもつ鉄酸化物をつくることができたのです（図3、Y. Tsujimotoほか、*Nature*, 450, 1062 (2007)）。酸化物の性質は金属のまわりにある酸素の結合形態によって大きく変わるので、新しい配位をもつこの鉄酸化物は新しい機能をもつと期待され、基礎と応用の両面から多くの方に注目していただきました。この研究では鉄酸化物の酸素を取除きましたが、取除くのではなく、窒素などのアニオン種と酸素を置換することによっても新しい機能をもつ物質をつくり出すことができます。この複数のアニオンからなる複合アニオン化合物には大きな可能性があると考えました。

——複合アニオンというアイデアは、最近生まれたものなのですか。

陰山 空気の主成分である酸素と窒素からなる酸窒化物は自然界には存在しません。酸素と比べて（三重結合をもつ）窒

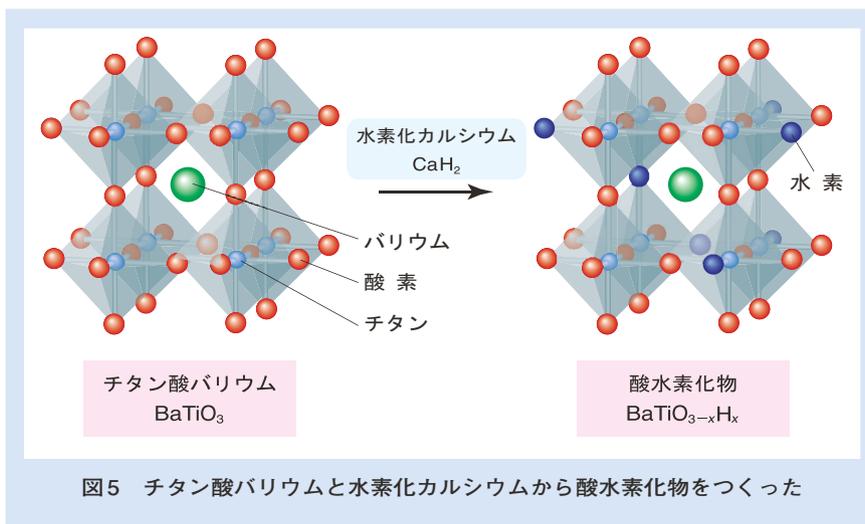
素は不活性なので、反応が起こりにくいので自然界には酸化物が多いのです。ですが、鉱物の中にはフッ素と酸素からなる複合アニオン化合物などもあるのでよ。しかし、複数のアニオンがあるからこそ面白い性質をもつ、という物質はほとんどありませんでした。2000年に入るところから、私たちのグループを含め、少しずつ報告が出てきたところです。そういう意味では、やっと注目されるようになってきた分野なのですよ。

私たちは、トボケミカル反応でいろいろと開拓しているところですが、合成法が確立していない、できた物質を解析する方法がないといったことが問題でした。ふつう酸化物の結晶構造解析にはX線回折があれば十分ですが、複合アニオン化合物になるとX線だけでは構造が一義的に決められないこともあり、中性子回折を使うのが必須です。ですが、酸化物を扱ってきた研究者のほとんどが、X線しか使っていないのですよ。複合アニオン化合物に関する文部科学省の大規模プロジェクト（www.mixed-anion.jp）が始まり、40あまりの研究室で研究を進めているのですが、解析法一つとっても酸化物のやり方を踏襲できないので、自発的、必然的に共同研究が進むようになって



てきました. その結果, 最近では, 新しい解析方法も生み出されつつあるのですよ. —複合アニオン化合物にはどのような特徴をもったものがあるのでしょうか. 陰山 チタン酸バリウム (BaTiO_3) は絶縁体で, 誘電体材料として使われています. この酸素の20%程度を水素に変えることに成功しました. 酸化物の世界で

は, 水素はプロトン H^+ になるのがふつうです. しかし, ここではヒドリド H^- になっています (Y. Kobayashiほか, *Nat. Mater.*, 11, 507 (2012)). この H^- と O^{2-} が混在する酸水素化物は面白いことがわかりました. H^- が入ると「活性」という要素が加わります. 酸水素化物は, 外界のガスと反応することができます.



酸化物は非常に安定で, それがコーヒーマカップとして使えるようにメリットでもあるのですが, 化学反応という点では面白みがありません. ですが, ここにヒドリドが入るだけで, 反応性が劇的に変わるので.

—安定な酸化物にヒドリドを加えることは難しかったと思います.

陰山 ヒドリドを加えるためには強い還元条件での合成が必要です. ですが, そのような環境では金属イオンまで還元されて壊れてしまうため, 合成は困難と考えられていました. しかし, 私たちはペロブスカイト構造をもつチタン酸バリウム (BaTiO_3) と水素化カルシウム (CaH_2) を 550°C ほどで反応させることで, 酸水素化物 ($\text{BaTiO}_{2.4}\text{H}_{0.6}$) を得ることができました. CaH_2 がチタン酸バリウム中の酸素を取ると, ペロブスカイト骨格を壊すことなくその空いたスペースに水素が入るのです. この考えは有機化学とも似ていなくもないですが, 一つ大きな違いがあります. それは, 私たちが扱っているのは結晶であり, 10の何十乗個もの原子が結晶をつくっていることです. トポケミカル反応ではときに多くの原子があたかも運命を知っているかのように一気に移動し, 別の組成をもつ構造になる必要があります. つまり, 反応は結晶の表面だけではなく, 内部まで均質な組成をもつように起こります.

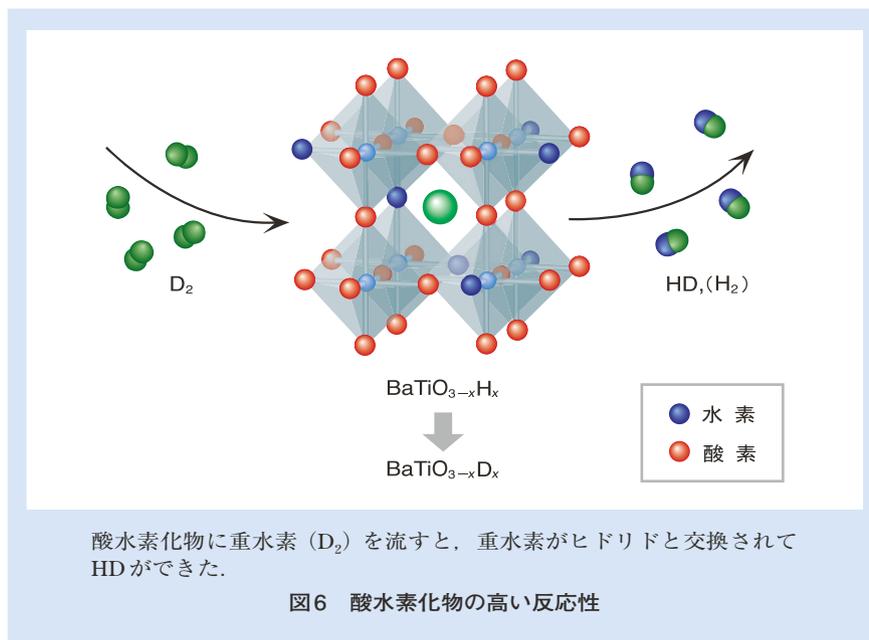
ただし, 低温でこのような原子の拡散・交換を起こすには大きな困難を伴うことも私たちの研究を通じて初めてわかってきました. たとえば, チタン酸バリウムのバリウムの代わりにストロンチウムを使うと入りうる水素がなぜか少ないという謎がありました. そこで結晶中の酸素をはじめから少し取っておく, つまり欠陥をつくってみると, 水素が入る割合が2倍以上増えることがわかりました (F. Takeiriほか, *Inorg. Chem.*, 56, 13035 (2017)). はじめから欠陥をつくっておくという考えはイオンクスや電気化学の分野ではすでにあつたのですが, その知識は無機合成化学にも使えた

のです。こうしてつくった酸水素化物を用いて、さまざまな研究を行いました。

酸水素化物の高い反応性

陰山 ヒドリドが酸化物に導入されることで新しい機能が生まれないかいろいろ考えていたのですが、当時わたしの専攻におられた井上正志先生（京都大学名誉教授）に重水素（ D_2 ）をお借りして、とりあえず400℃程度で反応させてみました。すると、HDガスが生じたのです。これは、ヒドリドと重水素が反応したということです。ヒドリドが重水素に交換しても意味がない、と思われるかもしれませんが、これはヒドリドが結晶内を低温で拡散していることを意味しています。ヒドリドが動くということは、水素燃料電池のような応用につながる可能性があります。水素といえばプロトンを利用した電池の研究が昔からされていますがヒドリドの標準還元電位は負に大きいので、高電圧化など新しい展開も期待できます。電池への展開は一つの研究の方向性ですが、このヒドリドの低温でのH/D交換活性と拡散能を別の用途に活かせないかと考えました。つまり、重水素の代わりにほかのアニオンを含むガスを用いることで新しい複合アニオン化合物が創製できるかもしれません。

そこでまず、300℃程度で酸水素化物にアンモニアガスを流してみました。するとヒドリドが窒素と交換されて、酸窒化物ができたのです（T. Yajimaほか、*Nat. Chem.*, 7, 1017 (2015)）。実は、酸窒化物をつくるにはこれまで1000～1500℃の高温が必要でした。また、アンモニアガスは毒ですし、高温では水素が出るので、それが金属を還元して壊してしまいます。ですから、なかなか難しい反応だったのです。ですが今回、酸水素化物を使うことで簡単に酸窒化物をつくることができました。さらに、別の学生が酸水素化物と窒素ガスを反応させたところ、何と常圧下でも酸窒化物になることがわかりました（N. Masuda, *J. Am. Chem. Soc.*, 137, 15315 (2015)）。窒素



分子は三重結合をもっていて非常に安定なため、さすがに酸水素化物とは反応しないと考えていたので驚きでした。つまり、酸水素化物中のヒドリドは非常に安定な窒素をも活性化できたのです。

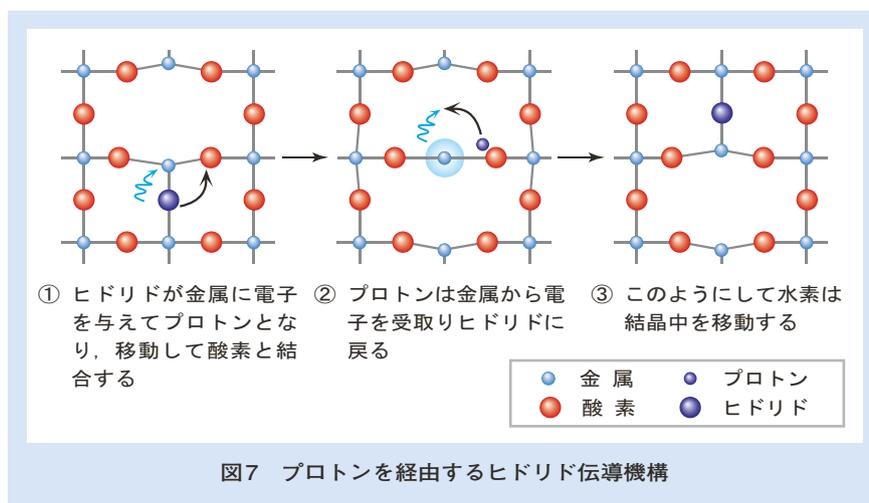
ということは、水素と窒素を酸水素化物のもとで流すとアンモニアをつくることができるかもしれません。実験をしたところ、予想どおりアンモニアをつくることのできたのです（Y. Kobayashiほか、*J. Am. Chem. Soc.*, 139, 18240 (2017)）。こうして酸水素化物がアンモニア合成触媒としても使えることがわかりました。チタンは窒素との結合が強すぎるためア

ンモニア合成触媒にはなりえないと考えられていましたが、ヒドリドを導入するだけでまるで違う世界が見えてきました。

風船のように伸び縮みするヒドリド

——ヒドリドの反応性が、複合アニオンの可能性を広げているのですね。

陰山 実は、ヒドリドには反応性以外にもユニークな性質があります。酸水素化物をつくった際、ヒドリドがあるかどうかNMRで調べてみました。すると、スペクトルが錯体では典型的なプロトンの位置に出たのです。なぜ、プロトンの位



		2.20						—	
		H						He	
		13.60 0.75						24.59 —	
0.98	1.57	2.04	2.55	3.04	3.44	3.98	—		
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne		
5.39 0.62	9.32 —	8.30 0.28	11.26 1.26	14.53 —	13.62 1.46	17.42 3.40	21.56 —		
0.93	1.31	1.61	1.90	2.19	2.58	3.16	—		
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
5.14 0.55	7.65 —	5.99 0.44	8.15 1.39	10.49 0.75	10.36 2.08	12.97 3.61	15.76 —		

電気陰性度（四角の左上の値）を基準に考えると、水素はこの位置にくる。左下の値はイオン化エネルギーを、右下の値は電子親和力を表す。

図8 正しい周期表？ (M. W. Cronyn, *J. Chem. Edu.*, 80, 945 (2003) より引用)

置にスペクトルが出るのか。実は、錯体中のヒドリドと無機物中のヒドリドはかなり違うものだったのです。そんなことを言われても、どちらも H^- なのだから同じだと思われるかもしれません。けれど、それが違うのです。

私たちが最近行った実験によると、水素は酸素に比べて2倍縮みやすいことがわかっています (T. Yamamotoほか, *Nat. Commun.*, 8, 1217 (2017))。つまり、酸素や窒素などのアニオンは、硬式のテニスボールをイメージしていただければいいのですが、水素はまわりの環境に応じて風船のように大きさが自在に変わります。おそらく錯体中のヒドリドは小さく、酸水素化物中のヒドリドは大きいと考えられます。NMRでは中心の原子核から電子を見ている。プロトンの場合は電子がなく、原子核だけの状態です (実際には共有結合性の効果はかなりあります)。一方、私たちが扱っている、無機物中のヒドリドは大きいため、電子が広い空間に非常に薄く存在していることとなります。つまり電子の密度が小さいため、NMRだとほとんどプロトンと同じように見えてしまうのです。

ほかにも面白いことができつつあります。 H^+ と H^- があると、ふつうは水素ガスができて終わりです。しかし、最近それぞれが共存できるような結晶をつくる

ことができました (N. Masudaほか, *J. Am. Chem. Soc.*, 137, 15315 (2015))。今はつくっただけで満足していますが、結晶の中で H^+ を H^- に変えるなど、イオンを変化させることもできるのではないかと考えて研究を進めています。たとえば、結晶中で H^- がもつ二つの電子を金属に与え、 H^+ に変わります。そして別の場所に移動して金属から再び電子を受取って H^- に戻る。このようなこともできるのではないかと考え、研究を進めています (図7)。この現象については、実際に理論の先生も提唱されています (Y. Iwazakiほか, *J. Appl. Phys.*, 108, 083705 (2010))。

——単純と思われている水素にも、まだまだわかっていないことがたくさんあるのですね。

陰山 水素は両性イオンで、電子を受取るとヒドリドに、放出するとプロトンになります。電気陰性度だけを考慮すると、図8のような周期表の位置になります (M. W. Cronyn, *J. Chem. Edu.*, 80, 945 (2003))。もちろん、価電子が四つないので変なのですが、このどちらにもなれる点がユニークな性質につながっていると思います。

Mixed is different

——どれもが大きな可能性のある研究で

すが、陰山先生の今後の夢は何でしょうか。

陰山 1977年にノーベル物理学賞を受賞したP. W. アンダーソン先生の言葉に、「More is different」があります。これは、原子が数百個の状態と、10の何十乗個の状態では全然違うということを行っています。たとえば超伝導は原子の数が多くないと出ない現象ですので、まさにMore is differentなのです。

私が新学術領域研究の代表になったときに、上田 寛先生がはなむけの言葉としてアンダーソン先生の言葉をもじって「Mixed is different」をくださいました。このMixには、もちろん複合アニオンの複合という意味もあるのですが、そのほかに分野をミックスする、つまりコミュニティをミックスしようという意味もあるのです。ですから、これからもこの言葉を象徴するような学問をしていきたいと思っています。

——最後に若い読者に向けて一言いただけますか。

陰山 酸化物の場合は、金属として何を使うか、どんな比で混ぜるかだけを考えていました。これはカチオン重視の考えです。その集大成がいわゆる相図 (状態図) です。けれど、今度はアニオンという新しいパラメーターを使って、今までにない機能を出そうとしています。酸化物あるいは窒化物の既存の科学をミックスすることで、新しい学問ができると考えているのです。実際に、酸化物では出ず、窒化物でも出ないけれど、酸素と窒素が混ざることではじめて機能が出る、そんな物質も生まれつつあります。ただ、今後もこの科学を成長させていくには、化学の力が、特に合成化学の力が重要です。錯体化学や有機化学の人たちの感覚が必要なのです。しかし、今は分野が分かれてしまっています。ですからぜひ、そのようなバックグラウンドをもつ方々にもこの分野に入っていただき、一緒に研究を進めていきたいと考えています。読者のみなさん、待っていますよ！