

有機合成で新しい特性を持った 磁石の開発に挑む

今、私たちの周りで使われている磁石はいずれも金属材料でつくられている。だが、有機合成物でも磁石をつくれるという。しかも分子設計でさまざまな機能や特性を自由に付与できる可能性もある。研究に邁進しながら子育てもしてきた女性研究者が、しなやかに未知の領域に挑む。

大阪府立大学
大学院理学系研究科物理科学専攻
教授

細越裕子

[ほそこし・ゆうこ] 1968年、東京都出身。埼玉大学理学部化学科卒業。東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。岡崎国立共同研究機構(現 自然科学研究機構)分子科学研究所助手を経て、大阪府立大学大学院理学系研究科物質科学専攻助教授に。2009年4月より現職。2011年にはフランス・ポールサバティエトゥルーズ第3大学客員教授に就任。「自分が学生るとき自由にやらせてもらったので、学生には細かいことは言わない」という。男子学生からは「男前の先生」という声も。

「第30回松籟科学技術振興財団研究助成 受賞」

物理か化学かで進路に悩む

——まず研究内容についてうかがいます。

どういうテーマの研究をされているのですか。

有機ラジカルによる分子磁石の開発がテーマです。一般の磁石は鉄とかニッケルといった金属元素を含んでいます。でも私が研究しているのは、金属元素を含まない有機化合物の磁石です。普通の有機化合物は磁石になりません。磁石の素になるのは電子の運動です。自転運動にたと

えられるスピンのによって、電子1つひとつがとても小さな磁石に相当すると考えてください。有機分子の共有結合では、2つの電子がスピンの向き、言わばN極とS極の向き、を互いに反平行にした対をつくってしまうので、有機化合物は磁石にならないのです。こうしたスピン対をつくらないひとつの電子、つまり不対電子を持つ化合物を、ラジカルと言います。たとえば水素原子1個ならラジカルで磁性を示しますが、水素原子が2個結合した水素分子は磁性

を示しません。

——なぜ有機化合物で磁石をつくらうとお考えになったのでしょうか。

きっかけは、世の中にないものをつくるということが、単純に面白そうだと感じたからです。実は今、私は物理科学科に所属していますが、出身は理学部化学科です。大学に進学するとき、化学か物理かちょっと悩んだ時期がありました。物理も好きだったのですが、結局化学科に入学しました。大学3年生のときに有機超伝導体を知り、有機化合物でもそういうことができるんだと思ったらうれしくて、化学と物理が融合した分野に進みたいと思うようになりました。大学院に進むときも、初めは有機超伝導の研究分野を希望しましたが、最終的には、当時まだ実現していなかった有機磁石の研究分野を選びました。指導教授の先生は、「自分の目が黒いうちは有機化合物の磁石なんてできない」と言っていたのですが、研究室に入って1週間くらい経ったとき、有機化合物の磁石ができたと言われました。新しいことが始まるとてもいい時期に大学院に入ったのは幸運でした。有機化合物がなぜ磁石になるのかを調べるために、いろいろな有機分子化合物を合成し、片っ端から結晶構造を解いて、結晶中でどのように分子が配列しているかを調べ、磁性を測定しました。ただ新しい物質をつくるだけではなく、新しい機能を持つことを物性測定で明らかにするところまでやりたいと思っています。

量子コンピュータへの応用も

——有機化合物の磁石は無機化合物の磁石と違う特性があるのですか。

はい。磁気特性は、その磁石を構成する元素によって異なります。磁

気記録材料に用いられるような大きな保持力を持つ硬磁性体には原子量の大きい重元素が有利です。軽元素から構成される有機化合物の磁石は保持力の小さな軟磁性体です。その点では鉄の磁石に近いとも言えますが、電気的には絶縁体です。また、原子を単位とする無機化合物と異なり、分子設計でいろいろな付加価値がつけられるということが、有機磁性体の利点です。たとえば、有機ラジカルは着色しており、光と絡む光磁気効果などが挙げられます。有機化合物は比重が軽く、何にでも溶け、成形もしやすい特徴を持つので、小型電子機器など多様な発展性があると思います。

——この間、大きな発展があったのですか。

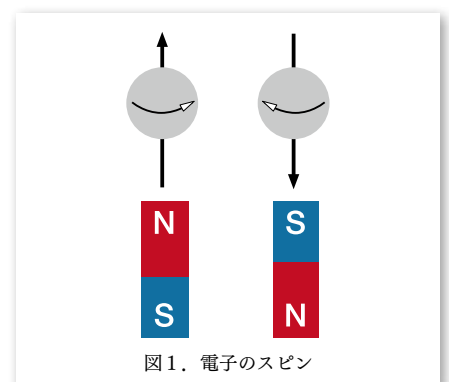
鉄は絶対温度1043ケルビン(770℃)まで温度を上げても磁石の状態を保ちます。一方、1991年に発見された世界最初の有機物の磁石は0.6ケルビンという絶対0度に近い温度でしか、磁石としての特性を維持できませんでした。どうして有機化合物が磁石になるのかを調べてきた結果、今では磁気転移温度が7ケルビンまで上がってきました。まだ低いですが、10倍以上の上昇は大きな進展です。実用にはまだ時間がかかりますが、有機化合物の磁性が無機化合物と違うことが分かってきたので、この何が違うのかということをよく知ることにより、今後の展開が見えてくると期待しています。

——常温で有機化合物の磁石ができる、今までと違うことができるようになったりするのですか。

常温有機磁石の実現にはまだ時間がかかると考えられていますが、現在、電気的絶縁体であることを考慮すると、伝導電子を付与することで

磁気転位温度は飛躍的に向上すると考えられます。今ある無機磁性体、有機磁性体で置き換えることは、必ずしも重要ではないと、私は考えています。それぞれの得意分野があるはずで、有機化合物でしかなし得ない磁性体、というものができるとが重要だと思います。

有機磁性体は、量子コンピュータへの応用という観点からも注目されています。磁性現象はとても小さな電子の運動が関係するので、本来、量子力学を使って記述されるものです。量子性は、スピンの配向に反映され、これは構成元素の種類と関係があり、軽元素から構成される有機分子は、量子的な磁気特性を示します。磁石の状態を表すのに、N極が上向きに揃った絵を描きますが、このスピンの向きを上下を、論理演算の0,1に対応させると情報処理に応用できます。量子的な磁気状態では、電子のスピンの向きが上か下かの2つの状態の重ね合わせとして表現されます。そのため複数の電子のスピンの向きを同時に選ぶことができ、高速演算が可能になると考えられています。これが量子コンピュータの原理で、有機磁性体は量子コンピュータを実現する有力な候補と考えられています。こうした量子的な磁気状態では、スピンの向きが一方向に規定されない揺らいだ状態で、物質状態にたとえると固体というよりは液体の状態です。こうしたスピンの



液体状態は熱を伝えると考えられています。有機磁性体の電気は流さず熱だけ伝えるという特性は、電子部品の熱対策材料として応用できると期待されています。特に電子が散乱されない熱伝導現象が予想されており、スイッチング速度が極めて早いトランジスタへの応用が期待されています。

三次元の骨格で安定化を実現

——松籟財団の助成を受けておられるのはどういう研究ですか。

高温分子磁石開発の基礎研究として、有機ラジカルの磁気相互作用を強く多方向に拡げる研究です。一般に、有機ラジカルは化学結合を好み反応性が高く不安定なのですが、磁石として利用するためには、室温大気中で安定に取り扱える必要があります。そのためには、嵩高い置換基で立体的に保護することが多いのですが、分子が互いに接近できなくなるために、分子間の磁気相互作用が弱くなってしまふ欠点があります。もうひとつの安定化の方法は π 共役を利用することで、不対電子が特定の原子上に局在することなく、非局在化することで反応性を妨げます。今回の研究では、嵩高い置換基を含まずに π 共役系を拡張することで、安定化されたフェルダシルラジカル

を使って、分子の密な接近を可能にし、強い磁気相互作用を多方向に実現しようとしています。

——具体的にはどういうことをされているのでしょうか。

物質の磁气的性質は結晶中での分子配列によって決まります。そして、分子のどの部位が互いに接近するかが、磁気相互作用と関係します。化学結合の概念からすれば、スピンの向きを互いに打ち消すような反強磁性相互作用が安定ですが、 π 共役系の分子積層をずらすことで、スピンの向きを平行に揃える強磁性相互作用が発現します。具体的には、水素原子をフッ素原子で置き換えます。フッ素原子は、水素原子と大きさは同じくらいですが、電気的には大きな負電荷を帯びているので、静電発発によって分子積層様式が変化します。また、 π 共役系が拡張された平面性分子は一次元に積層しやすいのですが、磁気相互作用を多方向に拡げることは磁気転移温度の上昇に欠かせません。そのための分子設計として、分子平面の捻じれを利用したり、複数のラジカルを一分子内に導入することで、二次元あるいは三次元の蜂の巣様格子を合成します。最初の有機強磁性体の転移温度が0.6ケルビンと低かったのは、磁気相互作用が1ケルビン程度と小さかったことが原因ですが、私のこの研究で

は、分子内に2つのラジカルを含む系で40ケルビンくらいの磁気相互作用が二次元的に均一に拡がる系を合成しています。

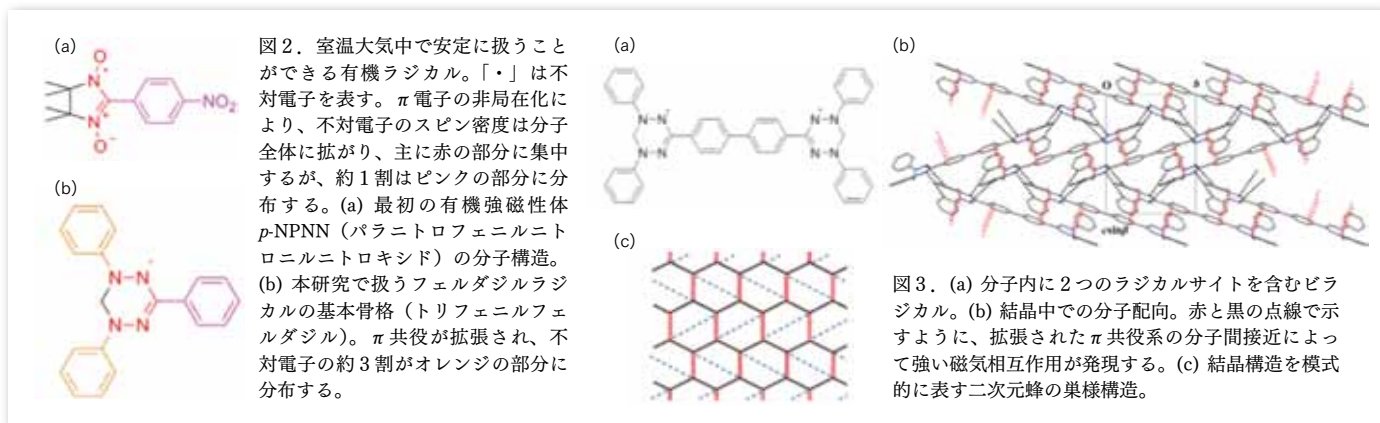
——そこまでは順調だったのですか。

まあそうですね。もちろんいろいろ苦労はありましたが、分子が大きくなってくると、溶解性が悪くなり、溶液に溶かして反応させるので、工夫しないと反応がうまくいかなかったりします。そこは学生さんが頑張ってくれて、私はそれを励ましています(笑)。私の研究室は物理科学科に所属しているので、学生は学部教育では有機合成の勉強をしていません。皆研究室に入ってから、一から勉強しているんです。そこはすごくよくやってくれています。有機合成の手順を覚えるだけでも大変だと思います。

世界で初めて有機フェリ磁性体を合成

——後半の研究ではどういうことを？

フェルダシルラジカルの π 共役系をさまざまに変化させながら、多次元な磁気格子を構築します。有機磁性体の研究は1960年代から行われてきましたが、狙った磁性を発現させる分子設計という観点からの系統的な研究はこれまであまり行われていませんでした。今回、私たちが



扱っている π 共役系が拡張されたフェルダジラジカルは結晶性がよくないとされていましたが、精製して純粋なものをつくれれば結晶性がよいと分かってきました。 π 共役系にいろいろな置換基を入れて、その分子配列との対応を調べることで、磁性体設計を可能にしようとしています。強磁性相互作用だけではなく反強磁性相互作用を利用した分子設計も行っています。実用磁石はすべて安定な反強磁性相互作用を利用したフェリ磁性体です。これは大きさの異なる2種類のスピンを反平行に整列させることで、差分の磁化を生じさせるものです。

——有機フェリ磁性体の合成に成功したのは、先生が世界で初めてだそうですね。

府立大に来る前の2001年のことです。それまで有機化合物の磁石は同じ大きさのスピンの向きを平行に揃える単純強磁性体のみで、フェリ磁性体はありませんでした。3つのラジカルを化学結合でつないで、分子内に大きさの異なる2種類のスピンをつくりました。この2種類のスピンの間に反強磁性的な相互作用をつくることで、フェリ磁性体の合成に初めて成功しました。ただ磁気転位温度が0.28ケルビンととても低かったです。嵩高い置換基を含んでいたために分子間の磁気相互作用が弱かったためです。あまりに低温での現象であるために、詳しい性質をまだ調べ切れていないところがあり、今回扱っている π 共役系を拡張した系を使ってフェリ磁性体をつくりたいという気持ちがあります。

——先ほど、合成の手順のお話をされましたが、合成のうまい下手で男女の違いはありますか。

それはないですよ（苦笑）。むしろ

個人の性格が大きいと思います。この学科の女子学生は1割程度と少ないので、研究室に在籍した女子学生は数えるほどです。私が学生だった20年くらい前と比べて、女子学生比率は微増という感じでしょうか。生物系はともかく、物理系や化学系はまだまだ少ないようです。文部科学省の「女性研究者支援モデル育成」事業によって多くの大学で女性研究者支援が行われて、大阪府立大学でも学内保育所ができたり、私が府大に赴任した10年前と比べると、環境はよくなってきていると思います。若手の女性教員も増えつつありますし、女子学生のネットワークづくりや中高生への裾野拡大も行っています。

裾野拡大については、関西近郊の大学と協力して、「女子中高生のための関西科学塾」も行っています。これは9年前から文部科学省、科学技術振興機構の実施事業である「女子中高生の理系進路選択支援プログラム」の支援を受けて運営実施しているもので、大阪府立大学も5年前に加わって、今年度は府大が関西科学塾の幹事校で、私が実行委員長をしています。

リケジョの育成にも取り組む

——理系にいく女子学生を増やすために具体的に何をしていますのですか。

ひとつは実験体験です。大学に来て実験を体験してもらっています。宇宙の電波をキャッチするとか、DNAの解析とか、なるべく幅広いテーマの実験を用意するようにしています。3月の最終行事は合宿形式で、実験の後、発表会も行います。その他の行事としてロールモデル講演会とか女子大生との交流会なども行っています。今年は初めて一般企業の見学会を実施して、企業で働く女性

研究者との交流をしました。冬には公立の研究所を見学し、交流会も行います。理系学部を卒業した後の職業イメージを持つことは大事ですから。

——アカデミックの世界で、女性の不利さを感じたことはありますか。

私の場合、幸い先生が皆さんよい方だったので、特に感じたことはありません。ただ、他の研究室などの女性から、コンパの席でちょっとどうかな、という話を聞いたことはありますね（笑）。私の場合、指導教授の先生から、大学院の博士課程の入学試験の翌日に「女性だから就職では苦勞すると思うよ」と言われたのですが、これは本当に心配してくれていたようです。分子研に就職したときは、技官ではなくて助手以上の教員としての女性研究者は初めてということで、エレベーターに乗るたびに知らない方から「ああ、あなたがあの？」とよく言われました。初めはちょっとプレッシャーでしたが、そんなこと言っても仕方がないのであまり気にしなくなりました。もともとと楽観的な性格なので。

——最後にこれからの目標をお聞かせください。

分子性化合物だから実現できる、有機化合物だから実現できる磁性体をつくりたいですね。転移温度の高温化という意味では、伝導電子を付与したいですね。今まで電気を流して磁石になるという分子性物質はほんの数例で、遷移金属が磁性を担い、有機分子が伝導性を担うもので、互いの相関はありませんでした。そうではなくて有機分子が磁性にも伝導性にも寄与するようなものをつくりたいと思っています。そのためにはまだまだブレークスルーが必要ですけどね。