

特集

# ふしぎで多彩な 変形菌の世界

サイエンス・インタビュー

スマホや電気自動車に欠かせない  
リチウムイオン二次電池を発明

旭化成株式会社名誉フェロー 吉野 彰

「milsil(ミルシル)」について  
「milsil(ミルシル)の「mil(ミル)は「見てみる」「聞いてみる」「やってみる」の「ミル」。そのような「ミル」から、新たな、そして豊かな「sil(シル=知る)」が得られるでしょう。この雑誌とともに、皆様楽しい「ミルシル」体験をされることを願っています。

C O N T E N T S

3 サイエンス・インタビュー 科学のいま、そして未来  
スマホや電気自動車に欠かせないリチウムイオン二次電池を發明  
吉野 彰 (旭化成株式会社名誉フェロー)

6 【特集】ふしぎで多彩な変形菌の世界  
[全体監修] 萩原 博光 (国立科学博物館名誉研究員)

7 変形菌とは何か  
—その生活環と特徴  
松本 淳 (越前町立福井総合植物園長)

11 変形菌の系統・進化  
—極限まで進化を遂げた単細胞生物  
川上 新一 (和歌山県立自然博物館学芸員)

13 単細胞の賢い行動  
中垣 俊之 (北海道大学電子科学研究所長)

16 変形菌の形づくり  
—単細胞はどのように複雑な子実体をつくるのか  
矢島 由佳 (室蘭工業大学応用理化学系学科准教授)

18 日本における変形菌の分類研究の系譜  
萩原 博光 (国立科学博物館名誉研究員)

20 標本の世界  
シーボルトが収集した日本の植物標本  
大場 秀章 (東京大学名誉教授/同大学総合研究博物館特招研究員)

22 日本の国立公園 第8回  
知床国立公園 ~流氷がもたらす海と陸の生態系~  
山本 豊 (環境省釧路自然環境事務所ウトロ自然保護官事務所首席自然保護官) 取材協力  
桜井 泰憲 (一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構函館頭足類科学研究所長) 取材協力

26 親子で遊ぼう! 科学冒険隊  
#64 きれいな結晶、ふしぎな結晶  
さとう かよこ (きらら舎主宰) 監修

30 DNAを知る 第5回  
遺伝子操作でできること① ~ゲノム編集が登場するまで~

32 NEWS & TOPICS  
世界の科学ニュース & おもしろニュースを10分で

34 milsilカフェ / 編集後記 / 定期購読のお知らせ / 次号予告



オオムラサキホコリの細毛体と胞子(左)とアミクロミルリホコリの胞子(右)。変形菌の子実体は、細毛体の網目状構造や胞子の表面突起などにより、次世代を担う胞子の空中移動に適応した形態を備えています。 写真提供: 松本淳



表紙写真  
変形菌は、単細胞生物とは思えないほど複雑かつ多彩な子実体をつくります。①ウツボホコリ、②ムラサキホコリ、③ルリホコリ、④ジクホコリ、⑤キラボシカタホコリ、⑥エダナシツノホコリ。 写真提供 ①④⑤⑥: 川上新一、②③: 松本淳

# スマホや電気自動車に欠かせない リチウムイオン二次電池 を發明

スマートフォンやノートパソコンを快適に使えるのは、充電式のリチウムイオン二次電池があるおかげです。小型軽量、パワフルで長持ちなリチウムイオン二次電池の基本構成を確立し、モバイルIT社会の実現や環境問題の解決に大きく貢献してきた吉野彰先生に、科学に向き合う姿勢や研究開発の足跡をお聞きました。

## ■ 化学に惹かれたきっかけは『ロウソクの科学』

科学者になろうと考えたのは何歳のころですか。

私が生まれ育ったのは大阪府吹田市の千里山、後に万博会場となるところです。私の少年時代には自然が豊かに残っていたので、虫取りなどをして自然のなかで遊ぶことが多く、昆虫の生態をはじめとする自然現象には関心をもっていました。そんな私に大きな影響を与えてくれたのが、小学校3、4年生の時の担任の先生です。大学で化学を学んで新任となった女性の先生でした。小学校ですから全教科を教えるわけですが、授業の折々に化学とはどういうものか、子どもにもわかるようにいろいろな話をしてくれました。それを聞いて、「化学っておもしろそうだな」と興味をもちました。先生はまた、マイケル・ファラデー<sup>\*1</sup>の講演をまとめた『ロウソクの科学』という本を勧めてくれました。科学について何も知らない私にもわかりやすく、その内容に惹き込まれました。自然科学への興味は成長するにつれて深まり、中学校、高校へと進むうちに、将来は化学を仕事にしようと思うようになっていきました。



旭化成株式会社名誉フェロー 吉野 彰 よしの あきら

1972年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。博士(工学)(2005年大阪大学)。1972年旭化成工業(現旭化成)株式会社入社。旭化成株式会社電池材料事業開発室長、同吉野研究室長などを経て、2017年より現職。技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター理事長、名城大学大学院理工学研究科教授ほか兼任。The Charles Stark Draper Prize(全米技術アカデミー)、紫綬褒章、日本国際賞など受賞多数。

大学や大学院では、どのような研究をなさったのですか。

大学は工学部に進み、石油化学科という教室に所属しました。といっても、石油化学に特化した教室ではありません。そこでは、実用的な触媒<sup>\*2</sup>の開発などを扱うほかに、化学を基礎的・理論的に考察する学問に取り組んでいました。

私は、計算(理論)だけに偏るのも、実験だけで何かを論じるのもおもしろくないと感じていました。そこで両方をとることにし、大学と大学院を通して、実験データを基に理論的に考察して、そこから出てくる答えを基に次の実験を行う、いわゆる物理化学的な研究をしていました。

大学院の修士課程を終えると、旭化成工業に就職を決めました。繊維や化学メーカーなどの選択肢があるなかで、旭化成は新しい事業を開拓していこうという機運と活気が感じられたからです。

企業の研究開発は、どのように行われるのでしょうか。

私の経験からいうと、企業で行われる研究開発は大きく3つの段階に分かれます。

1) 何か新しいものを見つけるための探索研究。将来実りそうなテーマ探しを、1つのテーマに対して1人か2人で行います。  
2) 探索研究で新しい成果が得られたときに、実用的な問題点を抽出してそれを解決するための研究。基礎技術を1つの既成技術に仕上げて世の中に出していくための研究です。

3) 新技術を世に売り出す、土台となる市場(マーケット)をつくる仕事。技術だけができてすぐには商品に採用されないもので、技術を買ってくれる市場をつくります。企業としては、これがとても重要です。

私の初任配属は、探索研究の部門でした。テーマ設定をして、2年程度で新しい技術開発の研究に取り組みます。成果

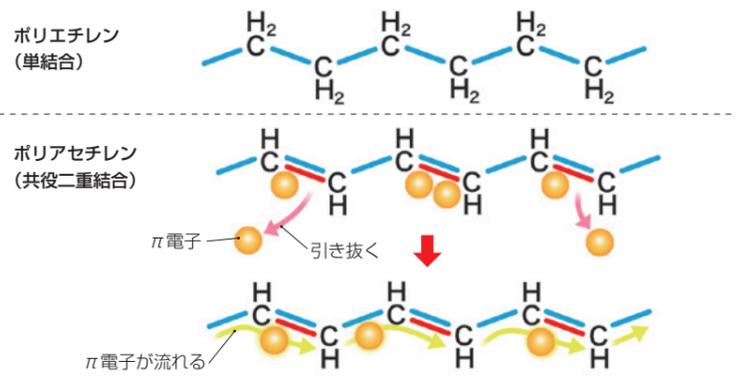


図1 電気を通すポリアセチレン

分子は普通、電子を共有して結合している（共有結合）。プラスチックの一種であるポリエチレンは、分子同士が1対の電子を共有する単結合が続いている。すべての電子は過不足なく使われ、動き回ることはないので電気を通さない。ポリアセチレンは、単結合と二重結合が交互に連なる共役二重結合の構造をもつ。二重結合の場合、1本目の結合は単結合と同じ種類の電子が働いているが、2本目の結合に関与している電子（ $\pi$ 電子という）は動き回れる性質がある。そこで、ポリアセチレンの一部の $\pi$ 電子を引き抜いて電気の通り道をつくと、 $\pi$ 電子が次々と移動するようになり、電気を通す。

が思わしくなければ、2年で次のテーマに移って再スタートします。可能性がありそうときは、研究を2年間延長して可能性を見極めます。私の場合は、3つの探索研究で思わしい成果が得られず、4番目のテーマとしてリチウムイオン二次電池の研究に取り組みました。

### ■ ポリアセチレンに着目し、新型二次電池の研究開発に挑戦

なぜ電池を研究テーマに選んだのですか。

研究がスタートしたのは1981年です。ちょうど、白川英樹先生<sup>※3</sup>がプラスチックの「ポリアセチレン」に電気を通したことが世界中で話題になっていました。ポリアセチレンは単結合と二重結合が交互に並んだ「共役二重結合」の構造をもつ物質で、白川先生はこの中を自由に電子が動いて、金属のように電気を通す性質をもたせることに成功したのです（図1）。ポリアセチレンは、半導体や太陽電池など、さまざまな分野で活用できると、注目されていました。

また、ポリアセチレンには、内部で電子が動くという特徴に加え、イオンが出たり入ったりするという電気化学的な機能もありました。「電子とイオンが同時に出たり入ったりするのは、電池の基本反応ではないか！」そう考えた私は、ポリアセチレンを用いたリチウムイオン電池の研究に入ったのです。

その当時、世の中にはどのような電池が

あったのでしょうか。

そうですね。私の研究の詳細の前に、当時の電池開発の状況を説明しておきましょう。電池は基本的にプラス極（正極）とマイナス極（負極）、電気の通り道になる電解液でできています。さらに、私たちが普段使う電池は、使い捨ての一次電池と、何度でも充電して繰り返し使える二次電池に分かれます。コンパクトな二次電池としては、リチウムイオン電池が現れる前にはニッケル・カドミウム蓄電池（ニカド電池）がありました。この電池には、電池が発生させることのできる電圧（起電力）を、1.5V以上にはできないという性能的な限界がありました。なぜかという、電解液が水溶液だったため、水の電気分解に必要な電圧である1.2~1.5Vを超えると、水が電気分解してしまうからです。

こうした限界を克服しようと、電解液に有機溶媒を用いた非水素の電池の開発も進められていました。私が研究を始めたときも、起電力が高く、乾電池に比べはるかに容量の大きな「金属リチウム一次電池」という非水素の電池が存在していました。これはカメラのストロボの電源に使われていましたが、一次電池ですから繰り返し充電することはできません。

当時は、ビデオカメラのようなポータブルな電子機器が世に出ようとする時代で、小型軽量で起電力が高く、しかも繰り返



図2 開発当時のリチウムイオン二次電池

吉野先生は、マイナス極、プラス極の素材を決めると、まずガラス製の試験管の中で電池としての作動を確認した。写真提供：吉野彰

し充電できる二次電池の登場が切望されてきました。そこで、金属リチウム一次電池を二次電池化する研究が行われていましたが、誰も実用に耐えるような電池の開発に成功していませんでした。この電池はマイナス極に金属リチウムを用いていたのですが、充電すると発火しやすく、安全性に大きな問題があったのです。つまり、二次電池のマイナス極には金属リチウムが使えないということですか。

その通りです。新型二次電池を商品化するためには、新しいマイナス極材料が必要だったのです。そこでポリアセチレンに目をつけました。ポリアセチレンは、電子もイオンも出たり入ったりするのでマイナス極になる可能性が考えられました。一方、ポリアセチレンと組み合わせるプラス極の材料探しには苦勞しました。1982年の末に、コバルト酸リチウム（ $\text{LiCoO}_2$ ）という材料が使えるとわかり、1983年に世界初のリチウムイオン二次電池をつくりました（図2）。

そこから一気に商品化へと進んだのですか。

物事は、そう簡単に進むとは限りません。当初の目的は、重量も体積も従来のニカド電池の3分の1にすることでした。新しくできた二次電池は、重量は3分の1になりましたが体積は従来のニカド電池とほぼ同じでした。目的の半分は達成されたので、デジタルカメラ用に小型軽量の電池を求めているメーカーに持参しました。そして、重量と体積のどちらを優先するか尋ねると、迷うことなく「体積です」と言われてしまいました。いまのスマートフォンの電池も、まず小さくなくては話になりませんね。

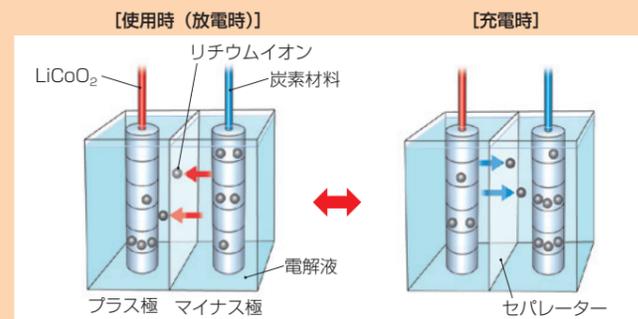


図3 リチウムイオン二次電池の原理

電池の使用時（放電時）は、マイナス極である炭素材料に取り込まれていたリチウムイオンがプラス極に移動する。充電の時は逆の反応が起こり、プラス極であるコバルト酸リチウムに含まれていたリチウムイオンが、マイナス極に取り込まれる。セパレーターはプラス極とマイナス極を分離しておく働きをしている。

ポリアセチレンはプラスチックなので密度が小さく、軽いけれどかさばります。密度を2倍、3倍にできればいいわけですが、それは原理的に不可能です。ポリアセチレンの2倍程度の密度があり、かつ共役二重結合の化合物はないか…と頭を巡らすと、炭素（カーボン）材料が思い浮かびました。いろいろ探すなかで、社内の研究所が開発していたVGCFという炭素繊維を電池のマイナス極に使用したところ、体積も重量も3分の1にすることができました。これにより、リチウムイオン二次電池の基本構成を確立することができました（図3）。1985年の年明けのことでした。

### ■ 最初の応用先はビデオカメラ その後、市場規模は500倍以上よりリチウムイオン電池が世に出るわけですね。

このころ世に出てきたのがビデオカメラです。1989年に、ソニー株式会社が「パスポートサイズ」をキャッチフレーズに小型ビデオカメラを発売しましたが、電池の

性能が不十分のため連続で撮影できる時間が限られていました。そこに、起電力・容量とも大きく、重量・体積3分の1を実現したリチウムイオン二次電池が採用されたのです。これは月100万個ほどの市場になりました。当時は、ビデオカメラの市場に入れただけで大成功だと考えていました。こうして1990年代の初めに、リチウムイオン二次電池を商品化して世に出したのですが、その後は、関心をもつ企業は多いけれど買ってくれないという状況が3~4年続きました。いまのように携帯電話やスマートフォン、ノートパソコンなどに採用され、これほど爆発的に普及することなど、まったく想像できませんでした。技術を確立するまでの研究と、それ以後に実用化が始まるまでとは、どちらの苦勞が多かったですか。

冒頭でお話した3つの段階のどれも苦勞の連続ですが、とりわけ胃が痛くなるのは、3番目の市場を立ち上げる仕事でしょうか。企業では「こうすれば、すぐ売れる」というシナリオをつくりがち

### リチウムイオン二次電池の長所

- エネルギー密度が高く、容易に高電圧（定格電圧3.7V）が得られる。
- 乾電池と比べて大容量かつ長寿命。
- ニッケル水素電池などにみられるメモリー効果（使い切らないうちに充電すると、再充電した容量しか使えなくなってしまう現象）が発生しない。



ですから、実際の売り上げとのギャップに苦しみます。ある商品が、ある時期を境に突然売れ始めるというのは、誰がどう仕掛けるというものではなく、世界の流れというしかないでしょう。世界がIT社会へ動き出したのは間違いなく1995年、Microsoft社の「Windows95」が発売された年です。その流れに乗って、モバイル機器や電気自動車、ドローンなどにもリチウムイオン二次電池が採用されるようになりました。いまでもビデオカメラ用の市場はありますが、それは全体の0.2%です。これを逆からみると、当初想定していた市場の500倍になったということですね。未来のことは誰も正しく予測できない。そこが技術開発の難しいところでもあり、一つの醍醐味でもあるといえるでしょう。

### 人類が理解している自然現象は1%もない

情報が氾濫する社会になり、「これだけいろいろなことがわかっているのだから、新しい科学研究をやろうとしても、すべてやり尽くされているのではないか？」と思っている人がいるかもしれません。しかし私は、自然界で起こっている現象のうち、人類が理解できていることは1%にも満たないだろうと思っています。したがって、世紀の大発明やノーベル賞級の研究のネタは至るところに眠っています。

これから科学者をめざす人には大きなチャンスが待っているといえます。あふれる情報を自分なりに追尾、分析してください。その深層に、たとえば新発見の可能性やビジネスチャンスの流れを読み取ることができる瞬間があります。そのチャンスを活かしてほしいと思います。

