

電気を流す “電気細菌”を研究!

メカニズム解明やその利用法の開発に挑む

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 (MANA)
ナノシステム分野電気化学ナノバイオテクノロジーグループリーダー
北海道大学大学院総合化学院客員教授

岡本 章玄

おかもと あきひろ

1990 年ごろ、発電したり、電気を通す細菌の存在が知られるようになり、その電気を応用する研究も世界で活発に行われ始めました。岡本章玄先生は、この分野の研究に早い時期からかわり、発電メカニズムの解明や応用で世界をリードしている気鋭の研究者です。研究者になるまでの道のりや、最前線の研究内容について伺いました。

電気細菌が発電するメカニズムを 世界で初めて解明

●電気を流す細菌はいつ発見されたのですか。

1988 年に、アメリカの環境微生物学者ケン・ニールソン教授(現 南カリフォルニア大学名誉教授)が、ニューヨーク州のオナイダ湖から、発電をしている細菌を発見しました。シュワネラ菌(図1)というこの細菌は、湖底の泥に含まれるマンガン鉱物に電子を渡していることがわかったのです。当時は、細菌が電気を流すと言ってもなかなか信じてもらえず、2003年にシュワネラ菌のDNAの塩基配列が解読されて、ようやく周囲が納得し始めました。DNAを調べたことで、電子を通しそうな特殊なタ

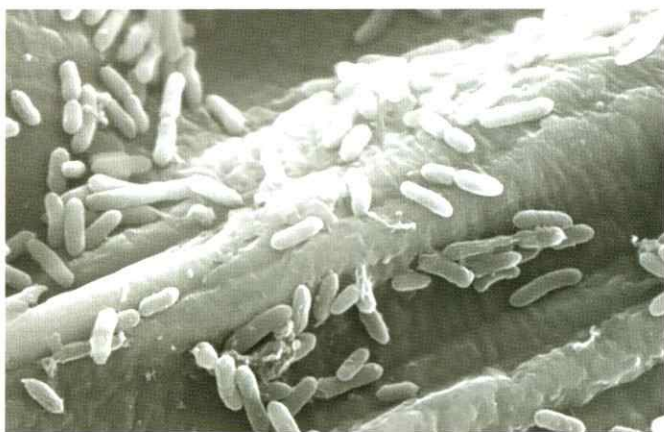


図1 シュワネラ菌の1種の電子顕微鏡写真

シュワネラ菌はシュワネラ属に分類される嫌気性の細菌の総称。湖や海底の堆積物などからも発見されている。

写真提供：物質・材料研究機構

ンパク質があることが示されたからです。

同時期に、土の中にいるジオバクター属に分類される細菌も電気を流すことが明らかになり、この機能を利用すれば、微生物から電池をつくれるのではないかと考えられるようになりました。「電気細菌」「発電菌」「微生物燃料電池」などの言葉も生まれ、この分野の研究が大きく展開していきました。

●これらの細菌の発電のしくみを、どのように発見されたのですか。

まず、電気細菌の発電のしくみを説明しましょう。細菌もヒトと同じで、呼吸をしています。ここでいう呼吸とは、肺などで行うガス交換(外呼吸)ではなく、酸素を使って有機物を分解しエネルギーを取り出す反応(細胞内呼吸)のことです。ヒトの場合は細胞内呼吸でエネルギーを電子の形で酸素に渡しています。これに対して電気細菌は、電子を金属(マンガンなど)に渡しているのです。この電子の受け渡しのときに電気が流れる(=発電する)わけです。

私は電気化学の研究分野からこの分野に入ってきましたが、当時の微生物学者たちは電気細菌の発電メカニズムについて2つのモデルを提唱していました。一つは、電子のチャンネル(通り道、^{あな}孔)の働きをするタンパク質が直接電極(金属)にくっついて電子を流すというモデル。二つ目は、両者が直接くっつくのは難しいから、電子のチャンネルと電極の間で、電子を輸送する特別な分子(フ

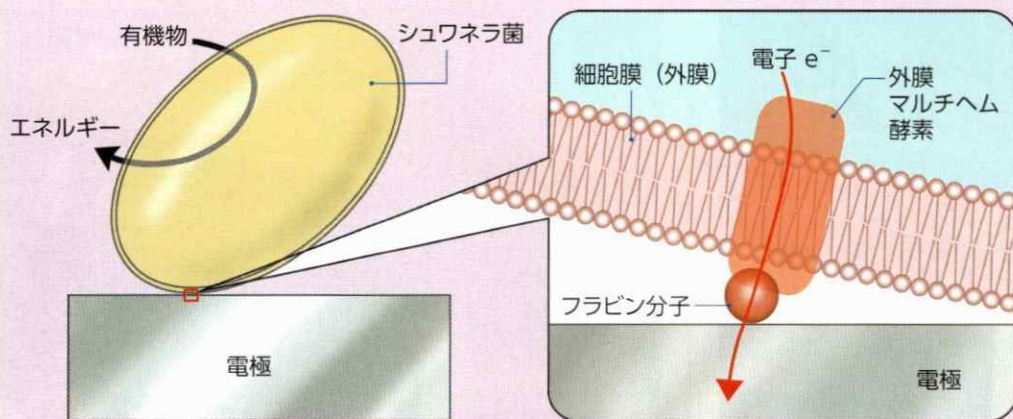


図2
シュワネラ菌の発電のメカニズム

細菌の外膜を通して、電子が電極へ移動していることを示している。吹き出しは外膜を拡大したところ。電子のチャネルとなる外膜マルチヘム酵素が電子の運び手であるフラビン分子と結合して電子の移動を助けている。

ラビン分子)が行ったり来たりしているのではないかと
いうものです。タンパク質から電子を受け取ったこの分子が電極まで移動し、表面で反応した後、元の位置に戻ってきているのではないかと、ということです。

電気化学的研究をしていた私からみると、二つ目のモデルは考えにくいと感じました。そこで、二つ目の説が間違いであることを示すために、電極と電子のチャンネルの境界面を高感度に分析できる装置をつくり、シュワネラ菌を使ってそこで何が起きているかを分析しました。

その結果、二つ目のモデルで電子の運び手として重要な役割を果たすとされていたフラビン分子は、移動しているのではなく、電子のチャンネルの一部になって働いていることがわかりました。図2に示したように、電子を細胞外へ排出するために電気導線のように働く「外膜マルチヘム酵素」という酵素が、フラビン分子と結合して電子の移動を助けていたのです。

こうしたメカニズムを最初に発表した時は、なかなか理解してもらえませんでした。その後、時間の経過とともに広く認められるようになり、現在はこの分野の標準的な理論になっています。しかもこのメカニズムは、シュワネラ菌とジオバクター菌だけではなく、そのほかの細菌でも重要なことが明らかになり、私がこの分野で名が知られる最初の仕事になりました。

建築を志した後、分子の設計をしたいと 考え応用化学の道に

●どのような経緯で電気細菌の研究をするようになったのですか。

小学生のころから何かを発明したい、おもしろいものをつくって世の中を変えたいと思っていました。高校生のころには大学は建築学科に進もうと考えるようになり、浪人して東京大学に進みました。大学に入ってから設計事

務所のアルバイトをしたり、映画監督と一緒に映画を撮ったりしました。建築といってもデザインを重視したものをつくりたかったので、文化・芸術系の活動にもかかわっていたのです。

3年生を前にして学部・学科の選択をする時、それまで志望していた建築学科を見学したところ、イメージしていた学科とは違うことがわかりました。自分にはもっと科学的な探究をする学科の方が向くのかなと思い始めて、橋本和仁先生(当時教授。現 物質・材料研究機構理事長)がいらした工学部応用化学科に進みました。20世紀の建築の隆盛は、セメントやガラスなど、マテリアルの発達をもたらしたものでしたが、それはケミストリー(化学)の成果ですよ。当時はナノテクノロジーも脚光を浴び始めたころで、分子で建築をやるのもおもしろいと感じて応用化学科に進んだのです。

●応用化学科ではどのような研究をしたのですか。

橋本研究室では「人工光合成」の研究をしました。具体的には二酸化炭素の固定化という課題で、二酸化炭素と触媒を混ぜ、光を当てることで二酸化炭素を分解して、それをギ酸などの物質に変えるといった研究です。

分子で構造物をつくるという、建築にも似た研究で、楽しい日々を過ごしました。光合成は生き物がもつ機能なので、バイオ系の知識も必要だと思っていたら、ちょうど研究室で微生物燃料電池の研究をすることになり、私もそこから電気細菌の研究に入りました。それが大学院修士課程1年の時のことで、それ以来現在までずっとこのテーマの研究を続けています(図3)。

博士課程の時にはアメリカ留学の機会がありました。そのころ私は微生物の研究を始めていて、微生物間のコミュニケーションの一つであるクオラムセンシングにかかわる研究を構想していました。クオラムセンシングとは、一部の細菌にみられるしくみで、細菌が同種の細菌の生息密度を感知し、それに応じて物質の産生をコント



図3 フィールドワーク中の岡本先生

野外に出て、自ら電気細菌を探すこともある。この写真は2018年に海洋研究開発機構の船で海底の泥を採取した時の様子。写真提供：岡本章玄

ロールするものです。クオラムセンシングの発見者、そして電気細菌の発見者もケン・ニールソン先生でしたので、迷うことなくニールソン先生のところに3か月ほど滞在させていただきました。以来今日まで連絡を取り合って共同研究を進めています。先生は温かい人柄で、せいたく当時は贅沢にいろいろなことを教えてもらいました。

微生物による金属腐食の防止や医療分野への応用を探る

●「微生物燃料電池」という言葉が出ましたが、電気細菌の応用研究にはどのようなものがありますか。

世界的に広く行われているのは、「工場等の廃水処理」に使うというものです。工場の排水に含まれる汚れは細菌のえさになるので、電気細菌に汚れを分解させれば、同時に電気が得られます。エスティー・シー・エスSDGs（持続可能な開発目標）の観点からも今後益々こういった研究は重要になってくると考えられます。私たちのグループが得意とする基礎研究の観点からは、ほかの分野で貢献できることが大きいと考えて、現在は微生物腐食の防止と、メディカル・ライフサイエンス（医療・生命科学）分野の研究に力を入れています（図4）。

●微生物腐食の防止とは、どのようなことですか。

土中や水中に生息する微生物によって、金属材料が腐食される現象が微生物腐食です。鉄の腐食によるアメリカの経済損失は、毎年GNP（国民総生産）の約4%に相当し、そのさらに1割ほどは微生物による腐食だとい

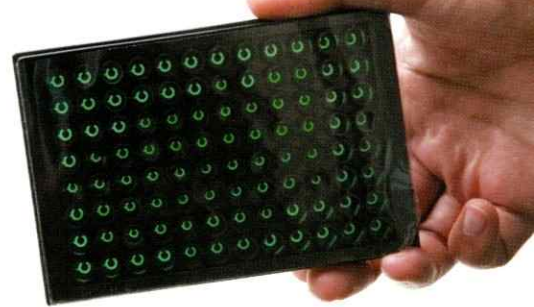


図4 電極を取りつけた細菌培養のプレート

細菌を培養するための96個のくぼみがあるプレート（96wellプレート）を改良して、電気細菌の発電量も測れるようにしたものだ。

われています。これはどの国にとっても大きな問題です。これを抑えるのはなかなか難しく、殺菌剤を入れると薬剤耐性菌が蓄積するなどの副作用が出てきます。微生物腐食が怖いのは見えないところで起こる点で、パイプラインやタンクの内側で起こると、突然穴が開いて石油や水などが漏れてきます。

図5は、鉄から電子を引き抜いて腐食させる硫酸還元菌です。この細菌は、ベシクルという微粒子を分泌する能力をもっています。このベシクルは100nm（ナノは10億分の1）ほどの球状で、これが数珠状につながると、まるでワイヤーのような構造になります。さらに、このナノワイヤーを電子が通るのです。この硫酸還元菌は、電子のチャンネルを使って電子を鉄から引き抜く、つまり鉄を酸化させることができ、そのときに、膜の表面に加え、このナノワイヤーも使っている可能性が高いと考えられます。

私たちは、微生物腐食を高感度に予知する検査や診断方法を開発しようとしています。その一つとして、化学的な腐食は起こらないけれど、微生物腐食だけが猛烈に起こるような材料をつくる研究を進めています。現場にこの材料を置いて、まったく腐食されなければ、安全な菌しかいないことが、腐食されていた



細菌培養の作業をしている岡本先生

96個のくぼみがあるプレート（96wellプレート）に染色した細菌を入れて培養し、プレートリーダーに読み込んでバイオフィルムの量を測定する。

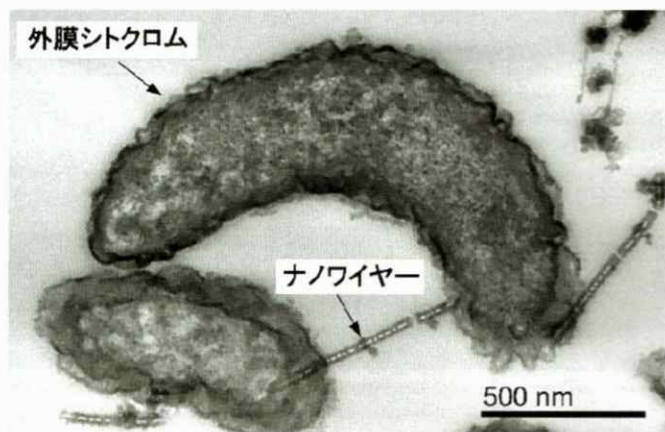


図5 鉄から電子を引き抜いて増殖し、鉄を腐食させる硫酸還元菌

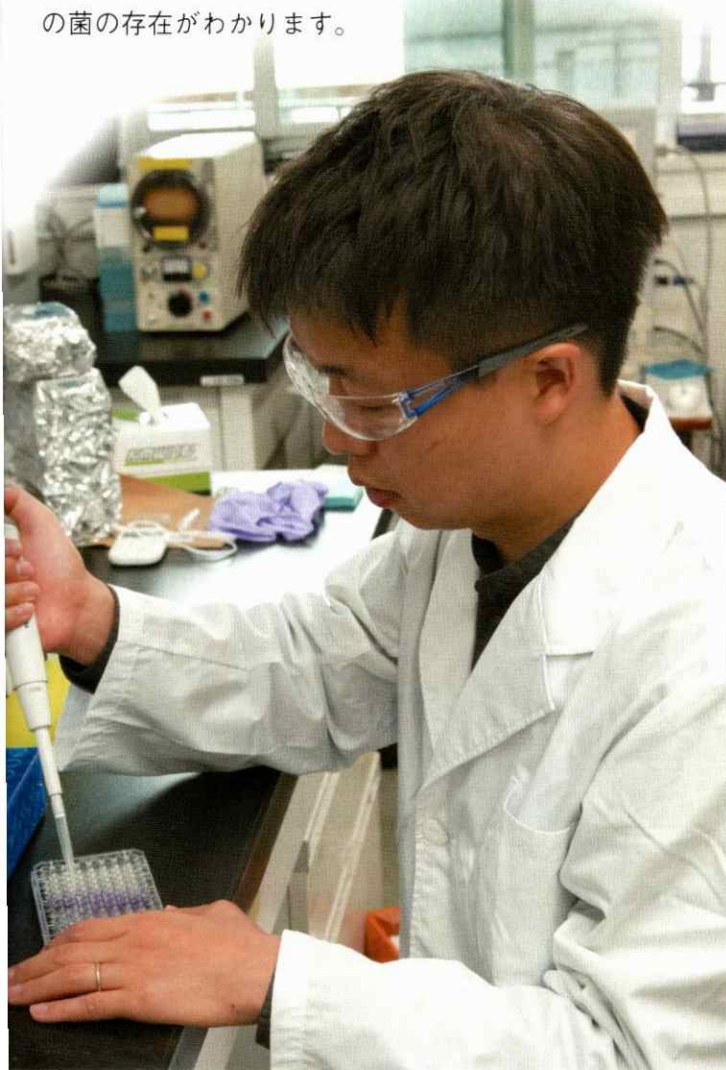
この細菌は膜をベシクルという微粒子として分泌する能力をもち、ベシクルを数珠状につなげて導電性をもつナノワイヤーにする。写真では細胞の表面やナノワイヤーの表面が黒く染まっているが、これは電子を細胞膜の内外へ流す外膜シクロム酵素というタンパク質があることを示している。

写真提供：物質・材料研究機構

らこの菌が増えてきたことがわかるような材料です。つまり、この材料をセンサーとして使うわけです。

●メディカル・ライフサイエンスの分野の研究とは、どのようなものですか。

病原細菌は、ヒトの体内で無害な菌がしないような代謝を行い、有害なものを生み出すことが病気の一因となっています。そういう菌にその菌しか食べないようなえさを与えると活性が高まり、電気を取り出す準備ができます。電極を置いてやると、病原細菌だけからの電流を検知できるので、これによりその菌の存在がわかります。



例えば、電極の上に唾液を載せ、そこに歯周病菌しか食べないえさを与えると、歯周病菌だけが食べて電気を流します。私たちは、その電流の大小を測定することで歯周病菌の量を検出するセンサーを開発中で、大学病院などと共同研究を始めているところです。

メディカル分野では、創薬への展開も考えているので一例を紹介しましょう。私たちはバイオフィーム^{※1}を均一に張りつかせた電極をつくる技術をもっています。この技術を使って、まず病原細菌が体内で病気を起こす時の状態に近いバイオフィームのついた電極をつくります。そして、できた薬がどのくらい効くかをみるときに、菌の活性の変化を電極からの電流で判定しようと考えているのです。薬を入れると電流が何パーセント減るのか、減るのにどのくらい時間がかかるのかといった定量的な情報がわかれば、新しい薬の開発にも貢献できるでしょう。

●基礎研究だけでなく応用研究への展開も多彩ですね。

もともとは化学の部分に注力していましたが、いまは装置を開発する工学的な研究、遺伝子にかかわる研究、ライフサイエンス、センサー技術など、新しいことを始めるときがとても楽しいと感じています。新しいことを始めると、元からやっていたこととの間にも良いループが生まれ、さらに新しいことを思いつくのではないかな？という前向きな気持ちになります。

建築家になりたかった私は、化学の勉強をしていなかったのが最初は苦労しました。でも実験して結果を出すには、必ずしも広い知識が必要でないことも多い。やってみなければわからないという面もあります。そのなかで、隠れた才能が見つかるかもしれないので、研究者になりたい人は思い切って挑戦してみることをお勧めします。

電気細菌の生態や応用について、興味深いお話をありがとうございました。新たな研究成果の発表を楽しみにしています。



※1 バイオフィーム…細菌が増殖して膜状になったもの。身近な例としては、台所の流しや排水口にぬるぬるした膜ができることがある。これがバイオフィーム。

Profile

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA) ナノシステム分野電気化学ナノバイオテクノロジーグループリーダー／北海道大学大学院総合化学院客員教授

岡本 章玄 おかもと あきひろ

2011年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。2012年アメリカ・南カリフォルニア大学博士研究員、2013年東京大学大学院工学系研究科助教、2016年物質・材料研究機構 (NIMS) 主任研究員などを経て、2017年より現職。2014年日本生物物理学会若手奨励賞、2018年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞など受賞多数。