

# 磁性細菌を解析し、ナノ磁石の産業応用をめざす!

新垣 篤史

お酒やヨーグルトなどを作る発酵微生物、ペニシリンを産生する青カビなど、人類にとって有用な微生物は山ほど存在する。こうした中で、ちょっと毛色が変わったものに「磁性細菌」がある。この細菌は、菌体内でナノサイズの磁石を作り出す。東京農工大学大学院 共生科学技術研究院の新垣篤史助教は、磁性細菌のゲノムを解読し、磁石をつくるための遺伝子や磁石の形や大きさの制御について解析を進めている。ナノ磁石は工業に利用できる可能性があるという。

## 磁性細菌とは

**Nature Digest** — 磁性細菌とはどのような細菌なのでしょう?

**新垣** — 菌体内で磁石を作り出す微生物を総称して磁性細菌とよびます。1970年代に、米国の研究者により、ボストン近郊の塩湖で発見されました。その後、世界中の川、池、海岸、油田、深海などに広く分布していることがわかり、これまでに、少なくとも属レベルで10グループが存在することがわかっています。最も多くの種類が発見されているのは、根粒菌や光合成細菌などが含まれる「 $\alpha$ プロテオバクテリア」に属するグループで、らせん状や球状の細菌などが知られています。いずれの磁石も脂質二重膜に覆われ、形の整った50～100ナノメートルほどのもの10～20個が、数珠のように連なっているのが特徴です(図2)。ただし、培養可能になっているのは、私たちの研究室で分離された3株を含め、世界に20株もないといわれています。

**ND** — 磁性細菌はなんのために磁石を作り出しているのでしょうか?

**新垣** — 「磁石(鉄)をエネルギー源にしているのではない」、「細胞内に多量にあると有害な鉄イオンを無毒化する機

構ではないか」などの説があり、現在も議論が続いています。一般的な解釈は、「自身の磁石によって地磁気を感じし、最短距離で最適な生息環境に移動するため」というものです。地球は大きな磁石で、北極はS極、南極はN極です。このような環境中では、磁性細菌内の数珠状磁石はコンパスのように機能し、菌体が地磁気と同方向に配向します(図1)。磁性細菌は嫌気性で、酸素の少ない川底表面の泥などを好みますが、氾濫などで頻りに水面に巻き上げられます。そのとき、磁石による配向を利用すれば、最短距離で生息環境に戻れるのではないかと考えられます。ただし、磁石はあくまでもコンパスの機能を果たすだけで、移動はべん毛の推進作用によります。ちなみに、栄養分や低酸素状態の整った実験室の中では、遺伝子操作などで磁石を合成できなくしても、生存には無関係であることがわかっています<sup>1</sup>。

実は、体内で磁石を作り出す生物は、意外に多いことが知られています。たとえば、海岸の岩場に張り付いているヒザラ貝の歯の表面は、磁性を帯びています。また、回遊魚や渡り鳥の中にも磁石を作ると報告されているものがあり、地磁気を利用できるように進化した結果だと思われるが、詳細は不明です。

## 磁性細菌のゲノムを解読

**ND** — 今回は、どのような磁性細菌のゲノムを解読されたのでしょうか?

**新垣** — 1993年に和歌山の水田から分離された硫酸還元菌の仲間属する磁性細菌(RS-1株)を対象に、製品評価技術基盤機構のチームと共同で、全ゲノムをほぼ100%の精度で解読しました<sup>2</sup>。RS-1株は、これまで分離されている磁性細菌の中で、唯一「 $\delta$ プロテオバクテリア」という種類に分類される細菌です。RS-1株のゲノムは染色体と2つのプラスミドからなりませんが、染色体のゲノムサイズは525万塩基対、プラスミドはそれぞれ5.8万(プラスミド1)と0.9万塩基対(プラスミド2)でした。遺伝子は、染色体上に4629個、プラスミド1に65個、プラスミド2に10個ありました。ゲノムサイズは一般的な硫酸還元菌よりもかなり大きく、遺伝子も多かったといえます。全ゲノムを見渡すと、シグナル伝達

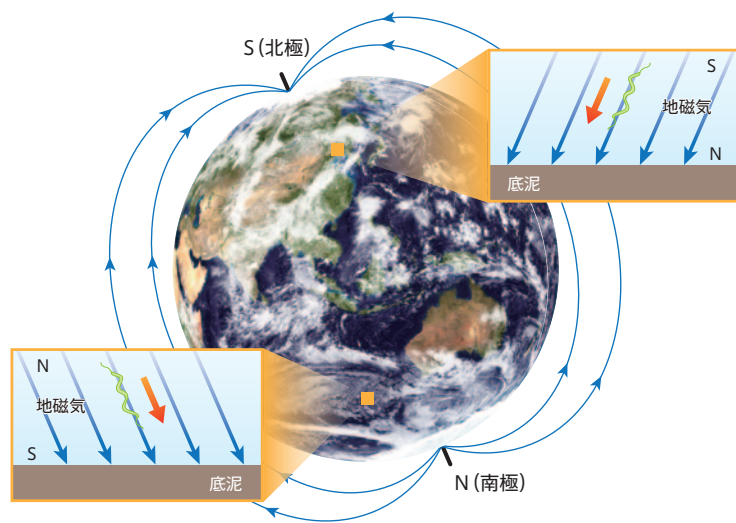


図1 磁性細菌は自身の磁石によって地磁気を感じし、最適な生育環境へと移動する。

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER IMAGE BY RETO STÖCKLI



新垣篤史 (あらかき・あつし) / 東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 生命機能科学部門 助教。専門は生物工学。1997年に東京農工大学工学部を卒業。1997～2003年まで、東京農工大学大学院工学研究科で松永是教授の指導を受ける。磁性細菌の基礎研究を進め、生物の作る磁石結晶の形成に直接かかわるタンパク質を初めて分離・同定した。2003年に博士(工学)取得。1998～1999年、ハワイ大学自然エネルギー研究所に留学。2003～2005年、早稲田大学理工学研究科で生体分子間反応の磁気および光学的検出技術の開発に従事。

2005年に東京農工大学に異動し、2007年より現職。磁性細菌の合成する磁気微粒子の形成機構解明とその工学的利用を目的として、特に結晶のサイズや形態制御に着目して研究を進めている。一方で、マイクロ流体デバイスを用いた細胞解析技術の開発を進めており、稀少細胞の分離・検出などへの応用に取り組んでいる。

関連遺伝子が多いことがわかりました。

**ND** — 磁石を作り出す仕組みについては、どのようなことがわかったのでしょうか？

**新垣** — 今回のRS-1株と、既にゲノム情報が得られているαプロテオバクテリアの磁性細菌とで塩基配列を比較したところ、どちらにも、磁石の合成にかかわる同一の遺伝子 (*mamAB* 遺伝子クラスター) が存在し、部分的に組み換えが起きた痕跡やトランスポゾンが多くみられました。この *mamAB* 遺伝子クラスターは他の磁性細菌にも広くみられ、私たちは、この遺伝子が異種の磁性細菌間で交換・伝播されている(水平伝播されている)と結論付けました。一方で、RS-1株だけにみられた遺伝子もあり、この中には、RS-1株に特徴的な「弾丸状粒子」の磁石を合成するものが含まれると考えています<sup>3</sup>。

磁石は、細胞表面から鉄イオンを取り入れることで作られています。菌体内に侵入した鉄イオンは、細胞膜が陥入することでできた小胞の中に蓄積されます。一方、菌体内には末端から末端に伸びるレールのようなタンパク質(フィラメント)があり、このフィラメントに沿って小胞が配置されるとともに、鉄イオンと複数のタンパク質を材料にして、磁石が合成されていきます。鉄はイオンの状態でもわずかながら磁気的な性質をもっていますが、ある大きさの結晶構造になると、強い磁気を帯びるようになります。こうしてできた磁石は、細胞分裂の際にはきちんと二等分されます。

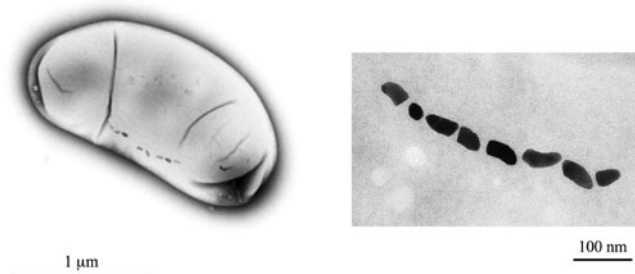


図2 磁性細菌(*Desulfovibrio magneticus*, RS-1株)の透過電子顕微鏡写真。細胞の中に並んだ粒上のが磁気微粒子。拡大すると、磁気微粒子の形態が弾丸状に制御されていることがわかる。

### 「バイomagネット」をめざして

**ND** — 磁性細菌が作る磁石を産業などで応用することはできるのでしょうか？

**新垣** — それをめざしているのです。私は、実用化をめざす意味を含めて、磁性細菌由来の磁石を「バイomagネット」とよんでいます。日常生活では、コピー機のトナー、パソコンの記録部品など、ナノサイズの磁石を利用しているものが多くあります。磁性細菌に、必要な形とサイズをもつ磁石を大量に作らせることができれば、工業的にさまざまな使い道があるでしょう。私は、特定の遺伝子を操作することで、磁石の結晶構造を認識するタンパク質を変化させ、形や大きさを制御できるのではないかと考えています。

また、バイomagネットは脂質二重膜に覆われているので、タンパク質などを結合させるのに好都合だという利点もあります。創薬のスクリーニングなどでは、磁石に蛍光タンパク質を結合させることで、目的の分子だけを集めるといったことをしますが、人工の磁石に脂質二重膜をコーティングするのは容易ではありません。私たちは、既に一部の磁性細菌株を使って、実用化に向けた試みを始めています。さらに、脂質二重膜がコーティングされていると、水中などでの磁石の分散性が上がるという利点もあります。

一方で、有害な重金属を磁性細菌に取り込ませて菌体ごと回収する、磁性細菌を「磁石以外のナノサイズのデバイス」を作る装置として利用する、といったことも考えられると思います。

**ND** — 今後の課題や目標は？

**新垣** — まずは、磁石の形と大きさの制御の分子メカニズムを詳細に解明したいですね。大量培養の手法は既に確立されているので、環境にやさしく、低コストで、精密な構造のデバイスが大量生産できる仕組み作りにつながるかと考えています。進化的にみると、磁性細菌はバクテリア全般に渡って分布しているような印象があるので、古細菌に属する新種の磁性細菌を探したいとも考えています。

**ND** — ありがとうございます。 ■

聞き手は、西村尚子(サイエンスライター)。

- 1 Arakaki A. et al. *J.R Soc Interface*, **5**, 977-999 (2008)
- 2 Nakazawa H. et al. *Genome Res*, **19**, 1801-1808 (2009)
- 3 Matsunaga T. et al. *Proteomics*, **9**, 3341-3352 (2009)