

## 電子部品だけじゃない，細菌も使うレアアース

井口 博之

レアアースの輸出入を巡って2010年に中国と摩擦が起きたことはよく知られていると思う。その時にレアアースというものが、電子部品を構成する永久磁石、ガラス添加剤、蛍光体などに欠かせないことをはじめて知ったものである。レアアース（希土類元素）は、 ${}_{57}\text{La}$ から ${}_{71}\text{Lu}$ までのランタノイドに、 ${}_{21}\text{Sc}$ と ${}_{39}\text{Y}$ を加えた計17種の元素を指す。レアアースは環境中に広く存在していて、地殻中の存在量を見ると、レアアースの中ではCe（セリウム）、La（ランタン）、Nd（ネオジウム）が比較的多く（数十ppm）、Zn、Cu、Coといった元素と同程度である。

微生物の培養には $\text{Fe}^{3+}$ や $\text{Zn}^{2+}$ など各種金属塩を加えるが、レアアースを加えようとする人はほとんどいないだろう。ところが近年の研究により、レアアースが細菌の代謝において重要な働きをすることが明らかになってきた。

レアアースの生物生理・生態への影響評価が研究の起りらしいが、その中でレアアースの有用な機能が見つかっている。生理活性物質の貴重な探索源・生産宿主となっている放線菌（*Streptomyces coelicolor*や*S. griseus*）に $\text{Sc}^{3+}$ （スカンジウム）を加えて培養すると、抗生物質の生産量が2～25倍に増加することが報告されている<sup>1)</sup>。また別の研究では、大腸菌に $\text{La}^{3+}$ を加えると、代謝が活性化して生育の促進が見られた<sup>2)</sup>。こういった効果を示すレアアース濃度は10–100  $\mu\text{M}$ くらいで、500  $\mu\text{M}$ 程度の高濃度では毒性があって生育阻害が起きてしまう。放線菌ではレアアースが遺伝子発現に影響を与えて抗生物質生産の表現型に結びついているようだが、詳細な作用機構は現在のところ不明である。

続いて、近年注目を集めているレアアース含有メタノール脱水素酵素(XoxF)について紹介したい。メタン・メタノール資化性細菌は、 $\text{Ca}^{2+}$ 含有メタノール脱水素酵素(MxaFI)を使ってメタノールをホルムアルデヒドに酸化する、というのが従来の知識だった。*mxoF*遺伝子とともにそのホモログである*xoxF*遺伝子がゲノム中に存在することが知られていたが、長年*xoxF*の機能は不明となっていた。近年のレアアース添加培養実験により、メタノール資化性細菌*Methylobacterium* sp. で発現しているXoxFが、 $\text{La}^{3+}$ 存在下でのみメタノール酸化活性を持つことが遂に判明した。

*Methylobacterium extorquens* AM1を用いた詳細な研究により、 $\text{La}^{3+}$ が存在する環境ではXoxFはMxaFよりも遺伝子発現量、比活性とも高く、主にXoxFがメタノール

ル酸化を担っていることが示された<sup>3)</sup>。それだけでなく、酵素であるXoxFが*mxoF*遺伝子の発現調節の働きをもつことも示唆されている。また葉面細菌のメタプロテオーム解析により、*Methylobacterium*属のXoxFが植物の葉上から多く見つかったことは興味深い。植物体にはレアアースが含まれ、葉からは多量のメタノールが放出されるため、メタノール資化性細菌はMxaFI酵素とともにXoxF酵素も使って、葉上でメタノールを資化していると考えられる。

メタン資化性細菌*Methylococcus* sp. SolVは、火山の泥間欠泉から単離された*Verrucomicrobia*門に属する新奇な菌であるが、本菌はMxaFIを持たずXoxFのみを持つため、メタンで生育するためにレアアースが必須である<sup>4)</sup>。はじめ生育を維持するために生息地の泥を添加していたが、その後のXoxF研究の進展により、泥に高濃度含まれる $\text{La}^{3+}$ や $\text{Ce}^{3+}$ がメタノール（メタンの酸化で生じる）の代謝に必要なことが判明したという経緯がある。自然環境中には、本菌のようにレアアースに依存して生育している細菌が存在することも分かってきている。

驚くことに、*xoxF*遺伝子はメタン・メタノール資化性細菌のみならず、根粒菌や*Burkholderia*、*Xanthomonas*など従来メタノール資化性と認識されてこなかった系統にも分布している<sup>5)</sup>。実際、 $\text{La}^{3+}$ 存在下で根粒菌*Bradyrhizobium* sp.のXoxFがメタノール酸化活性を持つことが確認されている<sup>6)</sup>。メタノールは植物を主要な発生源として広く環境中に存在しているので、これらの細菌はその意外な炭素源も利用して環境中でうまく生活しているのかもしれない。今後、環境中での実態の解明が待たれる。

レアアース研究について考えるうちに、実験室の微生物培養は、自然環境にあるさまざまな要素が排除されて単純化されていることを改めて感じた。レアアースのような除かれた因子を補ってやれば、微生物がまた新しい姿・機能を見せてくれるのではないかと期待している。

- 1) Kawai, K. et al.: *FEMS Microbiol. Lett.*, **274**, 311 (2007).
- 2) Wenhua, L. et al.: *Biol. Trace Elem. Res.*, **94**, 167 (2003).
- 3) Nakagawa, T. et al.: *PLoS One*, **7**, e50480 (2012).
- 4) Pol, A. et al.: *Environ. Microbiol.*, **16**, 255 (2014).
- 5) Keltjens, J. T. et al.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **98**, 6163 (2014).
- 6) Fitriyanto, N. A. et al.: *J. Biosci. Bioeng.*, **111**, 613 (2011).