

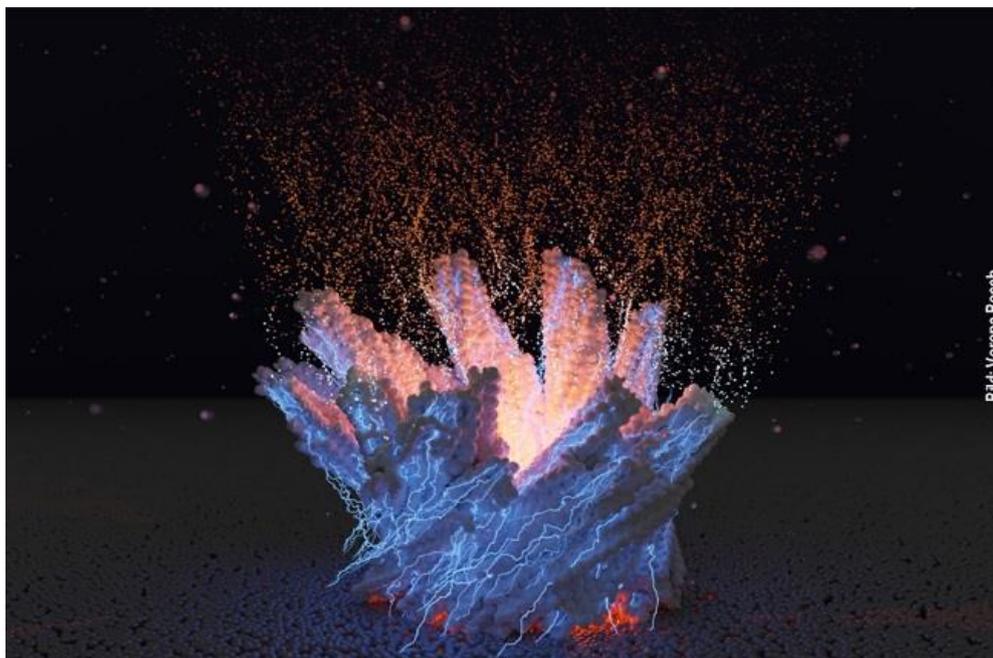
【バイオテクノロジー分野】

仮訳

バクテリアで水素や CO₂ を貯蔵する電子のハイウェイを発見(ドイツ)

2022年7月20日

ゲーテ大学フランクフルトの微生物学者らとマールブルグ大学およびバーゼル大学の研究者らは、水素(H₂)と二酸化炭素(CO₂)からギ酸を生成する酵素の構造を解明した。バクテリアである *Thermoanaerobacter kivui* の酵素は、ゲーテ大学フランクフルトの微生物学者らが数年前に発見したもので、その液体水素貯蔵の可能性について発表している。今回初めて原子レベルで解明されたこの酵素の糸状構造はナノワイヤーに似た働きをし、H₂とCO₂の極めて効率的な変換に関与していることがわかった(*Nature* 誌、DOI 10.1038/s41586-022-04971-z)。



H₂とCO₂のガスからギ酸を生成するバクテリア酵素 HDRCR のフィラメントが、組み紐のように互いに巻きついている (写真: Verena Resch - <https://luminous-lab.com/>.)

2013年、ゲーテ大学フランクフルトの Volker Muller 教授率いる微生物学者のチームは、熱を好む(好熱性)微生物が持つ、極めて異例な水素依存性二酸化炭素還元酵素(hydrogen-dependent CO₂ reductase: HDRCR)を発見した。この酵素は水素(H₂)

と二酸化炭素 (CO₂) からギ酸 (ギ酸塩) を生成するが、その過程で H₂ から CO₂ への電子移動が起こることから、H₂ を直接利用することができる初の酵素として知られるようになった。一方、それまで知られていたギ酸を生成する酵素はすべて遠回りをしてきたことが明らかになった。それらの酵素は可溶性細胞内電子伝達物質から電子を得ており、他の酵素の助けを借りて H₂ から電子を受容していた。

Thermoanaerobacter kivui は、例えば深海などの酸素から遠く離れた場所で繁殖しており、CO₂ と H₂ を使って細胞エネルギーを生産している。このバクテリアの HDCR は、水素を分解するもの、ギ酸を生成するもの、そして硫黄鉄を含んだ 2 つの小モジュールの、4 つのタンパク質モジュールから構成されている。Muller 教授は、「発見後には、2 個の小サブユニットがモジュール間の電子の伝導に関与しているはずであることは明らかでした」と説明する。2016 年には、HDCR が長いフィラメントを形成することを観察している。同教授は、「フィラメント形成が酵素活性を大幅に促進するという事実から、この構造の重要性がわかっていました」と話す。

ゲーテ大学フランクフルトの研究者らは、Jan Schuller 博士率いるマールブルク大学および LOEWE Centre for Synthetic Microbiology のグループと共同で、クライオ電子顕微鏡を用いた解析による HDCR の精密な観察を通じ、その構造を原子分解能で特定することに成功した。これにより、研究室での実験的な環境下 (イン・ビトロ) でこの酵素が形成する同フィラメントの構造の詳細が可視化された。各フィラメントのバックボーンは 2 つの HDCR 小サブユニットで構成されており、電子を伝導する何千個もの鉄原子の付いたナノワイヤーのようなものを形成するように配置されている。Schuller 博士は、「これは、これまで発見された中で酵素的に装飾されている唯一のナノワイヤーです。このワイヤーの上に、まるでひとつのケーブル上にキノコのカサが乗っているかのように、ヒドロゲナーゼモジュールとギ酸脱水素酵素モジュールが乗っているのです。」と説明する。

ゲーテ大学フランクフルトの Volker Muller 教授率いるグループの博士研究員である Helge Dietrich 氏は、HDCR フィラメントの形成を阻止している小モジュールの遺伝子操作を試みた。その結果、個別の構成要素、つまりモノマーは、フィラメントよりもはるかに活性が低いことが判明した。

バクテリアの細胞内においても、酵素のモノマーはフィラメント状の構造に自らを配置している。バーゼル大学の構造細胞生物学者である Ben Engel 教授とその研究チームは、クライオ電子線トモグラフィーを用いてこのことを発見している。この最先端の技術により、研究者らは特別なものを発見した。「数百本のフィラメントが束になっ

てリング状の超構造を形成しています。これらの構造は実に驚異的で、内輪ではこれを『ポータル』と呼んでいます」と Engel 教授は説明する。これらの束は、バクテリアの細胞の内膜に固定されているようで、その長さは細胞のほぼ全体にわたる。同教授チームの上席研究員である Ricardo Righetto 博士は、バクテリア内の HDCR フィラメントの構造を分析した。「クライオ電子線トモグラフィーを用いることで、非常に高い分解能で細胞内を直接観察することができます。この方法によって HDCR フィラメントが細胞内に出現することを確認したことに加え、それらが膜に付着した大きな束を形成していることを発見できて本当に驚きました」と Righetto 博士は語る。

解明されたこの構造により、「液体有機水素キャリアー」として H_2 と CO_2 からギ酸を生産する機能において、HDCR がどの化学触媒よりも桁違いに高効率で、既知のすべての酵素よりもはるかに優れている理由が明らかになった。Volker Muller 教授によると、「これらのバクテリアの生態系における水素濃度は低く、さらに CO_2 と H_2 の濃度が切り替わることがあります。フィラメントの形成とそれらの集束は、細胞内のこれらの酵素の濃度を大幅に増大させるだけではなく、この『ナノワイヤー』にある電子を伝導する数千個もの鉄原子は、バクテリアの近くを通過するたった 1 個の水素の気泡からの電子も中間的に蓄えることができるのです」。

今回の原子レベルでの HDCR の構造の解明によって、この酵素に関するすべての疑問が説き明かされたわけではない。Schuller 博士は、「ワイヤーがどのように電子を蓄積するのか、フィラメントの形成がなぜ酵素活性を著しく促進するのか、また、フィラメントの束がどのようにして膜に固定されているのかがまだわかっていません。私たちは、これらの課題の解明に取り組んでいます」と説明する。しかし、Muller 教授は、HDCR の将来性は非常に素晴らしいものになると考えている。「いつの日か、大気中の CO_2 の捕捉するために使用できるナノワイヤーを合成できるようになるかもしれません。また、生物学的な水素貯蔵の実現にも一歩近づいています」と語る。

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、Goethe University Frankfurt の以下の記事を翻訳したものである。

Research on bacteria: Electron highway for hydrogen and carbon dioxide storage discovered

(<https://aktuelles.uni-frankfurt.de/englisch/research-on-bacteria-electron-highway-for-hydrogen-and-carbon-dioxide-storage-discovered/>)

(Reprinted with permission of Goethe University Frankfurt)