

極限環境微生物が合成するカロテノイド：バクテリオルベリン

八波 利恵

ドラッグストアには、 β -カロテン、リコペン、ルテイン、アスタキサンチンといったサプリメントが並んでいるが、これらの商品を目にした方は少なからずいるのではないだろうか。これらは、すべて天然に広く存在するカロテノイド (Carotenoid) の一種である。

カロテノイドは、8個のイソプレネン (C_5) 単位が結合して合成された炭素数40 (C_{40}) の化合物を基本構造とする、黄色～赤色の天然色素である¹⁾。その名称は、ニンジン (英名: Carrot, 学名: *Daucus carota*) の学名に由来する。自然界において植物、細菌、藻類をはじめ動物にも分布している。これまでに700種以上のカロテノイドが単離され、その生理機能は多様である。植物においては、光合成における光捕集や光エネルギーの伝達、光障害防御などの機能が知られている。一方、動物はカロテノイド合成系をもたないため、植物から摂取してそれを代謝しさまざまな目的に使っている。動物に共通したカロテノイドの代謝は、 β -カロテンを開裂してレチナールに変換し、さらにレチノール (ビタミンA) へ還元することである。レチナールへ変換されるカロテノイドはプロビタミンA (ビタミンA前駆体) と呼ばれ、生理学的・栄養学的に重要である。また近年、哺乳類 (特にヒト) に対する老化予防、抗腫瘍作用、免疫賦活作用などの生理活性が次々と明らかにされている。

高度好塩性古細菌 *Halobacterium salinarum* は、生育に高濃度のNaClを要求し、約25%のNaCl存在下で良好に生育する極限環境微生物である。この菌は高度好塩性古細菌に特有の C_{50} の長鎖カロテノイド (バクテリオルベリン) を合成する (図1)。また、本菌は光駆動型プロトンポンプであるバクテリオロドプシン (BR) を有している。BRによって生じたプロトン濃度勾配はATP合成酵素によるATP合成に利用される。BRはアポタンパク質であるバクテリオオプシン (BO) と補欠分子であるレチナールから構成されている。レチナールとバクテリオルベリンの合成経路はリコペンで分岐する。すなわち、リコペンから β -カロテンを経てレチナールを合成する系とバクテリオルベリンを合成する系が存在する。そして最近、これらの合成制御はアポタンパク質で

あるBOが行っていることが明らかとなった²⁾。bop (BOをコードする遺伝子) 欠損株の合成するカロテノイドを調べたところ、野生株に比べバクテリオルベリンの蓄積量が増加していることがわかった。このことから、BOがバクテリオルベリン合成を阻害していることが明らかとなった。なお、この阻害はBRおよびレチナールによって引き起こされない。まとめると、BOによるバクテリオルベリン合成の阻害に伴ってレチナール合成が促進され、レチナールとBOが結合してBRが作られる。それに伴いBOの濃度が低下すると阻害が解除され、バクテリオルベリンが合成される。このように、*H. salinarum* は補欠分子の合成をアポタンパク質が介在するユニークな制御機構により促進させているのである。またBOの阻害は、リコペンからテトラヒドロビスアノヒドロバクテリオルベリンへの反応に関与する *lye* 遺伝子産物に特異的に作用することで引き起こされることもわかった。このようにレチナール合成が厳密に制御されているのは、BRがエネルギー獲得という重要な役割を担っているからであろう。本菌は通常、呼吸によりエネルギーを得ている。しかし、高塩濃度環境下において酸素が枯渇し、呼吸ができなくなった際に、BRによって光エネルギーを利用できるのである。一方、バクテリオルベリンの機能については、光酸化損傷からの防御、リベットとして膜の安定化、放射線耐性などへの関与が考えられており、今後より詳細が明らかにされるであろう。

バクテリオルベリンを合成する細菌として、放射線耐性菌 *Rubrobacter radiotolerans* が見つかった³⁾。バクテリオルベリンはラジカルおよびそのラジカルより生成する活性酸素種 (reactive oxygen species, ROS) 除去活性が高く、その局在は細胞表層脂質部分である。これより、バクテリオルベリンは放射線により生成するラジカル・ROSを除去し、細胞膜脂質およびそこに存在するタンパク質の保護に寄与していると推定されている。また、南極より分離された低温菌 *Arthrobacter agilis* は、生育最低温度5°Cにおいてバクテリオルベリンとその配糖体を多く生産し、低温での膜の安定化を担っていると考えられている⁴⁾。バクテリオルベリンを合成する細菌はいずれも極限環境微生物であり、過酷な環境を生き抜くために合成しているのである。

筆者も最近になっていくつかのカロテノイドを摂取し始めた。もちろん、日々起こる外的ストレスに対し、うまく適応し、生きていくためである。

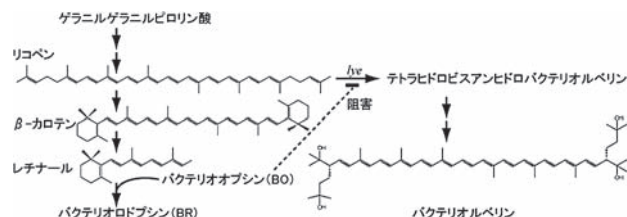


図1. *H. salinarum* のレチナールおよびバクテリオルベリン合成経路

- 1) 高市ら：カロテノイドーその多様性と生理活性ー，裳華房 (2006)。
- 2) Dummer, A. M. et al.: *J. Bacteriol.*, **193**, 5658 (2011)。
- 3) Saito, T. et al.: *Arch. Microbiol.*, **162**, 414 (1994)。
- 4) Fong, N. J. C. et al.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **56**, 750 (2001)。