

## 微生物が使う通貨としての電子

加藤 淳也

1万円札を持ってショッピングに行く。衣料品店で7000円のものを買ひ、食料品店で3000円のものを買ひ。お金は便利なもので、1万円を出して7000円のものを買ひたらちゃんと3000円返ってきて別の買い物に使い、1万円を存分に使いきれ。現代社会では当たり前のように使われている貨幣は人類の3大発明の一つであり、モノの価値をはかる物差しとして機能し、その価値を等価なモノに交換することができる。すなわち、価値を最大限に活用する術を生み出した。貨幣文化以前に行われていた物々交換を想像すれば有用性の高さは想像しやすい。

では、細胞内部の世界ではどうだろうか。エネルギーについて考えれば、一般に生物の通貨はATPであると言われる。本稿ではさらに絞って、ATPを生み出す源の一つでもある電子の流れに焦点を当て、嫌気性微生物が使う電子分岐 (electron bifurcation)<sup>1-3)</sup>を紹介したい。一般に、電子は有機物や水素などの分子から、電子伝達体と呼ばれる運び屋を介して活用される。これらは各々異なる酸化還元電位 (低いほど電子を渡す力が強く、エネルギーが高い) を持っており、酵素反応に応じて電子を受け渡し還元や酸化の反応を進める。また電子が流れるエネルギーをATPにも変換する。細胞の中から外にプロトンなどのイオンを汲み出すことに電子の流れを使い、形成された濃度勾配と膜の電位差によってイオンが細胞の外側から内側に流れ込む。結果として、イオンの流れるエネルギーをATP合成酵素がとりだしてATPを作り出す。実に巧妙で、電子はかくも多様な役割を担う。さらに巧妙なのは、電子のエネルギーを最大限に強化しつつ無駄なく使う機構、電子分岐、およびそれを担う電子分岐酵素である。

水素を利用する微生物を例にして、電子の供給が水素から行われる場合を先ほどのお金の例を使って考えてみよう。電子伝達体の酸化還元電位は決まっており、それに応じて電子が持つエネルギーも規定される。電子伝達体フェレドキシンが使う電子の酸化還元電位 ( $E_0'$ ) は低く、およそ-450 mVほどある。NADHだと-320 mVだ。水素は-414 mV<sup>3)</sup>。水素の持つ電子が1万円だとすると、フェレドキシンはもっと高く12,000円。じゃあ1万円札2枚持ってお買い物。羽振りのいいお金持だったら、1万円札2枚を渡して「釣りはいらねえ」になるかもしれないが、せっかく8000円お釣りがくるなら他にも何か

買いたい。一般の酵素反応であれば、余ったエネルギーのお釣りは利用できないが、電子分岐酵素はお釣りを出してくれる。電子分岐酵素は一つの水素が2個持っている電子それぞれを、違う価値 (酸化還元電位) を持った電子伝達体に分配することができる。すなわち、2個の水素から価格の高い (酸化還元電位が低い) フェレドキシンに電子を渡しつつ、残りを使って価格の安い (酸化還元電位が高い) NADHを作ることができる。1万円札2枚 (水素2個) から電子分岐酵素を介することでちゃんと2万円分 (12,000円のフェレドキシンと8000円のNADH) の商品が買える。1万円札2枚を支払ったのに12,000円のものしか手に入らないということはないし (物々交換ではありうる事態である)、1万円札1枚では買えないものを、2枚合算利用することで購入するというのも実はすごいことである。冒頭の貨幣の発明に戻るが、電子分岐酵素のおかげで、電子をまるで貨幣通貨のように生物は使うのである。電子分岐酵素は通貨としての電子を異なる単位の通貨 (電子) に両替してくれている、とともえられる。

こうして水素から取得した還元型フェレドキシンとNADHであるが、たとえば、 $H_2$ と $CO_2$ を利用して増殖できる嫌気性好熱菌の *Moorella thermoacetica* はフェレドキシンを使ってATPを作り、NADHを使って $CO_2$ 資化のための酵素反応を進める。必要あればフェレドキシンとNADHを両替して今度はNADPHを作り、 $CO_2$ 資化反応でNADPHを要する部分を進める<sup>4)</sup>。両替の前後の分子の組合せは多様である。この電子分岐酵素を介した代謝の仕組みはパズルのようでもあり、巧妙っぷりは実に感嘆する。実は、呼吸でも電子分岐の仕組みは使われているので、一度、細胞の仕組みを電子の流れという観点から見直してみながら、電子分岐酵素が司る役割をミクロに、マクロに、眺めてみることをオススメしたい<sup>5)</sup>。

- 1) Peters, J. W. *et al.*: *Curr. Opin. Biol.*, **31**, 146 (2016).
- 2) Buckel, W. and Thauer, R. K.: *Front. Microbiol.*, **9**, 401 (2018).
- 3) Müller, V. *et al.*: *Annu. Rev. Microbiol.*, **72**, 331 (2018).
- 4) Schuchmann, K. and Müller, V.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **12**, 809 (2014).
- 5) 石井正治: *生物工学*, **91**, 388 (2013).