

セルロースの酵素糖化には酵素同士の協力が大切

篠田 優

紙や綿製品、木材などに含まれるセルロースをブドウ糖（グルコース）に分解する酵素をご存知だろうか。セルロースはグルコースが β -1,4-グルコシド結合という結合により直鎖状に連なった多糖であり、植物の細胞壁の構成成分として地球上で豊富に存在する資源である。木材などのセルロース系原料は食糧と競合しないこと、二酸化炭素と水から光合成により再生可能なことから、枯渇することのない持続可能な資源としても注目されている。セルロースを容易にグルコースにまで分解（糖化）できれば、燃料用アルコールや有機酸、生分解性ポリマーの原料などを発酵生産できる。しかしながら、セルロースは同じグルコースのポリマーであるデンプンと異なり、強固な結晶構造（セルロースが束になっている）を形成しているため¹⁾、分解には大量の酵素製剤が必要となる。したがって、糖化に必要な酵素の量や酵素製剤の生産コストの低減が実用化への大きな壁となっている。

セルロースを加水分解する酵素をセルラーゼと呼ぶが、実際は単一の酵素で分解を行っているのではなく、複数種の酵素が協力してグルコースにまで分解する。これらの酵素は、セロビオハイドrolラーゼ（CBH）、エンドグルカナナーゼ（EG）、 β -グルコシダーゼ（BGL）の三つに大別することができる。CBHはセルロース鎖の末端から加水分解するセルラーゼであり、EGはセルロース鎖を内部から加水分解するセルラーゼである。BGLは、CBHやEGの分解により生じたセロビオース（グルコースが二つ結合したもの）などのセロオリゴ糖を加水分解し、グルコースを生成する^{2,3)}。

セルラーゼの存在はカタツムリの消化管において発見されて以来、動物・植物・微生物界で広くその存在が知られている³⁾。その中でも特に、*Trichoderma*属や*Aspergillus*属、*Acremonium*属のような糸状菌や*Clostridium*属などの嫌気性微生物が生産するセルラーゼについての研究が進んでいる。*Trichoderma reesei*では日本独自の改良株が育種されており、生産される酵素の諸性質の解明のみならず、遺伝子レベルでの解析も詳細に行われている⁴⁾。また、実用化を目指した遺伝子組換えによる改良も行われている。一方で、好熱嫌気性細菌*Clostridium thermocellum*では他の生物と異なり、菌体外において酵素複合体（セルロソーム）を形成することが知られており、性質が異なる複数種の酵素を集積・近接

させることで効率的にセルロースの分解を行っている³⁾。

これまでも多くのセルロース分解菌が見いだされ、それらが生産するセルラーゼに関する研究が精力的になされてきたが、工業的な利用にはさらなる改良が必要である。これまでに自然界から分解力の高い酵素を生産する微生物が探索されてきた。その中で村尾らは単に酵素活性が強いだけでなく、他のセルラーゼの弱点を補うような相乗作用を示すセルラーゼを自然界より探索し、*Trichoderma*属由来セルラーゼと相乗作用を示す糸状菌*Aspergillus aculeatus*を分離している^{2,3)}。*A. aculeatus*が生産するセルラーゼには、セロビオースを分解してグルコースを生成する活性だけでなく、グルコースが5個や6個連なったセロオリゴ糖に対しても強い分解活性を有する優れたBGLが存在している。併用することで*T. reesei*セルラーゼの弱点であるBGLを補うことが相乗作用のカラクリの一つである。さらにこの相乗作用を応用し、*A. aculeatus*のBGLを*T. reesei*で遺伝子工学的に発現させることで、より少ない酵素量での糖化に成功している⁴⁾。また篠田らも同様に相乗作用を示すセルラーゼを自然界より探索し、目的のセルラーゼ生産菌を見いだしている⁵⁾。今後さらに酵素量や酵素製剤の生産コストの低減を行っていくためには、起源の異なるセルラーゼ同士の協力が重要な鍵になるだろう。

自然界では、植物により生成されたセルロースの大部分がさまざまな微生物により分解され、失われていると考えられる。これらの現象は、*T. reesei*と*A. aculeatus*のような相乗作用を示すセルラーゼや、あるいはセルロース分解に別の役割を持つ新しいセルラーゼの存在を予想させる。我々の足下には、新規な性質を持つセルラーゼや未だ知られていないセルロース分解機構がまだまだ眠っているのかもしれない。

- 1) 東 順一ら：セルロースの事典，朝倉書店（2000）。
- 2) 村尾沢夫ら：セルラーゼ，講談社サイエンティフィク（1987）。
- 3) 近藤昭彦ら：バイオマス分解酵素研究の最前線—セルラーゼ・ヘミセルラーゼを中心として，シーエムシー出版（2012）。
- 4) Shida, Y. et al.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **80**, 1712 (2016)。
- 5) 篠田 優ら：日本農芸化学会大会講演要旨集，3C16P03 (2013)。