

セルロース分解を助ける謎のタンパク質

野崎 功一

再生可能なエネルギー源としてセルロース系バイオマスの利用に関する研究が盛んに行われているが、その中でもっとも困難かつ重要な課題は、セルロースの酵素糖化であろう。セルロース分解菌は、強固な結晶構造をもつセルロースを分解し可溶性の糖質を作るために、実に多くの種類のセルラーゼを生産する。しかし、セルロースの分解に関与するのはセルラーゼだけではない。主役であるセルラーゼが加水分解能力を十分に発揮できるように、それを陰から支える脇役者が存在することがわかってきた。彼らの仕事は、セルラーゼほど直接的なものではない。彼らはタンパク質であるが、酵素として認知もされていない。しかし、セルラーゼと共存することで、セルロース分解を促進することがわかっている謎のタンパク質である。

Bacillus 属細菌が生産するエクспанシンは、植物のエクспанシンと同様に植物細胞壁の伸長を引き起こす¹⁾。エクспанシンをろ紙に作用させると脆くなる(弱い力で崩壊する)ことから、セルロースの構造に何らかの変化を与えることがわかっている。セルラーゼの存在下では、エクспанシンの添加量に応じて分解が促進されることも確認されている²⁾。エクспанシン自身に加水分解活性はなく、おそらくセルロース分子鎖間の水素結合を緩和していると考えられている。エクспанシンの構造は、N末端側の glycoside hydrolase family 45 に属するエンド型セルラーゼに類似したD1と、C末端側の結晶性セルロースやキチンに結合するタイプAの糖質結合モジュールに似たD2の2つのドメインから構成される。しかし、D1にはセルラーゼの活性中心に相当するアミノ酸残基は存在しない。長いセルロース鎖は、エクспанシンの両ドメインの表面にわたって結合することがわかっており、結合に関与するアミノ酸残基に変異を導入すると、セルロースへの結合能力や前述したすべての活性が減少することがわかっている¹⁾。つまり、基質との結合がエクспанシンの作用と密接に関連していると考えられているが、詳細な反応機構については明らかにされていない。

一方、スオレニン属 *Trichoderma* 属、*Aspergillus* 属および *Penicillium* 属などの糸状菌によって生産されるタンパク質である³⁻⁵⁾。セルロースを「膨潤させる」=「Swollen」から命名され、その名称はセルラーゼおよびセルロース研究者の関心をかきたてる未知の機能を想

像させる。スオレニンの立体構造は解明されていないが、エクспанシンのD1とD2に相同性がある2つのドメインから構成されている。それらに加えて、N末端にリンカーでつながった糖質結合モジュール(CBM1)をもち、分子量はエクспанシン(25 k)より大きい値(75 k付近)を示す。*T. reesei*ではセルラーゼと同調して誘導・発現し、*Bacillus* 属細菌のエクспанシンと同様にセルラーゼによる加水分解反応を促進するが、その効果はより積極的でコットン繊維を膨潤させたり、ろ紙断片を繊維状に崩壊させることも確認されている³⁾。スオレニン自身には弱い加水分解活性が存在するが、セルラーゼと比較すると極微量であり、セルロースに生じる形態も既知のセルラーゼのものとは異なることがわかっている⁶⁾。また、スオレニンの反応機構に関しても、詳細は明らかにされていない。

これらタンパク質の新しく独特な機能に注目して、セルロース系バイオマスの酵素分解の促進に利用する研究が試みられてきた。しかし、これらが添加効果を発揮できるのは、極低濃度のセルラーゼが共存する時だけであるため、バイオエタノール製造で使用する強力なセルラーゼの下で、活性促進効果を得ることは不可能だと考えるのが自然であろう。また、*T. reesei*においては、スオレニンの遺伝子破壊株が作製され、その機能が調査されてきたが、セルラーゼ生産量や分解力に明確な変化は生じなかった。一方では、これら菌が植物の根に感染する際に植物細胞壁にあるセルロースの結晶構造の緩和に働いているという結果も存在する。いずれにせよ、限られた量のセルラーゼの働きを、最大限発揮させるためには、これらタンパク質の存在は有用であると考えられる。今後、このようなセルロース分解を補助する新規タンパク質が数多く発見され、その機能や反応機構の解明が進むことを期待したい。

- 1) Georgelis, N. *et al.*: *J. Biol. Chem.*, **286**, 16814 (2011).
- 2) Kim, E. S. *et al.*: *Biotechnol. Bioeng.*, **102**, 1342 (2009).
- 3) Saloheimo, M. *et al.*: *Eur. J. Biochem.*, **269**, 4202 (2002).
- 4) Chen, X. A. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **76**, 2556 (2010).
- 5) Kang, K. *et al.*: *BMC Biotechnol.*, **13**, 42 (2013).
- 6) Andberg, M. *et al.*: *Bioresour. Technol.*, **181c**, 105 (2015).