



酢酸菌の酢酸耐性

飯田 彩

食酢は古くからある代表的な調味料の1つである。近年、食酢の主成分である酢酸が、高めの血圧を下げる、高めの血中総コレステロール値を下げるなど生活習慣病の予防に役立つことが明らかにされ、その健康機能にも注目が集まっている。

食酢は酢酸菌が担う酢酸発酵によって製造される。食酢製造に用いられる酢酸菌は細胞膜に局在するアルコール脱水素酵素とアルデヒド脱水素酵素を有しており、両酵素を使用して、エタノールを酸化し、酢酸を生産する。この酢酸に抗菌作用があることはよく知られているが、それではなぜ、酢酸菌は酢酸環境下で生存できるのだろうか。酢酸菌は株によっては20%を超える高濃度の酢酸を生産することが知られており、これは同時に酢酸菌が驚異的な酢酸耐性を有することを示している。とはいえ、酢酸菌にとって、酢酸発酵は諸刃の剣であり、酢酸を生産することによって、他の微生物の生育を抑制する一方で、高濃度の酢酸は自らの生存をも危うくする。このため、食酢製造において酢酸菌の酢酸耐性機構を解明することはより効率よく食酢を製造する上で有用であるとともに、酢酸菌にもたらされた酢酸に対する驚くべき耐性能には興味を持たれる。そこで、本稿では近年明らかにされつつある酢酸菌の酢酸耐性機構について紹介したい。

酢酸は細胞膜を透過して細胞内に流入すると、酢酸イオンとプロトンに解離し、細胞内のpHを下げると考えられる¹⁾。そこで、酢酸菌は細胞内に流入した酢酸から自らを守るため、いくつかの対策を講じているようだ。その1つは最近報告された酢酸耐性を向上させるABCトランスポーターAatAである²⁾。AatAをコードする遺伝子を破壊すると、酢酸耐性が低下し、高発現すると、野生株よりも酢酸生産量が増加した。また、AatAは酢酸菌だけでなく、大腸菌でも機能することが分かっており、高発現することで、大腸菌の酢酸耐性も向上させるすぐれものである。一方で、放射性同位体でラベルした酢酸の取り込み実験により、酢酸菌がプロトン駆動力依存的な酢酸排出ポンプを有していることも示されており³⁾、膜を透過して細胞内に流入した酢酸が強力に排出されていることが予測される。

上記の輸送系に加え、クエン酸合成酵素やアコニターゼといったTCA回路の酵素が酢酸耐性に関与することが分かってきている⁴⁾。TCA回路が活性化することにより、細胞内に流入した酢酸が消費されるためと考えられている。最近になって、酢酸菌のクエン酸合成酵素の解析が行われ、生化学的特徴や結晶構造が明らかにされた⁵⁾。その結果、酢酸菌のクエン酸合成酵素は酸や温度に安定であることが示された。また、大腸菌と比較して、タンパク質表面が塩基性であることが明らかにされ、このことが、酸安定性に寄与しており、pHが低下した酢酸菌の細胞内で都合よく機能しているのではないかと推測されている。

また、外界の酢酸環境と直接接している細胞膜も酢酸耐性への関与が注目される。実際、酢酸菌の細胞膜は培養液の酢酸濃度の上昇によって変化することがわかっている⁶⁾。酢酸濃度の上昇とともに膜の主要成分であるリン脂質のうちフォスファチジルコリンが増加する。おもしろいことに酢酸耐性能の異なる菌株間でも同様の膜組成の変化が認められている⁷⁾。この膜組成の変化と酢酸耐性の関係は現在のところ明確にはされていないが、酢酸菌は細胞膜を変化させることにより、酢酸耐性を強化しているのではないかと考えられる。

以上のように、酢酸菌は酢酸排出、酢酸資化、細胞膜の強化などを組み合わせた酢酸耐性システムによって、高濃度の酢酸環境中での生存が可能になっていると考えられる。酢酸菌では*Gluconacetobacter polyoxogenes*、および*Gluconobacter oxydans*でゲノム解読が終了しており、今後ますます研究が進むものと思われる。酢酸菌が自ら生産する酢酸に対する耐性機構は非常に興味深く、今後の更なる解析が待ちどおしい。

- 1) Axe, D. D. *et al.*: *Biotechnol. Bioeng.*, **47**, 8 (1995).
- 2) Nakano, S. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 497 (2006).
- 3) Matsushita, K. *et al.*: *J. Bacteriol.*, **187**, 4346 (2005).
- 4) Nakano, S. *et al.*: *FEMS Microbiol. Lett.*, **235**, 315 (2004).
- 5) Francois, J. A. *et al.*: *Biochemistry*, **45**, 13487 (2006).
- 6) 東出ら：日食工誌, **43**, 117 (1996).
- 7) 後藤ら：油化学, **49**, 349 (2000).

著者紹介 (株) ミツカングループ本社 中央研究所 (研究員) E-mail: aya-i@mizkan.co.jp