

酒類醸造の主役である酵母や麹菌の“醸造中の代謝”を調べるという場合、物質代謝を指すことが多い。しかし物質代謝そのものはエネルギーの代謝によって起きている。本稿は、最近の研究動向を交え、この菌体における代謝について、エネルギー代謝の視点から紹介したい。

エネルギー代謝とは、生命現象をエネルギーという角度から見た熱力学的要素の強い視点である。生体内において発生したエネルギーは、“エネルギー通貨”であるアデノシン三リン酸（ATP）の高エネルギーリン酸結合による化学エネルギーを主な媒体として、生体内物質代謝に必要な還元力や熱などに変換されている。

醸造に関するエネルギー代謝については、アルコール発酵中の酵母の例がいくつか報告されている。ビールや清酒、りんご酒などの酒類において、菌体あたりの細胞内ATP含量や、アデニンヌクレオチド（AdN）全体のなかでどれだけリン酸結合エネルギーがチャージされているかを表したエネルギー・チャージ $\{EC; ([ATP]+0.5 \times [ADP])/([AMP]+[ADP]+[ATP])\}$ などの指標を用いて、酵母の発酵中におけるAdNの推移が調べられている。どの酒類においても、発酵中の酵母は高いエタノール濃度や糖濃度などのストレスに晒されるにもかかわらず、培養後期に至るまで（ビールでは残糖がなくなるまで、清酒ではアルコール添加を行うまで）、ほぼ一定の高い値（ATP濃度 $>5 \mu\text{mol/g}$ 、あるいは $EC > 0.8$ ）を維持していることがわかっている。これらはビール製造などにおける酵母活性（cell viability）の指標となる可能性が示唆されている。

一般的にECは細胞の代謝活性に関与すると考えられており、酵母活性の指標としてだけでなく、香气成分の生成など、酒類の品質向上の指標にもなる可能性が考えられる。Guimaraes¹⁾らは、麦汁の濃度と、発酵に用いる酵母の菌株を変えてビールの発酵を行い、それぞれについて発酵中のECを測定した。しかし発酵後期では酵母活性に差が見られたものの、最終的なビールの品質と成分の違いを説明できるような、発酵全般におけるECの有意な差は認められなかった。酒類では代謝の微妙な差異が最終的な品質に大きく影響しており、品質を従来のように菌体内のAdNだけで解析しようとするのは難しいようである。

生体エネルギーのほとんどはAdNに集中しているといわれているが、すべての代謝経路がエネルギー源として直接AdNを使うわけでない。補酵素であるピリジヌクレオチドをエネルギー源として利用する経路もいくつか存在しており、これらは細胞の脱水素酵素活性、酸化リン酸化およびAdNのエネルギー状態に影響を与えている。そのほか、間接的なエネルギー・カップリングに関係するヌクレオチドとして環状アデノシンリン酸、グアノシン三リン酸などが知られており、AdN以外にも生体内のエネルギーは広範な代謝物に分散して存在している。酒類品質に影響する代謝の微妙な違いを見るためには、AdN以外のこれらの物質を広範に解析していく“オミクス”の手法が必要と思われる。

よく知られているようにメタボロミクス解析では、サンプルからの代謝物を取得する際の抽出法に依存して、回収できる代謝物のカテゴリーが非常に異なってくる。実際、水溶性、脂溶性、酸性、塩基性、非イオン性など、代謝物の物性により抽出法のほか、分離法や測定法も異なってくるため、適応上においては、広範な代謝物のなかからターゲットをある程度絞った、いわゆるフォーカスド・メタボロミクスがより有効であると考えられはじめている。エネルギー代謝のメタボロミクス解析を行う場合、ターゲットとなる代謝物はヌクレオチドを中心としたカテゴリーになることが想定されるため、代謝物数は物質代謝の場合に比べてはるかに少なく、また抽出法などの条件を絞りやすい。反面、安定性に問題のある化合物が多く、サンプルの保存や分析の迅速化などに留意が必要と思われる。このようにして、エネルギー代謝に関連する、できる限り多くの代謝物の量的変動プロファイルを得ることで、醸造中の菌体内のエネルギーの流れが解明でき、酒類の品質に影響するような代謝の違いを知ることができると期待される。

以上、酵母のアルコール発酵におけるエネルギー代謝について述べてきたが、固体発酵である麹についてはどうであろうか。これは物質代謝も含め、酵母に比べて圧倒的に文献が少ない。まさに、これからの課題であると思われる。

1) Guimaraes, P. et al.: *Yeast*, **25**, 47(2008).