

生産現場で威力を発揮する酵素

鈴木 陽一

筆者も以前そうであったように、これを読まれる方々、特に学生の皆さんの多くは酵素についてこのような認識をお持ちではないだろうか。それは、“小さなバイアルが何千円もする高価な触媒”、“必要量を分取したらすぐ低温に戻さないと失活するデリケートなタンパク質”、“組換え菌に発現させて、細胞破砕液からアフィニティーカラムで精製し電気泳動で確認”といった教科書のかつタンパク実験プロトコル的なものである。もちろんこれらは正しく、今も世界中のラボでは日夜体力勝負の変異導入、形質転換が繰り返されていることであろう。ところが、産業用酵素の場合はその限りではない。バルクで安価な供給が求められるため、菌体内からの精製では収量が追いつかず、得られた酵素も必ずしも丁寧に扱ってはもらえない。たとえば、化成品合成用途では熱や有機溶媒にさらされながらも高収率を求められ、洗剤中ではご家庭で酵素パワーを発揮する前にドラッグストアの店頭で直射日光を浴びる。しかし、一般消費者層にまで“酵素”の存在を浸透させたこの洗剤用途も、実は酵素製剤が消費者の目に触れ、直接使われるきわめてまれな応用分野である。産業用酵素は多くの場合生産現場で反応を触媒し、最終製品が棚に並んだときにはその役目を終えている。

現場の酵素はタフで地味なものだというイメージを持っていただいたところで、ここでは筆者の所属するノボザイムズ社の酵素製剤をいくつか取り上げながら、生産プロセスで機能する酵素について食品、日用品を中心にいくつかの産業を例にあげ、その役割を紹介したい。

リパーゼの油脂加工への応用¹⁾

一般にトリグリセリド (TG) のエステル結合をグリセリンと脂肪酸に分解することで知られるリパーゼであるが、この反応は可逆的で、十分な水分子の存在下では加水分解が優勢である一方で、微水系・非水系ではエステル合成、アルコールシス、エステル交換反応を触媒することも知られている。リパーゼはその基質特異性、位置特異性、脂肪酸特異性などの違いによって特徴づけられ、これらの特性を巧みに利用して油脂加工への応用が試みられてきた。また、固定化リパーゼも製品化されており、

充填カラムを用いた連続運転などに適した性質を持つ。

リパーゼでも特にリン脂質のエステル結合を切るホスホリパーゼがあり、これらを含むリパーゼは構造油脂、一般油脂の連続エステル交換、脱ガム（主としてリン脂質を除去する工程）、レシチンの改質などに広く応用されている。

固定化リパーゼの応用には構造油脂および機能性油脂の合成がある。構造油脂とはグリセロールに位置特異的に特定の脂肪酸を結合させて得られるTGである。すでに工業化された実績のある代表的な構造油脂には、ココアバター代替脂、母乳代替脂、ブルーミング防止剤などがあるが、いずれもTGの1,3-位特異的なリパーゼの特徴を活かして合成されたものである²⁾。

市販の固定化リパーゼLipozyme[®] RM IMは*Rhizomucor miehei*由来のリパーゼで、高い1,3-位特異性を持つ。この固定化酵素を用いた構造油脂の研究は数多く、たとえばカプリル酸とエイコサペンタエン酸からMLM型構造油脂を合成した例などがある³⁾。MLM型構造油脂とは1,3-位に隣置リパーゼで分解されやすい中鎖脂肪酸を導入し、2-位の必須脂肪酸、高度不飽和脂肪酸、または長鎖脂肪酸エステルを効率的に取り込むことを意図した構造油脂である。

現在では低価格の固定化リパーゼの開発や、生産設備、プロセスの最適化によるコストコントロールが進み、食用を中心とした市場の一般油脂のエステル交換にも固定化リパーゼが積極的に用いられるようになってきている。一般油脂のエステル交換用に開発されたりパーゼにLipozyme[®] TL IMがあるが、これは原料脂の融点以上で使用できる耐熱性や、固定化担体にシリカゲルを用いることで比較的安価に、かつ反応系の水分を極力抑え加水分解を最小限にとどめることができるなど、この用途でのエステル交換反応に求められる特徴を有した固定化酵素である。

基質特異性以外にエステル交換反応の工程で酵素を用いる利点としては、一般的にあげられる比較的穏やかな条件で反応が進行することに加えて、たとえば従来のアルカリ触媒法必要であった洗浄、乾燥、漂白といった後工程を省略できるといったことがある。

製パンへの酵素の応用^{1,4-7)}

一言で製パン用酵素といってもそのパンへのかかわり方はさまざまで、パン生地調整、焼き上がりのボリュームのコントロール、さらには時間の経過に伴って硬くてもろくなるという性質の変化（老化）を防止したりと、パンのおいしさの鍵である食感や風味の向上、保持に工程の各所で寄与している。

製パンの処方には通常、パン生地に強度や弾性を付与することを目的として乳化剤が補助剤として加えられる。しかし、その添加量によっては、乳化剤由来の苦味や独特の風味が小麦本来の味に影響を与え得る。この乳化剤と置換えが可能な成分として注目されているのがリパーゼである。Lipopan[®] F BGは小麦粉に含まれる脂質、たとえばTG、レシチン、糖脂質を部分加水分解し、得られた極性脂質などの分解生成物が従来の乳化・分散作用を示すと考えられている。

パンの老化防止に用いられる酵素に α -アミラーゼがある。製パン業界での α -アミラーゼには主としてカビ由来と細菌由来のものがあるが、カビ由来のものは十分な老化防止効果が得られにくく、細菌由来のものは澱粉の過剰な分解による食感のクチャつきを与える、といった弱点があった。その違いは熱安定性に起因している。Novamyl[®] 10000BGは細菌由来の α -アミラーゼであるが、カビ由来と細菌由来のちょうど中間の熱安定性を有しているため、澱粉を効果的に分解して低分子の糖と可溶性デキストリンを生成して老化を起りにくくする。また、この酵素は焼成中で失活し、クチャつきを与えるほどには澱粉の分解が進行しない。加えて、長い保存期間を通じてパンのやわらかさと弾力性を保つことについても高い効果を得ている（図1）。

ビール醸造用酵素⁸⁻¹⁰⁾

1984年の酒税法改定により、ビール醸造においても酵素の使用が認可され、その製造に用いられるようになった。



図1. Novamyl[®]添加焼成7日後（右）と無添加焼成7日後（左）

り、今では欠かせない存在となった。ビールの製造工程は製麦、仕込み、醗酵、熟成に大別されるが、まずそれぞれの工程での酵素の役割に触れておきたい。製麦工程では大麦の発芽と焙燥が行われるが、この際の大麦種子中では発芽の際に発現する酵素によって種子中の栄養素の部分分解が始まる。次いで、仕込み工程ではデンプンやタンパク質の加水分解が麦芽由来の酵素群（ α -アミラーゼ、 β -アミラーゼ、プロテアーゼ、 β -グルカナターゼなど）によって進行し、糖やアミノ酸にまで低分子化されたそれらは麦汁中に回収され、醗酵工程でビール酵母に資化される。続く熟成工程では若いビールが低温で貯蔵され、比較のおだやかな酵素反応によって香味成分の変換が起こり、香りと味が調整される。

昨今の健康志向で需要が伸びている低カロリービールを例に、その製造において糖質由来のカロリーの低減にどのように酵素が寄与しているかについて簡単に解説したい（図2）。ここでいうカロリーに相当する糖質とは主として非醗酵性のデキストリンのことである。麦芽由来の酵素だけではそれ以上分解できないデキストリンを醗酵可能な糖へと変換する糖化酵素の添加がここではポイントとなる。仕込み工程で添加される糖化酵素にはグルコアミラーゼ、プルラナーゼなどがあげられる。これらの酵素は単独での使用よりも併用することでより高いデキストリン分解効果を示す。これは、複雑な枝分かれ構造をとっているアミロペクチンの分解に、 α -1,6結合を切断するプルラナーゼと、主に α -1,4結合を切断するグルコアミラーゼが相乗効果を発揮するためである。仕込み時に添加されるこれらの酵素は、麦汁の煮沸工程で失活するためビールには酵素活性が残存せず、酵素の取り扱いが比較的容易といえる。

低カロリービールの製造をより容易なものとするた



図2. 低カロリービール（イメージ）

め、あらかじめグルコアミラーゼとプルラーゼを混合させた製品が販売されている (Attenuzyme® Flex)。この酵素製剤は高性能グルコアミラーゼ、特殊な α -アミラーゼ、新規のプルラーゼを成分とするもので、従来の糖化酵素と比較して必要添加量や糖化時間も短縮され単独で十分な効果を発揮する酵素製剤である。

ここであげた低カロリービール以外にも、発泡酒、第3のビールと、酵素はその製造に深く関わっている。

衣料品加工に用いられる酵素¹¹⁾

唐突ではあるが服飾分野に話題を変える。19世紀のアメリカで作業着として誕生したジーンズは、そののち、カジュアルウェアとしてあつという間に世界中に普及した。実はそこにも酵素の活躍の場はある。

そもそも生地がコットン（セルロース）であることに加え、デニム生地の横糸には織りやすくするためのデンプン糊が、縦糸にはインディゴが毛羽立った綿繊維表面にのっている。故に、前者にはアミラーゼが糊抜きに、後者にはセルラーゼが微細なフィブリルをランダムに加水分解することで、やわらかい穿き心地や、あらかじめ穿きこんだような風合いや色の変化を与えている。その一方で、洗い加工工程の簡略化や、ケミカルの代替に用いられることによって環境負荷の低減に貢献していることにも言及したい。

変遷するジーンズのトレンドにも呼応し、80年代のストーンウォッシュには軽石の代替にセルラーゼが用いられ、ケミカルウォッシュには漂白剤の代わりにラッカーゼがメディエーターを事前配合した形で製品化された (Denilite® など)。この酵素はインディゴの藍色を特異的に漂白するため、生成りの白にも作用する次亜塩素酸ソーダなどによる一般的なそれとは異なり、青とナチュラルな白のコントラストを維持したままの自然な仕上がりが得られることが特徴である。ただ、ファッションの流行にはサイクルがある、というのは本当のようで、ケミカルウォッシュを若者が今の解釈で着こなしているのを街で目にする機会もある。

酵素による繊維加工の対象はジーンズばかりではない。先日、自宅のクローゼットを断捨離していてバイオ加工に言及した製品説明タグが付いたポロシャツを見つけた。あらためてタグを確認すると“バイオ加工とは、酵素（セルロース分解酵素）により、繊維の一部を分解し、洗い加工独特のもみ作業を加えることにより染料を繊維上より脱落させる加工です。”とあった。酵素種までがしっかり記載されていたのでタグも捨てずに残しておいたのである。筆者にとっては、酵素での繊維加工と

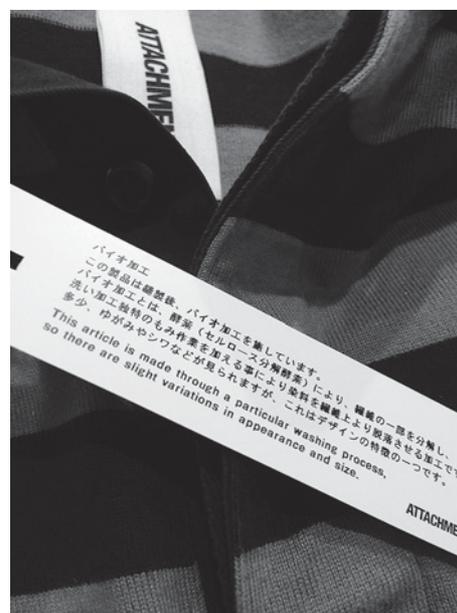


図3. 筆者愛用のポロシャツとその製品説明タグ

いうとバブル期のケミカルウォッシュのイメージが強かったため、“さすがに繊維加工で酵素のお世話になることだけはあるまい”と心の中で思っていた自分を恥じたい。実のところ、筆者はこのポロシャツをかなりのヘビーローテーションで愛用していた(図3)。このように、繊維加工用酵素もその用途を拡大している。

おわりに

酵素は生きとし生けるものの生命活動に欠かせない体内の触媒であるばかりでなく、日常生活のいたるところでさりげなくそのユニークな特性を発揮し、ささやかではあるが、我々の暮らしを豊かなものにしてきている。本稿がそんな酵素をより身近に感じていただく一助となれば幸いである。

文 献

- 1) 安部京子：バイオインダストリー，19, 62 (2002).
- 2) Xu, X.: *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, **102**, 287 (2000).
- 3) Irimescu, R. et al.: *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **77**, 501 (2000).
- 4) 中嶋康之：月刊フードケミカル，26, 35 (2010).
- 5) 中嶋康之：月刊フードケミカル，28, 19 (2012).
- 6) ノボザイムズ社技術資料，2001-15773-01 (2001).
- 7) ノボザイムズ社技術資料，2010-26391-01 (2010).
- 8) 宮地秀夫：ビール醸造技術，食品産業新聞社 (1999).
- 9) 宮下 陽：酵素利用技術大系，エヌティーエス，p. 771 (2010).
- 10) ノボザイムズ社技術資料，2013-11705-01 (2013).
- 11) 坂口博脩：洗濯の科学，59, p. 20 (2014).