JIBはみだし授業

日本パン技術研究所教育コースの興味深いテーマを解説します。

「発酵種の中の穀粉と微生物の複雑な関係」(その2)

～「酵母」だけじゃない「穀粉・乳酸菌との連携」の世界～

一般社団法人日本パン技術研究所　研究調査部　原田昌博

前号に引き続き連続寄稿になるが、今まで「自家製、天然、産地など」＋「酵母（あるいは酵母種）」 だけで語られてきた発酵種（サワー種）について、その陰で非常に素晴らしい仕事を行っている乳酸菌 を中心に、サワー種製パンの有効性を紹介する。

【参考文献】
Les levains de panifi cation: Microbiote et Fonctionnalités
（著者：Emilie Lhomme, Xavier Dousset, Bernard Onno ・2016 年 12 月 10 日発行

9. サワー種パンの風味

サワー種を使うと乳酸菌が醸し出す各種成分が品質に影響する。主として乳酸菌の産生する乳酸や酢酸が製品に酸味を与え、酢酸は刺激的な酸臭を与える。両者の産生量や個々の産生比率は発酵条件の影響を受ける。

刺激的な酸味酸臭は乳酸／酢酸のモル比率で定義され、この比率はサワー種の発酵温度に依存し、酸の生成量と乳酸比率は発酵温度が高くなるにしたがって増加する。他には水分（加水量）、発酵時間、使用する小麦粉などの技術的なパラメーターの組み合わせによって、乳酸／酢酸比率は変動する。

例えば、酢酸臭の強いドイツパンは、フランスパンよりも刺激的な酸味酸臭を持っている。このような風味を作り出すためにサワー種発酵にはライ麦粉を使用する。そうするとサワー種の酢酸比率は高まる。

逆に、典型的なフランスパンはパンの香りを最適化するために酢酸比率が高くないサワー種を用いる方が望ましいため、サワー種に小麦粉が使用される。

さらに酢酸比率はサワー種配合量の影響を受けるため、生地に配合するサワー種の添加量はライ麦パンより少なく、サワー種発酵に用いるスターターもライ麦粉サワー種用の菌叢とは異なる。

パンの香気成分の産生について、酵母は芳香族化合物の産生と関わっているが、乳酸菌ではプロテアーゼの作用で得られたアミノ酸の転移反応や脱アミノ化および脱カルボキシル化を介して、アルデヒドなどのフレーバー物質の前駆体物質の産生をもたらす。

また、特定の乳酸菌はクラストの香りに関わっており、アルギニンの代謝はアルギニンデアミナーゼ（ADI）により生地中のオルニチン含量を高める。オルニチンはクラストのメイラード反応で起こるストレッカー分解反応により、パンらしい風味の原因物質といわれている 2-アセチル（1-）ピロリンの含有量を高める。

この ADI 活性はヘテロ型発酵を行う乳酸菌の *L.sanfranciscensis, L.brevis, L.fructivorans* などで発見されている。他にはグルタミンを旨味に寄与するグルタミン酸に変換する。さらに、これらアミノ酸代謝と並行して、芳香族化合物の合成における重要な中間体であるアルデヒドによる脂質酸化も誘導する。

このように酵母と乳酸菌の代謝による相互作用は、パン中の芳香族化合物の産生に大きく貢献している。

一般的な製パンでは、「発酵」は主にクラムの風味に影響し、クラストでは「脂質酸化とメイラード反応」による２つの要因で風味が形成される

10. 細胞外多糖類と食感

細胞外多糖類（exopolysaccharides：EPS）の定義はグリコシド結合によって連結された糖のポリマーとされ、EPS は細胞外に分泌される。

EPS は増粘剤として使用され、粘度付与、エマルション化、ゲル化などの効果により製品の安定性を改善するため多くの食品に添加することができる。

EPS は２つのタイプに大別され、複数の糖から成るヘテロポリサッカライドと、単一の糖から成るホモポリサッカライド（HOPS）に分類され、乳酸菌代謝では HOPS としてグルカンブ ドウ糖のポリマー）またはフルクタン（果糖のポリマー）が知られ、EPS 産生乳酸菌は、それぞれグリコシルトランスフェラーゼ、フルクトシルトランスフェラーゼを発現し、これらの酵素によりショ糖から EPS を合成する。

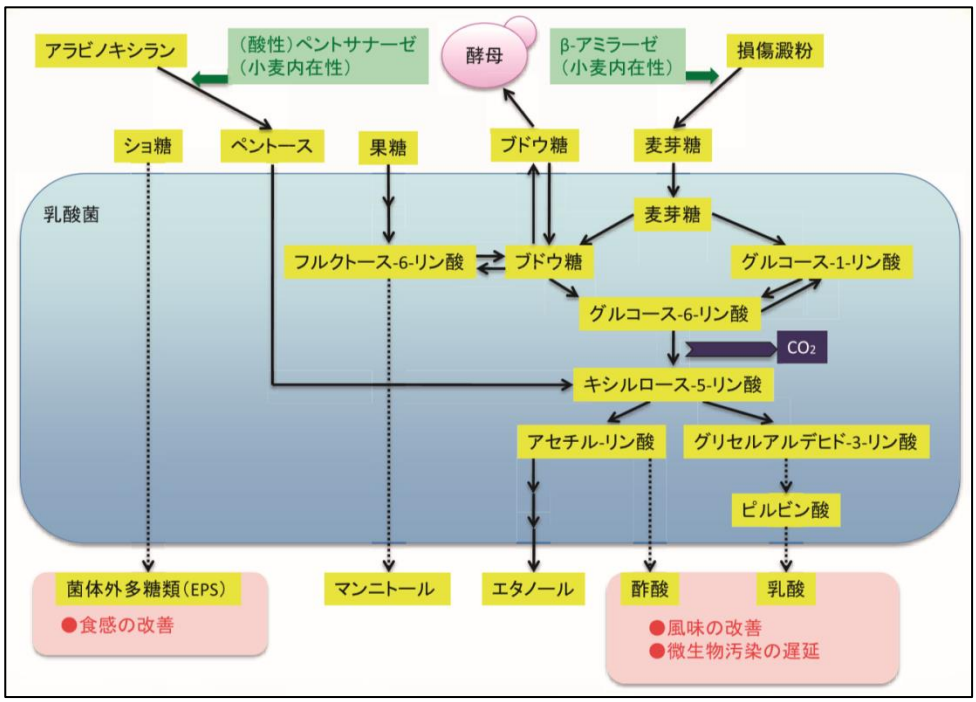


図2. 乳酸菌の菌体内外における糖質の代謝と製パンに与える機能

HOPS の構造や分子量、産生濃度は、乳酸菌の種類や炭水化物の濃度に依存し、合成されたグルカンやフルクタンはパンのボリュームやソフトさに影響を与える。

そして、EPS の製パン改良効果はサワー種発酵工程を経て産生された場合に限らず、別途合成された EPS を製パンに添加しても効果は現れる。

なお、EPS はすべての乳酸菌が産生できる訳ではない。小麦粉サワー種発酵中では *L. frumenti, L. reuteri, L. pontis, L. sanfranciscensis* が EPS を合成することが知られている。

これらの種はグルカン（デキストラン）よりフルクタン（イヌリン及びレバン）を合成する。これら以外では *W. cibaria, Ln. mesenteroides, L. plantarum* で EPS を合成することが知られている。さらに EPS はパンの気泡構造を改善するといわれ、グルテンフリーのパンの食感を改善する可能性も秘めている。

しかし、これを実現するためには製パン性改善に十分な量の EPS をサワー種発酵中に産生できるかどうかにかかっており、市販の親水コロイドと比較して、EPS の効果は未だ十分とは言い難いのが現状である。

ここで、乳酸菌の菌体内外における糖質の代謝と製パンに与える機能について**図 2** に示す。

11. 抗菌活性物質の産生

乳酸菌は、枯草菌、大腸菌群、真菌などに対して増殖を阻害する物質を産生する。この抗菌活性は、pH の低下と乳酸や酢酸などの低分子の酸としての効果、バクテリオシンおよび抗真菌物質の分泌による。

これらの静菌効果は、パンの日持ち向上効果のある添加物の代替として利用することもできる。例えば、枯草菌（バチルス）は培地の酸性化によって阻害される。また、酢酸やプロピオン酸は、乳酸よりも静菌作用が強い。さらに、乳酸菌はバクテリオシンを産生することで不要な細菌を阻害する。バクテリオシンは、系統発生的に近い細菌に対する殺菌または静菌活性を有するペプチドである。バクテリオシンと産生する乳酸菌の一例には、bavaricine A（*L. sakei*）、plantaricine（*L. plantarum*）、BLIS C57（ バクテリオイシン的な抗菌物質）（*L. sanfranciscensis*）、amylovorine（*L. amylovorus*）、reutericycline（*L. reuteri*）などが知られている。

抗真菌活性としてはジアセチル、過酸化水素、酢酸、プロピオン酸、カプロン酸、フェニル酢酸、reutericycline があり、これらはサワー種発酵中に増えていき、培養時間とともに抗真菌活性も強くなる。

他には *L.plantarum* が産生するフェニル乳酸や 4-ヒドロキシフェニル乳酸も同様の効果が認められており、パンの保存中に *Aspergillus niger* や *Penicillium roquefortii* の生育を 7 日間遅延させたという報告がある。しかし、サワー種発酵中に産生される個々の抗真菌活性物質の効果は、単体では弱すぎる量しか含まれない。よって、サワー種製パンにおける抗真菌成分の効果は複数の成分の相乗効果に起因している。

その事例として *L.amylovorus* の抗真菌効果はフェニル乳酸、フェノール酸、脂肪酸および環状ジペプチドを含む、10 以上の化合物の相乗的活性に起因することが判っている。

このような乳酸菌発酵によってもたらされる抗真菌効果は、現在、欧州で求められている「クリーンラベル」（添加物低減化）の手段のひとつとして利用が期待される。

12. サワー種製パンと栄養的価値

サワー種製パンは栄養的にも様々な効果が期待される。例えばミネラルの利用率の向上、グリセミックインデックス（GI 値）の低下、生理活性化合物の増加、また、プレバイオティクスの生体利用率の増加など。

微量元素は重要な栄養源であるが、ミネラルの吸収はフィチン酸存在下では制限される。フィチン酸は金属イオン（亜鉛、銅、コバルト、マンガン、カルシウム、鉄）と不溶性の塩（錯体）を形成することができ、この塩の形成によって吸収が阻害される。

一方、パンの製造中にフィチン酸は小麦粉中の内在性のフィターゼによって分解を受けるが、フィターゼによる分解には pH、温度および発酵時間の影響を受ける。このフィターゼの活性やミネラルの溶解性を高めるためにサワー種培養環境は最適の pH 条件を与える。 *L.sanfranciscensis* に分類される特定の株を用いた研究では、高いフィターゼ活性を有することが示されており、この株を小麦粉サワー種のスターターとして使用した場合、フィチン酸塩を約 50%低減化したという報告もある。

セリアック病に起因する吸収不良に苦しむ患者に対してフィチン酸はミネラルの生物学的利用能を低下させ栄養障害を強調するが、サワー種はこれらの問題解決の手段にも利用の可能性が期待されている。

穀物製品の中で、パンは消化性炭水化物の主要な供給源であり、血糖指数（GI）は高い。GI 値は炭水化物の消化による血糖値上昇の目安を表わす。高い GI 値は炭水化物が速く消化され血糖値が即反応して高まることを示す。一般に全粒粉などの非消化性の食物繊維を多く含むパンを食べると GI 値は低下する。

サワー種製パンでは小麦粉灰分が比較的高い小麦粉が利用されることが多いという事もあり、サワー種使用製品の消費量に応じて GI 値が減少したという報告もある。

また別の研究では、乳酸菌によって産生される乳酸はデンプンの糊化度を低下さるため、消化性を低下させる。この消化性低下が GI 値の低減に寄与するという報告もある。

最近、「発酵」は生物活性物質を生成することが実証されている。生理活性物質とはヒトの健康に影響する化合物（ペプチド、ポリフェノール、オリゴ糖など）として定義されており、サワー種に関する研究では、乳酸菌と酵母、種々の穀物による発酵工程で抗酸化性物質や lunasin（腫瘍細胞の抗転移に関与するタンパク質）が発見されている。

L.curvatus や *L.brevis* を用いた研究では lunasin 濃度が生地の発酵によって 2 ～ 4 倍高くなるという報告もある。さらに L. sanfranciscensis によって産生される EPS のうち、レバン（フルクタンの一種）などの代謝物は in vivo（生体内）において活性を有する。

また、潜在的なプレバイオティクス効果を有する多糖類の形成は、ソルガム生地を *L. reuteri* や *W. cibaria* で発酵させたサワー種からも見つかっている。これら EPS は生体内の腸内細菌によって代謝され、コレステロールやトリグリセリドの低下に寄与する。

このようにサワー種発酵における機能的な EPS の生産と、プレ（生菌摂取）およびプロ（死菌摂取）バイオティクスの探索に関する研究についても期待したい。ここで、乳酸菌の菌体内外におけるアミノ酸等の代謝と製パンに与える機能について**図 3** に示す。

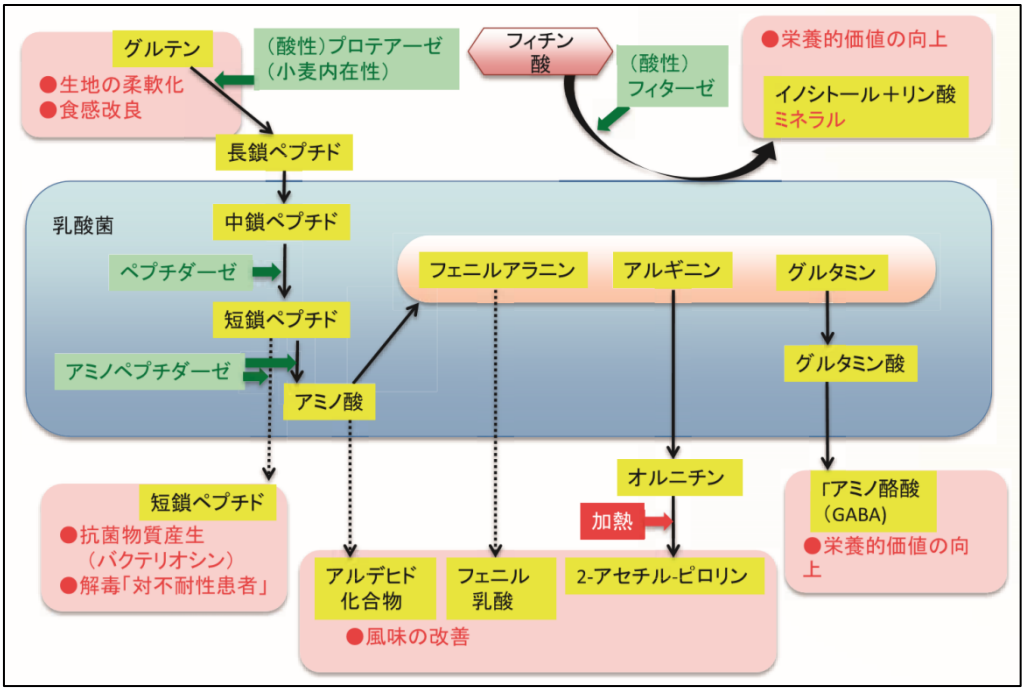


図 3. 乳酸菌の菌体内外におけるアミノ酸等の代謝と製パンに与える機能

13. サワー種起こし時の菌叢の変化

微生物学的観点から見ると各種サワー種には酵母と乳酸菌がダイナミックにバランスがとられ、相互作用しつつも生態系が維持されている。そしてその維持には多く内部要因と外部要因が関与する。

その維持管理に関わる各種条件は極めて不安定さを伴いつつ、常に更新を繰り返す事によって安定させる事もできるため、サワー種は「自然（一部では、天然と誤認される）」としての微生物の多様性を持ちつつも人為的に維持された培養物「人工」ということもできる。

最初の種起こし開始時、微生物叢は小麦粉（あるいはライ麦粉など）付着微生物そのものであり、約 10^2 ～10^5 CFU/g ほど存在する。

検出された微生物には、腸内細菌のバクテロイデス（*Bacteroidetes*）やファーミキューテス（*Firmicutes*）、プロテオバクテリア（*Proteobacteria*）藍色細菌のシアノバクテリア（*Cyanobacteria*）、グラム陰性好気性細菌の *Pseudomonasou* 属、食中毒菌の黄色ブドウ球菌（*Staphylococcus aureus*）やセレウス菌（*Bacillus cereus*）など、さらにカンジダ（*Candida*）、クリプトコッカス（*Cryptococcus*）、ピチア（*Pichia*）、ロドトルラ（*Rhodotorula*）、トルラスポラ（*Torulaspora*）、トリコスポロン（*Trichosporon*）、サッカロミセス（*Saccharomyces*）及びスポロボロミセス（*Sporobolomyces*）や、アルテルナリア（*Alternaria*）、クラドスポリウム（*Cladosporium*）、ドレクスレラ（*Drechslera*）、フザリウム（*Fusarium*）、ヘルミントスポリウム *Helminthosporium*）、アスペルギルス（*Aspergillus*）およびペニシリウム（*Penicillium*）など真菌に属する酵母やパン酵母の近縁種、他にカビなども見つかっている。それらに混在して乳酸菌桿菌（*L.casei, L.coryniformis, L.curvatus, L.plantarum, L.salivarius*）、ホモ型乳酸菌（*Enterococcus faecalis, Lc.lactis, P.acidilactici, Pediococcus parvulus, P.pentosaceus*）、ヘテロ型乳酸菌（*Leuconostoc*、*Weissella*）などのサワー種を構成する乳酸菌も検出される。

これらのほとんどは不活性状態で存在し、穀粉に水が加えられ時間が経つに連れて競争力のある乳酸菌によって置き換えられていく。

培養２日目（２回の種継）辺りからサワー種を構成する乳酸菌が一気に増え始め、酵母以外の多くの細菌は培養環境への適応性の欠如より衰退していく。

その後４～５日目辺りまでの種継ぎでは、パン酵母の増殖に先行して *Lactobacillus, Weissella, Pediococcus* などの培養環境に応じて特定の乳酸菌が支配的になり、その後、遅れて酵母が増殖する。

この段階で乳酸菌と酵母の栄養源は日々供給される小麦粉（あるいはライ麦粉）によって供給され、このうち糖分は小麦粉中のブドウ糖、果糖、ショ糖と損傷澱粉の分解によって生じる麦芽糖に絞られ、これらを資化できる乳酸菌の活動が活発になり、生成される乳酸や酢酸によって pH は低下する。さらに種継ぎを継続すると、酸に対して強い耐性を示す微生物に支配され、最終段階では *L.sanfranciscensis, L.plantarum* のような乳酸菌と酵母が支配的となっていく。

サワー種製パンに適したサワー種のそれぞれの菌数は、乳酸菌でおよそ 10^9 CFU/g、酵母でおよそ 10^6 CFU/g のレベルに達する。この菌叢の変化はサワー種を起こす時に観察され、サワー種に存在する乳酸菌の種類や酵母との比率などを決める技術的なパラメーターは、種起こし以降の様々な培養条件によって特徴付けられる。

14. サワー種の微生物叢の決定に関する技術的なパラメーター

種起こしを終えたサワー種をリフレッシュする場合、種継と同様に新たに穀粉を加えるが、これも滅菌されたものではないため、追加される穀粉中の各種微生物もサワー種で支配的になれる可能性を秘めている。

また穀粉が小麦粉と組成が違う場合、菌叢は変化する。

ある研究ではリフレッシュに使用する穀粉について、普通小麦（T.aestivum）とデュラム小麦（T.durum）を使用し、デュラム小麦粉は小麦粉と比べてサワー種の菌叢に影響を与えることを示している。

その論文によると、普通小麦では、*W.cibaria*、*L.brevis* と少数のホモ型乳酸菌と酵母が検出されたのに対して、デュラム小麦はヘテロ型乳酸菌の *L.sanfranciscensis* と *Leuconostoc* 属が優勢になったという報告がある。

つまり、デュラム小麦粉に対して普通小麦粉は発酵性糖濃度及び遊離アミノ酸が少ないためホモ型乳酸菌や酵母が勢力を伸ばしてくる可能性があるのに対して、栄養の多いデュラム小麦粉ではヘテロ型乳酸菌が支配的になった。

このことは逆に安定的なサワー種を維持するためには使用する小麦粉を変更すれば良いということを示唆している。

また、スターター調製時の穀粉についても、適宜変更することで、目的のサワー種に仕上げることも可能ということを示唆している。

穀粉以外では、サワー種を日々更新している ベーカリーの作業環境も影響を与える。つまり蔵付きの微生物が影響を与えるということである。このため、特殊なサワー種を外部から持ち込んだとしても、その菌叢を維持したままで継ぎ続けることは困難で、例えば同一のサワー種を研究室とベーカリーで継ぎ続けたら、全く別の菌叢であったという報告もある。

しかし、同一の小麦粉を使用し、同じ技術的なパラメーター（温度、時間、加水量、設備、衛生環境など）でリフレッシュすると、菌叢に差が見られなかったという報告もある。

従って、小麦粉と技術的なパラメーターさえ同一にで

きれば、サワー種の菌叢は維持することも不可能ではないということもいえる。

またリフレッシュの頻度と温度についても重要なパラメーターの一つである。ある研究によると、小麦粉サワー種をより高い温度（30 ～ 37℃）でリフレッシュしつづけた場合、24 時間毎に *Le.citreum*（ヘテロ型）によって支配され、23℃では *L.fermentum*（ヘテロ型）に支配された。

またリフレッシュ時の発酵時間が長いほど（30℃で 48 時間ごと）*L.fermentum* と *L.plantarum*（両者ともヘテロ型）が主体になったという報告がある。

また、商業用スターターが添加されたライ麦粉サワー種において、25℃で発酵中に *L.mindensis*（ホモ型）と *L.sanfranciscensis*（ヘテロ型）の菌叢維持を確認したが、30℃では逆に、*L.crispatus*（ホモ型）と *L.pontis*（ヘテロ型）、40℃では *L.crispatus*（ホモ型）、*L.frumenti*（ヘテロ型）と *L.panis*（ヘテロ型）が優勢となったという報告がある。

このように発酵温度は微生物叢にも大きく影響を及ぼす。さらに本報告によると、一概に発酵温度だけで単純に高温はホモ型乳酸菌が優勢／低温はヘテロ型乳酸菌が優勢というように割り切れるわけではないことも示唆されている。

一般に発酵温度は乳酸の生成と酸性化を促進し、高温に比較的適性を示す乳酸菌は酵母よりも支配的に優勢になる。このような培養環境において酵母は劣勢となり、生地を膨らませる力が弱く酸度の高い(酸っぱい)サワー種へと変貌する。

逆に低温では酵母も乳酸菌も同時に増殖速度が鈍るが、酵母に対する乳酸菌の増殖速度が低下する。このため酵母による旺盛な炭酸ガスの発生とともにエタノール臭も有し、且つ低温域で支配的なヘテロ型乳酸菌によって酢酸臭を伴うサワー種へと変化していく。

サワー種調製時の加水率（生地収率）もパラメーターの一つとして重要なファクターである。

フランスでは DY、ドイツでは TA などで表される数値は、小麦粉、水、サワー種（スターター）、および他の成分（塩など）のうち、小麦粉と水の重量%の合計を示す。つまり小麦粉 100 重量%に対して水 60 重量%を加えてサワー種を調製する場合の DY（TA）は 160 となる。

DY は、乳酸菌や酵母の増殖を制限するものではないが、加水の多い高い DY において長時間発酵（24 ～ 48 時間）を行うと乳酸菌は酵母より優位に増殖する。さらに、高い DY に高い発酵温度（35 ～ 37℃）を組み合わせた場合、ホモ型発酵乳酸菌の成長を優位に促進する。

逆に、低い DY（例えば 160）は、水分活性の低い環境下でも増殖することのできる酵母が乳酸菌よりも選択的に旺盛に増殖する。

リフレッシュの際の塩の添加は乳酸菌の増殖に影響を与える。少量の塩（最大で生地総重量に対して 0.7%まで）使用は乳酸菌の増殖を抑制しないが、多量の塩（1.6 ～ 3.2%）は乳酸菌の増殖を抑制し、増殖可能な酵母のみサワー種中で増える。

ある研究報告では乳酸菌／酵母比率が 20：1 のサワー種を多量の食塩の添加によって 1：1 まで変動させたという報告もある。

15. 極端な環境的なストレスによる乳酸菌叢の変動

前述した技術的パラメーター（温度、発酵時間、小麦粉の選択、加水量等）は、サワー種の安定性を確保するために必要な前提条件である。

しかし、各要因固有の変動は、ストレスの多い環境(例えば低温貯蔵や水分が極端に少ない保管環境）に置くことで拮抗する微生物間で新たな競争をもたらす。例えば、*L.sanfranciscensis*、 *L.amylovorus*、*L.plantarum* を用いて検証された研究では、増殖の最適温度や pH は微生物によって異なるため、ストレスを与えた後に菌叢が変化することが示されている。

この 3 種類の菌叢によって構成されるサワー種を、伝統的な発酵サワー種の発酵温度の 25～35℃の中温域で増殖すると、これらの乳酸菌は比較的維持される傾向であるが、これを熱帯気候のような高温（40～45℃）で培養すると高温で旺盛に繁殖する *Streptococcus thermophilus* などによって支配された。

他の研究ではサワー種中の乳酸菌の最適な増殖は pH5.0～6.0 の間であり、*L.sanfranciscensis* の最適 pH は 6.7、最小生育 pH は 3.9。*L.pontis* の最小 pH は 3.5。*L.plantarum* では 3.1 であり、保管中の pH の下がり具合も乳酸菌叢に影響を与えることが示されている。

一方、サワー種が発酵完了後に低温保管されるとき、培養条件によっては飢餓状態に陥ることもある。サワー種の貯蔵は一般に低温保管することで微生物の活性を低下させるが、低温と低い pH のストレスは低温でも発育する細菌の適応性を誘発する。

この結果 、一部の乳酸菌は 20℃以下でもゆっくりと代謝と成長を続け、保存期間が長くなるとサワー種は少しずつ変化していく。

例えば、*L.sanfranciscensis*、*L.plantarum*、 *L.brevis*、*L.hilgardii*、*L.alimentarius* と *L.fructivorans* では最適温度において世帯時間（2 倍に分裂する時間）は 2～5 時間。これに対して 15℃では 10～18 時間まで遅延する。

同時に低温に適応するために低温ショックタンパク質（CSP）を合成する。このタンパク質は DNA の螺旋構造を維持し、発酵や増殖など生体活動のために必要な DNA から RNA への転写および翻訳を維持し、短鎖脂肪酸や不飽和脂肪酸の割合を増加させることによって、低温時の細胞膜の流動性を維持するために発現される。

同様に、乳酸菌は酸ストレスにも適応機構を実装している。

L.sanfranciscensis や *L.reuteri* は pH5.0 より低下してくると酸ショックタンパク質（ASP）を発現し、グルタミナーゼを利用してグルタミンからグルタミン酸とアンモニアに変換して細胞内の pH 低下に抵抗する。

他の乳酸菌では、アルギニンをオルニチンに代謝する経路よりアンモニアを作る代謝経路も持っている。

16. 微生物相互における栄養の拮抗と共生

一般に酵母と乳酸菌は栄養を奪い合っており拮抗関係にあるものの、酵母と乳酸菌の関係は食品産業の中で密接に関係している。サワー種中においても拮抗ではなく共生関係にあるものも発見されている。最もよく知られた例は *L.sanfranciscensis* と *C.humilis* で、小麦粉懸濁液中のマルトースを酵母の *C.humilis* は資化できないのに対して、*L.sanfranciscensis* は砂糖を使用できない。そこで、*L.sanfranciscensis* はマルトースを取り込み、グルコース２分子に加水分解しグルコース１分子を培養液中に放出する。このグルコースはその後 *C.humilis* によって使用される。他の事例では同様にマルトース資化陰性酵母の *K.exigua* や *K.barnetti* と *L.sanfranciscensis* との間にも共生関係が確認されている。

また乳酸菌の増殖に必要なアミノ酸やペプチドについて、酵母が自己消化（自滅）することで供給されるという関係性も示されている。

一方で、乳酸菌は酵母がマルトースやグルコースを資化し尽した後でも他の糖質で増殖を続ける。これは小麦粉やライ麦が持っている内在性のヘミセルラーゼ（ペントサナーゼ）によって遊離してくるキシロースやアラビノースを利用できるからである。

乳酸菌相互の間においても拮抗的且つ相互的に作用しあっている。

L.plantarum はジアセチルや過酸化水素、バクテリオシン（*Plantaricines*）などの抗菌性化合物を産生し、*L.plantarum* 以外の株に対して作用する。*L.lactis* は lacticine-3147 を産生し低い pH も他の微生物への阻害活性を示す。*L.reuteri* は *reutericycline* を産生し *L.sanfranciscensis* を阻害するなど乳酸菌相互で拮抗的に作用している。

このように乳酸菌と酵母はバクテリオシンや生態系の相互作用を調節し、他の微生物や相互の増殖を阻害することができる。

17. 自然でありつつも人工的なサワー種

以上のように同じ技術的パラメーターを使用しているにも関わらず、サワー種の微生物叢は常にリフレッシュ（実験室環境やパン製造環境）することによって変動するというリスクを負う。これがサワー種製パンの個性であり、時には品質変動として問題になる。

その内、特に伝統的なサワー種の *S.cerevisae* による汚染は一部で問題視されてきた。

実際、工業生産されるパン酵母が蔓延する環境でリフレッシュされている場合、*S.cerevisae* はサワー種中で主力酵母になる。これが自然淘汰なのか、人為的に作られた「虚偽の天然」なのか、境界線は不明瞭である。

乳酸菌叢の安定性においても、製パン環境は重要な役割を果たしている。あるベーカリーにおける調査報告では *L.sanfranciscensis* が優勢であり、この細菌は製パン環境全体に存在していた。しかし、スタッフの手から *L.paralimentarius*、*L.plantarum* および *L.spicheri* が検出され、ベーカリー内の空気中（浮遊粒子）には *L.plantarum* が検出された。これらの結果は、サワー種の安定化には空気中の汚染微生物も重要なパラメーターになることを示す。

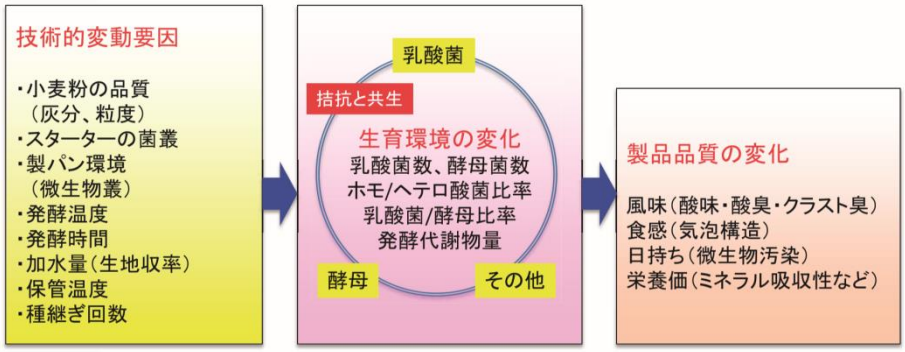
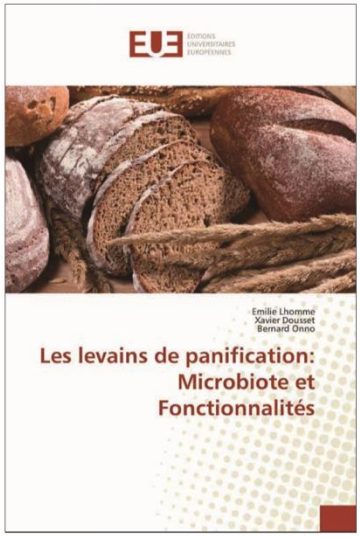


図4. 培養条件がサワー種の特性と最終製品に与える要因



サワー種を安定性に保つには、年間を通じて同じパラメーターでリフレッシュしても、環境的な要因からのコンタミのリスクまでも気にして、外的要因を極力排除する努力が必要であるということができるが、一方では、ベーカリー環境は、外部から持ち込まれる小麦粉や棲みついた微生物によって、サワー種の菌叢はその適応性と競争力で安定する場合もある。つまり、各地で伝統的といわれるサワー種が継続的に培養されているのは、内部要因と外部要因の結果である。

最後に、「サワー種」とは直訳すると「酸っぱいパン生地」であるが、これは多くの生物学的プロセスを複合的に操作して作り上げる「ベーカリーにおけるバイオリアクター」ということもできる。

つまり、サワー種は複雑な微生物生態系であり、複雑な微生物間の相互作用の結果であるというならば、それらを構築するに当って成し遂げられたことなのであろうか。自然界由来の微生物を人為的（人工的）管理下で選択的に制御して作り上げた生態系とその産物である。**図4**にまとめとして培養条件がサワー種の特性と最終製品に与える要因について示す。

最後に、今回紹介した情報は欧州における最新情報をもとにまとめたものであり、欧州では乳酸菌を中心とした発酵種が重要視されている。

一方で我国では一般消費者の認知度が高まり過ぎた事もあって、メディアウケする「天然酵母」という表現がいつまでも使用されている。

過去、日本パン工業会の依頼を受け、日本パン技術研究所にて「天然酵母表示問題に関する見解」（http:// www.jibt.com/image/tennenkobohyoji.pdf）をまとめたが、未だに誤解が解けてないように感じられる。

業界の新たな飛躍のためにも、そろそろ「酵母」だけに固執している「酵母種」の在り方について、認識を変えていった方が良いのではないかと思うところである。

なお、参考文献を求める場合、参考図書に記載があるので、参考図書を購入頂き、その中から文献を調査願う。