

身近で活躍する有用微生物 II 食品と有用微生物－西洋の食文化と微生物4

パンと微生物

ふじもとあきひと
藤本章人
Akihito FUJIMOTO

はじめに

街のベーカリーやスーパーでパンを見たときに、ヨーグルトやチーズのように「発酵食品」とイメージする人は少ないと思うが、自家製のパンを作った経験のある方は、生地が発酵し、膨らんでいくその様子を見て発酵食品と実感し、感激することが多いだろう。「酵母」はパンを膨らませる上で、欠かせない原材料の一つであり、「乳酸菌」はパンの香りや食感といったパンの品質に良い影響を与えることが知られている。また、袋を開けてパンをそのまま放置した結果、「カビ」が生えてしまう経験をした方もいると思うが、乳酸菌や酵母を主体とした「パン種」を利用するとカビが生えにくくなることも知られており¹⁻³⁾、「パン」と「微生物」はおいしいパンを作るという点で密接な関係がある。パンは欧米を中心に発展し、日本でも明治時代以降に広く普及してきたが、一方でパンやパン種に関する酵母や乳酸菌の研究は世界各地で行われている。本解説ですべてを取り上げるのは不可能だが、読んでいただいている皆様が少しでもパンをおいしく召し上がれるよう、パンと微生物の一端に触れていきたい。

I. パンとパン種の歴史について

パンの歴史は古く、メソポタミア文明にまでさかのぼる。河川流域で小麦が栽培されるようになるとそれを原材料として水と捏ねて焼成しただけのいわゆる無発酵パンが食べられるようになった⁴⁾。その後、約4400年前のエジプト文明の時代には、酵母による発酵をとまなういわゆる発酵パンが発明さ

れ、200種以上のパンに発展したといわれている⁴⁾。また、エジプト古王国時代のビール製造工程図にはパンとビールの製造が密接な関係であったことが示されている。その工程図にはサワードゥやパン焼き、また酵母の種おこしの様子が描かれており、当時のビール製造は半焼成パンの中にいる生きた酵母を利用して作られ、半焼成のパンをさらに焼成したものがパンとして食されていたとされている⁴⁾。ちなみに「サワードゥ（サワー種）」とは、一般に「パン種」といわれるパンを膨らませるために使用された原材料のひとつであり、小麦粉やライ麦粉などを自然発酵させ、多くの乳酸菌や酵母が存在するペースト状から生地状の発酵物であり、その味が酸っぱいことから、「サワー+ドゥ=酸っぱい+生地」と呼ばれるようになった。このパン種の歴史は発酵パンの歴史とも重なっている。エジプト文明で発展した発酵パンはその後、ギリシャを經由し、イタリア、フランスなどヨーロッパの各地に広がっていったとされている。その過程で「パンの商業化」、「パン業者の組織化」、「純度の高いパン種の管理」へと文化や技術が発展していったといわれている。現在、イタリアのナポリ近くにあるポンペイ遺跡にはベーカリーでパンが作られていたことを描いたフレスコ画や挽き臼、焼き釜などの設備、炭になったパンなどが今でも残っている。

前述した「パン種」中でも知名度の高いものとしては、「ホップス種（イギリス）」、「ルヴァン種（フランス）」、「パネトーネ種（イタリア）」、「サンフランシスコサワー種（アメリカ）」、「ライサワー種（ドイツ）」があり、その製法や使われ方の一部を表1に示した⁵⁾。それぞれの国で使用される原材料や製法はいずれも異なっているものの、それら酒種を除

表1 代表的なパン種の特徴と使用目的

パン種名称	原料や作り方	代表的な微生物	パンへの使用目的
ホップス種	ホップの受粉前の花からとった酵母にジャガイモなどのでん粉質を加えることにより作られるパン種。	酵母と乳酸菌	①生地膨張 ②ホップの風味づけ
バネトーネ種	生まれたての子牛が初乳を飲んだ後の腸内物質から取り出した乳酸菌を小麦粉と混合して作られる。イタリア北部・コモ湖周辺の伝統的なパン種	乳酸菌と酵母 (菌種例) <i>Lb.sanfranciscensis</i> <i>S.exiguus</i>	①生地膨張 ②風味づけ ③保存性向上
ライサワー種	ライ麦粉に水を入れて捏ねる際に、自然に入る粉や大気由来の酵母や乳酸菌を利用して培養させたパン種。	乳酸菌と酵母 (菌種例) <i>Lb.sanfranciscensis</i>	①生地膨張 ②生地の酸性化(ゲル化)
ルヴァン種	フランスの厳格な法律に基づき、ライ麦粉、小麦粉を種継ぐことで乳酸菌と酵母を生育させて作られるパン種。	乳酸菌と酵母 (菌種例) <i>Lb.sanfranciscensis</i> <i>S.cerevisiae</i>	①生地膨張 ②風味、呈味づけ
酒種	ホップが手に入らなかった理由で、日本酒用の米麹を使用し、作られたパン種。	麹と酵母(菌種例) <i>Aspergillus oryzae</i> <i>S.cerevisiae</i>	①生地膨張 ②風味、呈味づけ
サンフランシスコサワー種	サンフランシスコ湾岸地方特有の酵母をジャガイモの煮汁で培養させて作られるパン種。	乳酸菌と酵母 (菌種例) <i>Lb.sanfranciscensis</i> <i>S.exiguus</i>	①生地膨張 ②サワー風味や酸味づけ ③保存性向上

いたパン種は乳酸菌と酵母で構成されている。これらパン種はパンを膨らませる上で重要な役割を果たすと共に、風味づけや保存性向上、生地酸性化によるゲル化促進などの副次的な役割も担い、各地でその土地に合わせたパンが発展していったといわれている。

しかし、1600年以降にオランダのレーウェンフックが酵母の分離、培養に成功し、1857年にフランスのパスツールが酵母の発酵原理を解明した後、パン種の役割は徐々に工業的に製造されたパン酵母に置き換えられてしまう。1909年よりパン酵母製造法の基礎が完成し、パン酵母の工業化が進んだ。パン種は乳酸菌と酵母が共存するため、パンの膨らみを安定させるためには、管理に多大な労力や経験が必要となるが、パン酵母は比較的安定してパンを膨らませることができるために、大規模ベーカリーの発展に大きく貢献しながら、利用が拡大していった。そして、現在ではほとんどのパンにパン酵母が使用されており、パンを膨らませるために欠かせない原材料の一つとなっている。

日本にパンが伝わったのは室町時代の鉄砲伝来の時といわれ、宣教師によって一部で広められたといわれている⁴⁾。その後、江戸時代に入ると鎖国の影響でパンづくりの伝承は衰退するもの、江戸時代末期には再び外国人居留地で広まり、長崎、横浜、神

戸でベーカリーが誕生する。この時にはホップの煮汁を使ったパン種であるホップス種が使われていたと言われている。明治時代に入ると日本人によるベーカリーが誕生するが、日本国内でホップが入手できなかったため、日本酒の酒母のような酒種を使って、日本人好みのあんぱん(銀座木村屋)が誕生する⁴⁾。昭和に入ると大量生産式の製パン工場が誕生し、パンは学校給食にも採用され始めるようになり、現代にいたるまで様々な発展を遂げている。ここで出てくる「酒種」は麹と酵母の発酵によってつくられるが、パンを膨らませる以外にも、フルーティーな吟醸香が付与されることもあり、日本発のパン種として認められている。

II. パンを膨らませるための酵母について

図1にはパン製法の一つである直捏法の工程を示した。製パン工程は一般的にミキシング→一次発酵(フロア)→分割・丸め→成型→2次発酵→焼成という過程を取る。直捏法は原料を一度にすべて混捏するという点でシンプルな製法とされているが、気を付けなければならないポイントは多くあり、特に「①原材料(小麦粉、水など)の温度」、「②ミキシング時のパン生地温度とグルテン膜の出来具合」、「③発酵時の温度と生地の膨らみ具合」がチェック

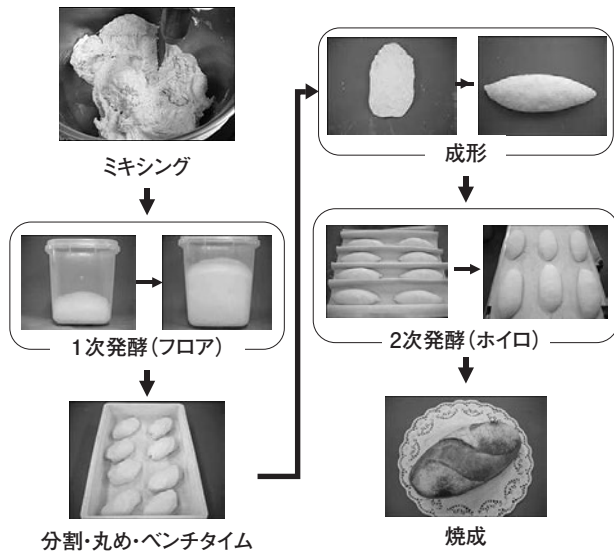


図1 直捏法による製パン工程

ポイントとして挙げられる。ミキシングから焼成までの作業時間はおよそ3-4時間であるが、ミキシング時や発酵中の温度や作業は1分単位で制御される。時間管理が重要であるという1つの例だが、環境温度にデリケートなパン酵母は温度によっても膨らみ方が変わるため、手早い作業でなければ、作業中のパン生地が刻一刻と変わるため、一つの生地から多くのパンを作るときに、最初のパンと最後のパンで大きさが変わってしまうケースも発生する。さらに季節により水温や原材料などの温度は毎日微妙に変わるため、その点も考慮する必要がある。パンを作る工程のすべてはパン酵母による発酵を常に考えながら進められていく、温度や時間にとってもデリケートな製法なのである。

そのようなパン酵母がパンの膨らみへの程度の影響を与えているのかを、「酵母を入れて発酵させたパン」と「生地に酵母を入れなかったパン」、「ベーキングパウダーを入れて膨らませたパン」を対比して図2に示した。そのボリュームの差は一目瞭然で大きく異なる。この差は酵母による発酵いわゆる「アルコール発酵」が重要な要因となっている。

パン生地中における酵母のアルコール発酵を図3に示した。酵母はパン生地に含まれている麦芽糖やブドウ糖、果糖を栄養源として菌体内に取り込み、解糖系という代謝システムを介して、炭酸ガスやアルコール類を生成する。その際、麦芽糖、ブドウ糖、果糖は酵母に存在している透過酵素を通じて菌体内



図2 パンにパン酵母もしくはベーキングパウダーを入れたときの比容積の比較

写真は日本イースト工業会版イースト読本、P7-8、2001より引用

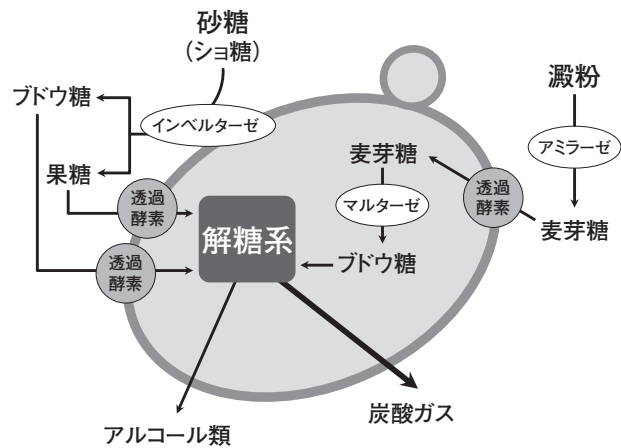


図3 パン酵母の発酵メカニズム

に取り込まれる。また、パン生地に含まれるショ糖(砂糖)は酵母菌体外に介在しているインベルターゼ(ショ糖を分解する酵素)でブドウ糖や果糖に分解され、菌体内に取り込まれる。一方、麦芽糖は菌体内にあるマルターゼ(麦芽糖を分解する酵素)でブドウ糖に分解され、最終的には同じ解糖系を介して、炭酸ガスやアルコール類になっていく。生成された炭酸ガスはパン生地中のグルテン膜に包みこまれ、パンに十分や膨らみを与える。

また、酵母はパンの香気成分を醸し出す上で非常に重要な役割を果たしており、一般にブドウ糖からの発酵代謝産物としてエタノール(甘い香り)、イソアミルアルコール(甘香ばしい香り)、アミノ酸であるバリンやフェニルアラニン由来の発酵代謝産物として、イソブチルアルコール(芳醇な香り)やβ-フェネチルアルコール(バラのような香り)を生成することが知られており⁶⁾、パンの風味形成に大

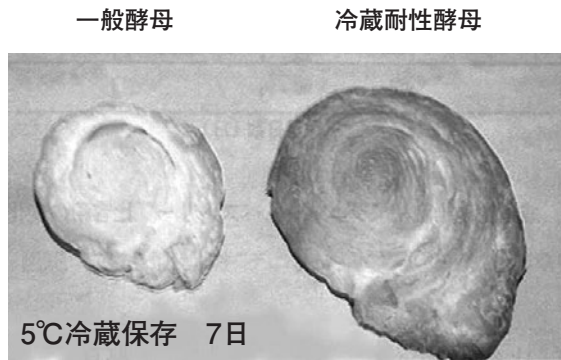


図4 冷蔵耐性酵母を利用したデニッシュペストリー

きな影響を与えている。

一般にベーカリーで使用されているパン酵母には、他にもさまざまな特徴をもったものがある。例えば、薄い層が重なってできるクロワッサンやデニッシュは製パン工程にパン生地と油を幾層にも織り込む作業がある。綺麗な層を作るには油が溶けて液状にならないように気を付けながら生地を薄く延ばしていくため、折り込む生地は低温域と中温域の温度帯を交互に晒されるような工程で作られる。この時に低温域でもだらだらと発酵するような酵母の場合は、層が乱れてしまうため、きれいな層のクロワッサンやデニッシュを作るのは非常に難しくなる。そこで低温域で感度よく発酵が止まり、中温域では通常通り発酵する冷蔵耐性酵母が広く使われるようになっており、そのような酵母がパンの品質に重要な役割を果たしている(図4)。そのほかにも、糖濃度が30%程度と高いパン生地でも発酵力が落ちない糖耐性をもった酵母や、エタノールの生成量が高く発酵を遅延させる酵母⁷⁾など、その種類は多様であり、近年では膨らませる以外の機能をもった酵母が多く開発されている。

Ⅲ. パン種と微生物について

パン種は上述のように乳酸菌や酵母を含む発酵物でその歴史は長い、パン種を構成している微生物については、今も尚ヨーロッパを中心に世界各国で分離・同定評価が行われている⁸⁻⁹⁾。パン種の原料や製法は地域や店舗によってさまざまな違いがあるため、そこに付着する微生物も様々に異なるが、最も代表的な乳酸菌種としては *Lactobacillus sanfranciscensis* が挙げられる。Kitaraha¹⁰⁾らは5つのサワー

種から21菌株の *Lactobacillus sanfranciscensis* を分離し、4つのタイプがあることを明らかにしており、*Lactobacillus sanfranciscensis* の菌種が非常に多様性に富んでいることを示唆している。その他にも *Lactobacillus plantarum*、*Lactobacillus pentosus*、*Lactobacillus brevis* など50種類以上の多くの菌種について分離・同定された報告がある¹¹⁾。また、酵母菌種としては *Saccharomyces cerevisiae*、*Saccharomyces exiguus*、*Candida humilis* など20種類以上の分離事例が報告されている。¹¹⁾ 通常、パン種の乳酸菌と酵母の比率は100:1の割合で共生して存在することが多いとされているが、*Lactobacillus sanfranciscensis* の場合はパン種中に存在するマルトースを資化し、グルコースを細胞外に排出することが知られており、*Saccharomyces exiguus* といったマルトースを資化できない酵母とうまく共生していると報告されている¹²⁾。

日本国内においてパン種を作るには、りんごや柑橘類といった果実やレーズンのようなドライフルーツ、小麦粉やライ麦粉などといった穀物を主原料として、自然発酵させて作ることが多い。りんごやレーズンなどを用いるときには一定量のショ糖と水を加え、冷蔵庫で保管し、数日そのままの状態で待つと、原料に付着している酵母が増殖し、気泡が発生する。酵母が十分に増殖した上記の液体に小麦粉を混ぜ、さらに発酵させたものを「りんご種」、「レーズン種」と呼んで利用することが多い。一方で、ライ麦粉や小麦粉、水、モルトを主原料として、中温域(25-28℃)で約6日間種継ぎと発酵を繰り返して完成する、いわゆるフランス発祥の「ルヴァン種」があり、1つの製法としてベーカリーで広く普及している(図5)⁵⁾。

本製法は乳酸菌スターターやパン酵母などを使用せずに自然発酵によって作られる。6日間の発酵が終了した時には多くの乳酸菌や酵母が検出されることは知られている。しかし、本製法はパンに使用できるまでに実際は種継ぎを最低6日間必要とし、この間の微生物挙動や食品成分の変化はほとんど知られていなかった。筆者らはこの6日間の発酵に着目し、様々な評価を行っている。微生物挙動やpHの変動を図6に示した。発酵1日目は原料に付着していたグラム陰性菌などが急速に増殖する。発酵2日目になると乳酸菌が優勢になり、乳酸が生成され、

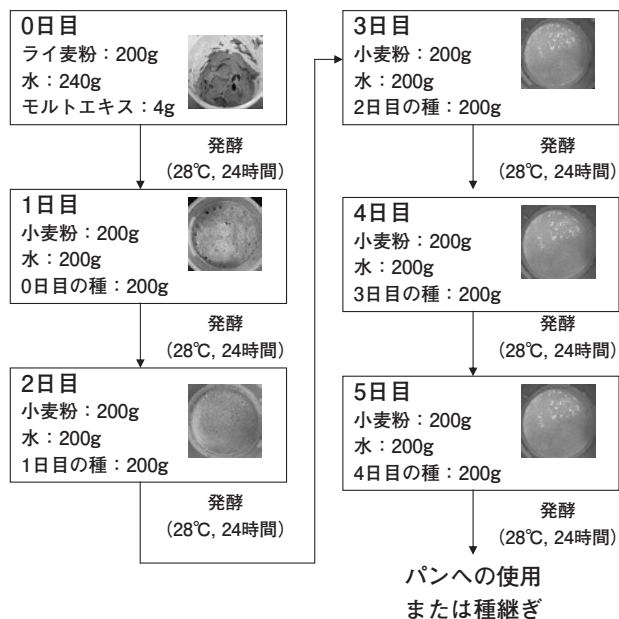


図5 日本で用いられる伝統的なルヴァン種の作製方法

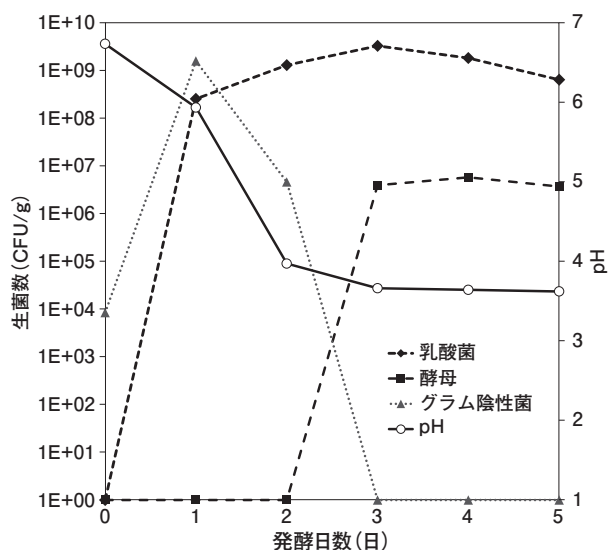


図6 日本で用いられる伝統的なルヴァン種の微生物挙動

pHが速やかに低下するとともに、グラム陰性菌が死滅していく。また、菌叢が変わり、pHも低下した環境中では小麦内在の酵素の働き方が変わり、遊離アミノ酸が増加する傾向がみられる。次いで発酵3日目より酵母が検出されるようになると、酵母は増加した遊離アミノ酸を資化して、5日目まで増殖が活発になる。発酵3-5日目の酵母の増殖によって、一旦増加した遊離アミノ酸総量は著しく減少するものの、発酵前の状態に比べて、遊離アミノ酸の組成は複雑になる。このルヴァン種の工程には風味

の質や発酵の具合から完成までに最低6日間が必要であるとされてきた。ルヴァン種における6日間の微生物や食品成分の挙動はダイナミックに変化しており、複数の微生物が共生発酵することによって、その特徴が作り出されているという観点で見ても大変興味深く感じる。ダイナミックでありながら、複雑な変化が6日間の間に生じるため、原料であるライ麦粉や小麦粉の種類を変えたり、温度条件が変わったりするだけでも、酵母が増殖せずに芳醇な良い香りを持つルヴァン種ができないことも多々ある。十分な知識とこまめな管理が発酵物であるルヴァン種には必要である。

また、日本各地でパン種を使ってパンを製造しているベーカリーは多いが、残念ながら日本のベーカリーで使われているパン種の中にどのような種類の乳酸菌や酵母が存在しているかという情報はほとんど報告されていない。今後、検討が進み、ベーカリーによってどのような種類のパン種が使われているのか、それによってどのようなおいしさが生み出されているのか明らかになることを期待したい。

IV. パン種に欠かせない乳酸菌の働きについて

パンにおいて乳酸菌が関わっていることはあまり知られていないが、上述したようにパン種の中には酵母以外にも乳酸菌が含まれており、乳酸菌はパンの品質に大きく影響する。乳酸菌の発酵により生成される成分、特にフレーバー成分、有機酸類、菌体外多糖などはパンの品質と大きく関係している。フレーバー成分では、甘い香りやサワー香、香ばしい香りを付与する効果が認められているが、代表的な成分では、ジアセチル（バター様の香り）、エタノール（甘い香り）、酢酸エチル（エステル香）がある。また、アミノ酸の一種であるオルニチンのように焼成後に香ばしい香りの付与する成分¹³⁾なども報告されている。乳酸菌から生成される有機酸類は乳酸、酢酸が中心になるが、これら成分がパンに含まれるといずれもpHが低くなる。そのため、パン生地中のグルテンの軟化により生地 of 伸展性が向上したり、パンのしっとりさなどで食感品質に違いが出たり¹⁴⁾、パンの発カビが遅延したり¹⁾する効果があるとされている。また、乳酸、酢酸の影響でわずかに

酸味を感じやすくなるが、含まれる量によっては酸味と認識されず、味が濃く感じられることもある。さらにこれらの成分はパンの香りを全体的にすっきりさせる効果があるため、雑穀パンであれば、嫌な臭いをマスキングしたり、副原料のよい香りを強調したりする。

菌体外多糖については主に乳酸菌の中でも *Leuconostoc mesenteroides* や *Weissella* 属で作られることが多い。これらの乳酸菌がショ糖からブドウ糖のポリマーであるデキストランという高分子の多糖類を作ることが知られている。その多糖類をパンに添加した場合、生地を保水力が上がるため、パンの柔らかさやしっとりさを保持しやすくなり、いわゆるパンの老化防止により効果が期待できると報告されている¹⁵⁾。

上記のように、これら乳酸菌はパンの香りや味、食感などに良い影響を与えていることが認められるようになった。最近の日本ではパン酵母の利用だけにとどまらず、乳酸菌で発酵させた原材料を「発酵種」、「発酵風味料」といった原材料名称で呼び、広く使われるようになっている⁵⁾。また、海外においてはセアリック病患者向けに小麦粉を使用しない「グルテンフリー」のパンなどが普及しつつあるが、小麦粉の代替として粟、稗、米などの雑穀が用いられるケースが増えている。これらの雑穀の独特な風味をマスキングしたり、焼成後の水分蒸発が多くパサつきやすい食感を改善したりする目的で、乳酸菌発酵物の利用が見直されつつある¹⁶⁾。これら乳酸菌の発酵による効果は、一般に流通されている香料や品質改良剤、乳化剤などと比べるとその香りや食感改良などは際立って実感できるものではなく、10人が試食したら、7-8人が良いと感じるレベルの効果であることが多い¹⁴⁾。乳酸菌の発酵物でパンを改良する良さは香り、味、食感改良など複数の機能が穏やかに働き、パンの品質を引き上げる点であり、そこがベーカリーや消費者にとって、自然なおいしさを味わえるポイントになっている。

おわりに

パンのおいしさは微生物によって、醸し出される部分が多い。ここで紹介した酵母はパンには必須の原料であり、乳酸菌は風味や食感の品質に広く関

わっているため、和食の味噌汁に例えるならば、酵母は味噌、乳酸菌はだしのような機能を果たしているとイメージするとよいかもかもしれない。本文を読んでいた皆様には、日頃からよく食べている馴染み深い食品であるからこそ、パンの長い歴史や酵母による発酵の難しさを感じていただき、パンの作り手に感謝しながら、さまざまな種類のパンにそれぞれのおいしさを感じていただければ幸いである。

文 献

- 1) Gänzle, M.G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*. 2014 ; **37** : 2-10.
- 2) Gobbetti M, Rizzello CG, Cagno DR, et al. How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiology*. 2014 ; **37**: 30-40.
- 3) Claudia AC. Antifungal sourdough lactic acid bacteria as biopreservation tool in quinoa and rice bread. *International journal of food microbiology*. 2016 ; **239** : 86-94
- 4) 越後和義. パンの研究 文化史から製法まで. 東京: 柴田書店; 1976. 10-45
- 5) 藤本章人, 井藤隆之, 井村聡明. 伝統的パン種のおいしさと微生物の関わりについて. *日本生物工学会誌*. 2012 ; **6** : 329-334
- 6) Rehman S, Paterson A, Piggott JR. Flavour in sourdough breads : a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2006 ; **17** : 557-566.
- 7) 井村聡明. 「ダイヤイーストPBX」の特徴と利用効果(特集 製菓・製パンの副素材動向). *ジャパンフードサイエンス*. 2003 ; **42** : 47-51
- 8) Lhomme E, Lattanzi A, Dousset X. Lactic acid bacterium and yeast microbiotas of sixteen French traditional sourdoughs. *International Journal of Food Microbiology*. 2015 ; **215** : 161-170
- 9) Ripari V, Cecchi T, Berardi E. Microbiological characterisation and volatiles profile of model, ex-novo, and traditional Italian white wheat sourdoughs. *Food Chemistry*. 2016 ; **205** : 297-307
- 10) Kitahara M, Sakata S, Benno Y. Biodiversity of *Lactobacillus sanfranciscensis* strains isolated from five sourdoughs. *Letters in Applied Microbiology*. 2005 ; **40** : 353-357
- 11) Vuyst LD, Neysens P. The sourdough microflora : biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology*. 2005 ; **16** : 43-56
- 12) Stolz P, Boecker G, Vogel RF et al. Utilisation of maltose and glucose by *Lactobacilli* isolated from sourdough. *FEMS Microbiology Letter*. 1993 ; **109** : 237-242
- 13) Yoshihashi T, Huong NT, Inatomi H. Precursors of 2-acetyl-1-pyrroline, a potent flavor compound of an aromatic rice variety. *Journal of agricultural and food chem-*

- istry. 2002 ; **50** : 2001-2004
- 14) 藤本章人, 須藤昌子. 製菓・製パン用発酵風味料「サワード」シリーズ. 食品と科学. 2010 ; **52** : 80-88
- 15) Lacaze G, Wick M, Cappelle S. Emerging fermentation technologies : development of novel sourdoughs. Food Microbiology. 2007 ; **24** : 155-160
- 16) Rühmkorf C, Jungkunz S, Wagner M, et al. Optimization of homoexopolysaccharide formation by lactobacilli in gluten-free sourdoughs. Food Microbiology. 2012 ; **32** : 286-294.