

●▲■ 1. ビールの発酵と他のアルコール発酵との違い

糖を含む液体に酵母菌（以下では、単に、酵母と称します）が混入すると発酵が起こりアルコール（正確にはエチルアルコール）と炭酸ガスが、量的にはほぼ半々ずつできてきます。酵母は、単細胞でどこにでもいるものですから、甘い清涼飲料水を飲みかけて栓をして飲み忘れていると、どこからか酵母が入り込み、中味が発酵しアルコールができ、味が変わってしまうと共に、生成した炭酸ガスのために、場合によっては壇が破裂し、大けがをする危険があります。これは皆様、よくご存知のことと思います。酵母については前項で詳しく述べましたが、自然界では、果実、花の蜜や樹液のような甘いもののある場所に多く存在し、それらを食べる虫や鳥に付着してどこにでも分布していると考えねばなりません。

ワイン造りはこの仕組みを利用したもので、特に葡萄果汁には、酵母とおなじ条件の場所によく存在する乳酸菌（糖を発酵すると乳酸を主として生成します）の生育を抑えるポリフェノールが多く含まれており、また酸性なので酵母以外の微生物は生育しにくい条件となっています。したがって特にワイン用の酵母を添加しないでも、よいワインができてきます。それでも、ワイン酵母以外の酵母が混入しないように、ワイナリーでは、糞の中に酵母を含む可能性のある鳩などは目の敵とされています。造り酒屋さんを訪問した時に、「蜜柑を出されても食べてはいけません」と言われるのも同じ理由です。ベルギーのランビックと言う、麦汁を樽の中で長期に自然発酵させて造る樽の口には木の枝の束が差し込んであり、何のためかと思いましたが、そこに、蜘蛛の巣がはり、昆虫の侵入を防ぐためと説明されました。「蜘蛛はわれわれの親友だ」とその職人は言っていました。

前置きが長くなりましたが、麦芽から糖を含む麦汁ができた後は、発酵によりアルコールができる原理は同じです。しかし、麦汁は清酒や葡萄果汁のように酸性ではなく、ポリフェノールの濃度も高くありません。したがって、麦汁は非常に各種の微生物による汚染を受けやすいものです。昔はホップが多量に使われていて、ビール汚染細菌（乳酸菌が主体）の生育を抑える効果を発揮しておりましたが、現在のビールの5倍も苦くなるほどに添加しないと、その効果は期待できません。したがって、ビール醸造においては、ホップ煮沸によって殺菌された麦汁を無菌的な条件下で冷却し、直ちに（雑菌に汚染されていない）酵母を多量に接種して短期間に発酵を開始させ、溶存酸素の少ない、酸性で、他の微生物の生育しにくい状態を早期に実現するという方法がとられます。そのため、酵母の接種量は他の醸造の場合と比較すると10倍近くにも達します。ビール酵母について説明した前項で、「ビール醸造に適した酵母は天然にはほとんど存在しない」といいましたが、麦汁中には、主体の糖である麦芽糖（マルトース）の他に、葡萄糖や果糖のような糖も少量含まれておりますので、特殊な菌でなくとも汚染して増殖してくる可能性は非常に高いのです。

雑菌の汚染が起こるとどうなるかと言うと、たとえ多量のビール酵母がその後添加されたとしても、すでにビール酵母が利用できる溶存酸素は低濃度になってしまい、ビール酵母にとっても消費しやすい糖やアミノ酸濃度が低濃度になってしまっておりますので、ビール酵母の増殖が遅れる結果となります。そうすると、ますます、雑菌の増殖が促進されると言う悪循環が起こってしまうことになります。

ビールの場合と他の醸造食品における発酵との相違点に、発酵終期における細胞同士の凝集の問題があります。この性質は工程の中で活用されており、他の醸造に於いては見られないものです。

●▲■ 2. 発酵の開始

ビールでの発酵と一口で言っても現在ではいろいろな方法があります。特に、屋外型シリンドロコニカルタンクが出現してから、その発酵様式は大きく多様化し、上面発酵と下面発酵の差、前発酵と後発酵の差、などが判然としなくなってきております。そこでここでは、現在、わが国の地ビール業界で広く行われているであろう発酵方式を中心に、話を進めることにさせていただきます。

ビールは発泡性のアルコール飲料であることが大きな特徴ですので、それらが生成される発酵工程の順調な進行は非常に重要です。順調な進行のためには、よい麦汁、よい酵母、よい条件が必要です。酵母についてはすでにお話しましたので、麦汁についてもお話ししなければならないのですが、他の機会に回すことをお許しください。発酵の目的は、当然のことながら品質のよい（若）ビールの製造ですが、それと共に、次の発酵に用いる活

性の高い酵母の生産も重要な目的です。この二つがビールにおける発酵の主要な目的となります。

よい酵母が、よい麦汁に接種されると酵母が増殖を開始し、それに伴ってアルコール発酵が起こります。すなわち、酵母は、主としてアルコール発酵によって生存のエネルギーを獲得しているのです。アルコール以外の生成物もありますが、特殊な場合を除き、それらは少ないことが望まれます。一口に言って、アルコール以外の生成物の生成程度は、アルコール発酵中の酵母の増殖程度に比例します（第2図参照）。したがって、発酵中の酵母の増殖程度は、アルコール発酵に影響しない範囲で、少ない方が好ましいのです。

発酵工程中の酵母の増殖程度は、添加される酵母の種類・活性度・濃度、麦汁の温度・溶存酸素濃度・にごりの程度、初期に行われる麦汁への通気の種類、発酵タンクの液深、等によって決まってくる。添加ホップ濃度、麦汁の濃度、あるいは、タンクの形状（深さを除く）などは、極端な場合を除いてあまり関係してきません。

酵母の添加によってその濃度は麦汁中で $10 \sim 15 \times 10^6/\text{mL}$ 程度となります。製造現場に於いては、酵母は水の中に懸濁した状態で保存されているのが普通（発酵終了後の酵母を保存せず直ちに次の発酵に使用する場合は別として）ですが、この場合、麦汁の量の約1/100量を目安に添加されると、この程度の酵母濃度となります。酵母濃度の測定には通常光度計が用いられます。高い波長の光の方が酵母以外の懸濁物による妨害が少ないため、600nm 台の光よりは800nm がよく使われます。吸光度ではなく、散乱光の測定であるため、使用する光度計の違いにより同じ波長光での測定値であっても比較することはできません。したがって、酵母濃度に換算して表示する必要があります。

酵母添加後、麦汁には通気が行われます。酵母の増殖に必要な酸素量は、約30mg/Lとされています。このうち、8mg/L（飽和酸素濃度）は酵母添加前の麦汁にすでに空気中から溶け込んでいると考えられます。この酸素は直ちに酵母により摂取され数時間のうちに麦汁中の溶存酸素濃度はゼロとなります。したがって、通常、酵母添加の直後から発酵槽内の通気孔から通気が継続して行われます。しかし、この酸素がどの程度酵母に利用されるかについては、通気孔の大きさや通気量などが関係し、また、タンク内での麦汁の発泡抑制の必要性もあり、不明な点も多く、多くの場合、溶存酸素濃度は低いままで経過します。近年は、特に、高濃度発酵の際などには純酸素も用いられますが、約30mg/Lの酸素供給のためには（空気通気の場合には）更なる通気が必要となります。主発酵タンクに発酵麦汁（もろみ）を入れる前に、スターチングタンクや、フローテーションタンクに一時麦汁を置き、その後主発酵タンクに移す場合には溶存酸素濃度の明確な上昇が認められます。このことから、酵母がすでに発酵を開始し、細胞壁から炭酸ガスを放出している状態では溶存酸素の取り込み効率は、供給方法の如何にかかわらず、高くないことが推定されます。麦汁供給管内に酸素供給装置をつけた近代的方法の場合には酸素供給量の管理はより確実に行いうることと思われまます。

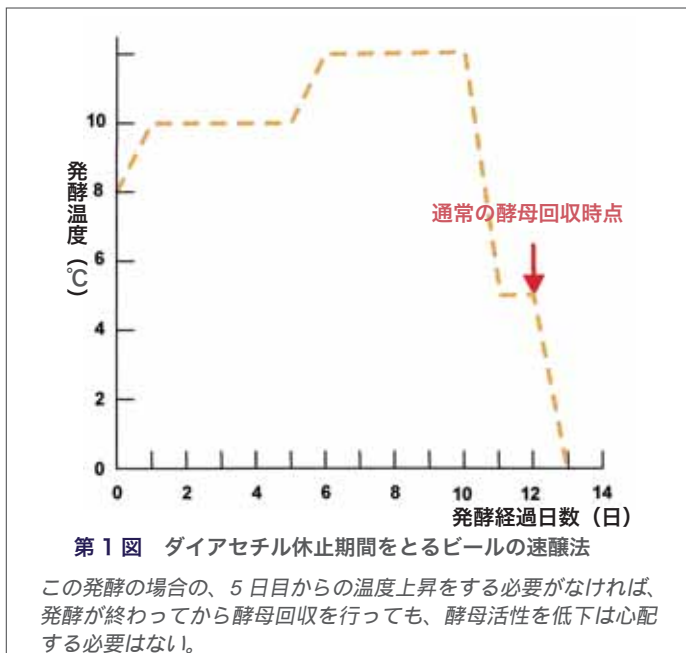
酵母添加の際に麦汁の温度は、通常、発酵最盛期の温度よりも $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 、場合によってはより低く保たれます。その理由は、発酵の開始により発酵熱が生じ、酵母の接種温度が高い場合には、最高温度が早期に到来して（冷却を早期に開始しなければならないことになって）しまう可能性があるからです。とは言っても、接種した酵母が弱っていた場合には旺盛な発酵による炭酸ガスの発生開始以前に必要な養分が麦汁から消失し、酵母が沈んでしまつて発酵の開始が緩慢となつてしまう可能性があり、麦汁温度も酸素供給の問題に次ぐ工程管理要因です。一般には、冷却を早めに開始することを覚悟した上で高めに設定することになりましょう。

酸素供給は酵母接種後24時間以内には終える必要があります。長期に行うといわゆる通気培養のような状態となり酵母増殖が過剰となり、副生成物の多い若ビールとなつてしまいます。屋外型シリンドロコニカルタンクが汎用されるようになった1980年代に、小さなタンクが建設され、そのタンクに麦汁を充填するのに、製造能力の小さな仕込み室から何回もの糖化もろみを投入しなければならず、その経過時間が24時間を越えたことにより、発酵異常が問題となったということがありました。

順調な場合には、酵母接種後36時間前後に炭酸ガスが液面に現れ、急速に液面を被うこととなります。これが極端に遅れた場合には、発酵を促進する必要があるのですが、可能な手段は限られています。酵母が沈んでしまつているのが原因の主なものでしょうから、攪拌できればよいでしょうが、よほど小さなタンクの場合でないといふと実施不可能でしょう。タンクの移し替えができればそれは攪拌に代わるよい方法となりうるでしょう。

●▲■ 3. 発酵の進行

ここまでの発酵管理は、下面発酵酵母を使う限りは、ほぼどの場合であっても大差はないと思います。しかし、上面発酵酵母は一般に下面発酵酵母よりも増殖力が旺盛ですので麦汁への通気量などは、上記の値よりは少なくなりましょう。それも含めて、前(主)発酵開始以降の発酵管理は、発酵方式によって大きく変わります。すなわち、オールモルトビール製造か、副原料使用率の高い発泡酒製造か。下面発酵方式であっても、ダイアセチル休止をとる速醸法か、あるいは伝統的長期熟成方式か。高濃度発酵(仕込工程だけで行うものではなく)を行っているか、あるいは12° Plato程度以下の通常濃度での発酵形式か。もちろん、アイスビールやノンアルコールビール等、特殊なビールを造っておいでの場合の条件まで含めてこの中で触れることはできません。1~2KL容量のシリンδροコニカルタンク(温度調節用ジャケット付)を使用し、ダイアセチル休止をとる速醸法で12° Plato程度以下のオールモルトビールを造る場合を想定して話をすることに致しましょう。仕込(糖化)方法はインフュージョン法であると仮定します。



発酵温度の経過は第1図に示したようであることを想定しますと、前号で触れましたように、酵母回収をよく注意して行わないと回収した酵母の活性が低下し、次の回の発酵が不調となる可能性があります。この方法はもともと大工場で使用している、容量何100KLもの巨大発酵タンクを使用する場合のために開発された方法であるため、小型のタンクの場合では必ずしもこの方法をとる必要はないはずです。それが前号で触れた、酵母活性を弱らせる可能性の少ない方法です。

その方法についてやや詳しく説明しますと、この図で示したような、下面発酵酵母にとって高目の温度(8°C)での発酵開始は、大型タンク内で液深による水圧を受け増殖を抑制されている酵母の活力を高めるためです。これが、丁度よくつりあっている場合には問題ないのですが、ほとんどの場合酵母の活性を高めすぎております。これはその方がアルコール発酵の進行には安全であるからです。そうなりますと酵母によるアミノ酸の消費が過剰となり、高級アルコール類のような発酵副生成物が多く生成され、香味の強いビールとなります。一番の問題点は、ビールの清涼感を損なうダイアセチル臭の強いビールとなる可能性が高くなることです。それを防ぐために、発酵中に生成するダイアセチル前駆体であるアセト乳酸の分解を促進する目的のダイアセチル休止期間をとる必要が生じ、それが酵母活性の低下の原因となるという因果関係となっているのです。

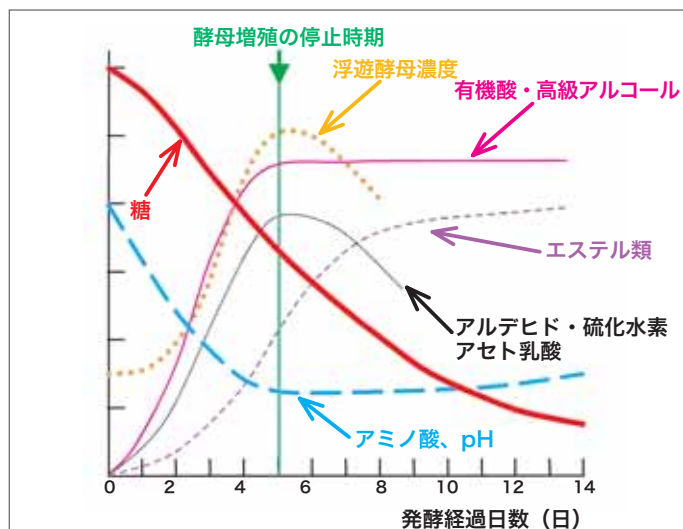
この悪循環の原因はそもそも大型の、液深の大きいタンクを使うからでありますので、小型タンクを使う地ビールメーカーでは同じ方法をとる必要はないはずです。すなわち、ダイアセチルの前駆体であるアセト乳酸の生成の少ない発酵形式をとればよい訳で、伝統的な下面発酵方式と同様な発酵開始方式を取ればアセト乳酸の生成濃度は、発酵開始温度の高い場合の半分以下に低下するはずで、その目安は、原麦汁のアミノ酸濃度の1/4以上が(若)ビール中に残っているかどうかです。アミノ酸の定量分析は、手軽に行い得る、清酒におけるアミノ酸度の定量法でよいと思います。結論的には発酵開始温度を問題ない程度に下げると言うことです。その後は第1図の経過と同様に、アルコール発酵終了の少し前に加圧をはじめ、ダイアセチル休止と同様な経過をたどらせます。その際の温度は当然図の経過よりも低いはずで

すので、酵母の活性低下は防げるはずで、また、アセト乳酸のダイアセチル休止開始時の濃度も第1図の方法をとった場合の半分以下となっているはずですので、その期間は短くてすむ理屈ですが、温度が低いので、同程度の期間はとっていただくのが安全でしょう。そうであっても酵母の活性の低下は確実に防げるはずで、

この方法をとれば、ビールの香味は、酵母の自己消化が少ないので清涼感の増したものとなり、すっきりした味のものとなると思います。これは、著者が机上で考えた方法ですが、すでにこのような方法を取っておいでの地ビールメーカーは多いのではないのでしょうか。もしこの方法の欠陥を経験されておいでの場合には、本誌の事務局を通してお報せいただければ幸いです。この方法は、副原料を使用したビールを醸造する場合には特に有効と思います。地ビールにとって一番重要な酵母の活性維持に役立つ方法として、敢えて提案させていただく次第です。

●▲■ 4. この項のまとめとして

発酵の際の、諸成分の変化の概念を第2図に示しました。参考として、目指すビール品質を創りあげていってください。



酵母の増殖が停止する時期にはまだ糖の発酵が盛んに行われている。一方、香味に関係する成分の生成は、その時期でほぼ終了する。その中でエステル類は、例外的に、酵母の増殖停止以降も生成が継続する。

前発酵終了の後は熟成(後発酵)です。この点に関して、諸参考書に書かれてあること以外に特別に申し上げることはありません。ただし、瓶詰、缶詰などをして長期保存に耐えるビールを造っておいでの場合には、製品化後2週間ほどたった製品について、ダイアセチル臭の有無を必ずチェックしてください。

野生酵母の汚染による発酵異常については前項ですでお話いたしました。麦芽(あるいは、タンクの形状や発酵条件)によっては、早期凝集性野生酵母が汚染した場合と同じような、途中で発酵が停止してしまう現象が起こることがあります。このような場合、早期に気がつけば(糖度がまだ高いのに、発酵の勢いが弱い)タンクの移し替え等で救済できる可能性があります。

発酵の状況や、ビールの品質は当然麦汁の品質と関係します。今回は麦汁についての解説が後回しになってしまいましたが、次の機会に、多少重複することがあるとは思いますが、書かせていただきます。(text. T.Inoue)

井上 喬(いのうえ たかし)

(プロフィール) 1935年、東京都に生まれる。東京大学農学部卒業。キリンビール・ビール科学研究所所長、秋草学園短期大学教授を歴任。「ビールのダイアセチルに関する研究」にて農学博士号。全北米大陸醸造者協会(MBAA)より功績賞。米国醸造化学者協会(ASBC)より栄誉賞。日本醸造協会評議員。前MBAA技術委員会アジア地区代表委員。前Institute of Brewing, Asia Pacific Section 日本代表委員。(著作)「ジアセチル」(幸書房)「やさしい醸造学」(工業調査会)「お酒のはなし」(学会出版センター、共著)「Recent Advances in Japanese Brewing Technology」(Gordon and Breach Scientific Publishers)など。米国醸造化学者協会(ASBC)から「DIACETYL」が出版予定。

QA? 本稿に関するご質問・ご意見等は、きた産業 (info@kitasangyo.com) にご連絡ください。筆者に転送いたします。