

特集 食に貢献する化学工学 I ～おいしさ・安全・健康～

「食」は命の糧であり、おいしさを通じて喜びをもたらしてくれます。また、健康の維持・増進へとつながる食素材の加工や食品の評価は、健やかで豊かな社会を支える必須の技術です。食品製造プロセスでは攪拌・混合や熱・物質の移動、反応の制御などがおこなわれており、化学工学と深い係わりがあります。現在、高齢化社会の進行や生活習慣病による課題を解決するため、健康リスク低減につながる機能性食品などの開発が進められています。さらに、食品の安全を確かなものとし、安心して食べられる食品の提供は欠かせません。本特集では2号にわたり、「食」に関するとびっきりおいしい話題を紹介し、ます。どうぞご堪能ください！

(編集担当：市川創作)†

ビール醸造工程における酵母スラリー攪拌システムの開発 ～ビール工場での化学工学活用事例～

川村 公人

1. はじめに

筆者は昭和62年に九州大学工学部化学機械工学科流体工学研究室を卒業後、アサヒビール(株)に入社し、当時新発売のビール醸造設備の新増設に多くの仲間と携わった。本稿は、その過程において、ビール醸造で重要な役割を担う酵母ハンドリング工程に対し適切な装置を開発し、事業実装することができたため、その内容を概説するものである。

2. ビール醸造に欠かせない酵母のはたらき

酵母を用いたアルコール発酵は、ビール醸造プロセスにおいて、その品質を決定する上で最も重要な役割を担っている。この酵母(*S. pastorianus*)は古くから酒類製造に広く利用されており、酒類に必要な様々な香味を付与することができる。そこで酒造会社はこの酵母を適切にハンドリング

しながら、各社独自の香味の特徴を生かした商品を製造販売している。しかし、この製品中の香味成分にはヒト官能閾値が低い物質が多いため、例えば酵母ハンドリング技術のような酒類製造工程における微量の香味成分制御技術が、商品特性に大きな影響を与えるという特徴を持つ。

これら酵母の代謝系で生じる物質は多岐にわたり複雑で、望ましい香味を達成するためには精緻なハンドリングが求められるが必ずしも容易ではない。これは酵母が外部環境に極めて敏感に反応し、その代謝系から産生する成分の変動が大きく、同時に酵母そのものの性質も一定ではなく、理論的にそのメカニズムを化学工学や農芸化学の領域を超えて、一義的に解明することが困難であったためであり、そのため酵母を適切にハンドリング可能とするプロセスが確立されていなかったためであろうと考えられた。これまで酵母の代謝系と香味との関係は一部明らかにされてきたが、そのメカニズムは十分に解明されておらず、現場における酵母の代謝系を変動させる物理的要因について、その対策を論じている研究はほとんど無かった。ビール酵母の代謝系概要を図1に示す。

そこで筆者らは、ビール工場で安定した香味を実現できる酵母ハンドリング技術確立を目指し、発酵を終えて回収した酵母の生物工学的特性を解明すると共に、酵母の代謝系で産生されるビール香味成分制御が可能となる酵母スラリー攪拌システムを開発した。これを実機にスケールアップし、実際のビール工場に展開した結果、良好な結果を得た。



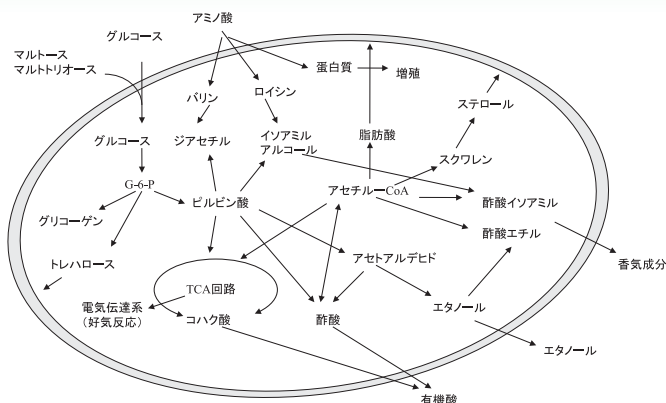
Studies on Engineering Properties of the Recovered Yeast Slurry in the Beer Fermentation Process and Improvement of Stirring System
Kimito KAWAMURA (正会員) (上席化学工学技士)

2012年 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士後期課程修了 博士(生物資源工学)(※国際地縁技術開発科学専攻)
アサヒグループホールディングス(株)R&Dセンター 主席研究員

連絡先：〒302-0106 茨城県守谷市緑1-1-21
E-mail kimito.kawamura@asahigroup-holdings.com

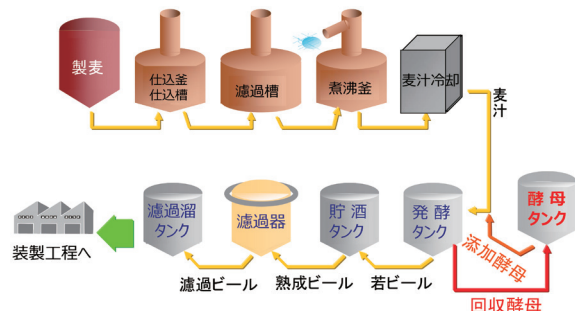
2018年2月28日受理

† Ichikawa, S. 平成29, 30年度化工誌編集委員(6号特集主査)
筑波大学生命環境系

図1 ビール酵母の代謝系概要¹⁾

3. 酵母ハンドリングの課題と解決方途

酵母のハンドリング技術を研究する際、最も困難な問題は酵母が非ニュートン流体であるという事実である。酵母は発酵が終了した時点で発酵タンクからポンプを用いて酵母タンクへ回収される。この時、酵母はビールを含むスラリー状態となっており、酵母タンクへ回収された後、数時間でビールから沈降分離し、タンク内で濃度差を生じる。この酵母は一定時間経過後、次の製造で麦汁に添加され、再度発酵タンクで発酵に用いられる。ビール醸造工程の概略フローを図2に示す。

図2 ビール醸造工程概略フロー¹⁾

この時の発酵初期条件を適正に調整することで発酵液の品質の多くが決定される。特に酵母添加量及び酵母の活性を一定にすることは、適正な発酵を実現するために必要であり、一旦タンク内で濃度差を生じた酵母を均一にするために攪拌機が用いられる。酵母添加前まで静止状態であった酵母は、タンク内でゲル状に固まっており、極端な非ニュートン性、特にビンガム流体の性質を示す。この極端な非ニュートン性を示す酵母は通常の攪拌機では十分な混合が難しく、同時にタンク壁面に設置された冷却ジャケットとの接触による伝熱も不十分となり、酵母の活性を適正に保つために必要となる冷却が困難となる。そこで攪拌機を激しく運転しても酵母が破損し、この攪拌によるダメージのために、発酵工程で不適切な香味を製品に付与することとなる。そこでこれまで様々な攪拌機が設計されてきたが、従来より粘度測定に用いられている粘度計がニュートン流体用の測定装置であり、非ニュートン流体である酵母

の低剪断速度領域における粘度が正しく測定できず、その結果、想定した流動が酵母タンク内で実現できないという課題が存在していた。

そこで我々は、これらの課題を解決するために、以下の手順で新しい酵母スラリー攪拌システムを開発した。

1. 非ニュートン流体領域を含む範囲で酵母粘度が測定可能となる粘度計を開発し、酵母粘度を詳細に測定、評価した。
2. ビール醸造工程で回収酵母が代謝異常を引き起こす要因となる物理的項目を実験的に絞り込み、酵母の適切なハンドリングを可能とするための工程の要点を明らかにした。
3. 酵母に与える剪断力が小さく、タンク内酵母が混合可能と考えられる大型パドル翼式の市販攪拌機²⁾をベンチ試験用に再設計し、スケールアップを経ながら性能を評価した。
4. 数値流体力学 (CFD) を用いて酵母タンク内部の混合性能、流動状態および剪断応力分布を計算し、スケールアップの過程で得られたデータと比較し、工学的特性を評価した。
5. 事業実装可能な規模の実装置を、CFDを用いて設計試作し、従来装置と比較することで試作装置性能を評価した。
6. 実装置を製作し、ビール工場に導入・稼働させ、その性能を評価した。

4. 課題解決へ向けた取組内容と結果

4.1 非ニュートン流体に対応できる粘度計の開発

本研究では、従来機と比較して低剪断速度領域の測定精度が良好であり、非ニュートン流体粘度も高精度で測定可能となる、小型落針式レオメータ (FNR) を開発した³⁾。

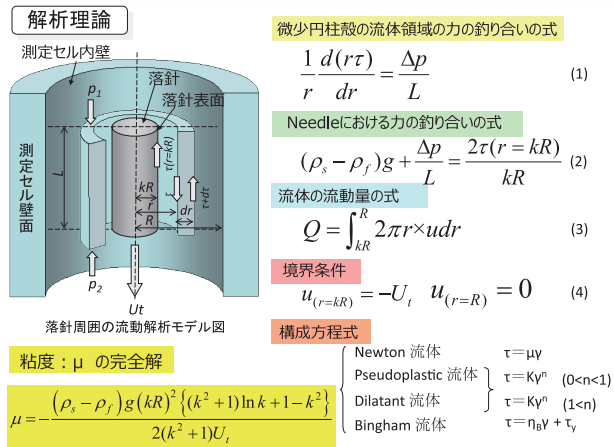
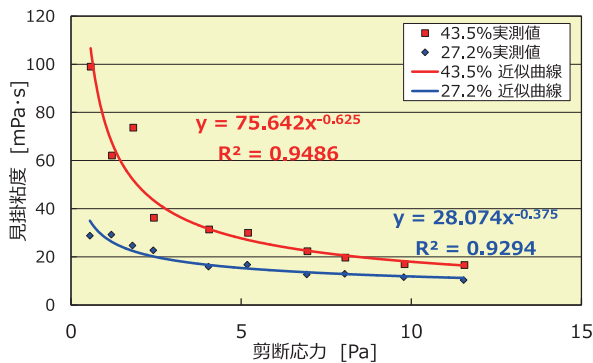
図3 小型落針式レオメータ (FNR)³⁾

図3に装置写真を、図4に解析理論を示す。本装置は、試料中にニードルを落下させ、その終末速度を測定する事で試料粘度を算出するものである。このFNRを用いた酵母粘度測定結果により、酵母はビンガム流体に近い挙動を示す非ニュートン流体であり、その非ニュートン性はスラリー濃度低下によって小さくなることが確認された。

図5に今回の測定で得られた酵母粘性データを示す。このデータを活用し、以降の装置開発を実施した。

4.2 回収酵母の代謝異常を引き起こす工程要因の絞り込み

酵母の代謝異常の要因を探るために、発酵を終えて回収されたスラリー状態のビール酵母に対するジャーファーマンターを用いた連続ストレス試験を実施した。酵母スラ

図4 FNRの解析理論³⁾図5 酵母粘度測定結果¹⁾

リー中のタンパク質濃度等、細胞内液漏出物を用いた生化学的評価および形態観察結果から、低温域において酵母は撹拌強度によるダメージを受けにくく、保存温度の上昇に伴いダメージを受けやすくなることがわかった。また一定時間経過までは撹拌により酵母が受けるダメージは少ないが、一定時間経過後はダメージが大きくなることが確認された。同時にそのダメージの大きさは温度が高い場合、または撹拌強度が大きい場合に、より大きくなることが示された(図6)⁴⁾。この特性に基づき、装置開発における条件を以下に定めた。

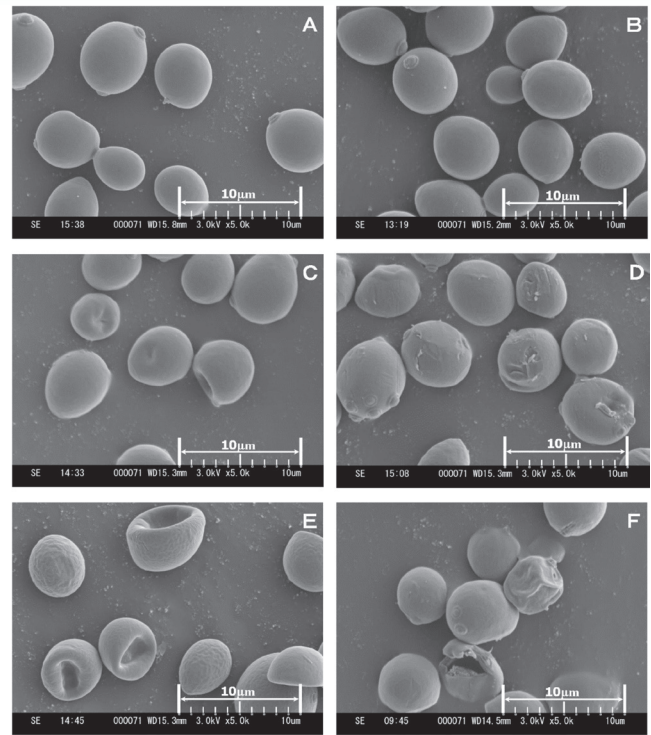
- (1) 酵母スラリーが短時間で完全混合となること
- (2) 撹拌剪断力による酵母が受けるダメージが少ないこと
- (3) 酵母は回収後、速やかに冷却されること
- (4) 適切な洗浄で、容易にサニタリー性が維持できること

4.3 市販大型撹拌機を用いた予備実験結果⁵⁾

市販大型パドル翼²⁾を改造した撹拌機を設置した酵母撹拌試験タンクでは、低速撹拌(1 rpm)でも酵母が沈降分離せず、一旦沈降分離した酵母は5分間の高速撹拌(20 rpm)で概ね混合することが認められた。試験品は対照品と比較し、酵母濃度のバラツキが少ないこと、細胞内液漏出が少ないことが認められた。これらの結果から細胞内液漏出酵母の発生数が抑制されたことが示唆され、電子顕微鏡写真でもその現象が観察された。冷却時温度分布は従来機と比較し良い均一性が確認された。洗浄性について、自動定置洗浄(CIP)で十分な洗浄効果が期待されることが確認された。

4.4 CFDを用いたタンク内部の酵母流動状態の評価

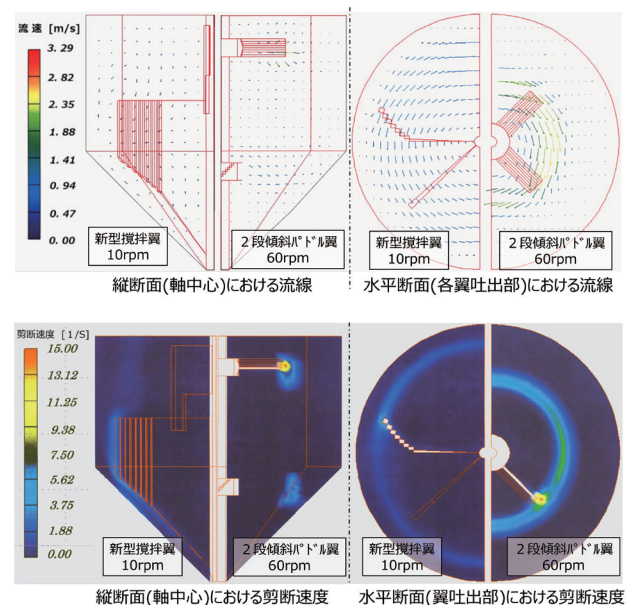
前項で得た実験結果を流体工学的に確認するため、実測

図6 連続試験時の酵母電子顕微鏡(SEM)写真⁴⁾(×5000)

電子顕微鏡写真の試験条件(連続撹拌29時間)

A; 連続撹拌試験開始前のサンプル(対照), B; 試験温度: 4°C, 撹拌回転数: 0 rpm, C; 試験温度: 15°C, 撹拌回転数: 300 rpm, D; 試験温度: 15°C, 撹拌回転数: 900 rpm, E; 試験温度: 25°C, 撹拌回転数: 0 rpm, F; 試験温度: 25°C, 撹拌回転数: 900 rpm

値を解析条件とし、数値流体力学(CFD)シミュレーションを実施した。撹拌時の流線と剪断速度分布に対するCFD計算結果を図7に示す。

図7 撹拌時の流線及び剪断速度のCFD計算結果⁵⁾

この結果より新型撹拌機を用いた撹拌に基づき形成される酵母タンク内部流動状態には、従来機と比較して大きな流れを形成していること、並びに撹拌翼先端付近での局所剪断速度が低下していることが確認された。従って、この

特性が攪拌性能を向上させている要因であろうと推察された⁵⁾。以上の結果に基づき、タンク形状の変更、攪拌翼形状の調整等を繰り返し、スケールアップ試験を実施した結果、高い効果が確認できたので、実装置を設計・製作した上で製造現場に適用し、検証を実施した。

4.5 実装置製作前にCFDを用いた設計結果検証

今回設計した酵母攪拌機を、従来型の2段平板バドル翼、逆台形リボン翼と比較した結果、従来機の最大線速度は2.5～3.0倍、最大剪断応力は約5倍と大きく、トレーサー法を用いた完全混合時間も良好な結果を得た。従って今回開発した新型攪拌機を具備する酵母タンクは、従来型と比較し流速が遅く剪断応力も低いが混合時間が短いことが確認された¹⁾。CFD計算結果の一例を図8に示す。

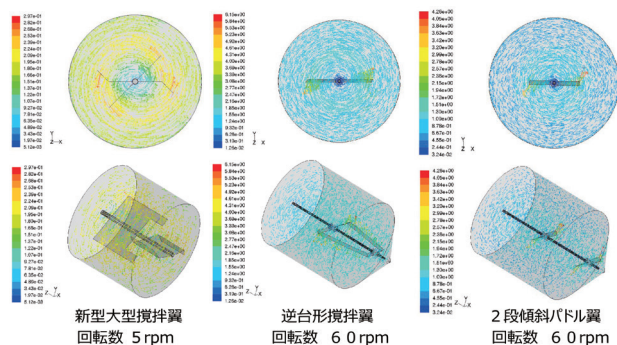


図8 実装置設計時に用いた攪拌時流線CFD計算結果¹⁾

上記結果に基づき、ビール工場で使用する実装置を製作した。

4.6 実装置を用いたビール工場での運転結果

これまでの検討結果に基づき、新しい酵母攪拌タンクを設計製作し、ビール工場の醸造工程に組み込み、性能を評価した。酵母タンク内での酵母濃度のバラツキの評価は、攪拌機の運転条件を調整した結果、CFDでの結果同様、短い攪拌時間で十分な攪拌効果が得られた(図9)。攪拌時の剪断力に起因する酵母ダメージの評価として、酵母破壊に起因する細胞内液漏洩は確認されなかった。攪拌機の運転条件を調整した結果、攪拌による酵母の活性低下は認められなかった。発酵への影響を評価した結果、製品の香味に及ぼす影響は確認されず、長期間安定した発酵が実現でき、製品の香味評価も初期の目標を安定的に達成できた。

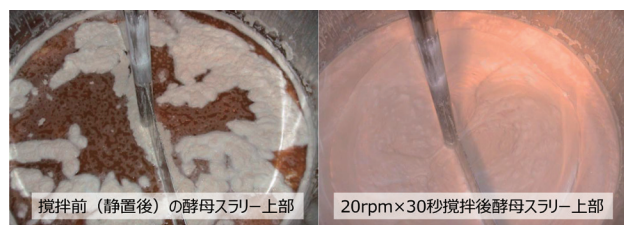


図9 実稼働後の攪拌前後の酵母タンク内写真¹⁾

また、本装置における酵母冷却能力は、極めて低速攪拌においても設定温度に良く追従していることが確認されたと共に、高速攪拌を短時間運転することで酵母に影響を与えず冷却できることも確認できた(図10)。

攪拌所要動力は、回転数が低速であることから想定最大回転数である20 rpm時でも0.4 kwと低くなることがわかった(図11)。そのため、工場設置の実機のモーターも0.75 kwと、従来の1/2～1/3の低い電気容量となった。

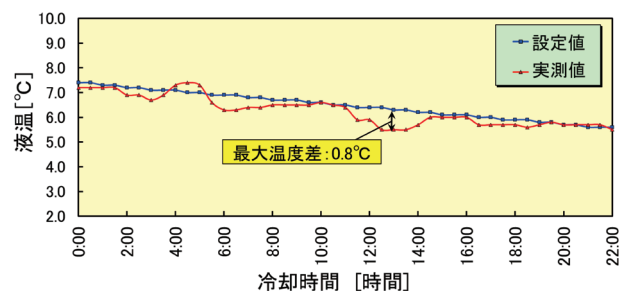


図10 冷却時の温度追従性評価⁵⁾

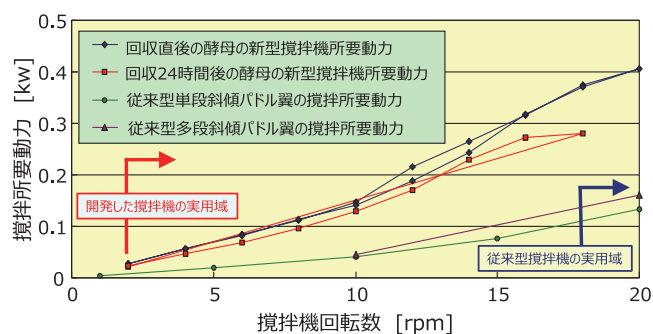


図11 攪拌所要動力の従来機との比較⁵⁾(タンク容量:10 kL)

5. おわりに

今回の検討結果を反映して、酵母スラリー攪拌システムの標準化を完了させると共に、国内外で多くの特許が登録となった。

この酵母攪拌タンクは、その原型となった高効率攪拌翼を持つ企業から市販が開始され、これまでに国内外のビール会社に、約80基納入された。その結果2017年末現在日本国内で生産されるビールの半数以上に、本技術が活用されるレベルに達したのと考えている。

本技術が、アサヒビールが望む世界の人々の健康で豊かな社会の実現に少しでも役に立つのであれば本望である。

謝辞

本稿作成に当たり、御指導を賜りました筑波大学 中嶋光敏教授、九州大学 村上泰弘教授(故人)、京都大学 小森悟名誉教授、関西大学 山本秀樹学部長、Technische Universität Berlin Prof. Karl Wackerbauer(故人)他、多くの先生方に感謝すると共に、神鋼環境ソリューション(株)、アサヒビール(株)の、御支援を頂いた全ての皆様に感謝いたします。

引用文献

- 1) 川村公人:筑波大学博士学位論文、ビール醸造工程における回収酵母スラリーの工学特性の解明と攪拌システムの改良(2012)
- 2) 高田一貴ら:日本流体力学会誌「ながれ」、22(3), 201-207,(2003)
- 3) Yamamoto, H. et al.: Int. J. Thermophys., 31(11-12), 2361-2379 (2010)
- 4) 川村公人, 中嶋光敏:日本食品科学工学会誌, 59(5), 205-212 (2012)
- 5) Kawamura, K. et al.: Proceedings of the 27th European brewery convention, pp.719-726, Cannes, FRANCE(1999)