◇◇◇ 解説記事 ◇◇◇

ビール醸造工程における酵母スラリー撹拌システムの開発

川　村　公　人

アサヒグループホールディングス株式会社 R&D センター

1. 緒　　言

筆者は昭和 62 年にアサヒビール(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．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て適切な装置を開発した．本稿では，現在多くのビール工場で活用されている当該技術概要を解説する．

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. pasturianus*）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は，商品特性に大きな影響を与えるという特徴をもつ．

これら酵母の代謝系で生じる物質は Fig. 1 に示すように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かった．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に変動が大きく，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食品工学や化学工学，農芸化学

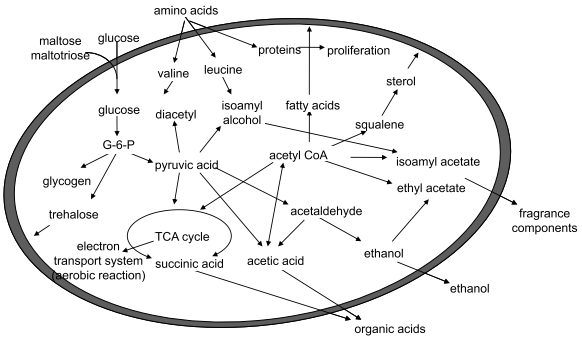


Fig. 1　Metabolic pathways in yeast.

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，そのメカニズムは充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なかった．

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ともに，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撹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．

2. 研究課題と解決方法

酵母のハンドリング技術を開発する際，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．ビール醸造工程の概略フローを Fig. 2 に示す．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．

この時の発酵初期条件を適正に調整することで発酵

著者略歴

川村公人

昭和 62 年 3 月　九州大学工学部化学機械工学科卒業（流体工学）
昭和 62 年 4 月　アサヒビール株式会社　入社
平成　6 年 7 月　Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei Berlin 研究員
平成 14 年 9 月　アサヒビール㈱博多工場　エンジニアリング部長
平成 23 年 7 月　アサヒグループホールディングス㈱ R&D センター豊かさ創造研究所長
平成 24 年 3 月　学位取得：博士（生物資源工学）@筑波大学生命環境科学研究科 国際地縁技術開発科学専攻
平成 28 年 9 月　同　R & D センター 主席研究員
平成 30 年 9 月　同　R & D センター 専任部長（現職）

〒302-0106　茨城県守谷市緑 1-1-21
FAX: +81-297-46-1515, E-mail: kimito.kawamura@asahigroup-holdings.com

© 2019 Japan Society for Food Engineering

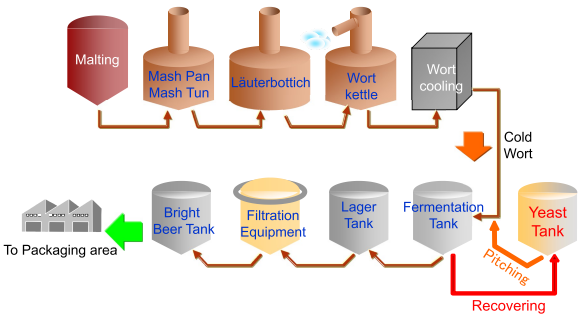


Fig. 2　Schematic flow of beer-brewing process.

液の品質の多くが決定される．とくに酵母添加量およ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撹拌機が用いられる．酵母添加前まで静止状態であった酵母は，タンクでゲル状に固まっており，極端な非ニュートン性，とくにビンガム流体的性質を示す．この極端な非ニュートン性を示す酵母は通常の撹拌機では充分な混合が難しく，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．そのため撹拌機を激しく運転しても酵母のもつ非ニュートン性により十分な撹拌状態を形成する事ができず，むしろその強い剪断力のために酵母が破損し，この撹拌によりダメージを受けた酵母は，発酵工程で不適切な香味を製品に付与することとなり，ビールの香味品質を劣化させる．そこでこれまで様々な撹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るため，非ニュートン流体である酵母の低剪断速度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撹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，評価すると共に，その後の設計指標として活用した．
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撹拌機 [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 を活用いて設計試作し，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・稼動させ，その結果を評価した．

3.　実験と結果

3.1　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（Falling Needle Rheometer : FNR）を開発した [3]．Fig. 3 に装置概要と写真を示す．

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．Fig. 4 に解析理論を示す．

この FNR を用いた酵母粘度測定結果を Fig. 5 に示す．この結果より，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．

このデータを活用して以降の装置設計を実施した．

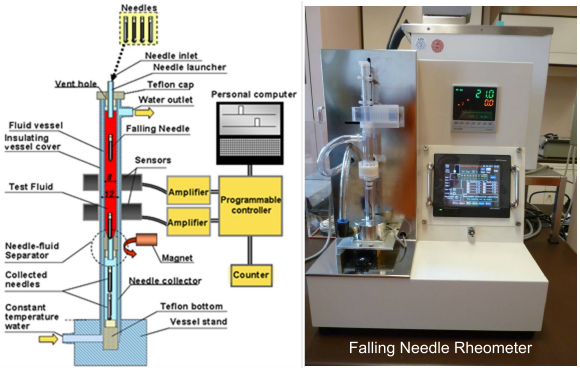


Fig. 3　Schematic view and Photo of the FNR.

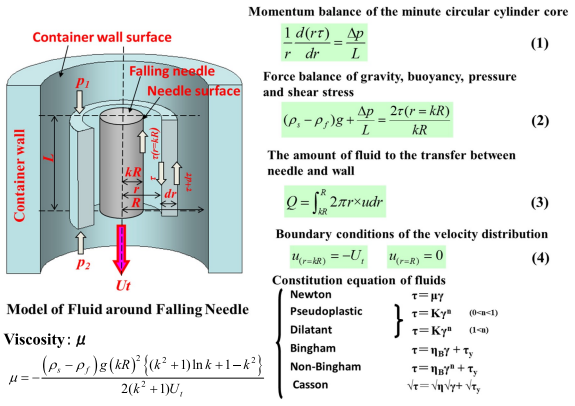


Fig. 4　Flow Model for Falling Needle Rheometer Analysis.

© 2019 Japan Society for Food Engineering

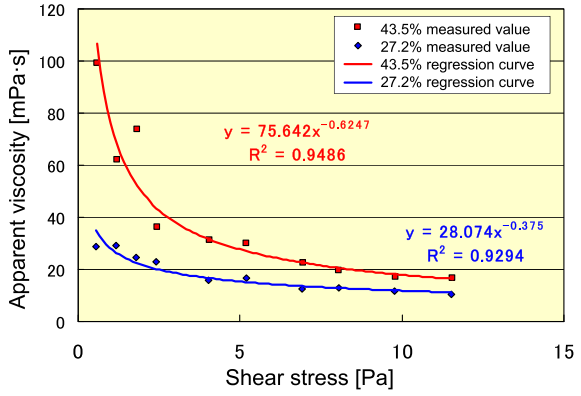


Fig. 5　Results of apparent viscosity against shear stress at different yeast concentrations.

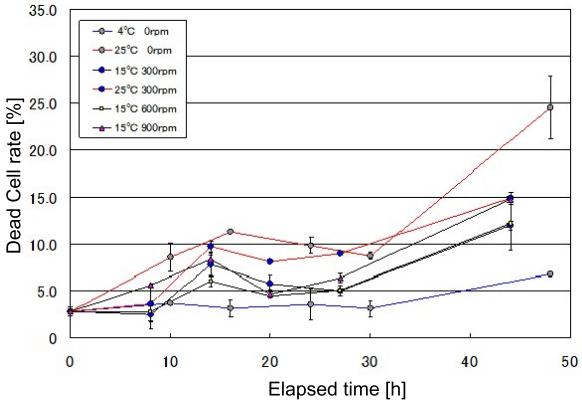


Fig. 7　Relationship between the temperature and the stirrer rotational frequency with dead yeast cell rate.

3.2　回収酵母の代謝異常を引き起こす工程要因の絞込み

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メンターを用いた連続ストレス試験を実施した．酵母スラリー上清中のタンパク質濃度測定による生化学評価結果の一例を Fig. 6 [4] に示す．

同様の試験におけるスラリー酵母の死細胞率測定結果の一例を Fig. 7 [4] に示す．

これらの結果から，低温域において酵母は攪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攪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．同時にその他の試験により，ダメージの大きさは温度が高い場合，または攪拌強度が大きい場合に，より大きくなることが示された．

本試験では同様に，各条件における攪拌試験開始 29 時間後の酵母を採取し，電子顕微鏡（SEM）を用いた形態観察を実施した．その結果を Fig. 8 に示す．連続攪拌試験に供された酵母は，温度が条件により酵母細胞壁に変化がみられた．またその酵母は攪拌がない場

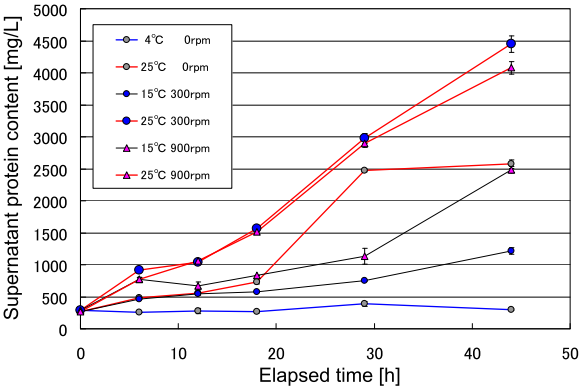
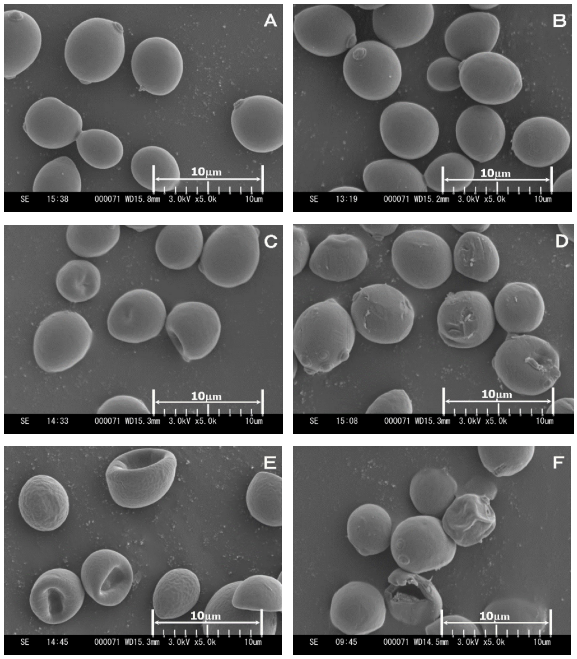


Fig. 6　Relationship between the temperature and the stirrer rotational frequency with the protein content of the yeast slurry supernatant.



A; Sample before start of continuous stirring test (control),
B; Test temperature: 4℃, stirring rotational frequency: 0 rpm,
C; Test temperature: 15℃, stirring rotational frequency: 300 rpm,
D; Test temperature: 15℃, stirring rotational frequency: 900 rpm,
E; Test temperature: 25℃, stirring rotational frequency: 0 rpm,
F: Test temperature: 25℃, stirring rotational frequency: 900 rpm

Fig. 8　Electron micrographs of yeast cells after 29h of continuous stress test (×5000).

合は，軟式庭球のボール様の凹部が発生するが，酵母細胞壁表面は比較的平滑であった．一方，攪拌を実施した酵母は，その細胞壁表面に擦過様の傷や酵母の断裂が確認された．

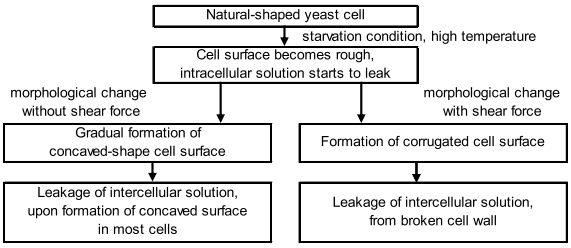
これら一連の酵母の破壊状況を，Table. 1 に示す．

ここで得られた酵母の特性を仮説として，装置開発における条件を以下の通り考えた．

(1) 酵母スラリーが短時間で完全混合となること
(2) 攪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

© 2019 Japan Society for Food Engineering

Table 1　Morphological changes of recovered yeast cells.



(4) 適切な洗浄で，容易にサニタリー性が維持できること

3.3　市販大型撹拌機を用いた予備実試験果 [5]

先ず市販大型パドル翼 [2] を改造した撹拌翼を試作し，既設の酵母タンクに取り付け，その性能を予備的に確認した．予備実験における撹拌時の温度分布測定結果を Fig. 9 に示す．

その結果，高速撹拌（20 rpm）における温度分布は良好であったが，低速撹拌（1 rpm）では温度差が確認された．一方，試験品は対照品と比較して酵母細胞内液漏出が少なかったことおよび電子顕微鏡写真撮影結果が良好だったことから，撹拌翼の剪断力により酵母が受けるダメージが少ない事が示唆された．また，Fig. 10 に示す冷却追随性確認試験の結果，冷却性能に関しても一定の効果が確認された．

さらに食品衛生上必要となる洗浄性について，既設酵母タンクに用いている自動定置洗浄（CIP）で十分な洗浄効果も確認された．これらの結果を受け，今回実施した新型撹拌翼の設計方針の適切性が認められたと考え，撹拌翼に加えタンク本体の形状を含めたさらに精度の高い検討を進める事とした．

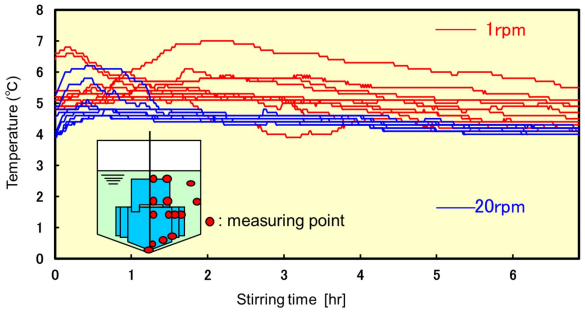


Fig. 9　Temperature distribution of test system.

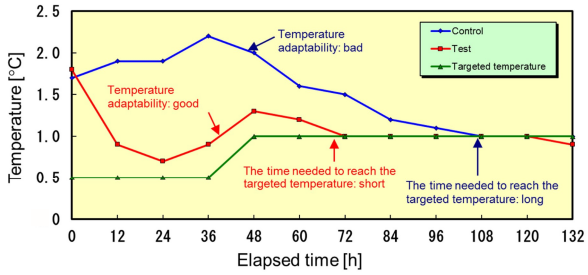


Fig. 10　Results of the stirring cooling tests in developed and conventional machines.

3.4　CFD を用いたタンク内部の酵母流動状態の評価

精度の高い設備設計指標を構築するに際し，前項で得た実験結果を流体工学的に解析した．解析には，数値流体力学（CFD）シミュレーションを用い，実測値を解析条件として実施した．撹拌時の流線と剪断速度分布に対する CFD 計算結果の一例を Fig. 11 に示す．

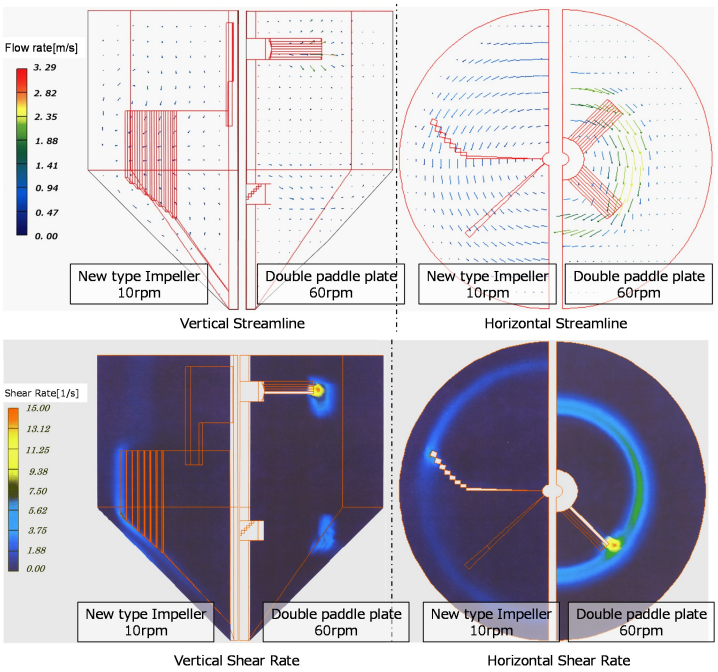


Fig. 11　Result of Stream line and Shear rate by CFD calculation.

© 2019 Japan Society for Food Engineering

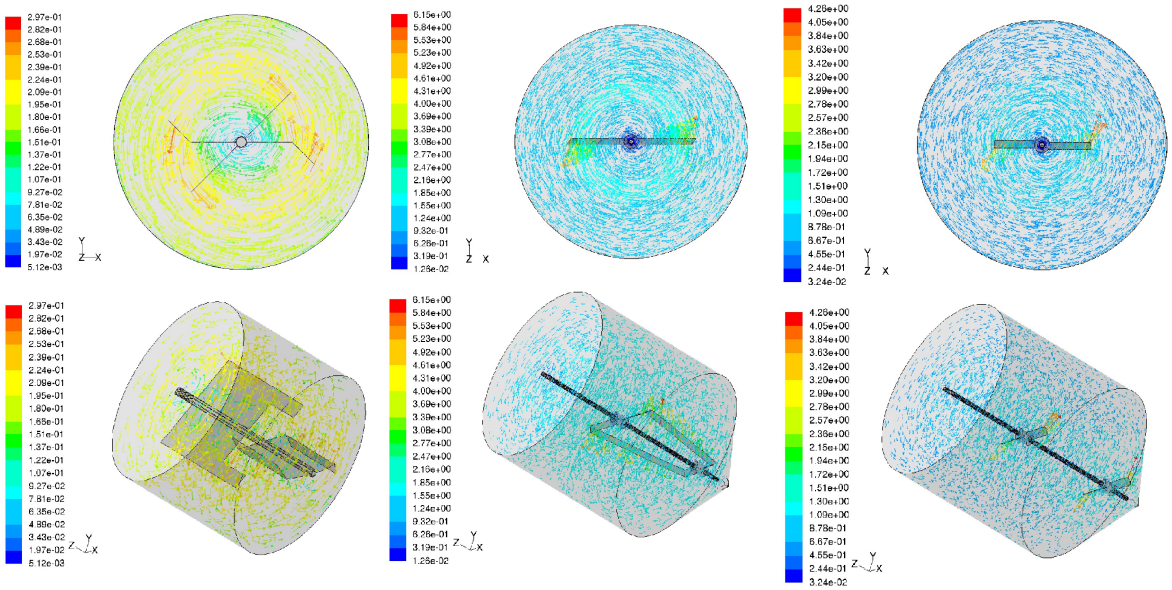
この結果より新型撹拌機を用いた撹拌から形成される酵母タンク内部流動状態は，従来機と比較して大きな流れが形成されており，撹拌翼先端付近での局所剪断速度が低下していることが確認された．したがって，これらの特性が撹拌性能を向上させる要因である可能性が示唆された [5]．このように CFD シミュレーション上でタンク形状，撹拌翼形状，撹拌機運転方法，などの試験を繰り返し実施した．これら繰り返し試験の結果，高い効果が予想される条件を見出すことができたため，実装置の設計を実施し，その性能を CFD で評価した．

3.5　実装置製作前に CFD を用いた設計結果検証

今回設計した酵母撹拌機 (a)，従来型の逆台形リボン翼 (b)，2 段平板パドル翼 (c) を，CFD を用いて流動特性を比較した．その計算結果の一部を Fig. 12 に示す．

この結果より，従来機 b と c は今回開発した a と比較し，最大線速度は 2.5〜3.0 倍，最大剪断応力は約 5 倍と大きい結果を得た．また従来機 b と c は水平方向の計算結果に，非ニュートン流体であるビンガム流体に特徴的な固体的回転渦が確認された．この事は，撹拌機のシャフトがある中心部分のみスラリーが回転する事で，冷却ジャケットを設置している外周面との混合が不十分となり，その結果，混合も冷却もできていない事が示唆された．今回は結果を示していないが，トレーサー法を用いた完全混合時間も a は良好な結果を得た．したがって今回開発した新型撹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]．

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．



(a) New type Impeller　5 rpm　　(b) Reverse trapezoid Impeller　60rpm　　(c) Double paddle plate　60rpm

Fig. 12　Results of flow analysis in stirring tanks a, b and c.

3.6　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，新しい酵母撹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．酵母タンク内での撹拌性能は，Fig. 13 に示す通り，CFD での結果同様，短い撹拌時間で十分な撹拌効果が得られている事が確認できた．

撹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．撹拌機の運転条件を調整した結果，撹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．

また，本装置を用いた酵母冷却試験結果を Fig. 14 に示す．

この結果，設定値（Set Value）と実測値（Actual Value）の差は，最大でも 0.8℃と小さく，冷却性能的にも従来機との比較において高い性能が確認された．

この結果．冷却能力は低速撹拌においても設定温度に良く追随していることが確認された．また新たな運転方法として，高速撹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．

© 2019 Japan Society for Food Engineering

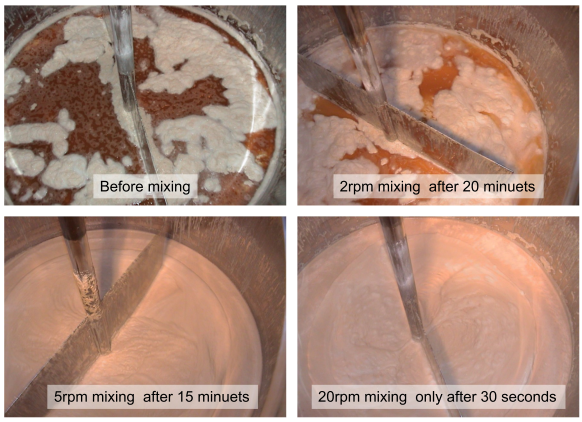


Fig. 13 Comparison of mixing ability on the new yeast stirring system.

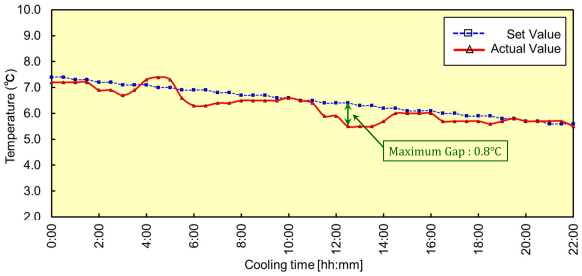


Fig. 14 Cooling capacity of this stirring system.

撹拌所要動力の実測結果を Fig. 15 に示す.

この結果，設計回転数が低速であることもあり，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．したがって，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り省エネルギー化も図られた.

最後に，今回完成した酵母スラリー撹拌システムをビール工場内で運用開始後，撹拌回転数と負荷の関係を調査するため，2 rpm から徐々に回転数を 20 rpm まで上昇させ，20 rpm に到達後，引き続き 2 rpm まで低下させた際の，撹拌回転数に対する撹拌軸にかかるトルクを測定した．測定結果を Fig. 16 に示す.

この結果より，撹拌回転数と撹拌軸にかかるトルクは比例せず，何れの回転数でも比較的近い値を示す事

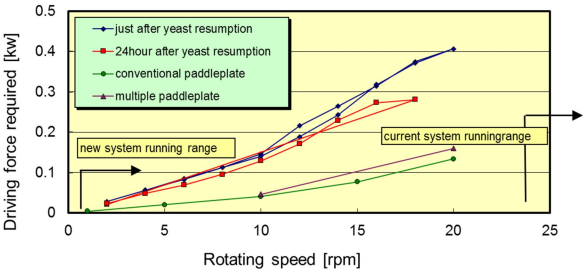


Fig. 15 Comparison of the driving force required on new system and rotating speed.

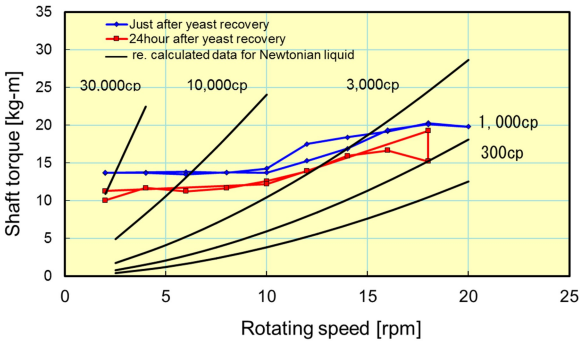


Fig. 16 Measurement of the shaft torque vs rotating speed.

ならびに回転数を上昇させる際の撹拌トルクと回転数を低下させる際の撹拌トルクは同じ値を辿ることがわかった．また，回収直後の酵母スラリーは回収後 24 時間経過後の酵母スラリーより，各回転数において何れも高いトルクを示した．この際測定されるトルクは当該回転数における粘性抵抗から生じる力と考えられるため，酵母スラリーの粘性抵抗を支配する要因として酵母の凝集力の総和が経時的に変化している可能性が示唆された．さらに，グラフ中にニュートン流体の場合の計算値を，300 cp から 30,000 cp の範囲で書き込んだ．この結果から，酵母スラリーは完全に非ニュートン流体の特性を示しており，その値は 2 rpm 時に 30,000 cp，13 rpm 時に 3,000 cp，20 rpm 時に 1,000 cp の挙動を示している事が，実測された.

4． 結　　言

今回の検討結果を反映して，酵母スラリー撹拌システムの標準化を完成させ，国内外で多くの特許が登録された．この酵母撹拌タンクは，その原型となった高効率撹拌翼をも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 2018 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ものと考える.

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 山本秀樹教授，Technische Universitat 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.

© 2019 Japan Society for Food Engineering

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撹拌システムの改良 (2012).
2) 高田一貴，岡本幸道，菊池雅彦，伊藤久善：高効率撹拌翼の開発 日本流体力学会誌「ながれ」, **22**, 201–207, (2003).
3) H. Yamamoto, K. Kawamura, K. Omura, S. Tokudome：Development of a Compact–Sized Falling Needle Rheometer for Measurement of Flow Properties of Fresh Human Blood Int. J. Thermophys., **31**, 2361–2379 (2010).
4) 川村公人，中嶋光敏：スラリー状態にある回収ビール酵母の物理的損傷の評価 日本食品科学工学会誌，**59**, 205–212 (2012).
5) K. Kawamura, M.Wakaura E. Jinnbo, Y. Okamoto：The Development and Successful Operation of a Sanitary Yeast Tank with a Stirrer Capable of Uniform Mixing without Damage to the Yeast Proceedings of the 27th European brewery convention, pp.719–726, Cannes, FRANCE (1999).

NOMENCLATURE

(English character on Fig. 4)

d	:	needle diameter	[m]
g	:	gravitational acceleration	[m/s^2]
k	:	ratio of the needle radius to the apparatus inner radius	[–]
K	:	fluid viscosity	[$Pa{\cdot}s^n$]
L	:	needle length	[m]
n	:	flow index	[–]
P_1,P_2	:	pressure applied to the upper and lower ends of minute circular–cylinder core fluid	[Pa]
ΔP	:	$P_1 - P_2$	[Pa]
Q	:	amount of the fluid pushed aside by the needle dropped	[m^3/s]
r	:	radial length	[m]
R	:	apparatus inner radius	[m]
u	:	flow rate in the vertical direction	[m/s]
U_t	:	terminal needle falling rate	[m/s]

(Greek character on Fig. 4)

g, du/dr	:	shear rate	[1/s]
h_B	:	Bingham viscosity	[Pa·s]
m	:	Newtonian viscosity	[Pa·s]
p	:	circular constant	[–]
r_f	:	test fluid density	[kg/m^3]
r_s	:	needle density	[kg/m^3]
t	:	shear stress	[Pa]
t_y	:	yield stress	[Pa]

「化学工学 Vol.82, pp.292–295 を改訂して掲載」

© 2019 Japan Society for Food Engineering