

WEB版

シーエンス

vol. 24



2026年3月

公益財団法人 奈良先端科学技術大学院大学支援財団

■ 研究報告

「低グルテリン米使用清酒の特徴香の酵母による生成メカニズム」
「酵母の育種技術を活用した代替タンパク質の創製」

■ 奈良先端科学技術大学院大学支援財団の概要

■ 奈良先端科学技術大学院大学支援財団の活動紹介

(1) 大学院大学支援事業

教育研究活動に対する支援
国際交流活動に対する支援
アワード事業

(2) 産学官交流事業

奈良先端大発 新産業創出支援事業

(3) 地域交流事業

高山サイエンスタウンフェスティバル
NAIST サイエンス塾
夏休み科学実験教室
親子科学教室
けいはんなプラザ・プチコンサート in 高山
サイエンスランドの運営
高山サイエンスプラザの団体受入れ
高山サイエンスプラザ

誌名「シーエンス」(CIENCE)の由来 

(公財) 奈良先端科学技術大学院大学支援財団(Foundation For Nara Institute of Science and Technology)の「Science」(科学)と「支援」から「シーエンス」(CIENCE)と名付けました。

■ 研究報告

奈良先端科学技術大学院大学支援財団では、地元の中小企業等が奈良先端科学技術大学院大学と連携し、大学内で生まれた研究成果や技術シーズの実用化に向け取り組む研究を支援しています。

令和7年度に支援した研究のうち、2件を紹介します。

・ 低グリテリン米使用清酒の特徴香の酵母による生成メカニズム

株式会社飯田

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 バイオサイエンス領域 准教授 渡辺 大輔

・ 酵母の育種技術を活用した代替タンパク質の創製

サラヤ株式会社

奈良先端科学技術大学院大学 研究・イノベーション推進機構 特任教授 高木 博史

「低グルテリン米使用清酒の特徴香の酵母による生成メカニズム」

株式会社飯田

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 バイオサイエンス領域
准教授 渡辺 大輔

【序論】

低グルテリン米とは、貯蔵タンパク質であるグルテリン含量が低い特性を有する米であり、原料米中のタンパク質含量の低下によって、雑味の少ない軽快な酒質が期待できることから、清酒醸造への利用が進められてきた。しかし、その利用の過程で、低グルテリン米を用いた清酒には、ライチ、マスカット、グレープフルーツ様の特徴的な果実様香気が生じることが見いだされ(Iizuka-Furukawa et al., 2017)、清酒の新たな香味特性として注目を集めている(図 1)。

この特徴香の由来を考える上で、ワインにおける知見は重要である。ワインでは、4-mercapto-4-methylpentan-2-one (4MMP)、3-mercaptohexan-1-ol (3SH) に代表されるチオール系香気成分がマスカット様あるいはグレープフルーツ様香気に寄与することが知られており(Howell et al., 2005)、これらの生成には酵母の β -リアーゼ遺伝子が関与することが報告されている。低グルテリン米清酒に認められる特徴香もこれらと類似することから、チオール系香気成分の関与が示唆されるが、その生成実体および発酵過程における分子機構は未解明である。特に、低グルテリン米という原料特性が酵母の代謝および遺伝子機能にどのような影響を与え、特徴的香気の発現へと結びつくのかは明らかでない。

本研究では、低グルテリン米を用いた清酒発酵において、特徴的果実様香気の生成に関与する酵母遺伝子を特定し、その機能解析を通じて香気生成機構を解明することを目的とする。特に、チオール系香気成分の生成に関わる酵母機能に着目することで、低グルテリン米清酒に特有の香気発現機構を分子レベルで理解し、清酒製造における新規香気の制御に資する基盤的知見を得ることを目指す。

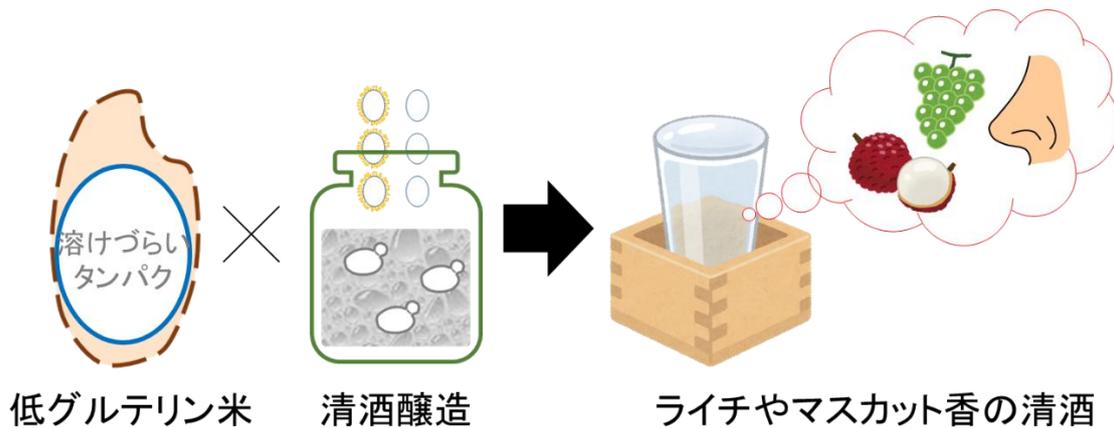


図 1. 低グルテリン米使用清酒における特徴香

【結果と考察】

1. 清酒もろみ中の酵母の RNA-seq 解析

低グルテリン米が清酒の特徴的香気の形成に及ぼす影響を明らかにするため、低グルテリン米「春陽」および一般米を用いた清酒小仕込み試験(総米 200 g)を実施した(図 2)。発酵過程における酵母(※ 本研究では、代表的な清酒酵母である K901 株を使用した。)の遺伝子発現プロファイルと比較するため、試料は留後

麴米	掛米	酵母	サンプリング
一般米 (70%精米、 乾燥麴)	春陽 (70%精米、α化米)	K901	留 6日目
X	一般米 (70%精米、α化米)	X	留 12日目
			留 18日目

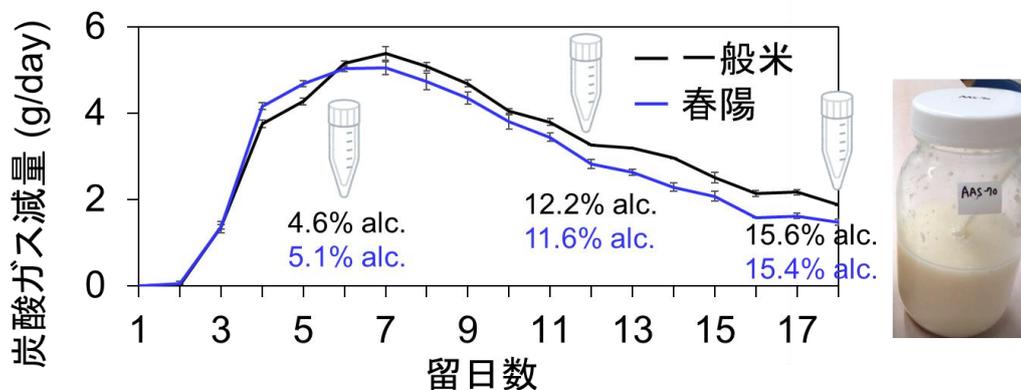


図 2. 低グルテリン米及び一般米を用いた清酒小仕込み試験の概要

6 日目、12 日目、18 日目に採取した。各試料から、ろ過および遠心分離を繰り返すことにより主として酵母を含む画分を単離し、全 RNA を抽出した後、RNA-seq 解析に供した(外部委託により実施)。これにより、発酵前期から後期に至る過程において、原料米の違いが酵母の転写応答に及ぼす影響を検討した。なお、両条件とも発酵は概ね順調に進行し、各時点におけるアルコール濃度にも大きな乖離は認められなかったことから、観察された遺伝子発現の差異は、主として原料米の性質の違いを反映したものであると考えられた。

低グルテリン米使用区において高発現を示した遺伝子群を対象に Gene Ontology エンリッチメント解析を行ったところ、アミノ酸代謝および膜輸送体に関連する遺伝子群が発酵前期に顕著にエンリッチされていることが判明した(図 3)。特に留後 6 日目の段階でこれらの機能カテゴリが目立っていたことから、低グルテリン米を用いたもろみ環境では、酵母が発酵のさかんな初期段階から窒素源の取り込みや利用に関わる応答を強めている可能性が示された。これは単一の遺伝子の偶発的な変動ではなく、窒素代謝や輸送機構に関わる複数の遺伝子群がまとめて変動していることを示しており、低グルテリン米条件下で酵母が置かれる栄養環境が、一般米使用時とは異なっていることを示唆する結果と考えられた。

このような遺伝子発現プロファイルが生じる背景を検討するため、本研究では窒素カタボライト抑制(nitrogen catabolite repression, NCR)と呼ばれる現象に着目した。これは、酵母が利用しやすい窒素源(アンモニア、グルタミン酸など)が十分に存在する条件では、それ以外の利用効率の低い窒素源(プロリン、尿素、アラントインなど)の取り込みおよび分解に関わる遺伝子群の発現を抑制し、窒素源の選択的利用を実現する制御機構である。酵母 *Saccharomyces cerevisiae* においては、この制御に Gln3p をはじめとする GATA 型転写因子群に加え、Dal81p などの補助的な転写制御因子も関与することが知られている(Hofman-Bang, 1999; Conrad et al., 2014; Tesnière et al., 2015)。低グルテリン米使用区では、窒素カタボライト抑制の制御下にあることが報告されている複数の遺伝子群の高発現が認められた(図 4)。このことから、低グルテリン米を用いた清酒もろみ中の酵母では、特に発酵前期において窒素カタボライト抑制が緩和され、少なくとも解除方向に傾いている可能性が示唆された。低グルテリン米では、清酒もろみ中で消化されやすいグルテリンの含有量が少ないので、もろみ中の利用しやすい窒素源が一般米を用いた場合と比較して少なくなっていると推察される。したがって、低グルテリン米使用区で認められた遺伝子発現プロファイルは、このような窒素源環境の特徴を反映したものであると考えられた。

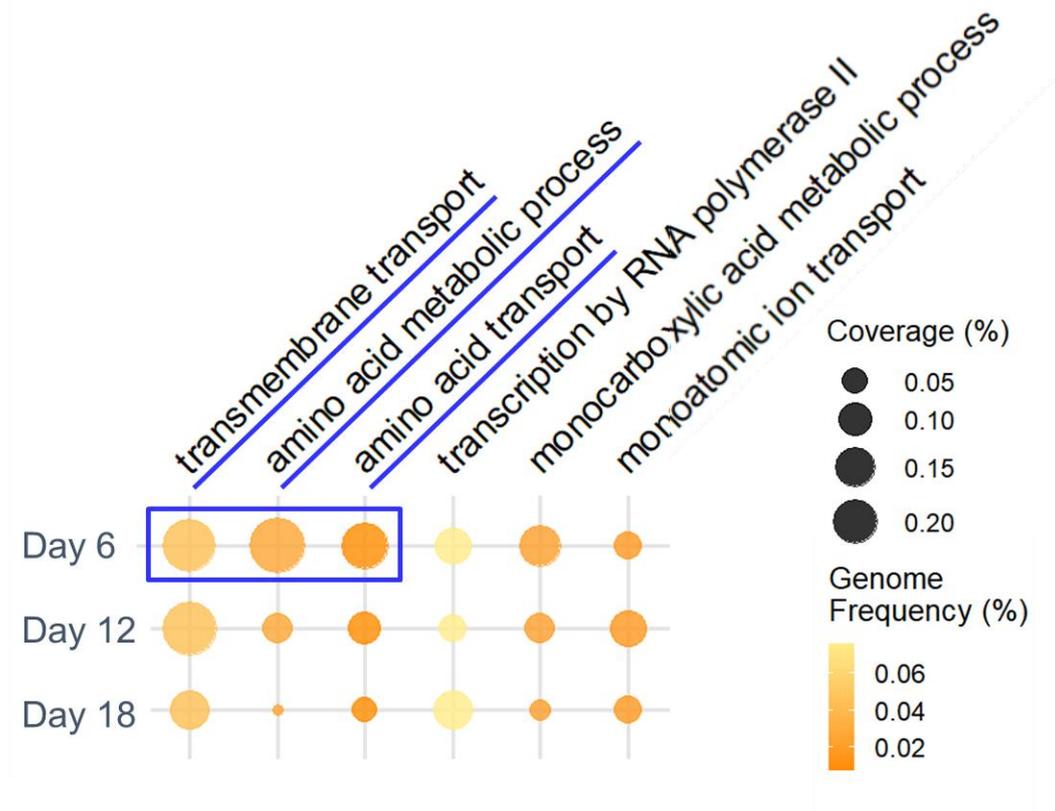


図 3. 低グルテリン米使用区で高発現を示した遺伝子群の Gene Ontology エンリッチメント解析

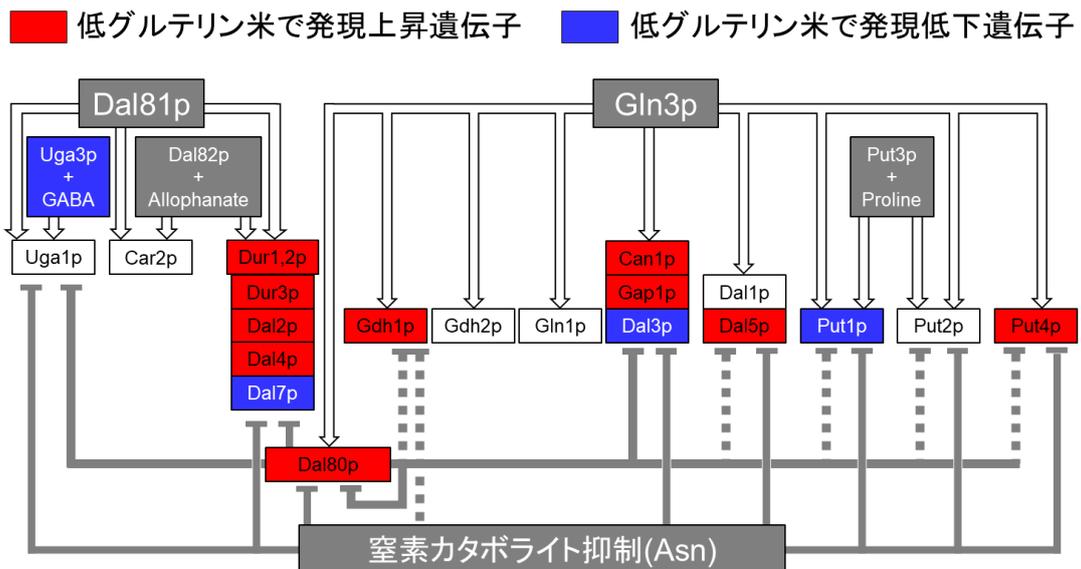


図 4. 窒素カタボライト抑制遺伝子の低グルテリン米使用区における発現挙動

本研究において低グルテリン米使用清酒の特徴香成分として想定しているチオール系香気成分との関連を検討するため、チオール生成に関与する可能性が想定されるリアーゼ遺伝子群の発現を比較した(図5)。その結果、解析対象とした6遺伝子の中で、*IRC7*のみが低グルテリン米使用区において発酵前期に明瞭に高い発現レベルを示した。具体的には、いずれの実験区においても、*IRC7*の発現量は留後6日目において高く、その後12日目、18日目にかけて低下する推移を示した。留後6日目では低グルテリン米使用区において一般米使用区の約2.5倍の発現レベルを示したが、12日目、18日目では同程度であった。一方、*STR3*、*CYS3*、*GLO1*、*CYT2*、*CYC3*といった他の候補遺伝子では、低グルテリン米使用区における高発現は認められなかった。以上の結果から、低グルテリン米使用区で発現が誘導される唯一の β -リアーゼ遺伝子として、*IRC7*が同定された。

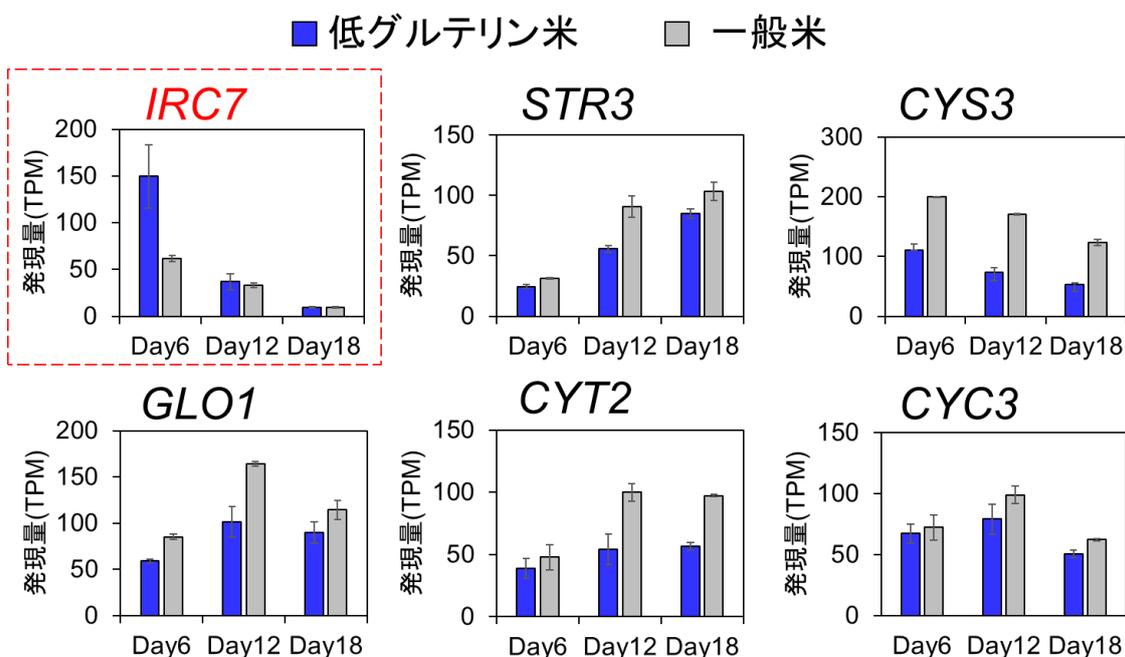


図5. チオール生成候補遺伝子群の発現挙動

Irc7p は、ワイン酵母においてシステイン抱合体およびグルタチオン抱合体を前駆体とする揮発性チオールの遊離に関与することが報告されており(Thibon et al., 2008; Roncoroni et al., 2011; Santiago et al., 2015)、本研究で観察された *IRC7* の発現上昇は、低グルテリン米清酒に特徴的な果実様香気形成と整合的である。さらに、*IRC7* は窒素カタボライト抑制の制御下にあることも

知られている。以上により、低グルテリン米を用いた清酒もろみでは、発酵前期に窒素カタボライト抑制が緩和され、その結果 *IRC7* の発現が誘導され、チオール系香気成分の生成に寄与するというモデルが考えられた。

2. *Irc7p* を介した低グルテリン米使用清酒の特徴香の生成

前章の RNA-seq 解析により、低グルテリン米を用いた清酒もろみでは発酵前期に *IRC7* の発現レベルが上昇することが明らかとなった。そこで、*IRC7* が低グルテリン米使用清酒の特徴香生成に実際に寄与するかを検証するため、清酒酵母の *IRC7* 過剰発現株を構築し、その酵素活性ならびに清酒小仕込み試験における香気形成への影響を解析した。

まず、強力な構成的プロモーターの制御下で *IRC7* を発現する過剰発現プラスミド pAUR101_*IRC7*(P_{TDH3}) を構築した(図 6)。具体的には、*TDH3* 遺伝子のプロモーター領域とターミネーター領域の間に清酒酵母 K901 株由来 *IRC7* 遺伝子の ORF を挿入した発現カセットを作製し、これを pAUR101 プラスミドに導入した。本プラスミドは *AUR1-C* を選択マーカーとして有しており、*StuI* により線状化した後、相同組換えによって実験室酵母 X2180 株または清酒酵母 K901 株の *AUR1* 遺伝子座に導入した。得られた形質転換株を、それぞれの親株(wild-type strain; WT)における *IRC7* 過剰発現株(overexpressing strain; OE)とした。

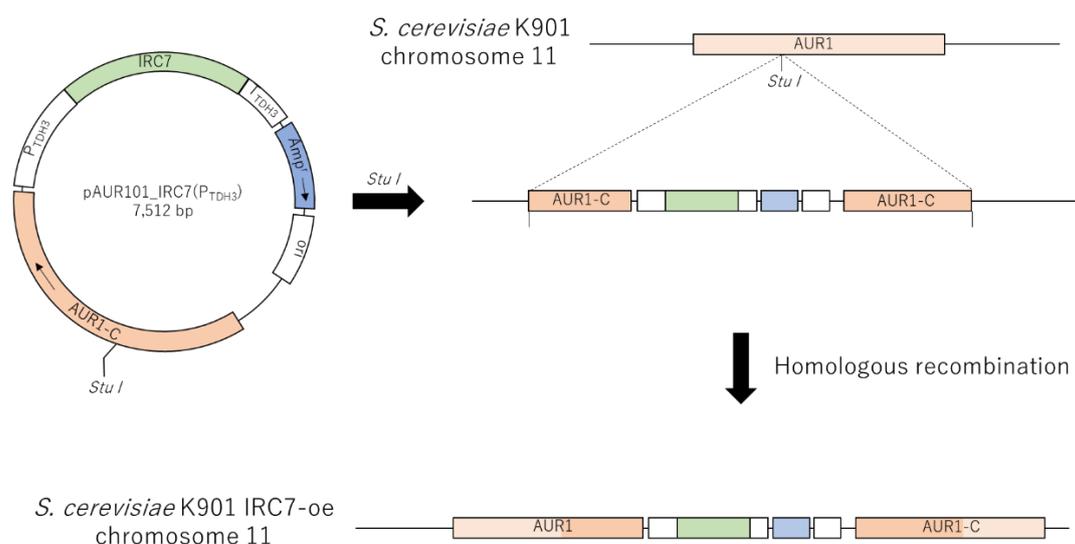


図 6. *IRC7* 過剰発現株の構築の概要

構築した *IRC7* 過剰発現株において、導入した *IRC7* が機能的に発現しているかを確認するため、 β -リアーゼ活性を測定した(図 7)。各株を YCB-SMC 培地で培養した後、培養液を遠心して上清を回収した。上清中に含まれるチオール化合物を DTNB と反応させ、412 nm における吸光度変化を測定することで β -リアーゼ活性を評価した。得られた活性値は菌体量の違いを補正するため、各培養液の OD₆₀₀ 値を用いて補正した。その結果、実験室株 X2180 および清酒酵母 K901 のいずれにおいても、*IRC7* 過剰発現株では親株と比較して高い β -リアーゼ活性が認められた(X2180 株: 1.83 倍、K901 株: 5.51 倍)。特に、清酒酵母 K901 では、*IRC7* の過剰発現に伴う活性上昇が明瞭に観察され、導入した *IRC7* が機能的に発現していることが示された。この結果は、清酒酵母が *Irc7p* を介した揮発性チオール生成能の発現に有利な遺伝的要因を有する可能性を示唆している。

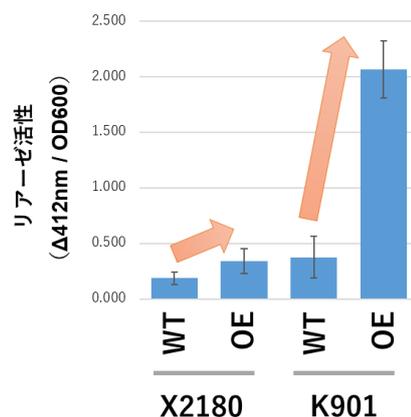


図 7. β リアーゼ活性

IRC7 過剰発現が清酒の香気形成に及ぼす影響を評価するため、清酒酵母 K901 親株および *IRC7* 過剰発現株を用いて、一般米および低グルテリン米「春陽」による清酒小仕込み試験を行い、製成酒の官能評価を実施した。その結果、製成酒のエタノール濃度については各条件間での差は小さく、発酵への影響はわずかであった。一方、チオール様の特徴香については、官能評価により明確な差が示された。一般米を用いた場合には、親株ではチオール様特徴香は認められなかったのに対し、*IRC7* 過剰発現株では弱いながらも明瞭に特徴香が認められた。低グルテリン米を用いた場合には、親株でも強い特徴香が認められたが、*IRC7* 過剰発現株ではそれがさらに強く感じられた。以上の結果から、*IRC7* の過剰発現は β -リアーゼ活性を高めると共に清酒小仕込み試験において特徴的果実様香気を増強したことから、*Irc7p* が低グルテリン米使用清酒で見られる特徴香の生成に寄与することが実証された。

原料米	酵母	エタノール(%)	チオール香
一般米	K901-WT	16.7	—
一般米	K901-OE	16.1	+
春陽	K901-WT	15.9	++
春陽	K901-OE	16.3	+++

図 8. *IRC7* 過剰発現によるチオール香の増強

4. 総括と今後の展望

本研究では、低グルテリン米を用いた清酒醸造における特徴的な果実様香気の生成機構を明らかにするため、清酒もろみ中の酵母の RNA-seq 解析および *IRC7* 過剰発現株を用いた機能解析を行った。その結果、低グルテリン米使用区では、窒素カタボライト抑制制御下にある遺伝子群(アミノ酸代謝および膜輸送体関連遺伝子群)の高発現も観察されたことから、窒素カタボライト抑制が緩和されている可能性が示唆された。こうした転写応答の中で、チオール生成関連候補遺伝子群のうち *IRC7* が特異的に発現上昇したことは重要であり、実際に本研究において構築した *IRC7* 過剰発現株では β -リアーゼ活性の上昇が認められ、清酒小仕込み試験においても特徴香が増強された。以上の結果は、*IRC7* が低グルテリン米使用清酒の特徴香生成に実際に寄与することを強く支持するものである。

低グルテリン米を用いた清酒もろみでは、一般米を用いた場合と比較して、酵母が利用可能な窒素源が少ないと考えられる(図 9)。このような環境下では、酵母は窒素カタボライト抑制を緩和し、Gln3p などの転写因子を介して、酵母が利用しにくい窒素源の代謝に関わる遺伝子群の発現を誘導すると考えられる。*IRC7*

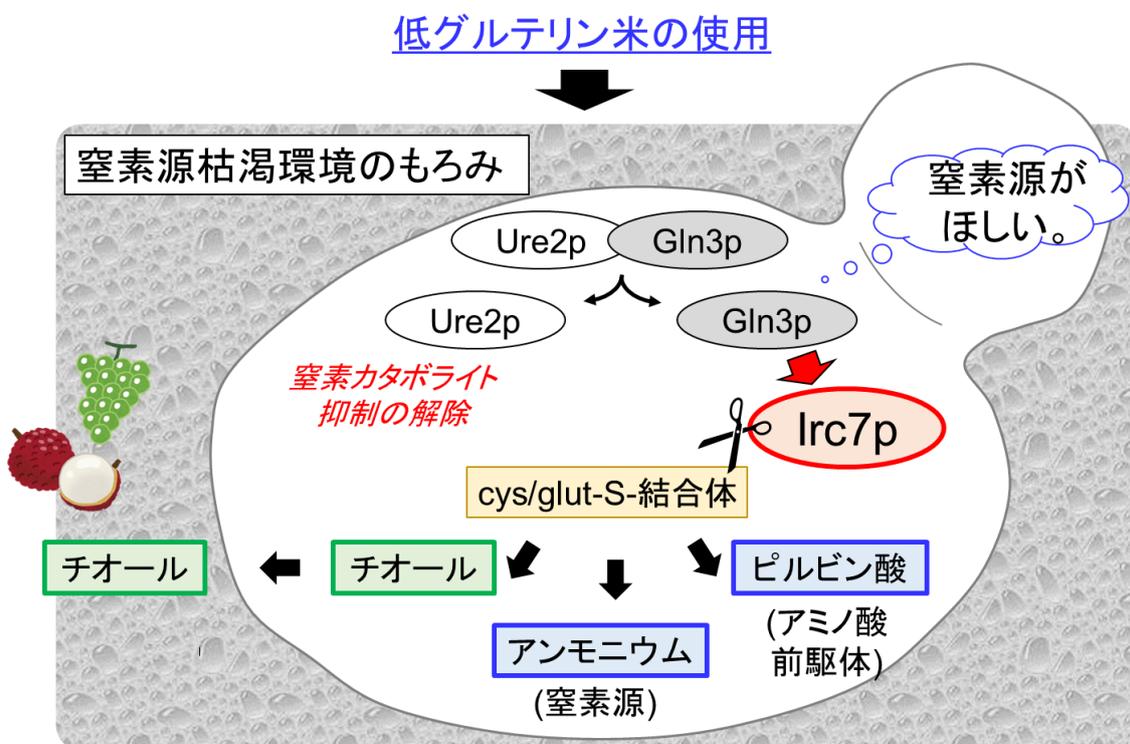


図 9. 低グルテリン環境と *Irc7p* の関連に関するモデル

はそのような遺伝子群の一つとして発現が上昇し、システイン抱合体、あるいはグルタチオン抱合体を経由する含硫黄前駆体の分解に関与することで、窒素代謝に再利用可能な成分の供給に寄与している可能性がある。その過程で副次的に揮発性チオールが生成され、結果として低グルテリン米清酒に特徴的な果実様香気として知覚されるのかもしれない。すなわち、Irc7p によるチオール生成は、窒素源の乏しい環境に適応しようとする酵母の生理応答の副産物として理解できる可能性がある。

今後は、低グルテリン米使用清酒に特徴的な果実様香気の実体をより直接的に明らかにするため、製成酒中の揮発性チオール成分の定量分析を進める必要がある。特に、4MMP や 3MH などの候補成分について化学分析を行い、RNA-seq 解析および *IRC7* 過剰発現株の表現型解析で得られた知見と対応づけることで、特徴香の分子実体をより明確にできると期待される。揮発性チオールは官能閾値が極めて低く、実際の製成酒中ではごく低濃度で存在すると考えられるため、その検出および定量は容易ではない。しかし本研究で得られた *IRC7* 過剰発現株は、候補となるチオール系香気成分を高生産する可能性が高く、成分同定や分析条件の最適化を進める上で有用なツールになると考えられる。

清酒におけるチオール系香気は、従来の清酒にはほとんど見られなかった新規性の高い香気特性であり、今後の清酒の高付加価値化に向けて大きな可能性を有している。一方で、これらは硫黄系香気成分でもあることから、濃度によっては好ましさだけでなく不快感にもつながり得る。そのため、単に香気成分を見いだすだけでなく、その生成機構と制御因子に関する基盤的知見を蓄積し、望ましい強度で再現性よく制御する技術へとつなげていくことが重要である。低グルテリン米の利用、酵母の窒素応答、Irc7p を介したチオール生成の関係をさらに明らかにすることで、将来的には清酒の香りを分子レベルで設計・制御するための新たな基盤が構築されることが期待される。

【参考文献】

Conrad, M., Schothorst, J., Kankipati, H. N., Van Zeebroeck, G., Rubio-Teixeira, M., and Thevelein, J. M. (2014). Nutrient sensing and signaling in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiol. Rev.* **38**, 254-299.

Hofman-Bang, J. (1999). Nitrogen catabolite repression in *Saccharomyces cerevisiae*. *Mol. Biotechnol.* **12**, 35-73.

Howell, K. S., Klein, M., Swiegers, J. H., Hayasaka, Y., Elsey, G. M., Fleet, G. H., Høj, P. B., Pretorius, I. S., and de Barros Lopes, M. A. (2005). Genetic determinants of volatile-thiol release by *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation. *Appl. Environ. Microbiol.* **71**, 5420-5426.

Iizuka-Furukawa, S., Isogai, A., Kusaka, K., Fujii, T., and Wakai, Y. (2017). Identification of 4-mercapto-4-methylpentan-2-one as the characteristic aroma of sake made from low-glutelin rice. *J. Biosci. Bioeng.* **123**, 209-215.

Roncoroni, M., Santiago, M., Hooks, D. O., Moroney, S., Harsch, M. J., Lee, S. A., Richards, K. D., Nicolau, L., and Gardner, R. C. (2011). The yeast *IRC7* gene encodes a β -lyase responsible for production of the varietal thiol 4-mercapto-4-methylpentan-2-one in wine. *Food Microbiol.* **28**, 926-935.

Santiago, M. and Gardner, R. C. (2015). Yeast genes required for conversion of grape precursors to varietal thiols in wine. **15**, fov034.

Tesnière, C., Brice, C., and Blondin, B. (2015). Responses of *Saccharomyces cerevisiae* to nitrogen starvation in wine alcoholic fermentation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **99**, 7025-7034.

Thibon, C., Marullo, P., Claisse, O., Cullin, C., Dubourdieu, D., and Tominaga, T. (2008). Nitrogen catabolic repression controls the release of volatile thiols by *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation. *FEMS Yeast Res.* **8**, 1076-1086.

以上

酵母の育種技術を活用した代替タンパク質の創製

サラヤ株式会社

奈良先端科学技術大学院大学 研究・イノベーション推進機構
特任教授 高木 博史

【背景】

世界的な人口増加や気候変動に伴う食糧危機（プロテインクライシス）、畜産に伴う環境負荷・動物倫理などの解決策として、また健康やエシカル消費に対する志向の高まりから、代替肉に代表される代替タンパク質が世界的に注目されている。代替タンパク質には、植物、動物細胞、昆虫、微生物などが用いられ、それぞれ開発が進んでいるが、市場の創出や拡大には多くの技術的課題がある。また、近年の異常気象、戦争、感染症などにより世界の食料生産は不安定になっており、食料安全保障の強化と食料生産の向上に寄与する代替タンパク質の生産は重要な課題である。

微生物は栄養価が高く、代替タンパク質として培養する際、他の生物と比べて極めて速く生育できる、酒粕・米糠、廃糖蜜などの副産物を栄養源に使用できる、高度な育種・培養技術を活用できるなどの利点がある。しかしながら、食肉本来の美味しさ・食感の再現技術、少量のバイオマス（菌体収量）に起因する製造コストなどに課題がある。酵母は非可食系バイオマスや食品廃棄物を用いて増殖でき、動物・植物タンパク質のようにヒトが摂取する穀物とは競合せず、世界的な環境・食料問題の解決に貢献できる。また、酵母を植物タンパク質存在下で培養し、その抽出液を添加することで、植物タンパク質の品質向上に資する。さらに、菌体を用いたタンパク質補給食品（サプリメント）など栄養価が高くヘルシーな代替タンパク質の生産も可能である。

【目的と研究プロセス】

本研究では、植物由来の低糖質甘味料やラクトフェリンを配合したサプリメントなど健康への貢献を目指した食品を開発している「サラヤ株式会社」と有用な酵母の育種技術を確立している「奈良先端大」の共同研究により、酵母の育種技術を活用することで、従来の製品との差別化や高付加価値化が可能な代替タンパク質の開発を目指す。具体的には、奈良先端大はタンパク質源として優れた性質を有するトルラ酵母（旧 *Candida utilis*, 現 *Cyberlindnera jadinii*）を用いて、食肉の美味しさや栄養・健康に寄与する機能性成分を高含有する菌株を育種するとともに、培地組成や培養条件を検討し、機能性成分の菌体内含量を高める方法を確立する。一方、サラヤ株式会社は育種した酵母の菌体を用いて代替タンパク質のプロトタイプを試作し、種々の評価を行うことで有用性を検証する。

【実験方法】

1. 毒性アナログを用いた機能性成分高含有株のスクリーニング

Biological Resource Center, NITE (NBRC) より、*Candida utilis* NBRC0988 株を親株として入手した。この株にエチルメタンサルホン酸 (EMS) 処理 (6%, 30 分) を施し、染色体 DNA にランダムな変異を導入した。EMS 処理後の細胞懸濁液を表 1 の毒性アナログを含有する SD 培地 (2% グルコース、0.17% 窒素源ベース、0.5% 硫酸アンモニウム) に塗布した後、30°C で培養を行い、生育の速いコロニーを取得した。

表 1 対象の機能性成分とスクリーニングに利用したアナログ

機能性成分	アナログ
必須アミノ酸	トリフルオロロイシン (TFL)
イノシン酸	8-アザグアニン (8-AG)
グルタチオン	セレノメチオニン (SeMet)
オレイン酸	トリフェニルテトラゾリウムクロライド (TTC)

2. 細胞内機能性成分含量の分析

各変異株を YPD 培地 (2% グルコース、1% 酵母エキス、2% ペプトン) で 30°C、250 rpm、24 時間培養した。集菌・洗浄後、OD₆₀₀ = 100 相当の細胞を回収した。これらの細胞から、下記に示す方法で各機能性成分を抽出し分析試料とした。

◎アミノ酸

回収した細胞を 1 mL の水で懸濁し、100°C で 20 分間処理し、細胞から総アミノ酸を抽出した。遠心分離後の上清に等量のクエン酸リチウム緩衝液 (pH 2.0) を加えてフィルターろ過 (0.22 μm) を行うことで、分析試料とした。アミノ酸含量を JLC500/V2 (日本電子社) で測定し、細胞内アミノ酸含量を nmol/OD₆₀₀

unit で示した。アミノ酸定量用の濃度既知スタンダードは、標準アミノ酸混合液（和光純薬社）を用いた。

◎イノシン酸

回収した細胞を、1 mL の水／メタノール／クロロホルム混合溶液（1:2.5:1）に懸濁し、37°C で 1200 rpm、30 分間処理し、細胞からイノシン酸を抽出した。遠心分離後の上清を乾固し、水に溶解しフィルターろ過（0.22 μm）を行うことで、分析試料とした。イノシン酸含量は HPLC で測定し、細胞内イノシン酸含量は nmol/OD₆₀₀ unit で示した。

◎グルタチオン

イノシン酸と同様の方法により、細胞からグルタチオンを抽出した。遠心分離後の上清を乾固し、クエン酸リチウム緩衝液（pH 2.0）を加えてフィルターろ過（0.22 μm）を行うことで、分析試料とした。グルタチオン含量は JLC500/V2（日本電子社）で測定し、細胞内グルタチオン含量は nmol/OD₆₀₀ unit で示した。

◎オレイン酸

イノシン酸と同様の方法により、細胞から中性脂質を抽出した。遠心分離後の上清を乾固し、ジメチルスルホキシドに溶解し分析試料とした。中性脂質含量は、ラボアッセイトリグリセライド（富士フィルム和光純薬）を用いて測定し、細胞内中性脂質含量は μg/mL/OD₆₀₀ で示した。また、中性脂質中の脂肪酸組成については、湿重量 10 g 相当の菌体を日本食品分析センターに送付し、委託分析を行った。

3. 生育試験

Candida utilis NBRC0988 株をオートクレーブ滅菌した廃糖蜜含有培地に、初期菌体濃度を OD₆₀₀=0.01 で植菌し、30°C で液体培養を行った。菌体濁度を経時的に測定し、生育を評価した。

4. 大豆ハンバーグの試作

NBRC0988 株（親株）、必須アミノ酸高含有株（TFL-5）、イノシン酸高含有株（8AG-79 株）をそれぞれ培養し、湿重量 70 g 相当の菌体を調製した。下記の手順で、これらの菌株を種々の濃度で配合した大豆ハンバーグを作製した。

<原料>

- ・大豆ミート 500 g
- ・ソテーオニオン 200 g
- ・強力粉 72 g

- ・パン粉 15 g
- ・塩・香辛料（ナツメグ）少量
- ・酵母 各 54 g

<試作手順>

手順1．大豆ミートを2リットルの水に入れて、強火で沸騰させる。
沸騰後、中火にして芯がなくなるまで炊く。

手順2．炊いた大豆ミートを鍋から上げて、大豆特有の匂いがなくなるまで濯ぐ。

手順3．濯いだ後の大豆ミートを手で絞り、脱水させる。
その後、脱水させた大豆ミートをロボクーブ（ミキサー）で米粒大に破砕する。

手順4．酵母以外の材料を混ぜる。

手順5．手順4の生地を【Aグループ】720 g、【Bグループ】360 g、【Cグループ】720 gに分ける。

手順6．【Aグループ】はそのまま120 g×6個に分け、ハンバーグの形に成形する。⇒ 酵母無添加検体

手順7．【Bグループ】に酵母18 gを入れて混ぜた後、120 g×3個に分けて成形する。⇒ 酵母5%添加検体

手順8．【Cグループ】に酵母18 gを入れて混ぜ、半分に分ける（D, Eグループ）

Dグループはそのまま120 g×3個に成形する。⇒ 酵母2.5%添加検体

Eグループには酵母18 gを追加し、120 g×3個に成形する。⇒ 酵母7.5%添加検体

手順9．下記の方法で各ハンバーグ検体を焼成する。

①中火で両面に焼き目がつくまで焼く。

②弱火で蓋をし、適宜水を加えながら硬くなるまで蒸し焼きにする。

手順10．焼成した各検体を冷ました後、個包装で真空パックし冷凍する。

5．大豆ハンバーグの評価

◎成分分析

酵母を添加していない大豆ハンバーグを対照に、各酵母株を 7.5%添加した試作品中の遊離アミノ酸および遊離イノシン酸含量を測定した（日本食品分析センターに委託分析）

◎物性試験

レオメーター（SUN RHEO METER CR-500DX（株）サン科学）を用い、ハンバーグの噛み切り特性(破断性)並びに中身の物性特性(硬さ、弾力性)を測定した。

・検体の前処理

各検体を真空パックの状態では沸騰水（95℃以上）に投入し、20 分間湯煎した。加熱後の検体をパックから取り出し、室温 15 分間放冷した後に測定に使用した。

・破断測定

② くさび形のプランジャーを使用し、各検体の中心付近で測定した。

②得られた応力データを基に、最大荷重（N）を算出した。

・圧縮測定

② ディスク形のプランジャーを使用し、各検体の平坦な表面を選び実施した。

②圧縮を 2 回連続で繰り返して得られた応力データを基に、硬さ(N)、脆さ(N)、弾力性を算出した。

◎官能分析

・検体の前処理

物性測定と同様に調製し、各検体を 6 等分に切り分け分析に供した。

・官能検査

10 名の被験者に、酵母菌株ごとに「無添加（対照）、2.5%、5%、7.5%」の検体セットを配布し、試食してもらった。

・検査項目

食前：外観（色や質感）の好ましさ、香りの好ましさ

食後：食感、えぐみや苦み等の不快味、塩味、肉の風味、旨味、総合的な好ましさ

・評価：5 段階（-2：好ましくない / 弱い ～ +2：好ましい / 強い）

*官能検査：研究代表機関（奈良先端大）のヒトを対象とする研究に関する事前審査によって、国が定める倫理指針に該当しないと判断されたため、奈良先端大

の「研究科倫理審査委員会」にて倫理審査を行い、承認を得た上で実施した。

【実験結果】

1. 機能性成分高含有株の育種

Candida utilis NBRC0988 株を EMS で処理し、表 1 に示す各種毒性アナログに耐性を示す変異株をスクリーニングした。その結果、それぞれのアナログを含有する培地で良好に生育する変異株を 50-100 株選抜した。各株の細胞内の機能性成分含量を測定した結果、次に示す各機能性成分含量が増加した株の取得に成功した。

◎必須アミノ酸（バリン・スレオニン）高含有株（TFL-5 株）：ロイシンアナログ（TFL）に耐性を示す株の中から、親株と比較して 2 倍のバリンおよび 2.4 倍のスレオニンを含有する TFL-5 株を取得した（図 1）。

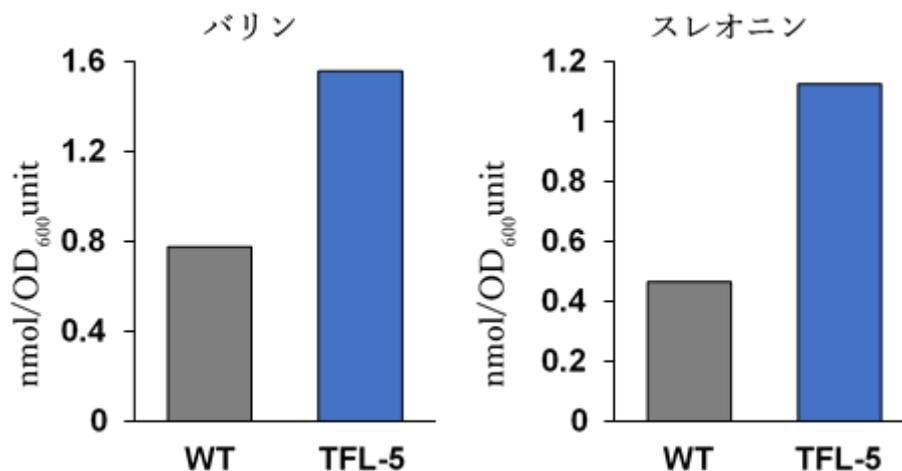


図 1 TFL-5 株の細胞内バリンおよびスレオニン含量

NBRC0988 株（親株）と TFL-5 株を YPD 培地で培養し、細胞内バリンおよびスレオニン含量を測定した。

◎イノシン酸高含有株（8AG-79 株）：イノシン酸アナログ（8AG）耐性株から、細胞内イノシン酸含量が 1.7 倍に増加した株を取得した（図 2）。

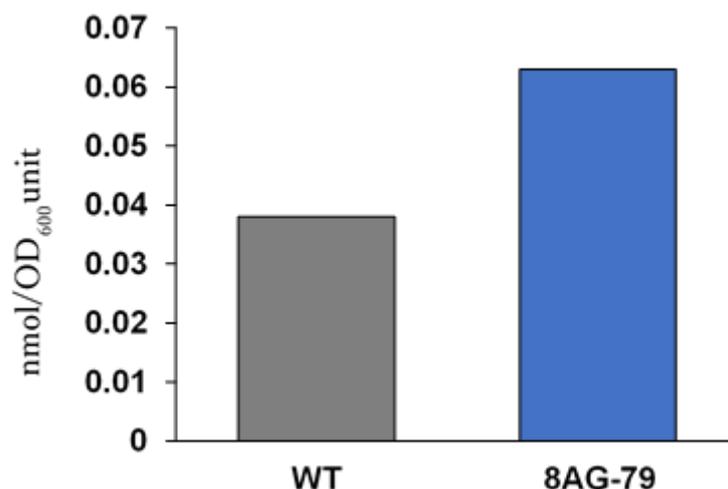


図2 8AG-79株の細胞内イノシン酸含量

NBRC0988株（親株）と8AG-79株をYPD培地で培養し、細胞内イノシン酸含量を測定した。

◎グルタチオン高含有株 (SeMet-2株)：グルタチオンを構成するシステインのアナログ (SeMet) に耐性を示す株の中から、親株と比較して1.3倍のグルタチオンを含有する株を取得した (図3)。

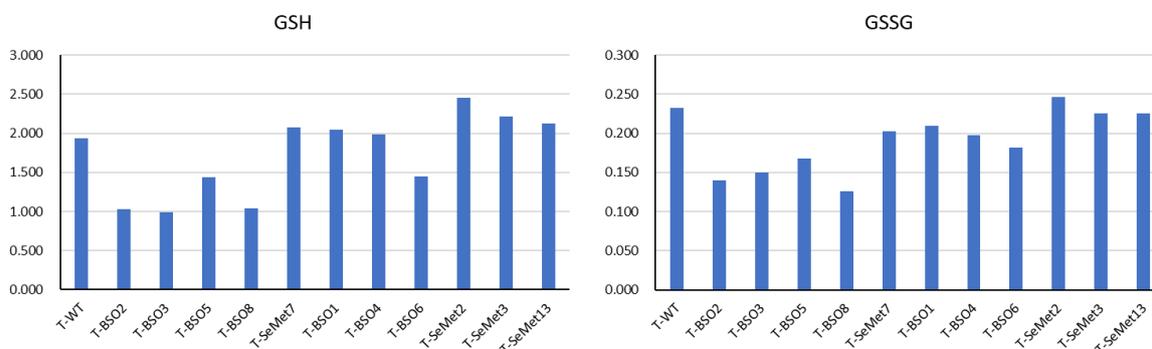


図3 SeMet-2株の細胞内グルタチオン酸含量

NBRC0988株（親株）とSeMet-2株をYPD培地で培養し、細胞内グルタチオン含量を測定した (GSH: 還元型グルタチオン、GSSG: 酸化型グルタチオン)。

◎中性脂質高含有株 (TTC-5, TTC-11株)：細胞内に脂肪酸を蓄積する菌株が、TTC (トリフェニルテトラゾリウムクロライド) 存在下で、赤く呈色することが報告されている。また、TTC含有培地でトルラ酵母の生育が阻害される一方で、細胞内に脂質を多く含む油脂酵母 (*Yarrowia lipolytica*) は良好な生育を示した。以上のことから、TTC含有培地での生育が改善したトルラ酵母の変異株は、脂質を高含有することが期待できる。そこで、TTC含有培地で良好な生育を示す

変異株をスクリーニングし、各株の細胞内中性脂質含量を測定した。その結果、中性脂質含量が親株の2倍に増加した2株取得した(図4)。そこでTTC-5株、TTC-11株を大量培養し、これらの菌株中の脂肪酸組成を分析したが、親株と比較してオレイン酸の増加は認められなかった。これは、培養スケールの拡大に伴う培養条件の変化が、細胞内の脂質蓄積に影響したためと考えられる。

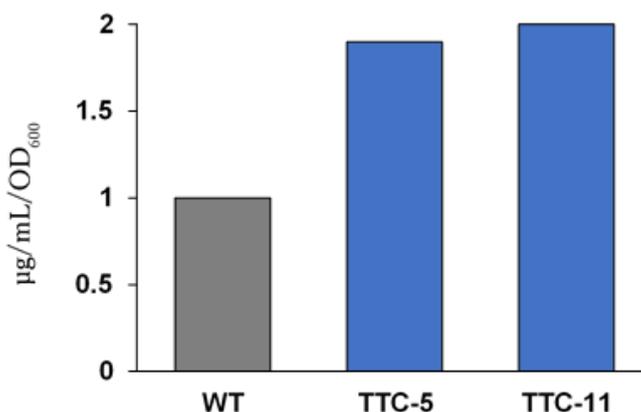


図4 TTC-5およびTTC-11株の細胞内中性脂質酸含量

NBRC0988株(親株)とTTC-5株およびTTC-11株をYPD培地で培養し、細胞内中性脂質含量を測定した。

2. 培養条件の検討

原料コストの低減化およびバイオマス収量の増加を目的に、食品副産物である廃糖蜜を炭素源として培養した際の生育を検討した。富栄養培地(1%酵母エキス、2%カゼインペプトン、2%グルコース)の組成において、グルコースを種々の濃度の廃糖蜜に置き換え、親株の生育に与える影響を検討した。その結果、8%の廃糖蜜(大よそ2%グルコースに相当)を含む培地で培養すると、同一培養時間(48時間)での生育が1.2倍に向上した(図5)。

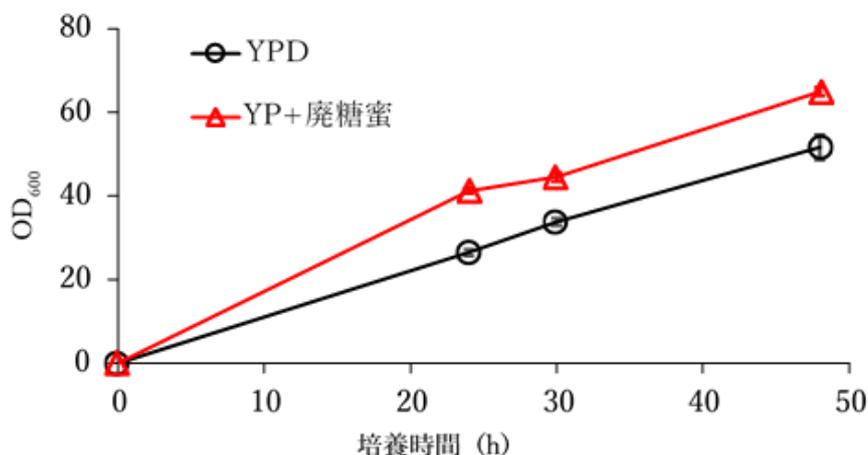


図5 廃糖蜜培地での生育試験結果

NBRC0988 株を YPD (黒) もしくは YP+8%廃糖蜜 (赤) 培地に、初期菌体濃度を OD₆₀₀=0.01 で植菌し、30°C にて液体培養し菌体濁度を経時的に測定した。

3. 代替タンパク質の試作・評価

3-1. 成分分析結果

酵母を添加していない大豆ハンバーグ、および各酵母菌株を 7.5% 添加した試作品について、遊離アミノ酸および遊離イノシン酸を測定した (表 2)。酵母の添加により、各種遊離アミノ酸が増加したさらに、TFL-5 株 (バリンおよびスレオニン高含有株) を用いることで、親株を添加した場合よりも両アミノ酸含量が増加し、大豆ハンバーグの栄養機能増加に寄与することが示唆された。一方で、イノシン酸含量は酵母添加の有無に関わらず検出限界を下回った。そのため、酵母の添加量の検討や、イノシン酸含量がさらに増加した菌株の育種が必要と考えられる。

表 2 試作品中の遊離アミノ酸および遊離イノシン酸含量

	酵母添加なし	親株	TFL-5	8AG-79
遊離アルギニン	42 mg/100g	49 mg/100g	50 mg/100g	42 mg/100g
遊離リジン	3 mg/100g	7 mg/100g	9 mg/100g	7 mg/100g
遊離ヒスチジン	3 mg/100g	5 mg/100g	5 mg/100g	5 mg/100g
遊離フェニルアラニン	2 mg/100g	3 mg/100g	4 mg/100g	4 mg/100g
遊離チロシン	3 mg/100g	3 mg/100g	4 mg/100g	4 mg/100g
遊離ロイシン	2 mg/100g	3 mg/100g	4 mg/100g	4 mg/100g
遊離イロイシン	2 mg/100g	2 mg/100g	3 mg/100g	3 mg/100g
遊離メチオン	—	2 mg/100g	1 mg/100g	—
遊離バリン	2 mg/100g	3 mg/100g	4 mg/100g	3 mg/100g
遊離アラニン	5 mg/100g	15 mg/100g	14 mg/100g	10 mg/100g
遊離グリシン	2 mg/100g	4 mg/100g	3 mg/100g	3 mg/100g
遊離プロリン	1 mg/100g	2 mg/100g	3 mg/100g	2 mg/100g
遊離グルタミン酸	9 mg/100g	38 mg/100g	35 mg/100g	31 mg/100g
遊離セリン	1 mg/100g	5 mg/100g	5 mg/100g	4 mg/100g
遊離スレオニン	1 mg/100g	2 mg/100g	4 mg/100g	3 mg/100g
遊離アスパラギン酸	6 mg/100g	10 mg/100g	16 mg/100g	9 mg/100g
遊離トリプトファン	4 mg/100g	4 mg/100g	5 mg/100g	4 mg/100g
5'-イノシン酸	—	—	—	—

3-2. 物性評価

各検体の物性測定結果を表3に示す。

破断の最大荷重では、親株>TFL-5>8AG-79の順に値が大きく、いずれの検体も酵母配合量が増えるほど値が低下する傾向が見られた。

また、応力グラフを見ると、無添加と親株 2.5%添加ではプランジャー押し込みの終了付近で最も高い応力を示した一方、他の酵母添加検体は押し込み途中で応力がピークに達し、その後は緩やかに低下する現象が見られた。これは、荷重により検体が割れた後に押し広げられ、徐々に応力を外部に分散した結果であると考えられ、粘り性の向上に関連すると考えられる。

圧縮の硬さはどの検体も同程度であり明確な違いは認められなかった。このことから、奥歯で噛んだ時に感じる硬さは酵母添加で変化しないと考えられる。脆さは、無添加はほぼ0となり、添加群で0.8~1.7N程度となった。これは圧縮の応力グラフでも破断と同様のパターンが見られ、無添加では圧縮終了まで崩れず酵母添加群は途中から崩れ始める特性を反映したものと考えられる。

表3 試作品の物性測定結果

項目	0%	親株			TFL-5 株			8AG-79 株		
		2.5%	5%	7.5%	2.5%	5%	7.5%	2.5%	5%	7.5%
破断 最大荷重 (N)	4.84	4.98	4.56	3.59	3.67	3.52	3.11	2.77	2.76	2.52
圧縮-硬さ (N)	3.24	3.46	3.61	3.54	3.75	3.72	3.35	3.66	3.30	3.48
圧縮-脆さ (N)	0.03	1.25	1.49	0.81	1.37	1.17	1.43	1.46	1.18	1.71
圧縮-弾力性	0.40	1.00	1.75	1.49	1.32	1.15	1.16	0.89	0.80	0.66

弾力性は、無添加<8AG-79<TFL-5≦トルラ親株となった。ただし、各郡で T1, T2 の値の大小パターンが異なり、弾力の質に差がみられる可能性が示唆された(表4)。具体的には、親株と TFL-5 は 1 回目の圧縮で崩れて押し込まれた分以上に形状を復元して具体的には、親株と TFL-5 は 1 回目の圧縮で崩れて押し込まれた分以上に形状を復元しているのに対し、無添加や 8AG-79 では比較的塑性が強く、変形が残りやすい傾向が認められた。

表 4 各検体の T1、T2 の傾向

	無添加	親株	TFL-5 株	8AG-79 株
T1 (1 回目ピーク)	大 13.4mm	小 4.9~6.3mm	中 6.5~7.3mm	中 6.9~9.3mm
T2 (形の戻り具合)	小 5.3mm	大 6.2~9.3mm	大 7.5~9.5mm	小 5.5~6.2mm
弾力性 T2/T1	小	大	やや大	やや小

3-3. 官能評価

【外観】

T-TFL5 株の 7.5%配合品のみやや低評価となった。コメントで「断面が粘土様、均質」といった言及があり、検体断面に露出した菌体原料の小片が外観評価に影響した可能性があり、添加量を増やす場合は、ペースト状の酵母菌体を生地十分に混合できる工夫が重要と考えられる (図 6)。



図 6 TFL-5 株を添加した試作品の外観評価

左から順に、酵母無添加、2.5%添加、5.0%添加、7.5%添加した検体

各検体について、無添加検体に対する官能分析結果を表 5 に示す。

【香り】

検体間で大きな変化は認められなかった。

【肉の風味】

親株 2.5%がやや高評価となったが、他は変化が認められなかった。後述の不快

味が強くなると感じにくくなっていた可能性が考えられる。

【不快味】

親株は 5%から不快身を強く感じる結果に対し、他の育種株は 7.5%で低評価となった。このことから、育種株では不快味が若干緩和された可能性がある。また、被験者のコメントでは「えぐみ」「培地臭」という回答が複数見られた。

【弾力性】

親株、TFL-5 株は 5%以降で低評価となり、「柔らかい」「粘度のよう」といった意見が多くみられた。一方、8AG-79 株は 2.5%と 7.5%は低評価だが、5%は影響なしと判定された。8AG-79 株添加群は全体的に無添加群よりも物性的に柔らかいことが示されていることから、質感など何か別の要素の影響で特異的に嗜好性が向上した可能性がある。

【塩味】【肉汁感】

今回の添加条件では、大きな変化は認められなかった。

【旨味】

親株 2.5%がやや高評価、TFL-5 株 2.5%がやや低評価となったが、他に特徴的な変化は見られなかった。

表 5 官能分析結果（無添加検体を 0 とした相対スコア）

項目	親株			TFL-5 株			8AG-79 株		
	2.5%	5%	7.5%	2.5%	5%	7.5%	2.5%	5%	7.5%
外観 (色,質感)	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.7	-0.4	0	-0.1
香り	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.1
肉の風味	0.6	-0.1	0.1	-0.4	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
不快味 (苦み,えぐみ)	-0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-1.1	-0.3	-0.3	-0.6
弾力性-強さ	0	-0.5	-0.6	-0.2	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1	-0.5

塩味-強さ	0.2	-0.2	0	-0.2	-0.1	-0.1	0.1	0.2	0
旨味-強さ	0.7	-0.2	0.2	-0.5	0.1	-0.4	0	0.2	0.1
肉汁感-強 さ	0.2	-0.1	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.1	0.1	-0.1
総合評価	0.5	-0.8	-0.4	-0.6	-0.2	-0.7	0	0.3	-0.1

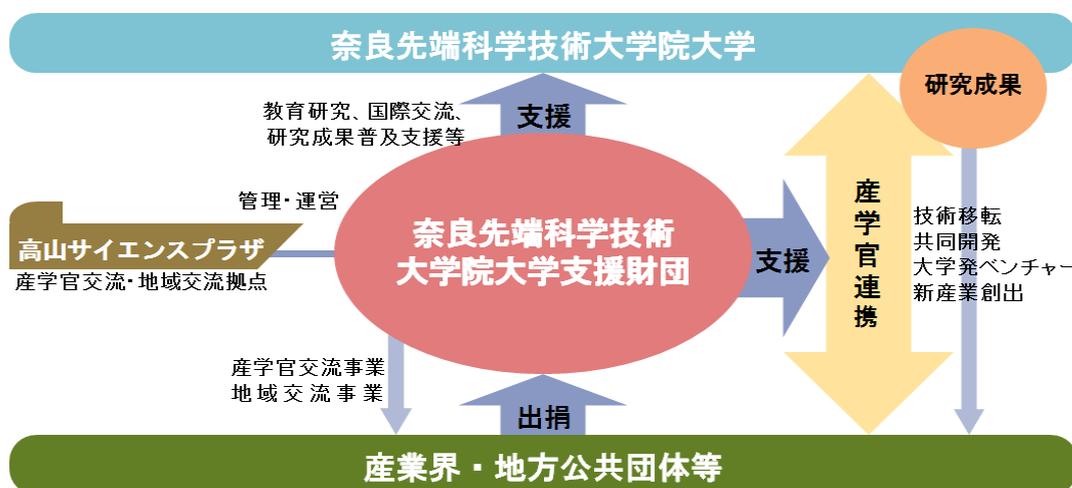
【今後の展開】

- ◎ 機能性成分の菌体内含量が増加する培養方法を検討する。
- ◎ 試作品の評価により得られた技術的課題を解決する酵母を開発する。

以 上

■奈良先端科学技術大学院大学支援財団の概要

- 名 称 公益財団法人 奈良先端科学技術大学院大学支援財団
(Foundation for Nara Institute of Science and Technology)
- 所 在 地 奈良県生駒市高山町 8916-12
- 沿 革 平成3年7月18日 財団設立
平成23年6月1日 公益財団法人に移行
- 行政庁 内閣府（内閣総理大臣）
- 目 的 奈良先端科学技術大学院大学の持つ斬新かつ優れた特性及び機能を最大限に発揮していただくために、その教育研究活動を支援するとともに、大学院大学と産業界、地方公共団体等との交流を促進することにより、先端科学技術分野の研究開発を担う研究者、技術者等の育成及び研究開発基盤の充実に寄与し、我が国の科学技術の発展に資することを目的としています。
- 事業内容
 1. 大学院大学支援事業
 - (1) 大学院大学における教育研究活動に対する支援
 - (2) 大学院大学における国際交流活動に対する支援
 - (3) 大学院大学における学術研究成果の普及に対する支援
 - (4) 大学院大学に対するその他の支援
 2. 先端科学技術の普及啓発ならびに交流事業
 - (1) 産学官交流事業
 - (2) 地域交流事業
 - (3) 情報発信事業
 3. その他
 - (1) 高山サイエンスプラザの経営
 - (2) 高山サイエンスタウン駐車場の運営



■奈良先端科学技術大学院大学支援財団の活動紹介

(1) 大学院大学支援事業

令和7年度大学院大学支援事業

支援総額 8,800 千円

① 教育研究活動に対する支援

- ・ 研究テーマ助成 3 件 1,500 千円

氏名	所属・職名	研究テーマ
松田 明大	先端科学技術研究科 ユビキタスコンピューティングシステム研究室 博士後期課程 2 年	糖尿病予防を目的とした非侵襲での血糖値予測に基づく行動変容システムの開発
吉岡 求	先端科学技術研究科 微生物インタラクション研究室 博士後期課程 1 年	奈良漬から単離された乳酸菌が有する好エタノール性のメカニズムの解明
ANDRIANALY Tojo Fenosoa	先端科学技術研究科 ナノ高分子材料研究室 博士後期課程 2 年	Exploration on synthesis of unique topologies bearing polymer via dynamic bond formation of phenylboronic acid and diol

- ・ 社会人ドクター修学支援事業 3 名 600 千円

② 国際交流活動に対する支援

- ・ 海外派遣支援 17 件 2,203 千円
- ・ 外国人留学生支援 6 名 2,652 千円
- ・ 大学間交流活動支援 3 件 505 千円

③ アワード事業

- ・ NAIST 最優秀学生賞 14 名 840 千円
- ・ 教員表彰 4 名 500 千円

(2) 産学官交流事業

奈良先端科学技術大学院大学支援財団では、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（以下、「奈良先端大」と記します。）で生まれた革新的な科学技術等を産業界で積極的に活用していただくために、奈良先端大の研究成果や技術シーズの実用化に向けた取り組みを支援する「奈良先端大発 新産業創出支援事業」を平成 16 年度に立ち上げ、令和 7 年度も引き続き実施しました。

奈良先端大発 新産業創出支援事業

地元の中小企業・ベンチャー企業等が、奈良先端大と連携して、奈良先端大で生まれた研究成果や技術シーズの実用化に向けた研究開発に取り組む場合に、研究開発に要する費用の一部を支援しています。

令和 7 年度は次の 4 件のテーマを支援しました。

『生成 AI の活用により独自性・創造性を高めるウェブデザインプロセスモデルの構築』

株式会社 EASE 創研

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 情報科学領域 教授 飯田 元

『低グルテリン米使用清酒の特徴香の酵母による生成メカニズム』

株式会社飯田

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 バイオサイエンス領域 准教授 渡辺 大輔

『電荷輸送層の最適化による新規ビスマス系太陽電池の創製』

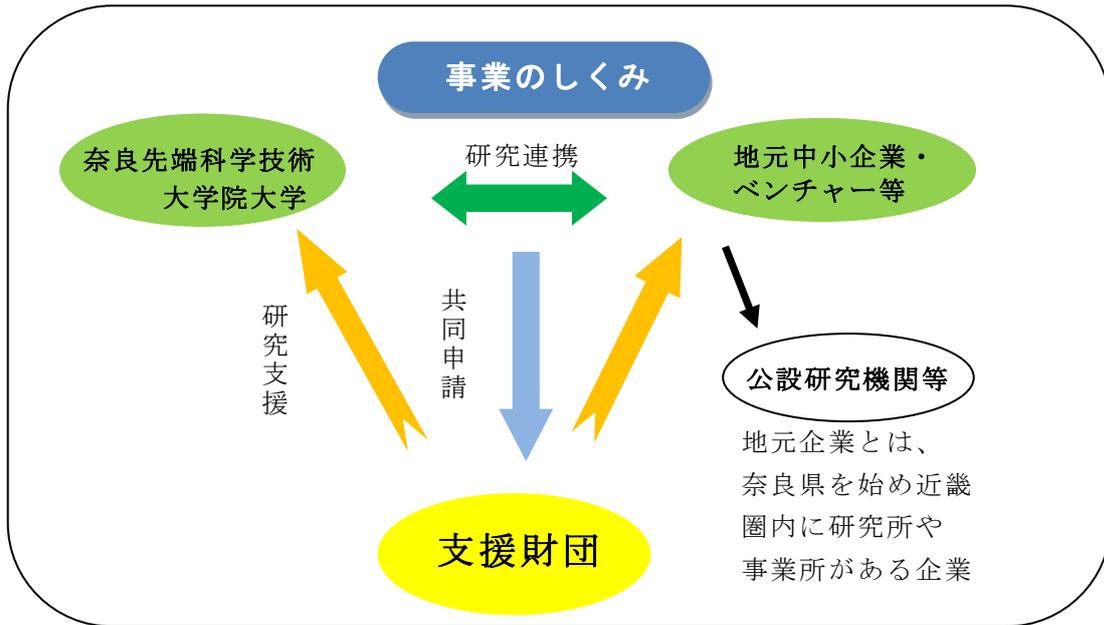
株式会社奥本研究所

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 物質創成科学領域 准教授 原 康祐

『酵母の育種技術を活用した代替タンパク質の創製』

サラヤ株式会社

奈良先端科学技術大学院大学 研究・イノベーション推進機構 特任教授 高木 博史



(3) 地域交流事業

財団では、先端科学技術に対する地域住民の関心を高めるとともに、高山地区の立地施設と地域住民との相互理解を深めるために様々な地域交流事業を行っています。

高山サイエスタウンフェスティバル

関西文化学術研究都市高山地区に立地する施設で構成する関西文化学術研究都市高山地区立地施設等連絡協議会の主催で、地域交流の一環として開催しています。

令和7年度は、9月27日（土）に開催しました。

高山サイエンスプラザでは、親子科学教室（「ブロックをつかって四足歩行ロボットを作ろう！」）を開催し、奈良先端大のオープンキャンパス（NAIST EXPO 2025）とともに、来場者に楽しんでいただける一日となりました。

※ 関西文化学術研究都市高山地区立地施設等連絡協議会

関西文化学術研究都市高山地区に立地する8つの施設（奈良先端科学技術大学院大学、参天製薬㈱奈良研究開発センター、上六印刷㈱、㈱Burley plus、㈱芦田製作所、㈱日阪製作所、㈱ソフトバンク生駒センター、当財団）で構成する団体です。

NAISTサイエンス塾

平成18年11月から、子供の理科離れの防止を目的に、講師を奈良先端大にお願いして科学実験教室を開催しています。

【令和7年度開催状況】

開催回数／5回

参加者／小学生117名

内容／

5月 「パンを作る生き物 『イースト』のひみつに迫ろう」

6月 「対戦ゲームでAIプログラミングに挑戦しよう！」

7月 「光と海の波の共通点 温めたチーズから見えるもの！」

9月 「空気の力！？ ホバークラフトを作ってみよう！！」

12月 「ミカンでできる！！科学工作」

夏休み科学実験教室

毎年夏休み期間中、科学のおもしろさ、楽しさを伝え、科学をより身近に感じてもらえるよう、科学実験教室を開催しています。

開催日／令和7年8月23日（土）

参加者／小学生21名

内容／「しらべてびっくり！身近な植物のひみつをさぐる」

親子科学教室

科学の基礎知識を学ぶ実験を実施しています。

開催日／令和7年11月8日（土）

参加者／小学生24名

内容／「自分で作る、空気抵抗だけで飛ばす『飛ぶ折り紙ヒコーキ』作りに挑戦しよう！」

けいはんなプラザ・プチコンサート in 高山

関西文化学術研究都市高山地区立地施設等連絡協議会の協賛による「けいはんなプラザ・プチコンサート in 高山」が、高山サイエンスプラザ オープンギャラリーにて開催されました。

【令和7年度開催状況】

開催回数／4回

参加者／149名

内容／

5月 「なつはるコンサート」

6月 「山本みなみ&田宮緋紗子 DUO コンサート」

10月 「マリンバデュオコンサート」

11月 「鈴木麻琴&木下裕美子 Duo Concert」

サイエンスランドの運営



奈良先端大との連携により、「科学に芽生える」をコンセプトとした幼児の遊び空間「サイエンスランド」に、ドラえもんをはじめ種々のソーラーカー、電磁石ゴマといったコンテンツを揃えました。



高山サイエンプラザの団体受入れ

「サイエンスランド」や屋外のオブジェを活用し、幼稚園児等の団体体験を受入れています。

高山サイエンスプラザ



高山サイエンスプラザは、当財団が行う産学交流や地域交流などの活動拠点であり、研究者や市民の交流の場となっています。

建物内部のガラス張りのオープンギャラリーは、水と緑と光があふれる吹き抜けの大空間で、コンサートなどの催しに利用されています。

磁石の反発力を利用した「磁気浮上階段」や、屋外の「科学する子供たちの広場」には、建物のガラス壁面に大きく映し出されたアインシュタインの顔や、ニュートン、野口英世などの偉大な科学者の像、「アルキメデスのねじ」のオブジェなどがあり、子供たちの科学する

心をはぐくむ楽しい空間となっています。

平日の9時から17時まで開館しています。

