



国立研究開発法人  
農業・食品産業技術総合研究機構

農研機構 技報

# NARO Technical Report

No. 18  
/ Oct. / 2025

Topics ▶ ご当地乳酸菌 Jチーズスターター  
▶ 企業連携のためのNARO乳酸菌コレクション

History 温故知新

発酵

特集

農研機構 技報

NARO Technical Report No.18

発行所／農研機構 広報部広報戦略室（編集委員会事務局）

〒305-8517 茨城県つくば市観音台3-1-1



この冊子は、グリーン購入法適合の用紙を使用しています



## フランス国立農業・食料環境研究所 (INRAE) との国際連携

# 2019

### Joint Linkage Call (JLC) 開始

若手研究者の交流により  
共同研究への発展を目指したプログラム



INRAE-NARO研究合意書署名

# 2024

### 「発酵研究」を重点分野として取り組み開始

### 農研機構

食料問題の解決と地球環境保全を両立する持続可能な食料システムを構築するためのキーテクノロジーのひとつが「発酵」です。日本人は長い歴史の中で発酵技術を築き上げてきました。第3回NARO食と健康の国際シンポジウム(2024年4月16日開催)では「発酵」と健康「発酵テクノロジー」のセッションの中で議論を交わしました。さらに、2024年6月11日には国際シンポジウムJP-FR Symposium on Fermentation Food Researchを在日フランス大使館で開催しました。各国が持つ技術の融合が促進され、AIやビッグデータを活用した先端発酵技術の開発に向け、新たなコラボレーションにつながっています。



麹菌を使った世界で初めての「麴チーズ」の開発



日本醸造学会によって「国菌」として認定された麹菌(*Aspergillus oryzae*)を使った伝統食品



国際シンポジウムでの討論の様子

### フランス国立農業・食料環境研究所

農業、食料、環境に関する研究を行い、持続可能な農業と食料システムの構築、環境保護、気候変動への対応を目指す欧州最大かつ世界トップレベルの農業研究機関

<https://www.inrae.fr/en>



傘下の研究機関

MICALIS (microbiologyとフランス語で食品を意味するalimentsを組み合わせた造語) 研究所の研究の3本の柱

- ・細菌の応用と病原性
- ・食品と消化の生態系
- ・系統微生物学と微生物による生合成

STLO研究所は牛乳と卵を研究対象とし、独自に開発した人工消化管を用いた乳酸菌および乳発酵食品の研究に実績があり、この分野で世界をリードしています。

新規乳酸菌の活用研究

腸内細菌と健康に関する研究

麹菌発酵技術の応用研究

微生物による脂質生産研究



2024年2月にNARO側担当者がINRAE本部を訪問、同年9月にMICALIS研究所のTristan Rossignol博士の研究室を、11月にSTLO研究所のYves Le-loir博士の研究室を訪問。同月にINRAE側担当者が来日。研究紹介セミナーおよび交流会を相互に開催しました。

### 連携の歴史



## 04 特集「発酵」

## 05 特集によせて

榊原 祥清

## 06 1 農研機構の乳酸菌コレクションと多様性

—NARO乳酸菌の発酵代謝物をDB化—

富田 理

## 10 2 非スターター乳酸菌を利用した

チーズ熟成の促進

野村 将

## 14 3 農業・食品副産物のアップサイクルに向けた生物変換プロセス開発

池 正和

## 18 4 日本の伝統食品“麴”を応用した

タンパク質増産技術の開発

真野 潤一

## 22 5 麹菌を活用した国産チーズの開発

—風味・成分の特徴と輸入チーズとの差別化—

鈴木 聡

## 26 6 発酵微生物の代謝とその機能

萩 達朗

## 30 7 澱粉系食品素材の消化性に

影響を及ぼす澱粉構造と物性

松木 順子 佐々木 朋子

### <トピックス>

## 34 ▶ご当地乳酸菌 J チーズスターター

小林 美穂

## 36 ▶企業連携のためのNARO乳酸菌コレクション

遠野 雅徳

## 38 温故知新

### 表紙について

発酵食品に使われる微生物：納豆菌の胞子(電子顕微鏡像を加工)  
胞子状態の納豆菌は保存性や耐熱性が高く、納豆製造の種菌として利用されています。



特集

## 発酵

Fermentation

微生物を活用して、  
食品の品質・機能性の向上、  
地域資源の有効活用、  
環境負荷の低減などに  
貢献する技術

## 特集によせて

食品研究部門 所長  
榊原 祥清  
SAKAKIBARA Yoshiakiyo

われわれが普段食べている日本食には、味噌、醤油、納豆、漬物など、様々な発酵食品が数多く使われています。これらの発酵食品は、栄養価が高く、保存が効くため、古くから日本の食卓に欠かせない存在となってきました。そして、2013年には「和食；日本人の伝統的な食文化」がユネスコ無形文化遺産に登録されました。「和食」の特徴のひとつとして「健康的な食生活を支える栄養バランス」が挙げられます。一汁三菜を基本としたバランスのとりの食生活に加え、出汁や発酵食品をうまく利用していることが、動物性油脂の摂取量を抑え、日本人の長寿や肥満防止に役立っていると考えられています。

発酵食品はその地域の食材や気候風土に根差して経験的に生まれ、発達してきたものと考えられます。稲作の盛んな日本では、高温多湿なカビの繁殖に適した環境と相まって、米とカビ（麹菌）でつくった米麹を使った技術が確立されてきました。このような背景から、麹菌は「われわれの先達が古来大切に育み、使ってきた貴重な財産である」として、2006年に日本醸造学会により麹菌に対して国を象徴する菌である「国菌」の認定が行われました。

他方、気候が冷涼で酪農の盛んなヨーロッパでは、乳を原料とした発酵食品が発達し、チーズやヨーグルトの製造技術が生まれたと考えられます。チーズやヨーグルトは「和食」とは言えませんが、既にわれわれの食生活の中にもすっかり定着しています。特に乳酸菌などを使った発酵乳・乳酸菌

飲料は、腸内環境を整える効果や、免疫力を高める効果などが注目され、今後も需要の増加が見込まれます。

さて、「発酵」と「醸造」の違いについてご存知でしょうか？ 発酵は、微生物の働きによって有機物が分解され、アルコール、有機酸、二酸化炭素などの物質を生成する現象のことです。一方、「醸造」は、発酵という現象を利用して、特定の食品や飲料を製造する技術のことです。両者とも食品や飲料と関係の深い用語ですが、「発酵」は現象を指す言葉であり、その対象は食品に限りません。従来は石油などの化石資源から作られていた製品を、未利用・低利用のバイオマス資源から生産する試みがなされています。環境負荷の低減や新たな資源利用に貢献する技術としても、発酵は期待されています。

農研機構では、微生物の力を活用した発酵技術の研究を通じて、食品の品質・機能性の向上はもとより、地域資源の有効活用、環境負荷の低減など、食品産業の発展や社会課題の解決に向けた取り組みを進めてきました。本号では、「発酵」を主題に、乳酸菌、麹菌、澱粉構造、副産物のアップサイクルなど、多様な切り口から発酵研究の最前線を紹介します。微生物の力を活かした新たな食や産業の創出は、持続可能な未来への鍵となることでしょう。

読者の皆様に発酵研究のさらなる可能性を感じていただき、引き続き農研機構の取り組みをご支援いただきますようお願いいたします。



# 農研機構の乳酸菌コレクションと多様性

## －NARO乳酸菌の発酵代謝物をDB化－

富田 理  
TOMITA Satoru

### はじめに

乳酸菌は、発酵食品の製造や味と風味の形成に欠かすことのできない発酵微生物のひとつです。また、腸内環境を整える作用や、免疫機能を調節する作用のように、ヒトや動物の健康にも有益であることが広く知られています。ただし、乳酸菌に分類される生物種は数百に及ぶだけでなく、同一種であってもその能力は菌株の違いによって大きく異なります。能力に優れる菌株を特定するには一つ一つの菌株を試験していく必要があります。したがって、研究開発において有用な菌株を見つけるためには、探索の元手として豊富な菌株コレクションを用いることが重要な要素のひとつになります。しかし、菌株コレクションは多大な時間とコストをかけた地道な収集の末に形成される“資産”であり、一朝一夕には得られません。これが乳酸菌株の探索研究に対して、特に新規参入に対してのハードルになっている場合があると考えられます。

農研機構は、12の国立研究機関を統合・再編する形で2001年4月に設立され、その後2016年までに合計6機関との統合を経て、現在の組織体制へと至っています。個別の研究拠点で長年にわたり収集されてきた乳酸菌株に関しても、2019年から統合を進めた結果、保有菌株が6,000株を超える規模の乳酸菌コレクションとなりました。この微生物資源の利用によりハードルを解消し、農業・食品分野における様々な研究開発を後押しするため、菌株選抜に役立つデータベースの構築と拡充を進めてきました<sup>1)2)</sup>。ここでは、本稿執筆時点の内容にアップデートし、NARO乳酸菌コレクションとそのデータベースの現状を紹介します。

### 農研機構乳酸菌コレクションの概要

現在、NARO乳酸菌コレクションでは約6,400株の菌株を保有しており、それらは多岐にわたるサンプルから分離されてきました(表1)。本コレクションのうち約半分が農

作物や発酵食品などの食品由来の分離株であり、もう半分は家畜飼料や糞便サンプルなどの非食品を由来としています。食品への応用を前提とする場合には食品由来の菌株が希望されることが多いですが、食品の分離源を大きく分類すると、野菜類、穀類、乳類、調味料、魚介類、果実類などに分けられます。その多く(約1,800菌株)は大分類として同じ野菜類に由来するものの、内訳では漬物を中心に100種類を超える分離源が登録されています(図1)。このように分離源が多岐にわたることは、分離株の特性も多様性に富むことを期待させます。

分離株の生物種に関する情報は各菌株が乳酸菌かどうかを確認するために重要ですが、本コレクションの約96%の菌株に菌種同定の分析データが登録されています。現在の分類学では乳酸菌群は*Lactobacillales*目にまとめられており<sup>3)4)</sup>、本コレクションの保存菌株にはこの目を構成する5科すべての乳酸菌が含まれています。また一部には、産業上の重要性や生理学的な共通性から広義に乳酸菌として扱われる*Bifidobacterium*属細菌や*Heyndrickxia coagulans*(旧*Bacillus coagulans*)なども含まれています。本コレクションの属の総数は30を超え、提唱されている乳酸菌属の4割以上をカバーしており、種の総数も190に及びます。具体的な例として、広範な環境から分離され産業利用も多い*Lactiplantibacillus*属乳酸菌に注目した場合、80種類以上の分離源に由来する5種700菌株が該当し、多様な菌株から選抜をスタートすることができます。

### 菌株情報のデータベース化とweb検索システムの開発

このように本コレクションには膨大な選択肢があるために、そこから使用する菌株を選びぬく判断材料が少ない

と、かえって選定が滞ってしまう側面もあります。そこで、NARO乳酸菌利用者による菌株の選定作業をサポートするため、各菌株が有する特性データを収集してデータベース化しました。このデータベースは各菌株の分離源や生物種などの基本情報のほか、生理生化学的特性、発酵特性、機能性、ゲノム情報により構成されています(表1)。さらに、これらのデータを使用して菌株のオンラインスクリーニングを行うことができるweb検索システムを開発しました<sup>5)</sup>。このシステムでは複数の特性データから横断的な検索が可能で、検索結果からの絞り込み検索にも対応しており、ステップを踏んで簡単に菌株を絞り込んでいくことができます(図2)。また、やや高度な使用方法として、データベースに含まれるゲノム情報に対して、特定の遺伝子・酵素名やタンパク質ドメイン番号で検索することも可能です。これは、目的の表現型に関わる遺伝子やタンパク質の情報が得られている場合に、その有無を指標として候補菌株を絞り込むアプローチとなります。

表1 NARO乳酸菌コレクションに含まれる各種データ  
(本稿執筆時点)

|               |                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| 菌株数           | >6,400株                                                            |
| 分離源           | 食品:野菜類、穀類、乳類、調味料、魚介類、果実類など 非食品:飼料、動物、植物                            |
| 生物種           | 3目、8科、31属 >190種                                                    |
| ゲノム情報         | 約500株<br>アノテーション遺伝子名、酵素名、タンパク質構造ドメイン番号                             |
| 特性<br>- 生理生化学 | ～約1,900株(項目により異なる)<br>糖質化性、ガス生産性、耐塩性、低温発酵能、亜硝酸耐性                   |
| 特性<br>- 発酵特性  | ～約2,700株(項目により異なる)<br>牛乳発酵性、豆乳発酵性、豆乳発酵代謝物                          |
| 特性<br>- 機能性   | ～約2,800株(項目により異なる)<br>対 <i>L. sakei</i> 抗菌活性、腸管粘膜付着性、IL-12遺伝子発現誘導能 |

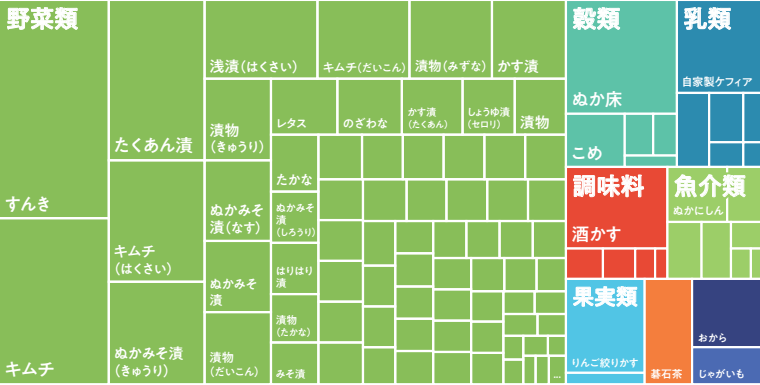


図1 NARO乳酸菌コレクションの食品由来菌株の分離源  
各タイトルの大きさはその分離源に該当する菌株の数を反映。

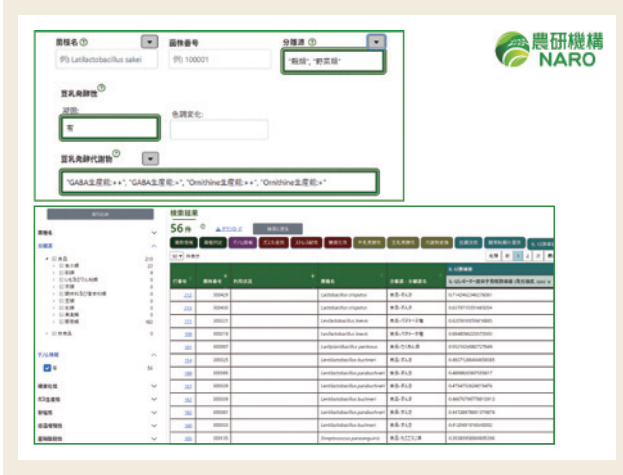


図2 NARO乳酸菌DB検索システムの使用例  
上は、「穀類および野菜類を由来とする菌株」のうち、「豆乳の凝固能があり、代謝物としてGABAまたはオルニチンを生産する菌株」の検索例。下は、上の検索結果について、さらに「ゲノム情報が有る菌株」を絞り込んだ例。



本システムの検索機能および各菌株の分離源と生物種は公開されており、無料で検索・閲覧することができます。ユーザー登録が必要な利用範囲としては、分離源と生物種以外の特性データの表示機能が設定されており、個別に利用希望を受け付けています(お問い合わせ窓口: lactibacteria@ml.affrc.go.jp)。

## 乳酸発酵豆乳の代謝物データベース

筆者は、上記のデータベースのうち発酵代謝物の情報収集を精力的に行ってきました。食品の発酵加工によって生成される代謝物は、栄養素としてだけでなく、味や香り、健康増進効果に関わる要素であることから、その情報が菌株選抜に役立つと考えたからです。各乳酸菌株を用いて調製した発酵豆乳を核磁気共鳴(NMR)法を用いたメタボローム解析(多成分の一斉分析)に供し、主要代謝物の発酵前後の消長から各菌株の特性を評価しました。食品由来を中心とする約2,700菌株のNMRスペクトルからは40種以上の成分が検出されました(図3)。例として主要成分である乳酸発酵経路の代謝物(乳酸、酢酸、エタノール)だけを見てみても、異なる菌株の使用により顕著な差異が生じることがわかります(図4)。乳酸は発酵物のpHと密接な関係性を示していることから酸味強度への寄与を、また、揮発性のある酢酸とエタノールについては香りへの影響を予想することができます。

最終的に、各成分の消長データから30項目の特性へと集約することで検索可能なデータベースとして格納しました。このデータには、大豆オリゴ糖の代謝、大豆タンパク

質の分解と変換、脂質と核酸の分解、イソフラボンのアグリコン化などに関連する代謝物も含まれます。大豆は有用

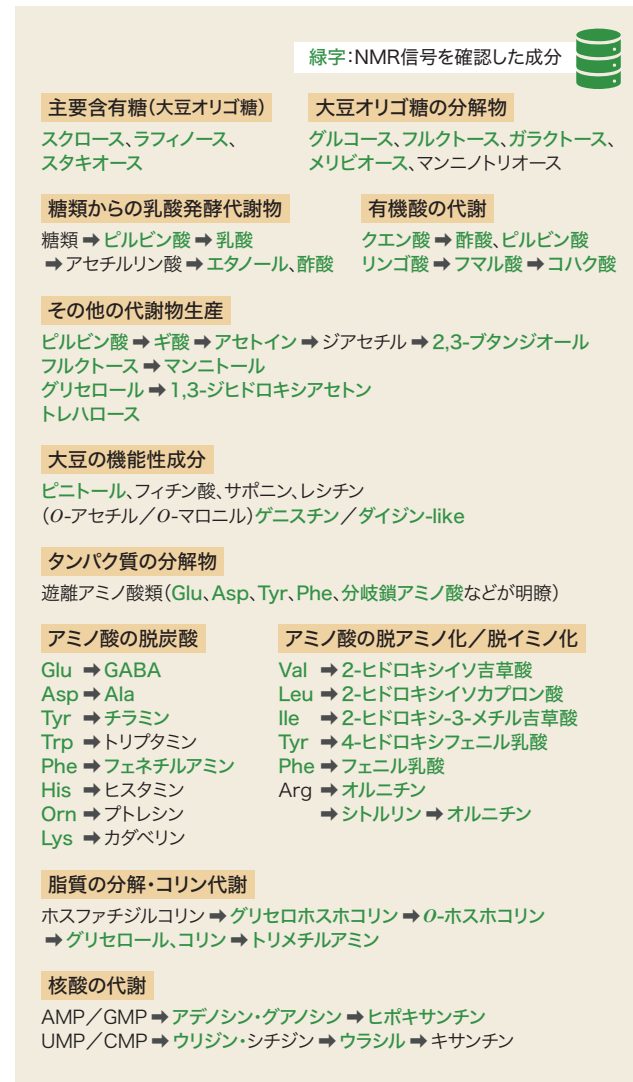


図3 NARO乳酸菌の豆乳発酵物に検出された成分および推定される代謝系

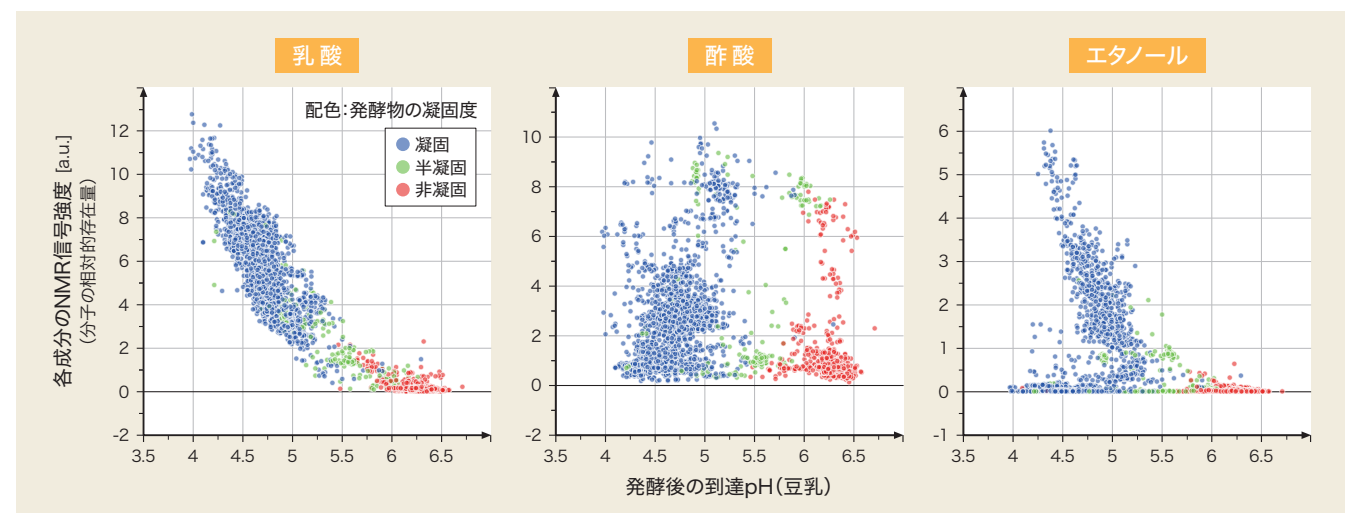


図4 豆乳発酵物のpHと主要代謝物からみたNARO乳酸菌約2,700株の比較

各グラフの横軸は発酵後の豆乳発酵物のpHを示し、縦軸はグラフ上部に表示のある各成分の検出信号強度を表す。グラフ中の一つ一つのドットは、約2,700株の異なる乳酸菌で発酵された豆乳発酵物を意味する。

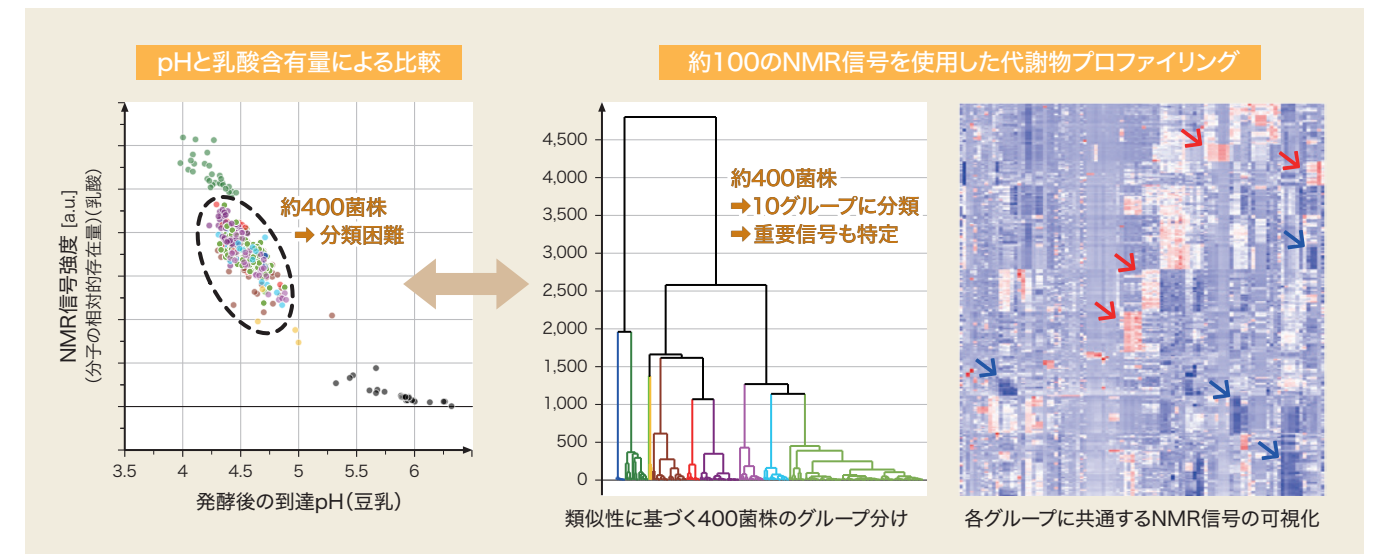


図5 代謝物プロファイリングによるLactiplantibacillus属約400株の比較例

左は、豆乳発酵物のpHと乳酸のNMR信号強度の散布図であり、楕円内のほとんどの菌株が分類困難であることを示す。中央は、成分(NMR信号)の検出パターンを用いることで菌株間のグループ分けに成功したことを示す、階層的クラスタリング解析の結果。右は、その各グループに共通するNMR信号が特定可能(図中矢印)であることを示すヒートマップ。

なタンパク質資源として期待が高まっているほか、オリゴ糖やイソフラボンなどの機能性成分を含有する一方で、青臭さや取れん味のような課題も残されています。また、好ましくない代謝物である生理活性アミン(ヒスタミンやチラミンなど)の検出の有無も、安全性に関わる情報源として役立ちます。乳酸菌を用いた大豆の新たな発酵加工を検討する際に、望ましい成分組成をもたらす菌株を効率的に提案することができます。

また、データベースに格納されていない未同定のNMR信号も活用することで、特定の代謝物に限定しない網羅的な菌株比較が可能です。この方法ではNMR信号パターンの差異を統計学的手法で検出(プロファイリング)し、菌株のグルーピングを視覚的に行うことが可能です。例えば、データベースのうち豆乳凝固能を示したLactiplantibacillus属の分離株約400株は、発酵物のpHではそれ以上の違いを判別することはできません。しかし、約100のNMR信号をプロファイリングすれば、10の異なるグループに分類できることがわかり、さらに、この分類に寄与したNMR信号を特定することもできました(図5)。異なるグループに属した菌株には成分組成に何らかの差異があると言えることから、選抜の指標となる成分が特定できていない状況においては、この方法が菌株の探索的な絞り込みに適しています。

## おわりに

今回開発されたデータベースとその検索システムにより、利用者の目的に合う、複数の特性を併せ持つ乳酸菌の候補株を簡単に検索することが可能となりました。これにより発酵食品のデザイン業務を効率化し、研究・開発の実現可能性を大きく高め、時間的・経済的コストの低減につながります。NARO乳酸菌コレクションを活用した発酵食品産業の支援・拡大を念頭に、新規な菌株の収集やさらなるデータの拡充を進めるとともに、検索システムの機能を充実させていきたいと考えています。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

付記: 本稿で記載された内容は、内閣府 研究開発とSociety5.0との橋渡しプログラム(BRIDGE)課題「国産ダイズの用途拡大に向けたフードテック企業等支援基盤の整備」(2023-2024年)の研究成果です。

## 参考文献

- 1) 林田空・富田理(2023) NARO乳酸菌コレクションの確立に向けたデータ収集とその活用事例. 食品の試験と研究, vol.58, 22-24.
- 2) 林田空ら(2024) NARO乳酸菌コレクションとその活用方法. 月刊食品工場長, vol.326, 105.
- 3) Ludwig, W. et al. (2009) Order II Lactobacillales. In: De Vos P. et al. (ed.), Bergey's Manual of Systematic Bacteriology 2nd ed. vol.3, pp.464-735.
- 4) 鈴木健一郎(2024) 乳酸菌分類学の歴史的背景と展望. 日本乳酸菌学会誌, vol.35(1), 15-22.
- 5) 農研機構乳酸菌データベース. <https://lactibacteria.nfri.naro.go.jp/>



# 非スターター乳酸菌を利用した チーズ熟成の促進

野村 将

NOMURA Masaru

## はじめに

発酵は人類最古の食品加工技術の一つであり、古くから保存や風味の向上に利用されてきました。発酵によって生成される乳酸や酢酸などの有機酸、アルコールは、腐敗菌の繁殖を抑える働きがあり、食品の保存性を高めます。また、発酵の過程で生じる有機酸やアミノ酸、アルコールなどは、食品に独特の香りやうま味を加え、味に深みをもたらします。さらに、発酵によってビタミンやアミノ酸が増加したり、栄養成分が消化吸収しやすい形に変化したりすることで、栄養価も向上します。加えて、発酵により増える乳酸菌や酵母などの有用微生物は腸内環境を整える働きを持ち、免疫力の向上やアレルギーの抑制など、健康面での効果も期待されます。

チーズやヨーグルトのような発酵乳製品を作る時は、発酵をスタートさせる種菌(発酵スターター)を人為的に接種します。この発酵スターターが持つ役割として、①乳中で速やかに増殖して乳酸を生成し、pHを下げることで、②優占菌叢<sup>そう</sup>を形成して汚染菌の生育を抑えること、③各種の酵素を生産してタンパク質や脂肪を分解し、風味成分を生成して熟成を進めることなどが挙げられます。チーズの熟成には低温条件下で長期間を要するので、時間とコストを削減する熟成促進技術が求められています。チーズの熟成促進に関しては、これまでに熟成温度の上昇、高圧処理、酵素添加など様々なアプローチがなされており、その一つとして熟成促進効果を持つ乳酸菌の利用があります。

## 非スターター乳酸菌

チーズの製造過程では、熟成初期は発酵スターターが優占菌叢を形成していますが、熟成が進むにつれて発酵スターター以外の乳酸菌(非スターター乳酸菌、non-starter lactic acid bacteria: NSLAB)が偶発的に増殖することがあります(図1)。NSLABは、空気中の細菌の混入や、チーズ製造装置や原料殺菌後の生残菌に由来すると考えられており、通常、様々な中温性乳酸菌と*Pediococcus*属で構成されます<sup>1)</sup>。低濃度( $10^2$ – $10^3$  cfu g<sup>-1</sup>)ではその影響は限定的ですが、高濃度(> $10^7$  cfu g<sup>-1</sup>)になるとチーズ熟成プロセスに影響を及ぼ

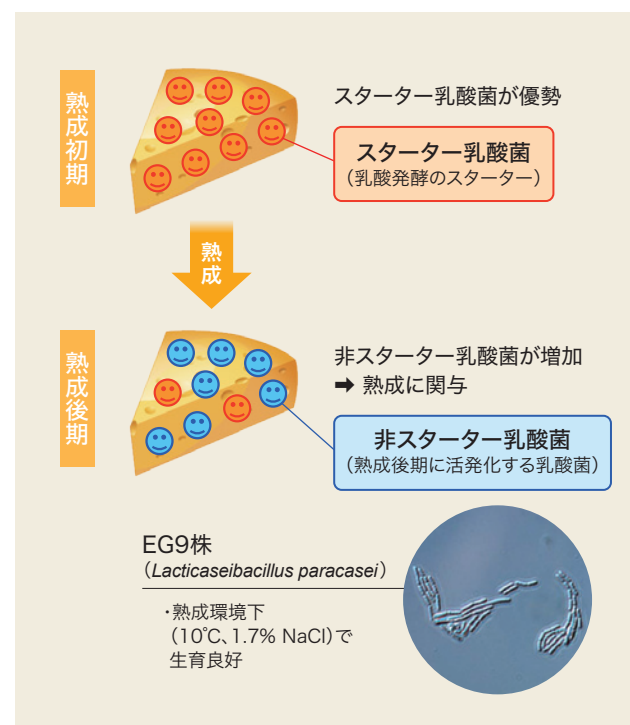


図1 非スターター乳酸菌とEG9株の特徴

し、熟成中に遊離アミノ酸の生産を促進し、風味を改善することが示されています<sup>2)</sup>。

## NSLABのチーズスターター利用

NSLABはチーズの熟成を改善しますが、偶発的に発生するため制御は困難です。そこで、NSLABを単離して発酵スターターの一つとして原料乳に添加することで、熟成後期の菌叢を制御して熟成促進効果が得られると考えました。

そこで、熟成チーズ9種類を用いて、MRS寒天培地およびGYP寒天培地<sup>\*2</sup>を使用し、NSLABの分離を試みまし<sup>3)</sup>。その結果、9種類のうち7種類のチーズでは両培地上にコロニーが形成され、残りの2種類からはコロニーが確認されませんでした。各培地からランダムにコロニーを採取し、合計100株の分離株が得られ、16S rRNA遺伝子の塩基配列解析により、88株が同定されました(図2)。

内訳は、*Lactococcus lactis*が42株、*Lacticaseibacillus paracasei*が28株、*Leuconostoc mesenteroides*が9株、*Kocuria koreensis*が8株、*Brevibacterium* sp.が1株でした。*Lacticaseibacillus paracasei*は熟成チーズから頻繁に分離されますが、発酵スターターには含まれないことから、NSLABであると考えられました。一方、*Lactococcus lactis*と*Leuconostoc mesenteroides*はチーズスターターに含まれる微生物であるため、NSLABかどうかの判断は困難でした。

これらの中から、*Lacticaseibacillus paracasei* EG9株を選抜し、さらなる検討を行いました。EG9株の生育の特徴として、基準株<sup>\*3</sup>である*Lacticaseibacillus paracasei* JCM 8130<sup>T</sup>株と比較して、10°C・1.7%NaClという熟成チーズに近い条件下で優れた生育能力を示しました(図1)。しかし、EG9株は乳酸菌用のMRS培地では良好に生育しましたが、牛乳(脱脂乳培地)では生育が遅く、発酵スターターに求められる酸生成速度には達しませんでした。その

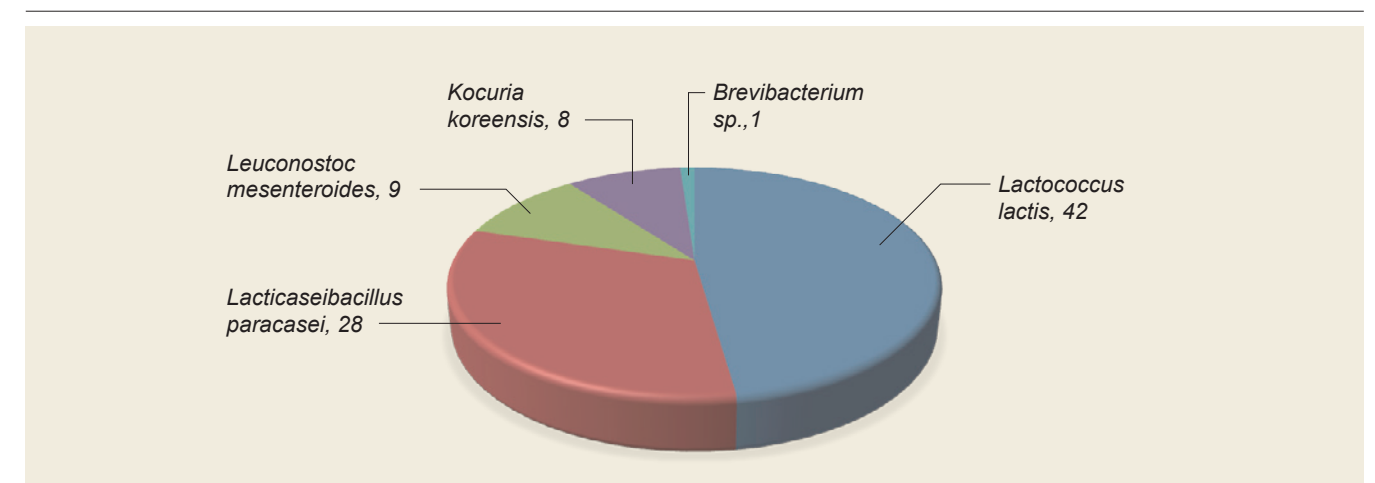


図2 熟成チーズから分離された株



ため、以降の試験では酸生成速度の速いスターター菌と混合して使用しました。

次にEG9株の熟成促進効果を検証するため、EG9株を酸生成速度が速いスターターと同数の $1 \times 10^7$  cfu mL<sup>-1</sup>で原料乳に添加してチーズを試験製造し、熟成後の生菌数、遊離アミノ酸、pH、水分、食感、味覚センサー応答を測定しました<sup>3)6)</sup>。EG9株はチーズ中で $10^9$  cfu g<sup>-1</sup>まで増加し、熟成期間中はその生菌数が維持されました。また、EG9株添加チーズの総遊離アミノ酸は、無添加チーズの2.7倍も生成されました(図3)。一方、味覚センサー分析では両者に有意な違いはありませんでした。このことから、EG9株をチーズ発酵の種菌に添加すると、熟成中の遊離アミノ酸生成が促進され、風味を損なうことなく品質を向上させる有望な補助スターターであることが示されました。また、EG9株の遊離アミノ酸生成効果は、初発菌数を $1 \times 10^6$  cfu mL<sup>-1</sup>まで下げても得られましたが、 $1 \times 10^5$  cfu mL<sup>-1</sup>まで下げると効果がなくなりました。

## EG9株のタンパク質分解遺伝子 発現プロファイル

乳酸菌のタンパク質分解には、細胞内および細胞外の酵素とトランスポーターが関与しています<sup>4)</sup>。すなわち、乳酸菌の細胞壁結合型タンパク質分解酵素(プロテイナーゼ)は、牛乳中のカゼインをオリゴペプチドに分解し、オリゴペプチドはペプチドトランスポーターを介して乳酸菌細胞内に輸送されます。細胞内に運ばれたオリゴペプチドは、細胞内ペプチダーゼによってさらに分解され、短鎖ペプチドまたは遊離アミノ酸になります(図4)。EG9株のゲノム配列を解読したところ、約2.9Mbの染色体と3種のプラスミドpEG9A(80kb)、pEG9B(55kb)、およびpEG9C(12kb)で構成されていました<sup>5)</sup>。そこで、これまでに報告がある乳酸菌タンパク質分解関連遺伝子38個についてEG9株ゲノム配列を探索したところ、18のペプチダーゼ、1つの細胞壁結合型プロテイナーゼ、11のペプチドトランスポーター、および1つの応答調節因子が見出されました(表1)。これら31遺伝子について、定常期細胞<sup>※4</sup>をコントロールとして熟成0日目と30日目の発現プロファイルと比較したところ、熟成0日目には多くの遺伝子が活性化され、30日目には抑制される傾向が見られました<sup>6)</sup>。すなわち、EG9株は、チーズ熟成中に増殖してタンパク質を分解し、遊離アミノ酸生成を促進することが明らかになりました。今後は、EG9の遺伝子発現制御や他のNSLABとの相互作用についての研究が期待されます。

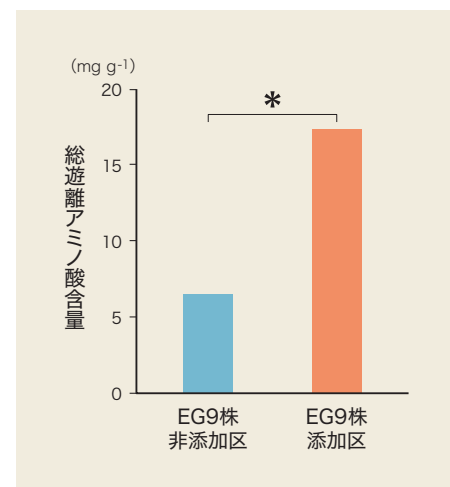


図3 チーズ熟成におけるEG9株添加効果  
熟成180日の遊離アミノ酸が約2.7倍。

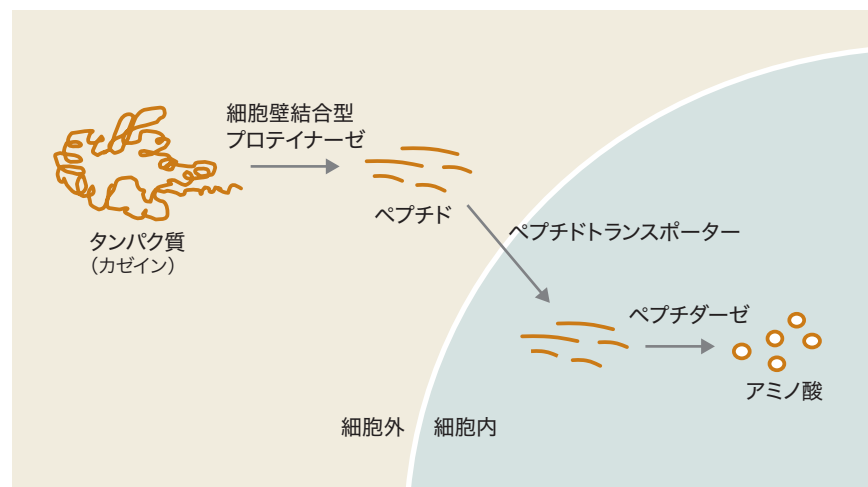


図4 乳酸菌のタンパク質分解メカニズム

表1 熟成チーズ中におけるEG9株のタンパク質分解関連遺伝子の発現解析  
タンパク質分解関連の31遺伝子のうち27遺伝子で、熟成30日目より熟成0日目の発現量が高い。

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ペプチダーゼ        | <i>pepO2</i> 、 <i>pepA</i> 、 <i>pepP2</i> 、 <i>pepO1</i> 、 <i>pepF1</i> 、 <i>pepF2</i> 、 <i>pepF3</i> 、 <i>pepN</i> 、 <i>pepC1</i> 、 <i>pepC2</i> 、 <i>pepL</i> 、 <i>pepT</i> 、 <i>pepV</i> 、 <i>pepX</i> 、 <i>pepI</i> 、 <i>pepR</i> 、 <i>pepQ</i> 、 <i>pepP1</i> |
| 細胞壁結合型プロテイナーゼ | <i>prtR</i>                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ペプチドトランスポーター  | <i>dtpT</i> 、 <i>dppB</i> 、 <i>dppC</i> 、 <i>dppD</i> 、 <i>dppF</i> 、 <i>oppC</i> 、 <i>dppA</i> 、 <i>oppD</i> 、 <i>oppF</i> 、 <i>oppB</i> 、 <i>oppA</i>                                                                                                            |
| 応答調節因子        | <i>prcR</i>                                                                                                                                                                                                                                                        |

赤:有意に高い(10倍以上) 緑:有意に高い(2~10倍) 黒:変化しない(2倍未満)

## おわりに

日本国内におけるチーズ生産は年々増加しており、チーズ工房の数も着実に増えています。2006年には106カ所だった工房数は、2023年には351カ所に達し、全国各地で広がりを見せています<sup>7)</sup>。また、牧場併設型や独立型のチーズ工房では、地域と連携した特色ある商品づくりに取り組んでおり、創意工夫に富んだ活動が展開されています。日本では、生乳の風味を活かした口当たりの良いチーズや、クセの少ないチーズが好まれる傾向があります。そのため、多くの生産者がフレッシュタイプ、ハードタイプ、白カビタイプなど、様々な種類のチーズを製造しており、国内外のナチュラルチーズコンテストで高い評価を受ける工房も登場しています<sup>7)</sup>。しかし、チーズの風味形成に重要な役割を果たす発酵スターターは、現在ほとんどが海外から輸入されたものに依存しており、結果としてチーズの風味が画一的になりがちです。こうした課題を背景に、国産乳酸菌資源を活用した発酵スターターの開発が進められています。

日本にはヨーロッパのような乳利用の伝統文化がないため、長期にわたって継承されてきた乳発酵に適した乳酸菌培養物は存在しません。しかし、各地で野菜や穀類などの植物性発酵食品が作られており、そこには多様な乳酸菌が含まれています。その活用例として、北海道十勝地方の酒粕から分離された乳酸菌「Jチーズスターター *Lactocaseibacillus paracasei* OUT0010株」が挙げられま

す。この菌はチーズの熟成を促進する効果を持ち、すでにこの菌を用いたチーズが市場に登場しています(本号トピックス「ご当地乳酸菌Jチーズスターター」、小林美穂<sup>8)</sup>)。

農研機構では、発酵食品など多様な分離源から単離した約6,000株の乳酸菌を収録した「NARO乳酸菌データベース」(<https://lacticbacteria.nfri.naro.go.jp/>)を運用しています(本号特集I「農研機構の乳酸菌コレクションと多様性 -NARO乳酸菌の発酵代謝物をDB化-」、富田理)。現在、このコレクションから植物性の漬物由来でありながら乳発酵が可能な菌株を選抜し、チーズ用国産発酵スターターの開発が進められています(特許出願中)。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

### 用語解説

- ※1 **優占菌叢** 腸内や食品中で他の微生物よりも優勢に存在し、環境や性質に強く影響を与える微生物群を指す。食品では、製造や熟成の過程で特定の菌が優勢となり、品質や風味の形成に重要な役割を果たす。チーズでは、これらの菌が味や香りに強く影響する。
- ※2 **MRS寒天培地およびGYP寒天培地** 乳酸菌の分離や培養に用いられる培地で、栄養源としてグルコース、ペプトン、酵母エキスをを含む。
- ※3 **基準株** ある細菌種を代表する標準的な株で、その種の分類や同定の基準として用いられる。研究において、信頼性の高い参照株として重要な役割を果たす。
- ※4 **定常期細胞** 微生物の増殖曲線において、細胞分裂と死滅の速度がほぼ釣り合い、全体の細胞数が一定になる段階の細胞を指す。この時期の細胞は、栄養枯渇や代謝産物の蓄積などのストレスに適応しており、代謝活動が変化する。研究や産業利用では、安定した状態の細胞として注目される。

### 参考文献

- 1) Crow, V. L. et al. (1995) The role of autolysis of lactic acid bacteria in the ripening of cheese. *International Dairy Journal*, vol.5, 855-875.
- 2) Settanni, L., and Moschetti, G. (2010) Non-starter lactic acid bacteria used to improve cheese quality and provide health benefits. *Food Microbiology*, vol.27, 691-697.
- 3) Saiki, R. et al. (2018) Effects of the addition of non-starter lactic acid bacteria on free amino acid production during cheese ripening. *Food Science and Technology Research*, vol.24, 299-309.
- 4) Blaya, J. et al. (2018) Symposium review: Interaction of starter cultures and nonstarter lactic acid bacteria in the cheese environment. *Journal of Dairy Science*, vol.101, 3611e3629.
- 5) Asahina, Y. et al. (2018) Complete genome sequence of *Lactobacillus paracasei* EG9, a strain accelerating free amino acid production during cheese ripening. *Genome Announcements*, vol.6, Article 00627-18.
- 6) Asahina, Y. et al. (2020) Expression profiles of milk proteolysis-related genes in *Lactobacillus paracasei* EG9, a non-starter lactic acid bacterial strain, during Gouda-type cheese ripening. *International Dairy Journal*, vol.110, 104812.
- 7) 農林水産省 牛乳乳製品課(2024) 各地で活躍するチーズ工房及び国内で製造されているチーズの種類. <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/gyunyu/lin/attach/pdf/index-93.pdf> (参照 2025-6-23)
- 8) 小林美穂ら(2020) 乳酸菌、チーズの製造方法. 特許第7537668号。



# 農業・食品副産物のアップサイクルに向けた生物変換プロセス開発

池 正和

IKE Masakazu

## はじめに

持続可能な社会の実現に向けて、廃棄物を資源として活用し、循環型利用を進める取り組みが世界的に求められています。特に農業・食品分野では、稲わらや剪定枝などの「農業残渣」、食品加工や消費の過程で発生する「食品残渣」が大量に発生しており、これらの有効活用が課題となっています。2025年8月に農林水産省が公表した統計<sup>1)</sup>によると、農作物非食用部、食品廃棄物等の利用率は、それぞれ約33%、約60%であり、さらなる利用率の向上が求められています。

私たちの研究グループでは、こうした副産物や廃棄物を新たな価値ある製品に転換する「アップサイクル」技術の開発を進めています。これらの資源は年間の発生量が多い一方で、地域ごとに種類や量にばらつきがあり、広範囲に分布していること、高含水率でかさ高く扱いにくいことなど、利用に向けた課題も多く存在します。そのため、私たちは地域単位での実装を重視し、小規模でも効率的なプロセスを開発してきました。図1に私たちが目指している稲わらのアップサイクルの例を示します。原料である稲わらを水酸化カルシウムと混合し、室温で一定期間以上貯

蔵します。この工程により、稲わらの腐敗を防ぎつつ、酵素や微生物の作用を受けやすくします<sup>2)</sup>。この貯蔵物を洗浄・加水・pH調整した後、一般的な糖化工程で用いる「酵素」ではなく、「微生物」を添加して発酵原料となる糖液を生産します。さらに発酵により、エタノールや酵素等の様々な発酵産物を得ることができます。本稿では、この稲わらアップサイクルプロセスのうち、生物機能を活用した2つの要素技術—①微生物を用いて糖液を生産する「微生物糖化」技術、②地域糖液からの酵素組成の調節生産技術—について紹介します。

## 微生物を用いて糖液を生産する「微生物糖化」技術

一般的な糖化工程では、前処理した原料にセルロース分解酵素(セルラーゼなど)を加えて反応させ、原料中のセルロースやヘミセルロースから生じるグルコースやキシロースなどを回収します。このような一般的な糖化工程では、原料の糖化設備とは別に、糖化酵素を生産する専用の設備(あるいは市販酵素の調達)が必要です(図2左)。このような工程は、複数の酵素を混合して効率的な糖化反

応に適した酵素組成を整えるなど、均質な原料を対象にする大規模な糖液製造に適した技術となっています。

これに対して私たちは、小規模での糖液生産を想定し、糖化酵素の生産と糖液の生成を一体化したより簡素

な「微生物糖化工程」を開発しました<sup>3)4)</sup>。この工程では、前処理原料(稲わら)に糖化酵素を生産する微生物を直接接種し、同じ反応槽内で条件を変えながら2段階の反応を行います。まず、微生物が増殖し糖化酵素を生産する条件Aで反応を進め、適切なタイミングで微生物が不活化しつつ酵素が活発化する条件Bに切り替えることで、糖を効率的に蓄積させます(図2右)。

図3は、稲わらの水酸化カルシウム処理物(前処理物)を用い、トリコデルマ属菌を使った微生物糖化工程の実施例を示しています。前処理物を含むスラリー※1にトリコデルマ属菌の前培養液(以下、前培養液)を接種し、28℃で酵素を生産(酵素生産フェーズ)した後、50℃に昇温して糖化反応(糖化反応フェーズ)を行いました(図3左)。120時間の微生物糖化後の糖回収率は、接種する前培養液の量や酵素生産フェーズの長さによって大きく変動しますが、例えば酵素生産フェーズを24時間とした条件では、前培養液を2%添加した際の糖回収率が75%に達するなど、70%前後の糖回収率を示す条件が複数確認されました(図3右)。このように、微生物糖化工程では、接種する前培養液、すなわち酵素生産菌の量や反応条件の切り替えタイミングを適切に制御することで、効率的に糖液を生産することができます。糖化酵素の生産と糖液生成の一体化により、専用設備や市販酵素の調達が不要となり、設備・装置の簡素化が可能となります。また、原料のばらつきに対しても、微生物の選択や反応条件の調整により柔軟に対応することができ、地域ごとの多様な副産物を活用した小規模生産に適していると考えています。一方

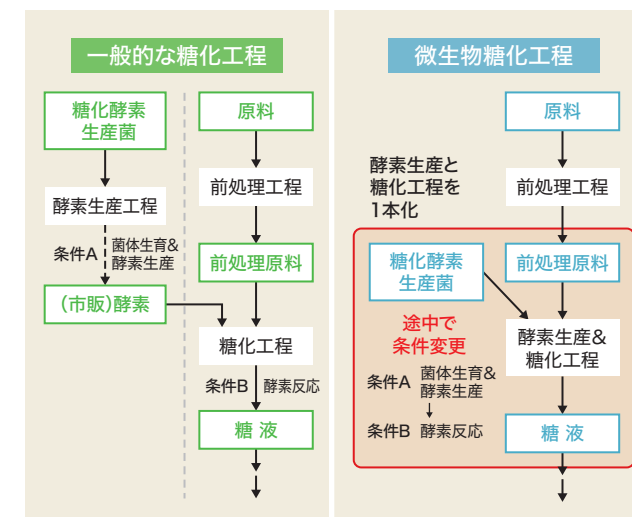


図2 一般的な糖化工程と微生物糖化工程の比較

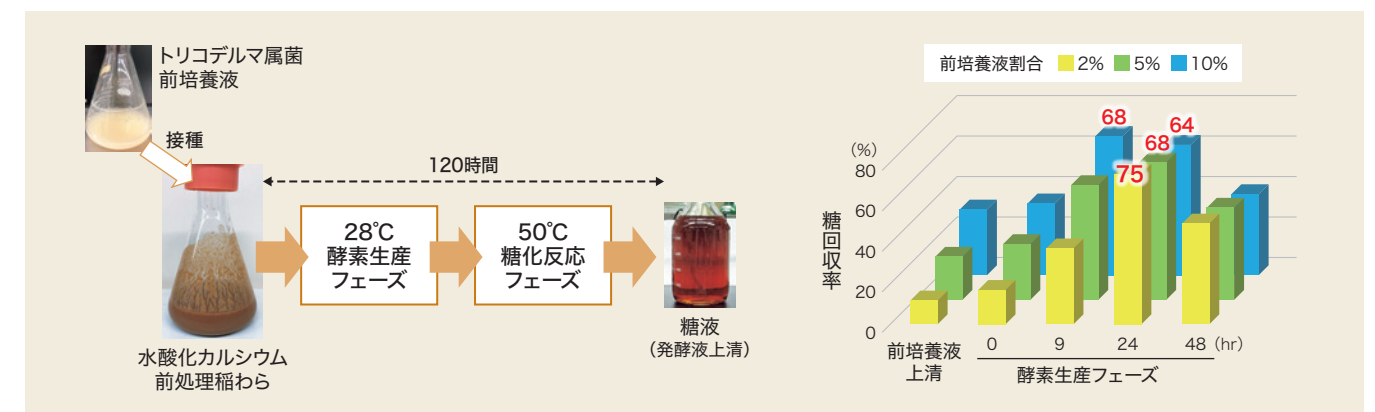


図3 稲わらの微生物糖化による糖生産  
(左)微生物糖化工程の流れ (右)トリコデルマ属菌前培養液割合および酵素生産フェーズの長さが糖回収率に与える影響

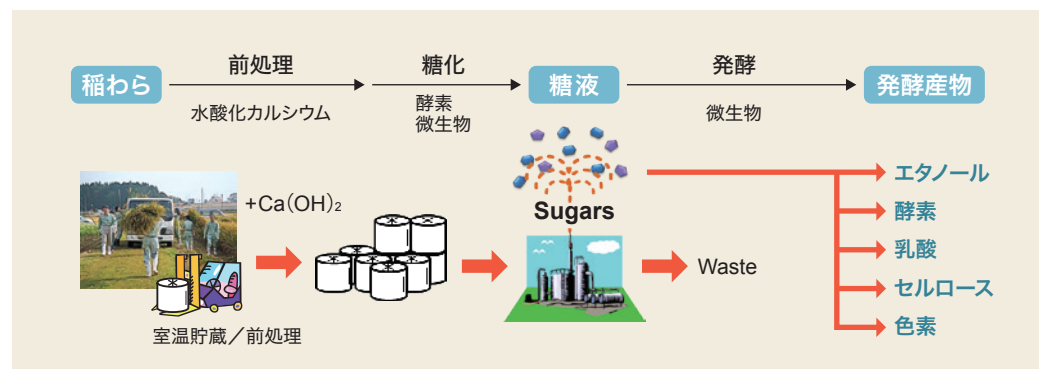


図1 稲わらを活用したアップサイクルによる有価物の生産例



で、原料の組成や接種する菌体の状態などのわずかな違いが最終的な糖収率に大きく影響するため、安定して高い糖収率を得るための技術開発を現在も進めています。

## 地域糖液からの酵素組成の調節生産技術

続いて、微生物糖化などにより生産された糖液を原料とした有価物生産のうち、微生物発酵による酵素生産について紹介します。私たちの研究グループでは、水溶性の糖のみを原料とした「半連続培養※2」による酵素生産システムを構築しました<sup>5)6)</sup>。変異導入等の手法により改良した微生物株を用い、原料糖液の組成や供給方法、発酵液の量などを適切に管理することで、目的に応じた組成を有する酵素群を長期間にわたって効率的に生産するシステムです(図4)。供給する原料には、可溶性の糖源に加え、特定の酵素の生産を促す「誘導物質」や栄養源が含まれており、これらを発酵槽に連続的に供給します。この際、糖や誘導物質の組成、供給のタイミングを精密に制御する

ことで、生産される酵素の種類やバランスを調整することができます。

さらに、供給原料を連続的に添加しながら、一定の間隔で発酵液の一部を回収するという半連続的な運用により、長期間にわたる安定した酵素生産が期待できます。現在は、図5に示すような、原料の供給や発酵液の回収を自動で管理できるシステムを構築し、さらなる効率化に向けた検討を進めています。実際に、本システムを用いた酵素生産の例として、トリコデルマ属菌を用いたセルラーゼ・ヘミセルラーゼ生産を紹介します(図6)。植物細胞壁にはセルロースの他にもヘミセルロースが含まれており、植物種や前処理方法により、その構造や含有量が異なります。このため、効率的な酵素糖化反応のためには、セルラーゼに加え、必要量のヘミセルロース分解酵素(ヘミセルラーゼ)を生産させる必要があります。糖液および誘導物質の組成が異なる3種類(A、B、C)の供給糖液を用いて、1週間の酵素生産発酵を行いました。いずれの条件でも生産されたタンパク質量とセルロース分解酵素(セルラーゼ)の活性はほぼ同等でした。一方で、糖液BやCを使用した場合

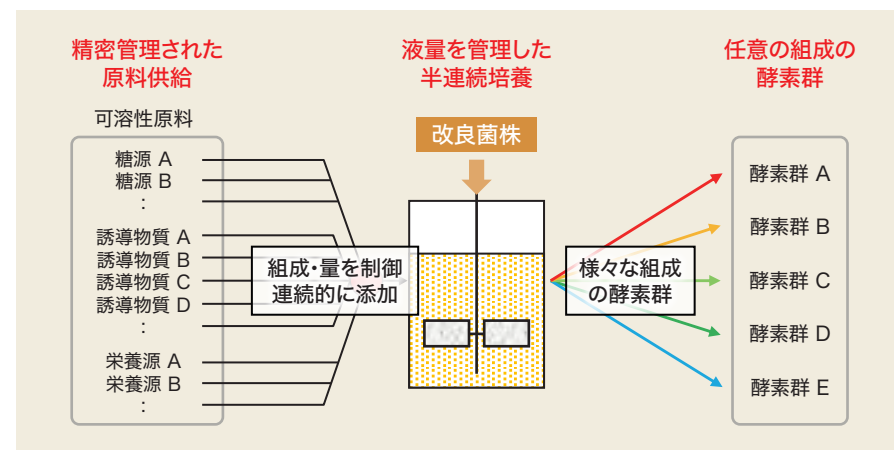


図4 様々な組成の酵素群を効率的に生産するシステム概略図

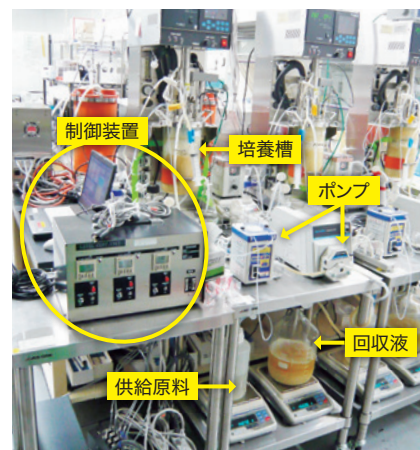


図5 液量管理が可能な微生物培養システム

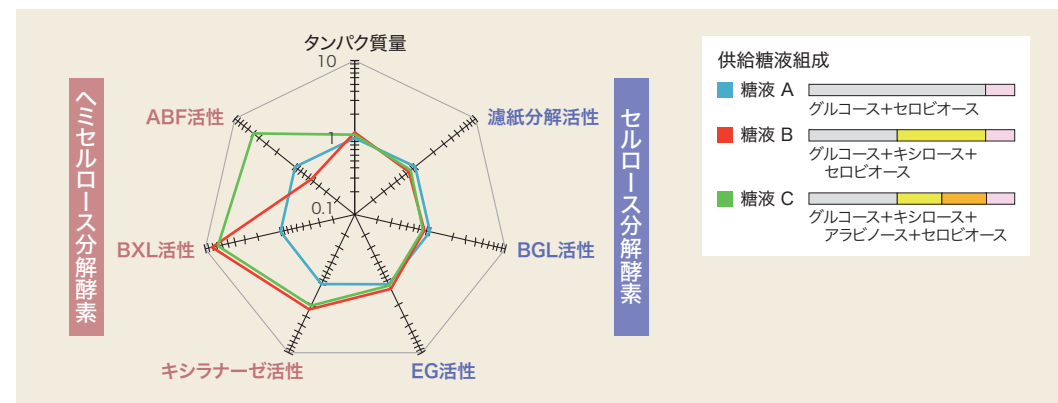


図6 組成を制御した酵素生産例  
各糖を18g/L・培地/日で連続的に供給しつつトリコデルマ株を7日間培養。  
培養上清中のタンパク質量および酵素活性(糖液Aでの値を1とした相対値、対数軸)。  
BGL:  $\beta$ -グルコシダーゼ  
EG: エンドグルカナーゼ  
BXL:  $\beta$ -キシロシダーゼ  
ABF:  $\alpha$ -L-アラビノフラノシダーゼ

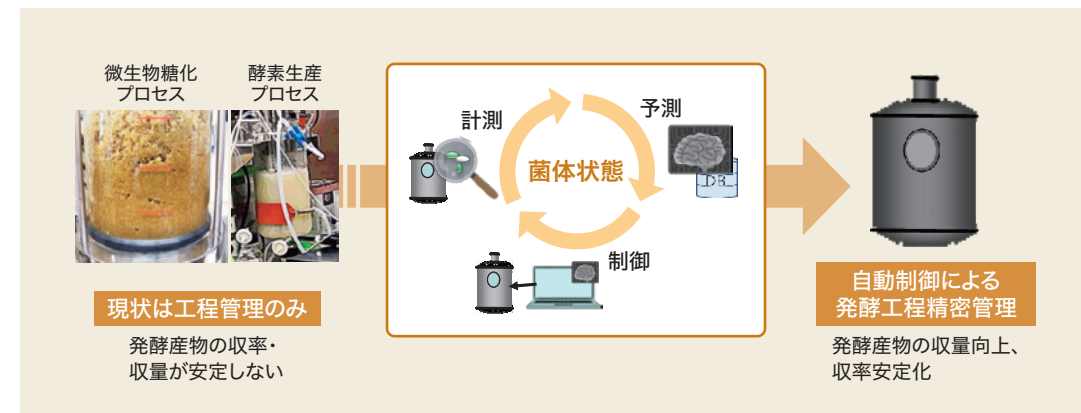


図7 プロセス精密管理に向けた開発

には、糖液Aと比べてヘミセルロース分解酵素(ヘミセルラーゼ)の活性が大幅に高くなることが確認されました。このように糖液や誘導物質の組成を調整することで、セルラーゼの生産性を維持しながら、ヘミセルラーゼの生成量をコントロールすることが可能です。また、糖や誘導物質の各々の供給のタイミングを調整することで、より細かな酵素組成のコントロールが可能であることを確認しています。

供給する糖液としては、セルロースやヘミセルロースの加水分解物(例えば、微生物糖化により得られた糖液)、デンプン由来の副産物、廃糖蜜<sup>7)</sup>など、農業や食品産業から発生する副産物や廃棄物が利用できることを確認しています。このように、本酵素生産システムでは多様な糖源を活用し、目的に応じた様々な酵素群を生産することが可能です。そのため、地域で入手しやすい原料の混合利用や、原料特性に応じた酵素組成の調整など、地域ごとの特性に柔軟に対応できる「フレキシブルな酵素生産」につながると期待されます。

## おわりに

農業・食品産業から多種多様な副産物や廃棄物が発生しており、これらを地域資源として有効活用することが、持続可能な社会の実現に向けた重要な課題となっています。また、人口減少や高齢化が進む中で、地域ごとの資源循環型モデルの構築が求められています。こうした背景を踏まえ、私たちの研究グループでは、地域で入手可能な原料を活かし、柔軟かつ効率的なアップサイクルを可能とする技術開発を進めています。本稿では、微生物糖化技術や酵素組成の調節生産技術について紹介しました。いずれも微生物の力を活用するものであり、さらなる生産

効率の向上や生産プロセスの安定化には、発酵工程を精密に管理していく必要があります。これらの技術の実用化に向けて現在、発酵微生物の状態をリアルタイムで把握し、最適な条件に制御する培養システムの開発を進めています(図7)。スケールアップや自動化、地域との連携を通じて、資源循環と価値創出が両立する社会の実現に貢献していきたいと考えています。

(基盤技術研究本部 農業ロボティクス研究センター  
基盤モジュールユニット 兼 食品研究部門  
食品加工・素材研究領域 バイオ素材開発グループ)

### 用語解説

- ※1 スラリー 液体中に固形分が分散した混合物。どろどろした粘り気のある状態のことが多い。  
※2 半連続培養 発酵槽に原料を継続的に添加しながら、一定の間隔で発酵液の一部を回収して培養する方法。

### 参考文献

- 1) バイオマス種類別の利用率の推移(令和7年7月)  
[https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/230908\\_8-12.pdf](https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/230908_8-12.pdf) (参照 2025-8-18)
- 2) 農研機構プレスリリース(2020-11-12) 糞と畜糞燃焼灰が互いをアップグレードー農畜資源を混ぜ置くだけで利用し易く、資源価値が向上ー。  
[https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/nfri/137379.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nfri/137379.html) (参照 2025-6-23)
- 3) Ike, M. et al. (2025) Construction of the biological saccharification process from lignocellulosic biomass using a filamentous fungus *Trichoderma reesei*. Journal of Applied Glycoscience, vol.72, 7202203.
- 4) 特開2023-178061, 池正和ら, 糖液を製造する方法、およびそれによって得られる糖液。
- 5) Ike, M. et al. (2013) Controlled preparation of cellulases with xylanolytic enzymes from *Trichoderma reesei* (*Hypocrea jecorina*) by continuous-fed cultivation using soluble sugars. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, vol.77, 161-166.
- 6) 池正和(2021) 地域資源の高度利用に向けた「地産酵素」の製造・利用技術の開発。応用糖質科学, vol.11, 42-49.
- 7) Ike, M. et al. (2018) Cellulase production of *Trichoderma reesei* (*Hypocrea jecorina*) by continuously fed cultivation using sucrose as primary carbon source. Journal of Applied Glycoscience, vol.65, 51-56.



# 日本の伝統食品“<sup>こうじ</sup>麹”を応用したタンパク質増産技術の開発

真野 潤一  
MANO Junichi

## はじめに

微生物や植物の細胞は、「窒素同化」と呼ばれる機能を持ち、自然環境中にあるアンモニアや硝酸などの無機窒素化合物からタンパク質を合成することができます。一方、ヒトを含めた動物は、進化の過程で「窒素同化」の能力を失ったため、タンパク質を食物から摂取する必要があります。農耕の発明により、人類はタンパク質を安定的に入手できるようになり、人口を増やし、文明を築いてきました。20世紀に入り、化学合成による窒素肥料が使われ始め、「緑の革命」と呼ばれる穀物の飛躍的な増産が実現し、さらに多くの人口を支えることが可能となりました。また、先進国では、穀物を家畜飼料として利用することで、タンパク質を豊富に含む畜産物が大量に生産可能になり、20世紀後半には健康増進・寿命延伸が達成されました。このようにタンパク質生産のあり方は、人類の発展に大きな影響を及ぼしてきました。

一方、現代では、世界人口の急速な増加や新興国における著しい経済成長によって、畜産物の需要が劇的に増加することが予想されています<sup>1)</sup>(図1左)。畜産飼料を支え

ているのは穀物であり、穀物の需要増加も見込まれます<sup>1)</sup>(図1右)。しかし、穀物は既に広大な土地を利用して生産されており、短期間で大幅に増産することは容易ではありません。このため、タンパク質の供給が世界的に不足する「タンパク質危機(global protein crisis)」の発生が懸念されています。このような背景から、タンパク質供給力の維持・強化に向けて、既存の食料システムと調和した低コストで高効率な新しいタンパク質生産プロセスが求められています。

## <sup>こうじ</sup>麹菌を利用したタンパク質生産

麹は、米などの穀物を *Aspergillus oryzae* などの麹菌で発酵させた、わが国伝統の発酵食品です。麹には、麹菌が分泌した酵素が豊富に含まれており、味噌や醤油、日本酒の醸造に広く用いられてきました。麹菌は、日本酒、味噌、醤油などの日本独自の食文化を支える微生物であることから、公益財団法人日本醸造学会によって国の菌、“国菌”に認定されています<sup>2)</sup>。

一般的な麹づくりの工程では、麹菌は穀物に含まれるタンパク質を分解して細胞内に取り込み、それを栄養源(窒素源)として増殖します。増殖後の麹菌菌体にはタンパク質が30～40%も含まれる<sup>3)</sup>のに対して、穀物のタンパク質含量は5～10%に留まり、麹菌が生育するには窒素源が不足したバランスの悪い栄養源です。一方で、麹菌は自然環境中にある無機窒素源からタンパク質を合成する「窒素同化」の機能をもっています。そこで、米やトウモロコシなどの主要な穀物に、タンパク質の合成に必要な窒素化合物を添加して麹菌の増殖を促進する“窒素同化固体発酵”というタンパク質生産技術の開発を試みました(図2)。

麹菌は、穀物に含まれるデンプンを分解し、生体物質

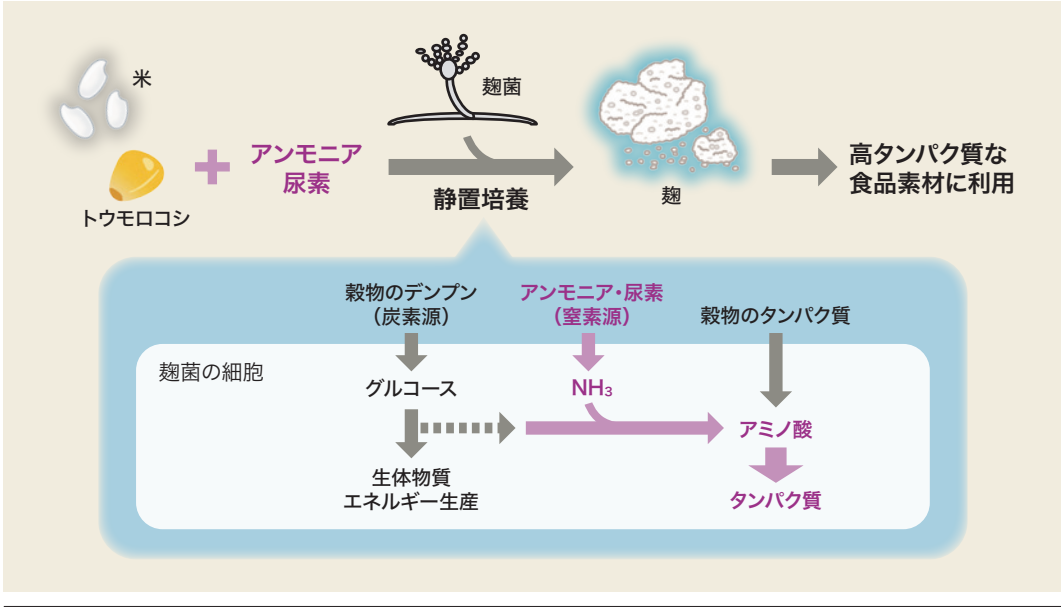


図2 窒素同化固体発酵の概要  
紫色で示した反応がタンパク質の増加に寄与。

の合成やエネルギー生産に利用しています(図2)。窒素同化固体発酵では、アンモニアや尿素などの窒素化合物が麹菌の細胞内に取り込まれ、窒素同化反応によってアミノ酸が合成されます。そのアミノ酸が、麹菌の細胞骨格や酵素などとして働くタンパク質に取り込まれるため、タンパク質総量が増加するのです。

## 窒素同化固体発酵の効果

米およびトウモロコシにアンモニアや尿素などの安価な窒素化合物、その他の無機塩類、麹菌の胞子を混合して30℃で静置培養し、4日後に培養物に含まれるタンパク質の量を評価しました(図3①)。その結果、培養前の米およびトウモロコシに比べ、タンパク質がそれぞれ最大で2.3倍と1.6倍に増加し、麹菌によるタンパク質の生産が確認されました(図3②)。タンパク質含量は、米で12.3%、

トウモロコシで13.2%(乾燥重)となりました<sup>4)</sup>。

生物のもつタンパク質は20種類のアミノ酸から構成されています。このうち、ヒトを含めた動物が体内で合成できないトリプトファン、ロイシン、リジン、バリン、スレオニン、フェニルアラニン、メチオニン、イソロイシンの8種は必須アミノ酸と呼ばれ、食品から摂取する必要があります。食物として摂取したタンパク質が栄養素として体内で利用される量は、必須アミノ酸のうち、最も充足率の低いものに制限されることが知られており、これを制限アミノ酸と呼びます。穀物の場合は、リジンが制限アミノ酸であり、リジンの比率がタンパク質の質を評価する上で極めて重要です。本研究において、麹菌の発酵によってリジンの比率が米で1.4倍、トウモロコシで1.6倍にまで増加することが確認されました<sup>4)</sup>。このように、窒素同化固体発酵がタンパク質の質的な面での改善につながることも明らかとなりました(図3③)。

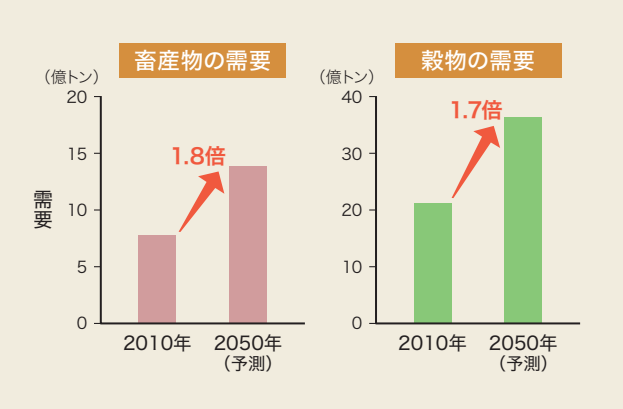


図1 畜産物と穀物の世界全体での年間需要量



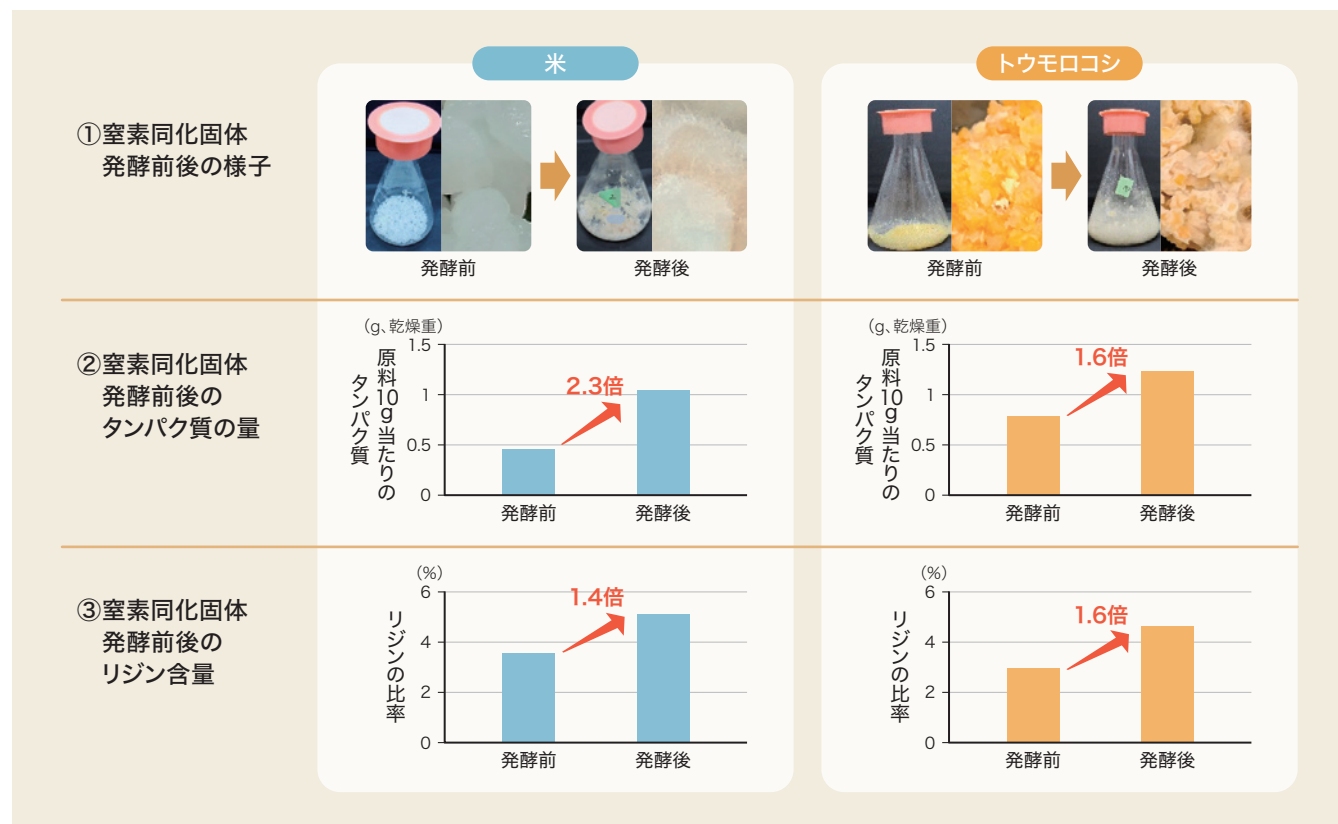


図3 窒素同化固体発酵による米(左)およびトウモロコシ(右)のタンパク質量とリジン含量の増加

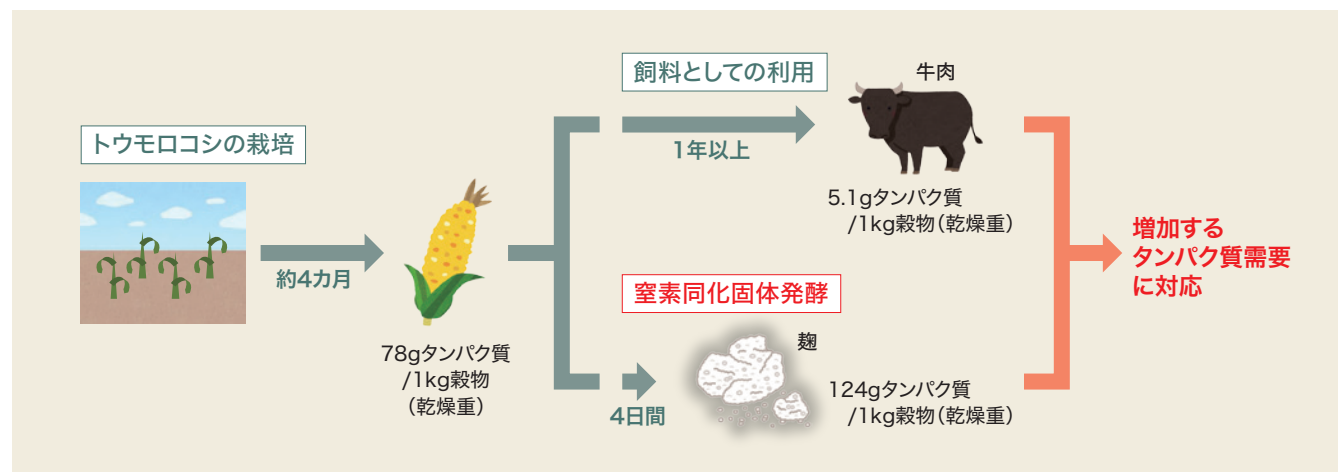


図4 窒素同化固体発酵によるタンパク質供給力増大の可能性

## 社会的なインパクト

穀物は、国内外を問わず家畜の飼料として広く利用されていますが、飼料に含まれるタンパク質の大部分は糞や尿として排出されてしまいます。過去の文献<sup>5)</sup>を基に試算すると、牛肉の場合、1kgのトウモロコシから生成するタンパク質は5.1gです<sup>5)</sup>。一方、今回の研究で得られた結果を基に試算すると、窒素同化固体発酵では、わずか4日間

で1kgのトウモロコシから124gのタンパク質が生成されます(図4)。窒素同化固体発酵で生産した麴が食品として利用可能になれば、高タンパク質な食品素材の選択肢が増えるだけでなく、今後予想される世界的なタンパク質需要の増加への対応に貢献することが期待されます。

わが国では飼料用トウモロコシの生産は少なく、ほとんどが海外からの輸入に依存しています。食肉の自給率は、飼料の自給率も加味して計算されるため、牛肉の自給率

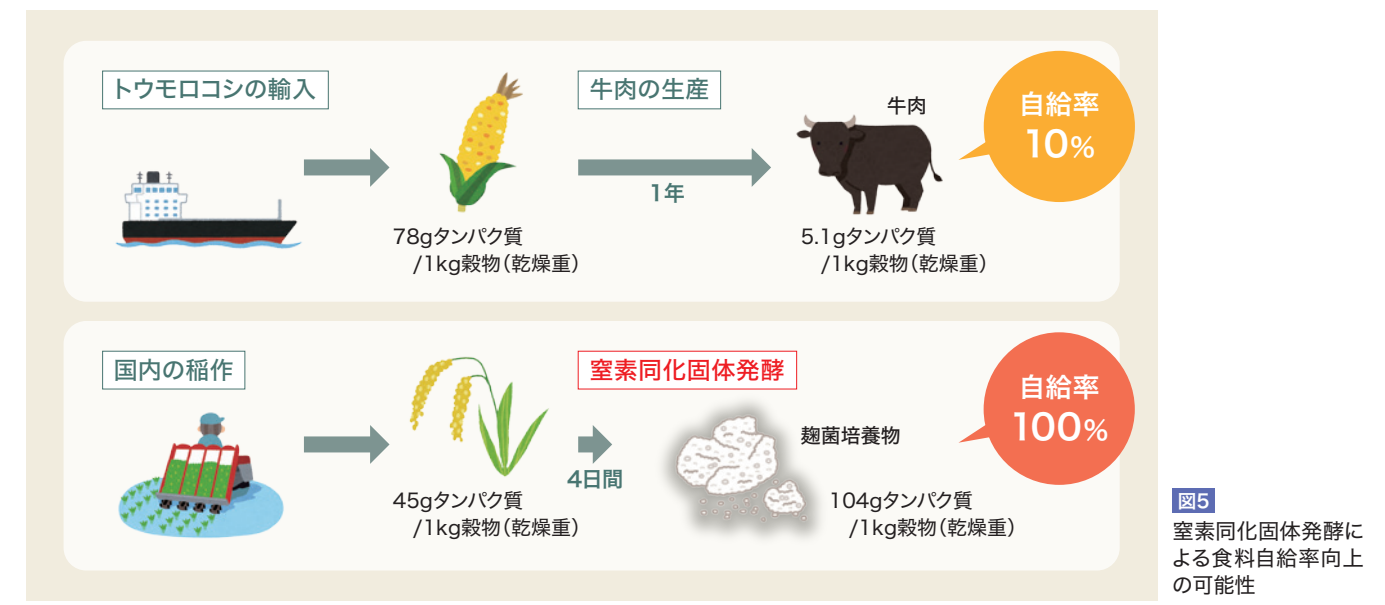


図5 窒素同化固体発酵による食料自給率向上の可能性

は10%と算出されています<sup>6)</sup>。一方、今回の研究で、国内で自給できる米から高タンパク質な麴を生産可能であることが明らかとなりました(図5)。このように、窒素同化固体発酵は食料自給率向上につながる可能性を秘めた革新的な技術といえます。

## おわりに

窒素同化固体発酵により得られる麴は、新たな高タンパク質食材としての活用が期待されます(図6)。一方、牛ばら肉、豚ばら肉のタンパク質含量が18%、28% (いずれも乾燥重) であるのに対し<sup>7)</sup>、今回の研究で得られた麴の現時点におけるタンパク質含量は最大、米で12.3%、トウモロコシで13.2% (いずれも乾燥重) でした。今後、培養条件などの検討により、タンパク質含量の向上が求められます。

輸入を含めた国内の食肉供給量は、年間で牛肉が91万トン、豚肉が185万トン、鳥肉が227万トンです<sup>8)</sup>。一方、米の年間生産量は735万トンであり、過去には最大で年間1,426万トンが生産された実績もあります<sup>9)</sup>。これらの

図6 窒素同化固体発酵で生産した麴の利用例  
発酵後の麴を加熱調理しハンバーグ様食品を作成。

データから、日本の国土には、麴を活用して米からタンパク質を大規模に生産する潜在力があると考えられます。

2024年6月3日に内閣府が公表した「バイオエコノミー戦略」においても、新たなタンパク質源の開発例として麴菌の活用が挙げられています。これまでの研究成果を発展させ、麴をサステナブルな高タンパク質食品素材として実用化できるよう、今後も研究に取り組んでまいります。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

## 参考文献

- 1) 環境省, 基礎データ集, 参考資料10, p.7.  
<https://www.env.go.jp/council/12nature/900432748.pdf> (参照 2025-8-8)
- 2) 日本醸造学会(2006) 麴菌をわが国の「国菌」に認定するー宣言ー.  
<https://www.jozo.or.jp/gakkai/wp-content/uploads/sites/4/2020/02/koujikinnituite2.pdf> (参照 2025-8-8)
- 3) Jin B. et al. (1998) Utilisation of starch processing wastewater for production of microbial biomass protein and fungal  $\alpha$ -amylase by *Aspergillus oryzae*. Bioresource Technology, vol.66, 201-206.
- 4) Mano J. (2025) Fast and easy edible protein production by nitrogen-supplemented koji fermentation. npj Science of Food, 9.150.
- 5) Pimentel D. et al. (1975) Energy and land constraints in food protein production. Science, vol.190, 754-761.
- 6) 農林水産省 大臣官房広報評価課広報室(2023) aff 2023年2月号 特集 日本の「食料」を学ぶ.  
<https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/2302/pdf/aff2302-all.pdf> (参照 2025-10-15)
- 7) 文部科学省 食品成分データベース. <https://fooddb.mext.go.jp/> (参照 2025-8-8)
- 8) 猪口隼人(2023) 食肉の生産と消費について. 基金now, vol.12, 34-35.  
[https://www.jaffic.go.jp/whats\\_kikin/kouhou/kikin\\_now\\_2023\\_02.files/kikin\\_now\\_2023\\_02\\_20.pdf](https://www.jaffic.go.jp/whats_kikin/kouhou/kikin_now_2023_02.files/kikin_now_2023_02_20.pdf) (参照 2025-8-8)
- 9) 農林水産省(2024) 作物統計調査.  
[https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat\\_infid=000040256305](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000040256305) (参照 2025-8-8)



# こうじ 麹菌を活用した国産チーズの開発 ー風味・成分の特徴と輸入チーズとの差別化ー

鈴木 聡

SUZUKI Satoshi

## はじめに

こうじ  
麹菌はわが国の「国菌※1」に認定されている糸状菌(カビ)で、味噌、醤油、清酒などの伝統醸造食品の製造に欠かせない、わが国の食文化を支える重要な微生物です<sup>1)</sup>。麹菌は、文字としての記録が残るだけでも1000年以上<sup>2)</sup>の食経験がある極めて安全性の高い食品微生物であり、かつ、産業用酵素製剤生産等、その高いタンパク質生産能力を活かした物質生産用産業微生物としても非常に有能です。この日本独自の麹菌を用いた食文化を武器に、「伝統的な味噌、醤油、清酒などの醸造食品とそれにまつわる和食文化の輸出促進」と「麹菌を用いた新規食品の提案」でわが国の麹菌関連業界は世界に打って出ようとしています。麹菌のバイオテクノロジーを応用したフードテックでは、代替肉などのタンパク質素材としても世界中から注目を集めています。このような、非伝統的な麹菌の用途開発のひとつとして、農研機構は麹菌を活用した和のテイストを持つ国産チーズの開発を進めています。

## 国産チーズ開発の背景

近年食生活の多様化等を背景に、チーズ、中でもナチュラルチーズの消費量が増加しており、農林水産省畜産局牛乳乳製品課「令和5年度チーズの需給表」によれば国産ナチュラルチーズ生産量もわずかながら増加傾向にあります<sup>3)</sup>(図1)。農林水産省による消費者意識調査では、国産チーズの購入理由として、「安心感」「おいしさ」が上位を占めています<sup>4)</sup>。しかし、国産ナチュラルチーズを取り巻く状況には以下のような課題が指

摘されています<sup>5)6)</sup>。すなわち、2018年末と2019年初めに相次いでTPP11、日EU・EPAが発効し、ヨーロッパ、オセアニアからの輸入ナチュラルチーズの関税が段階的に軽減、あるいは撤廃される方向となっています。今後、安価な外国産ナチュラルチーズの輸入量が増大する懸念も指摘されており、国産ナチュラルチーズを取り巻く状況は厳しさを増しています<sup>7)</sup>。そのような状況下、国産ナチュラルチーズのさらなる競争力強化を図るためには、製品に独自の特徴を持たせ、差別化を図ることが鍵となります。そもそも、チーズは中近東で生まれ、トルコ、ギリシャを経て、イタリアで大きく発展し、ヨーロッパに広がった…もの<sup>8)</sup>であり、わが国で製造されるナチュラルチーズの製造方法のほとんどがヨーロッパに学んだものです。また、原材料となる生乳こそ国産とはいえ、風味の決め手となる発酵に用いる微生物の種菌はほぼすべてがヨーロッパからの輸入品です。そのため、国産ナチュラルチーズの独自性を打ち出すことはなかなか困難です。そのような課題を解決するため、農研機構では、乳酸菌スターターやチーズ用糸状菌等のわが国由来の独自のチーズ用微生物の開発を進めています。そのうち、本稿では筆者が関わったチーズ用糸状菌の開発に焦点をあてて解説いたします。

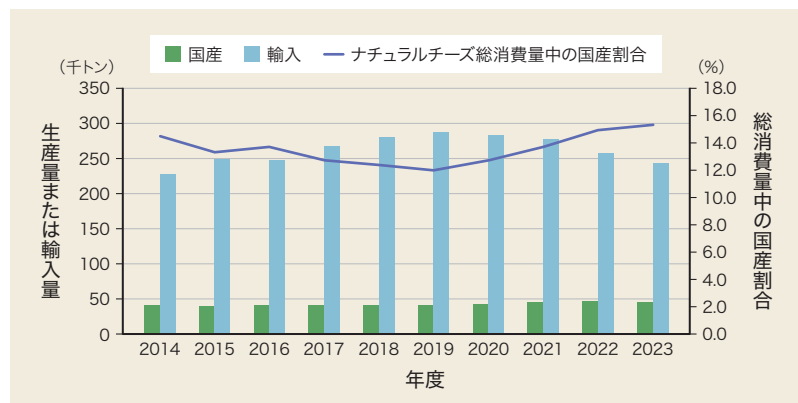


図1 国産ナチュラルチーズ生産量と輸入量の変化  
農林水産省畜産局牛乳乳製品課令和5年度チーズの需給表より抜粋構成。

## チーズに使われる糸状菌

ブルーチーズ(青カビチーズ)、カマンベールチーズ(白カビチーズ)等のヨーロッパのカビ付けチーズ熟成に用いられるカビは色の差異はあるものの、分類学上はどちらもアオカビ(*Penicillium*)属に属する糸状菌です。一方、麹菌は*Penicillium*属と系統的に比較的近縁のアスペルギルス(*Aspergillus*)属に属する糸状菌です。青カビチーズと白カビチーズは、アオカビの持つ酵素の働きによりチーズの熟成が進みます。味噌、醤油、清酒は、麹菌の持つ酵素の働きで熟成が進みます。そこで私たちはチーズ熟成を麹菌で代替する技術を開発することにしました。これにより、わが国の気候風土に適したチーズ熟成用の糸状菌の国産化が実現します。

## チーズ熟成における糸状菌の作用

カビ付けチーズの熟成においては、糸状菌が産生するタンパク質分解酵素により、乳タンパク質が分解され、アミノ酸が遊離してきます<sup>9)</sup>。さらにアミノ酸が糸状菌により代謝されると、有機酸やアンモニアが生成します。アミノ酸のうち、グルタミン酸※2やアスパラギン酸にはうま味があり、グリシンやアラニンには甘味があります。一方、分岐鎖アミノ酸には苦味があります。どのようなアミノ酸がどのような割合で遊離してくるかについては、それぞれの菌株により変わってきます<sup>10)</sup>。また、乳タンパク質が分解されることにより、チーズの物性にも変化が生じます。糸状菌が産生する脂肪分解酵素により乳脂肪が分解されると、脂肪酸が遊離してきます。乳脂肪には、中・短鎖の脂肪酸が比較的多く含まれており、これらの脂肪酸が遊離してくると、独特の臭いが生じます。この中・短鎖脂肪酸の臭いは、適

量であればチーズらしい風味となりますが、多すぎる場合は悪臭となり、どちらになるかは糸状菌のそれぞれの菌株の産生する脂肪分解酵素活性の強さや種類に依存します<sup>11)</sup>。加えて、遊離の脂肪酸量が多くなるとチーズにピリピリとした刺激味加わり、その程度が適度であればブルーチーズ様の好ましい風味となりますが、過剰となれば嗜好性が低下します(図2)。

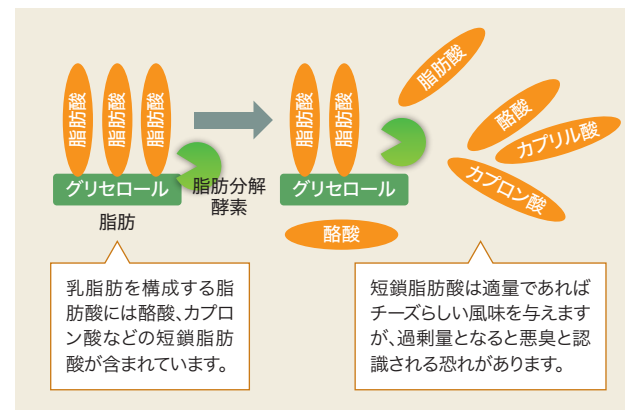


図2 乳脂肪からの短鎖脂肪酸の遊離

## 私たちの目指す麹菌熟成チーズ

開発する麹菌熟成チーズの方向性は、ナチュラルチーズの中でも家庭向け商品の国産比率が高いカマンベールチーズのような表面から熟成の進むソフトタイプチーズで、日本の消費者に広く受け入れられやすい風味の穏やかなチーズとしました。

種麹製造業者のストック菌株(すべて食経験あり)から乳タンパク質が分解されやすく、熟成が速いなどの特徴を有する麹菌を12株選び、チーズ上での増殖具合、外観、酵素活性、官能評価によって5菌株を絞り込みました。5株の麹菌株と、対照実験のヨーロッパの市販チーズ



## 麹菌を活用した国産チーズの開発

用青カビ種菌2株を用いてモデルチーズを熟成させ、酵素タンパク質を抽出して酵素活性を測定しました。その結果、麹菌「KC43」株(KCはKoji Cheeseの頭文字の略)を選定しました。KC43株は、ヨーロッパの市販チーズ用青カビ種菌に比べて、タンパク質分解酵素の力が強く、脂肪分解酵素の力が弱いという特徴が見出されました(図3)<sup>12)</sup>。このような酵素活性の特徴から、本麹菌株を用いて熟成されたチーズでは、うま味アミノ酸が多く含まれ、かつ、乳脂肪の分解が抑えられて風味の穏やかな製品となることが期待されました。

## 麹菌熟成チーズの成分の特徴

私たちが選抜したチーズ熟成用麹菌株を用いて、表面熟成タイプのソフトチーズを7日間熟成させ、核磁気共鳴(NMR)法により水溶性成分を、固相マイクロ抽出(SPME)ーガスクロマトグラフィー質量分析法(GC/MS)により揮発性成分の網羅的解析を行いました<sup>13)</sup>。比較対象は、カマンベールチーズ、ブリーチーズ、ブルーチーズなどの輸入および国産の市販のカビ熟成チーズ商品21品目としました。水溶性成分の主成分分析では、麹菌熟成

チーズは、市販カビ熟成チーズとは違うグループを形成しました(図4左)。揮発性成分の主成分分析では、麹菌熟成チーズは総合的にはカマンベールチーズに近い独自のグループにまとまりました(図4右)。さらに7日間から30日間まで熟成させたチーズの経時的な成分分析を行いました。ここでは、うま味アミノ酸として最も重要なグルタミン酸に着目し、経時的な蓄積量を定量しました。麹菌を用いたチーズでは、グルタミン酸の蓄積が早く、15日時点で市販白カビ種菌の約2.8倍に達しました。次に不快臭をもつ中・短鎖脂肪酸を代表して酪酸、およびカプリル酸<sup>※3)</sup>の経時的な蓄積量を定量しました。麹菌を用いたチーズでは、終始市販白カビ種菌よりこれら中・短鎖脂肪酸の蓄積量が低く抑えられていました(図5)。このように麹菌熟成チーズは輸入された市販カビ熟成チーズ(カマンベール等)に比べて、うま味が強く、脂肪の代謝物による風味が穏やかということが成分分析の結果から示唆されます。

## おわりに

本稿で紹介した麹菌熟成チーズは、2018年開始の生研センター経営体プロ、2021年より現在も継続するJRA

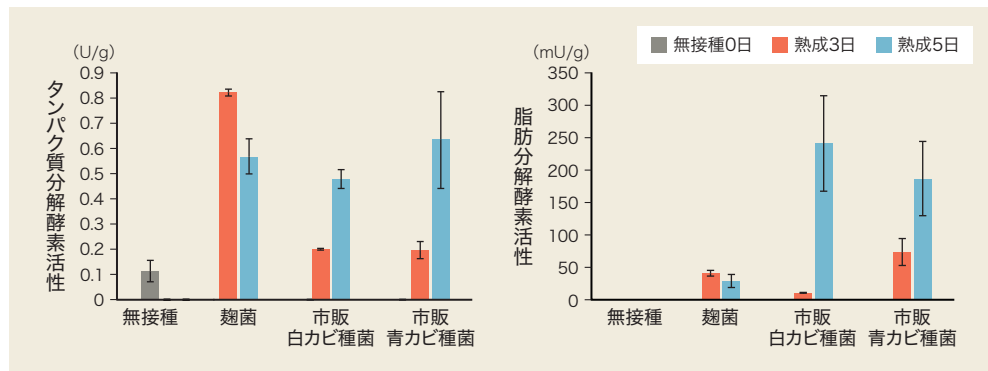


図3 麹菌と市販白カビ種菌、青カビ種菌とのタンパク質分解酵素活性および脂肪分解酵素活性の比較  
無接種0日目の灰色バーは、カビ付けを行う前のグリーンチーズ(熟成前の若いチーズ)におけるカビ以外の要因由来の酵素活性。タンパク質分解酵素活性はアソカゼインを基質として、1分間に440nm吸光度を1増加する酵素量を1酵素単位として測定。脂肪分解酵素活性は/パラニトロフェニル酪酸を基質として1分間に1μmolのパラニトロフェノールを遊離する酵素量を1酵素単位として測定。

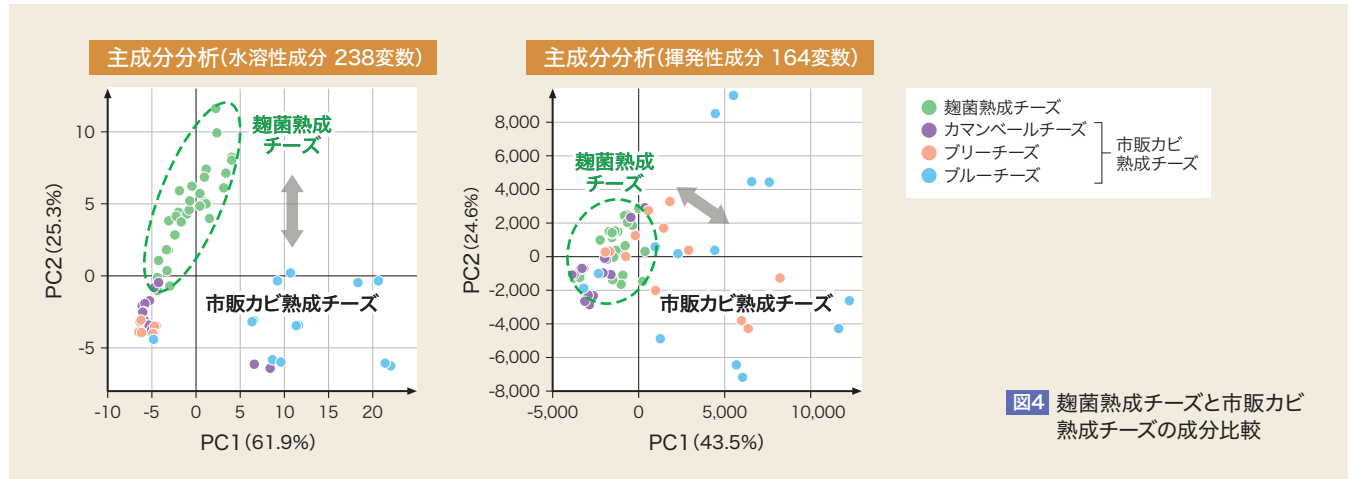


図4 麹菌熟成チーズと市販カビ熟成チーズの成分比較

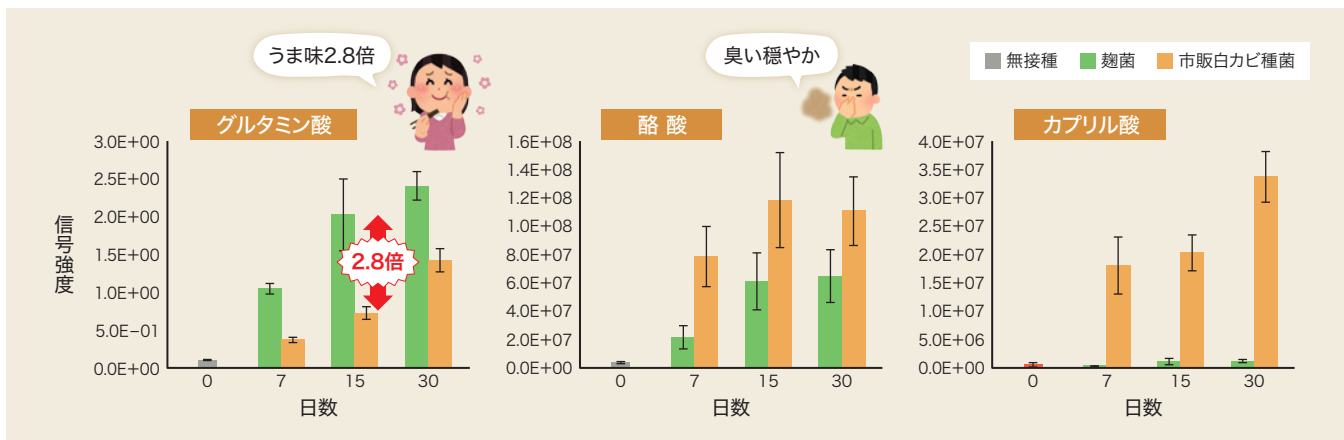


図5 0日から30日熟成時の麹菌と市販白カビ種菌による熟成チーズの成分比較  
500MHzNMRを用いて得られたNMR信号をマレイン酸を内部標準として標準化した。

畜産振興事業において農研機構内外の麹菌研究の専門家とチーズ研究の専門家からなるコンソーシアムの協働により、当初のねらい通り、欧米のカビ付けチーズとの差別化に成功し、うま味に富み、風味穏やかな和のテイストを持つ新たなジャンルのチーズとして商品開発・販売まで到達することができました。商品をご購入いただいた皆様からは、「和のテイストがして、日本酒が飲みたくなる」等の好評を得ています。現在、共同研究を行うチーズ専門の大学教授のご尽力により、全国のチーズ工房への技術普及に努めており、コンソーシアムの開発した技術を用いて麹菌熟成チーズの製造販売を行うチーズ工房が少しずつ増えています。既に商品化された麹菌熟成チーズでは、酒粕も配合されており、今後それぞれの地域のチーズ工房と酒蔵が連携することで日本酒とセットで地域色を打ち出すことも可能です。農研機構食品研究部門の麹菌研究は、その前身である食糧庁食糧研究所時代の1953年に当時の国税庁醸造試験場より、味噌・しょう油醸造部門が移管された時に始まります。以来70年にわたり、(一社)中央味噌研究所、各県公設試などとも連携して味噌を中心に広く醸造産業の技術的 downstairs の責務を果たしてまいりました。また近年は、SIAL Paris<sup>※4)</sup>で講演するなど海外との連携も模索しています。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

## 用語解説

※1 国菌 日本醸造学会が認定した「われわれの先達が古来から大切に育み、使ってきた貴重な財産」であるとした糸状菌。麹菌は、黄麹菌(*Aspergillus oryzae*)、醤油麹菌(*Aspergillus sojae*)、黒麹菌(*Aspergillus luchuensis*)、白麹菌(*Aspergillus kawachii*)の4種類が認定されている。麹菌の種は何の発酵食品を作るかによって使い分けられる。

※2 グルタミン酸 グルタミン酸は昆布のうま味の代表的な成分であり、グルタミン酸ナトリウム(γ-アミノ酪酸)の原料でもある。  
※3 カプリル酸 乳脂肪の構成脂肪酸は他の動植物由来脂肪に比べて中・短鎖脂肪酸の構成割合が多くなっている。例として中・短鎖脂肪酸のひとつである酪酸は、悪臭防止法上、特定悪臭物質として指定されており、極微量でも悪臭として認識される。  
※4 SIAL Paris 欧州最大級の総合食品見本市である「SIAL Paris(シアル・パリ)」は、パリで2年に1度開催される食品見本市。世界中から食品ブランド、バイヤー、そして関連媒体の記者が参加。

## 参考文献

- 1)日本醸造学会(2006) 麹菌をわが国の「国菌」に認定するー宣言ー。  
<https://www.jozo.or.jp/gakkai/wp-content/uploads/sites/4/2020/02/koujikinnituite2.pdf> (参照 2025-5-19)
- 2)播磨国風土記(713~715頃)
- 3)農林水産省畜産局牛乳乳製品課「令和5年度チーズの需給表」。  
[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/cheese\\_zyukyu/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/cheese_zyukyu/index.html) (参照 2025-7-16)
- 4)農林水産省大臣官房統計部(2024-5-10) 令和5年度 食料・農林水産業・農山漁村に関する意識・意向調査。国産チーズの消費拡大に関する意識・意向調査結果。  
<https://www.maff.go.jp/j/finding/mind/attach/pdf/index-81.pdf> (参照 2025-5-19)
- 5)生物系特定産業技術研究支援センター(2018年度-2020年度) 独自発酵技術による日本オリジナル・ナチュラルチーズの開発。  
[https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/keiei/research/files/keiei\\_subject5\\_305\\_2020.pdf](https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/keiei/research/files/keiei_subject5_305_2020.pdf) (参照 2025-7-16)
- 6)日本中央競馬会 畜産振興事業(2021年度-2023年度) 令和3年度畜産振興事業について。  
[https://jra.jp/company/social/livestock/about/pdf/chi\\_r03.pdf](https://jra.jp/company/social/livestock/about/pdf/chi_r03.pdf) (参照 2025-7-16)
- 7)鈴木聡(2025) 麹菌熟成チーズ用麹菌株の開発、発酵・醸造の新展開〜育種、プロセスDXから精密発酵、アップサイクルまで〜(金内誠監修)。株式会社エヌ・ティー・エス、東京、pp.597-605。
- 8)田中穂積(2004) チーズ。香料、No.222, 65-85。
- 9)Sousa, M. J. et al. (2001) Advances in the study of proteolysis duringcheese ripening. International Dairy Journal, vol.11, 327-345。
- 10)高橋仁ら(2008) 製麹における麹菌のタンパク質分解酵素生産に対する麹米と麹菌株の影響。醸造協会誌, vol.103(11), 894-900。
- 11)Chintagavongse, N. et al. (2022) A study of lipolysis induced by adjuncts from edible *Aspergillus* sp. solid culture products on ripened semi-hard cheese. Journal of the Science of Food and Agriculture, vol.102, 4355-4362。
- 12)Suzuki, S. et al. (2021) Lipase and protease activities in Koji cheeses surface-ripened with *Aspergillus* strains. Food Science and Technology Research, vol.27(3), 543。
- 13)Tomita, S. et al. (2022) Volatile and soluble metabolite profiles in surface-ripened cheeses with *Aspergillus oryzae* and *Aspergillus sojae*. Food Research International, vol.158, 111535。



# 発酵微生物の代謝とその機能

萩 達朗  
HAGI Tatsuro

## はじめに

発酵食品には様々な成分が含まれます。麹菌や乳酸菌などの発酵微生物そのものや、これらの活動によって生成される有機酸やアミノ酸、ペプチドなどの様々な代謝産物が含まれ、風味や保存性をはじめ、健康機能にも大きく関与しています。特に乳酸菌については、100年以上前に「ヨーグルトによる寿命延伸説」<sup>※1</sup>が提唱されて以降、腸内環境改善効果などヒトの健康への作用が長年研究されています。ヒトを含む哺乳動物の乳は、新生児の成長に必要な栄養素を豊富に含み、優れた食資源でもあります。そのため、乳の栄養価を保ちながら長期保存を可能にしたのがヨーグルト（発酵乳）やチーズなどの乳製品です。これらの歴史は古く、乳加工の起源は紀元前6000年頃にさかのぼるとされており、乳製品と人類は長い歴史の中で共に進化してきました。さらに興味深いことに、乳に含まれ

るタンパク質<sup>※2</sup>は、消化や発酵の過程で分解され、生理活性ペプチドと呼ばれる短いアミノ酸鎖になり、これらは血圧降下作用や免疫調節作用など健康増進効果を発揮することが報告されています<sup>1)</sup>。

近年、腸内細菌叢の研究が急速に進展し、私たちの健康に深く関与する有用な腸内細菌が明らかになりつつあります<sup>2)</sup>。そのため、乳製品を含む発酵食品や、そこに含まれる乳酸菌およびその代謝産物が腸内細菌に与える影響について研究が進められています。農研機構では、乳製品などの発酵食品から特徴的な機能性成分を探索し、それらの生産を促進する方法の開発に取り組むとともに、特定の有用腸内細菌の増殖に影響を与える乳酸菌や発酵食品の探索も行っています。本稿では、乳製品に含まれるユニークな機能性成分と、有用腸内細菌の増殖を促進する乳酸菌について紹介します。

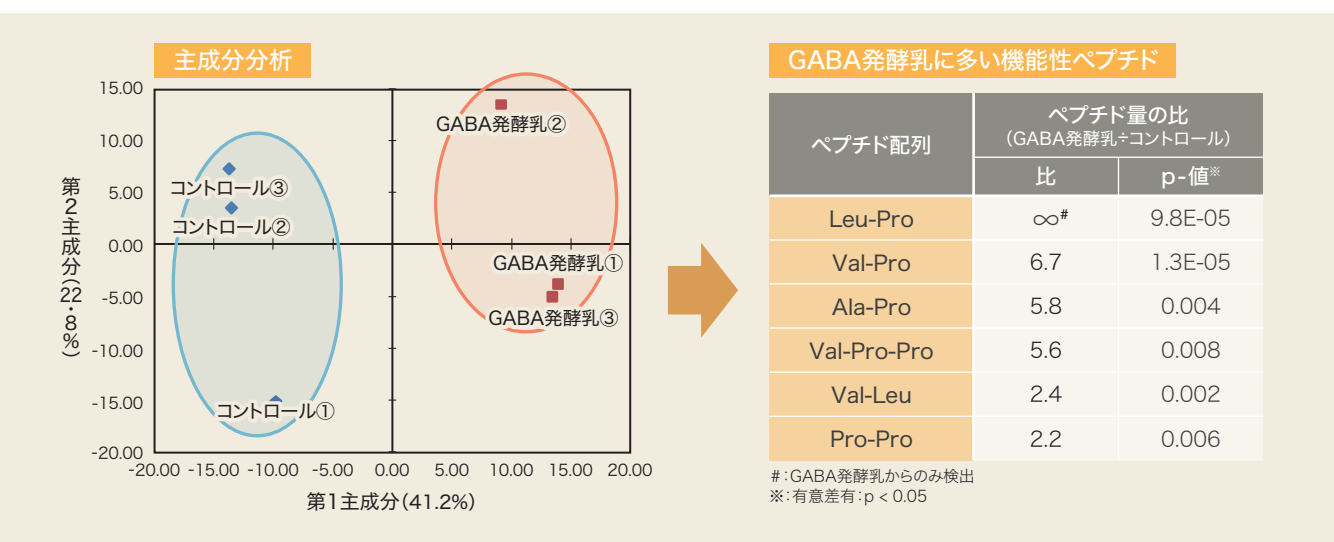


図1 GABA生産菌を加えた時の発酵乳中のメタボローム解析:主成分分析と機能性ペプチドの選抜  
コントロール(青枠)と比較し、GABA生産菌を加えたGABA発酵乳(赤枠)で成分が大きく変化する。ペプチドは血圧降下作用を有するペプチド。ロイシン(Leu)、プロリン(Pro)、バリン(Val)、アラニン(Ala)から構成。



## 乳製品に含まれる機能性代謝産物

農研機構では、血圧降下作用を有するγ-アミノ酪酸(GABA)を高生産する乳酸菌01-7株を保有しています。本菌は単独では牛乳中での生育が遅いものの、他の乳酸菌と共培養することで発酵能が向上し、GABAを高生産できるというユニークな特徴があります。このような共培養による発酵能の改善は、単独では活性化されない代謝経路が他菌の存在によって誘導されている可能性を示唆しており、GABA以外にも新たな機能性成分が生産されている可能性もあります。そこで、GABA生産菌01-7株を添加して製造した発酵乳(GABA発酵乳)と非添加発酵乳(コントロール)についてCE-TOFMS (Human Metabolome Technologies社)を用いてメタボローム解析<sup>※3</sup>を実施し、GABA以外の有用代謝産物を探索しました。検出された代謝産物を主成分分析で比較したところ、

2つの発酵乳間でその成分は大きく異なることが示されました(図1左)<sup>3)</sup>。変化した成分のうち、GABA発酵乳では血圧降下作用を有するペプチドが増えていることがわかりました(図1右)。一方、01-7株を添加したチーズ(GABAチーズ)と非添加チーズ(コントロール)のメタボローム解析をLC-MSを用いて行い代謝産物を主成分分析で比較したところ、発酵乳と同様に成分が大きく異なることが示されました(図2左)<sup>4)</sup>。また、変化した成分のうち、GABAチーズに特徴的なペプチドに注目し、LC-MSで得られた化学式と牛乳タンパク質配列を照合した結果、Tyr-Leu-Gly-Tyrのような機能性ペプチド候補を同定しました。当該ペプチドは発酵乳では検出されず、チーズ製造で生み出されるペプチドであることがわかりました。

さらに私たちは、新規乳製品開発を目的とし、麹チーズの開発も行っています。麹菌をチーズ製造に用いることはほとんどなく、麹菌と乳酸菌の分解でどのような代謝産物

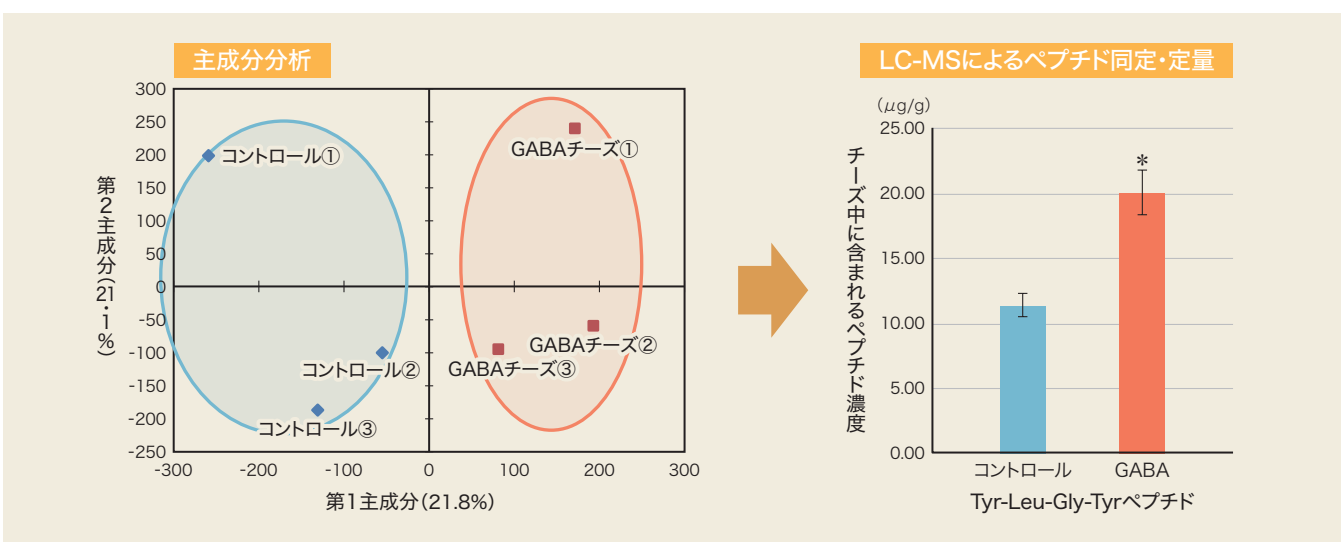


図2 GABA生産菌を加えた時のチーズ中のメタボローム解析:主成分分析とペプチドの同定  
コントロール(青枠)と比較し、GABA生産菌を加えたGABAチーズ(赤枠)で成分が大きく変化する。Tyr-Leu-Gly-Tyr:チロシン(Tyr)、ロイシン(Leu)、グリシン(Gly)、チロシン(Tyr)から構成されるペプチド。抗酸化作用の他、YLを含むペプチドは抗不安作用を有することが期待。\*:有意差有:p<0.05



表1 麴チーズ中に含まれるγ-グルタミルペプチドと酒粕添加によるペプチド量の増加

グルタミン酸(Glu)、イソロイシン(Ile)、ロイシン(Leu)、アラニン(Ala)、グリシン(Gly)、スレオニン(Thr)、バリン(Val)、セリン(Ser)、His(ヒスチジン)、メチオニン(Met)。

| γ-グルタミルペプチド種          | ペプチド量の比<br>(麴チーズ(酒粕添加)÷麴チーズ) |         |
|-----------------------|------------------------------|---------|
|                       | 比                            | p値      |
| γ-Glu-Phe             | 2.2                          | 6.7E-04 |
| γ-Glu-Ile (γ-Glu-Leu) | 2.2                          | 0.003   |
| γ-Glu-Ala             | 2.0                          | 0.004   |
| γ-Glu-Gly             | 2.0                          | 0.013   |
| γ-Glu-Thr             | 1.9                          | 0.002   |
| γ-Glu-Val             | 1.9                          | 0.003   |
| γ-Glu-Glu             | 1.7                          | 0.009   |
| γ-Glu-Citrulline      | 1.7                          | 0.021   |
| γ-Glu-Ser             | 1.6                          | 0.007   |
| γ-Glu-His             | 1.6                          | 0.007   |
| γ-Glu-Met             | 1.6                          | 0.014   |

が生じるか不明でした。そこで、麴チーズ成分をメタボローム解析した結果、うま味を増強するペプチドとして知られるγ-グルタミルペプチド※4が多数種検出されました。また、乳酸菌の生育を促進する酒粕を添加することで、ほとんどすべてのγ-グルタミルペプチドが増加することがわかりました<sup>5)</sup>。酒粕に含まれる栄養成分が、乳酸菌と麴菌の代謝を活性化し熟成が進んだと予想されます。このような機能性ペプチドを増強する発酵技術開発を行うことで、美味しく体に良い発酵食品開発が期待されます。

発酵微生物と腸内細菌

腸内細菌は、他の腸内細菌との競争に勝つために効率的に栄養を取り込んだり、腸内環境に適応しながら生き延びるため、抗菌作用を持つ胆汁酸※5などの消化管内のストレスに対処したりする能力を備えています。こうした機能は、腸内細菌が腸内で安定して定着するために重要な役割を果たしています。私たちは、肥満や2型糖尿病の改善効果が期待される腸内細菌*Akkermansia muciniphila*<sup>2)</sup>に着目し、その腸内環境適応機構の解明や、本菌の増殖を促す乳酸菌や発酵食品の開発に取り組んでいます。本菌は、ムチン(高分子糖タンパク質。消化管・気道の粘膜上皮などで産生される粘質の主成分)を炭素源・窒素源とするユニークな栄養代謝を持っていることは知られていましたが、他の腸内適応機構は不明でした。そこで私たちはまず、*A. muciniphila*の腸内適応機構のひとつである胆汁酸耐性に着目し、オミクス解析※6を用いてその解明に取り組んでいます。これまでの研究で、*A. muciniphila*が胆汁酸に対して持つ新しい耐性機構を明らかにしました(図3)<sup>6)</sup>。具体的には、胆汁酸を細胞内外に輸送するポンプの役割を果たすトランスポーター、そして細胞膜を安定化する脂質(ホパノイド)の合成に関わる遺伝子の発現量が胆汁酸で増加することを確認しました。これらのトランスポーターやホパノイド合成を阻害する薬剤を用いると、*A. muciniphila*の胆汁酸耐性が低下することから、これらのシステムが胆汁酸から細胞を保護する役割を果たしていると考えられます。また、胆汁酸の一種であるグリコデオキシコール酸(GDCA)が本菌に強い抗菌作用を示す一方で、GDCAが

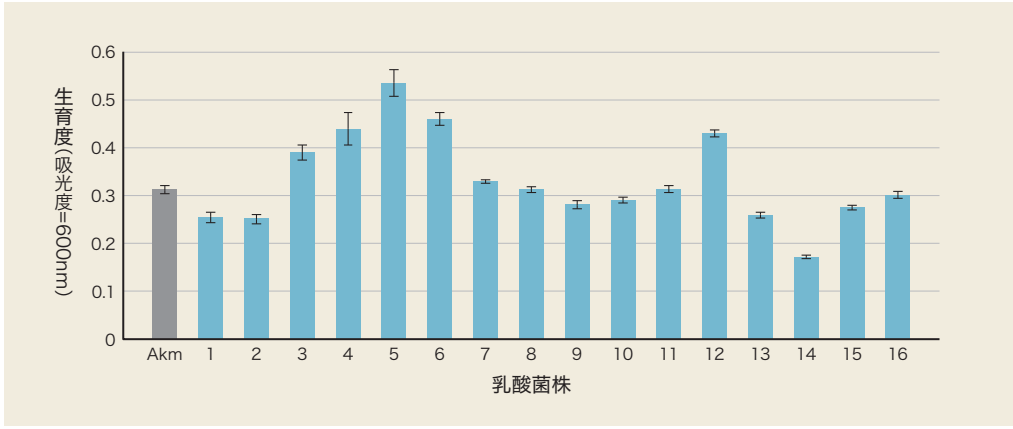


図4 胆汁酸添加培地で*A. muciniphila*と各乳酸菌株を共培養した時の濁度  
両株が混合状態の濁度を測定(使用した培地では乳酸菌の増殖が弱いため「濁度」≒*A. muciniphila*の生育」と判断)。  
Akm:*A. muciniphila*のみを培養。

らグリシンが脱抱合されたデオキシコール酸(DCA)は、本菌の増殖を促進することも明らかにしました<sup>6)</sup>。そこで、この知見に基づき、胆汁酸から*A. muciniphila*を保護する“盾”となり得る乳酸菌としてGDCAをDCAに変換し、*A. muciniphila*の増殖を促進する乳酸菌を選抜しました。その結果、*Lactiplantibacillus plantarum*に属するNo.5株が*A. muciniphila*の増殖を改善することを見出しました(図4)。同じ*Lb. plantarum*で胆汁酸変換能を持つ別の菌株では、*A. muciniphila*の効果が異なることもわかり、株によって効果が異なることが示唆されました<sup>7)</sup>。胆汁酸代謝能以外にも、乳酸菌の持つ別の要因が*A. muciniphila*の生育に影響していることも予想されます。

おわりに

本研究では、乳製品に「うま味増強」や「血圧降下作用」などの効果を有する、様々な機能性ペプチド成分が含まれていることを明らかにしました。さらに、これらの機能性成分は、使用する乳酸菌の組み合わせや製造方法によって変動することも示しました。発酵食品は、「おいしさ」と「健康効果」の両立が可能な食品です。近年、腸内細菌の構成に影響を与える食品への関心が高まっています。特に、*A. muciniphila*のような有用な腸内細菌の増殖に関与する因子の解明は、健康維持において重要な課題です。今後は、乳製品に含まれる機能性成分の増強技術の開発を進めるとともに、有用腸内細菌が持つ腸内環境への適応特性を明らかにし、それらの増殖を促進する因子の特定を目指していきます。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

用語解説

- ※1 **ヨーグルトによる寿命延伸説** 1908年にノーベル生理学・医学賞を受賞した微生物学者、イリヤ・メチニコフは、ブルガリア地方の長寿者が日常的にヨーグルトを摂取していることに着目し、ヨーグルトによる腸内環境の改善が寿命の延伸につながるという仮説を提唱した。
- ※2 **乳タンパク質** 牛乳に含まれる主要なタンパク質は、カゼイン(全体の約80%)と、水溶性タンパク質であるホエイタンパク質(約20%)。これらは、多くのアミノ酸から構成されるタンパク質であり、私たちの体にとって重要な栄養源となる。乳タンパク質は、動物や微生物が持つ消化酵素によって分解され、ペプチド(アミノ酸が2個以上つながったもの)やアミノ酸へと変化する。
- ※3 **メタボローム解析** 代謝産物を網羅的に分析する手法で、分析対象になるのは糖・有機酸・アミノ酸・ペプチドなどの低分子代謝物である。メタボローム解析は、キャピラリー電気泳動に質量分析計を組み合わせたCE-TOFMSや、液体クロマトグラフィーに質量分析計を組み合わせたLC-MSなどの機器を用いて行われる。
- ※4 **γ-グルタミルペプチド** グルタミン酸の「γ位」(側鎖)を使って、他のアミノ酸やペプチドと結合した化合物である。食品中では、うま味を強めたり、コク味を付与したりするペプチドとして知られている。
- ※5 **胆汁酸** 腸内において食物に含まれる脂質の吸収を促し、コレステロール代謝の中で重要な役割を担う生体内物質である。ヒトが分泌する1次胆汁酸と、それが腸内細菌によって代謝された2次胆汁酸がある。また、抗菌作用を有するため、細菌を排除する役割もあり、腸内細菌叢の形成にも関与する。
- ※6 **オミクス解析** ※3のメタボローム解析、トランスクリプトーム解析(生物の遺伝子発現変化)やプロテオーム解析(タンパク質変化)などの手法を用いて、生物の体の中で起こっている様々な現象を網羅的に解析すること。

参考文献

- 1)Nielsen, S. D. et al. (2011) Bioactive milk peptides: an updated comprehensive overview and database. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol.64, 11510-11529.
- 2)Cani, P. D. et al. (2022) *Akkermansia muciniphila*: paradigm for next-generation beneficial microorganisms. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, vol.19, 625-637.
- 3)Hagi, T. et al. (2016) Metabolome analysis of milk fermented by γ-aminobutyric acid-producing *Lactococcus lactis*. Journal of Dairy Science, vol.99, 994-1001.
- 4)Hagi, T. et al. (2019) Characterization of unique metabolites in γ-aminobutyric acid-rich cheese by metabolome analysis using liquid chromatography-mass spectrometry. Journal of Food Biochemistry, vol.43, e13039.
- 5)Hagi, T. et al. (2022) Effect of sake lees on cheese components in cheese ripened by *Aspergillus oryzae* and lactic acid bacteria. Journal of Dairy Science, vol.105, 4868-4881.
- 6)農研機構プレスリリース(2020-12-22) 腸内細菌アッカーマンシア・ムシニフィラの胆汁酸耐性機構の一部を解明。  
[https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/nilgs/137775.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nilgs/137775.html) (参照 2020-12-22)
- 7)萩達朗・野村将(2023) 乳酸菌を用いた有用腸内細菌の生育改善. 特願2023-031034.

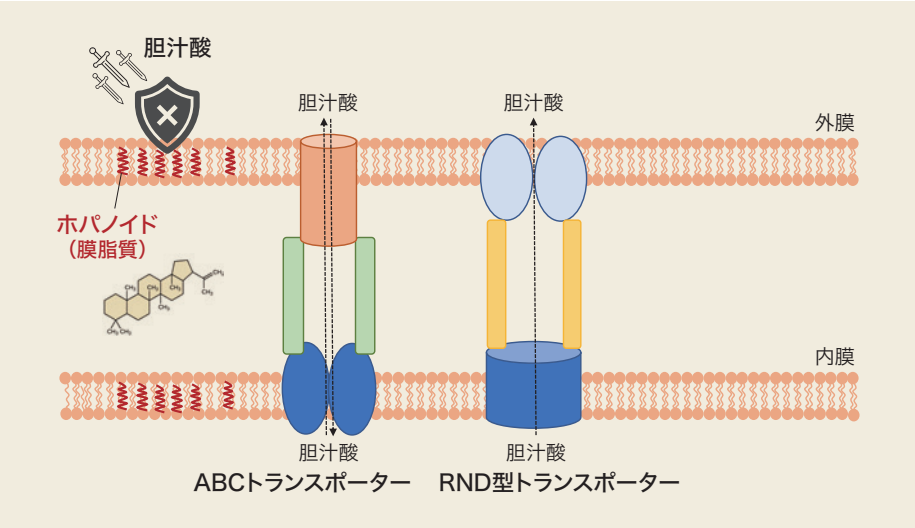


図3 *A. muciniphila*との胆汁酸耐性機構  
ABCトランスポーター、RND型トランスポーターおよびホパノイド合成に関する遺伝子の発現量が上昇し、各トランスポーターおよびホパノイド合成阻害剤によって、*A. muciniphila*の胆汁酸耐性は減少します。そのため、これらのシステムが胆汁酸から細胞を守っていると考えられます。



# でん ぶん 澱粉系食品素材の消化性に 影響を及ぼす澱粉構造と物性

松木 順子 佐々木 朋子

MATSUKI Junko

SASAKI Tomoko

## はじめに

でん ぶん  
澱粉は、私たちの食生活に欠かせない炭水化物の一種であり、米やジャガイモ、サツマイモなどに豊富に含まれています。植物が光合成によって作り出すエネルギーの貯蔵形態であり、人間にとっても主要なエネルギー源です。さらに、日本の伝統的な発酵食品である味噌、醤油、酒、焼酎なども、澱粉を含む原料の発酵によって造られています。発酵において澱粉は、微生物が利用する「炭素源」として重要な役割を果たしています。

澱粉は、化学的には直鎖状のアミロースと、枝分かれ構造を含むアミロペクチンという2種類の分子から構成されており、それらの構造や構成比の違いによって、消化されやすさや発酵性が大きく変わります。消化性の観点からは、澱粉は「急速に消化される澱粉(RDS:Rapidly digestible starch)」「緩やかに消化される澱粉(SDS:Slowly digestible starch)」「難消化性澱粉(RS:Resistant starch)」の3つに分類されます<sup>1)</sup>。SDSは小腸で完全に消化・吸収されるものの、消化速度が緩やかなため、血糖値の急上昇を抑制する効果があります。一方、RSは、小

腸で消化されずに大腸まで届き、腸内細菌によって発酵されることで、短鎖脂肪酸を生成し、腸内環境の改善などの健康効果をもたらすとされています。

RSは、その生成要因により、RS1(消化酵素からの物理的な隔離)、RS2(B型および一部のC型結晶構造をもつ生澱粉)、RS3(老化澱粉)、RS4(化学的加工澱粉)、RS5(アミロースと脂質の複合体)の5つに分類されます<sup>2)</sup>。例えば、老化しやすい構造の澱粉を増やすことで、RSの含量を高めることが期待されます。

このように、澱粉の構造や組成を品種改良や調理方法によって制御することで、消化性を調整できることが明らかになってきました。本稿では、米の品種や調理条件によって消化性が変化する事例、また、澱粉の構造変化モデルについて紹介します。

## 澱粉の構造と消化性

澱粉の内部には、結晶質部分と非晶質部分が不均質に分布していると考えられています。結晶質部分では、主としてアミロペクチンの直鎖部分が二重らせん構造を形



成しています。澱粉を加熱すると、この結晶の部分がほどけて水に溶け出し、粘りのある炊きたてご飯のような「糊化」状態となり、冷却すると直鎖が再会合して二重らせんを形成し、冷やご飯のような「老化」状態になります。この糊化と老化の過程は、食品の食感や消化性、さらには発酵性にも影響を与える重要な現象です。

例えば、超硬質米として知られる稲品種「新潟129号」では、澱粉合成に関わる酵素のひとつであるBEIIb(枝作り酵素)を欠いているために、アミロペクチンの枝分かれが少なく、直鎖部分の平均鎖長が長くなっています(図1)。このような構造をもつ澱粉は、糊化温度が高く、炊飯時に糊化しにくいだけでなく、炊飯後の老化が非常に早く進みます<sup>3)</sup>。

実際に、炊飯直後の澱粉の糊化度をBAP法(澱粉の糊化老化程度を評価する方法)で測定したところ、コシヒカリでは約90%であったのに対し、新潟129号ではわずか10%程度でした。糊化度の低い炊飯米は硬く、ぼそぼそとした食感となるため、そのままでは食用に適さず、加工やブレンドなどの工夫が必要です。パックご飯にした場合、コシヒカリ100%のパックご飯の糊化度は、あたため直後(93%)と5時間後(92%)でほとんど変化が見られません

でしたが、新潟129号を50%含むパックご飯では、あたため直後の糊化度が66%であったのに対し、5時間後には58%まで低下し、老化が進行しやすいことが示されました。

## 分岐アミロデキストリンを用いた老化の解析

澱粉の糊化や老化のメカニズムをより詳細に理解するため、私たちは「分岐アミロデキストリン(BD)」というモデル物質を用いた解析を行っています。BDは、澱粉から酸処理によって非晶質部分を除去し、分岐構造をもった分子を精製したものです(図2)。このBDを水で溶解して経過観察すると、分子同士が二重らせんを形成し、やがて結

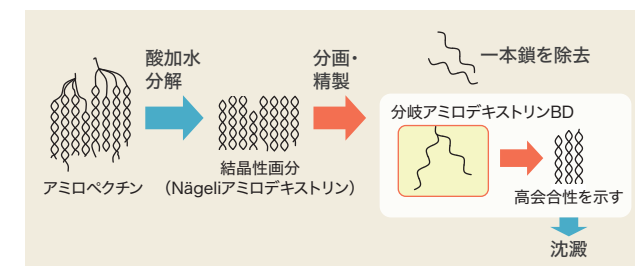


図2 アミロペクチンのモデル物質(分岐アミロデキストリンBD)の精製法

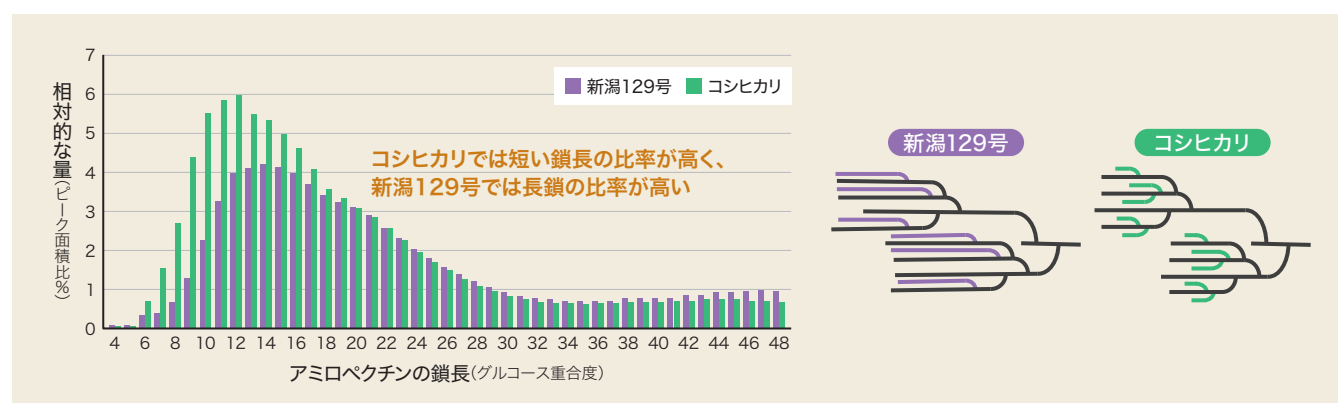


図1 アミロペクチンの鎖長分布の比較  
左:鎖長分布 右:アミロペクチン構造の模式図

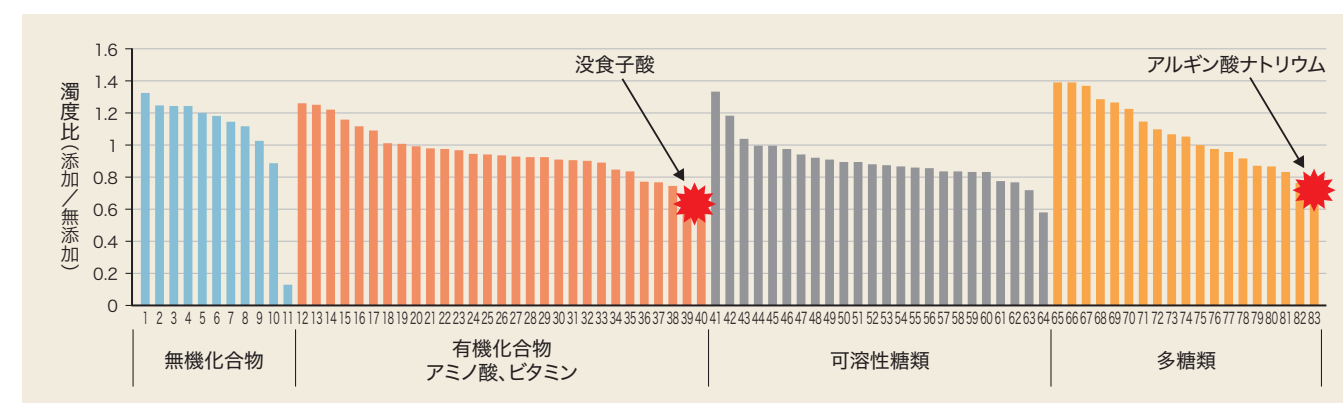


図3 食品成分による濁度変化への影響(無添加時との比較)  
横軸数字はサンプル番号。値が低いほど濁度上昇を阻害、すなわち老化を抑制。図中の★印で示した没食子酸、アルギン酸ナトリウムは、同じグループの食品成分・食品素材の中でも、特に濁度上昇阻害効果が高かった例。



晶化して沈澱します。

二重らせん形成によるBDの会合過程を濁度の変化として測定することで、分子の会合しやすさ、すなわち老化のしやすさを評価できます。さらに、アミノ酸、ビタミン、可溶性糖類、多糖類など、様々な食品成分がこの会合に与える影響を調べたところ、二重らせんの形成を促進あるいは抑制する物質がいくつか見出されてきました(図3)<sup>4)</sup>。これにより、食品中の成分が澱粉の老化や消化性に影響を与える可能性を評価できます。

## 澱粉分解酵素の作用に影響を及ぼす炊飯米の特性

私たちの主食であるご飯の主要成分は澱粉です。澱粉は口腔内で唾液アミラーゼ、小腸で膵液アミラーゼおよび二糖分解酵素により単糖まで分解・吸収されて血中グルコースになるため、米澱粉の消化酵素による分解性が食後の血糖値上昇に強く影響しています。一方、食品に含まれる澱粉は食品の網目構造の中に存在しています。そのため澱粉の消化性には、化学構造だけでなく、分解酵素と澱粉の接触を制御する食品の物理構造が重要な役割を果たしています。

玄米は表層が果種皮で覆われており、食物繊維を多く含むため消化吸収が遅く、白米よりも血糖値上昇が緩やかになる素材として期待されてきました。白米と玄米を対象とした血糖値推移の比較試験は古くから報告されていますが、米の品種、炊飯条件、摂食時の形態によって、異なる傾向が観察されていました<sup>5)6)</sup>。そこで私たちは、「コシ

ヒカリ」の玄米およびその精白米を一般的な炊飯器で炊飯し、摂食後の血糖値の推移を比較しました。白米は1.5倍加水の「白米モード」で、玄米は白米と同じ加水量(1.5倍)の「白米モード」で炊飯した試料と加水量を2.0倍に増やし、「玄米モード」で炊飯した試料を用意しました。炊飯器の「白米モード」と「玄米モード」では、加熱時間が異なります。その結果、玄米摂食後の血糖値推移は炊飯条件によって顕著に異なり、「白米モード」の玄米摂取60分以降の血糖値は白米摂食時よりも低くなりましたが、2.0倍加水「玄米モード」の玄米を摂食した際には、摂取45分後まで血糖値が急激に上昇し、その後急激に血糖値が下がる傾向を示しました(図4)<sup>3)7)</sup>。ピーク時の血糖値は白米よりも有意に高く、血糖値曲線下面積値は玄米2.0倍加水(4,533mg min/dL)＞白米(4,216mg min/dL)＞玄米1.5倍加水(3,792mg min/dL)の順になりました。

次に同じ試料を用いて、各種炊飯米の澱粉消化性を比較しました。消化性の*in vitro*評価試験をヒトの消化過程に近づけるためには、咀嚼に相当する試料の破碎処理が重要です。破碎処理をせずに炊飯米を粒のままの状態では消化性を評価すると、2種類の手法で炊飯した玄米は白米よりもRDS含量が低く、消化速度が緩やかでした。一方、咀嚼を模擬して破碎した試料を用いて消化性を評価した結果、同条件で炊飯した白米と玄米ではRDS含量に有意差はなく、2.0倍加水の玄米ではRDS含量が白米よりも有意に高く、消化されやすい傾向が見られました(図5)。この結果は、前述した血糖値の推移とよく一致しており、玄米の消化酵素による分解性は炊飯条件によって大きく異なることがわかりました。さらにテクスチャー解析によっ

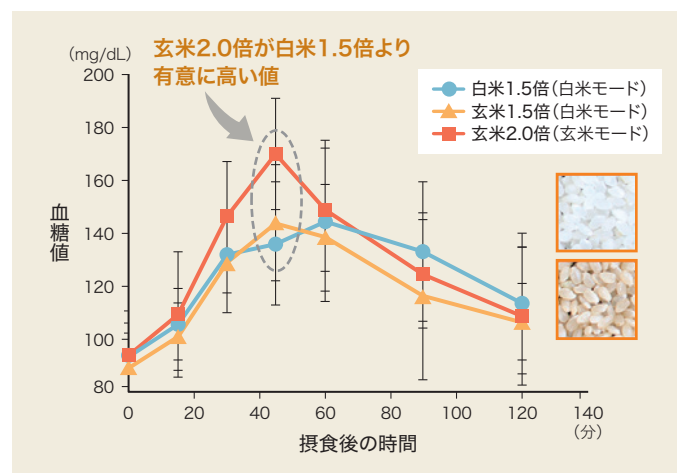


図4 白米と玄米の食後血糖値の推移

白米1.5倍(白米モード):白米の重量に対して1.5倍加水、「白米 ふつう」モードで炊飯  
玄米1.5倍(白米モード):玄米の重量に対して1.5倍加水、「白米 ふつう」モードで炊飯  
玄米2.0倍(玄米モード):玄米の重量に対して2.0倍加水、「玄米」モードで炊飯  
6名の被験者を対象に、食後血糖値の測定を実施した。

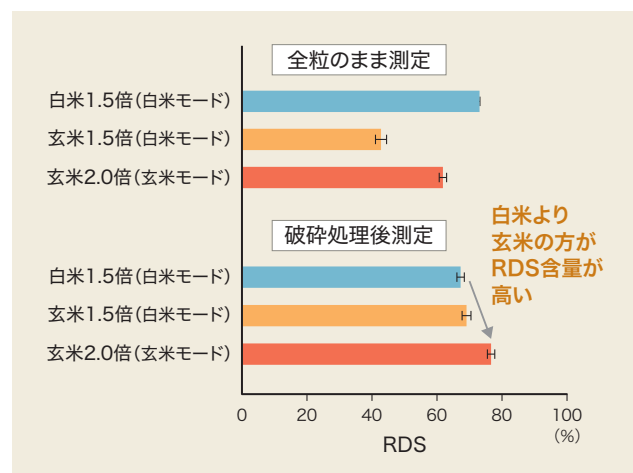


図5 白米と玄米のRDS(急速に消化される澱粉)含量

全粒のまま測定:炊飯米をそのままの状態での消化試験の試料として使用  
破碎処理後測定:炊飯米をミキサーで破碎処理をした試料を使用  
各試料について3点以上の繰り返し測定(n≥3)を行い、分析した。

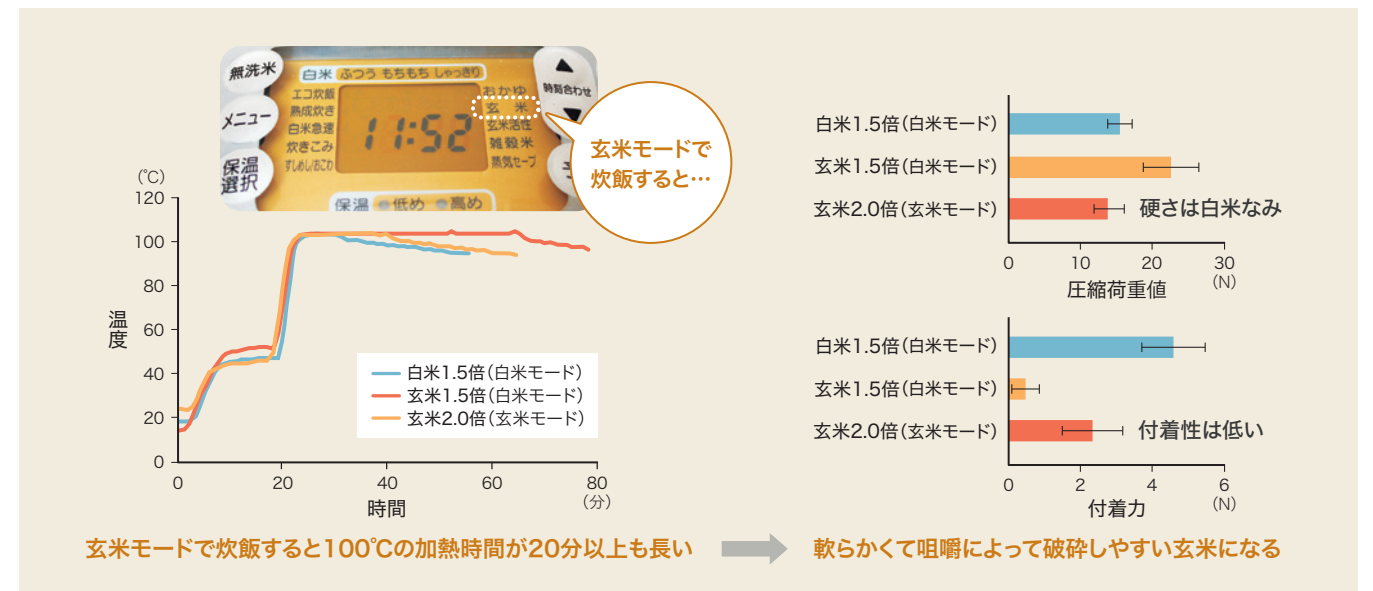


図6 玄米の炊飯条件による物性変化

炊飯米の物性測定は、30粒を対象に繰り返し測定(n=30)した。

て、玄米は2.0倍加水「玄米モード」で炊飯することで、白米と同程度の硬さになり、白米特有の粘りを反映した付着性については白米よりも低い値を示しました(図6)。これらの結果から、2.0倍加水「玄米モード」の玄米は軟らかくて凝集しにくい物性によって、咀嚼および破碎処理の段階で白米よりも細かく破碎されたことが考えられました。一方、白米の場合は表層の付着性が高いため、破碎処理によって部分的に凝集が生じ、玄米よりも消化酵素液中で拡散しにくい状態になっていることが示唆されました。また血糖値の推移から見て、咀嚼の過程でも*in vitro*評価系と同様の現象が起きていることが考えられました。このように、食品の中に存在する澱粉の消化酵素による分解性は、食品の構造特性、咀嚼過程での凝集性、破碎性によって、大きく変動することが示されました。

## おわりに

各種炊飯米の食後血糖値と澱粉消化性を調べた結果、食後の急激な血糖値上昇と急速に消化される澱粉量には強い関連があることが認められました。また、消化酵素の作用を調整する要因として、消化過程での食品の構造変化が重要であることが示されました。食後の血糖値を抑えるための食品構造特性を解明し、その制御技術の開発が期待されます。

このように、澱粉の構造と消化性を理解し、制御することは、発酵食品の開発においても重要な鍵となります。例

えば、RSを多く含む米や澱粉を用いることで、腸内発酵を促進し、整腸作用を高めた発酵食品を作ることができるかもしれません。今後さらに澱粉の化学構造および物理構造と消化性の理解を深めることで、より機能性の高い食品の創出につながると期待されます。これらが麹菌による利用性にも影響するかは未解明ですが、穀物の澱粉構造や蒸煮条件によって麹菌の生育や酵素生産に違いが出る可能性が考えられ、この制御によってより利用目的に合った麹造りにつながるかもしれません。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域  
バイオ素材開発グループ)

## 参考文献

- 1) Englyst, H. N. et al. (1992) Classification and measurement of nutritionally important starch fractions, *European Journal of Clinical Nutrition*, vol.46, S33-S50.
- 2) Jane, J.-L. and Robyt, J. F. (1984) Structure studies of amylose-V complexes and retro-graded amylose by action of alpha amylases, and a new method for preparing amylopectins. *Carbohydrate Research*, vol.132, 105-118.
- 3) 松本順子・佐々木朋子(2022) 米デンプン消化性、大坪研一監修(2022) 米の機能性食品化と新規利用技術・高度加工技術の開発、テクノシステム、東京、pp.177-188.
- 4) Matsuki, J. et al. (2020) Association of branched dextrin from Nāgeli amylopectin in water for screening of additives affecting starch gel properties. *Starch - Stärke* vol.72, 1900202.
- 5) Miller J. B. et al. (1992) Rice: A high or low glycemic index food? *American Journal of Clinical Nutrition*, vol.56, 1034-1036.
- 6) Ito Y. et al. (2005) Postprandial blood glucose and insulin responses to pre-germinated brown rice in healthy subjects. *The Journal of Medical Investigation*, vol.52, 159-164.
- 7) Sasaki T. et al. (2016) Effects of milling and cooking conditions of rice on *in vitro* starch digestibility and blood glucose response. *Cereal Chemistry*, vol.93, 242-247.



# TOPICS

## ご当地乳酸菌 Jチーズスターター

食品研究部門 食品加工・素材研究領域 バイオ素材開発グループ 小林 美穂  
KOBAYASHI Miho

### ■ はじめに

わが国のチーズの総消費量は近年堅調に推移していますが、ナチュラルチーズに換算したチーズ総消費量のうち国産割合は13%程度であり、国産チーズのさらなる消費拡大のために、高付加価値化や輸入チーズとの差別化が求められています。酪農家などがチーズ製造に取り組む際には、原料乳の生産地や乳牛の飼養方法などが製品差別化の要素となりますが、一方で、チーズ製造において乳酸発酵を行わせるチーズスターター※1や、特徴付けのため添加するサブスターター※2は輸入品が利用されており、外国産ナチュラルチーズとの明確な差別化を難しくしています。

### ■ 熟成用サブスターターの開発

チーズ品質に関わる乳酸菌群はスターター由来乳酸菌の他に、非スターター乳酸菌群(Non-Starter Lactic Acid Bacteria/NSLAB)が知られています。NSLABは原料乳(殺菌乳)や製造環境から極わずかに混入し、熟成期間中にチーズの菌叢で優勢となり、特に嗜好性に影響する香りや食感などの品質に大きく影響します。これまでNSLABとし

て分離実績のある乳酸菌種には明らかな傾向があり、例えばセミハードチーズでは*Lacticaseibacillus casei*グループ(*L. casei*, *L. paracasei*, *L. rhamnosus*)、*Latilactobacillus curvatus* *Lactiplantibacillus plantarum*の検出報告が多く、熟成期間が1年を超えるようなハードチーズでは、*Pediococcus*が特徴的に検出されます。これらは、加塩、低温、酸性化を基本とする食品保蔵条件において優勢となる乳酸菌種で、チーズのみならず漬物等のわが国の伝統的発酵食品からも高い頻度で分離されます。熟成チーズから分離同定したNSLAB菌株を、熟成促進やフレーバー増強を狙い、サブスターターとして長期熟成チーズのスターターに併用する試みは多くの報告があり特徴付けに成功しています。一方、これまで乳系食品以外から分離した乳酸菌のチーズスターター利用の例はわずかです。そのような乳酸菌の菌体酵素活性は、チーズ由来菌のものとは異なり、チーズ製造に利用できれば多面的な差別化特徴の付与が期待できると考え、著者らの研究グループは、ご当地発酵食品由来の乳酸菌を利用したサブスターター開発に着手しました。開発に当たり、北海道(道南、道央、十勝、道北)の地場食品120点、栃木県産食品70点



図2

Jチーズスターターを添加して製造したゴーダチーズの消費者型官能評価  
Jチーズスターターを添加して、チーズ工房で実規模製造したゴーダチーズと、同じチーズ工房で製造した従来品について、一般消費者106名を年齢層、性別を均等となるようリクルーティングし、精密にコントロールされた消費者型官能評価を実施しました。その結果、ゴーダチーズは熟成によって消費者嗜好が有意に向上することが明らかとなりました。一方、Jチーズスターターを使用して製造したチーズでは、2カ月熟成チーズでも3カ月熟成と遜色のない嗜好性を有することが確認されました。

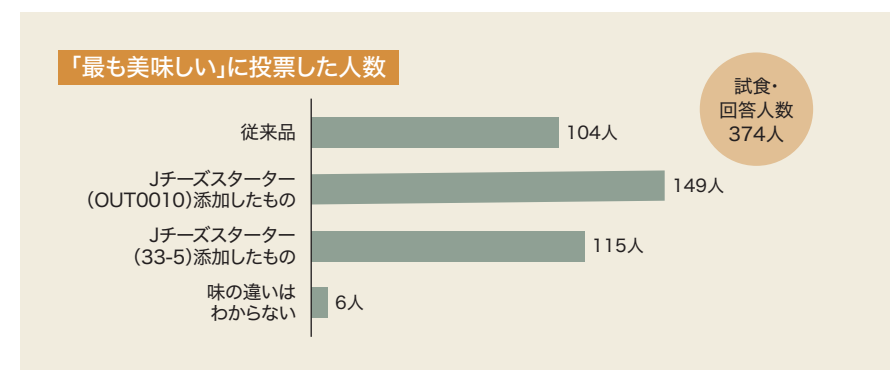


図3

Jチーズスターター(サブスターター)を添加して製造したゴーダチーズの試食投票結果  
消費者型官能評価を実施したのと同じ試験チーズと従来品をイベント会場(2019年10月札幌市)で配布し、ブラインドでの投票を集計したところ、OUT0010チーズの得票が最も多く、「味の違いは無い、わからない」との回答はわずかに6人でした。

から、計676菌株の乳酸菌を分離・同定してNSLAB菌種を選び、生育温度帯、pH耐性、カゼイン分解活性などの菌株特性、さらに小規模および実規模製造チーズの品質を比較し、差別化特徴の付与が期待できる菌株を選抜しました。選抜した*L. paracasei* OUT0010、*L. curvatus* 33-5、*L. rhamnosus* P-17、*L. curvatus* OY-57を各々用いて試験製造したゴーダチーズでは、「標準品より旨味成分の濃度が早く高くなる」「味覚センサー試験で旨味強度が高い」「特徴的な香り成分が高まる」などの共通した特徴が認められ、Jチーズスターター(サブスターター)と総称しています。Jチーズスターター*L. paracasei* OUT0010を用いて製造したゴーダチーズは、消費者型官能評価とイベント会場での試食インタビューにて、食べてわかる熟成効果と好ましさが高く評価されました(図1、2、3)。

### ■ おわりに

市販チーズスターターは、高濃度の乳酸菌を乾燥粉末状に加工したものが主流となっています。これらは、チーズ製造時に原料乳に直接添加して用いるため、乳酸菌を活性化するための前培養の手間がかからず、培養時の雑菌汚染の心配からも解放されます。2024年度から、「国産ナチュラルチーズ高付加価値化推進事業(地方競馬全国協会畜産振興事業、代表機関：(公財)日本乳業技術協会)」において、Jチーズスターターを乾燥粉末加工したプロトタイプ品によるチーズ試作実証が開始されており、このチーズは既に上市も始まっています。今後、国産チーズスターターがわが国のナチュラルチーズの差別化ツールとして機能するように、体系的な整備を進めていく必要があります。

### 用語解説

- ※1 **チーズスターター** 乳酸菌などの発酵用微生物で、乳酸発酵により原料乳の凝固を促し、チーズの熟成にも働く。利便性と衛生面を考慮し、高濃度の生菌を凍結乾燥処理した粉末形状のものが市販されている。
- ※2 **サブスターター** 乳酸生成能力は低い、熟成中のアロマ形成、旨味増強、熟成促進などの効果を期待し、チーズスターターと併用する微生物。



図1

凍結乾燥粉末化したJチーズスターター(左写真)を用いて実規模製造したゴーダチーズ(右写真)



# TOPICS

## 企業連携のための NARO乳酸菌コレクション

畜産研究部門 畜産飼料作研究領域 飼料生産利用グループ 遠野 雅徳  
TOHNO Masanori

### ■有用微生物等の遺伝資源の現状

一般的な研究開発業務では、速やかな研究シーズの創出と実用化が求められます。製品の安全性や安定生産に関する技術開発や、コストダウンのための研究エフォートも確保しなくてはなりません。有用微生物の実用化においても、これらの技術開発上の難関が待ち構えています。実用化がゴールであるとすれば、有用微生物の探索・保存等の基盤整備は、まさにスタート付近の取り組みです。限られた経営資源の中で、有用微生物等の基盤整備にまで対応できないケースは少なくないはずです。実際、設備や人材不足によ

り、各企業保有の微生物コレクションの衰退が指摘されています<sup>1)</sup>。また、わが国では有用微生物等の遺伝資源の基盤整備が重要視されにくく、強みにできなかったという見方もあります<sup>1)</sup>。

### ■莫大な利益を生む微生物

日本学術会議の対外報告<sup>2)</sup>において、微生物は「それ自体が莫大な利益を生む可能性がある」とされています。有用微生物等の基盤整備を取り巻く現状は厳しい一方で、乳酸菌を含む微生物遺伝資源への期待が高まっていることも事実

です。NARO乳酸菌コレクションは、農研機構内の研究者による分野横断的な“オールNARO事業”であり、各企業等で維持管理が困難となりつつある微生物コレクションに代わり、受け皿的な役割を発揮できます(図1)。単なる菌株の提供だけでなく、分離・同定・分類・培養・機器分析・バイオフィーマティクスなどの基盤研究手法(ノウハウ)とのパッケージ型連携も可能であり、民間企業における実用化研究を進めながら、本分野の人材育成にもつながります。互いの強みを活かし、実用化のゴールに向けて役割分担をしながら、効率的な連携体制を実現します。

### ■農業分野におけるNARO乳酸菌の実用例

乳酸菌と関わりの深いチーズやヨーグルト。その主要な原料は生乳であり、酪農業がその生産を担っています。生乳の経営コストに占める飼料費の割合(2023年)は、北海道で48%、都府県で56%を占めています<sup>3)</sup>。このため、家畜の発酵飼料であるサイレージの高品質化や低コスト化に加えて、サイレージの腐敗などによる廃棄ロスの低減は、経営上の重要課題となります。われわれの研究チームでは、飼料原料に乳酸菌をスターター添加して良質なサイレージを調製するために、NARO乳酸菌コレクションを活用したサイレージ添加用乳酸菌「畜草ラクト」と「畜草アセト」の2商品を2024年に実用化しました(図2)。この新製品には、サイレージ発酵能力に優れ、国内外で実用化例が皆無であったペディオコッカス・イノピナタス(*Pediococcus inopinatus*)という大変珍しい乳酸菌種を採用しました。国内外に微生物遺伝資源を扱うカルチャーコレクションは多数ありますが、NARO乳酸菌コレクションにおける本菌種の収蔵数は世界トップクラスであり、技術開発時のアドバンテージとなりました。

本技術開発の過程では、すべてが順調に進んだわけではありません。研究報告事例の乏しい乳酸菌種であったため、参考になる公知文献や実用化例が無く、工場レベルでの低コスト大量培養法の開発が難航しました。民間企業や地域の公設試験場と連携し、ゲノム情報の活用や精密な培養技術の開発に取り組んだ結果、市場に安定供給することが可能となりました。技術開発にはトラブルや失敗がつきものですが、パッケージ型連携による知の結集により、営農者が新技術を直接利用できるようになりました。本事例でお示した飼料生産・利用に関する社会課題だけでなく、NARO乳酸菌を活用した技術開発を通じて、わが国の農業・食品分野が抱える様々な課題の解決を目指したいと思います。

### ■おわりに

NARO乳酸菌コレクションは、民間企業等による事業開発や産業応用を主目的としています<sup>4)</sup>。利用に当たっては、個別の各種契約の締結が必要となりますが、提供した乳酸菌株自体を知財対象にできる可能性や、農研機構の強みとなる全国の研究地域・設備・実証地・ノウハウ等とのパッケージ利用も想定でき、事業化に向けた連携活動の加速化が期待できます。産業上有用な機能性を既に明らかにしている菌株も保有しており、一部の菌株では特許出願・査定済みとなっています。研究開発時間やコスト削減の視点で、本有用菌株の活用もお勧めできます。

ニーズに応じて、提供後のアフターフォローを充実させることも可能です。万が一、提供後に培養が不調となった場合には、農研機構内のバックアップ保管株から再提供も可能となるため、提供先における菌株の保管管理に関わる設備コストや菌株の損失リスクの低減も期待できます。NARO乳酸菌コレクションの活用と連携を通じて、わが国の農業・食品産業の発展につながれば幸いです。

### 参考文献

- 1) 森口洋充(2014) 日本の遺伝資源の保存とその課題。季刊政策・経営研究, vol.1, 49-58.
- 2) 日本学術会議微生物学研究連絡委員会(2000) わが国における微生物・培養細胞カルチャーコレクションのあり方に関する提言 ―生物資源等に関わる知的基盤整備をめざして―。  
[https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/17htm/17\\_24.html](https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/17htm/17_24.html)  
(参照 2025-6-19)
- 3) 農林水産省畜産局飼料課(2025) 飼料をめぐる情勢(令和7年8月)。  
[https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l\\_siryu/index.html](https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryu/index.html)  
(参照 2025-8-28)
- 4) 遠野雅徳(2023) 畜産関連微生物資源の開拓 ～NARO 乳酸菌コレクションの産業応用の可能性～。微生物資源の整備と利活用の戦略。株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, pp.485-492.

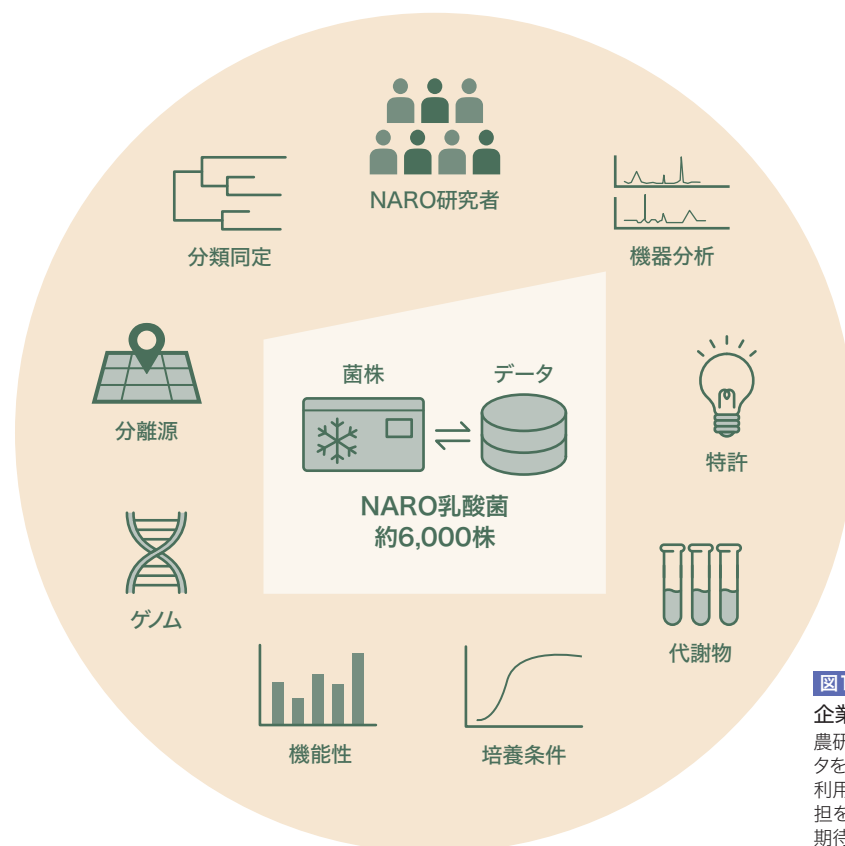


図1 企業連携のためのNARO乳酸菌コレクション  
農研機構内で保有する約6,000の乳酸菌株とデータを一元的に整備し、保管・連携力を強化している。利用者による乳酸菌株の新規探索・保管管理の負担を低減し、研究開発時間の短縮とコスト削減が期待される。



図2 NARO乳酸菌コレクションの実用化例であるサイレージ添加用乳酸菌「畜草ラクト」と「畜草アセト」  
農研機構・広島県立総合技術研究所・雪印種苗株式会社による共同研究成果。写真提供元の雪印種苗株式会社の許可を得て掲載。



# 温故知新

>> 古きをたず(温)ねて新しきを知る



精密発酵研究で  
使用する研究機器

## 精密発酵／複合発酵、醸造、そして微生物コンソーシアム

KIMURA Keitarou 木村 啓太郎

本号は「発酵」に関する特集号です。ハムラビ法典(紀元前18世紀)には「ワインを酔っ払いに売ってはならない」と書かれているらしい。恐らく、最初のアルコール飲料が実用化されたのは先史時代のことでしょう(大塚謙一著、醸造学、1981)。発酵食品はスローフードとも呼ばれます。生物学的プロセスである発酵は、古くてゆっくりな技術なのです。

しかしながら、環境負荷の低減が社会課題となっている今日、エネルギー消費量や副産物が少ない“スローな発酵”が再評価されています。また、世界的な人口増や気候変動、紛争・戦争の影響から、良質なタンパク質の供給不足が懸念されており、いわゆる代替タンパク質を発酵技術で生産することが注目されています。消費者受容性を考慮すれば、長期の食経験がある発酵微生物は代替タンパク質の生産宿主として有望です。このような背景から、食品研究部門では、精密発酵をひとつのキーワードとして関連課題への取り組みを強化しています。

動物由来タンパク質の代替として、酵母などの微生物が生産する代替乳タンパク質や代替卵白タンパク質が数年前に米国で認可されました。一般的には、このような取り組みを精密発酵(precision fermentation)と呼びます。一方、微生物の増殖状態や代謝物を各種センサーや分析機器で計測し、人工知能を利用したデータ解析手法の導入により培養条件を最適化して発酵生産の量・収率、効率の向上を図る“発酵プロセスの精密な制御”も精密発酵に含まれます。

代謝工学的なアプローチにより複雑な構造を持つ化合物の精密発酵に成功した例も数多く知られています。しかし、多くの場合、細胞内代謝経路の改変がストレスとなるため生産量は少なく、培養条件も制限されるなど産業利用に向けた課題が

ないわけではありません。課題解決に向けた研究開発目標のひとつとして、複数の微生物種に代謝経路を分散させる複合発酵が挙げられます。複数の微生物種が互いに中間産物を受け渡すことにより、ストレス軽減と収量の増加が期待できます。

ところで、発酵微生物は種ごとに異なる得意分野(利用できる基質の種類や温度・pH・酸素分圧などへの環境適応)を持つことが知られています。食品ロス素材や未利用農産物資源のような雑多な原料を発酵利用する場合は、得意分野を活かした協奏的な複合発酵プロセスに利点があります。例えば、個体培養と多糖分解が得意な<sup>こうじ</sup>麹菌と嫌気的な乳酸発酵が得意な乳酸菌あるいは好気的なアルコール生産に強い酵母の組み合わせがすぐ思い浮かびます。実のところ、これらは伝統的な酒や酢の発酵生産(醸造)によく似ています。並行複発酵と呼ばれる醸造プロセスでは、開放的な環境下で菌叢遷移が滞りなく進行します。

アップサイクル<sup>※1</sup>のための簡素な発酵プロセスを開発するならば、菌叢遷移をモニタリングまたは予測し、適切なタイミングで原料を追加投入できる連続発酵が望ましい。その場合、複合菌叢を構成する微生物コンソーシアムが自律的に再構成される必要があります。そのような動的な菌叢遷移が周期的に繰り返される“アップサイクル生態系”の構築は、新しきを知るためのチャレンジングなテーマだと思います(研究の一線から退いた筆者の妄想かもしれませんが…)。工学分野との連携を進めるとともに、改めて古の経験知を学び直しているところでございます。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域)

※1 アップサイクル 廃棄されるものに新たな価値を与えて再生すること

## Editor's Note

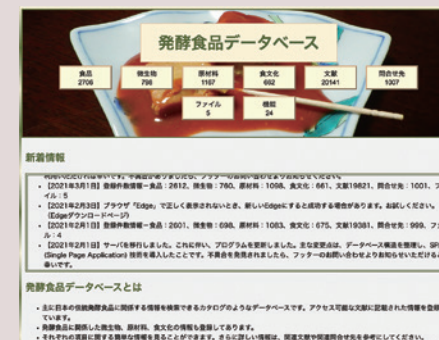
## 編集後記

微生物の力を活用した発酵技術の研究は、和食として古くから日本の食卓で親しまれている味噌、醤油、納豆、漬物、酒などや海外に目を向けるとチーズやヨーグルトなどの発酵食品の製造やその食品機能性などについて実施されています。最近では、持続可能な社会の実現を目指した農業・食品副産物の未利用バイオマス資源からの有用物質生産などのアップサイクルについても発酵技術の適用研究が進められています。農研機構技報第18号では、発酵をテーマとして、乳酸菌や麹菌などの特性解析やデータベース化、発酵技術の応用研究、農業・食品副産物のアップサイクル、将来の食品開発を見据えた澱粉構造と消化性に関する研究などの最新の成果を紹介しています。より深く知りたいことなどがありましたら、ホームページの「お問い合わせ」からコンタクトいただけますと幸いです。

最後まで、お読みいただきありがとうございました。

日本の伝統的な発酵食品の情報をまとめた発酵食品データベースも公開しています。こちらもご参照ください。

発酵食品  
データベース



## 農研機構技報

NARO Technical Report No.18

2025年10月1日発行

発行者/久間和生

発行所/農研機構 広報部広報戦略室(編集委員会事務局)

〒305-8517 茨城県つくば市観音台3-1-1

製作協力・印刷/株式会社アイワット  
非売品



技報  
バックナンバー

農研機構は「みどりの食料システム戦略」を推進しています

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/>



本誌研究内容に関するお問い合わせは

<https://prd.form.naro.go.jp/form/pub/naro01/research>



『農研機構技報』NARO Technical Report 読者アンケートのお願い

ご意見・ご感想をお聞かせください

<https://prd.form.naro.go.jp/form/pub/naro01/ntr>



\*本誌掲載の記事・写真・イラストの無断転載・複写を禁じます。