



国立研究開発法人
農業・食品産業技術
総合研究機構

NARO

農研機構技報

Technical Report

No. 14
/ Nov. / 2023



特集

食品を科学する

— 食品加工と新素材、分析法 —

Topics

機能性農産物を利用した
NARO Style®弁当の開発とその活用

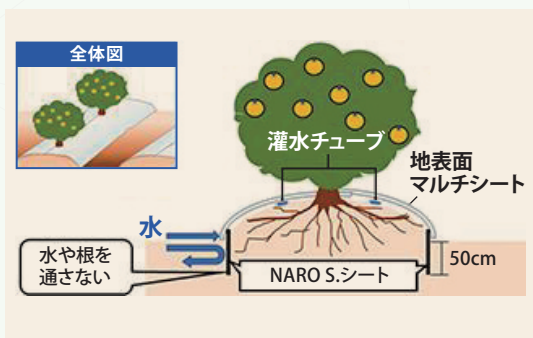
History

温故知新

研究成果を社会実装中

農研機構では、農業・食品産業におけるSociety 5.0の深化と浸透を目指すべき姿を実現するための研究開発を行い、社会実装に向けた

技術



NARO S.シートを活用したシートマルチ栽培

高品質果実の安定生産



花きの高付加価値化

国内外での実用化と新たな用途の提案



蚕業革命

超極細・高染色性絹糸やタンパク質などの生産

育成品種



そらみずき、そらみのり

多収で高品質な品種



あのみりのり2号

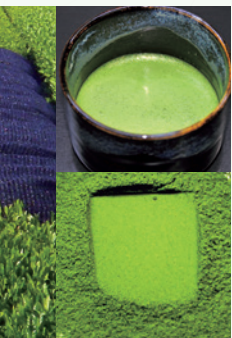
気候変動下での省力栽培に適する単為結果性



せいめい

抹茶等の高品質緑茶の製造に適した品種

により、
取り組みを進めています。



- 04 特集「食品を科学する」
— 食品加工と新素材、分析法 —
- 05 安全で高品質な食品の提供のために
高橋 清也
- 06 ① 交流高電界から始まった
ミニマムヒーティング技術の応用
植村 邦彦
- 10 ② 食品の高圧加工
山本 和貴 中浦 嘉子
- 14 ③ 塩味増強効果の評価と候補物質の探索
河合 崇行
- 18 ④ ヒトミルクオリゴ糖主要構成成分の
食品利用を指向した合成法
西本 完
- 22 ⑤ 新しい成熟変異を活用したトマトの日持ち性改善
伊藤 康博
- 26 ⑥ 素材&加工法で澱粉消化性を制御
佐々木 朋子
- 30 ⑦ 高アミロース米を利用した介護食用米粉の開発
芦田 かなえ
- <トピックス>
- 34 ▶ 機能性農産物を利用した
NARO Style®弁当の開発とその活用
山本(前田) 万里
- 36 温故知新
農研機構130年のあゆみ



特集

食品を科学する

— 食品加工と新素材、分析法 —

安全で高品質な食品の 提供のために

食品研究部門
所長

高橋 清也

TAKAHASHI Seiya

食品の定義を皆さんご存知でしょうか。食品は空気のように、ヒトが生きる上でなくてはならない存在ですので、改めて定義について考える機会は少ないと思います。食品衛生法には、「食品とは、全ての飲食物をいう。ただし、医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律(昭和三十五年法律第百四十五号)に規定する医薬品、医薬部外品及び再生医療等製品は、これを含まない。」と記載されています。つまり、医薬品等として法律で定められているもの以外、口に入れるものはすべて食品です。この多様な食品を、健康の維持増進に寄与し、安全においしく食べられるようにするため弛まぬ努力を払ってきました。とりわけ資本主義経済の中では、食品は競争的価値を持った「商品」という役割をもち、より安全でおいしく、高い品質が求められています。

わが国の食料・農林水産業は、大規模自然災害・地球温暖化、生産者の減少等の生産基盤の脆弱化・地域コミュニティの衰退、新型コロナを契機とした生産・消費の変化などに直面しており、将来にわたって食料の安定供給を図る必要が強く認識されるようになってきました。また、健康な食生活や持続的

な生産・消費の活発化やESG*投資市場の拡大に加え、諸外国でも環境や健康に関する戦略を策定するなどの動きが見られます。今後、このようなSDGsや環境を重視する国内外の動きが加速していくと見込まれる中、わが国の食料・農林水産業においてもこれらに対応し、持続可能な食料システムを構築することが急務となっています。このため、農林水産省は、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」を策定し、その取組を強化しています。

農研機構は、消費者に安全で高品質な食品を提供することに貢献できる技術の開発を目指して研究を行ってきました。その中から本特集では、「食料安全保障」に貢献し、食品の品質を高く維持したまま常温で長期間保存できる技術や、健康・栄養などに配慮した超高齢社会に寄与する技術をピックアップしてご紹介します。これらの研究成果を産業界で活用するためには、市場規模や多様な消費者のニーズに合わせ、技術の改良や大規模化、低コスト化を進める必要があります。それぞれの分野の皆様と手を携えて、これからも安全で高品質な食品の提供に役立つ技術開発に取り組んでまいります。

*環境(Environment)・社会(Social)・ガバナンス(Governance)の英語の頭文字を合わせた言葉

交流高電界から始まった ミニマムヒーティング技術の応用

植村 邦彦

UEMURA Kunihiko

はじめに

食品の安全性や保存性を高める殺菌・加工方法として加熱が一般に行われていますが、十分な殺菌効果を得るために行われる長時間の加熱による食品の熱劣化が問題となっています。ミニマムヒーティング技術は、電気の力により、様々な形態の食品の殺菌・加工に必要な加熱時間を最少とする食品の加熱方法です。ミニマムヒーティング技術には、レモン果汁などの「交流高電界殺菌」、ポテトサラダなどパウチ食品の高品質殺菌のための「水中短波帯加熱」、水産加工品の常温流通を実現する「水中短波帯加圧加熱」、果実ペーストなど高粘度液体食品を高品質な状態で長期保存可能とする「高周波パルス連続加熱」があります。これらの技術は、病原性大腸菌O157

による食中毒事故や2011年に発生した東日本大震災で被災した水産業の復興支援を契機に開発されたもので、加工食品の高品質化や長期保存、食品ロスの低減、国産農産物の輸出促進に寄与する技術として応用が期待されます。

交流高電界殺菌の特徴

1996年に、日本各地で腸管出血性大腸菌O157による集団食中毒事故が多発しました。これに対応した農林水産省のプロジェクト研究が開始され、電気的な処理で食品中の大腸菌を殺菌する研究を行いました。電気による非熱的な殺菌方法としては既に高電界パルスを用いた研究が国内外で報告されていましたが、通電加熱の電圧

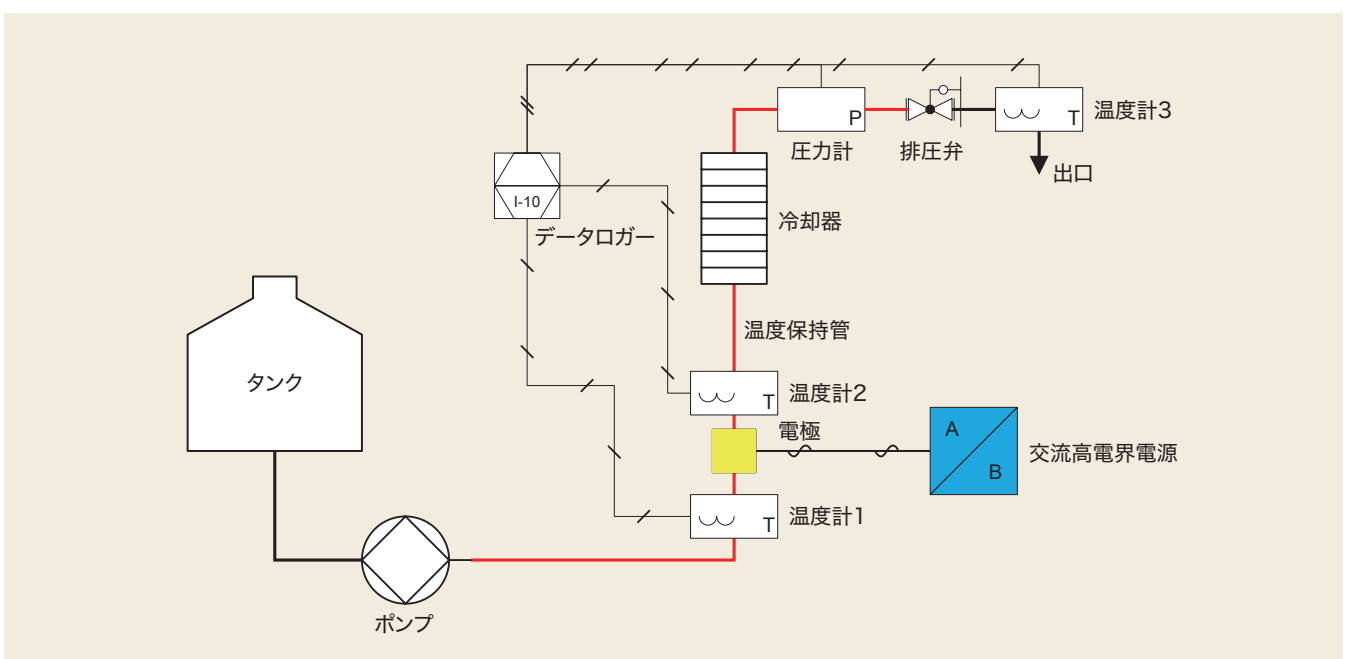


図1 交流高電界装置



を高電界パルス並みに高くすると、通電加熱の熱効果に加え、高電界が微生物の細胞膜を物理的に破壊する電気穿孔の効果が生じるため、食品中の大腸菌をごく短時間で効率的に殺菌することが可能となりました。高電界の交流を利用した本殺菌技術を交流高電界殺菌技術と呼ぶことにしました¹⁾。交流高電界は、加圧下で100°C以上に加熱することにより、高電界パルスでは困難であった耐熱性の細菌芽胞まで失活することがわかりました²⁾。その後、食品メーカーおよび装置メーカーとの共同研究により、装置のスケールアップ(図1)と数々の商品テストを経て2014年に食品メーカーから交流高電界殺菌によるレモン果汁製品が上市されました³⁾。交流高電界は、細菌芽胞の殺菌に必要な加熱時間を従来加熱に比べて1/10以下に短縮することが可能なため、果汁本来の色やフレッシュな香気成分を保持し、製品の品質を高めることに成功しました。また、交流高電界は、短時間の加熱処理でペクチンメチルエステラーゼやリポキシゲナーゼなど、農産物の変質に関わる酵素を効率的に失活させることがわかり、食品の保存中の酸化や風味の変質を抑制し、食材の高い品質を長期間保存することが可能になりました⁴⁾。現在、本技術は、果汁以外に一部の牛乳の殺菌にも利用されています。

水中短波帯加熱の特徴

2017年に病原性大腸菌O157を原因とするポテトサラダの食中毒が発生しました。キュウリなどの生野菜が含まれるポテトサラダは、パウチ包装後の長時間の加熱殺菌を行うことができませんでした。そこで、総菜、豆腐、果実加工品などのパウチ包装した食品を均一迅速に加熱するために水中短波帯加熱技術を開発しました。プラスチック

包装されたポテトサラダを温水に沈め、外から27MHzの短波帯の交流を印加することで、パウチ内のポテトサラダを従来の1/10以下の時間で均一迅速に加熱殺菌し、生野菜の熱劣化を低減することが可能となりました⁵⁾。また本技術は、ビワ⁶⁾やモモ⁷⁾などの果実コンポートの高品質殺菌への応用が報告されています。

水中短波帯加圧加熱の特徴

2011年に発生した東日本大震災への対応として、東北沿岸の水産加工業のJST復興支援プロジェクトに参画して、水産加工品を常温長期保存するために水中短波帯加圧加熱技術を開発しました。パウチ包装した水産物を加圧条件下で水中短波帯加熱することにより、レトルト加熱並みの殺菌で加熱時間を短縮し、高品質な加工食品を実現しました(図2)。サンマのレトルト並みの殺菌を行いながら、身肉を柔らかく、ドリップを低減、レトルト臭を低減、背骨を軟化、背骨に含まれるコラーゲンを低分子化することで高品質なファストフィッシュ加工品を製造することが可能となりました⁸⁾⁹⁾。また、本技術を用いることにより、保存料無添加でゲル強度を低下させないソーセージ(図3)¹⁰⁾や蒲鉾を常温で長期保存できることが報告されています。本研究は、現在共同研究で実用的な規模の装置開発による実用化を目指しているところです。

高周波パルス加熱の特徴

野菜のペーストや果実ピューレなど高粘度の液体食品は、生果と同様の繊維質などの機能性を保持しています。一方、破碎することで酸化や酵素反応が進み、変色、風味が劣化し、腐敗が進みやすくなるのが問題です。生の

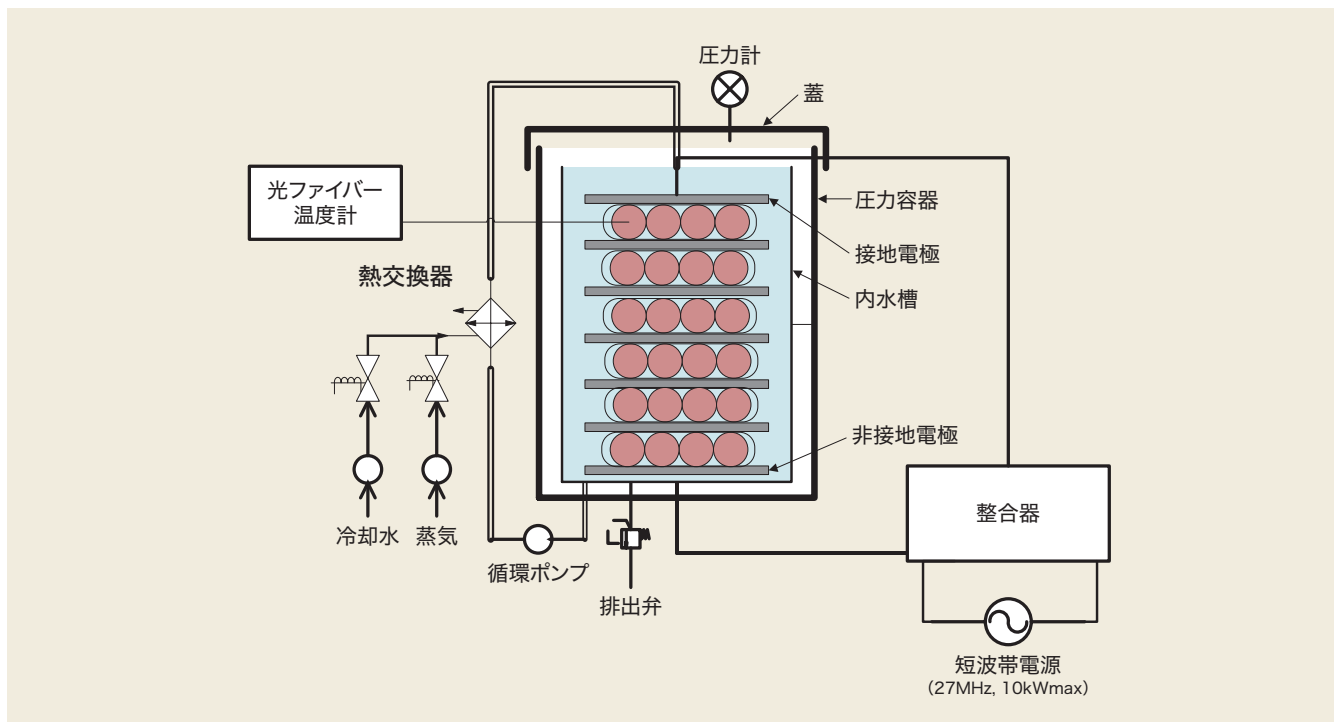


図2 水中短波帯加圧加熱装置

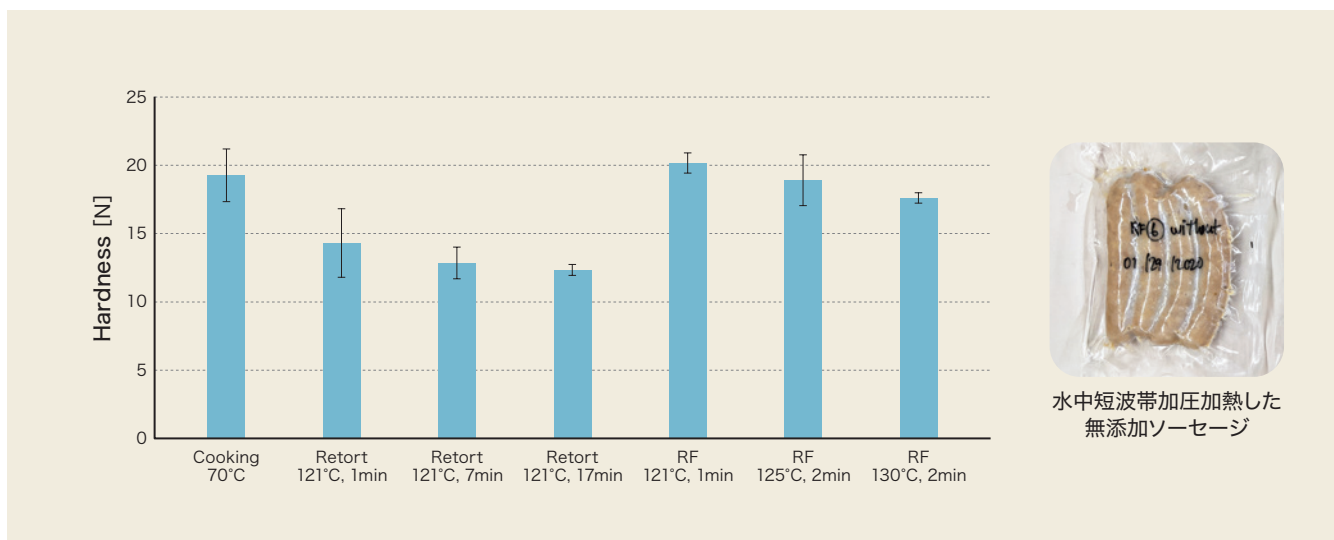


図3 加熱処理がソーセージの弾力に与える影響

左から、温浴加熱(70°C)、レトルト加熱(121°C 1分、7分、17分)、水中短波帯加熱(121°C 1分、125°C 2分、130°C 2分)

色や風味を保持したままこれらを長期間保存できるようになれば、高齢者や乳幼児用の食品として、または様々な加工食品の原料として有用であり、農産物の廃棄ロスや食品ロスの低減にも寄与します。果汁などの液体食品の殺菌に用いられる交流高電界はペーストのような高粘度の液体食品を安定的に加熱殺菌処理することができませんでした。そこで、高粘度の液体食品で問題となる不規則な電流変化に対応できる冗長性の高い双極性高周波

パルス電源および電極内の電界分布が均一となる3層電極を新たに開発し、図1の交流高電界装置の当該部分を置き換えて高周波パルス加熱装置を作製しました。リンゴピューレを本装置で連続加熱すると、リンゴのビタミンCを保持しながら(図4)、ポリフェノールオキシダーゼは4秒で失活し、褐変を生じることなく長期間保存することが可能となりました(図5)¹¹⁾。現在、各種ペースト食品への応用を進めているところです。

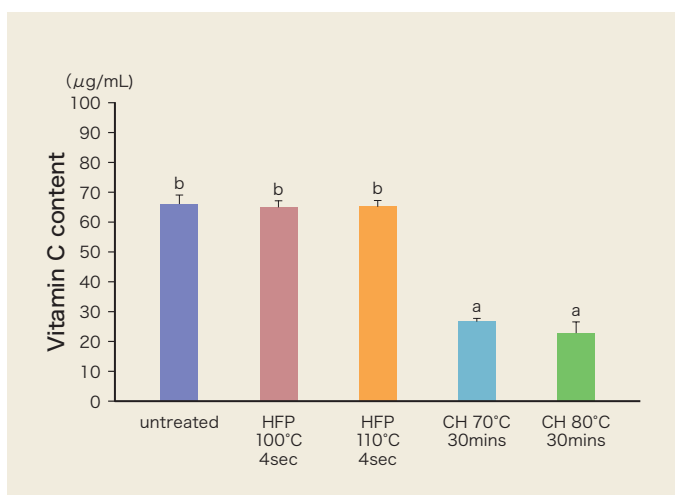


図4 高周波パルス加熱および従来加熱がリンゴのビタミンCに与える影響
左から未加熱、高周波パルス加熱(100°C 4秒)、高周波パルス加熱(110°C 4秒)、
温浴加熱(70°C 30分)、温浴加熱(80°C 30分)



図5 リンゴピューレの保存(5°C、1年間)
左から未加熱、温浴加熱(80°C 30分)、高周波パルス加熱(100°C 4秒)、
高周波パルス加熱(110°C 4秒)

おわりに

ミニマムヒーティング技術として、低粘度液体食品に対応した交流高電界、チルドパウチ食品に対応した水中短波帯加熱、レトルトパウチ食品に対応した水中短波帯加圧加熱、果実や野菜の高粘度ペースト食品に対応した高周波パルス連続加熱について紹介しました。現在は、農産物をまるごと洗浄殺菌処理可能な水中高周波パルス加熱の開発を進めています。本技術を用いることにより、国産農産物および加工食品を高品質な状態のままで長期間保存することが可能になります。ミニマムヒーティング技術が食生活の向上、食品ロスの低減、和食の輸出促進、さらにはSDGs推進に寄与するものと期待されます。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域
食品加工グループ
現 研究推進部 研究推進室)

参考文献

- 1) Uemura, K. and Isobe, S. (2002) Developing a new apparatus for inactivating *Escherichia coli* in saline water with high electric field AC, *Journal of Food Engineering*, 53(3), 203-207.
- 2) Uemura, K. and Isobe, S. (2003) Developing a new apparatus for inactivating *Bacillus subtilis* spore in orange juice with a high electric field AC under pressurized conditions, *Journal of Food Engineering*, 56(4), 325-329.
- 3) 農研機構プレスリリース(2013)「新しい殺菌法(交流高電界殺菌法)を利用した果汁製品の製造が始まります」。
https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nfri/049382.html
- 4) Uemura, K. et al. (2015) Rapid inactivation of pectin methylesterase in tomato juice using high electric field alternating current, *Food Science and Technology Research*, 21(1), 7-11.
- 5) 植村邦彦(2018) 水中短波帯加熱によるポテトサラダの殺菌, 農研機構研究報告 食品研究部門, 2, 15-19.
https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/nfri/report/080865.html
- 6) Lara, G. et al. (2021) Application of radio frequency heating in water for extending the shelf-life of fresh-cut Japanese loquat fruit (*Eriobotrya japonica*), *Food Science and Technology Research*, 27(6), 847-857.
- 7) Lara, G. et al. (2021) Improving the shelf life stability of vacuum-packed fresh-cut peaches (*Prunus persica* L.) by radio frequency heating in water, *International Journal of Food Science & Technology*, 57(6), 3251-3262.
- 8) Uemura, K. et al. (2017) Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuum-packed fish in water, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81(4), 762-767.
- 9) Kanafusa, S. et al. (2018) The effect of radio-frequency heating on vacuum-packed saury (*Cololabis saira*) in water., *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 82(9), 1576-1583.
- 10) Jantapirak, S. et al. (2021) Effect of radiofrequency heating of vacuum-packed nitrite-free sausage on quality properties and microorganism inactivation., *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 85(4), 907-915.
- 11) Lara-Valderrama, G. et al. (2023) Quality characterization of apple puree processed by high frequency pulse continuous heating, *Food Chemistry Advances*, 2, 100228.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100228>

食品の高圧加工

山本 和貴 中浦 嘉子

YAMAMOTO Kazutaka NAKAURA Yoshiko

はじめに

食品高圧加工技術¹⁾²⁾は、林力丸博士による1987年の実用化提言以降、非熱的殺菌^{*1}の手法として、日本で飛躍的に研究開発が進み、1990年に世界初の高圧加工食品がジャムとして実用化されました。一方、「滅菌(完全殺菌)ができない」、「納豆菌などの芽胞は高圧力に強い」など、問題点に議論が集まったこともあり、その後の発展は遅々としたものでした。一方、欧米諸国などでは、この技術が積極的に採用され、肉製品、ジュース、ペースト類の殺菌の他、甲殻類・貝類の開脱殻などにも利用され、装置導入も順調に進みました。更に、受託加工^{**2}事業が盛んになり、数、量ともに多くの高圧加工食品が実用化されています。

食品加工における高圧処理の基礎

食品加工は、熱的加工と非熱的加工とに分類され、食品高圧加工(high pressure food processing)は非熱的加工のひとつです。また、高圧加工には、爆破、衝撃波などにより極短時間で高圧力を印加する動的(dynamic)高圧加工と、徐々に圧縮した後に高圧力を比較的長く印加する静的(static)高圧加工とがあります。後者のうち、水を圧力媒体とし食品産業界でも用いられるものは、高静水圧加工(high hydrostatic pressure processing: HHP processing)と呼ばれます。高圧加工を簡略的に「HPP(high pressure processing)」とすることもありますが、衝撃波加工と高静水圧加工との区別が必要です。食品高圧加工を、「非加熱加工」、「非熱加工」とする記載もありますが、加圧時の断熱圧縮^{**3}による発熱のため、厳密には、非加熱でも完全な非熱でもありません。さらに、

地球科学など、他の高圧科学分野では10~300GPaの高圧力が用いられる一方で、それよりも2~3桁低い100~600MPaで行う食品高圧加工を、「超高圧加工」とするのは如何なものでしょうか。

食品高圧加工に独特で熱加工にない特徴(図1)³⁾は、均一かつ瞬時の圧力伝達、化学反応の抑制、密度最大化などの物理的変化です。これにより、巨視的には、液体が含浸し、気体が溶解して分散し、貝類・甲殻類の開脱殻が進み、組織が軟化します。微視的には、細胞内外の蛋白質が変性し、澱粉が糊化し、細胞膜が損傷し、DNAの高次構造が変化します。これら変化の結果として、微生物が不活性化されます。そのため食品高圧加工は、化学反応を抑制して品質劣化を最小化しつつ、微生物、特に細菌を不活性化⁴⁾⁵⁾して衛生を確保する均一加工法として、食品産業界で着目されています。食品高圧加工での殺菌対象については、病原性・腐敗細菌の知見が多い一方で、^{かび}黴、酵母の知見は、品質劣化に関与するものの、健康被害に直ちにつながる事例が少ないことから限定的です。微生物またはウイルスの高圧不活性化の効果は、生物種、細胞の形状・状態、食品の種類、検出手法、装置、その他の影響を受けます。高圧不活性化における耐圧性は、概ね、芽胞>グラム陽性菌>グラム陰性菌・酵母・黴の順に高く、これは、熱処理での傾向と似ています。菌種・菌株によっても耐圧性は異なります。棒状の桿菌が圧力に弱く、球菌が強い傾向があり、また、安定な定常期の方が、活発な対数増殖期の細胞よりも高い耐圧性を示します。更に、食品に糖質、蛋白質などが多いと、微生物は不活化し難い傾向があり、pH、水分活性、浸透圧などの影響も受けます。一方、健全な細菌(健常菌)へのストレスが強いと死菌となり、弱いと損傷菌⁵⁾⁶⁾になります。損傷菌は、損傷程度に応じて、軽度損傷菌(亜致死的損傷菌)および



各種の高圧加工果実コンポート

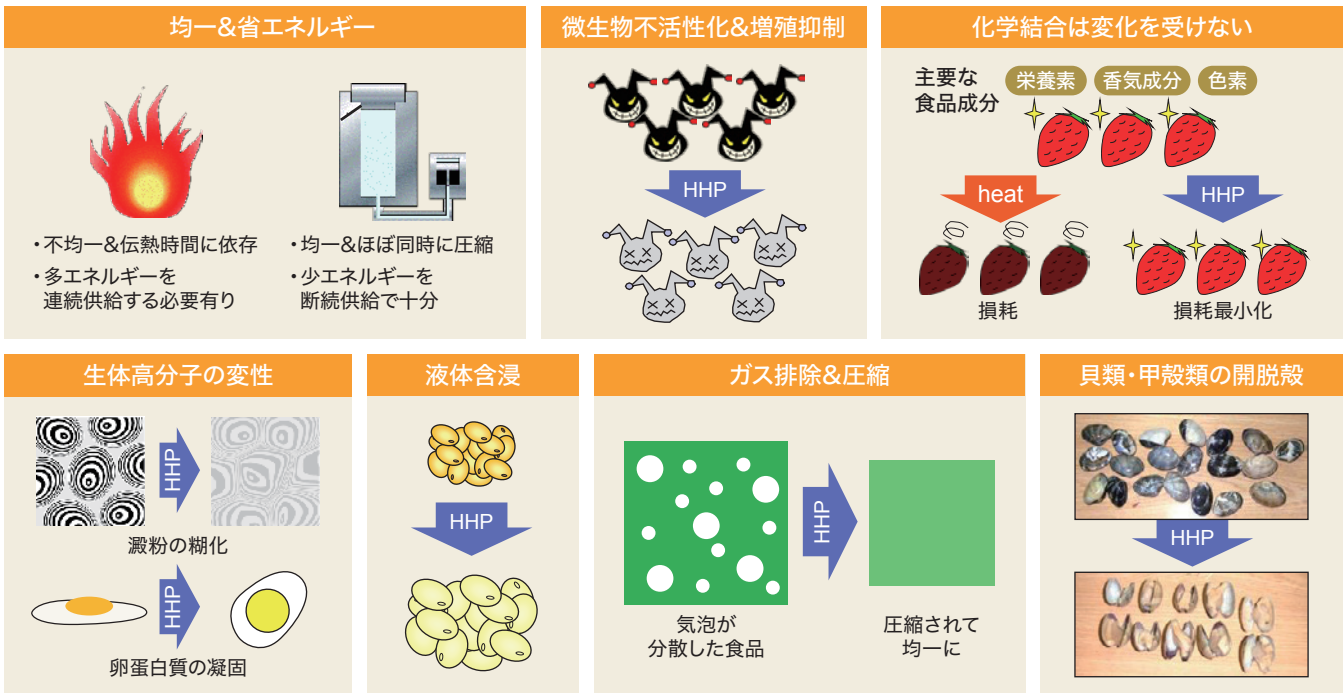


図1 食品高圧加工の特徴 HHP(high hydrostatic pressure; 高圧力/高静水圧力)

重度損傷菌(致死的損傷菌)となり、中度損傷菌が、軽度損傷菌に回復する、または、更に損傷して重度損傷菌となって死滅する、という考え方(図2)⁷⁾があります。損傷菌は、熱の他に、次亜塩素酸、超音波、両性界面活性剤、電子線などの処理、高圧処理によるストレスでも発生します。

食品高圧加工の実際

高圧処理は、殺菌目的とその他用途とに分類されます。殺菌目的では、概ね5~15°C、600MPa、数分間での低温高圧処理が行われます。低温高圧処理は、化学反応が抑制されて色、香りの変化が最小化される利点があるため、ジュースなどの清涼飲料水、肉加工品、総菜などの殺菌に利用されます。特に緑色は、熱で損なわれることが多いので、高圧処理は、緑色を保持するには都合の良い殺

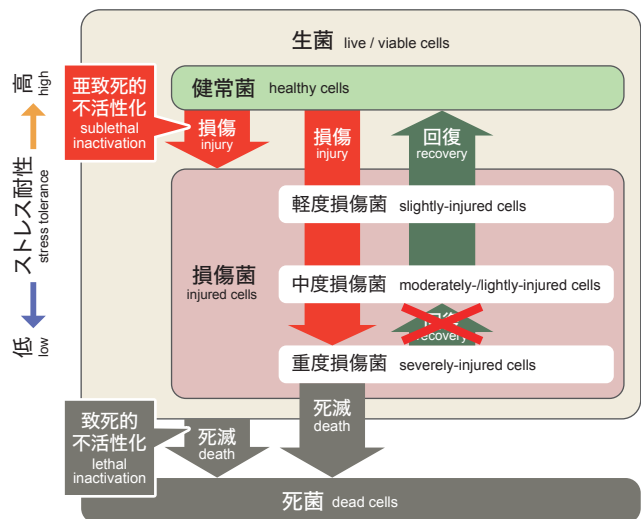


図2 生菌における損傷菌の位置付け
生菌には、健全菌以外に損傷菌が含まれる。損傷菌は、損傷程度によって、軽度/中度/重度損傷菌に分類することが提案されている。重度損傷菌は死滅する運命にある。

菌法と考えられています。具体的には、高圧加工ジュースは、低温高圧殺菌により賞味期限を数週間まで延ばしつつ、絞りとたての生ジュースの風味を実現します。さらに、乳酸菌汚染がしばしば問題となる肉加工においては、一次殺菌後に食品添加物を添加して賞味期限を保持する等の工夫が求められますが、二次殺菌を実現する高圧加工は、肉加工品の低温殺菌法として重宝されています。実際のところ、世界の高圧加工品の内、2割強が清涼飲料水、約3割が肉加工品とも言われています。

日本の高圧加工食品としては、米粒への含水を促進した高圧浸漬無菌包装米飯(1998年)、高圧殺菌で賞味期限を延長した無塩漬^{むえんし}の肉加工品(2005年)などが実用化されましたが、国内の高圧加工食品市場が著しく拡大することはありませんでした。しかしながら、近年再び高圧加工品が着目され、肉製品、サラダ類が販売されています。一方、高圧加工ジュースの製造に関心が高い国内企業は多いのですが、高圧加工ジュースの製造では、食品衛生法の清涼飲料水製造基準において、熱殺菌との同等性を示して個別認可を得る必要があることが参入への障壁となっています。

上記以外の用途としては、貝類・甲殻類の開脱殻(400~600MPa)、酵素分解促進(100MPa近傍)、液体含浸促進(100MPa以上)などがあります。高圧開脱殻は、二枚貝の開脱殻、ロブスターの脱殻簡易化に用いられ、日本でも、牡蠣、アサリなどの二枚貝の高圧開脱殻が実用化されています。従来は専用の治具を使って二枚貝を開殻し、さらに貝柱を削いで身を脱殻して加工用牡蠣としていましたが、高圧処理ではこれら操作が同時に行え、なおかつ手作業の際に解決できなかった殻破片の混入クレーム問題を最小化できる利点があります。近年は、開脱

殻作業者の確保が困難になりつつあるので、高圧処理による開脱殻の自動化に注目が集まっています。100MPa近傍での中高圧加工⁸⁾は、日本独自の技術と言えます。100MPaでは微生物の死滅は期待できませんが、微生物の活動、特に増殖を抑制できます。例えば、味噌、醤油の製造では、高塩濃度または低温で腐敗菌の増殖を抑制して長期熟成を進めますが、高塩濃度も低温も、酵素活性を抑制するため、酵素分解反応に長期間が不可欠です。一方、中高圧加工では、酵素反応中の微生物増殖が抑制されることから、無塩/低温の環境、しかも酵素反応最適温度近傍で酵素反応を進めることが可能ですので、酵素分解に必要な時間が大幅に短縮されます。中高圧加工による商品開発の進展は顕著で、プラセンタエキス、スッポンエキス、ニンニクエキスなどの各種エキス利用製品が実用化されています。

上記いずれの用途においても、液体が食品に含浸する現象がみられます。これを積極的に活用し、低pHの調味液を果実内部にまで含浸させた高圧加工果実コンポート(P11タイトルイメージ参照)が実用化されています⁹⁾。リンゴ、ナシ、モモ、カキなど、特に収穫期が短い果実の高品質加工品が、冷蔵で通年供給できる利点があります。

食品高圧加工の設備・コスト

食品高圧加工では、概して100~600MPaの高圧力が用いられ、中高圧加工では100MPaが、高圧加工では600MPaが一般的に用いられています。食品加工用の実用装置には縦型と横型とがあり(図3)¹⁰⁾、従来の縦型から、近年は、大容量を実現する横型が主流となっています。一般的に、食品加工では大量処理により処理コストを

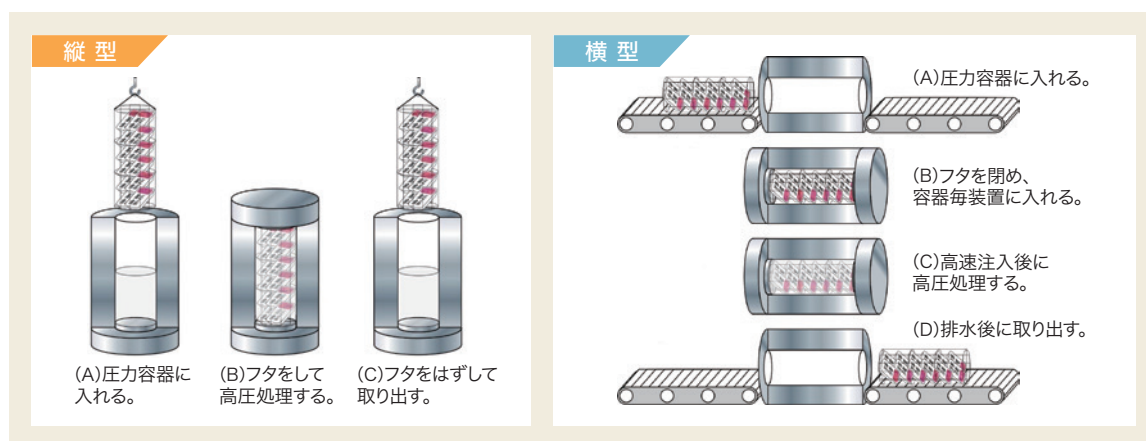


図3 食品高圧加工装置

低減することが求められますので、食品高圧加工においても、処理コスト削減に向けた容器の大型化が重要です。容器大型化のためには、容器径または容器長を増す選択がありますが、容器径を増すと、指数関数的に容器壁を厚くする必要があり、材料だけでも大幅なコストアップになるので、装置製造コスト抑制のためには、容器長を増すの対応が理想的です。しかし、縦型で容器長を増すと、処理品が入ったバケツ(かご)を、最低でも容器長の倍程度以上の高さから釣り上げて取り出さなければならず、天井の高さに制約される問題があります。一方、横型では、設置場所の最大長に応じて如何様にも容器長を増せる利点があるのですが、容器の開放時に圧力媒体の水をすべて取り出し、容器密閉時に水を再度大量に入れるという縦型では不要な操作が必要です。よって、横型では、圧力媒体圧入用ポンプ以外に、高速で圧力媒体を流入させる目的のポンプを併用することで、この問題点を解決します。横型食品高圧加工装置で最大の容器は、容量525Lであり、このうち6~7割が処理可能量です。

食品高圧加工では、5°C近傍で600MPaを課す低温高圧処理が趨勢です。圧力保持時間3~5分間でも、十分な微生物不活性化効果が期待できます。昇圧および減圧の際には、それぞれ断熱圧縮および断熱膨張による加熱および冷却があります。よって、高圧処理を実施する際には、循環恒温水などで制御、特に冷却することが、製品の温度管理上重要です。

食品産業界の特徴は、中小企業または小規模事業者の数が、全体の事業者数の99.7%を占めていることです。それ故に、食品高圧加工装置のような大規模な設備投資ができない企業が多く、受託加工(toll processing/tolling)が注目されています。装置のみを保有する企業が、食品企業から持ち込まれた包装食品を、一回処理当たり、kgなどの単位当たりなどで課金して処理する業態で、海外では益々広がりを見せています。事業者数および装置容量に限りはありますが、日本国内でも中高圧処理(100MPaまで)または高圧処理(600MPaまで)の受託加工が可能です。中小企業への食品高圧加工技術普及のためには、受託加工のさらなる普及が不可欠でしょう。

装置を導入して生産する場合、525L容器の大型装置を、5年償却として、容器充填率60%、16時間/日・300日/年稼動で用いた場合、処理コストは、0.071Euro/kg(約10円/kg:1Euro=137円で計算)と試算されます。8時

間/日・200日/年稼動では、0.213Euro/kg(約29円/kg)です¹¹⁾。食品高圧加工では、このように相応の処理コストが上乘せされますので、冷蔵輸送コストも考慮の上、単価が一定以上の製品に利用すると良いでしょう。

おわりに

食品高圧加工は、実用化の用途が、ジュース、肉製品、野菜、開脱殻などと、些か限定的であり、熱加工に比べて研究開発の歴史も浅いのが現状です。発想を転換すると、未開拓用途および未説明現象が今後さらに見出されると期待できると言えましょう。今後の研究開発が世界で進展することにより、基礎および応用の視点から、技術がさらに発展することを期待しています。ご関心がある方は、ご遠慮なくお問い合わせください。

(食品研究部門 食品加工・素材研究領域
食品加工グループ)

用語解説

- ※1 **非熱的殺菌(nonthermal pasteurization)** 加熱、冷却などによる熱的殺菌(thermal pasteurization)が一般的であるが、圧力、薬剤、放射線など、熱を積極的に使わない手法による殺菌。
- ※2 **受託加工** 装置を持つ企業に食品を持ち込んで加工してもらうこと。食品加工装置は高価なので、特に中小企業の新規事業進出には便利。
- ※3 **断熱圧縮** 物体の温度が上昇する程、断熱的に急激に圧縮して体積を小さくすること。数分間で600MPaまで圧縮する食品高圧加工では、食品に含まれる水の圧縮率が鍵を握る。断熱圧縮による加熱は、食品の初発温度が高い程大きく、低温では約2°C/100MPaのものが、約80°C以上では5°C/100MPaとされる。

参考文献

- 1) Yamamoto, K. (2017) Food processing by high hydrostatic pressure. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81 (4), 672-679.
- 2) 山本和貴(2020) 食品高圧加工における基礎及び応用に関する研究. *日本食品工学会誌*, 21 (1), 11-23.
- 3) 山本和貴(2013) 食品高圧加工の動向. *ソフト・ドリンク技術資料*, 171, 1-18.
- 4) 山本和貴(2019) 物理的微生物制御技術の今とこれから[7] 圧力の利用: 高圧加工による非熱的殺菌. *日本防菌防黴学会誌*, 47 (10), 415-422.
- 5) Yamamoto, K. et al. (2021). Bacterial injury induced by high hydrostatic pressure. *Food Engineering Reviews*, 13, 442-453.
- 6) 山本和貴(2020) 損傷菌[12] 高圧損傷菌. *日本防菌防黴学会誌*, 48 (4), 169-176.
- 7) 山本和貴(2017) 食品高圧加工における食品安全性確保. *食品と容器*, 58 (9), 530-537.
- 8) 森川篤史(2016) 中高圧処理(100~200MPa)装置での有償加工. *食品と容器*, 57 (7), 410-414.
- 9) 中浦嘉子(2017) 中温中高圧加工した果実コンポート. *食品と容器*, 58 (8), 460-466.
- 10) 山本和貴・小関成樹(2007) 第4回高圧バイオサイエンス・バイオテクノロジー国際会議: 食品高圧加工技術の最新動向. *食品と容器*, 48 (3), 150-154.
- 11) Balasubramaniam, V. M. et al. (2016) High-pressure processing equipment for the food industry. In: V.M. Balasubramaniam, G.V. Barbosa-Cánovas, H.L.M. Lelievre (Eds.), *High Pressure Processing of Food*, Food Engineering Series (pp.39-65). Springer.

塩味増強効果の評価と候補物質の探索

河合 崇行

KAWAI Takayuki

はじめに

米飯食中心の日本の食文化において、“塩”や“塩味”はとても大切な要素です。塩味は甘味やうま味を強く感じさせたり、苦味を抑えたりします。食品中の香りを強く感じさせることもあれば、逆に生臭さを抑えることもあります。また、唾液分泌を刺激することで、食品から出てきた風味液を口の中いっぱいに行きわたらせる作用も持っています。塩味を利用することで、ユネスコ無形文化遺産に登録された際の“和食”の説明にある“多様で新鮮な食材とその持ち味を尊重した食事”を実践することできるようになります。適度に塩味の効いた副菜があると、ご飯が進みます。水分を多く含み、油脂をほとんど含まない米飯をたくさん食べることで、少ない脂質量でも満足感が得られるところも“和食”が“健康な食生活を支える栄養バランスを提供してくれる食事”と考えられている一因です¹⁾。

塩味の増強と分析機器に頼らない評価法

塩味は、ナトリウムイオンが味受容細胞の細胞膜上にあるチャネル(ゲート)を通して細胞内へ取り込まれることにより、感じられる味と考えられています。チャネルの孔は非常に小さく、周期表で一段下にあるカリウムイオンですら通すことはありません。他にこの孔を通れるのはリチウムイオンだけです。リチウムは塩味を呈することから、1940年代は塩味代替物として使用されていましたが、大量に摂取すると中毒を起こすことや脳の活動を抑制させる薬効を示すことから、現在は、食品に利用できなくなっています。現在、塩味増強剤や減塩素材として、酵母エキスやダシ、アミノ酸やメイラード化合物などが利用されてい



図1 味の錯覚例

ます。これらは、直接的に塩味を付加している訳ではなく、間接的に塩味が増えたように錯覚させているのです。味の錯覚は、スイカに塩やコーヒーに砂糖など、私たちが日常的に経験している普通感覚(図1)ですが、分析機器を使って正しく評価することはできません。味の錯覚を評価するには、脳による処理が必要となってきます。ヒトによる官能評価が最も重要な評価法です。しかし、細かい描写が可能であるという長所がある反面、個人差・食習慣・食経験などの変動要因による再現性や安定性、定量性の確保が非常に難しいという短所があります。そこで筆者らは、動物行動学試験をベースに、味の錯覚を評価する方法を開発し、ヒト試験と組み合わせて、開発中の塩味増強剤の評価を行いました。動物は言葉を操れないため好きか嫌いかの1次元でしか表現できません。ヒトのように複数の味質が混ざった試料を要素ごとに解して多次元で評価することはできません。我々は、動物に塩味を評価させるために、ナトリウム含量の少ない餌に適切な量の利尿剤を加えた餌を与えることで塩味欲求性を高め、塩味の強さに応じて摂取量(一定時間に舐める回数)が変わる

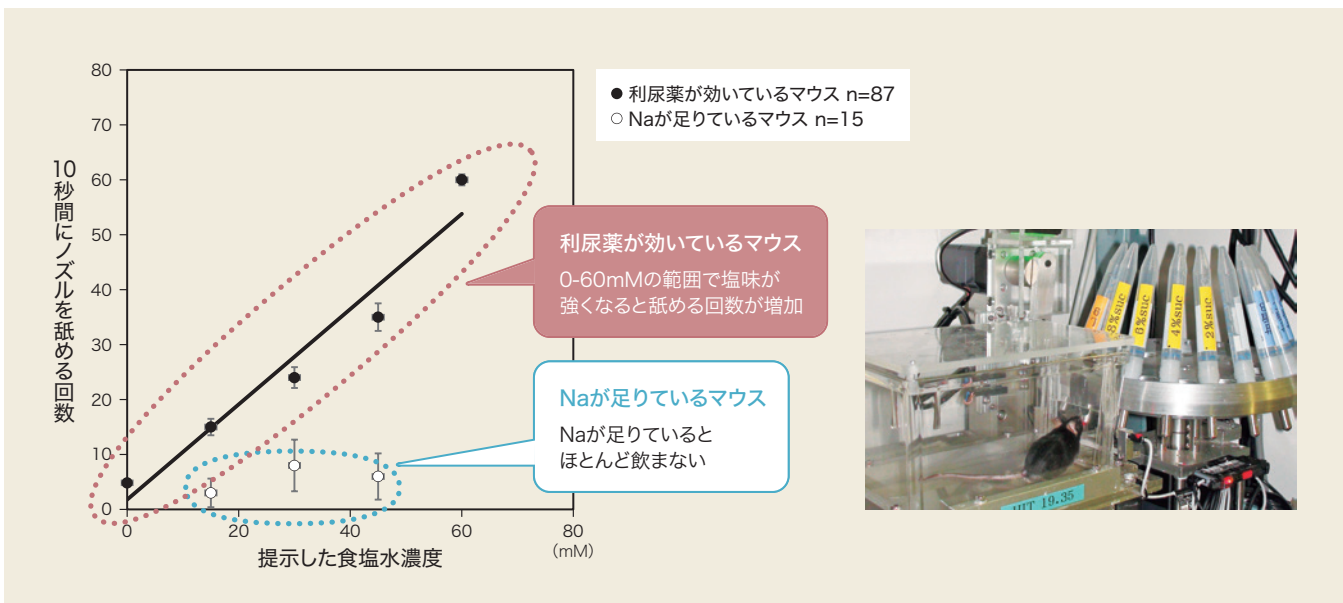


図2 利尿薬投与による塩味欲求性、右図は舐める回数を計測する自作装置

マウスの飼育法を確立しました²⁾(図2左)。一定時間に舐める回数を計測する装置も作成しました³⁾(図2右)。

香辛料由来物質の塩味増強効果

筆者らは、オランダセンニチという香辛料に含まれる痺れ成分であるスピラントール(図3上)にアミノ酸の一種であるアルギニン塩酸塩を添加したものが塩味増強効果を持つことをマウスとヒトの両方で検証しました⁴⁾⁵⁾。食塩水にスピラントール、アルギニン塩酸塩、あるいはその両方を添加した溶液の塩味の強さを、塩味欲求性マウスを利用して評価しました。その結果、スピラントール30ppm^{*1}のみの添加では1.5倍程度の塩味増強しか見られないものの、アルギニン塩酸塩を15mmol/L^{*2}添加することにより、増強効果が約2.0倍にまで拡大することを明らかにし

ました(図3左下)。減塩した実食品とそれらにスピラントールとアルギニン塩酸塩を添加した食品の塩味の強さをヒト官能試験にて比較したところ、すべての食品で塩味の増強が認められました(図3右下)。このことから、スピラントールとアルギニン塩酸塩の混合剤が塩味増強剤として有効であると考えられました。

香りによる塩味増強

パイナップルやバナナの香気が甘味を強く感じさせたり、ベーコンや醤油の香気が塩味を強く感じさせたりすることが知られています。意外な組み合わせは少なく、甘味や塩味を強めると言われている香気は、甘い食品や塩辛い食品に含まれる成分です。その理由のひとつに、食経験に基づいた味と香気の変換記憶が考えられます。筆者ら

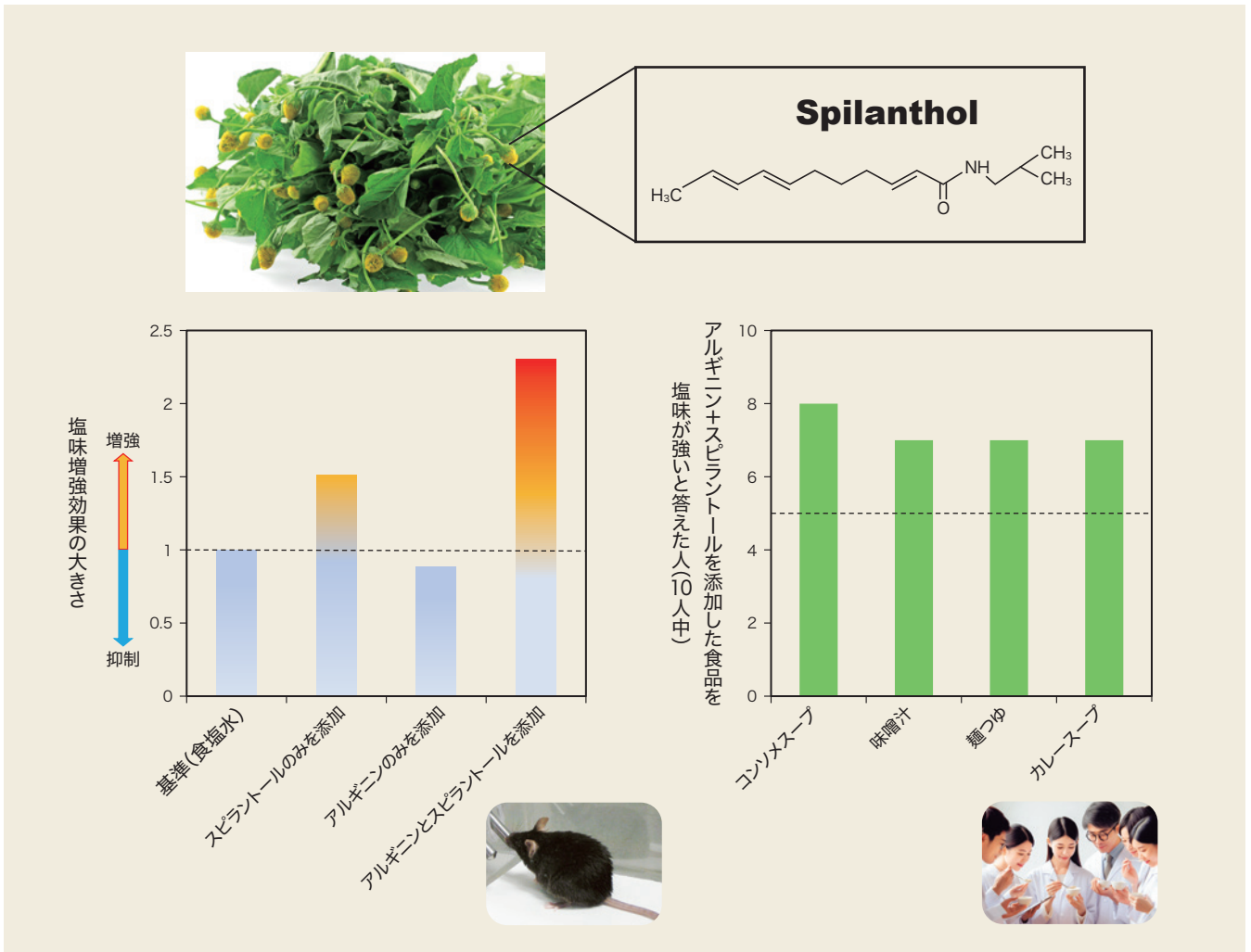


図3 上:オランダセンニチとスピラントールの構造、左下:動物による評価結果、右下:ヒトによる評価結果

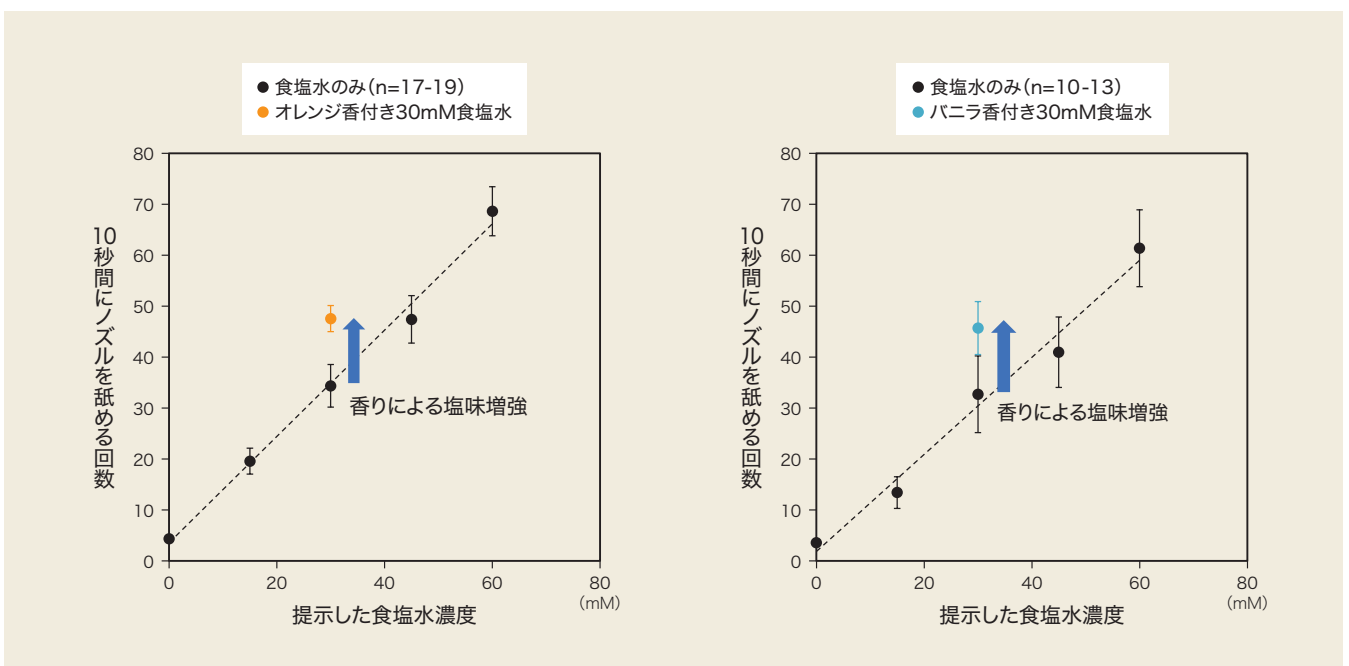


図4 左:仔マウス時期にオレンジ香付き食塩水を経験した大人マウスでの塩味評価、
右:仔マウス時期にバニラ香付き食塩水を経験した大人マウスでの塩味評価

は、子どもの頃の食経験によって、バニラ香やオレンジ香でも塩味増強効果を示すか否かを調べる実験を行いました⁶⁾⁷⁾。ヒトに対して長い期間をかけて食経験をコントロールすることは不可能です。マウスを使って試験を行いました。その結果、6週齢の仔マウス時期に3週間オレンジ香付き食塩水を経験したマウスは、10週齢以降の大人になっても、香なし食塩水よりもオレンジ香付き食塩水に強い塩味を感じていることが明らかになりました(図4左)。同様に、仔マウスの時期にバニラ香付き食塩水を経験したマウスは、大人になっても、香なし食塩水よりもバニラ香付き食塩水に強い塩味を感じていることが明らかになりました(図4右)。我々には一見マッチングしていないように感じられる味と匂いの関係であっても、子どもの頃の経験により連合学習する可能性を示していると考えられます。減塩市場が拡大し、子どもの頃からしょっぱい食品を食べない世代が大人になったときには、塩味増強効果を持つ香りは無くなっているかも知れません。

おわりに

本稿では、塩味の増強錯覚を引き起こす食品成分とその効果の評価法について紹介してきました。現在市販されている減塩食品は、減塩によって失われたおいしさを複雑な味の組み合わせで補い、単体でもたくさん食べられるように設計された商品がほとんどです。減塩前のオリジナル食品と同じ味にはなっていません。単体でもたくさん食べられる味であることは、ご飯が進む味ではなくなってしまっていることを意味しています。ナトリウムが与えてくれる塩味は、唯一無二の味覚なのです。近年では、減塩素材を使わず塩だけで塩味増強させる技術が報告されています。舌に直接接触する部分の塩味を通常濃度より強くし、その他の部分を低くすることによって、全体の塩分量を減らす作戦です。中空状の塩で表面積を大きくしたり、粗挽きの塩を混ぜたりして、短時間のみ強い塩味を感じさせる方法が有効であることが知られています。流行りの3Dプリンタ食を使った官能試験においても、層構造の両端にのみ強い塩味をつけた不均一モデル食品が均一塩味食品よりも有意に塩味を強く感じたことが報告されています⁸⁾。筆者らは、低塩で発酵させた漬け菜に塩分高めの乾燥ふりかけを載せることで50%減塩野沢菜漬けを試作しました。アンケートを用いて評価してもらったところ、

約3分の2の人から「ご飯が進む味だ」との回答を得ることができました。塩分摂取量を減らしつつ、しっかりした塩味を残す技術開発は、日本人の主食がご飯である限り、まだまだ伸びていくものと考えられます。

(食品研究部門 食品健康機能研究領域
ヘルスケア食グループ)

用語解説

※1 ppm(パーツ・パー・ミリオン) 液体の微量な濃度を示す単位。

※2 mmol/L(ミリモル毎リットル) 濃度の単位。

参考文献

- 1) 農林水産省ホームページ「和食」がユネスコ無形文化遺産に登録されています。
<https://www.maff.go.jp/j/keikaku/syokubunka/ich>
- 2) 河合崇行ら(2008) リックカウンターを用いた塩味増強効果の測定. 日本味と匂学会誌, vol.15(3), 489-492.
- 3) 河合崇行(2011) 動物行動学に基づいた美味しさの評価およびリック計測器の開発. 食糧, vol.49, 1-20.
- 4) 特許第6519847号(2019) 塩味増強剤. 河合崇行ら.
- 5) 河合崇行ら(2015) 塩味増強効果のある食品素材の探索. 農研機構 研究成果情報.
https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nfri/2015/nfri15_s18.html
- 6) 河合崇行・日下部裕子(2015) 甘味・塩味における呈味増強香気の学習効果の検証. 日本味と匂学会誌, vol.22(3), 321-324.
- 7) 河合崇行ら(2017) 塩味を想起する香りとその記憶. 農研機構 研究成果情報.
https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/nfri/2017/nfri17_s05.html
- 8) 堀内真美ら(2021) 3Dフードプリンターによる介護食の造形および造形物評価. 日本食品工学会誌, vol.22(1), A12-A16.

ヒトミルクオリゴ糖主要構成成分の食品利用を指向した合成法

西本 完

NISHIMOTO Mamoru

はじめに

ヒトの母乳に含まれる糖質成分は乳児のエネルギー源として非常に重要な乳糖(以下ラクトース)が大半を占めています。また、ラクトース以外にも250種類以上の構造が異なるオリゴ糖が報告されていて、それらは総称してヒトミルクオリゴ糖(以下HMO)と呼ばれています。HMOはラクトースと異なり、胃や小腸では消化・吸収されず、大腸内に棲息するビフィズス菌などによって利用されていることがわかってきました。特に、ラクト-*N*-ビオースI(以下LNB)は哺乳類の中でもヒトにしか見られない特徴的なオリゴ糖であり、このLNBを含むHMOはI型と呼ばれています(図1)。このI型HMOを効率的に利用しているのが乳児の腸内細菌叢の主役となるビフィズス菌(以下乳児型ビフィズス菌)です。

ビフィズス菌がLNBを利用する仕組み

HMOの多くはヒトが持っている消化酵素によって分解

されにくいと、特定保健用食品の保健機能で腸内環境改善を謳う多くのオリゴ糖と同様に、消化・吸収されずに大腸に到達し、腸内細菌の餌(エネルギー源)となります。LNBはガラクトースと*N*-アセチルグルコサミンが β 1,3-結合した2糖であり、やはりヒトの消化酵素では分解されません。しかしながら、乳児型ビフィズス菌はこの結合を分解し、LNBからガラクトース1リン酸と*N*-アセチルグルコサミンを生成する特異的な糖質加リン酸分解酵素^{※1}を持っていることがわかってきました¹⁾。また、ゲノム解析の結果、その酵素遺伝子周辺には、LNBの取込み、代謝に関連する酵素遺伝子群が存在しており、LNBの加リン酸分解で生じたガラクトース1リン酸を利用するだけでなく、遊離した*N*-アセチルグルコサミンも特別なリン酸化酵素の働きで*N*-アセチルグルコサミン1リン酸に変換して利用しています²⁾。これらの糖1リン酸は解糖系の出発物質であるグルコース1リン酸やグルコース6リン酸に容易に変換され、最終的に生体のエネルギー通貨と呼ばれるATPが作り出されます。つまり、乳児型ビフィズス菌はLNB分子を独占的に余すところなく利用し、乳児腸管内での寡占状態を実現していることが示唆されました。

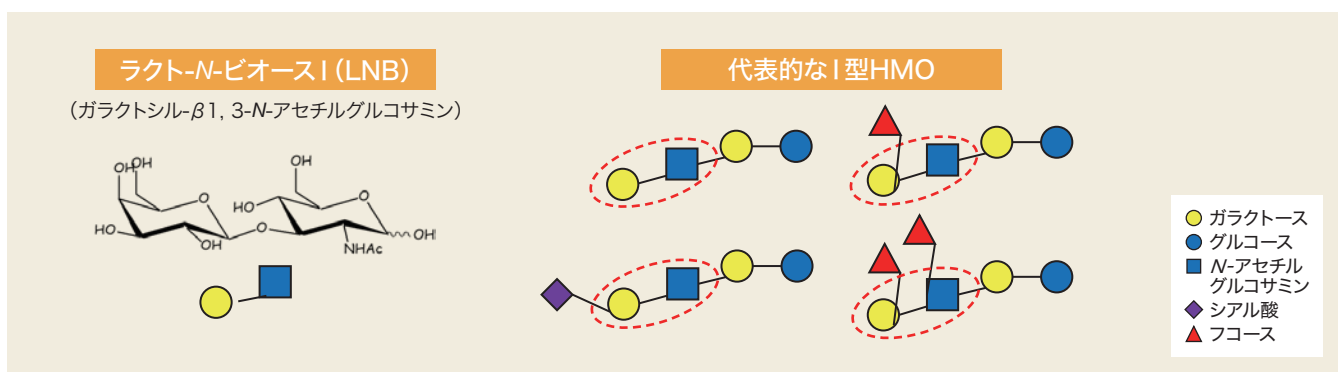


図1 LNBの構造、および主なI型HMOの模式構造
LNBはI型HMOの共通構造(赤色破線囲み)。



調製したLNB粉末

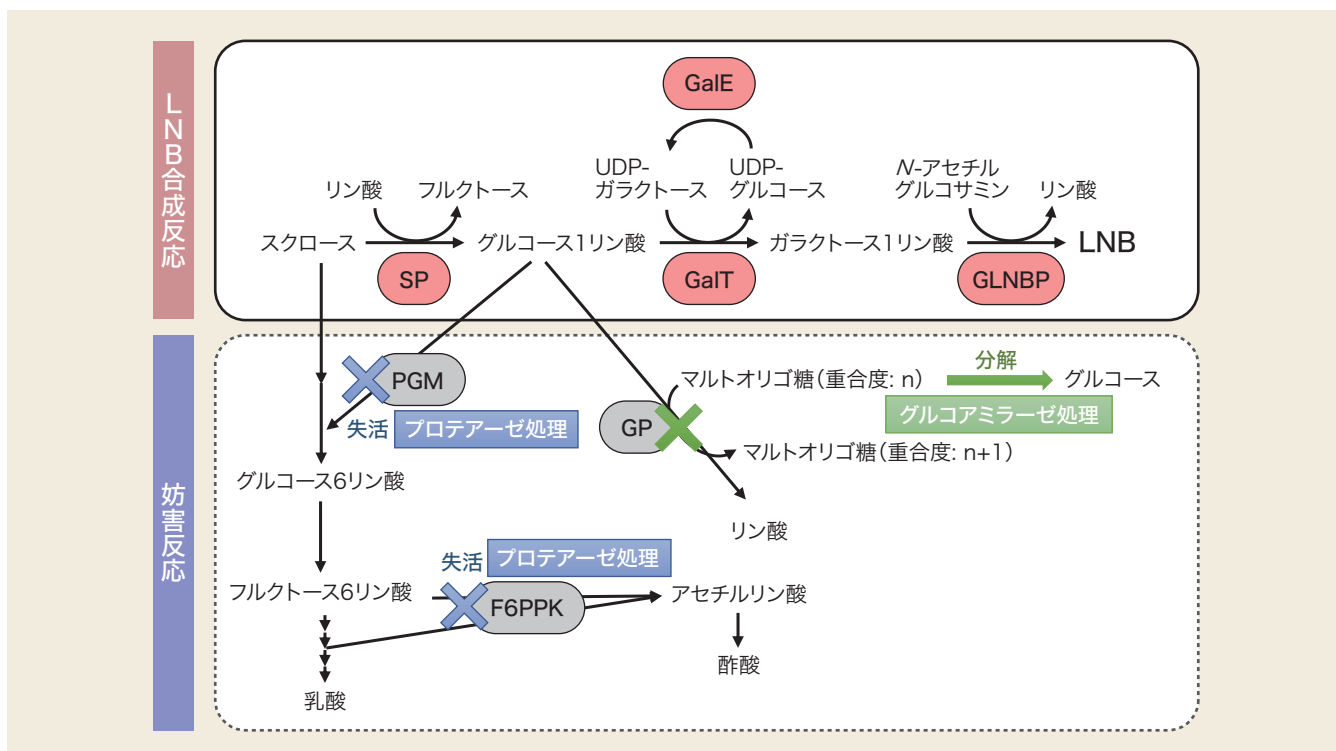


図2 LNB合成反応(上)、および妨害反応(下)の概要

SP、GalT、GalE、GLNBPの4種の酵素によりスクロースとN-アセチルグルコサミンからLNBを生成。
PGM、GPが中間産物のグルコース1リン酸を消費しLNBの生成を妨害。F6PPKはグルコース1リン酸の消費を加速。
これらの妨害反応を各種処理により抑制することでLNBの生産性を向上。

酵素を利用したLNB合成

ビフィズス菌がLNBを利用していることを証明するためには、LNBのみを炭素源とする培地でビフィズス菌の増殖を確認し、ビフィズス菌のLNB利用性を検証する必要があります。そのためには十分な量のLNBを確保しなければなりません。しかしながら、LNBは大量には販売されていないことから、自身でLNBを調製する技術を開発しました³⁾。原材料となる砂糖(以下スクロース)とN-アセチルグルコサミンにビフィズス菌の4種類の酵素を作用させることで図

のようにLNBを生成することができます(図2上)。これは上述の乳児型ビフィズス菌がLNBを利用してエネルギーを獲得する仕組みに着想を得たものです。スクロースからスクロースホスホリラーゼ(以下SP)により生成したグルコース1リン酸をUDP-グルコース:ガラクトース1リン酸ウリジリルトランスフェラーゼ(以下GalT)およびUDP-グルコース4-エピメラーゼ(以下GalE)の働きでガラクトース1リン酸に変換し、それとN-アセチルグルコサミンを基質として1,3-β-ガラクトシル-N-アセチルヘキソサミンホスホリラーゼ(以下GLNBP)の合成反応によってLNBが生成します。

また、原材料の濃度を高く維持することで生成したLNBの分解を抑制し蓄積することができます。この反応液から副生成物などを取り除き、検証に必要な量のLNBを調製することができました⁴⁾。さらに、調製したLNBを用いた培養試験により、LNBがビフィズス因子として働くこと、ビフィズス菌の中でも特に乳児型ビフィズス菌の増殖を促進することを明らかにしました⁵⁾⁶⁾。このようなビフィズス菌増殖促進効果は食品として摂取することで、腸内での選択的なビフィズス菌の増殖による腸内環境の改善、特に乳児腸管内でのビフィズス菌占有率の向上が期待できます。

ビフィズス菌によるLNB合成

先に述べた酵素合成法はビフィズス菌由来の酵素を大腸菌に生産させた遺伝子組換え酵素を使用していました。この遺伝子組換え酵素はLNBを精製する際に除去されることから、最終製品であるLNBの中には存在し得ないのですが、日本国内における遺伝子組換えに対する受容度が低いことから遺伝子組換え技術に頼らないLNB製造法を開発することとしました。LNBの合成に必要な酵素は図2に示した4種類です。ビフィズス菌はそれら4種の酵素を持っていることから無細胞抽出液^{*2}を調製し、LNB合成の原材料となるスクロースとN-アセチルグルコサミンを添加することによりLNBが生成します。ただし、LNBの生成量はごくわずか(19mM^{*3})です。その原因として考えられるのが、無細胞抽出液に含まれている多くの夾雑物^{きょうざつぶつ}によるLNB合成反応の妨害です。特に、糖質の代謝に関わる酵素群、ホスホグルコムターゼ(以下PGM)、フルクトース6リン酸ホスホケトラーゼ(以下F6PPK)、グリコーゲンホスホリラーゼ(以下GP)がLNB合成に必要なグルコース1リン酸を消費してしまい、LNB合成反応を妨害することがわかりました(図2下)。この妨害反応を回避する手段として必要な酵素だけを精製して使用することが考えられますが、精製にはそれなりのコストがかかってしまい、最終製品への価格転嫁が避けられません。したがって、精製酵素の使用は実用化を困難なものにしてしまいます。そこで本技術では、ビフィズス菌無細胞抽出液中の夾雑物を除去し、4種の酵素を選択的に残存させつつ妨害する酵素を失活させる簡便な方法について検討を行いました。その結果、後述する限外ろ過^{*4}、プロテアーゼ^{*5}、グルコアミラーゼ^{*6}、原材料追加4処理により、効率的にLNBを合成する技術を開発しました⁷⁾。

限外ろ過処理

ビフィズス菌の無細胞抽出液には細胞内に存在する様々な低分子化合物が含まれています。中でも、グルコース1,6-ビスリン酸、ATPはそれぞれPGM、F6PPKの反応に欠かせない低分子化合物です。そこでこれらが無細胞抽出液から除去することを目的として、中空糸膜{SLP-0053(分画分子量10,000)、旭化成}による限外ろ過を行いました。その結果、低分子化合物を除去した無細胞抽出液を用いたLNBの合成量は未処理区の約2倍の42mMにまで向上しました(図3)。

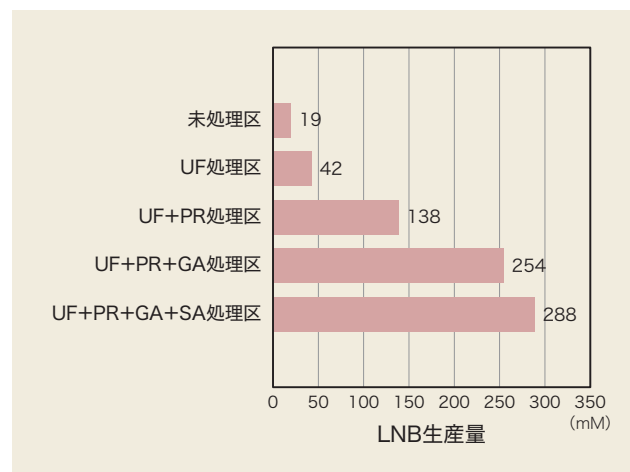


図3 各種処理によるLNB生産性
限外ろ過処理(UF)、プロテアーゼ処理(PR)、グルコアミラーゼ処理(GA)、原材料追加処理(SA)。

プロテアーゼ処理

低分子化合物の除去だけでは阻害要因の排除が不十分だったため、次にプロテアーゼ処理を検討しました。プロテアーゼの種類によってタンパク質に対する感受性がそれぞれ異なることから、LNB合成に必要な4種の酵素活性は保持したまま、妨害するPGM、F6PPK、GPの活性だけを低下させる作用条件について、食品製造に利用されている8種のプロテアーゼを用いて検証しました。その結果、パンクレアチンを用いて47°Cで1時間処理することで、LNB合成に必要な酵素の活性は十分に保持したまま、PGM、F6PPKの活性を1%以下に低下することができました(図4)。また、先述の膜ろ過処理に本プロテアーゼ処理を組み合わせることでLNB合成量は7倍の138mMにまで向上しました(図3)。

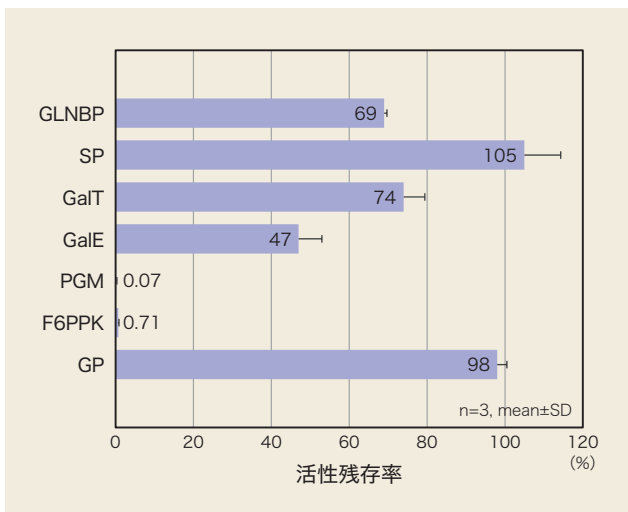


図4 プロテアーゼ(パンクレアチン)処理後の残存活性

グルコアミラーゼ処理

プロテアーゼ処理においてPGMおよびF6PPKの失活条件を見出したものの、GPの活性を低下させる処理条件が見つからなかったことから、GPの基質となるマルトオリゴ糖のグルコアミラーゼによる分解を検討しました。その結果、プロテアーゼ処理の際にグルコアミラーゼを添加することでマルトオリゴ糖を分解し、GPの働きを無効化できることがわかりました。膜ろ過処理、プロテアーゼ処理に本グルコアミラーゼ処理を組み合わせることで、LNB合成量は13倍の254mMにまで向上しました(図3)。

原材料追加処理

LNB合成が進むにつれ原材料がLNBに変換されることで見かけ上のLNB合成反応が遅くなります。そこで減少した原材料を反応液中に追加し、その解消を試みました。その結果、反応開始後3日目と7日目にスクロースを追加することでLNBの生産性が向上することを見出しました。これまでのすべての処理を組み合わせることでLNB合成量は未処理区の15倍、288mMまで向上しました⁸⁾(図3)。

おわりに

本稿では、大量調製法を確立したLNBの機能性を検証することで新たに見出されたビフィズス菌増殖促進効

果を享受するため、LNBの食品利用を目指した効率的な合成法の開発について紹介しました。なお、本研究の一部は森永乳業株式会社との共同研究によって実施されたものであり、LNBの製品化に向けた実証試験などを進めていく予定です。一方、冒頭で述べたように、HMOの中だけでも250種以上のオリゴ糖が存在しており、オリゴ糖の種類は構成糖や結合様式の違いから無数に存在するといっても過言ではありません。これまでに製品化されているオリゴ糖・多糖はそのうちのごくわずかであり、オリゴ糖・多糖の機能性研究はまだ開拓の余地が残されています。今後、そのほかの様々なオリゴ糖についても、新たな機能性の発掘に取り組んで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
食品素材開発グループ)

用語解説

- ※1 **糖質加リン酸分解酵素** 糖質と無機リン酸を基質として糖リン酸を生成しながら糖質を分解する反応を触媒する酵素の総称。
- ※2 **無細胞抽出液** 物理的、または化学的方法によって菌体(細胞)を破碎し、細胞内の成分を溶出させた溶液。
- ※3 **mM(ミリモラー)** モル濃度の単位。
- ※4 **限外ろ過** 大きい溶質分子を小さい溶質分子や溶媒分子からふるい分ける分子レベルのろ過。
- ※5 **プロテアーゼ** タンパク質中のペプチド結合の加水分解反応を触媒する酵素の総称。
- ※6 **グルコアミラーゼ** 澱粉の α -グルコシド結合を非還元末端側からグルコース単位で加水分解する酵素。工業的には澱粉の糖化に利用。

参考文献

- 1) Kitaoka, M. et al. (2005) Novel putative galactose operon involving lacto-*N*-biose phosphorylase found in *Bifidobacterium longum*. Applied Environmental Microbiology. 71 (6) 3158-3162.
- 2) Nishimoto, M. and Kitaoka, M. (2007) The complete lacto-*N*-biose I/galacto-*N*-biose metabolic pathway in *Bifidobacterium longum*: Identification of *N*-acetylhexosamine 1-kinase. Applied Environmental Microbiology. 73(20) 6444-6449.
- 3) 特許第4915917号(2012) ラクト-*N*-ビオース及びガラクト-*N*-ビオースの製造方法. 北岡本光・西本完.
- 4) Nishimoto, M. and Kitaoka, M. (2007) Practical preparation of lacto-*N*-biose I, the candidate of the bifidus factor in human milk. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. 71 (8) 2101-2104.
- 5) Kiyohara, M. et al. (2009) Prebiotic effect of lacto-*N*-biose I on bifidobacterial growth. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. 73(5) 1175-1179.
- 6) Xiao, J. Z. et al. (2010) Distribution of in vitro fermentation ability of lacto-*N*-biose I, a major building block of human milk oligosaccharides, in bifidobacterial strains. Applied Environmental Microbiology. 76 (1) 54-59.
- 7) 特願2020-65664(2020) 酵素含有組成物の製造方法. 西本完ら.
- 8) Machida, S. et al. (2022) Production of lacto-*N*-biose I using crude extracts of bifidobacterial cells. Journal of Applied Glycoscience. 69 (2) 15-21.

新しい成熟変異を活用した トマトの日持ち性改善

伊藤 康博

ITO Yasuhiro

はじめに

多くの果実類は成熟することで食品として利用できるようになります。成熟前は果肉は硬く、渋味や酸味が強かったり、あるいは青臭さなどがあつたりで食品としては不適なことが多いですが、成熟の開始とともに果皮は赤や黄色などに鮮やかに色付き、果肉は軟らかくなり、また酸味が減って甘みが増し、さらに華やかな芳香が漂いはじめ、おいしく食することができるようになります。一方で保存期間が長くなると、成熟過程の進行は過剰な軟化による果実の損傷、腐敗などの品質低下を招きます。このように成熟過程は果実類を利用するために大事なステップです。この過程を上手に制御して果実品質を向上させることができます。様々な果実類のうち、トマトはモデル植物としてこの成熟過程の研究に広く利用されています。ここではトマトの成熟を制御する遺伝子の機能解明に関する研究について、またその過程で得られたゲノム編集変異体が、当初思いもよらない性質を示し、高日持ち性育種への可能性を見出した研究について紹介します。なおトマトの日持ち性については、丁寧に収穫、迅速に流通してスーパーに陳列、新鮮なうちに食される、という場面ではあまり問題になりません。しかし業務向け加工用トマトでは、成熟開始日がまちまちな果実を畑で一斉収穫し、ある意味、雑な集荷を経て工場へ運搬される工程では重要な形質になります。

トマトの成熟の特徴

トマトの成熟は他の多くの果実類と同様、果実自身が発するエチレンによってコントロールされています。十分な大きさに成長し内包する種子が充実した頃に成熟期が

始まります。エチレンの生産が急増し、それを機に赤くなる、軟らかくなる、香りや味の分量が急変する、という現象が同時に進行します。この時期の遺伝子発現の変化は劇的で、多くの成熟形質に関連する遺伝子が一斉に、そして爆発的に転写量の増加を見せます。成熟過程全般が「同調的に」進行するので、色素合成や果肉軟化などに関わる遺伝子は同じような転写制御を受けているように見えます。日持ち性を向上させるということは、この同調性を崩し、色素合成は普通に進むが軟化は抑制させたい、という成熟進行全体から見ると相反する現象を行おうとすることになります。

トマトでは成熟が全く進まない突然変異がいくつか知られています。そのうちのひとつ、*ripening inhibitor (rin)* 変異は特に有名で、この変異を持つトマトは成熟直前まで通常の生育を示しますが、時期が来ても成熟が開始しません。長期の保存後も赤くも軟らかくもならずその姿を保ちます(図1)。この変異は世界中で育種に利用されており、野生型遺伝子を持つ親と交配して得られたF₁品種の果実は両親の中間型の性質を示し、野生型親より赤みが弱いものの日持ち性が大きく改善されます。

RIN遺伝子の機能

*rin*変異はある転写因子遺伝子の部分欠失が原因であることをアメリカのグループが明らかにしました。転写因子とは、DNAに結合してmRNAの転写を調節するタンパク質で、遺伝子が適切な位置(組織)で適切な時期に働くようにコントロールする役割を担っています。RINと呼ばれるこの転写因子の機能研究により、特定のDNA配列に結合して転写活性化能を持つことを明らかにしました¹⁾。RINが転写を直接調節している成熟関連遺伝子を250遺伝子

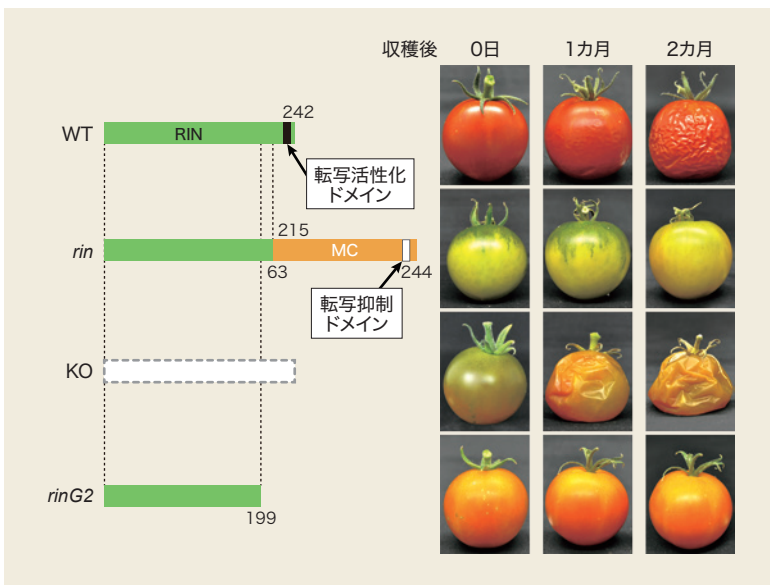


図1 野生型RIN遺伝子(WT)および3種の変異型遺伝子がコードするタンパク質の構造とその変異による果実の表現型

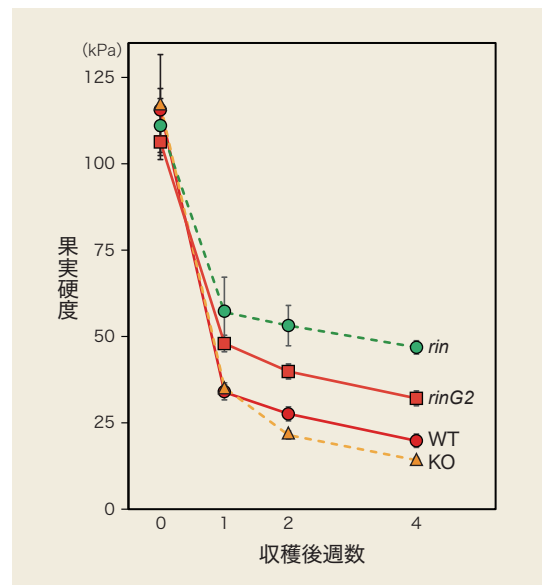


図2 RIN遺伝子の3種の変異トマトの軟化 (Ito, Y. et al. 2020⁴⁾を改変)
成熟前および成熟開始後1、2、4週後の果実硬度を測定。5果以上の測定値の平均。エラーバーは標準誤差を示す。

ほど見出しています²⁾。これにはエチレン合成や軟化、あるいはカロテノイド合成の主な遺伝子が含まれ、RINが成熟の主要制御因子であることが裏付けられました。

しかしながら最近rin変異について、世界中の研究者がその効果を誤って理解してきたことが判明しました。前述のようにrin変異トマトは全く成熟しませんが、これは変異によって野生型遺伝子が「機能を失った」と考えられてきました。ところがゲノム編集法により作出した野生型遺伝子が全く機能しないノックアウト(KO)変異トマトは、rin変異トマトと異なり、成熟が不完全ながらも開始・進行しました³⁾(図1)。実はrin変異では、遺伝子の一部の欠失により、発現時に複雑な過程を経て隣の遺伝子(MC)と融合したmRNAが合成され、翻訳された融合タンパク質は転写を“抑制”する転写因子機能を持っていました¹⁾³⁾(図1)。つ

まり成熟期における成熟関連遺伝子群について、①RINがなくても発現が開始するものがある、②RINがあれば強力に発現促進される、③rin変異型タンパク質は転写を強く押し止める、ということを明らかにしました³⁾。rin変異は機能を失った変異である、という従来の常識を完全に否定したことになります。

RIN遺伝子の新たな変異の活用

rin変異トマトでは全く蓄積しないリコピンが、KO変異トマトでは少量ながらも蓄積するので、成熟が不完全に進行するように見えます。ただ不思議なことに、果肉の軟化は野生型トマトよりも進行し(図2)、最終的には水風船のように果肉がドロドロになります⁴⁾(図1)。成熟現象の同

調性が異常になった、という見方もできます。

一方で同じくゲノム編集技術により、*rin*変異ともKO変異とも異なる変異を作出しました。*rinG2*と名付けたこの変異により、RINの末端部分が欠落したタンパク質ができます⁴⁾(図1)。KO変異と違ってタンパク質自体はできますが、RINの主要な機能である転写活性化に必要な領域を失っています。つまり野生型RINの転写活性化能もないし、*rin*変異型タンパク質の転写抑制能もない、ということからKO変異と同様の効果が予想されましたが、全く異なる形質を示しました。*rinG2*変異トマトのリコピン蓄積はKO変異と同様でわずかですが、β-カロテンについては野生型トマトよりも多く蓄積し、KO変異トマトよりも鮮やかな色合いを示します。一方で軟化はあまり進まず、*rin*変異型には及ばないものの日持ち性の明らかな改善が認められました(図1、2)。過剰な軟化が進んだKO変異とは対照的です。著しくカロテノイド合成が低下して色付きの悪い*rin*変異トマトと比べ、オレンジ色ながらこの合成過程が進行する*rinG2*変異トマトは高日持ち育種の素材として魅力的です。日持ち性を保ちながら、トマトらしい赤色を呈するよう改良していくことが今後の課題です。そこでゲノム編集法によりリコピンをβ-カロテンに変換する酵素の量を低下させたところ、リコピン量が増加して少し赤みが増しましたがまだ十分ではありません⁴⁾(図3)。また野生型遺伝子を持つトマトと交配したF₁系統は両親の中間型で、かなり赤くなりますが、やはり日持ち性も中間で、*rin*変異とのF₁系統と比べると日持ち性は劣ります⁵⁾(図4)。*rinG2*変異の上手な利用法を現在も検討しています。

*rin*遺伝子座の様々な変異の影響

これまで述べたように、*rin*変異、*rinG2*変異、KO変異はそれぞれ全く異なる表現型を示します。同じ遺伝子由来の変異にも関わらずこれほど多様な表現型を示すことは全くの予想外でした。特にカロテノイド合成と軟化に限ってもその違いは顕著で、これらの変異体の比較によって、リコピン蓄積と日持ち性を向上させるヒントが得られるかもしれません。野生型、および3つの変異体の網羅的遺伝子発現解析から、それぞれの変異体の特徴が浮かび上がってきました⁴⁾(図5A)。例えば、野生型とKO型トマトとの比較により、多くの遺伝子が「RINがない」ことで発現上昇しており、ここにKO型トマトが過剰に軟化する原因が見出せるかもしれません。また、*rinG2*型と野生型、*rin*型との相違点から、軟化抑制の鍵を見出すことが期待できます。

成熟関連の主要遺伝子の発現レベルを、野生型とそれぞれの変異型で比較しました(図5B)。これらの遺伝子の多くは*rin*変異トマトで強く発現が抑制されます。全体として、KO型、*rinG2*型でも野生型と比べて発現は抑制されますが、*rin*型ほどではありません。軟化について、*rinG2*型において*rin*型と同様に発現が抑えられている遺伝子はPG2a、MAN4、CEL2がありました。これらのうちKO型では、MAN4が野生型より強く発現し、PG2aは*rinG2*型や*rin*型と比べて発現抑制程度は弱く、CEL2は同レベルで低い発現でした。これだけ見るとMAN4が軟化に大きく影響しそうな気もしますが、以前の研究でこの遺伝子の発現抑制組換えトマトでは明確な軟化抑制は見られなかったと

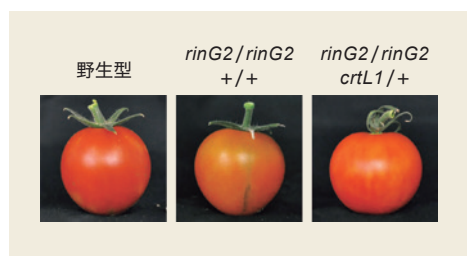


図3 *rinG2*変異体に*CrtL1*遺伝子のノックアウト変異を導入した果実
リコピンをβ-カロテンに変換する酵素遺伝子*CrtL1*について、ノックアウト変異を*rinG2*変異体に導入した。この変異をホモに持つとアルビノになって生育できないが、ヘテロ(*crtL1/+*)だと生育が可能になり、リコピン蓄積が増加した。

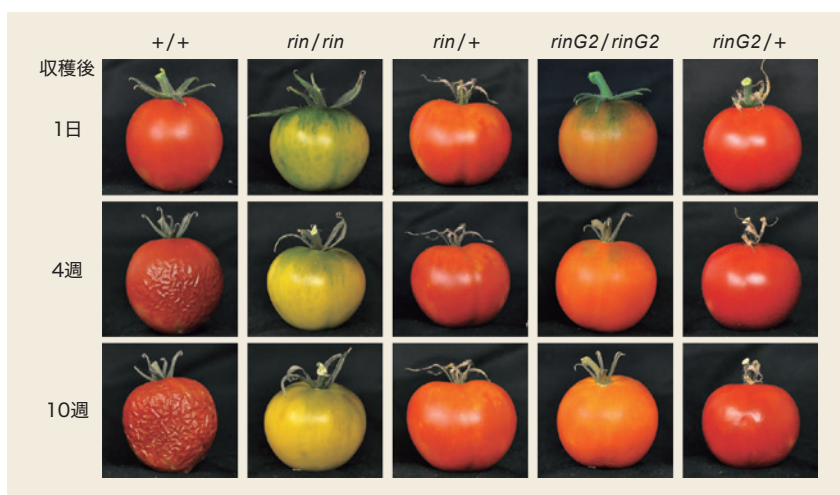


図4 *rin*変異および*rinG2*変異をヘテロにもつトマトの日持ち性
*rin*変異体および*rinG2*変異体を野生型系統(+/+)と交配し、得られたF₁系統(*rin/+*および*rinG2/+*)の果実の性状。

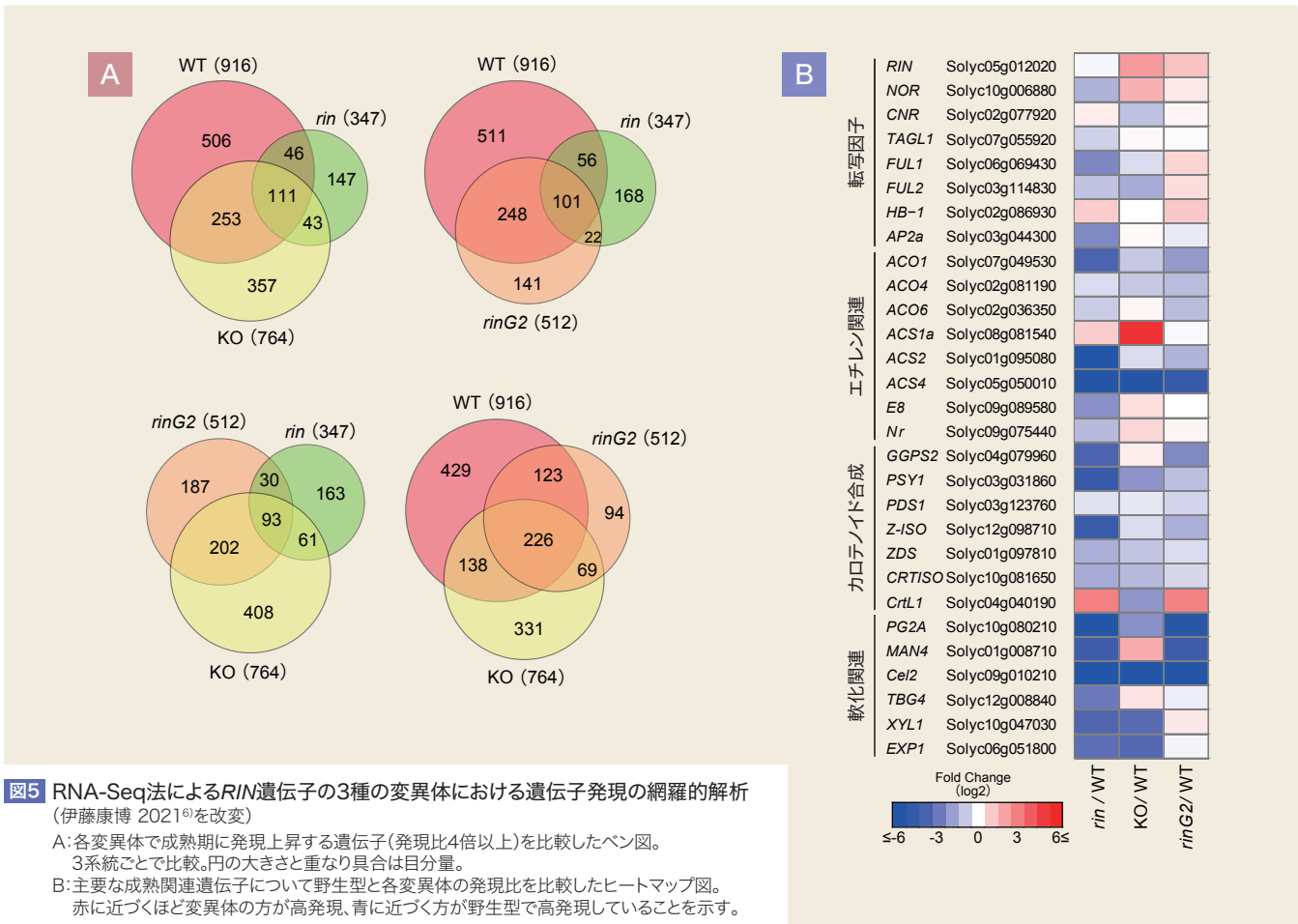


図5 RNA-Seq法によるRIN遺伝子の3種の変異体における遺伝子発現の網羅的解析 (伊藤康博 2021⁹⁾を改変)
 A: 各変異体で成熟期に発現上昇する遺伝子(発現比4倍以上)を比較したベン図。
 3系統ごとで比較。円の大きさと重なり具合は目分量。
 B: 主要な成熟関連遺伝子について野生型と各変異体の発現比を比較したヒートマップ図。
 赤に近づくほど変異体の方が高発現、青に近づく方が野生型で高発現していることを示す。

報告されています。軟化の進行は複数の酵素が関与しており、単独の酵素遺伝子の発現抑制では影響が小さいと考えられています。これまでのrin変異トマトを利用した研究では、発現変化した遺伝子の数が多すぎて結局どれが本当に重要なのかを見極めるのが困難でした。rinG2型、KO型の発現パターンを加味することで、軟化に働く主要遺伝子を絞り込めるはずで、栽培品種において、これらの遺伝子の機能を抑制することで高日持ちトマト育成が期待できます。

おわりに

KO変異、rinG2変異の作出計画時には、まさかこれほど異なる成熟パターンが見られるとは考えませんでした。まさに偶然の産物ですが、この変異体群の解析により、成熟制御のメカニズムを解明し高日持ち化や高リコピン化などを示すトマトの開発につながることを期待できます。研究の世界ではよく、偶然の副産物が大きな発見につな

がる、いわゆる“セレンディピティ”という言葉が使われます。トマトの高品質育種におけるセレンディピティとなるかどうか、今後の研究の展開が重要になります。

(食品研究部門 食品流通・安全研究領域
 流通技術・新用途開発グループ)

参考文献

- 1) Ito, Y. et al. (2008) DNA-binding specificity, transcriptional activation potential, and the rin mutation effect for the tomato fruit-ripening regulator RIN. *Plant Journal*, vol.55(2), 212-223.
- 2) Fujisawa, M. et al. (2014) Transcriptional regulation of fruit ripening by tomato FRUITFULL homologs and associated MADS box proteins. *Plant Cell*, vol.26(1), 89-101.
- 3) Ito, Y. et al. (2017) Re-evaluation of the rin mutation and the role of RIN in the induction of tomato ripening. *Nature Plants*, vol.3(11), 866-874.
- 4) Ito, Y. et al. (2020) Allelic mutations in the ripening-inhibitor locus generate extensive variation in tomato ripening. *Plant Physiology*, vol.183(1), 80-95.
- 5) Ito, Y. et al. (2021) Semi-dominant effects of a novel ripening inhibitor (rin) locus allele on tomato fruit ripening. *PLOS One*, vol.16(4).
- 6) 伊藤康博(2021) トマトの成熟転写因子RINの再評価. *化学と生物*, vol.59(10), 512-519.

素材&加工法で 澱粉消化性を制御

佐々木 朋子

SASAKI Tomoko

はじめに

糖尿病やその予備軍の方は年々増え続けており、食後の急激な血糖値の上昇を抑えるような食品、食品素材が求められています。一方で、私たちが主食として食べている米、麺、パンなどの食品は澱粉含量が高い上に、澱粉が加熱調理により消化されやすい状態(糊化)になっているため、エネルギー補給に適している反面、食後の血糖値が上昇しやすい食品として考えられています。食品に含まれる澱粉は消化性によって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)、および難消化性澱粉(RS: Resistant Starch)の3種類に分類されます(表1)¹⁾。RSは小腸内で消化・吸収されないため、食物繊維と同様に健康の維持に役立つ生理作用を発現する成分です。SDSは完全に小腸で消化はされますが、消化速度が緩やかなために、急激な血糖値上昇を抑制し、最終的には小腸でグルコースとして吸収され、エネルギー源としても活用できます。そのため、特に澱粉を多く含む穀類や穀類加工食品を中心に、澱粉中のRDSを抑えてSDSを増やす食品素材や食品加工技術の開発が求められています。

表1 消化性による澱粉の分類

	ヒトの消化能力	生理的機能
Rapidly Digestible Starch (RDS)	口腔内と小腸で急速に消化	急速なエネルギー源、急激な血糖値上昇
Slowly Digestible Starch (SDS)	緩やかだが小腸で完全に消化	緩やかで持続性のあるエネルギー源、緩やかな血糖値上昇
Resistant Starch (RS)	小腸では消化されない	食物繊維と同様の生理機能

本稿では素材に着目した^{もちごめ}糯米の品種による餅の澱粉消化性の違いと、食品の添加剤に着目したパンの澱粉消化性について紹介します。

餅の澱粉消化性について

餅は消化のよい食べ物なのでしょうか。餅を食べた後、腹持ちがいいと感じる人もいれば、逆にすぐにおなかがすくと感じる人もいるようです。餅に含まれている澱粉の消化は、澱粉がどの程度強固に餅の構造に守られているかがポイントになります。澱粉はアミロースとアミロペクチンの2種類の高分子から構成されていますが、餅の原料である糯米はほとんどアミロースを含んでいません。アミロペクチンの中でも長い側鎖をもつものは、澱粉分解酵素の作用を受けにくい特徴がありますが、一般的にはアミロース含量の高い澱粉が消化されにくいことがわかっています。そのため澱粉特性から考えると、ほぼアミロペクチンから構成されている餅の澱粉は消化されやすいと考えられます。しかし餅については事例は少ないものの、特に高齢者の方がうまく噛めずに飲み込んだ場合、胃や小腸内で石のようにかたくなり、腸閉塞を引き起こすことがあると報告されています²⁾。これは餅を搗く過程で形成される強固なマトリックス構造内に包括された澱粉は、その構造が破壊されなければ消化酵素の作用を受けにくい状態であることが原因として考えられます。全く消化されないのは問題ですが、ある程度餅のマトリックス構造の強度を変えることによって、澱粉消化性を制御できる可能性が期待できます。そこで、テクスチャーに特色のある2種類の糯米品種を用いて、餅の澱粉消化性を比較しました。ひとつは加熱調理後もかたくてしっかりしたテクスチャーをもつ餅になる糯米と、もうひとつはやわらかくてよく伸びる餅になる



糯米です。餅のテクスチャーは糯米の澱粉特性が反映されており、かたくてしっかりしたテクスチャーの餅になる糯米に含まれている澱粉はアミロペクチンの側鎖に長い鎖、一方やわらかいテクスチャーの餅になる糯米は短い鎖の比率が高いという特徴があります(図1A)³⁾。澱粉消化性を比較すると、急速に消化されるRDS含量はやわらかい餅の方が高い傾向が見られました(図1B)。さらに餅の内部構造を観察したところ、RDS含量が低かった餅では加熱後、また消化酵素液中で反応させた後でも構造内にしっかり包括された澱粉粒が存在していました(図2)。餅に含まれている澱粉の一部は、強固なマトリクス構造内で加熱によって糊化もせず、また消化酵素の攻撃から守られていたことが確認できました。

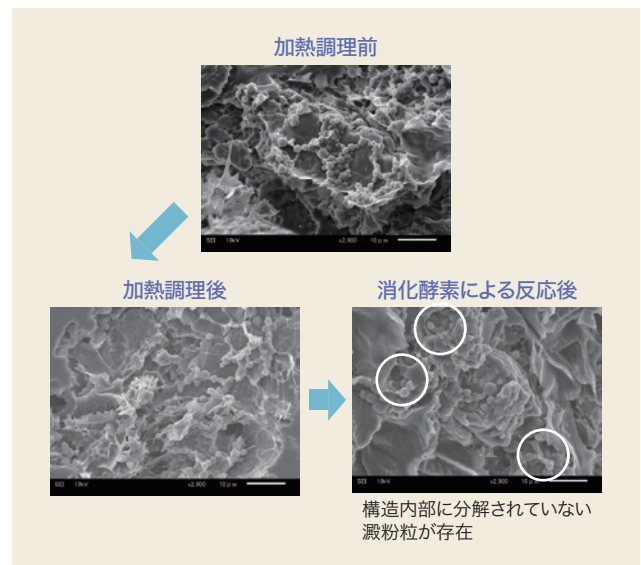


図2 RDS含量の低かった餅の内部組織の顕微鏡観察

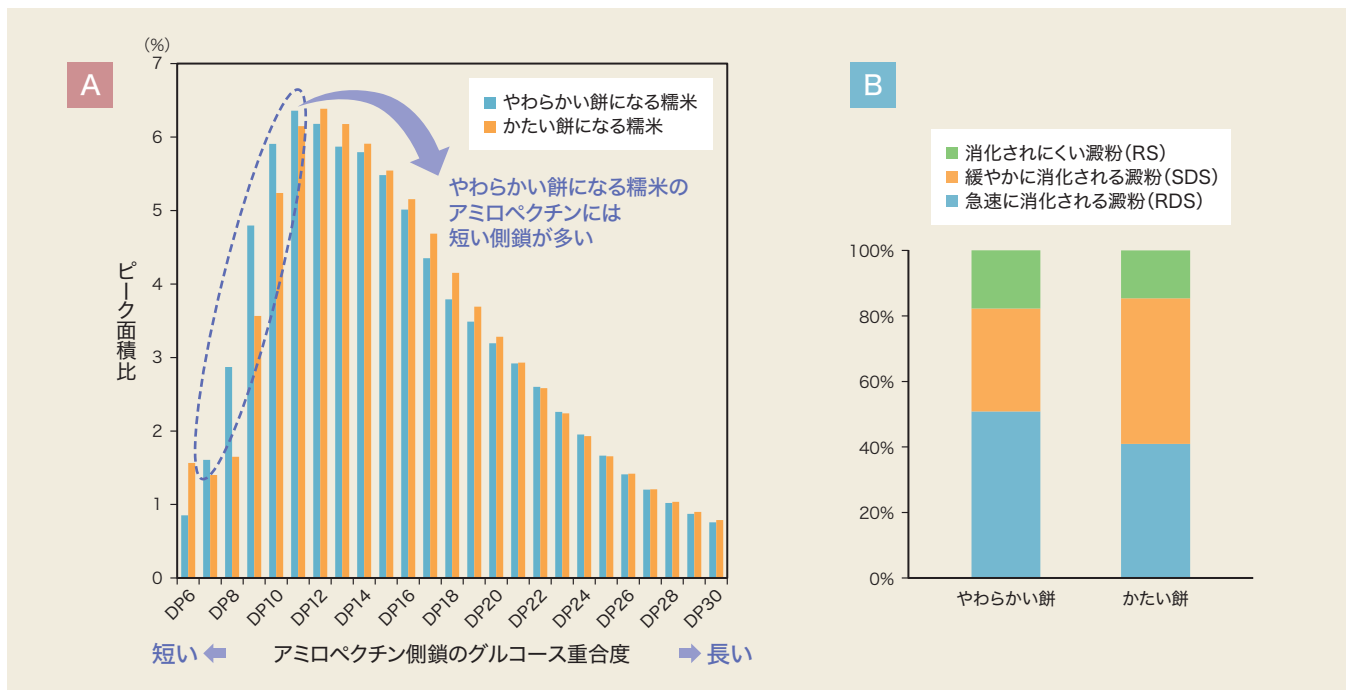


図1 テクスチャーが異なる餅の澱粉構造(A)と澱粉消化性(B)の違い

A: 枝分かれ構造をしているアミロペクチンの側鎖を酵素処理によって枝切りし、各重合度のピーク面積比(液クロ)を比較しました。

添加剤が澱粉消化性に及ぼす影響について

食品に含まれている澱粉の消化性は、澱粉特性、酵素の作用を阻害する食品の構造特性に加えて食品内の共存成分が影響を及ぼしています。特に、加工食品で広く使われている増粘多糖類は、消化管内の内容物の粘度を上昇させることによって、消化酵素の作用性を抑制する効果が期待されています。図3は代表的な増粘多糖類について

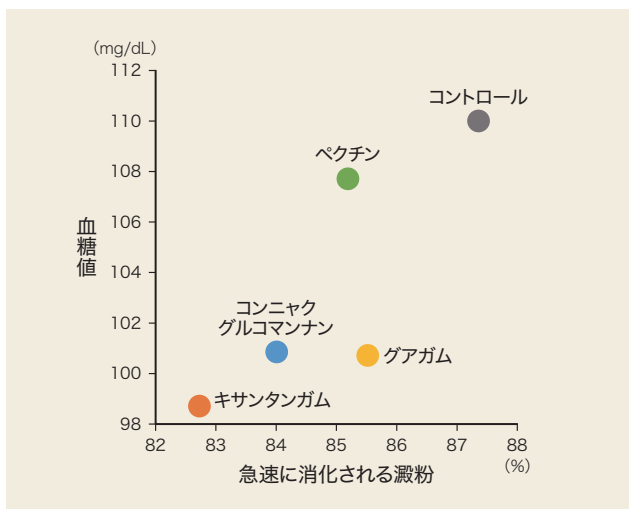


図3 馬鈴薯糊化澱粉に各種多糖類を添加した時の澱粉消化性とラットにおける食後血糖値の関係

馬鈴薯澱粉の消化性およびラットによる食後血糖値上昇に対する抑制効果を比較したものです⁴⁾。多糖類の中ではキシランタンガムが他の多糖類よりも澱粉消化性に対してだけではなく、食後血糖値に対しても高い抑制効果を示すことがわかりました。しかし、キシランタンガムは他の多糖類と比べて増粘効果が顕著に高いわけではなく、粘度上昇効果だけではその制御メカニズムが説明できないため、澱粉と各種多糖類(キシランタンガム、ペクチン、グアガム、コンニャクグルコマンナン)との分子間相互作用を、水晶振動子センサーを用いて解析しました。その結果、キシランタンガムのみが澱粉粒に吸着する現象を確認でき、他の多糖類についてはそのような現象は見られませんでした(図4)⁴⁾。そのため、キシランタンガムは澱粉粒に吸着することによって、消化酵素の作用を防いでいる可能性が考えられます。

次に、キシランタンガムの澱粉消化性に対する抑制効果を実際の食品で検証しました。近年グルテンフリー食品の需要が高まり、多様な食品が作られています。小麦粉を使用した食品では、小麦粉に含まれているグルテンが食品の製造過程で強固なネットワーク構造を形成し、澱粉を包括することで消化酵素による分解を抑制する効果があることが報告されています⁵⁾。一方グルテンフリー食品では、澱粉が消化酵素の作用を受けやすい状態にあるこ

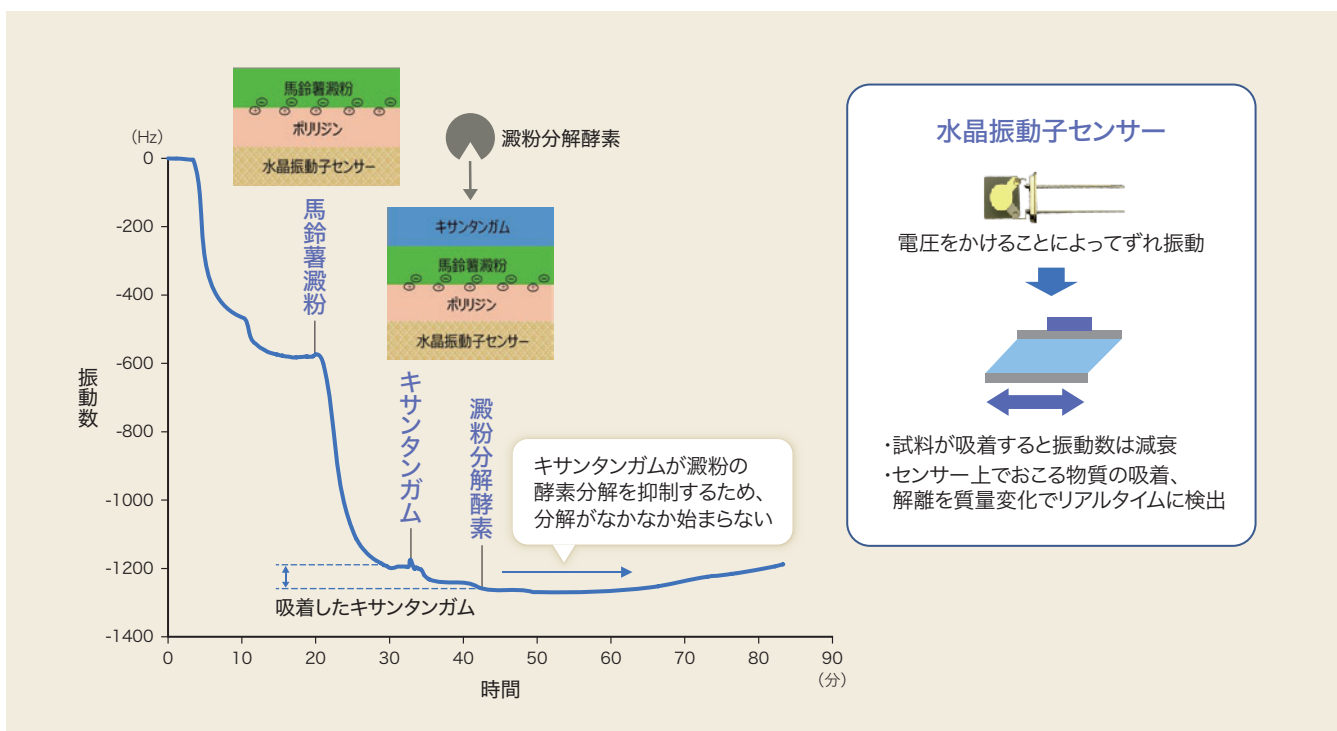


図4 水晶振動子マイクロバランス法による澱粉とキシランタンガムの相互作用の解析
キシランタンガムが澱粉に吸着し、澱粉の酵素分解を抑制する効果を確認しました。

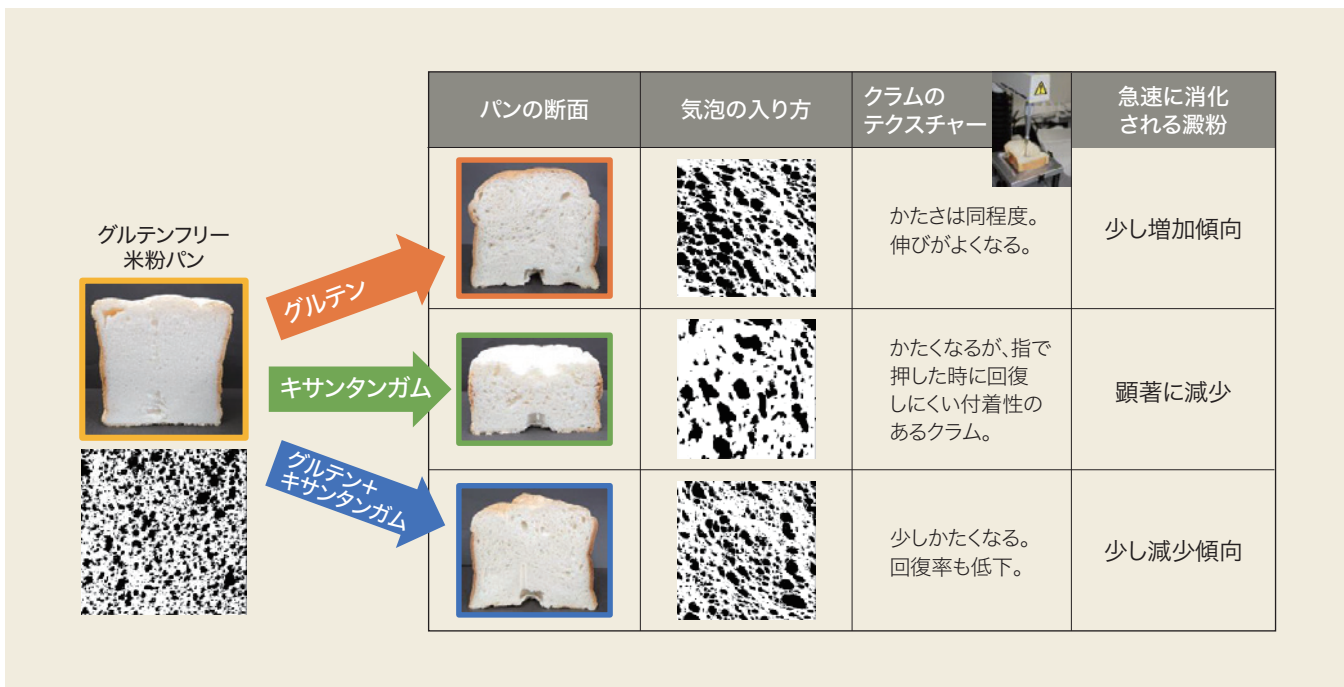


図5 グルテンフリー米粉パンのテクスチャーおよび澱粉消化性に及ぼす添加剤の影響

とが考えられ、澱粉消化性を抑制する技術が課題となっています。そこで農研機構の矢野ら⁶⁾が開発したグルテンフリー米粉パンを用いて、米粉パンの添加剤としても使用されているキサントランガムの澱粉消化性に及ぼす影響を調べました。キサントランガムを米粉重量に対して2%添加することによって、有意に澱粉消化性を抑えられることを確認しました⁷⁾。キサントランガムを添加すると、パンの内部構造が密になり、さらには内部結着力が高く、指で押した際になかなか戻らないユニークなテクスチャーのパンが得られました(図5)。さらに、グルテンフリー米粉パンにあえてグルテンを添加することによってパンの内部構造を改変し、澱粉消化性を測定しました。キサントランガム添加による澱粉消化性に対する抑制効果は、グルテンを添加することによって低減しました。これはグルテンの力によってパンの内部に気泡構造が形成されたことによって、消化酵素が内部まで浸透しやすくなったためと考えられます。

おわりに

食品に含まれている澱粉の消化性を抑制するためには、澱粉源となる素材として消化抵抗性の高い澱粉構造をもつ品種などの選択が重要です。しかし加工食品となると、多くの成分からなる複雑な組成になる上に、加工調理

過程での澱粉の糊化老化、消化性に及ぼす食品構造の影響など、様々な要因が関わっているため、なかなか意図した素材の機能が得られないことがあります。今後は素材特性と加工技術を組み合わせた澱粉消化性の制御技術が農産物の加工食品の機能性向上には重要な技術になると考えます。

(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)Englyst, H. N. et al. (1992) Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, vol.46(2), S33-50.
- 2)小林慎二郎ら(2005) 食餌性イレウスの2例. *日本臨床外科医学会雑誌*, vol.66(2), 393-397.
- 3)Sasaki, T. et al. (2013) Characterization of waxy rice cakes (Mochi) with rapid hardening quality by instrumental and sensory methods. *Cereal Chemistry*, vol.90(2), 101-106.
- 4)Sasaki, T. et al. (2015) In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gelatinized potato starch in the presence of non-starch polysaccharides. *Starch*, vol.67, 415-423.
- 5)Xu, H. et al. (2021) Mechanism underlying the effect of gluten and its hydrolysates on in vitro enzymatic digestibility of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 113, 106507.
- 6)Yano, H. et al. (2017) Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism. *LWT-Food Science and Technology*, 79, 632-639.
- 7)Sasaki, T. (2022) Influence of xanthan gum and gluten on in vitro digestibility and textural properties of rice bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 57, 2376-2383.

高アミロース米を利用した 介護食用米粉の開発

芦田 かなえ

ASHIDA Kanae

はじめに

日本の総人口に占める65歳以上人口の割合は2021年に28.9%、75歳以上人口の割合は14.9%と高齢化が進んでいます¹⁾。加齢に伴って様々な機能低下が起こりますが、生命の維持に不可欠な「食べる」ことに関する機能も低下します。食べることは、食べ物を適切な大きさに口の中に取り込み、かみ砕いて唾液と混合することで飲み込める状態の食塊にし(咀嚼)、それを飲み込む(嚥下)という非常に高度で複雑な動作で構成されています。この食べる機能は、加齢だけでなく、脳疾患、認知疾患、神経疾患など様々な要因で低下します。食べ物などが誤って喉頭と気管に入ってしまう状態が誤嚥です。高齢者では嚥下後に咽頭腔に残留した食べ物が気管に入ってしまう嚥下後の誤嚥が起こりやすく、一方で喀出機能も低下することから肺炎になりやすく、毎年数万人以上の方が誤嚥性肺炎で亡くなっています。

高齢化に伴い、病院や介護施設、在宅介護の場面で、咀嚼・嚥下機能に問題のある方向けの食事である嚥下調整食を必要とされる方も増えています。嚥下調整食には、誤嚥しやすい食品の特性(表1)と反対の特性、つまり、均

表1 誤嚥しやすい食品(成人)

誤嚥の要因となる特性	食品の例
サラサラした液体	水
まとまりにくい	ひき肉、寒天、ごぼう、焼き魚など
くっつく	餅、団子、焼き海苔、ウエハースなど
水分が少ない	パン、ゆで卵など
硬い	たこ、いか、ナッツ類など
液体と固体の混合(不均一)	味噌汁、麺類など

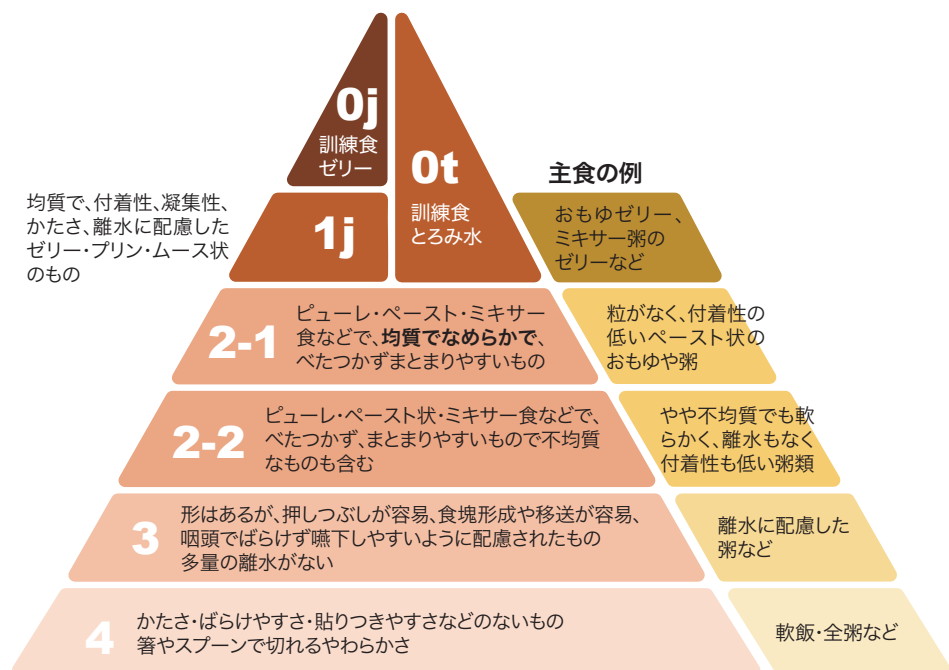


図1

段階に応じた嚥下調整食の分類
日本摂食嚥下リハビリテーション学会
嚥下調整食分類2021²⁾より作成。



一で・軟らかく・まとまりやすく・くっつかない、といった特性が求められます。嚥下能力によって処理可能な食品の形態は異なるため、嚥下機能の段階に応じて嚥下調整食が分類されています(図1)²⁾。

米は主食として重要な食べ物ですが、粒があるため嚥下機能が低下すると誤嚥しやすくなります。介護食の主食となる米の調理は、食べる人の嚥下機能に合わせて、軟飯、全粥、五分粥など水分を多くしていく作業があり、さらに粥の粒が残留する場合はミキサーにかけて均一化する作業が加わります。しかも、普通の粥をミキサーにかけると粘りが出て「でんぷんのり」の状態になって飲み込みにくくなってしまふことから、粥をミキサーにかけ際には澱粉分解酵素とゲル化剤を加えて物性を調節する手間がかかります。

高アミロース米の特徴

私たちが普段食べているお米は稲の種子で、その成分の9割が澱粉です。澱粉は、植物が光合成によって作りだしたグルコースが貯蔵に適した形態に重合した巨大な分子で、グルコースが直鎖状に結合したアミロースと、分岐構造を持つアミロペクチンによって構成されます³⁾⁴⁾(図2)。

澱粉中のアミロースの割合をアミロース含有率と呼び、米の場合、アミロース含有率が少ないほど、軟らかく粘りのあるご飯になります。日本で栽培されている米のほとんどがアミロースの割合が15~20%の中アミロース米で、アミロースが0%の米がモチ米です。アミロース含有率が25%以上の米は高アミロース米と呼ばれ、炊飯すると硬くパサパサとしたご飯になりますが、リゾットやピラフ、米粉麺への加工などに適しています。米のアミロース含有率はイネの澱粉合成酵素の多型によって決まるため、品種ごとに

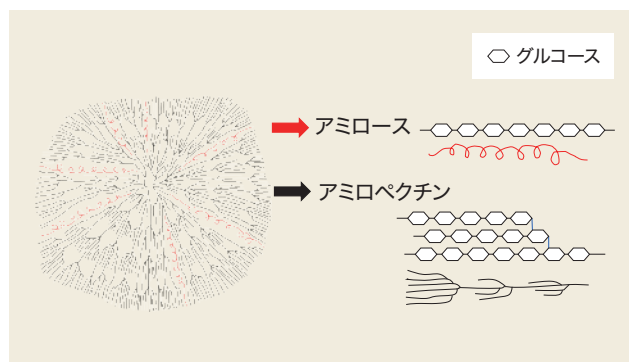


図2 澱粉のモデルと構成成分

二國二郎(1969)³⁾、Lineback, D. R.(1986)⁴⁾より作成。

表2 米の品種とアミロース含有率を左右する遺伝子

品種名	遺伝子型	アミロース含有率	主な用途
ミルキークイーン さんさんまる	Wx-mq Wx1-1	9~15% (低アミロース米)	ごはん チルド米飯
コシヒカリ ひとめぼれ ヒノヒカリ あきたこまち ななつぼし つきあかり にこまる きぬむすめ	Wx ^b	15~20% (中アミロース米)	ごはん
亜細亜のかおり 越のかおり ふくこの 北瑞穂	Wx ^a	27~32% (高アミロース米)	米粉麺 パスタ

太字で示した栽培面積の多い上位3品種が全生産量の半分を占める

アミロース含有率は異なります(表2)。アミロース含有率は米の加工特性を左右するため、その用途に応じて最適なアミロース含有率の米の品種を選択する必要があります。

澱粉に水を加えて加熱すると、澱粉粒は膨潤して透明度が上がり、粘度が上昇する「糊化」という現象が起こり、

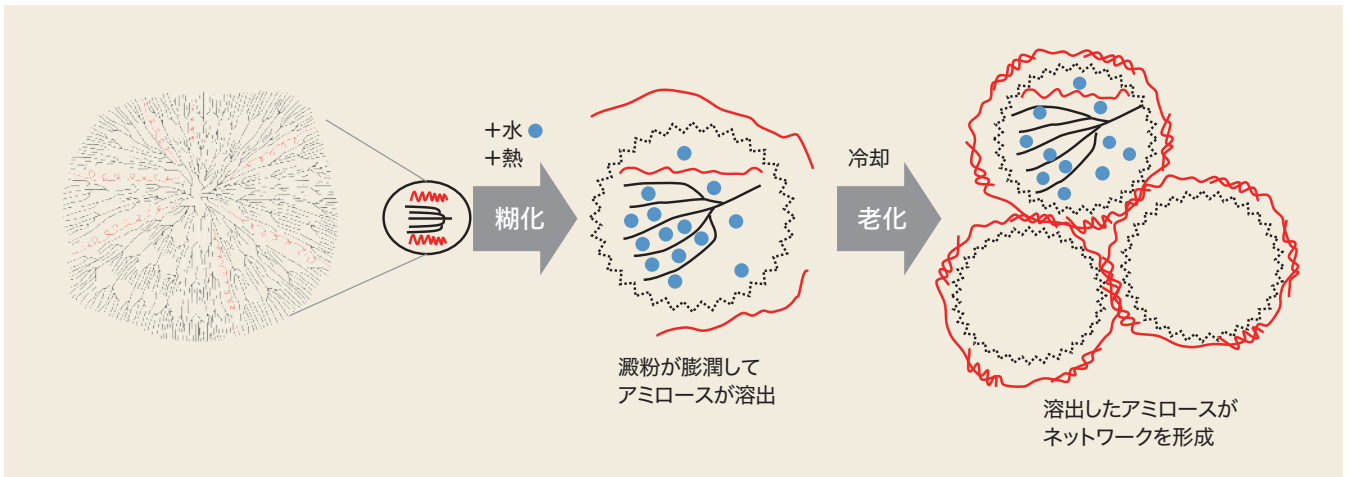


図3 高アミロース澱粉のゲル化模式図

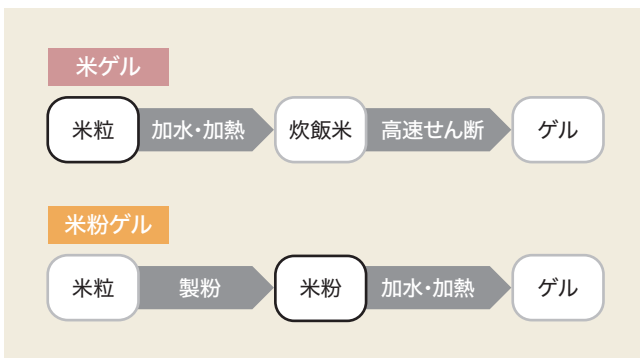


図4 米ゲルと米粉ゲル

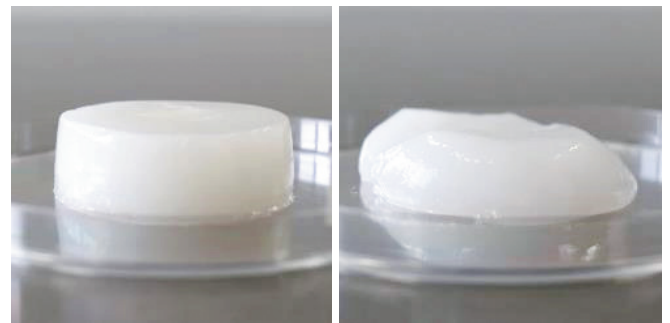


図5 高アミロース米粉ゲル(左)と中アミロース米粉ゾル(右)

表3 米粉への加水量と得られる糊を冷却した際の性状

米粉の種類	6倍加水 (米粉濃度14.3%)	10倍加水 (9.1%)	15倍加水 (6.3%)	20倍加水 (4.8%)
高アミロース米	ゲル 硬く脆い	ゲル ゼリー状	ゲル ゼリー状	ゾル※2 糊状
中アミロース米	ゲル 軟らかい団子状	ゲル 餡子状	ゾル 糊状	ゾル 糊状

糊化した澱粉粒は冷やすと収縮して「老化」します。糊化の際には澱粉粒からアミロースが溶出しますが、溶出したアミロースが多い場合、老化の際にアミロース同士が結びついて網目構造を形成し、膨潤した澱粉粒を抱え込んでゲル※1が形成されます⁵⁾ (図3)。農研機構では数年前に、高アミロース米の炊飯米を高速せん断することで得られる「米ゲル」を開発しました⁶⁾。米ゲルは米粒を糊化させてから均一化しますが、炊飯前米粒を製粉した後に糊化することもできます。つまり、高アミロース米の米粉からも、水を加えて加熱することで得られる糊を冷却して「米粉ゲ

ル」を得ることができます(図4、5)。この高アミロース米粉ゲルは、普通の米粉とは異なりべたつきが少なく、口どけが良く飲み込みやすいという特徴があります。私たちは加水量と物性を調査し、高アミロース米の粉に対して水を10倍量加えるとゼリー状になり、嚥下調整食に適する物性を示すことを明らかにしました⁷⁾⁸⁾ (表3)。

高アミロース米粉を利用した 介護食の開発

高アミロース米粉のゼリーは、米粉に水を加えて加熱するだけで調理でき、介護食に応用することで、従来の粥ゼリーの調理を簡便化できることが期待されます。私たちは、病院、医療研究機関、製粉会社、介護食メーカーとで研究コンソーシアムを形成し、生研支援センターのイノベーション創出強化研究推進事業（JPJ007097）において、介護食用米粉の市販化と普及に向けた取り組みを進めています。そこでは、米の研究者と嚥下調整食の専門知識を持つ医師・管理栄養士、民間企業が協力することで、高アミロース米粉ゼリーの実用化に向けて、高齢者の方を対象とした咽頭残留の評価や、実際の調理・提供場面を想定した問題解決を行うことが可能になりました。例えば、高アミロース米粉ゼリーの物性が適切な範囲に入ることはもちろん大切ですが、調理作業性に優れることも重要なポイントです。電子レンジやスチームコンベクションオーブンで調理を行う際には、途中で攪拌することができないため、米粉が沈殿して分離しないようにトロミを持たせてから加熱する必要がありますが、米の品種によってトロミのつき方が異なります。本研究コンソーシアムでは物性面と調理作業性の両面から嚥下調整食に適する高アミロース米品種の特徴を明らかにして、2021年に特許を出願しました。その後、調理施設や在宅介護でのモニター試験を行いながら適切な調理方法および提供方法などの手順を確立し、“ゲル化剤不要の介護食用米粉”として2022年9月に市販化しました。



おわりに

高アミロース米粉は、介護食の主食としてだけでなく、抹茶オレの粉末やジャムなどを加えて調理し、口だけの良いデザートとしてもおいしく食べることができます。介護食用米粉と言えば、これまでゲル化剤入りの米粉しかありませんでした。米粉から介護食の粥ゼリーを調理することができ、そのことにより調理の負担が減って、介護する側される側ともに“やさしい介護食”になる、という新しい概念を普及させるために、今後きめ細やかな情報発信とフォローアップを実施していきたいと考えています。

（食品研究部門 食品健康機能研究領域
ヘルスケア食グループ）

用語解説

- ※1 **ゲル(gel)** ソル※2が分散質のネットワークにより流動性を失い、固体状になったもの（食品例：寒天ゼリー・ゼラチンゼリー・豆腐・蒟蒻・プリンなど）。
- ※2 **ソル(sol)** 澱粉・寒天・タンパク質などの微細なコロイド粒子が液体に分散し、流動性のある状態のもの（食品例：牛乳・マヨネーズ・ポタージュスープなど）。

参考文献

- 1) 内閣府(2022) 令和4年度版高齢社会白書。
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/zenbun/04pdf_index.html
- 2) 相下淳ら(2021) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食分類2021. 日本摂食嚥下リハビリテーション学会雑誌, vol.25(2), 135-149.
- 3) 二國二郎(1969) 澱粉と調理. 調理科学, vol.2(1), 6-14.
- 4) Lineback, D. R. (1986) Current concepts of starch structure and its impact on properties. Journal of the Japanese Society of Starch Science, vol.33(1), 80-88.
- 5) 市原敬司(2015) 澱粉ゲルの構造と物性—酵素処理澱粉のゲル物性とその発現メカニズムより—. 応用糖質科学, vol.5(2), 95-99.
- 6) 杉山純一・藤田かおり(2013) 高アミロース米による新規食品素材「米ゲル」. 農研機構 研究成果情報。
https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nfri/2013/13_064.html
- 7) 芦田かなえら(2019) 高アミロース米の米粉から調製したゲルの物性. 日本食品科学工学会誌, vol.66(8), 290-298.
- 8) 芦田かなえら(2019) 高アミロース米の米粉から調製できる飲み込みやすい物性のライスゼリー. 農研機構 研究成果情報。
https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/nics/2019/nics19_s04.html

TOPICS

機能性農産物を利用した NARO Style® 弁当の開発と その活用

NARO

Style®

弁当

食品研究部門 山本(前田) 万里
MAEDA-YAMAMOTO Mari

■ はじめに

新型コロナウイルスの爆発的な流行により生活様式が急変し、内食・中食の需要が急増しました。在宅勤務の急増など今までとは異なった生活環境下では、ストレス、睡眠障害、生活習慣病の増加などが懸念されており、人の健康を維持増進する食事の役割が重要性を増しています。そこで、今まで実施してきた食品開発研究についてご紹介します。

■ 機能性農産物の開発

農産物に対するヒトでのエビデンス獲得を含む総合的な検証を行う、機能性を持つ農林水産物・食品開発プロジェクト(2012～2015年度、農林水産省)を実施しました。本プロジェクトでは、機能性成分データベースや機能性関与成分のシステムティックレビューの公開を行うとともに、ヒト介入試験により健康上のリスク低減等に期待される効果を解明し、高β-グルカン大麦¹⁾、高タンパク大豆、高メチル化カテキン緑茶²⁾、高β-クリプトキサンチンカンキツ、ケルセチン高含有タマネギ³⁾などが機能性表示食品^{*1}として届出されました。

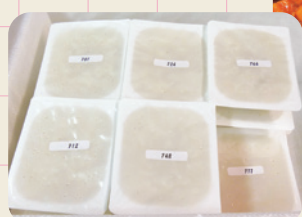


■ NARO Style® 弁当の開発

上記プロジェクトの中で、複合食品の機能性検証として、内臓脂肪面積が高めの被験者159人による、機能性農産物を組み合わせた弁当の内臓脂肪低減等の有効性を検証しました。対照は、機能性農産物を使用しない「おかず」、「茶」(麦茶)および「米飯」(白米)、被験食品は、機能性農産物を使用した「おかず」、「茶」(べにふうき緑茶)および「米飯」(50%大麦「キラリモチ」)であり、4群に無作為に割り付けて3カ月間、平日の昼食時のみ喫食してもらいました。弁当のエネルギーは約700kcal、塩分2.1g以下、タンパク質約28g、脂質約20g、炭水化物約102g、機能性成分は、ポリフェノール0.8g、食物繊維10.4g、カロテノイド15.0mgでした。内臓脂肪面積が喫食前と比べて、有意に9.2cm²減少し、その効果の高い食品は機能性米飯でした。また、機能



おかずとべにふうき緑茶
(ティーバッグで提供)



50%キラリモチご飯

ヒト試験の時に
実施会場で試食した弁当

性茶(べにふうき緑茶)飲用で、糖代謝マーカー^{※2}であるヘモグロビンA1c^{※3}が他の群に比べて減少し、1,5-アンヒドログルシトール^{※4}では有意な減少が認められました⁴⁾。

■ NARO Style[®] 弁当の改良

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期(2018～2022年度、内閣府)の取り組みの中で、軽度不調(Minor Health Complaints: 疾病に起因せず、本人が主観的に感じる軽度の心身の不調)の主観的判定法を定め、深く関わる17種類の食品成分(β -クリプトキサンチン、葉酸、ビタミンB₆、不溶性食物繊維、マグネシウム等)を明らかにしま



NARO Style[®] PLUS MEAL SET

- ・さばのから揚げ甘酢あん
- ・炊き合わせ
- ・菜の花のお浸し
- ・大豆サラダ
- ・50%キラリモチご飯
- ・べにふうき緑茶

《栄養成分表示》

エネルギー	472kcal
タンパク質	26.0g
脂質	29.0g
炭水化物	34.0g
糖質	28.0g
食物繊維	6.0g
食塩相当量	1.6g
灰分	4.0g

した⁵⁾。NARO Style[®] 弁当に、この17食品成分を多く含む食材を副菜として追加した弁当をNARO Style[®] PLUS MEAL SETとし、製造・販売する体制を整えています。

■ おわりに

今後の食品の機能性としては、超高齢化の中で健康寿命延伸に大きく寄与すると考えられるフレイル(虚弱)予防、認知機能改善、ストレス軽減、老化制御作用などの解明が期待されています。機能性農産物を複合的に活用して食事として利用できる食品開発を目指していきたいと考えています。

用語解説

※1 **機能性表示食品** 食品表示法に基づき、事業者が食品の安全性と機能性に関する科学的根拠などの必要な事項を、販売前に消費者庁長官に届け出て、機能性を容器に表示した食品。

NARO Style[®] 弁当

開発した弁当



- ・鶏肉の人参トマトソース煮
- ・かぼちゃのチーズ焼き
- ・ホウレンソウの炒め物



- ・鮭のムニエル
- ・タルタルソース添え
- ・パプリカとしめじの炒め物
- ・ホウレンソウのお浸し



- ・キャロットハンバーグ
- ・パプリカの人参ドレッシング添え
- ・ホウレンソウのお浸し



各メニュー共通で「50%キラリモチご飯」「べにふうき緑茶」が含まれます。

※2 **糖代謝マーカー** 糖尿病を診断するための血中あるいは尿中のバイオマーカー。

※3 **ヘモグロビンA1c** 血中糖代謝マーカーのひとつで、糖化ヘモグロビンの割合を示し、過去1～2カ月前の血糖値を反映する。6.5%以上で糖尿病の疑いありとされる。

※4 **1,5-アンヒドログルシトール** 血中糖代謝マーカーのひとつで、グルコースに似た希少糖で短期の血糖値の動きをリアルタイムで示す。

参考文献

- 1)Aoe, S. et al. (2017) Effects of high β -glucan barley on visceral fat obesity in Japanese individuals: A randomized, double-blind study, Nutrition, 42, 1-6.
- 2)Imbe, H. et al. (2016) "Benifuuki" green tea, containing O-methylated EGCG, reduces serum low-density lipoprotein cholesterol and lectin-like oxidized low-density lipoprotein receptor-1 ligands containing apolipoprotein B: A double-blind, placebo-controlled randomized trial, Journal of Functional Foods, 25(9), 25-37.
- 3)Nishihira, J. et al. (2021) The effect of 24-week continuous intake of quercetin-rich onion on age-related cognitive decline in healthy elderly people: a randomized, double-blind, placebo-controlled, parallel-group comparative clinical trial, Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 69(2), 203-215.
- 4)山本(前田)万里ら(2017) 機能性農産物を使用した弁当のメタボリックシンドロームへの影響を検証するヒト介入ランダム化プラセボ対照比較試験. 日本食品科学工学会誌 64(1), 23-33.
- 5)Kagami-Katsuyama, H. et al. (2023) The relationship between mental and physical minor health complaints and the intake of dietary nutrients. Nutrients, 15(4), 865.

温故知新

>> 古きをたず(温)ねて新しきを知る

1900 **1920** **1940** **1960** **1980**

1904年
稲の人工交配に成功

1914年
世界初の
カイコ
ハイブリッド
実用品種
配布開始

1921年
耐冷性
稲品種
「陸羽132号」
育成

1935年
小麦
「農林10号」
育成

1940年
人力1条田植機
農研号 TM1-4型市販化

1945年
日本初の
自脱型コンバイン
誕生

1949年
豚熱ワクチン開発

1950年
凍結保存胚移植成功

1959年
ナシ「幸水」育成

1960年
酵素法による
異性化糖生産技術開発

1962年
リンゴ「ふじ」育成

1965年
日本最初の
日本飼養標準刊行

1966年
遺伝資源種子
保存庫を建設

1966年
農林水産省
ジーンバンク事業の開始

1969年
豚熱ワクチン開発

1979年
凍結保存胚移植成功

1986年
農機研式高速乗用
田植機市販化

2000年
カイコ遺伝子組換え
技術の確立に成功

2004年
イネゲノム
完全解読

2006年
ブドウ
「シャイン
マスカット」
誕生

茶「べにふうき」の
抗アレルギー効果
確認、さまざまな
製品の市販化

農研機構130年のあゆみ

2000

2020

現在

2008年 田植えロボットの開発

口蹄疫・牛海綿状脳症(BSE)への対応

2016年
自動直進
田植機市販化



2022年
自動運転
田植機市販化

高病原性
鳥インフルエンザ
への対応

2011年 FAO/WOAHに
よる牛疫撲滅宣言

牛ゲップ由来
メタン削減
技術開発への貢献

食料自給率向上と
食料安全保障

豚熱・高病原性鳥インフルエンザへの対応

2015年 牛疫ワクチン製造・所持施設認定



2010年
サツマイモ
「べにはるか」誕生

小麦「ゆめちから」を使った
国産小麦のパン市販化

温暖化適応品種誕生
モモ「さくひめ」
リンゴ「錦秋」「紅みのり」
ブドウ「グロースクローネ」

農産物・食品の
産業競争力強化と
輸出拡大

2008年
高温耐性の
稲品種「にこまる」
誕生



2020年
茶「せいめい」
誕生



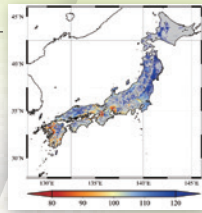
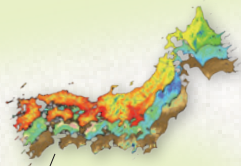
生産性向上と
環境保全の両立

2007年
クリ「ぼろたん」誕生

気候変動による
稲の収量への
影響予測

世界の穀物の収量予測

2022年
IPCC
第6次評価
報告書執筆に貢献



2016年
メッシュ
農業気象データ
提供システム
Web公開開始

2018年
農業情報研究
センター設立
農業AI研究進む

2020年
AIスパコン
「紫峰」
稼働開始



基盤技術の
強化



2016年
全国デジタル
土壌図作成

2019年
WAGRI
本格運用
開始



2021年
高性能NMR装置
リモート供用システム運用開始

2022年
ロボティクス
人工気象室
運用開始

温故知新 ～農研機構130年のあゆみ～

農研機構は2023(令和5)年に、起源である農商務省農事試験場が1893(明治26)年に設立されてから130周年を迎えました。これを記念して、シンボルマークの制作と記念誌の発行を行いました。また、農研機構のこれまでの農業技術発展への貢献や現在の取り組みを紹介する、食と農の科学館「農研機構130周年特別展」を開催しています(2024年3月29日まで)。

2023年9月20日には、今後の農研機構の進むべき方向に焦点をあてた、農研機構130周年記念シンポジウム「科学技術イノベーションで実現する食と農の未来」を開催いたしました。

農研機構評価委員会委員の方や130周年記念誌にご寄稿いただいた方、民間企業、行政、大学、公設試験研究機関、報道機関、一般の方など、350名の皆様にご参加いただき、盛況のうちに終了いたしました。「AIやデータロボティクスを用いたスマート農業の普及進化」、「スマートフードチェーンの最適化」に加えて、「人材育成・人材流動化」といった課題について、講演者やパネラーの皆様から多くのご助言を頂きました。しっかりと受け止めて、今後の取り組みに活かしてまいります。

■ 130周年記念シンボルマーク



■ 130周年記念誌



Part1:
現在の農研機構の
戦略と方針
Part2:
130年の研究成果



農研機構130周年記念シンポジウム

「科学技術イノベーションで実現する食と農の未来」

【開会挨拶】

主催者挨拶 農研機構 理事長 久間和生
来賓挨拶 農林水産省 農林水産技術会議 会長 小林芳雄

【基調講演】

「農業・食品産業の可能性」

株式会社 日本総合研究所 創発戦略センターエキスパート 三輪泰史

【第一部】農研機構の戦略と取り組み

「科学技術イノベーションの創出をめざして」

「農研機構の研究開発戦略」 理事 白谷栄作
「食料自給率向上と食料安全保障」 理事 湯川智行
「農産物・食品の産業競争力強化と輸出拡大」 理事 松田敦郎
「生産性向上と環境保全の両立」 理事 井手任
「共通基盤技術の強化と活用」 理事 中川路哲男

【第二部】パネルディスカッション

「農研機構が創る食と農の未来 —各界からの期待・提言—」

東日本電信電話株式会社 代表取締役社長社長執行役員 澁谷直樹
日本農業研究所 研究員/東京大学名誉教授 生源寺真一
JA全農 代表理事理事長 野口栄
外務大臣科学技術顧問/東京大学名誉教授 松本洋一郎
東京都農林総合研究センター 所長 村上ゆり子
モデレーター 理事 門脇光一



Editor's Note

編集後記

昨今、人口増加や温暖化、自然災害の激甚化などの地球規模リスクに直面し、「食と健康」が世界的な課題となっています。「食品を科学する」をテーマとする技報第14号(本号)では、主に収穫後の農作物を対象として、食品産業の発展を目指した農研機構の研究成果を紹介しています。技報でこのような特集を編むのは、2019年6月の創刊以来初めてのことです。

本号では、新しい食品素材や食品加工法、食品や素材の品質を精密かつ効率的に分析する方法などを紹介しています。これらの成果は、国内外における新たな食や流通システムの創造に貢献するものであると考えています。本号の「トピックス」では、農研機構が重視している「食と健康」に焦点をあて、機能性農産物を利用したNARO Style[®]弁当の開発とその活用について紹介しています。「温故知新」では、農研機構130年のあゆみを紹介しています。

本号をお読みいただきながら、日本や世界の人々のウェルビーイング(幸福)を支える新たな「食」の形に思いを馳せていただければ幸いです。

(編集委員長)

農研機構技報

NARO Technical Report No.14

2023年11月30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合せは

<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。



農研機構



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