—受賞論文—

Research on Quality Evaluation, Cultivar Differentiation, and Processing of Rice*

米の品質評価，品種判別および加工利用に関する研究*

大坪研一 (おおつぼ けんいち)^{1, **}Ken'ichi Ohtsubo^{1, **}¹新潟大学大学院自然科学研究科 (農学部併任)

950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地

¹ Graduate School of Natural Sciences, Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, Niigata 950-2181, Japan

要旨：米の食味などの品質評価，品種判別および加工利用に関する研究を行った。米の食味を物理化学的に評価する方法として，テンシプレッサーによる一粒炊飯測定方法，RVAによる米の物性および老化性の推定方法および米飯の外観，香り，味，粘り，硬さの各評価を理化学的測定で行った結果を多変量解析することによる食味の多面的理化学評価方法を開発した。米の酵素阻害タンパク質 RASI のアミノ酸配列を決定し，3種類の酵素阻害タンパク質やアビジンの遺伝子を導入した虫害抵抗性稲を作出した。米品種の判別方法として，精米を試料として鋳型 DNA を抽出精製し，適正なプライマー共存下で PCR を行う方法を開発した。鋳型 DNA の調製方法として，酵素法およびその改良法を開発することにより，試料が米飯，米菓，日本酒などの場合においても，PCR による原料米の判別を可能にした。米の消費拡大を目的として，新形質米を中心に，膨化玄米，発芽玄米，米粉パンなど各種の機能性米加工食品の開発に取り組んだ。

キーワード：米，品質，品種，加工，食味***

1. はじめに

筆者は，1981年に農林水産省食品総合研究所に入所し，米の利用を担当する農産第2研究室に配属され，途中3年間，北陸農業試験場に勤務したが，27年間勤務し，2008年に新潟大学農学部へ異動し，現在に至っている。この間，32年間，米の品質利用に関する研究に従事し，多くの方々の御指導とご協力を頂く中で，以下の研究を行ってきた。

2. 米の食味などの品質評価 (表1)

従来，米の食味や老化性は，食味試験¹⁾や高度な米飯物性測定装置を用いて評価されてきた。また，近赤外分光分析の手法を活用した各種の「食味計」も開発され，生産者から消費者に至るまで普及しつつあるが，米飯物性や米飯老化性について，少量の試料を用いて，簡易・迅速，かつ正確に評価する方法が必要とされていた²⁾。

2.1 テンシプレッサーによる一粒炊飯測定方法

岡留らは，テンシプレッサーによる低圧縮試験，高圧縮

表1. 米の品質評価に関して行った研究

1. 米の老化性や米飯物性を推定可能な装置を開発 (フォス・ジャパンと共同)
ライスマスターを開発
2. 米飯物性の新測定方法の開発 (タケトモ電機と共同)
高圧縮・低圧縮連続測定により，タンパク質・澱粉特性評価が可能に
3. 米脂質劣化指標の比色測定法の開発
脂肪酸度測定法を滴定法から比色法へ
4. 米の食味の多面的理化学測定法の開発
外観，香り，味，粘り，硬さのそれぞれを機器分析し，多変量解析
5. アミロース含量，ゲルコンシステンシー等の測定方法の改良
インド型高アミロース米への適用性を改良した
6. 一粒炊飯による米飯物性測定方法の開発
PCR装置により，米一粒の炊飯と物性測定を可能にした
7. 近赤外分光法によるアミロース含量，食物繊維等の測定方法の改良
米のアミロース含量，大麦の食物繊維等の測定精度を高めた

試験，連続圧縮試験により，品種・栽培による米飯物性の相違を検出できることを報告している^{3,4)}。中村らは，DNA判別に使用される PCR 装置とチューブを用いて米試料を1粒ずつ炊飯し，テンシプレッサーによって物性を測定す

* 本原稿は，日本応用糖質科学会平成25年度大会の学会賞受賞講演で一部発表された。

** 連絡先 (Tel. 025-262-6360, Fax. 025-262-6360, E-mail: ohtsubok@agr.niigata-u.ac.jp)

*** Key words: α -amylase family, neopullulanase, CAZy, substrate specificity, reaction specificity
本文中略記：RVA, Rapid Visco Analyzer; RASI, Rice Amylase Subtilisin Inhibitor.

一粒炊飯・物性測定の実例

試料名	表層の硬さ (10^3 dyn)	表層の粘り (10^3 dyn)	表層の付着性 (10^5 erg)	粘り／硬さ -H1/H1	米飯の特徴
コシヒカリ	60.98±12.80	6.62±1.91	0.17±0.07	0.109±0.021	軟らかくて粘りが強い
きらら397	75.98±17.36	4.73±2.54	0.10±0.08	0.062±0.029	硬くて粘りが弱い
ひとめぼれ	71.06±15.39	6.11±2.39	0.13±0.07	0.087±0.030	やや硬いが粘りは強い
ササニシキ	61.61±9.14	3.79±1.88	0.07±0.04	0.061±0.028	軟らかくて粘りが弱い

図1. 一粒炊飯による物性測定法

PCR装置とチューブを利用して1粒ずつ炊飯し、8粒をテンシプレッサーによって物性を測定することで、少量試料による精密測定が可能になった。

ると、米飯相互の付着やプリンカップ内の炊飯部位による誤差が減少し、8粒の測定によって試料米の特徴を推定できることを報告した⁹⁾ (図1)。

高圧加工では京都大学の林や越後製菓(株)の山崎らによって食品加工への適用が行われ、超高压加工を施した無菌米飯が開発されている。筆者らは、越後製菓と共同で、超高压浸漬米飯の物性改善効果について、本学会誌で報告した⁹⁾。

2.2 RVAによる米の物性および老化性の推定方法

筆者らの研究室では、1997年に、ラピッド・ビスコ・アナライザー (RVA) の米品質評価への適用を目的とする測定方法を全国の7試験研究機関と共同で開発し、論文を発表するとともに、技術と装置の普及に努めてきた⁷⁾。

その後、新型RVAの開発にともなって、糊化特性の測定結果に基づいて米飯の硬さや粘り等の物理特性、さらに、炊飯後の糊化澱粉の老化による米飯硬化性 (冷やご飯のなりやすさ) 等、ユーザーの求める利用特性を、測定結果として直接表示することができるソフトウェアを筆者らが開発し、米飯物性や米飯老化性を推定できることを示し、RVAのソフトウェアに加えるとともに、RI (レトロインデックス: 老化性指標) を表示できる簡易型RVA (ライスマスター) をフォス・ジャパン(株)と共同で開発した⁸⁾ (図2)。

今回の技術と装置の開発により、ユーザーは、「この試

料米は米飯の硬さ指標が〇〇で、炊飯後の老化のしやすさは〇〇」というように、試料米の特性を示すデータを、直接に読みとることが可能になった。この装置を使うことにより、4g程度の少量の試料米を用いて、①美味しい米の育種選抜 (育種研究者) や、②生産した米の美味しさの推定 (農家)、③仕入れた米や販売する米の食味の推定 (卸、精米業界、米販売業界)、④購入した米の食味や冷やご飯のなりやすさの推定 (米加工業界、消費者) が簡単にできるようになり、米に携わる多くの人々が簡易迅速評価技術の開発によって時間と労力を使わないで美味しい米を選ぶことができるようになるものと期待される。

2.3 米の食味の多面的理化学評価方法

筆者らの研究室では、近赤外分光分析や物性測定において、多変量解析の手法を導入してきた^{9,10)}。また、最近開発されたにおいセンサー¹¹⁾や味センサー¹²⁾を利用して、米飯の味や香りを電氣的に測定しようとする試みも行い、米飯物性、糊化特性、味センサー、においセンサー、味度^{13,14)}の各測定結果を変数として多面的食味評価を行っている。竹生等は、全国の飯用米の官能検査結果を目的変数にとり、タンパク質、ヨード呈色度、糊化粘度を説明変数として重回帰分析を行うことにより、食味推定式を作成した¹⁵⁾。当研究室においても、米飯物性、糊化特性、味度による、年次間変動の小さい食味推定式を作成し、さらに改善を図るため、澱粉合成酵素¹⁶⁾や細胞壁分解酵素¹⁷⁾による

1. 開発の背景：「美味しいお米、冷やご飯になりにくいお米を簡単に選びたい！」
2. 従来の技術：食味試験や物性測定は労力と時間がかかる。
食味評価装置では老化性評価が困難。

図2. 米飯物性や老化性を推定可能な RVA ソフトウェアの開発

2日間かけて測定した米飯物性・老化性のデータと RVA による糊化特性値との重回帰分析により、4gの精米粉の短時間測定による米飯物性・老化性の推定が可能になった。

食味への影響についても研究を行っている^{18,19)}。

3. 米および米加工品の品種判別に関する研究 (表2)

3.1 酵素阻害タンパク質やアビジンの遺伝子を導入した虫害抵抗性稲の作出

筆者は、穀類の酵素阻害タンパク質に関する研究を行ってきた^{20,21)}が、ダーラム大学 (イギリス) の M. リチャードソン博士のもとで、米の酵素阻害タンパク質 (RASI) のアミノ酸配列を決定した²²⁾。この研究を発展させて、遺伝子組み換え稲の作出の研究では、穀類に含まれていて安全性の高い酵素阻害タンパク質、すなわち米トリプシンインヒビター、ハトムギシスタチン²³⁾、大麦アミラーゼズブチリシンインヒビターの遺伝子を複合導入することにより、アワヨトウなどの害虫に対して抵抗性のある稲を作出した。また、2005年には、筆者らの研究室の奥座宏一博士が、卵に含まれるビオチン欠乏因子であるアビジンの遺伝子を稲に導入することにより、鱗翅目や鞘翅目などの広範な害虫に対して抵抗性を示す稲を作出した²⁴⁾。なお、アビジンは加熱によって失活するので、このアビジン発現米は、米飯になるとヒトに無害となる。

3.2 精米を試料とする PCR による米の DNA 品種判別方法の開発

近年、食品の偽装表示が増加し、消費者の食品表示に対する信頼が揺らいでいる。また、わが国で多大な労力と年月をかけて育成されたイチゴやインゲンマメなどの品種が不正に海外に持ち出される事例があり、育成者権の保護が必要とされている。

DNA 品種判別は、分子生物学の進歩を基礎に、情報量

表2. 米の DNA 判別に関して行った研究

1. 精米を試料とする DNA 品種判別技術を開発 (食糧庁、生物研と共同)
PCR 法による DNA 品種判別技術、コシヒカリ判別キット等を開発
2. 米飯を試料とする DNA 品種判別技術の開発
耐熱性アミラーゼとプロテアーゼ K による「酵素法」を開発
3. もち米加工品へのワキシコーン混入検出技術の開発
GBSS やゼイン遺伝子に特異的なプライマーを開発
4. 新潟県産コシヒカリの判別技術の開発
いもち病抵抗性に関連する DNA マーカーによる判別技術を開発
5. 日本酒、ワイン等の醸造酒を試料とする原料植物判別技術の開発
「酵素法」の改良と植物特異的プライマーの開発
6. 虫害抵抗性の遺伝子導入イネの開発
アビジン遺伝子導入イネ、インヒビター遺伝子導入イネの開発
7. DNA 食味推定技術の開発に取り組み中
PCR 結果を2値化し、米の食味評価結果を目的変数に多変量解析

が多い DNA の品種間差異に着目して判別する技術であり、食品の偽装、特に品種偽装を防ぐためにも、また、育成者権を守るためにも有用な技術と考えられる。

筆者らは、育成者権の育成者権を守り、消費者の食品表示への信頼を高めることを目的に、米の DNA 品種判別に関する研究を行った²⁵⁻²⁹⁾。

コシヒカリは、その良食味性と広域栽培適応性から、流通量も最も多く、高価格で取引されるため、偽装表示の多い品種であった。そこで、筆者らは、前述の STS 化マルチプレックス法による「コシヒカリ判別キット」を平成 13 年に開発した³⁰⁾。この場合、開発にあたって、①各識別プライマーの併用によるマルチプレックス化 (簡易迅速化)、②各県のコシヒカリ同士で相違が現れないこと (同一品種内の均一性)、③ひとめばれ、あきたこまち等の主要な近縁品種とも明瞭に識別ができること (異品種間の識別性)

図3. コシヒカリ判別キットの開発

コシヒカリに関し、同一品種内の均一性と異品種間の識別性を確保したマルチプレックスプライマーセットを開発し、タカラバイオ㈱から実用化した。

の3つのポイントが重要であった(図3)。

次いで、翌年、混米検出用の「コシヒカリネガキット」の開発を行った³¹⁾。この場合は、①全国のコシヒカリの原種で、識別バンドが全く現れない、②コシヒカリ以外の品種の場合には、何らかの識別バンドが出現する、という2点がポイントになった。こうした技術開発によって、不正混米は減少した。筆者らは、北海道産米同士を識別するためのプライマーセットや、食品企業が委託炊飯している原料米を製品段階で判別するためのプライマーセットなども開発・実用化してきた。

改正JAS法の施行にともない、米の品種、産地、産年の包装での表示が義務づけられ、同一品種の米でも、産地によって食味や価格が異なっており、DNA解析によって産地の判別が可能であるかどうかを検討する必要がある。筆者らは、DNA解析を中心に、米の産地間差異の検討を行い、PCR法や理化学的フィンガープリント等を用いる産地判別技術を開発することを目的として研究を行った。その結果、①同一品種の原種同士のDNA塩基配列の相違に基づくPCR法では、コシヒカリの32産地の原種同士の差異を識別できるDNAマーカーを開発することにより、原理的に産地の識別の可能性が示されたが、原種同士の差異はきわめて微妙であり、キット等による実用化はかなり困難であった。②同一品種の同質遺伝子系統のDNA塩基配列の相違に基づくPCR法の場合、いもち病抵抗性に着目したDNAマーカーを開発することにより、原種同士の識別よりも明瞭な識別が可能であり、コシヒカリとササニシキにおいて、同質遺伝子系統を識別することが可能になった³²⁾。③各種新潟コシヒカリBLのいもち病抵抗性遺伝子*Pia*、*Pii*、*Pita-2*、*Piz*に対応する識別用プライマーを開発し(図4)、これらを基に、平成17年、実用的マルチプレックスプライマーセットをとしてタカラバイオ

社を通じて市販を開始した³³⁾。

3.3 米加工品を試料とする原料米の判別技術の開発

その後、筆者らは、平成8年に、米飯試料向けDNA抽出精製法として、「酵素法」を開発した。この方法のポイントは、耐熱性の α -アミラーゼを用いることによって、DNA分解酵素の作用を抑えながら糊化澱粉を分解除去し、次いで、SDS存在下で、プロテアーゼKによって変性タンパク質を分解除去し、DNAの抽出・精製を容易にする点である。こうして精米と同様に、米飯一粒の場合にも、主要な品種の識別を可能にしている³⁴⁾。

さらに、もち米菓に対するワキシコーン混入検出技術として、コーンの品種に関わらず混入を検出するため、コーンに普遍的な澱粉合成酵素GBSS特異的なPCR用プライマーを開発した^{35,36)}。もち米加工品の例としては、白玉粉、餅、あられ、かきもちなどが挙げられる。これらのもち米加工品製造に、時にはワキシコーンを混合して使用する場合がある。それによって製品の物性を調節したり、コストを下げたりできるメリットがある。それ自体は加工技術の適用であって問題ないが、コーンを混合して「水稻もち米100%使用」などと表示すると、消費者の信頼を損なうことになるし、国産糯米を用いて努力している食品加工企業にとってももち米産地にとっても打撃となる。

そこで、筆者らは、新潟県農総研およびたかい食品㈱と共同で、もち米加工品におけるワキシコーン検出技術の開発に取り組んだ。ポイントは①米とコーンの相違点に着目して判別する、②コーンの種類によらず、普遍的な検出が必要、ということであった。そこで、コーンの主要タンパク質であるゼインの遺伝子の塩基配列及び澱粉合成酵素の遺伝子の塩基配列に基づいて、混入コーンをPCR法で

開発したDNAマーカーの座乗染色体および位置と標的遺伝子との位置関係
 (A) 第11染色体上の拡大図 (*Pia* 遺伝子とDNAマーカーaとの位置関係を示す)
 (B) 第9染色体上の拡大図 (*Pii* 遺伝子とDNAマーカーbとの位置関係を示す)
 (C) 第12染色体上の拡大図 (*Pita-2* 遺伝子とDNAマーカーc, d, eとの位置関係を示す)

図4. 開発したいもち病抵抗性DNAマーカーのマッピング結果

新潟県の育成した各種のいもち病抵抗性コシヒカリ同質遺伝子系統のDNAマーカーを開発し、従来報告されている座乗染色体および座乗位置と一致することを確認して使用した。

検出するためのプライマーを設計した。この結果、もち米加工品における混入コーンの検出が可能となった³⁵⁾。

醸造酒には、ワイン、ビール、日本酒などがあり、それらの品質は、原料植物、すなわち、イネやブドウの品種が強く影響するとされている。農林水産省によると、平成16年産醸造用米の作付けは15.2千haであり、上位品種の山田錦、五百万石、美山錦、雄町で全体の7割以上を占めていた。

醸造酒の場合は、既報^{34,35)}における米飯や糯加工品(あられ・煎餅)の場合と異なり、微生物やブドウ果皮などの共存と成分間反応により、PCRを阻害する色素成分が共存する。これらの問題点を解決するために、筆者らは、醸造酒にわずかに残存する原料植物由来のDNAを得る目的で、非加熱濃縮により醸造酒を粉末化し、既報の酵素法により、澱粉およびタンパク質を分解除去した後、回収した沈殿から70%エタノールを用いてDNAを溶出すると同時に色素成分を除去してPCR可能な鋳型DNAを調製する技術を開発した。また、原料植物由来のDNAのPCR増幅多型によって判別するため、麹菌や酵母などのDNAは増幅せず、植物由来DNAのみが増幅する酒米やブドウ品種同士の判別に適したプライマーを選定あるいは開発した^{37,38)}。たとえば、筆者らが開発したコシヒカリ判別用プライマー³⁰⁾、澱粉合成関連プライマー²⁹⁾、いもち病抵抗性関連プライマー^{32,33)}が好適であった。さらに、これらのプ

ライマーによるPCRの最適条件(DNA濃度、酵素、反応温度、回数など)を選定した。これにより、日本酒を試料とする五百万石、山田錦、美山錦、雄町などの主要な酒米の相互識別やワインを試料とする原料ブドウの判別が可能になった³⁹⁾(図5)。

3.4 PCR結果に基づく食味推定の試み

筆者らは、試料米から抽出DNAを鋳型とするPCR法による増幅DNAバンドの有無を0と1に2値化して重回帰分析することによって食味推定を試みた^{40,41)}。また、中村らは、さらにPCR用のプライマーを改良し、世界の広範な米を試料として、米飯物性や糊化特性の推定がある程度可能であり、未知試料においても高い相関の得られることを報告した⁴²⁾。

筆者らは、PCR装置を炊飯器として使用する一粒炊飯・物性測定方法および品種判別用のPCR法を、DNA食味判別技術に発展させる研究を行っている。品種判別に用いる各種のプライマー(遺伝子の断片)を開発しているうちに、良食味米に特有に現れるDNAバンドや食味の劣る米に共通して出現するDNAバンドのあることに気づき、澱粉合成酵素に関係するプライマー等と併用して統計処理を行い、米のDNAから食味を推定しようと検討を続けている。このDNA食味判別技術は、半粒良食味選抜技術に発展する可能性もある。すなわち、交配して得られる雑種

図5. PCR法の醸造酒の原料判別への適用

醸造酒を試料とするPCRは困難とされていたが、DNAの抽出精製方法を開発し、植物特異的な判別用プライマーを開発することで原料植物の判別が可能になった。

第一代の種子を半粒に切断し、胚芽のついている判粒を保存し、胚乳のみの半粒からDNAを抽出して各種のプライマーを用いてPCRを行う。その結果を食味推定式に当てはめて、良食味米と推定された試料のみ、保存しておいた胚芽付き半粒を播種して次世代を育てる。その次の世代(雑種第二代)も半粒に切断し、やはり胚芽のない半粒のDNAで良食味米を選抜する。この選抜を繰り返すことによって、交配直後の育種初期段階から、多収性、病害抵抗性などの他の重要形質と並行して、良食味選抜を行うことができると考えられる。

4. 米の加工利用に関する研究 (表3)

農林水産省では、米の消費を拡大するために、平成元年から、多様な形態や特質の品種の育成と利用技術の開発に関する研究プロジェクトを開始した。筆者も同研究に参加し、各種の新形質米の品質評価および加工利用に関する研究を行ってきた⁴³⁻⁴⁸⁾。

4.1 各種の新形質米

最近、(独)農研機構の北陸研究センター(上越市)で育成された新品種「華麗舞」は、日本型米とインド型米を交配して育成されたカレーライス好適米である。米飯の表面の粘りが弱いので、カレーソースとよくなじみ、かみしめるとコシヒカリと同様に軟らかいという特徴があり、白飯と

表3. 米の利用に関して行った研究

1. 新形質米の機能性を活かした新食品の開発(北陸農試, 新潟県等と共同)
高アミロース米麺, 黒米せんべい, 発芽玄米おはぎなどを開発
2. 発芽玄米の高温高压加工による多用途食品素材化(吉村穀粉と共同)
高GABA和菓子用米粉, 高GABAパン用米粉などを開発
3. 発芽玄米含有機能性米菓の開発(茨城県工技センター, 関口醸造と共同)
高血圧抑制米菓, 酵素含有米菓, フレーバー含有米菓などを開発
4. 低アミロース米を用いた即席玄米雑炊の開発(キューピー, 作物研と共同)
お湯をかけて2分で可食の即席玄米雑炊を開発
5. 常温流通可能な発芽玄米の開発
発芽処理後の蒸気殺菌処理により, 常温流通を可能にした
6. カレーライス好適米「華麗舞」の開発(北陸センター, ハウス食品と共同)
米飯表面の粘りが弱く, 全体は軟らかい日印交雑種の特徴を活用
7. 糖尿病発症予防の米加工品の開発を検討中(キューピー, 慈恵医大と共同)
高アミロース米の低GI性による発症予防を期待
8. 超硬質米を原料とする機能性米加工食品を開発中(農水省プロジェクト)
発芽玄米の糊化練り込み法による黒米パン, トマトパンなど

してはコシヒカリが好まれるが、カレーライスとしては「華麗舞」の方がおいしいとのアンケート結果も得られている。

わが国における糖尿病患者は約 800 万人、予備軍を含めると約 2,000 万人と概算されている。筆者らは、農水省の研究プロジェクトにおいて、畿央大、慈恵医大、キューピー研究所とともに、高アミロース米に関する共同研究を行った。すなわち、食味は劣るが摂食後の血糖上昇が緩やかな高アミロース米を中心に、その食味改善を図るとともに、当該米加工品を用いて動物およびヒトによる臨床試験を実施し、発症予防機能について解明することを目的に研究を行った結果、高アミロース米はアミロース含量が約 30% と高く、米飯がきわめて硬く、粘りの弱いこと、レジスタントスターチ量の多いことが明らかになった⁴⁹⁾。また、摂食後の血糖上昇が、低アミロース米や一般飯用米より緩やかであり、糖尿病の発症予防効果が期待されている。

超硬質米とは、澱粉のアミロース含量が多いのではなく、主要成分であるアミロペクチンの短鎖の少ない米の総称であり、九州大学の佐藤 光教授の研究室で EM10, EM72, EM189 などとして育成されている⁵⁰⁾。主要成分であるアミロペクチンの短鎖が少ないために、通常の高アミロース米よりさらにヨード呈色値が高く、見かけのアミロース含量は 40% を超えるものが多い。

筆者らは、佐藤教授との共同研究の中で、EM10 などの米飯がきわめて硬くて粘りが弱く、フィルムとしての引張強度も強いことを 2001 年に報告した⁵¹⁾。その後、農水省

の食品機能プロジェクトに参加する中で、筆者らの研究室では、EM10 をはじめとするこれらのアミロペクチン変異米がレジスタントスターチを多く含むことに注目し、米飯や米粉パン、米粉めんなど、各種の米加工品に利用する特許を出願した⁵²⁾。米飯の場合は、粒状であり、外層部から緩やかに消化されるので、食パンやマッシュポテトに比べて食後血糖上昇が緩やかであることが知られている。しかし、米粉として利用する場合には、この効果がうすれ、血糖が比較的速やかに上昇すると報告されている。そこで、筆者らは、この EM10 などのアミロペクチン長鎖型の米を「超硬質米」と総称することを提案し、米粉加工品においても食後血糖上昇の抑制効果があることを確認するための研究を行ってきた。

EM10 などの超硬質米の米飯は、通常の高アミロース米よりもきわめて硬くて粘りが弱く、主食用としては適していない。そこで、筆者らの開発した糊化組成物としてパンや麺に加える技術⁵³⁾を適用することにした。試作したパンの比容積は大きく、テンシプレッサーを用いる多重バイト法で測定した食感も良好であった。試食の結果、硬さや弾力性などの物理性においては市販の食パンより良好であり、パン製造 4 日後の物性については、市販の食パンを上まわる評価であった。超硬質米 EM10 の小麦粉に対する配合割合を、4:6 とした米粉含有パンは、摂食後 60 分で有意にインシュリン分泌増加が抑制されていた⁴⁹⁾。この研究成

図 6. 農水省実用技術開発事業「超硬質米プロジェクト」の概要

九州大学で育成されたアミロペクチン長鎖型の超硬質米の澱粉特性、製粉特性、吸油特性、食後血糖上昇抑制効果などを解明し、各種の機能性米粉パンや機能性米粉麺を開発した。

図7. 赤タマネギ添加による種子の発芽促進および抗菌性

超硬質米を発芽玄米として利用する際、発芽液に赤タマネギを添加することで、微生物の増殖を抑制しながら、玄米の発芽を促進し、ケルセチン等を強化できることを見出した。

果を元に、2008年から5年間の「アミロペクチン長鎖型の超硬質米を利用した新需要食品の開発」プロジェクトが実施された(図6)。このプロジェクトの結果、福岡県農試では「ちくし粉85号」、北陸研究センターでは「北陸粉243号」が育成され、後者は2013年から始まった農水省の「機能性食品開発」プロジェクトの中で、食後の血糖上昇抑制等の機能性について医学的エビデンスを得る共同研究に発展している。

4.2 発芽玄米

稲の胚芽を水に浸漬しておくと、グルタミン酸脱炭酸酵素(GAD)の作用によってγ-アミノ酪酸(GABA)が増加することが報告され、発芽玄米の利用が拡大した⁵⁴⁾。ミネラル、ビタミン、食物繊維、GABAなどが多い上に、軟化して呈味成分が増加し、一般の精白米とブレンドして通常の炊飯器で炊飯できることからその利用が広がった。問題点としては、発芽時に微生物が繁殖しやすいので、出荷前に殺菌工程が必要なこと、市販品の価格が高いことなどが挙げられる。

筆者らは、タマネギの抗菌性に着目し、発芽時に添加することで微生物の増殖抑制を試みた結果、赤タマネギの場合に効果が顕著であることを見出した⁵⁵⁾(図7)。しかも、赤タマネギの添加によって、発芽率の低い原料米の発芽率が向上し、その発芽促進効果は、米に限定されず、麦、大豆、小豆などにも適用されることが明らかになった⁵⁶⁾。

赤タマネギの発芽促進効果については、ウニコナゾールPの添加によってその効果が減少することから、ジベレリンを介することが推察されるが、筆者らは、新潟大学の三ツ井教授と共同で、プロテオーム解析による機構解明に取り組んでいる。赤タマネギの添加によって、インドール酢酸合成関連酵素が増加することが認められ、今後の発芽促

進機構の解明が期待されている。

4.3 各種米粉加工食品の開発

筆者らは、関口醸造(株)および茨城県工業技術センターとともに、農水省総合食料局の助成を受け、共同研究を行った。①低アミロース米ミルクイエーンを原料とする米菓製造技術および棒状米菓製造技術を開発した。②消化性を向上させるために、酵素をマイクロカプセル化して米菓生地に練り込む製造技術を開発した。③香りを改善するために、香気成分をマイクロカプセル化して米菓生地に練り込む製造技術を開発した。④機能性を増強するために、発芽玄米や酒粕を添加した米菓製造技術を開発した⁵⁷⁾。

また、農水省の「新形質米の機能性を活用した新食品の開発」の共同研究の中で、3種類の「新形質米」を30%小麦粉に配合することで、小麦粉100%のパンよりも老化しにくいパンを試作できることを見出した⁵⁸⁾。すなわち、高アミロース米である「夢十色」、紫黒糯米である「朝紫」、糖質米である「あゆのひかり」を複合利用することで、外観、膨張性、耐老化性の優れたパンを製造できることが明らかになった。

5. おわりに

32年間の研究を振り返ってみると、産業界の研究期間が長く、社会的ニーズに応えるための短期的な研究が多く、深化型の研究の少ないことになったことに忸怩たる思いがある。米の主成分は澱粉であり、本学会および澱粉研究懇談会において発表された諸先生方の研究成果を学びながら研究開発を行うことができた。また、本学会では、産学官の連携協力が進んでおり、共同研究の進め方なども学ぶことができた。新潟大学に新しい糖質科学の研究者が増

えてきた^{59,60)}ことも本学会のおかげであり、深く感謝している。

世界の食料需給は長期的には逼迫が予想されており、貿易の自由化の動きなど、米を巡る情勢はきわめて厳しいものがある。米の品質利用に関する研究開発を進めることで、少しでもわが国の食料確保に貢献できるよう、今後も研究に取り組みたいと考えている。

謝辞

本論文で述べた研究は、筆者が農林水産省食品総合研究所(現、飼農研機構食品総合研究所)および新潟大学において行ったものであり、日本応用糖質科学会の貝沼圭二元会長、谷口 肇元会長、坂野好幸元会長、竹田靖史元会長、松井博和前会長、春見隆文会長、林 清前東日本支部長をはじめ、多くの先生方のご指導を頂きながら行ったものであり、心よりお礼申し上げます。米の品質特性に関しては、谷 達雄先生、竹生新治郎先生、柳瀬 肇先生のご教示を頂き、澱粉の特性に関しては、不破英次先生、高橋幸資先生、井ノ内直良先生に感謝申し上げます。タンパク質の研究に関しては、田中國介先生、増村威弘先生のご教示を頂き、稲育種に関しては佐藤 光先生、三浦清之先生から貴重な新品種試料を頂きました。また、Dr. M. Richardson, Dr. E. Champagne, Dr. H. Choiに感謝いたします。

旧食糧庁品質管理室、旧北陸農業試験場品質評価研究室、タカラバイオ(株)、越後製菓(株)、キューピー(株)、日本精米工業会、山崎製パン(株)、フォス・ジャパン(株)、タケトモ電機(株)、吉村穀粉(株)、関口醸造(株)の皆様にお礼申し上げます。

共同研究者である中村澄子准教授をはじめ、食品総合研究所穀類特性研究室の皆様、新潟大学農学部食品製造学研究室の皆様にも篤くお礼申し上げます。

文献

- 1) E.T. Champagne, K.L. Bett, M.A. Fitzgerald, C.C. Grimm, J. Lee, K. Ohtsubo, S. Jongdee, L. Xie, P.Z. Bassinello, A. Resurreccion, R. Ahmad, F. Habibi and R. Reinke: Important sensory properties differentiating premium rice varieties. *Rice*, **3**, 270-281 (2010).
- 2) 大坪研一：米の品質。『米の科学』、竹生新治郎監修、石谷孝佑、大坪研一編、朝倉書店、東京、pp. 13-77 (1995)。
- 3) 岡留博司、豊島英親、大坪研一：単一装置による米飯物性の多面的評価。日食工誌, **43**, 1004-1011 (1996)。
- 4) 岡留博司、豊島英親、須藤 充、堀末 登、安東郁夫、沼口憲治、大坪研一：米飯1粒の多面的物性測定に基づく米の食味評価。日本食品科学工学会誌, **45**, 398-407 (1998)。
- 5) 中村澄子、鈴木啓太郎、原口和朋、大坪研一：物性測定のための米一粒による炊飯方法の開発。育種学研究, **9**, 63-66 (2007)。
- 6) M. Yamakura, K. Haraguchi, H. Okadome, K. Suzuki, U.H. Tran, A.K. Horigane, M. Yoshida, S. Homma, A. Sasagawa, A. Yamazaki and K. Ohtsubo: Effects of soaking and high-pressure treatment on the qualities of cooked rice. *J. Appl. Glycosci.*, **52**, 85-93 (2005)。
- 7) 豊島英親、岡留博司、大坪研一、須藤 充、堀末 登、成塚彰久、相崎万裕美、大川俊彦、井ノ内直良、稲津 脩、不破英次：ラビッドビスコアライザーによる米粉粘度特性の微量迅速測定方法に関する共同試験。日食工誌, **44**, 579-584 (1997)。
- 8) 大坪研一、岡留博司、井上 茂：穀類の食品物性値を表示する糊化特性測定装置。日本特許第 3908227 号 (2007)。
- 9) N. Shimizu, T. Kimura, J. Katsura, T. Yanagisawa, S. Inoue, R.P. Withey, I.A. Cowe, C.G. Collin, A.B. Blakeney, S. Yoshizaki, H. Okadome, H. Toyoshima and K. Ohtsubo: Determination of apparent amylose content in Japanese milled rice using NIT spectroscopy. *Food Sci. Technol. Res.*, **5**, 337-342 (1999)。
- 10) H. Okadome, H. Toyoshima and K. Ohtsubo: Multiple measurements of physical properties of individual cooked rice grains with a single apparatus. *Cereal Chem.*, **76**, 855-860 (1999)。
- 11) T.T. Uyen, K. Suzuki, H. Okadome, S. Homma and K. Ohtsubo: Analysis of the tastes of brown rice and milled rice with different milling yields using a taste sensing system. *Food Chem.*, **88**, 557-566 (2004)。
- 12) T.T. Uyen, K. Suzuki, H. Okadome, H. Ikezaki, S. Homma and K. Ohtsubo: Detection of changes in taste of japonica and indica brown and milled rice during storage using physicochemical analyses and a taste sensing system. *J. Agric. Food Chem.*, **53**, 1108-1118 (2005)。
- 13) C. Bergman, C. Battacharya and K. Ohtsubo: End-use qualities of rice. in *Rice*, E. Champagne, ed., Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, pp. 415-472 (2004)。
- 14) H. Okadome, H. Toyoshima, N. Shimizu, K. Suzuki and K. Ohtsubo: Quality prediction of rice flour by multiple regression model with instrumental texture parameters of single cooked milled rice grains. *Cereal Chem.*, **82**, 414-419 (2005)。
- 15) 竹生新治郎、渡辺正造、杉本貞三、真部尚武、酒井藤敏、谷口嘉廣：多重回帰分析による米の食味の判定式の設定。澱粉科学, **32**, 51-60 (1985)。
- 16) Y. Takemoto, K. Suzuki, S. Nakamura, H. Satoh and K. Ohtsubo: Soluble starch synthase I effects differences in amylopectin structure between indica and japonica rice varieties. *J. Agric. Food Sci.*, **54**, 9234-9240 (2006)。
- 17) M. Kishine, K. Suzuki, S. Nakamura and K. Ohtsubo: Grain qualities and their genetic derivation of 7 new rice for Africa (NERICA) varieties. *J. Agric. Food Chem.*, **56**, 4605-4610 (2008)。
- 18) S. Nakamura, K. Machida and K. Ohtsubo: Search for cell-wall-degrading enzymes of world-wide rice grains by PCR and their effects on the palatability of rice. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 1645-1654 (2012)。
- 19) 大坪研一、中村澄子：米の外観品質・食味研究の最前線(8)―生物学的、物理的、化学的手法による米の食味評価―。農業および園芸, **86**, 641-651 (2011)。
- 20) K. Ohtsubo, H. Yanase and S. Yanagi: Properties of a trypsin inhibitor from Job's-tears, *Agric. Biol. Chem.*, **49**, 1985-1991 (1985)。
- 21) K. Ohtsubo, K. Harada and S. Kawasaki: Changes in level of proteases and their inhibitors, localization and interactions of Job's-tears seeds, *Plant Cell Physiol.*, **30**, 699-705 (1989)。
- 22) K. Ohtsubo and M. Richardson: The amino acid sequence of a 20 kDa bifunctional subtilisin/amylose inhibitor from bran of rice seed. *FEBS Lett.*, **309**, 68-72 (1992)。
- 23) K. Yoza, S. Nakamura, M. Yaguchi, K. Haraguchi and K. Ohtsubo: Molecular cloning and functional expression of cDNA encoding a cysteine proteinase inhibitor, cystatin, from Job's tears. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **66**, 2287-2291 (2002)。
- 24) K. Yoza, T. Imamura, K.J. Kramer, T.D. Morgan, S. Nakamura, K. Akiyama, S. Kawasaki, F. Takaiwa and K. Ohtsubo: Avidin expressed in transgenic rice confers resistance to the stored-product insect pests *Tribolium confusum* and *Sitotroga cerealella*. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **69**, 966-971 (2005)。
- 25) 大坪研一、奥座宏一、藤井 剛、川崎信二：米試料の品種判別方法。日本特許第 3685478 号 (2005)。
- 26) S. Nakamura and K. Ohtsubo: PCR method for the detection and identification of cultivars of rice flours used in yeast leavened breads containing both wheat and rice flours. *J. Cereal Sci.*, **52**, 16-21 (2010)。
- 27) K. Ohtsubo and S. Nakamura: Cultivar identification of rice (*Oryza sativa* L.) by polymerase chain reaction method and its application to processed rice products. *J. Agric. Food Sci.*, **55**, 1501-1509 (2007)。

- 28) M. Kishine, S. Nakamura, U. Matsukura and K. Ohtsubo: Cultivar identification of Korean rice based on DNA markers for blast resistance. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **72**, 2767–2769 (2008).
- 29) 中村澄子, 岡留博司, 與座宏一, 原口和朋, 奥西智哉, 鈴木啓太郎, 佐藤 光, 大坪研一: PCR 法による世界の広範な特性の米の識別及び食味要因の探索. *農化*, **78**, 764–779 (2004).
- 30) 大坪研一, 中村澄子, 今村太郎: 米の PCR 品種判別におけるコシヒカリ用判別プライマーセットの開発. *農化*, **76**, 388–397 (2002).
- 31) 大坪研一, 中村澄子, 宮村 毅, 雲 聡, 加藤郁之進: 穀粒中の混合品種の有無および混合された品種の判別方法, 日本特許第 4189873 号 (2008).
- 32) 大坪研一, 中村澄子: いもち病抵抗性の稲品種を DNA 判別法によって識別するためのプライマーおよび該プライマーを複数組み合わせ合わせたプライマーセット, 日本特許第 4756334 号 (2011).
- 33) 大坪研一, 中村澄子, 星 豊一, 松井崇晃, 石崎和彦: 稲の同質遺伝子系統識別方法及び当該識別技術を利用した米の産地識別方法, 日本特許第 4072610 号 (2008).
- 34) K. Ohtsubo and S. Nakamura: Cultivar identification of rice (*Oryza sativa* L.) by PCR method and its application of processed rice products. *J. Appl. Glycosci.*, **54**, 235–243 (2007).
- 35) 中村澄子, 鈴木啓太郎, 原口和朋, 與座宏一, 奥西智哉, 松井崇晃, 石崎和彦, 吉井洋一, 大坪研一: 糯加工品における糯米の品種判別および異種穀類の混入検出技術の開発. *農化*, **78**, 984–993 (2004).
- 36) 大坪研一, 中村澄子, 與座宏一, 穴戸宏一: 餅を試料とする原料米の DNA 品種判別. *日食工誌*, **48**, 306–310 (2001).
- 37) K. Ohtsubo, K. Suzuki, K. Haraguchi and S. Nakamura: Novel method for preparation of the template DNA and selection of primers to differentiate the material rice cultivars of rice wine by PCR. *J. Biochem. Biophys. Methods*, **70**, 1020–1028 (2008).
- 38) 大坪研一, 中村澄子: 醸造酒中の原料植物の判別方法, 日本特許第 4953058 号 (2012).
- 39) S. Nakamura, K. Haraguchi, N. Mirtani and K. Ohtsubo: Novel preparation method of template DNAs from wine for PCR to differentiate grape cultivar. *J. Agric. Food Chem.*, **54**, 10388–10395 (2007).
- 40) 大坪研一, 岡留博司, 中村澄子, 原口和朋, 與座宏一, 奥西智哉, 鈴木啓太郎: 米の DNA 食味判定技術及び粳/玄米半粒による良食味米選抜方法. 日本特許第 4255630 号 (2009).
- 41) 大坪研一, 中村澄子, 岡留博司: DNA 判別による米の食味推定. *日食工誌*, **50**, 122–132 (2003).
- 42) K. Ohtsubo, S. Nakamura and H. Okadome: Method to evaluate rice palatability by PCR, European Patent, EPI298222B1 (2006).
- 43) 大坪研一, 岡留博司, 井邊時雄, 佐藤宏之, 久能昌朗: 膨化玄米, 日本特許第 4126335 号 (2008).
- 44) 大坪研一, 岡留博司, 奥西智哉, 鈴木啓太郎: 発芽玄米膨化物及びその製造方法, 日本特許第 4166011 号 (2008).
- 45) 小林明晴, 鈴木保宏, 小林 陽, 三浦清之, 大坪研一: 北陸地域の新形質米の品質特性. *日食工誌*, **45**, 484–493 (1999).
- 46) V. Singh, H. Okadome, H. Toyoshima, S. Isobe and K. Ohtsubo: Thermal and physicochemical properties of rice grain, flour and starch. *J. Agric. Food Chem.*, **48**, 2639–2647 (2000).
- 47) K. Ohtsubo, K. Suzuki, Y. Yasui and T. Kasumi: Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder. *J. Food Compos. Anal.*, **18**, 303–316 (2005).
- 48) 大坪研一, 中村澄子: 機能性米粉, その製造方法及び該米粉を用いた飲食品, 日本特許第 4868336 号 (2011).
- 49) 大坪研一, 中村澄子, 宇都宮一典, 増田泰伸, 辻 啓介: 硬質米と糖尿病発症予防, 実用化に向けた取り組み. *食品工業*, **53**, 46–51 (2010).
- 50) A. Nishi, Y. Nakamura, N. Tanaka and H. Satoh: Biochemical and genetic analysis of the effects of *amylose-extender* mutation in rice endosperm. *Plant Physiol.*, **127**, 459–472 (2001).
- 51) 高橋 仁, 大坪研一, マリッサ・ロメロ, 豊島英親, 岡留博司, 西 愛子, 佐藤 光: 高アミロース突然変異米の用途推定のための基本品質特性評価. *日食工誌*, **48**, 617–621 (2001).
- 52) 大坪研一, 中村澄子: 硬質発芽穀類加工食品およびその製造方法, 日本特許第 5414100 号 (2013).
- 53) S. Nakamura, H. Satoh and K. Ohtsubo: Characteristics of pregelatinized *ae* mutant rice flours prepared by boiling after pre-roasting. *J. Agric. Food Chem.*, **59**, 10665–10676 (2011).
- 54) N. Shirai, H. Suzuki, K. Suzuki and K. Ohtsubo: Effect of extruded polished brown, and germinated brown rice on the behavior and plasma parameters of ICR mice. *Food Sci. Technol. Res.*, **16**, 621–626 (2010).
- 55) S. Nakamura and K. Ohtsubo: Acceleration of germination of super-hard rice cultivar EM10 by soaking with red onion. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **75**, 572–574 (2011).
- 56) S. Nakamura and K. Ohtsubo: Influence of physicochemical properties of rice flour on oil uptake of tempura frying batter. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **74**, 2484–2489 (2010).
- 57) 大坪研一, 関口恭史, 中川力夫, 金子成延, 鈴木啓太郎, 中村澄子, 長谷川裕正: 小麦含有米菓およびその製造方法, 日本特許第 4744395 号 (2011).
- 58) S. Nakamura, K. Suzuki and K. Ohtsubo: Characteristics of bread prepared from wheat flours blended with various kinds of newly developed rice flours. *J. Food Sci.*, **74**, E 121–130 (2009).
- 59) T. Nihira, E. Suzuki, M. Kitaoka, M. Nishimoto, K. Ohtsubo and H. Nakai: Colorimetric quantification of α -D-mannose 1-phosphate. *J. Appl. Glycosci.*, **60**, 137–139 (2013).
- 60) 中井博之, 仁平高則, 北岡本光, 大坪研一: 糖質関連酵素が触媒する糖質合成反応を活用した新規オリゴ糖の生産開発. *応用糖質科学*, **2**, 223–224 (2012).