

# 食糧

その科学と技術

Shokuryo — food science and technology —

# 55

国立研究開発法人  
農業・食品産業技術総合研究機構

食品研究部門

Food Research Institute, NARO (NRFI)  
National Agriculture and  
Food Research Organization (NARO)

2017.3

# まえがき

農研機構 食品研究部門は、農林水産物や食品の価値を最大限に向上させる技術の開発、多様で安全な食品とそれを支える技術の提供、科学的で正しい食品の情報の発信など、食品に関わる基礎から応用に至る幅広い独創的な研究を通じて、安全でおいしく健康的な食品の低コスト・安定供給を実現し、これにより、持続的に発展可能な社会の実現に貢献することを大きな役割としています。

食品研究部門では、その時々の研究トピックスや今後の研究開発の考え方、技術の普及材料となる研究などを分かりやすく解説した冊子「食糧」を年一回刊行しています。今回の食糧 55 号では、「穀類利用」をキーワードに関連の研究成果を解説いたします。

日本人の主食である米の一人あたりの年間消費量は、年々減少しており、ピークであった昭和 30 年代半ばに比較して半分以下となっています。米の消費量低下の主な原因としては、食の欧米化、消費者ニーズの多様化、主食のウエイト低下（「おかず食い」への傾向）などが考えられます。一方、我が国の食料自給率は、カロリーベースで 39%と低い値が続く中、米だけは、ほぼ自給できる状況にあります。このため、食料自給率の向上を図るためには、米の用途拡大が少なからず効果を有するものと考えられます。食品研究部門は、83 年前（1934 年）に農林省米穀局内に設置された米穀利用研究所をその始まりとしており、米の加工利用に関する研究では長い歴史を有しています。この特集では、米の用途拡大、消費拡大に向けての、食品研究部門での最近の取り組みを幅広く紹介します。この一冊で、米の加工利用に関する研究の最新の進捗状況を把握していただけるものと期待しています。

食品に係る研究者や技術者だけではなく、食に関心をお持ちの多くの方々に活用していただくとともに、現在の食品研究部門の活動について少しでもご理解をいただければ幸いです。

なお、食糧の 15 号（1972 年）以降は、食品研究部門のホームページでも公開しておりますので、ぜひご参照下さい。

([http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/laboratory/nfri/index.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/nfri/index.html))

平成 29 年 1 月 5 日

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）食品研究部門  
研究部門長 鍋谷 浩志



# 目 次

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| I   | 工学的単位操作による米の品質・加工特性の制御<br>一粒食・粉食での事例一 |    |
|     | 岡留 博司                                 | 5  |
| II  | 玄米の澱粉消化性および玄米摂取後の血糖値の制御要因             |    |
|     | 佐々木 朋子                                | 19 |
| III | 日本で栽培されている米の澱粉特性                      |    |
|     | 中浦 嘉子                                 | 33 |
| IV  | 米粉パンの比容積に影響を与える因子                     |    |
|     | 與座 宏一                                 | 51 |
| V   | 穀粉の吸水性の評価と調節                          |    |
|     | 松木 順子                                 | 63 |



# I 工学的単位操作による米の品質・加工特性の制御

## —粒食・粉食での事例—

### はじめに

国内における現在の米の年間消費量はピーク時の半分以下まで減少してきており、今後も人口減少に伴い減少すると推計されている<sup>1)</sup>。一方、米の消費が落ち込む中、加工米飯（無菌包装米飯、レトルト米飯、冷凍米飯等）や中食・外食産業は近年シェアを着実に伸ばしてきている<sup>2,3)</sup>。これは女性の社会進出や高齢者・単身者の増加等に伴う社会構造の変化が要因であり、今後も食の外部化・簡便化が進行して、米の消費形態が益々多様化することが予想される。また農林水産省では米の需要拡大に向け、「21世紀新農政2008」の中で国際的な食料事情を踏まえた食料安全保障の確保のため、米については「ご飯」としてだけでなく、「米粉」としてパン、麺類等に活用する取組を本格化させている。しかしながら、米粉の用途は和菓子原料に限定されてきた経緯があり、小麦代替原料として活用するには解決すべき技術的課題が多く<sup>4)</sup>、また食育からのアプローチも必要だと思われる。

このようなことから、米については粒食・粉食の両方で需要拡大に向けた加工技術の開発が望まれる。米の品質や加工特性は、基本的には品種特性に左右されるが、栽培・気象条件や収穫後の貯蔵・加工流通条件でも変動する。このため、多様な実需・消費ニーズに応えるには加工技術の開発だけに終始するのではなく、米を取り囲むフードチェーン全体で品質・加工特性を安定・向上させるシステムを構築し、社会実装に向けて最適化していくことが重要であろう。本稿では筆者らがこれまで取り組んできた工学的単位操作（表面加工、加熱、冷却、粉碎等）による米の品質・加工特性の制御研究を中心に粒食及び粉食での事例について紹介する。

## 1. 粒食用途向けの品質・加工特性の制御

### 1-1 表面加工による玄米の加工特性制御

玄米は白米より一次機能（栄養）や三次機能（生体調節）が優れているものの、二次機能（嗜好性）が劣るため、玄米の消費拡大が進んでいない。このため、農研機構では玄米表面に僅かに創傷を形成させた表面加工玄米を製造する表面加工技術を開発した。

表面加工玄米は精米歩留まりが99.8%程度であるため、玄米と栄養成分は殆ど変わらないが、玄米表面に傷が形成されることにより品質・加工特性が改善される知見が幾つか得られた。図1-1は生米での吸水性の比較例を示す<sup>5)</sup>。全て

の米試料で浸漬時間の経過とともに吸水率は上昇するが、30%到達時間は白米、一分搗き米、表面加工玄米、玄米の順に短いことがわかる。すなわち、玄米は吸水が遅いため、軟らかくするには白米よりも炊飯時間を長く設定する必要があるが、表面加工玄米の場合には吸水が早いため、玄米よりも炊飯時間を短縮できることが示唆された。

図1-2は少量炊飯(10g)した場合の米飯粒の物性の比較例である<sup>6)</sup>。3種類とも加水量の増加に伴って、表層及び全体とも硬さが低下傾向を示す。同加水量では表面加工玄米の方が玄米よりも表層が軟らかくなっており、表面加工が表層の硬さの低減に有効であることがわかった。また表面加工玄米では加水量を多めに設定することで白米と同程度の硬さに調製できることもわかってきた。一方、粘りに関しては、表面加工玄米は玄米よりも表層の粘りが大きい結果が得られた。おにぎり成型機で成形性を比較した結果では、白米と表面加工玄米では加水量の増加に伴っておにぎり重量が増加するのに対して、玄米では重量変動が小さく、表面加工玄米と玄米では成形性が異なる知見を得た。これは上述の表層の硬さや粘りが加工成形性に影響することが考えられ、機械成型の際にはそれぞれに応じた成型条件の設定が必要であることが示唆された。栽培条件による品質への影響については、一般的に窒素多肥ではタンパク含量が高くなり、白米では食味低下が指摘されているが、表面加工玄米でも同様に窒素多肥では食味が低下する知見が得られた<sup>7)</sup>。

実際、長期間(4週間)食べたときの食べやすさの比較では、表面加工玄米の方が玄米よりも食べやすいという結果が得られている<sup>8)</sup>。表面加工玄米のインビトロ消化性や咀嚼性についても知見が得られており、詳細については掲載論文を参照されたい<sup>9-10)</sup>。またヒト介入試験による機能性の検証効果については、前糖尿病患者及び過体重者を対象に一定期間摂取した試験(UMIN000014276及びUMIN000016293)を実施した結果、体重や腹囲の減少効果等が見られた<sup>11)</sup>。

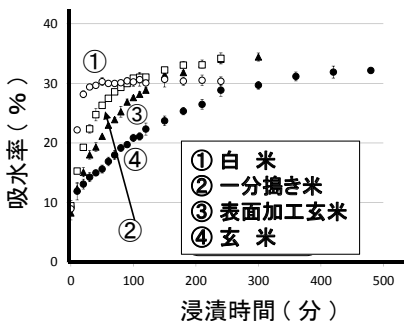


図1-1 生米の吸水性の比較

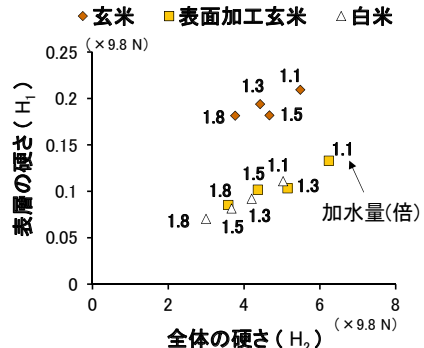
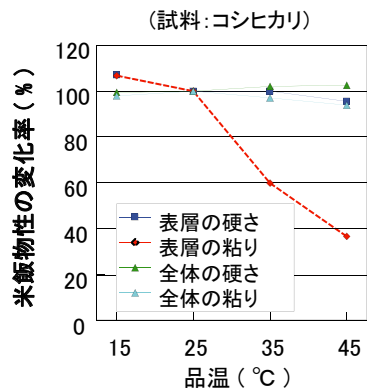


図1-2 加水による米飯粒の硬さの変動

## 1-2 温度変化による米飯の加工特性の変動

加工米飯等の製造においては、炊飯後の冷蔵、冷凍・解凍、レトルト、乾燥、輸送等の工程での米飯の温度制御が必要となる。そこで、温度制御による米飯の加工特性の変動について検討した事例を紹介する。米飯の硬さや粘りは食味の重要な要因であるが、品温で変動することが指摘されているため、機器測定で数値化する場合、バラツキを抑えるために通常、一定温度で測定する<sup>12,15)</sup>。図1-3は実際、米飯物性が品温でどの程度変動するのかを具体的に調べた事例で、品温が15℃から45℃まで変動した場合の物性の変化率を示す。全体の硬さ、全体の粘り及び表層の硬さは品温による変動は殆どないのに対して、表層の粘りは室温25℃から20℃上昇することにより半減している。すなわち、他の項目に比べると温度依存性が高く、換言すると、温度制御で表層の粘りは制御し易いと言える。これにより、製造現場の炊飯後の工程においては品温の制御次第で米飯粒同士やコンベア・ホッパーとの付着性が変動することとなり、結果的にハンドリング特性（成形、計量、充填等の精度）が変動することが推察される。従って、製造工程でのトラブル回避には米飯の品温を一定に維持して物性変動を最小限に抑える等の対策が必要と言える。例として、シャリ玉成型機に保温機能を搭載したり、職人さんが人肌でシャリ玉やおにぎりを握ったり、あるいは冷やご飯を一度加熱してチャーハンを作ったりする場面が挙げられる。これらの例では粒子同士や成型ロール、手のひら、フライパンとの付着性を適度に和らげ、成形性や作業性を向上させるために比較的高い温度帯を維持していると考えられる。

一般的にごはんを冷蔵庫で保存すると硬くなることは誰もが経験している。図1-4はいろいろな品種・系統を使って低温保存したときの物性変化を比較した結果を示す<sup>16)</sup>。代表的な良食味品種であるコシヒカリ（澱粉の構成成分であるアミロース含量：18%前後）は低温で24時間保存後では、表層の粘りが半減し、表層の硬さは倍以上に増大していることがわかる。これは常温に比べて低温では米の主成分である澱粉の老化が進行しやすいためである。しかし、コシヒカリよりもアミロース含量が少ない低アミロース米（5～15%前後）の中には低温での変化率がコシヒカリよりも小さい品種・系統が見られる。特に奥羽系統では低温による物性変動が少ない。これより、チルド輸送で食感変動を抑えるという観点で



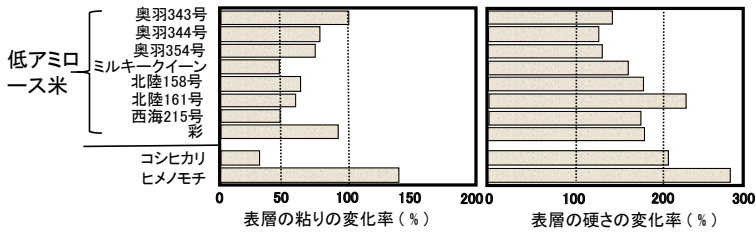
※25℃の物性値を100とした場合の変化率

図1-3 米飯粒の品温によるテクスチャーの変化率



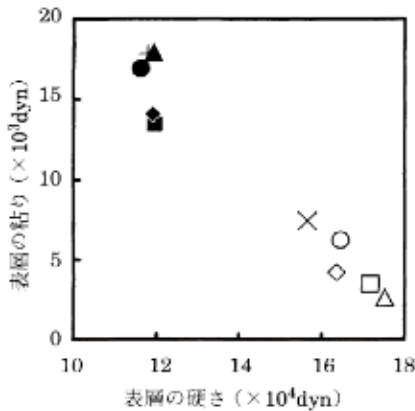
はコシヒカリのような良食味米よりも低アミロース米の方が適しており、使用温度帯での品種の使い分けを提示している知見である。

次いで、図 1-5 は酢飯での低温保存後の物性変動を調べた結果を示す<sup>17)</sup>。これはテイクアウト用の寿司ではネタの鮮度保持や衛生面からチルド帯での販売・流通を想定し、低温下での酢飯の食感が寿司酢の種類によってどの程度異なるのかを調べたものである。「当日」は室温 2 時間後の、「冷蔵後」は 4℃で 18 時間保存後に室温に戻したときの表層の物性を示す。「当日」は表層の硬さは寿司酢の種類で殆ど差はないが、表層の粘りは水とブドウ糖を添加した酢飯粒で若干低くなっている。しかし、「冷蔵後」ではいずれの酢飯粒も当日に比べて表層の硬さ



※炊飯直後の物性値を100としたときの5℃で24時間保存後の変化率

図 1-4 低温保存に伴う米飯粒表層の物性変化



◆, ●, ショ糖使用 (当日); ▲, 果糖使用 (当日); +, 麦芽糖使用 (当日); ○, ◇, 水 (冷蔵後); □, ブドウ糖使用 (冷蔵後); △, 果糖使用 (冷蔵後); ×, 麦芽糖使用 (冷蔵後)

図 1-5 冷蔵保存に伴う各種酢飯粒の表層の物性変化

が増大し、表層の粘りは低下しており、中でも果糖を使用した酢飯粒の物性変化が最も大きかった。これより、低温下での酢飯の食感の変動抑制には果糖以外の糖の方が適していることになる。いずれにしても、低温流通では、寿司酢の種類で酢飯の食感の変化速度が異なるので、使用する糖の種類や濃度を変える等対策を講じるが必要となる。

## 2. 粉食用途向けの品質・加工特性の制御

### 2-1 粉砕機の種類について <sup>18-22)</sup>

粉砕とは粉体や固体に外力を加えてさらに細かくすることであり、目的としては1) 利用しやすい粒径にする、2) 表面積を大きくして乾燥、抽出、溶解、蒸煮等を容易にする、3) 成分分離を行って使い分ける、4) 他の粉体と混合しやすくする、5) 流動性を向上させることである。表 2-1 に食品分野で使われる粉砕機を示す。小麦は米よりも粉砕し易いため、大規模工場ではロール式粉砕機が主に導入されている。これに対して、米はロール式以外にも衝撃式、胴搗き式、気流式等様々な原理の粉砕機が使われている。また小規模工場が多く、工場によって導入粉砕機の種類が異なるのが現状である。さらに米粉の製粉には湿式と乾式

表 2-1 食品分野で使われる粉砕機

| メカニズム                   | 形 式     | 特 徴                                    | 使 用 例                             | 製 品 名                                      |
|-------------------------|---------|--|-----------------------------------|--|
| 回転するハンマーやビンによる機械的な衝撃で粉砕 | 機械的衝撃式  | ハンマーの高速回転や杵の往復運動による衝撃力で粉砕              | 穀物、香辛料、砂糖、食塩、デンプン、茶、乾燥果実、ゼラチン     | ハンマーミル<br>アトマイザー<br>バルベライザー<br>スタンプミル      |
|                         | 遠心衝突式   | 回転する装置の中心に原料を供給し、遠心力を発生させてビンなどに衝突させて粉砕 |                                   | ピンミル<br>自由粉砕機<br>インバクトミル                   |
| 高速気流により粉砕               | 渦流式     | ローターを高速で回転させて発生する渦流で粉砕                 | 穀物、砂糖、食塩、香辛料、魚粉、海藻、植物根、ゼラチン、コンニャク | ターボミル<br>マイクロマット<br>ブレードミル<br>ウルトラローター     |
|                         | 高速気流噴射式 | ノズルから高速気流を噴射                           | 茶、米、乾燥野菜                          | ジェットミル<br>ジェットオーマイザー<br>ウルマックス<br>カレントジェット |
| 機械的せん断力により粉砕            | 挽き臼式    | 上臼の荷重のもとで、回転により発生するせん断力により粉砕           | 抹茶、ソバ、コムギ                         | 石臼   |
|                         | 湿式回転式   | ステーターに対して高速で回転するローターのせん断力により粉砕         | 大豆、プロイラー、魚肉、野菜、果物、米(醸造用)、味噌       | コロイドミル<br>マスコロイダー                          |
| 一対のロールで粉砕               | ロール回転式  | ロール間隙、一対のロールの回転数の差で粉砕性を調整              | コムギ                               | ローラーミル                                     |
| 媒体とともに回転させて粉砕           | 媒体式     | 金属やセラミックスのボールを媒体                       | 茶、米、鯉節、香料                         | ボールミル<br>チューブミル<br>遊星ボールミル                 |

の2種類の方法があり、湿式は原料となる米粒の水分含量を予め高めると粉碎しやすいという性質を利用したものであるが、製粉後に乾燥を要するため乾式よりも製粉コストが高くなる。

回転するハンマーやピンによる機械的衝撃で粉碎する装置としてスタンプミル（胴搗き製粉機）は杵の往復運動による打撃衝撃力によって原料を粉碎していく。具体的には精米を水洗後に水分を約28%に調整し、スタンプミルで粉碎し、シフターにより篩い分けし、乾燥して製造されるため、湿式製粉の米粉となる。ハンマーミルは高速回転するハンマーの衝撃で粉碎する。ピンミル、インパクトミル、自由粉碎機は回転する装置の中心に原料を投入し、遠心力を発生させてピンなどに衝突させて粉碎する遠心衝撃式の粉碎機である。

微粉碎を特徴とする気流式粉碎機は高速気流を利用する粉碎機で、ローターを高速回転させて発生する渦流を利用して粉碎する渦流式とノズルから高速気流を噴射させて粉碎する高速気流噴射式がある。渦流式粉碎機の例として、スーパーパウダーミルやマイクロシクロマットでは空気の高速渦流による圧力変動で原料を高周波振動させて原料を自己破壊させ、回転数や吸引空気量などを調整することで目的の粒度が得られるようになっている。また、気流式粉碎機は高速気流そのものが粉碎媒体としての役目を果たすため温度上昇が少ないのが特徴である。

石臼は最も原始的な製粉方法であり、上下一対の臼からなり、上下臼の接触面には4～12分画するような放射状の主溝が刻まれ、その主溝に平行して複数の複溝が刻まれている。上臼の原料投入用の穴から投入された穀粒は上下臼の隙間に落下し、臼間の摩擦により砕かれ、外側へ向かうほど細かく粉碎されていく。石臼は発熱が少ないのが特徴であるが、生産性が低い。

ロールミルは一对のロールの回転により粉碎する装置で、ロールの間隙や回転数を調整することで米粉の粒度を調節することができる。精米を洗米した後に通風乾燥で水分を15%以下に乾燥し、ロールミルで粉碎し、シフターによりふるい分けして製造するので乾式製粉の米粉となる。

## 2-2 粉碎方法による米粉の粉体特性の相違について<sup>23)</sup>

粉体特性は粉体の製造工程でのハンドリング特性を把握する上で有用な情報となる。そこで、まず基本的な粉体特性として、実際、米粉の製粉現場で使用されている数種類の粉碎機を用いて作製した米粉の粒子径分布を測定した例を図2-1に示す。気流式粉碎機で粉碎された米粉は粒度が細かく（平均粒径が20～80 μm前後）、またシャープな粒度分布を示したのに対して、ロールミルやピンミルでは粒度が粗く（140～260 μm前後）、分布幅が大きかった。すなわち、同じ原料を使っても粉碎機の種類や粉碎条件（乾式・湿式）で米粉の粒度が異なることがわかる。

次いで、多様な特性を持つ米品種（糯米、低アミロース米、高アミロース米、

多収米等)を用いて粉碎した米粉について、平均粒径とゆるめカサ密度及び安息角との関係を図2-2及び図2-3に示す。ゆるめカサ密度は一定容量のカップに粉体試料を自然落下させたときの充填密度のことであり、製造工程のサイロやホッパーの設計の際に有用な指標となる。安息角は粉体試料を自然落下させた状態で形成される粉体の山の勾配の角度であり、粉体の流動性を判断する簡易な方法で、安息角が小さければ流動性が良いと判断できる。米粉のゆるめカサ密度は平均粒径の増大に伴って増加傾向を示した。すなわち、カサ密度は品種よりも粉碎方法の影響が大きく、ロールミルでは粒度が粗く、密度が大きいのに対して、気流式粉碎機では粒度が細かく、密度が小さい傾向を示した。すなわち、この結果

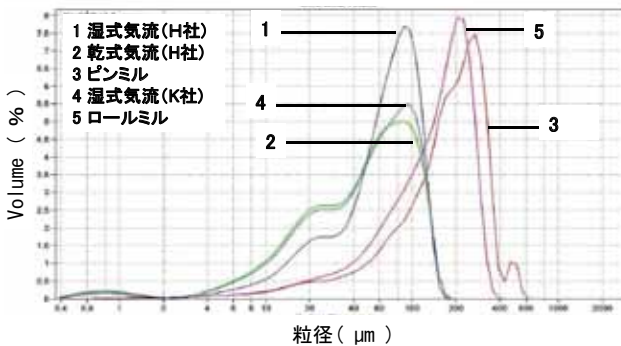


図 2-1 米粉の粒子径分布の測定例  
(原料：コシヒカリ白米)

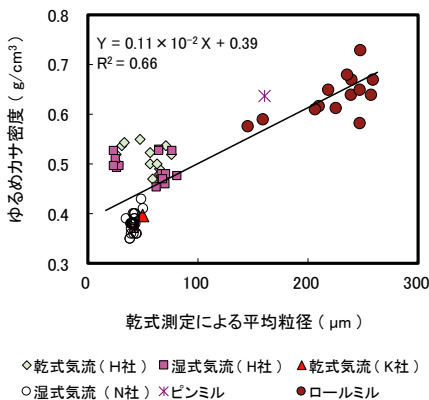


図 2-2 米粉の粒径とゆるめカサ密度の関係

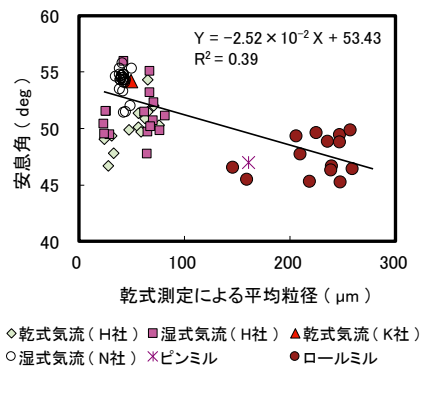


図 2-3 米粉の粒径と安息角の関係

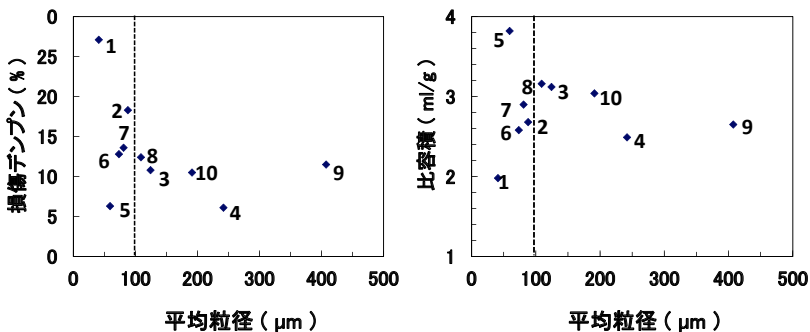
◇乾式気流(H社) □湿式気流(H社) ▲乾式気流(K社)  
○湿式気流(N社) ×ピンミル ●ロールミル

は粉碎方法によって粒度や密度が異なるため、包装資材の設計容量やトラック輸送での積載量等が変わることを示唆している。安息角は平均粒径と負の相関を示し、粒度が大きい米粉は安息角が小さくなる傾向を示した。これより、粒度の粗いロールミルやピンミルの米粉は粒度の細かい気流式粉碎の米粉よりも流動性が良いと判定できる。

このように、米粉の粉体特性は品種よりも粉碎方法、すなわち粒度に影響されやすいため、製造工程（粉体の搬送、サイロ貯留、包装資材への充填等の工程）でトラブルを防ぐには目的とする粒度に合った粉碎機を導入した際にはその粒度に適した製造工程の条件設定が必要となる。

### 2-3 粉碎方法による米粉の加工特性の変動について<sup>24-27)</sup>

同一原料を用いて幾つかの粉碎条件で作製した米粉の加工特性の比較例を図2-4に示す。調製した米粉の平均粒径は40～400 $\mu\text{m}$ 前後の範囲で、粉碎方法で平均粒径が10倍程度異なっており、石臼で粉碎した米粉が最も粗く、気流式粉碎機による米粉は細かい。損傷澱粉（粉碎時の衝撃や熱で傷がついた澱粉）の割合が6～27%の範囲で、米粉80%にグルテンを20%配合してストレート法で製造した米粉パンの比容積（パンの体積/重量）が2～4 ml/gの範囲で、同じ原料でも粉碎方法により米粉の加工特性が変動することがわかる。特に平均粒径100 $\mu\text{m}$ 以下の細かい米粉の製造では同程度の平均粒径でも粉碎方法によって損傷澱粉や比容積が大きく変動しているのがわかる。このため、細かい米粉を使用する際には粒度データのための判断では目的とする加工特性が得られないケースがあるので、他の品質項目も組み合わせて判断する必要がある。



- 1: ハンマーミル (スクリーン径: 0.7 mm)、2: ハンマーミル (1.0 mm)、  
 3: ハンマーミル (2.0 mm)、4: ピンミル、5: 湿式気流、6: 湿式気流、  
 7: 乾式気流、8: サイクロンサンプルミル、9: 石臼、10: 超遠心式粉碎機

図 2-4 粉碎方法が米粉の加工特性に与える影響

## 2-4 ジェットミル等によるマイクロ・ナノスケール粉碎による加工特性の制御<sup>28-34)</sup>

筆者らは上述の米粉よりも粒子サイズがさらに細かい平均粒径が $10\ \mu\text{m}$ ～数百 $\text{nm}$ 程度の米粉の特性解明を目的として、マイクロ・ナノスケール粉碎技術の開発に取り組んできており、その成果について一部紹介する。図2-5はジェットミルやハンマーミルを用いて乾式でマイクロスケール粉碎した米粉スラリーの分散性の比較結果を示す。全体的には分散直後に比べると25分後では吸光度が低下傾向を示すが、ジェットミルで粉碎した平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の微細米粉は吸光度の低下が小さく、分散が良好であることがわかった。図中の写真はジェットミルで粉碎した米粉スラリーの分散状態を示しており、平均粒子径 $45\ \mu\text{m}$ と $14\ \mu\text{m}$ では白から透明に変化しているが、 $3\ \mu\text{m}$ では白濁状態が保持されていることが確認できる。

図2-6はいろいろな作物から精製された澱粉粒をジェットミルにより乾式で3回繰り返し粉碎し、その特性変化について比較した結果である。馬鈴薯澱粉では平均粒径 $50\ \mu\text{m}$ （粉碎前）から $10\ \mu\text{m}$ 程度（3回粉碎後）まで粉碎すると最高粘度（回転粘度計の一種であるRVAで測定した澱粉懸濁液の加熱糊化過程の粘度曲線におけるピーク粘度）が約8分の1まで低下した。一方、 $5\ \mu\text{m}$ 程度（粉碎前）の米澱粉の粉碎では、3回

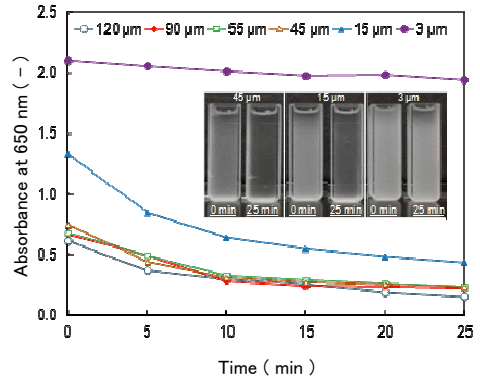


図 2-5 米粉スラリーの分散性の比較

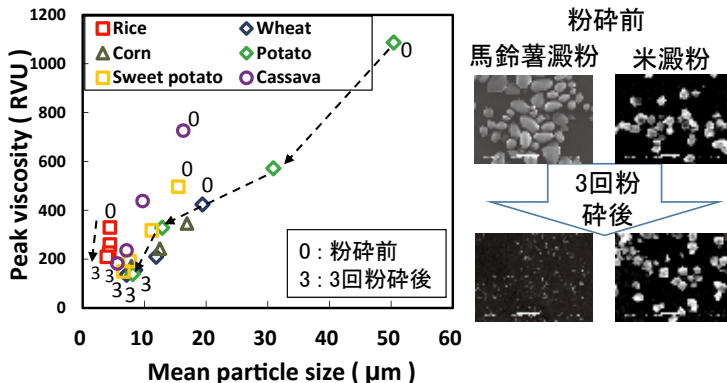


図 2-6 反復微粉碎による各種澱粉粒の特性変化

粉碎後でも粒径の変化は殆ど見られないが、最高粘度は半分程度まで減少した。電子顕微鏡写真から、3回粉碎後では馬鈴薯では澱粉粒が完全に破碎されているのに対し、米澱粉では部分的に破壊されており、澱粉粒の破壊の度合いに応じて加熱糊化時の澱粉粒の膨潤度が変化し、最高粘度が変動することが考えられた。

図 2-7 はマイクロ・ナノ粉碎による米粉の特性差異を示す。平均粒径 600 nm の米粉はジェットミルでマイクロスケール粉碎後に湿式メディアミルでナノ粉碎して作製したものである。澱粉の損傷割合は吸水性と正の強い相関を示しており、ナノ粉碎した最も細かい平均粒径 600 nm の米粉では吸水性や損傷澱粉度が劇的に増加することを見出した。これより、米の単粒澱粉 (5  $\mu\text{m}$ ) のサイズ以下の領域では、物理的粉碎で粒径を変えることによって、損傷澱粉や吸水性をフレキシブルに制御できる可能性があることがわかってきた。

以上、マイクロ・ナノスケール粉碎した細かい米粉の特徴について幾つか紹介したが、基本的にはターゲットとなるサイズが単粒澱粉のサイズ前後以下となるため、澱粉粒の破壊と損傷澱粉の増加は避けられず、米粉パンには適さないと判断できる。しかし、物理的粉碎による粒径制御のみで分散性や吸水性を可変にコントロールできる可能性を秘めていることがわかったことから、このような加工用途を目的とした場合には十分使える素材ではないかと考えている。

(食品加工流通研究領域 食品製造工学ユニット 岡留 博司)

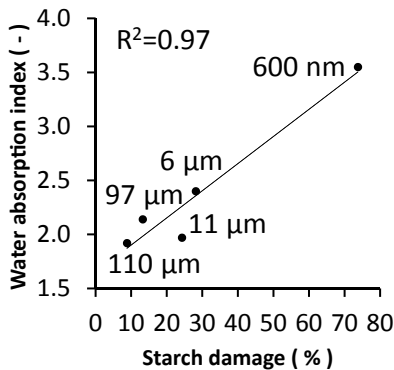


図 2-7 マイクロ・ナノスケール粉碎による米粉の特性変化

## 引用文献

- 1) 米穀機構. 米に関する調査レポート H26-6「ライフスタイルの変化と米消費の動向」(2015年3月5日発刊).
- 2) 米穀機構. 米に関する調査レポート H26-4「中食・外食の動向 (No.3 弁当給食事業者, 弁当等製造事業者)」(2014年9月17日発刊).
- 3) 米穀機構. 米に関する調査レポート H26-4「加工米飯の動向 (No.1 無菌包装米飯)」(2014年8月8日発刊).
- 4) 與座宏一・岡部繭子・島 純. 米粉利用の現状と課題—米粉パンについて, 日食科工誌, **55**, 444-454 (2008).
- 5) 奥西智哉, 岡留博司, Hossen Md. Sharif, 松木順子, 堀金彰, 宮下香苗, 矢口貴代. 表面加工玄米の炊飯特性, 日本調理科学会平成 27 年度大会研究発表要旨集, p.16 (2015).
- 6) 岡留博司, 知野秀次, 七山和子, 五月女格, 奥西智哉, 佐々木朋子, 安藤泰雅, 堀金彰. 異炊飯条件に伴う表面加工玄米の機械成形性の変動解析, 日本食品工学会第 17 回年次大会講演要旨集, p.25 (2016).
- 7) 岡野克紀, 飯島智浩, 宮本勝, 岡留博司, 堀金彰. 玄米タンパク質含量の違いによる表面加工玄米の食味特性日本作物学会第 240 回講演会要旨集, p.132 (2015).
- 8) 荒木理沙, 松浦文奈, 藤江敬子, 中田由夫, 鈴木浩明, 橋本幸一. 表面加工玄米の食べやすさに関するランダム化クロスオーバー試験, 日本栄養・食糧学会誌, **69**, 249-255 (2016).
- 9) Tomoko Sasaki, Tomoya Okunishi, Itaru Sotome and Hiroshi Okadome. Effects of Milling and Cooking Conditions of Rice on In Vitro Starch Digestibility and Blood Glucose Response, *Cereal Chemistry*, **93**, 242-247 (2015).
- 10) 神山かおる. 精米法と調理法が異なる米飯の咀嚼特性, 日本咀嚼学会雑誌, **26**, 14-19 (2016).
- 11) 橋本幸一. 表面加工玄米の機能性について—ヒト介入試験による効果検証一, 日本食品科学工学会第 63 回大会講演集, p.43 (2016).
- 12) 竹生新治郎・渡辺正造・杉 本貞三・真部尚武・酒井藤敏・谷口嘉広. 多重回帰分析による米の食味の判定式の設定: 米の食味と理化学的性質の関連 (第 2 報), 澱粉科学, **32**, 51-60 (1985).
- 13) Ohtsubo, K. et al. Comparative study of Texturometer and Instron texture measurements on cooked milled rices. *Rep. Nat. Food Res. Inst.*, **54**, 1-9 (1990).
- 14) Hiroshi OKADOME. Application of Instrument-Based Multiple Texture Measurement of Cooked Milled-Rice Grains to Rice Quality Evaluation,



- JARQ, **39** (4), 261-268 (2005).
- 15) Hiroshi Okadome, Hidechika Toyoshima, Naoto Shimizu, Keitaro Suzuki, and Ken'ichi Ohtsubo. Quality Prediction of Rice Flour by Multiple Regression Model with Instrumental Texture Parameters of Single Cooked Milled Rice Grains, *Cereal Chemistry*, **82**, 414-419 (2005).
  - 16) 高見幸司・郡山剛・大坪研一. 低アミロース米飯の低温保存中における硬化性とその評価方法, *日食科工誌*, **45**, 469-477 (1998).
  - 17) 小田原 誠・底押秀康・高橋鍛・岡留博司・大坪研一. すし酢が酢飯の低温保存後のテクスチャーに与える影響, *日食科工誌*, **51**, 620-625 (2004).
  - 18) 日本食品工学会編. *食品工学ハンドブック* (朝倉書店, 2006), p. 77-78.
  - 19) (社) 日本食品機械工業会. *最新日本の食品機械総覧 2008-2009/CD-ROM*, 光琳 (2008).
  - 20) (社) 日本粉体工業技術協会. *粉体技術総覧 2004/2005* (2004.11.9), p. 8-54.
  - 21) 江別製粉株式会社 執筆. *食品加工総覧 3 加工共通技術* (農文教, 2002), p.117-121.
  - 22) 奥田聡 分担執筆. 「改訂・粉碎」(株式会社化学工業社発行, 昭和 47 年), p.53-65.
  - 23) 農林水産技術会議事務局. 低コストで質の良い加工・業務用農産物の 安定供給技術の開発 第2分冊(2系 大豆, 3系 畑作物, 4系 稲, 5系 モデルコンソーシアム), *研究成果シリーズ* **485**, 349-352 (2013).
  - 24) 與座宏一・松木順子・岡留博司・岡部繭子・鈴木啓太郎・奥西智哉・北村義明・堀金彰・山田純代・松倉潮. 製粉方法の異なる米粉の特性と製パン性の関係, *食品総合研究所報告*, **74**, 37-44 (2010).
  - 25) 吉井洋一・中村幸一. 新たな展開を見せる米の加工食品, *農林水産技術研究ジャーナル*, **31** (7), 22-27 (2008).
  - 26) 穴戸功一・江川和徳. ベクチナーゼ処理による米粉の製造法及びその製パン適性 (第1報) 米の粉食文化に関する研究, *新潟県食品研究所・研究報告*, 第 27 号, 21-28 (1992).
  - 27) 岡部繭子・岡留博司・與座宏一・松木順子・奥西智哉・春日重光. 米粉の粒子径分布構成範囲が粉体特性および製パン性に与える影響, *粉体工学会誌*, **49**, 901-906 (2012).
  - 28) Md. Sharif Hossen, Itaru Sotome, Kazuko Nanayama, Tomoko Sasaki and Hiroshi Okadome. Functional properties of submicron sized rice flour produced by wet media grinding, *Cereal Chemistry*, **93**, 53-57 (2016).
  - 29) 岡留博司 (分担執筆). 澱粉系素材のマイクロ・ナノスケール粉碎とその特性 (食品素材のナノ加工を支える技術, 監修: 安達修二, 中嶋光敏, 杉山滋一), シーエムシー出版, p.109-119 (2013.10).

- 30) Md. Sharif Hossen, Itaru Sotome, Makiko Takenaka, Seiichiro Isobe, Mitsutoshi Nakajima, Hiroshi Okadome. Effect of particle size of different crop starches and their flours on pasting properties, Japan Journal of Food Engineering, **12**, 29-35 (2011).
- 31) Md. Sharif Hossen, Itaru Sotome, Makiko Takenaka, Seiichiro Isobe, Mitsutoshi Nakajima, Hiroshi Okadome. Starch Damage and Pasting Properties of Micro-pulverized Rice Flours Produced from Dry Jet Grinding Method, Cereal Chemistry, **88**, 6-11 (2011).
- 32) Md. Sharif HOSSSEN, Itaru SOTOME, Makiko TAKENAKA, Seiichiro ISOBE, Mitsutoshi NAKAJIMA, Naoto SHIMIZU, and Hiroshi OKADOME. Ultra-fine Pulverization of Rice: Effects on Hydration Properties and Enzymatic Hydrolysis, Japan Journal of Food Engineering, **14**, 37-46 (2013).
- 33) 五月女格・津田升子・岡部繭子・大島紗也香・ムハマド シャリフ ホッセン・板倉真由実・竹中真紀子・岡留博司・五十部誠一郎. 粉碎方法および粒子径が米粉の Carr の流動性指数および噴流性指数に与える影響, 日本食品工学会誌, **10**, 95-106 (2009).
- 34) 岡留博司. 米粉の用途拡大に向けた粉碎技術「粉碎技術とエコ・リサイクル」(齋藤文良, 伊ヶ崎文和 監修), NGT コーポレーション, 256-262 (2010).



## Ⅱ 玄米の澱粉消化性および玄米摂取後の 血糖値の制御要因

### 1. はじめに

澱粉は穀類を原料とする食品の主成分であり、重要なエネルギー源として食事には欠かせない成分だが、国内外で糖尿病患者が年々増加している状況下では食後の血糖値上昇に影響を及ぼす成分として、その摂取方法に関心が集まっている。Englystらは、1990年代に人工消化液による澱粉の消化性を酵素分解の反応時間によって①RDS (Rapidly Digestible Starch：易消化性澱粉)、②SDS (Slowly Digestible Starch：遅消化性澱粉)、③RS (Resistant Starch：難消化性澱粉)に分類し(表1)、RDSとSDSの量比が食後血糖値の上昇度と関連性が高いことを明らかにしている<sup>1) 2)</sup>。その後もSDSの重要性は注目されており、2011年には欧州食品安全委員会(EFSA)でも、穀類加工食品に含まれるSDSの含量と食後血糖値の相関性に関する意見が発表された。一方、我々日本人の主要な主食のひとつである米は、澱粉含量が高く、さらには含まれている澱粉は炊飯後、消化されやすい状態になるために、食後血糖値の上昇程度を指標化したグリセミックインデックス(GI)が高い食品として知られている。そのため、食後血糖値上昇が緩やかな主食となる食品や素材の開発が望まれている。一般的には、玄米は白米よりも歯ごたえがあり、消化吸収が遅いと考えられているため、血糖値上昇を緩やかにする素材として期待されている。しかし、白米と玄米の摂取後の血糖値を比較した過去の研究例を見ると、玄米摂取後の血糖値上昇が、白

表1 消化性(酵素分解性)による糖質の分類<sup>2)</sup>

|                                 | 定義                                       |
|---------------------------------|--|
| Rapidly digestible starch (RDS) | <i>in vitro</i> 法での反応時間20分以内に消化される澱粉     |
| Slowly digestible starch (SDS)  | <i>in vitro</i> 法での反応時間20～120分の間に消化される澱粉 |
| Resistant starch (RS)           | <i>in vitro</i> 法での反応時間120分後の未消化画分       |
| FSG                             | 遊離のグルコース+ショ糖由来のグルコース                     |
| RAG                             | RDS+急速に食品から遊離するFSG                       |
| SAG                             | SDS+ゆっくり食品から遊離するFSG                      |

米よりも緩やかになる傾向が見られた論文と、両者の違いが見られなかった論文が混在していた。Itoらは玄米、発芽玄米、白米摂食後の血糖値を比較し、白米と比較して玄米、発芽玄米ではGI値が有意に低くなったと報告している<sup>3)</sup>。Panlasiguiらの研究では、健常人および糖尿病患者での白米と玄米摂食後の血糖値を比較し、玄米摂食後では健常人で12.1%、糖尿病患者では35.6%も白米よりGI値が低くなったと示されている<sup>4)</sup>。Laiらも同様に、数種類の品種の米を用いて、玄米摂食後のGI値が、同じ品種の白米を摂取した時よりも低くなることを報告している<sup>5)</sup>。一方でMillerらの研究では、3品種の米について玄米と白米摂食後のGI値を比較し、1品種については玄米摂食後のGI値は白米摂取後より低くなったが、残り2品種については玄米と白米ではGI値に有意差が認められなかった<sup>6)</sup>。O'Deaらは粒のままとすりつぶした炊飯米について、玄米および白米摂食後の血糖値を比較して、すりつぶした炊飯米では玄米と白米摂食後の血糖値の推移はほぼ同じであったとの報告をしている<sup>7)</sup>。これらの論文では、白米および玄米の炊飯条件が論文によって異なる上に、日本人の我々の基準からすると加水量が低すぎるような条件も含まれていた。玄米は表層が果種皮で覆われており、吸水性が低く、白米と同じ炊飯条件で炊飯すると硬くてパサパサした炊飯米になってしまうため、一般的には玄米の炊飯時には加水量を増やし、圧力鍋や炊飯器の「玄米モード」を使用して炊飯する。ここでは玄米の炊飯条件に重点をおいて、炊飯米に含まれる澱粉の消化性に及ぼす影響について検討したので紹介する。さらに、代表的な炊飯条件で調製した炊飯米については、食後血糖値の推移も比較したので併せて結果を紹介する。

## 2. 炊飯条件が炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響

炊飯時の基本的な条件である洗米後の浸漬時間、加水量、炊飯器の機能としての炊飯モード、および炊飯器の種類の種類炊飯条件が玄米の炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響を調べた。茨城県産コシヒカリ玄米を原料に、精米機により搗精した白米（精米歩合91%程度）と玄米の表面を加工した表面加工玄米（精米歩合99.5%以上）を試料とした。表面加工玄米は、農研機構・食品研究部門で開発された穀類表面に創傷を形成させる技術（特許第4849520号）を用いて、玄米から調製した試料で、表面に傷があるために吸水が速く、通常玄米よりは柔らかく炊きあがる特徴がある。玄米、表面加工玄米、および白米を試料として、同一の炊飯器を用いて炊飯前の浸漬時間、加水量、炊飯モードを変えて炊飯した炊飯米を用意した。炊飯米は炊き上がり直後に容器に移し、室温で30分間放置後、Englystらが提案した評価法<sup>1)</sup>に従って、澱粉消化性の評価を実施した。人工消化液を作用させた20分後に遊離グルコース量の定量を行い、消化酵素による澱粉分解率の測定を行った。

玄米、表面加工玄米、白米について、浸漬条件（浸漬なし、5℃で一晩浸漬）

のみを変えて炊飯米の消化酵素による澱粉分解率を評価した結果、いずれの試料でも浸漬条件による影響は見られず、洗米後すぐに炊飯したものと一晚浸漬した後炊飯した試料の澱粉分解率に有意差は認められなかった (図 1A)。使用した炊飯器では予熱機能があり、通常の炊飯モードでも浸漬の必要がないように設計されているので、炊飯器にセットする直前の米の吸水状態は炊き上がりにあまり影響がない可能性が考えられる。一方で、加水量のみを変えて炊飯した試料では、加水量の影響が顕著に見られた。加水量を 1.5 倍から 2.0 倍に増やすことで、澱粉分解率は有意に上昇した (図 1B)。加水量が多い状態で炊飯すると炊飯米のテクスチャーは柔らかくなり、消化酵素が組織内部に浸透しやすくなることが主な原因として考えられる。

最近の炊飯器は多機能化が進み、様々な炊飯器および炊飯モードを選択できる。玄米モードを使えば、炊飯器で手軽に玄米がおいしく炊けるようになっていく。そこで、加水条件は同じにして、基本的な白米モードと玄米モードで玄米を炊飯し、澱粉分解率を比較した。その結果、玄米モードで炊飯した試料の澱粉分解率が白米モードの試料の値より、有意に高くなった (図 1C)。各炊飯モードでの炊飯中の温度変化を観察すると、玄米モードは 100℃付近での加熱時間が白米

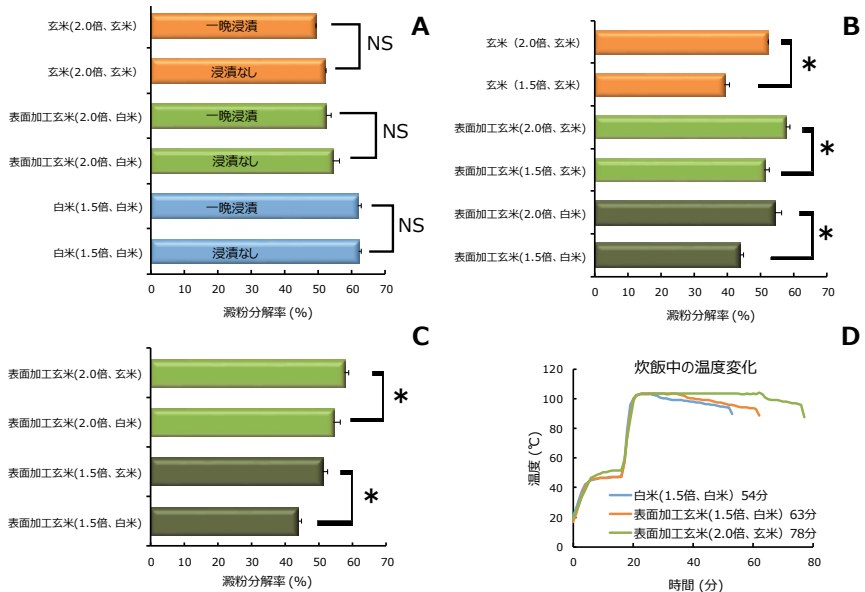


図 1 炊飯米の澱粉消化性に及ぼす炊飯条件の影響

A : 浸漬時間, B : 加水量, C : 炊飯モード, D : 炊飯中の温度変化, NS : 有意差なし, \* :  $p < 0.05$  括弧内 : 数値は加水量, 玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード, 白米モードを示す。

モードよりも20分以上も長いので(図1D)、加熱時間の違いが内部の澱粉の糊化状態や炊飯米のテクスチャーに影響を及ぼしているものと考えられる。炊飯器の種類による影響を調べるために、代表的な4種類の炊飯器、①圧力IH式、②IH式、③マイコン式、④マイコン式(炊飯モードの選択ボタン無し)を使用して、洗米後浸漬をせず、同じ加水量(1.7倍)、通常の白米モード(④以外)で炊飯した表面加工玄米の澱粉分解率を比較した。その結果、圧力IH式とIH式で炊飯した炊飯米はほぼ同程度の澱粉分解率を示したが、マイコン式の炊飯器では有意に低い値を示した(図2)。さらに、2種類のマイコン式炊飯器の間にも有意差が認められた。炊飯時間、100℃までの昇温速度、および100℃付近での加熱時間が各種炊飯器で異なるため、各炊飯器による加熱方式と炊飯時の温度履歴の違いが、玄米の澱粉消化性の差異に反映されている結果となった。

### 3. 破碎処理が各種炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響

澱粉消化性の *in vitro* 評価法では、ヒトの消化過程を模擬した評価法になるべく近づけるために、消化過程の最初のステップである咀嚼に相当する破碎処理が不可欠である。Hoeblerらは、消化性を評価する *in vitro* 評価法における破碎処理の重要性に着目し、パンとパスタについてヒトが咀嚼した試料の粒度分布を解析し、ミンサー(肉挽き器)で破碎した試料が似たような粒度分布を示すことを明らかにした<sup>8)</sup>。著者らも炊飯米について、ミンサーとホモジナイザーを用いて破碎した後、破碎した試料の平均面積を解析した。塩沢ら<sup>9)</sup>によって報告された咀嚼した炊飯米の平均面積と比較し、ミンサーで前処理をした試料の方が咀嚼

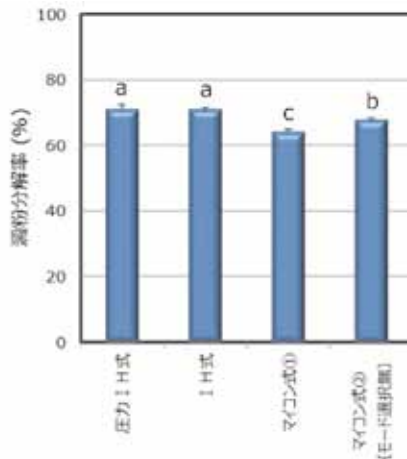


図2 炊飯器の種類による表面加工玄米の澱粉消化性の比較  
洗米後浸漬せず、加水量は1.7倍、通常の白米モード(④以外)で炊飯。

した試料の平均面積に近いことを確認したので、各種炊飯米について粒のままとミンサーで破碎処理をした試料の澱粉消化性の評価を行った（図3）。その結果、試料の形態によって、白米、表面加工玄米、玄米の澱粉分解率の試料間差の傾向が大きく異なった。

粒の状態で測定した場合は、米の精米歩合の影響がはっきりと見られ、玄米の澱粉分解率が最も低く、表面加工玄米は白米と玄米の中間的な値を示した。玄米は表層が果種皮で覆われているため、吸水性が低く、内部への酵素浸透性も妨げられるため、内在する澱粉の分解速度が抑えられたと考えられる。表面加工玄米と玄米の精米歩合の違いはほんのわずかであるが、炊飯米の硬さを測定してみると表面加工玄米の方が柔らかいため、加工処理によって表面に傷があることから、玄米よりも吸水および酵素の浸透性が早いことが、玄米より澱粉分解率が高くなった原因として考えられる。玄米については炊飯条件の影響が顕著に見られ、白米と同じ炊飯条件で調製した玄米（1.5倍加水、白米モード）は、他の試料と比較して顕著に酵素による消化に対する抵抗性が高く、酵素反応2時間後の澱粉分解率も他の試料と比べて有意に低い値を示した。ただし、この条件下で炊飯した玄米はかたくてバサバサしているため、食感的には他の試料に比べてかなり劣る。一方、2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米はほぼ白米同様の柔らかさになり、澱粉分解率は上昇した。表面加工玄米についても炊飯条件の影響は確

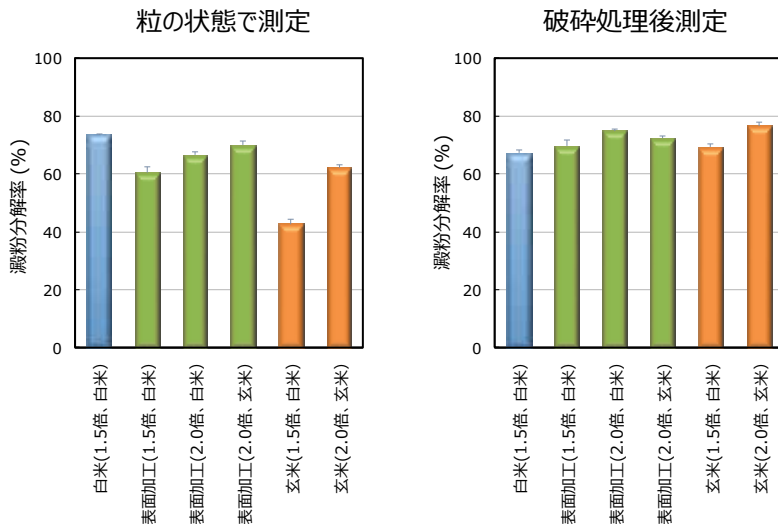


図3 各種炊飯米の消化酵素による澱粉分解率（反応時間20分）

括弧内：数値は加水量、玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード、白米モードを示す。



認でき、加水量の増加と玄米モードの炊飯によって、澱粉分解率は上昇した。

しかし、咀嚼を模擬したミンサーによる破碎処理をした試料では、各試料間差が小さくなり、同じ炊飯条件（1.5倍加水、白米モード）で炊飯した白米、表面加工玄米、玄米では有意な差が認められなかった。さらに、2.0倍加水で炊飯した表面加工および玄米については、白米よりも澱粉分解率が有意に高くなった。玄米と表面加工玄米は、粒のままで測定した澱粉分解率よりも、ミンサーで破碎処理をした試料を用いて測定した澱粉分解率が高くなったが、標準試料の白米はミンサー処理をすることによって澱粉分解率が低下する傾向が見られた。破碎処理をすれば、食品試料の粒度は小さくなり、消化酵素が作用できる表面積が増える上に、組織内部の澱粉に酵素が作用しやすい状態になる。しかし、白米の炊飯米の場合は、付着性が極めて高いために（図4）、ミンサー処理をすることによって部分的に凝集し、団子状の食塊を形成したため、今回の測定における振盪・攪拌条件では酵素液中の試料の拡散が制御され、消化酵素による澱粉の分解速度が遅くなったと考えられる。

#### 4. 各種炊飯米摂取後の血糖値の推移

日本人の代表的な主食のひとつである米飯は澱粉含量が高く、食後血糖値が上がりやすい食品として認識されているため、食後血糖値が急激に上昇しにくい食

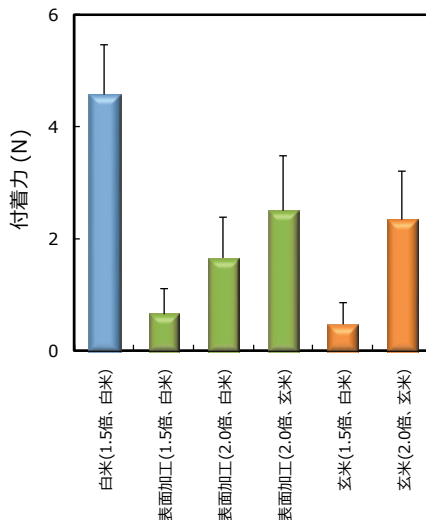


図4 各種炊飯米の付着性

括弧内：数値は加水量、玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード、白米モードを示す。

べ方に関心が集まっている。杉山らは食後血糖値の上昇程度の指標となるGI値の観点からごはん食の食べ方を検討した<sup>10)</sup>。116種類の米飯の食べ方についてGI一覧表を作成し、食べ合わせや調理法等の影響を明らかにした。国内だけではなく、海外でも“cooked rice”の食後血糖値に関する様々な研究が報告されている。Leeらは白米の炊飯方法がラットにおける食後血糖値に及ぼす影響を調べ、高圧蒸気で炊飯した白米が他の加熱方法で炊飯した白米よりも血糖値が高くなることを明らかにした<sup>11)</sup>。澱粉を構成するアミロースとアミロペクチンの2種類の高分子の組成割合が澱粉の消化性に影響を及ぼしており、アミロース含量が高い澱粉ほど消化抵抗性が高い傾向にあるので、炊飯米についても食後血糖値上昇を緩やかになる効果を期待し、高アミロース品種の利用が検討されてきた<sup>6) 12) 13)</sup>。しかし、高アミロース米の炊飯米は澱粉の老化が速く、硬くて粘り気が少ない。炊飯米としては日本人の嗜好にはなかなか合わないため、主に米粉や麺などの加工品として利用されている。そして、玄米については最初に述べたように血糖値上昇を緩やかにする効果が期待され、白米と玄米の摂食後の血糖値を比較した研究例が報告されている。

今回著者らは、玄米および表面加工玄米について、澱粉消化性が異なった代表的な条件で炊飯した炊飯米を用いて血糖値測定の実験を実施した<sup>14)</sup>。試験食は①白米(1.5倍加水, 白米モード)、②表面加工玄米(1.5倍加水, 白米モード)、③表面加工玄米(2.0倍加水, 白米モード)④表面加工玄米(2.0倍加水, 玄米モード)、⑤玄米(1.5倍加水, 白米モード)、⑥玄米(2.0倍加水, 玄米モード)の6種類を用意し、炊飯器は1台に限定して、すべて同じ炊飯器を使用した(表2)。炊飯完了1時間後に各種炊飯米のグルコース量50gに相当する量を150mLの

表2 試験食の組成と摂取量

| 試料                        | 総グルコース量<br>(%, db) | 炊き上がり水分<br>含量(%, wb) | 摂取量(グルコース<br>50g相当量) |
|---------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 白米<br>(1.5倍加水, 白米モード)     | 95.4 ± 2.3a        | 62.6 ± 0.6d          | 140.3                |
| 表面加工玄米<br>(1.5倍加水, 白米モード) | 88.2 ± 0.3b        | 54.2 ± 0.0f          | 123.8                |
| 表面加工玄米<br>(2.0倍加水, 白米モード) | 88.2 ± 0.3b        | 65.4 ± 0.4c          | 164.0                |
| 表面加工玄米<br>(2.0倍加水, 玄米モード) | 88.2 ± 0.3b        | 67.4 ± 0.3b          | 174.1                |
| 玄米<br>(1.5倍加水, 白米モード)     | 86.2 ± 0.0b        | 56.3 ± 0.2e          | 132.6                |
| 玄米<br>(2.0倍加水, 玄米モード)     | 86.2 ± 0.0b        | 68.4 ± 0.2a          | 183.7                |

水と共に摂取し、血糖自己測定器によって空腹時（0分）、摂取15、30、45、60、90、120分後に血糖値を測定した。今回は、被験者（男性2名、女性4名）に15分間で試験食をすべて摂取するように指示しただけで、一口の量や咀嚼回数等は制限しなかった。加水量を1.5倍から2.0倍にすることで炊き上がりの水分含量が10%程度上昇し、さらには白米、玄米、表面加工玄米では精米歩合によって総グルコース含量が異なるため、炊飯米としての摂取量は試験食によって最大43gの差が生じた（表2）。

図5に各種炊飯米摂食後の血糖値の推移を示した。玄米および表面加工玄米と白米では若干血糖曲線のパターンに違いが見られ、玄米と表面加工玄米では摂食45分後に最大値を示したが、白米では摂食60分後が血糖値のピークであった。同じ条件で炊飯した玄米、表面加工玄米、白米（加水量1.5倍、白米モード）を比較すると、有意差は認められなかったが玄米および表面加工玄米がピーク値を示した摂食45分後では白米の方が低い値を示し、一方で摂食60分以降は白米が玄米より高くなる傾向を示した（図5A）。同じ条件で炊飯した玄米と表面加工玄米はほぼ同様の血糖値の推移を示した。異なる条件で炊飯した表面加工玄米および玄米を比較すると、表面加工玄米では炊飯条件の違いによる顕著な影響は見られず、60分以降で加水量が少ない条件で炊飯した試験食（1.5倍加水、白米モード）を摂食した際の血糖値がわずかに2.0倍加水の試験食より低くなる傾向を示した（図5B）。ところが、玄米では炊飯条件の影響が顕著に見られ、炊飯条件の異なる2種類の試験食では血糖値の推移にはっきりとした違いが認められた（図5C）。2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米は他の試験食と比較すると摂取後45分まで急激な血糖値上昇を示し、45分後の血糖値では最も低い値を示した白米との間に有意差が認められた。そして45分以降は急激に低下し、最終的には白米よりも低い血糖値を示した。GI値の算出に用いる血糖値曲線下面積を解析した結果、4,216（白米）、3,349（表面加工玄米、1.5倍加水、白米モード）、4,272（表面加工玄米、2.0倍加水、白米モード）、4,020（表面加工玄米、2.0倍加水、玄米モード）、3,792（玄米、1.5倍加水、白米モード）、4,533（玄米、2.0倍加水、玄米モード）となり、各試料間で有意差が見られなかったが、2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米が最も高い値を示した。一方で、1.5倍加水、白米モードで炊飯した玄米および表面加工玄米は白米よりも低くなる傾向を示した。

これらのデータは、玄米に期待されている血糖値上昇抑制効果とは相反する結果になったが、澱粉消化性や炊飯米のテクスチャーのデータも考慮すると、玄米の加水量と加熱時間を増やすことによって玄米がかなり柔らかくなり、澱粉分解率が増加したことが、摂取直後の急激な血糖値上昇の要因として考えられる。以上の結果から、白米と玄米の食後血糖値の比較試験は、特に玄米の炊飯条件によって違った傾向が見られることが明らかになった。

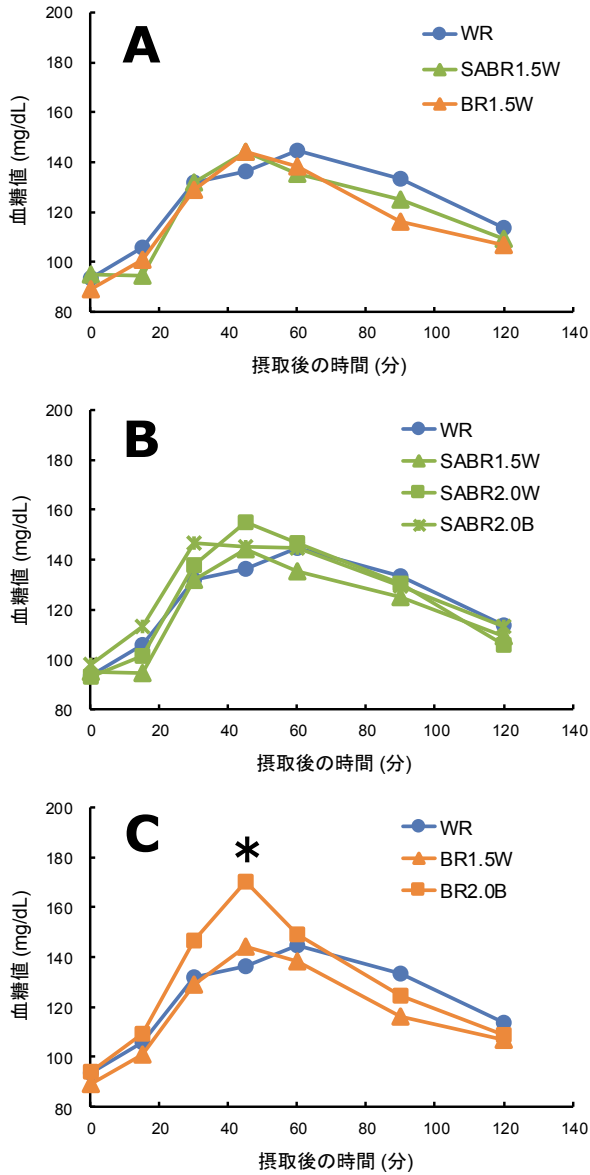


図5 各種炊飯米の食後血糖値の推移

A : 同じ炊飯条件での比較, B : 白米と表面加工玄米の比較, C : 白米と玄米の比較  
 (WR: 白米, SABR: 表面加工玄米, BR: 玄米, W: 白米モード, B: 玄米モード)  
 \* :  $p < 0.05$  vs WR (白米)

## 5. 澱粉消化性と食後血糖値の関連性

Englyst らは、穀類加工食品に限定して自ら提案した澱粉消化性の *in vitro* 評価法を用いて、酵素を作用させた後20分までの間に消化された澱粉 (RDS:Rapidly digestible starch) 由来のグルコースと遊離グルコース、ショ糖由来のグルコースを併せたグルコース量 (RAG: Rapidly available glucose, 表1参照) が、血糖値曲線下面積との間に有意な相関性があることを報告している<sup>2)</sup>。一方で、食後の血糖値上昇には澱粉の消化性だけでなく、澱粉の消化吸収に関わる共存成分の影響も大きい。Clegg らはパンケーキに異なる脂質を添加し、脂質の種類によって食後血糖値が異なることを明らかにした<sup>15)</sup>。さらに *in vitro* 評価法で測定した澱粉消化性と血糖値の間に関連性が見られなかったことから、脂質のような胃内容物の排出速度に関する成分の影響は *in vitro* 評価法では反映できないことを報告している。Brand らも、米、馬鈴薯、とうもろこしの加工食品を用いて、*in vitro* 評価法での澱粉消化性と *in vivo* での血糖値応答の関連性を解析し、脂質の多いポテトチップ以外は高い相関性が得られたと報告している<sup>16)</sup>。ポテトチップに含まれる澱粉自体は消化されやすいがGI値は低かったので、脂質によって胃からの排出速度が遅くなり、小腸内での吸収が遅くなったと推察している。

今回の実験材料である炊飯米については、米と水だけのシンプルな食品だけに、澱粉自体の消化性が食後血糖値の主な変動要因になっていることが予想できるため、澱粉消化性と血糖値の関連性を調べた。*In vitro* 評価法で測定した澱粉分解率 (反応時間 20, 60, 120 分) と試験食摂取後 15, 30, 45, 60, 90, 120 分後の血糖値、および血糖値曲線下面積との間の関連性を解析した。炊飯米を粒のままの状態 で測定した澱粉分解率と血糖値との間には関連性は見られなかったが、ミンサーで破碎した炊飯米を用いて測定した場合は、反応時間 20 分後の澱粉分解率と摂取後 45 分の血糖値との間に高い相関性が認められた (図6)。摂取後 45 分は、玄米および表面加工玄米では血糖値のピークを示した時間である。以上の結果から、加水量と炊飯モードを変えて炊飯した各種炊飯米については、澱粉消化性の評価方法にミンサーによる破碎処理を加えることによって、試験食の澱粉消化性の違いが、摂取後の血糖値応答の差を反映するような結果が得られた。澱粉消化性の評価法においては、ヒトの咀嚼を模擬した試料の前処理方法によって、澱粉分解率が大きく変動するため<sup>8) 17)</sup>、なるべく咀嚼した後の試料に近づけることが望ましいが、咀嚼後の試料サイズには個人差があり、食品の形態によって適している破碎方法が異なるため、理想の前処理法を見出すことが困難である。食品摂取による血糖値応答には摂取前の食品の形態が重要な影響を与えている。Read らはトウモロコシ、馬鈴薯、米、リンゴを試験食として、咀嚼をした時と細かく切ったサンプルをそのまま飲み込んだ時の血糖値を比較し、特に米とトウモロコシでは血糖値に顕著な差が見られ、咀嚼をすることによって血糖

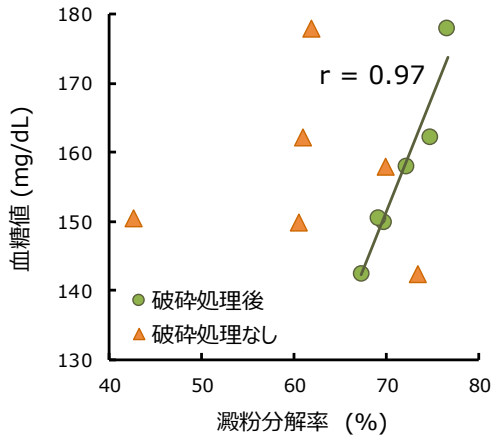


図6 澱粉分解率と血糖値の関係

値が上昇することを示した<sup>18)</sup>。一方で、咀嚼にはインスリン分泌を促すインクレチンの分泌量を増やし、さらには胃内容物の排出速度を遅くする効果もあることが報告されている<sup>19)</sup>。

著者らが測定した各種炊飯米の食後血糖値の比較では、加水量2.0倍、玄米モードで炊飯した玄米について、他の試料と比較して食後急激な血糖値上昇が見られた。この条件で炊飯した玄米はテクスチャー解析の結果から、かたさは白米と同程度であるが、付着性は白米よりもかなり低い特徴を示した。従って、咀嚼によって玄米は白米よりも小粒状にバラバラになりやすく、さらには酵素が浸透しやすい柔らかさも兼ね備えているので、消化酵素が作用できる表面積が増えることで摂取直後の血糖値が上昇したのではないかと推測する。一方で、白米は付着性が極めて高いために、咀嚼後凝集してしまい、内部まで消化酵素が浸透するまでに時間がかかり、食後血糖値の上昇が緩やかになったと考えられる。

## 6. おわりに

本稿では、玄米の炊飯条件を中心に、炊飯米の澱粉消化性と食後血糖値に影響を及ぼす要因に関する研究成果を紹介した。玄米と白米の食後血糖値の推移の比較は、玄米の炊飯条件によって異なる傾向が見られ、炊飯米に含まれる澱粉の消化性だけでなく、咀嚼による試料の形態変化が摂取直後の血糖値上昇に影響を及ぼす重要な要因であることが示された。玄米食が食後血糖値に及ぼす影響については、搗精前の玄米には白米と比べて胚芽や糠層に多く含まれる有用成分が多いため、これらの成分の効果を期待して様々な報告例があり、長期的な玄米食の摂取が2型糖尿病のリスク軽減に有効であるとの報告もある<sup>20)</sup>。著者らの実

験では、単回摂取による摂取直後の血糖値の推移に及ぼす影響について検討したが、玄米の炊飯条件が澱粉消化性と玄米摂食後の血糖値の推移に及ぼす影響が予想以上に大きかったため、食品の加工調理条件、形態、および破碎による形態変化が澱粉消化性および食後血糖値に及ぼす影響を解明することが今後の検討課題である。また、今回は澱粉消化性の評価に、ミンサー処理を加えることによって食後血糖値の変動を反映できる結果が得られたが、澱粉消化性の評価に適している食品の前処理法は食品の種類、形態によって異なるので、各試料に適した方法の検討が必要である。

## 謝辞

本研究は、「農研機構：機能性を持つ農林水産物・食品開発プロジェクト」により実施されたものである。

(食品加工流通研究領域 食品品質評価制御ユニット 佐々木 朋子)

## 引用文献

- 1) Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cummings, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **46** (S2), S33-S50 (1992).
- 2) Englyst, K. N., Englyst, H. N., Hudson, G. J., Cole, T. J., and Cummings, J. H. Rapidly available glucose in foods: an *in vitro* measurement that reflects the glycemic response. *Am. J. Clin. Nutr.*, **69**, 448-454 (1999).
- 3) Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., Yamamoto, S., Yoshihara, R., and Yokoyama, J. Postprandial blood glucose and insulin responses to pre-germinated brown rice in healthy subjects. *J. Med. Invest.*, **52**, 159-164 (2005).
- 4) Panlasigui, L., and Thompson, L. U. Blood glucose lowering effects of brown rice in normal and diabetic subjects. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **57**, 151-158 (2006).
- 5) Lai, M-H., Liu, K-L., Chen, P-Y., Ke, N-J., Chen, J-J., Sung, J-M., Wu, Y-L., and Lin, S-D. Predicted glycemic index and glycemic index of rice varieties grown in Taiwan. *Cereal Chem.*, **93**, 150-155 (2016).
- 6) Miller, J. B., Pang, E., and Bramall, L. Rice: a high or low glycemic index food? *Am. J. Clin. Nutr.*, **56**, 1034-1036 (1992).
- 7) O'Dea, K., Nestel, P. J., and Antonoff, L. Physical factors influencing postprandial glucose and insulin responses to starch. *Am. J. Clin. Nutr.*, **33**, 760-765 (1980).
- 8) Hoebler, C., Devaux, M. -F., Karinthi, A., Belleville, C., and Barry, J. -L. Particle size of solid food after human mastication and *in vitro* simulation of oral

- breakdown. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **51**, 353-366 (2000).
- 9) 塩澤光一, 城所寛子, 佐藤洋子, 神山かおる, 柳沢慧二. 米飯咀嚼時の食塊物性と嚥下閾値との関係, *日本咀嚼学会雑誌*, **13**, 58-65 (2003).
  - 10) 杉山みち子, 若木陽子, 中本典子, 小山和作, 三橋扶佐子, 井上倫, 清水瑠美子, 星野和子, 佐藤さぬ子, 杉山佳子, 鈴木純子, 安江千歳, 藤谷朝実, 鶴見克則, 川島由起子, 宮下実, 中村丁次, タン・アン・チュオ, 安部眞佐子, 合田敏尚, 細谷憲政. ごはん食と Glycemic index に関する研究, *日本健康・栄養システム学会誌*, **3**, 1-15 (2003).
  - 11) Lee, S-W., Lee, J-H., Han, S-H., Lee, J-W., and Rhee, C. Effect of various processing methods on the physical properties of cooked rice and on *in vitro* starch hydrolysis and blood glucose response in rats. *Starch*, **571**, 531-539 (2005).
  - 12) Panlasigui, L. N., Thompson, L. U., Juliano, B. O., Perez, C. M., Yiu, S. H., and Greenberg, G. R. Rice varieties with similar amylose content differ in starch digestibility and glycemic response in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, **54**, 871-877 (1991).
  - 13) Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., and Wu, D. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *J. Cereal Sci.*, **40**, 23-237 (2004).
  - 14) Sasaki, T., Okunishi, T., Sotome, I., and Okadome, H. Effects of milling and cooking conditions of rice on *in vitro* starch digestibility and blood glucose response. *Cereal Chem.*, **93**, 242-247 (2016).
  - 15) Clegg, M. E., Pratt, M., Markey, O., Shafat, A., and Henry, C. J. K. Addition of different fats to a carbohydrate food: Impact on gastric emptying, glycaemic and satiety responses and comparison with *in vitro* digestion. *Food Res. Int.*, **48**, 91-97 (2012).
  - 16) Brand, J. C., Nicholson, P. L., Thorburn, A. W., Truswell, S. Food processing and the glycemic index. *Am J. Clin. Nutr.*, **42**, 1192-1196 (1985).
  - 17) Foschia, M., Peressini, D., Sensidoni, A., Brennan, M. A., and Brennan, C. S. Mastication or masceration: Does the preparation of sample affect the predictive *in vitro* glycemic response of pasta? *Starch*, **66**, 1096-1102 (2014).
  - 18) Read, N. W., Welch, I. M., Austen, C. J., Barnish, C., Bartlett, C. E., Baxter, A. J., Brown, G., Compton, M. E., Hume, K. E., Storie, I., and Worlidge, J. Swallowing food without chewing: a simple way to reduce postprandial glycaemia. *Brit. J. Nutr.*, **55**, 43-47 (1986).
  - 19) Pera, P., Bucca, C., Borro, P., Bemocco, C., De Lillo, A., and Carossa, S. Influence of mastication on gastric emptying. *J. Dent. Res.*, **81**, 179-181 (2002).



- 20) Sun, Q., Spiegelman, D., van Dam, R. M., Holmers, M. D., Malik, V. S., Willert, W. C., and Hu, F. B. White rice, brown rice, and risk of type 2 diabetes in US men and women. *Arch. Intern. Med.*, **170**, 961-969 (2010).

### Ⅲ 日本で栽培されている米の澱粉特性

#### 1. はじめに

米は、小麦及びトウモロコシと共に、世界三大穀物の一つとして世界中で栽培されている。日本は、アジアモンスーン地域北部に位置し、海からの季節風によって十分な降雨がもたらされ、年間の温度差が大きいことから、稲作に好適な条件が揃っている<sup>1)</sup>。日本で主に栽培されている米は、短粒種で粘りの強いジャポニカ米であるが、夢十色<sup>2)</sup>、サリークイーン<sup>3)</sup>等、日本で育成されたインデカ米も僅かではあるが栽培されている。

農林水産省の食糧需給調査<sup>4)</sup>によると、日本人の主食である米の1人あたりの年間消費量は、1962年の118.3 kgをピークに年々減少し、2014年にはピーク時の半量以下の55.6 kgにまで低下した(図1)。米消費量低下の主な原因は、食生活の欧米化、消費者ニーズの多様化、主食の比率低下等が考えられる。しかしながら、2010年に行われた非公開型インターネットアンケートによる三食の主食状況調査<sup>5)</sup>によると、朝食についてはパン(45.8%)が最も多かったものの、昼食、夕食となるにつれてごはん(米)の割合が高くなり、夕食では9割近い結果となったことが報告されている。この結果からも分かるように、1人あたりの年間米消費量は低下しても、米は我が国にとって、依然重要な食糧資源である。

日本人は、軟らかく粘りの強い米を一般的に好むが、チャーハン、パエリア等、少し硬めで粘りの弱い米の方が適している料理もある<sup>6)</sup>。また、コンビニエンスストア、スーパー等では、おにぎり、弁当を長時間低温下で保存するため、そのような状況下でも硬くなりにくく粘りが落ちにくい米が望まれる等、米の

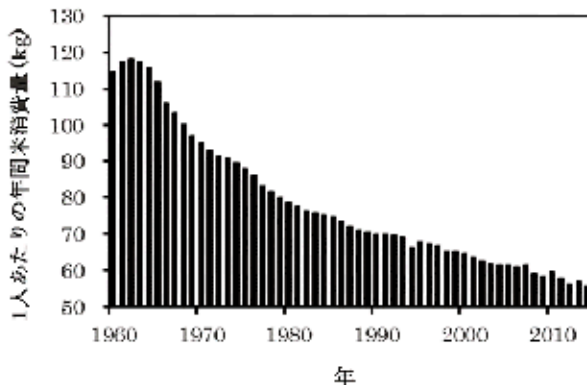


図1 1人あたりの年間米消費量の推移(文献<sup>4)</sup>より作図)

調理・加工法及び用途によって求められる米飯物性は異なる<sup>7)</sup>。米飯物性は、米の7割以上を占める澱粉の影響を最も強く受けると考えられていることから<sup>8,9)</sup>、多様化したニーズに応えるためにも、現在、日本で栽培されている米の澱粉特性について、著者の研究を踏まえて纏めてみた。

## 2. イネの作付動向

(公社)米穀安定供給確保支援機構の作付動向調査<sup>10)</sup>によると、平成27年の水稻の作付は約150万haであり、内、うるち米が95.2%、もち米が3.5%、醸造用米が1.3%であった。つまり、日本で作付されている水稻のほとんどがうるち米である。また、うるち米の品種別作付割合は、1位コシヒカリ(36.1%)、2位ひとめぼれ(9.7%)、3位ヒノヒカリ(9.0%)、4位あきたこまち(7.2%)、5位ななつぼし(3.4%)と続き、作付割合上位10品種で全体の約76%、20品種で約85%を占める<sup>10)</sup>(図2)。水稻うるち米の作付品種数は、1950年代には300以上、60年代には約250、70年代から80年代には160~200、90年代から2000年には200~280品種と推移している<sup>11)</sup>。平成27年の作付品種数は不明だが、その数に大きな変動はないと考えられることから、仮におおよそ200品種と見積もっても、その10分の1の品種によって全作付面積の8割以上が占められると推算される。また、うるち米の品種別作付割合上位10品種の内、ひとめぼれ、ヒノヒカリ、あきたこまちは、コシヒカリを親として育成された品種であることから、コシヒカリを含めたコシヒカリ系統の米が、少なくとも全体の62%を占める(図2)。前述のインターネットを利用したアンケート調査<sup>5)</sup>によると、



図2 平成27年産うるち米(醸造用米、もち米を除く)の品種別作付割合(文献<sup>10)</sup>より作図)

最も人気のある品種はコシヒカリ、2位はあきたこまちであり、いずれもコシヒカリ系統の米である。この結果は、日本人がコシヒカリの食味を好むことを裏付けている。しかし、一方で、品種へのこだわりはないという回答が47%もあり、これは、日本で栽培されている米が似たような食味をしている、つまり食味にバラエティーがない、と否定的な捉え方をされていると見ることもできる。

### 3. 日本で栽培されている米の澱粉特性

#### 1) うるち（粳）米ともち（糯）米

米には、白飯として食するうるち米と餅や赤飯として食するもち米とがあり、収穫乾燥後の精白米はうるち米が半透明なのに対して、もち米は白い。これは、もち米中に存在する空隙が光を乱反射させることによるものとされる<sup>12)</sup>。うるち米の澱粉<sup>13)</sup>は、アミロース及びアミロペクチンの2成分から構成されている(図3)。グルコースが $\alpha$ -1, 4-グリコシド結合により直鎖状に繋がったものがアミロース<sup>14)</sup>であり、 $\alpha$ -1, 4結合から成るグルコース直鎖の途中から $\alpha$ -1, 6-グリコシド結合によって分岐構造を持つものがアミロペクチン<sup>15)</sup>である。一方、もち米の澱粉は、アミロースを含まず、アミロペクチンのみから構成されている。アミロースは、ADP-グルコースピロフォスホリラーゼ (AGPase) によって生成されるADP-グルコースを基質として、約60 kDa<sup>16)</sup>の澱粉粒結合型澱粉合成酵素I (granule-bound starch synthase I : GBSS I) によって合成される<sup>17)</sup>。GBSS Iは、イネの第6染色体上に位置するWx遺伝子によってコードされており、この遺伝子が機能を失うと、アミロースが全く含まれないもち性となる<sup>18)</sup>。

#### 2) アミロース含量

一般に、アミロース含量の高い米は、米飯とした場合、体積増加が多く(釜ぶえする)、硬く、粘りの少ない飯となり、アミロース含量の低い米は、軟らかくて粘りのある飯となる<sup>19)</sup>。

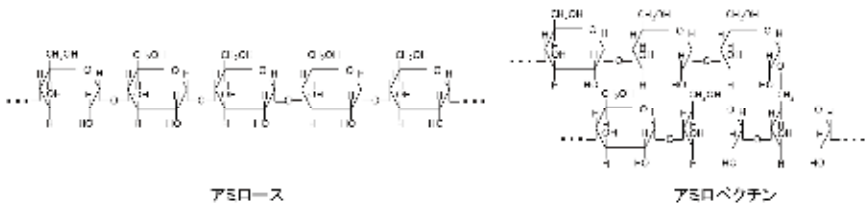


図3 アミロース及びアミロペクチンの化学構造

アミロース、 $\alpha$ -1, 4-グリコシド結合により直鎖状に繋がったグルコースポリマー；アミロペクチン、 $\alpha$ -1, 4結合から成るグルコース直鎖の途中から $\alpha$ -1, 6-グリコシド結合によって分岐構造を持つグルコースポリマー

もち米は、アミロースを含まずアミロペクチンのみで構成されているため、粘りが強い<sup>20)</sup>。餅、赤飯として食される以外にも、餅生地を老化させて、あられ、おかきといった加工米菓にも用いられる。この餅生地の硬化速度は、澱粉の特性に大きく左右される。アミロース含量が、もち米とコシヒカリを始めとするうるち米との中間の米を、低アミロース米、もしくは半もちと呼ぶ<sup>20)</sup>。低アミロース米は、粘りが強く、老化しにくいいため、コンビニエンスストア、スーパーのおにぎり、弁当等、長時間冷蔵保存される米飯に適している。タイ米に多い高アミロース米は、白飯にすると粘りが弱く、パサパサしているため、日本人の嗜好には合わない。しかし、ピラフ、チャーハン等のバラバラとした食感が好まれる料理または冷凍米飯に用いられており、近年、その需要は高まっている<sup>21)</sup>。

澱粉中のアミロース含量測定には、主に、ヨウ素呈色比色法、電流滴定法、電圧滴定法等のヨウ素を用いる定量方法と、酵素・クロマト法とがある<sup>22)</sup>。前者は、アミロース分子が6個のグルコース残基で1巻きの螺旋構造を形成することを利用した方法で、螺旋構造内にヨウ素分子が取り込まれると青色に呈色することから、その呈色度を測定し定量する。後者は、澱粉に  $\alpha$ -1,6 結合を特異的に切断する酵素（殆どの場合 *Pseudomonas* のイソアミラーゼ）を作用させて枝切りした後に、ゲル濾過クロマトグラフィーによって、側鎖分子をその大きさと分離・定量する方法である<sup>23)</sup>。うるち米澱粉からアミロペクチンを精製し、酵素・クロマト法でその鎖長分布を調べると、アミロースと同程度の大きさで非常に長い直鎖状側鎖である超長鎖 (super long chains : SLC) の存在が認められる<sup>24)</sup>。この SLC も、アミロースと同様にヨウ素と結合して呈色するため、ヨウ素を用いる定量方法及び酵素・クロマト法いずれの測定方法においても、実際のアミロース含量である「真のアミロース含量」よりも高いアミロース含量が算出される。よって、真のアミロース含量と区別するために、「見かけのアミロース含量」と呼ぶ。

酵素・クロマト法により、澱粉、精製アミロペクチンのゲル濾過溶出曲線 (図4) をそれぞれ描き、鎖長分布を調べると、これらの関係が良く分かる。アミロースが含まれる澱粉 (図4A) では、画分境界をヨウ素吸収波長で決定し、ローマ数字で画分を区別する。アミロース及び SCL が溶出する Fr. I を見かけのアミロース含量とするが、中間画分 (Int. Fr.) にも短いアミロース、非常に長いアミロペクチン単位鎖が含まれるので付帯情報として重要である。Fr. II, Fr. III はアミロペクチン単位鎖のそれぞれ長鎖画分、短鎖画分である。一方、精製アミロペクチン (図4B「●」) では、画分境界は溶出曲線の極小で決定し、アラビア数字で画分を区別する。アミロースが含まれないことから、Fr. 1 は SCL であり、次にアミロペクチン長鎖 (Fr. 2) 及び短鎖 (Fr. 3) が溶出する。そして、澱粉 (図4B「○」) の溶出曲線を重ね合わせ、同じ極小境界で区切った Fr. 1 には、アミロース及び SCL が含まれるので、精製アミロペクチン溶出曲線で求め

た SCL を差し引くと、真のアミロース含量が求まる。画分境界の考え方が異なるので、澱粉試料、精製アミロペクチン試料で見かけのアミロース含量が異なる点には注意が必要である。

日本で栽培されている米として、2006年に（独）農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所及び5ヶ所の農業研究センターでプロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農作物の安定供給技術の開発」のために栽培された試料米80点、2006年に北海道で栽培された雪の穂、2005年三重県産コシヒカリ（市販品）を加えた計82点（N=82）の米について、その性質を調べた。表1には、精白米から調製した澱粉について、ヨウ素呈色法で得られた最大吸収波長（ $\lambda_{\max}$ ）、680 nmにおける吸光度（青価、blue value : B.V.）と、酵素・クロマト法で得られた見かけのアミロース含量（Fr. I）とを示した<sup>25)</sup>。 $\lambda_{\max}$ と見かけのアミロース含量との間には、相関係数0.962の非常に高い正の相関関係が認められたことから（図5）、 $\lambda_{\max}$ の値に基づいて、もち米、低アミロース米、中アミロース米、高アミロース米に分類し、それぞれの見かけのアミロース含量の平均を算出したところ、もち米で $0.0 \pm 0.0\%$ （N=12）、低アミロース米で $9.2 \pm 2.7\%$ （N=25）、中アミロース米で $18.3 \pm 3.3\%$ （N=41）、高アミロース米で $28.0 \pm 1.1\%$ （N=4）となった（表1）。世界で栽培されている米の見かけのアミロース含量は0～約33%であるのに対して<sup>26)</sup>、日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量は、0～29%と大差ないことが分かる。つまり、日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量はバラエティーに富んでいるといえる。これは、アミロース含量が米の食味に大きな影響を及ぼすという研究結果が多数報告されたことを受け、新形質米育種においてアミロース含量の改変を積極的に行った成果といえる<sup>27-29)</sup>。

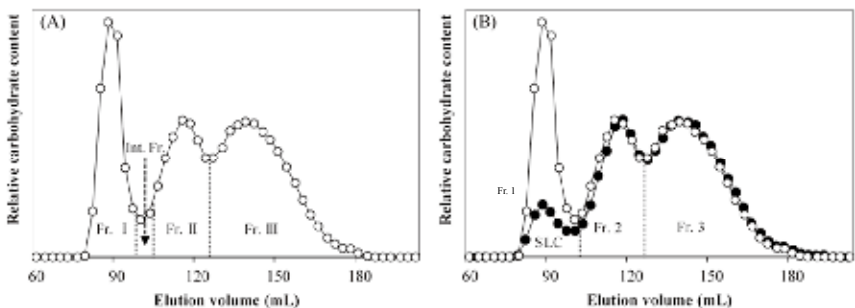


図4 ゲル濾過溶出曲線<sup>25)</sup>

(A) は枝切りした澱粉の溶出曲線（○）。(B) は枝切りした澱粉（○）、枝切りした精製アミロペクチン（●）の各溶出曲線。見かけのアミロース含量は、真のアミロース含量と SLC 含量との合計。

同じ試料米を用いて、炊飯米及び炊飯米を5℃で24時間保存した冷飯を調製し、その硬さを、硬さ・粘り計（RHS1A, (株) サタケ）を用いて、越智ら<sup>30)</sup>の方法により測定した（図6）。炊飯米、冷飯共に、見かけのアミロース含量（Fr. I）が高い程、硬い。また、アミロース含量が高い米程、冷飯が硬い傾向があることから、アミロース含量が高い米程、老化が速いといえる。

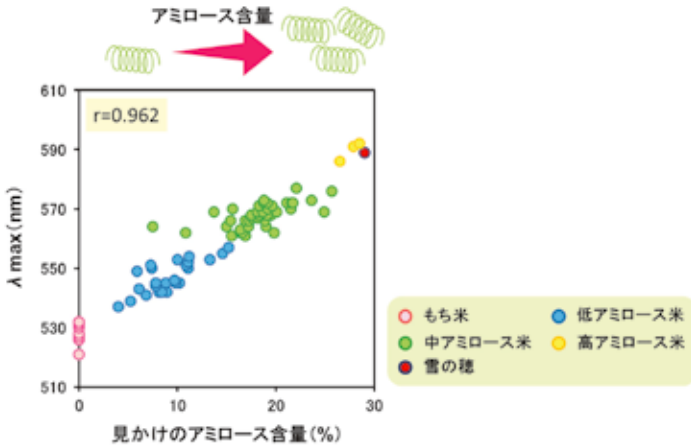


図5 日本で栽培されている米のアミロース含量とヨウ素呈色法における $\lambda$  max 値との相関（文献<sup>25)</sup>より作図）

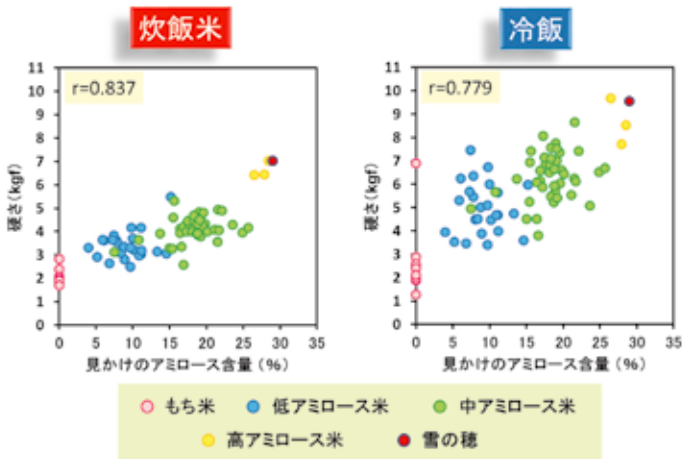


図6 炊飯米及び冷飯の硬さと見かけのアミロース含量との関係<sup>25)</sup>

表1 日本で栽培されている米のアミロース含量 (文献<sup>25)</sup>より抜粋)

## I. もち米

| No. | 試料名      | 栽培地 | ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線         |             |   | Fr. I (%) |
|-----|----------|-----|-----------------------|-------------|---|-----------|
|     |          |     | $\lambda_{\max}$ (nm) | B.V.        | n |           |
| 1   | ヒヨクモチ    | 福岡  | 520 ± 0               | 0.05 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 2   | 泉1280    | 福岡  | 521 ± 0               | 0.07 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 3   | はくちょうもち  | 北海道 | 526 ± 0               | 0.07 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 4   | 奥羽紫糯389号 | 秋田  | 526 ± 1               | 0.07 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 5   | モチミノリ    | 茨城  | 527 ± 1               | 0.06 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 6   | 北陸糯197号  | 新潟  | 527 ± 0               | 0.09 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 7   | 紅染めもち    | 福岡  | 528 ± 0               | 0.07 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 8   | めばえもち    | 新潟  | 530 ± 0               | 0.08 ± 0.01 | 6 | 0.0       |
| 9   | 北陸糯199号  | 新潟  | 531 ± 0               | 0.08 ± 0.01 | 6 | 0.0       |
| 10  | 北陸糯210号  | 新潟  | 532 ± 0               | 0.07 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 11  | 朝紫       | 秋田  | 532 ± 1               | 0.08 ± 0.01 | 6 | 0.0       |
| 12  | ヒメノモチ    | 新潟  | 532 ± 1               | 0.08 ± 0.00 | 6 | 0.0       |
| 平均  |          |     | 528 ± 4               | 0.07 ± 0.01 | 6 | 0.0 ± 0.0 |

## II. 低アミロース米

| No. | 試料名       | 栽培地 | ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線         |             |   | Fr. I (%) |
|-----|-----------|-----|-----------------------|-------------|---|-----------|
|     |           |     | $\lambda_{\max}$ (nm) | B.V.        | n |           |
| 1   | スノーパール    | 秋田  | 537 ± 0               | 0.11 ± 0.00 | 6 | 4.0       |
| 2   | シルキーパール   | 秋田  | 539 ± 1               | 0.12 ± 0.00 | 6 | 5.2       |
| 3   | 西海257号    | 福岡  | 541 ± 1               | 0.10 ± 0.01 | 6 | 6.8       |
| 4   | 札系05062   | 北海道 | 542 ± 1               | 0.13 ± 0.00 | 6 | 8.1       |
| 5   | 札系050624  | 北海道 | 542 ± 1               | 0.13 ± 0.00 | 6 | 8.4       |
| 6   | はなえまき     | 北海道 | 542 ± 0               | 0.13 ± 0.00 | 6 | 8.9       |
| 7   | LGCソフト    | 広島  | 543 ± 1               | 0.11 ± 0.00 | 6 | 6.1       |
| 8   | ミルキータイン   | 茨城  | 544 ± 1               | 0.14 ± 0.00 | 6 | 7.8       |
| 9   | 札系05063   | 北海道 | 545 ± 1               | 0.14 ± 0.00 | 6 | 8.8       |
| 10  | 札系04036   | 北海道 | 545 ± 1               | 0.15 ± 0.00 | 6 | 9.8       |
| 11  | 中国192号    | 広島  | 545 ± 0               | 0.16 ± 0.00 | 6 | 7.8       |
| 12  | 札系03038-1 | 北海道 | 545 ± 1               | 0.16 ± 0.02 | 6 | 10.2      |
| 13  | 札系05060   | 北海道 | 546 ± 1               | 0.14 ± 0.00 | 6 | 9.7       |
| 14  | 朝つゆ       | 新潟  | 546 ± 1               | 0.15 ± 0.00 | 6 | 9.7       |
| 15  | 関東224号    | 茨城  | 549 ± 1               | 0.11 ± 0.01 | 6 | 5.9       |
| 16  | 中国191号    | 広島  | 550 ± 1               | 0.13 ± 0.01 | 6 | 7.4       |
| 17  | 札系05058   | 北海道 | 550 ± 1               | 0.15 ± 0.00 | 6 | 11.1      |
| 18  | 関東229号    | 茨城  | 551 ± 1               | 0.13 ± 0.01 | 6 | 7.3       |
| 19  | 札系05055   | 北海道 | 551 ± 1               | 0.16 ± 0.00 | 6 | 10.9      |
| 20  | 関東230号    | 茨城  | 552 ± 1               | 0.12 ± 0.01 | 6 | 11.1      |
| 21  | 中系特80     | 広島  | 553 ± 1               | 0.15 ± 0.02 | 6 | 10.0      |
| 22  | ソフト158    | 新潟  | 553 ± 0               | 0.16 ± 0.00 | 6 | 13.3      |
| 23  | おぼろづき     | 北海道 | 554 ± 0               | 0.17 ± 0.00 | 6 | 11.2      |
| 24  | 北海306号    | 北海道 | 555 ± 1               | 0.18 ± 0.00 | 6 | 14.6      |
| 25  | 泉1274     | 熊本  | 557 ± 0               | 0.20 ± 0.01 | 6 | 15.2      |
| 平均  |           |     | 547 ± 5               | 0.14 ± 0.02 | 6 | 9.2 ± 2.7 |



## Ⅲ. 中アミロース米

| No. | 試料名         | 栽培地 | ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線         |             |   | Fr. I (%)  |
|-----|-------------|-----|-----------------------|-------------|---|------------|
|     |             |     | $\lambda_{\max}$ (nm) | B.V.        | n |            |
| 1   | 札系05051     | 北海道 | 561 ± 0               | 0.20 ± 0.00 | 6 | 16.9       |
| 2   | 泉1273       | 福岡  | 561 ± 0               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 15.5       |
| 3   | 柔小町         | 福岡  | 562 ± 0               | 0.18 ± 0.01 | 6 | 16.6       |
| 4   | 札系03043-1   | 北海道 | 562 ± 0               | 0.21 ± 0.00 | 6 | 10.8       |
| 5   | 北海300号      | 北海道 | 562 ± 0               | 0.21 ± 0.00 | 6 | 16.4       |
| 6   | 泉1272       | 福岡  | 562 ± 0               | 0.25 ± 0.01 | 6 | 19.8       |
| 7   | あきたこまち      | 秋田  | 563 ± 1               | 0.23 ± 0.00 | 6 | 16.4       |
| 8   | 札系03044-1   | 北海道 | 564 ± 1               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 7.5        |
| 9   | 西海黄256号     | 福岡  | 564 ± 0               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 19.0       |
| 10  | 北海302号      | 北海道 | 564 ± 0               | 0.22 ± 0.00 | 6 | 15.0       |
| 11  | コシヒカリ       | 福岡  | 564 ± 0               | 0.22 ± 0.01 | 6 | 17.2       |
| 12  | 泉1277       | 福岡  | 566 ± 0               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 18.9       |
| 13  | 北海303号      | 北海道 | 566 ± 0               | 0.22 ± 0.00 | 6 | 15.4       |
| 14  | 北陸166号      | 新潟  | 566 ± 0               | 0.23 ± 0.01 | 6 | 16.9       |
| 15  | コシヒカリ (市販品) | 三重  | 566 ± 1               | 0.24 ± 0.00 | 6 | 17.3       |
| 16  | コシヒカリ       | 茨城  | 567 ± 0               | 0.24 ± 0.01 | 6 | 17.6       |
| 17  | 日本晴         | 福岡  | 567 ± 0               | 0.24 ± 0.00 | 6 | 18.2       |
| 18  | 中国酒185号     | 広島  | 568 ± 0               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 17.5       |
| 19  | 泉1276       | 福岡  | 568 ± 0               | 0.22 ± 0.01 | 6 | 18.3       |
| 20  | キヌヒカリ       | 福岡  | 568 ± 0               | 0.22 ± 0.01 | 6 | 19.1       |
| 21  | コシヒカリ       | 新潟  | 568 ± 0               | 0.25 ± 0.01 | 6 | 19.5       |
| 22  | 泉1279       | 福岡  | 569 ± 0               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 18.7       |
| 23  | ほしのゆめ       | 北海道 | 569 ± 1               | 0.24 ± 0.00 | 6 | 24.9       |
| 24  | きらら397      | 北海道 | 569 ± 0               | 0.25 ± 0.00 | 6 | 13.7       |
| 25  | 札系04015     | 北海道 | 569 ± 1               | 0.25 ± 0.00 | 6 | 18.1       |
| 26  | 札系04033     | 北海道 | 569 ± 0               | 0.26 ± 0.04 | 6 | 20.1       |
| 27  | ヒノヒカリ       | 福岡  | 570 ± 0               | 0.22 ± 0.01 | 6 | 19.2       |
| 28  | 札系05047     | 北海道 | 570 ± 1               | 0.24 ± 0.00 | 6 | 21.5       |
| 29  | 日本晴         | 茨城  | 570 ± 0               | 0.28 ± 0.01 | 6 | 15.6       |
| 30  | キヌヒカリ       | 新潟  | 571 ± 1               | 0.22 ± 0.02 | 6 | 18.3       |
| 31  | 北海293号      | 北海道 | 571 ± 0               | 0.25 ± 0.01 | 6 | 19.6       |
| 32  | 北陸赤212号     | 新潟  | 571 ± 0               | 0.27 ± 0.00 | 6 | 18.3       |
| 33  | 中国183号      | 広島  | 572 ± 0               | 0.23 ± 0.01 | 6 | 21.7       |
| 34  | 日本晴         | 広島  | 572 ± 1               | 0.24 ± 0.00 | 6 | 19.1       |
| 35  | 北海307号      | 北海道 | 572 ± 0               | 0.25 ± 0.01 | 6 | 21.1       |
| 36  | 札系04032     | 北海道 | 572 ± 1               | 0.26 ± 0.00 | 6 | 18.8       |
| 37  | 春陽          | 新潟  | 572 ± 1               | 0.28 ± 0.01 | 6 | 21.6       |
| 38  | ヒノヒカリ       | 広島  | 573 ± 1               | 0.21 ± 0.01 | 6 | 18.8       |
| 39  | あゆのひかり      | 新潟  | 573 ± 1               | 0.22 ± 0.01 | 6 | 23.6       |
| 40  | 北海299号      | 北海道 | 576 ± 0               | 0.26 ± 0.01 | 6 | 25.7       |
| 41  | 初雫          | 北海道 | 577 ± 1               | 0.26 ± 0.02 | 6 | 22.1       |
| 平均  |             |     | 568 ± 4               | 0.23 ± 0.02 | 6 | 18.3 ± 3.3 |

## IV. 高アミロース米

| No. | 試料名   | 栽培地 | ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線         |             |   | Fr. I (%)  |
|-----|-------|-----|-----------------------|-------------|---|------------|
|     |       |     | $\lambda_{\max}$ (nm) | B.V.        | n |            |
| 1   | ベニロマン | 熊本  | 586 ± 0               | 0.33 ± 0.01 | 6 | 26.5       |
| 2   | 雪の穂   | 北海道 | 589 ± 1               | 0.36 ± 0.00 | 6 | 29.0       |
| 3   | ホシユタカ | 熊本  | 591 ± 0               | 0.35 ± 0.01 | 6 | 27.9       |
| 4   | 夢十色   | 茨城  | 592 ± 0               | 0.37 ± 0.00 | 6 | 28.5       |
| 平均  |       |     | 590 ± 3               | 0.35 ± 0.02 | 6 | 28.0 ± 1.1 |

## 3) アミロペクチンの鎖長分布

米の食味には、アミロース含量が大きく影響を及ぼすことが古くから知られていたが、澱粉の大半を占めるアミロペクチンの構造も食味に関与することが、近年の研究によって明らかとなってきた<sup>31-34)</sup>。アミロペクチンの構造については、古く19世紀後半、A. Meyerにより研究が始まり、Staudingerの櫛型モデル、Haworthの薄層型モデル、Meyerの樹枝状モデル、二國、Frenchらの房状モデル等が提唱されてきたが、現在のところ房状モデルが最も妥当なものとして受け入れられている<sup>35, 36)</sup>。また、前述の通り、うるち米のアミロペクチンには、SLCが存在するが、もち米には存在しないことが明らかにされている<sup>24)</sup>。アミロペクチンの単位鎖長分布は、澱粉もしくはアミロペクチンをイソアミラーゼで完全に枝切りして、生じた単位鎖の重合度分布をゲル濾過クロマトグラフィー或いはパルス電流検出器を用いる高性能陰イオン交換クロマトグラフィーにより測定する方法、枝切りした単位鎖を蛍光標識し、キャピラリー電気泳動法によって測定する方法がある<sup>37)</sup>。

Nakamuraら<sup>38, 39)</sup>は、キャピラリー電気泳動法を用いて、日本を含むアジアで栽培された水稻うるち米及びもち米のアミロペクチン側鎖長を測定し、その短鎖及び中鎖（グルコース重合度：DP ≤ 24）に対する短鎖（DP ≤ 10）の割合を amylopectin chain ratio (ACR) として算出した。アジアで栽培された米の大半は ACR の低い (0.150 < ACR < 0.200) L 型のアミロペクチンを持つ米と、ACR の高い (0.240 < ACR < 0.290) S 型のアミロペクチンを持つ米との2つのタイプに分類されることが報告されている<sup>38)</sup>。また、日本で栽培された米は、全て S 型 (0.240 < ACR < 0.287) でアミロペクチン側鎖が短いこと、アミロペクチン側鎖が長くなる程、糊化温度が高くなること等が明らかにされている<sup>38)</sup>。Horibataら<sup>40)</sup>もアミロペクチン側鎖長と糊化温度との間には正の相関関係があることを報告している。そこで、我々は、おおよそのアミロペクチン側鎖長を知るために、示差走査型熱量計 (DSC) を用いる簡易法<sup>40)</sup>で、日本で栽培されている米の糊化温度測定を行った。すると、日本で栽培されている米の糊化温度（糊化ピーク温度）は、54～74℃の範囲に分布し、特に62～72℃の範囲に集中していることが分かった（図7）。つまり、Nakamuraらの報告<sup>38, 39)</sup>にも

あるように、日本で栽培されている米のアミロペクチンの側鎖長は短く、バラエティーに乏しいといえる。

炊飯米及び冷飯について、その硬さと糊化温度との関係を調べた結果を図8に示す。炊飯米、冷飯共に硬さと糊化温度との間に相関関係は無いが、冷飯の硬さは、アミロース含量が近い米においては、糊化温度が高い程、つまりアミロペク

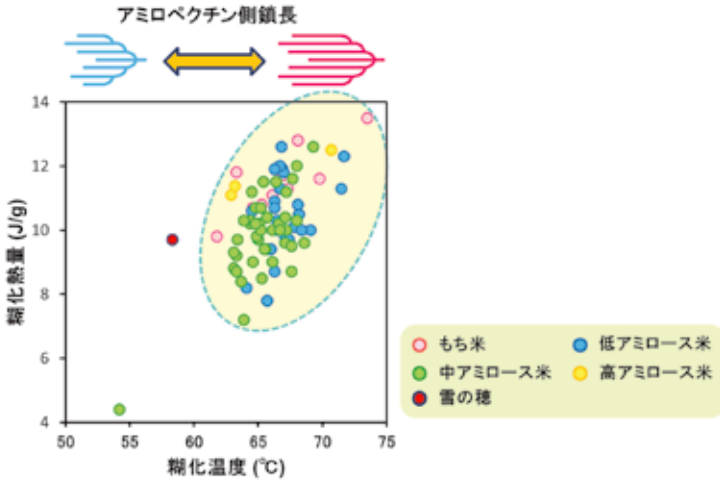


図7 糊化温度（ピーク温度）の分布<sup>25)</sup>

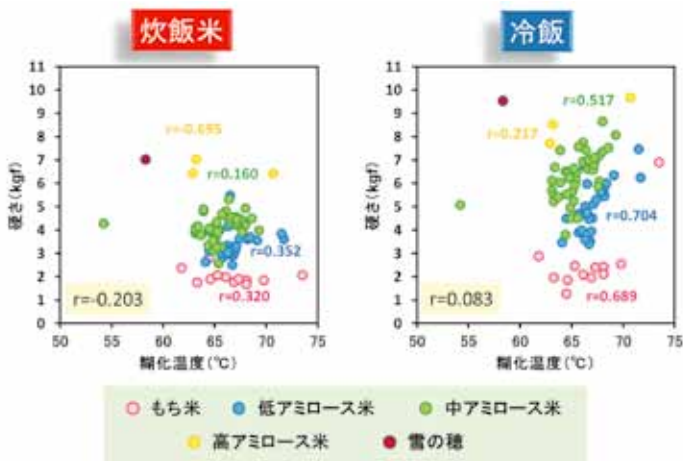


図8 炊飯米及び冷飯の硬さと糊化温度（ピーク温度）との関係<sup>25)</sup>

チン側鎖が長くなる程、硬くなる傾向が見られた。高アミロース米については、日本で得られる試料数が少ないためか、特段の傾向は認められなかった。また、Okamoto<sup>41)</sup>らは、餅の硬化速度と品種間差について、アミロペクチン側鎖が短い品種は餅の硬化速度が遅く、長い品種は速いことを報告している。もち米菓製造では、軟らかくて粘る餅を切断する必要があるため、餅を冷蔵庫に1～3日間入れて冷却し、切断できる程度にまで硬化させる。この工程には長時間を要するために、生産性に深く関係することから、餅の硬化速度は非常に重要である<sup>42)</sup>。つまり、うるち米ももち米も、バラエティーに富んだアミロペクチン側鎖長の品種を開発して利用することで、老化の程度をより厳密に制御することが可能になると期待される。

#### 4) SLC 含量

SLCは、アミロペクチンに結合した側鎖であるが、アミロース様の性質を示す。すなわち、DP300～500程度の非常に長い直鎖であり、ヨウ素と結合して呈色する<sup>43)</sup>。前述の通り、白飯の食味及び物性には、アミロース及びアミロペクチンの分子構造が大きく関与しているが、SLCもまた白飯の食味に影響を及ぼす。水上ら<sup>34)</sup>は、SLC含量と米飯の硬さとの間に高い正の相関があり、SLCが多い程硬い米飯となる傾向があることを報告した。また、白飯の付着性は、SLCが多くなると低下するが、SLC含量が1%までは急激に低下し、それ以上では緩やかに低下することを示した。SLC含量の分析は、澱粉と精製アミロペクチンとをそれぞれ枝切りし、ゲル濾過クロマトグラフィーを用いて行う方法があるが、回転粘度計の一種であるRapid Visco Analyser (RVA)を用いて推算する方法もある<sup>40)</sup>。RVA測定で得られるセットバック値(最終粘度-最低粘度)とSLC含量との間には、高い正の相関関係が認められることから、おおよそのSLC含量を知る方法として、RVA測定は有用である。日本で栽培されている米のSLC含量を推定するために、RVA測定を行った結果を図9に示す。縦軸のブレークダウン(ピーク粘度-最低粘度)は、良食味米の指標であり<sup>44)</sup>、値が高くなるほど良食味と言われている。日本で栽培されている米のセットバック値は、35～340RVUであった。Horibataら<sup>40)</sup>の方法に基づいて、セットバック値からSLC含量を推算したところ、1品種で12%以上、3品種で3～12%の値が得られ、これらの品種はいずれも高アミロース米であった。また、高アミロース米を除く78品種のSLC含量は、3%以下であった。この結果から、日本で栽培されている米のSLC含量も、アミロペクチンの側鎖長と同様に、バラエティーが無いといえる。

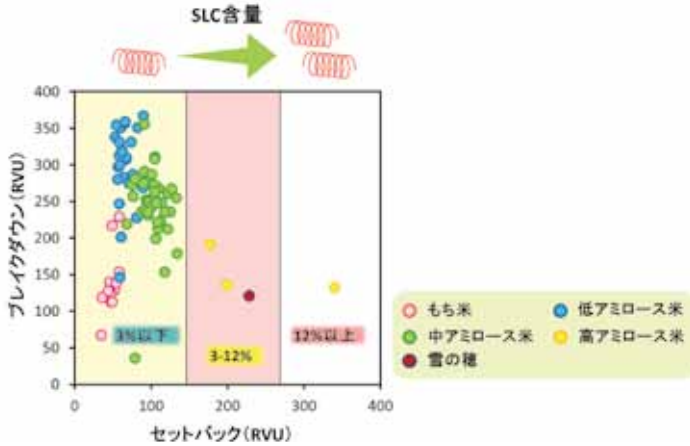


図9 RVA 測定値からの SLC 含量推算

## 5) まとめ

日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量は、0～29%に分布し、世界で栽培されている米のアミロース含量分布（0～約33%）と大差無く、バラエティーに富んでいる。しかし、アミロペクチンの側鎖長については、世界で栽培されている米ではアミロペクチンの側鎖が短いS型及び長いL型が存在しているのに対して、日本で栽培されている米のアミロペクチンは、S型のみと多様性に乏しい。更に、SLC含量についても、大半の米が3%以下に偏っている。これまでは、米の食味に大きな影響を及ぼすという報告が多数あるアミロース含量に基づいて、様々な新形質米が育成されてきたが、アミロペクチンと食味との関係も解明されつつあることから、今後は、アミロペクチンの構造特性にも注目した新形質米が多数育成され、日本人の多様化したニーズに応えられる米の誕生が望まれる。

## 4. 高アミロース米「雪の穂」の活用事例

雪の穂は、2000年に北海道勇払郡むかわ町にある穂別ヘルシーフード農業センターにおいて、低アミロース米である「彩」の突然変異米として発見され、2009年に品種登録されたジャポニカの短粒米である（品種登録番号 第18121号）。雪の穂は、脱粒し易く、玄米が腹白で芒が稀短、穂長及び稈長がやや長い。その他の特徴は種子親である彩に類似していることから、自然条件下で生じた彩の突然変異体とみなされた。雪の穂の澱粉構造について調べたところ、雪の穂は高アミロース米（Fr. I：29.0%）で、しかも、アミロペクチンクラスターを構成する側鎖が日本で栽培されている米の中でも極めて短い品種であることが

分かった。また、SLC 含量がコシヒカリ (2.3%)、ホシユタカ (6.3%) よりも高く 8.6% で、独特な澱粉構造をしていることが分かった<sup>25)</sup>。海野ら<sup>45)</sup>は、この雪の穂を育成し、健康成人を対象とした単回摂取試験及び耐糖能障害者を対象とした食事負荷試験を実施し、雪の穂の米飯が、低 GI (GI=40) であること、コシヒカリの米飯 (GI=80) に比べて食後血糖値の上昇が有意に低く、インスリン分泌が抑制されることを明らかにした。また、耐糖能障害者を対象とした長期摂取試験においても、HbA1c (ヘモグロビン A1c; 過去 1~2 ヶ月間の平均的な血糖レベルを示す。食事の影響を受けない。) 及び 1, 5-AG (1, 5-アンヒドロ-D-グルシトール; 血糖の上昇を速やかに反映する。) が有意に改善され、血糖の是正に寄与する可能性を示した<sup>46)</sup>。更に、経口血糖降下薬を使用している 2 型糖尿病患者を対象にした食後血糖に関する試験を行い、経口血糖降下薬であるスルホニル尿素薬単独あるいは併用の 2 型糖尿病患者においては、コシヒカリ米飯群よりも雪の穂米飯群の方が食後血糖の上昇が有意に小さく、食後血糖の是正に有用であること、また、 $\alpha$ -グルコシダーゼ阻害薬単独あるいは併用の 2 型糖尿病患者においては、雪の穂米飯群の方がインスリン分泌の抑制効果があることを明らかにした<sup>47)</sup>。これらの結果を踏まえ、雪の穂は、糖尿病の食事療法の主食として有益であると考えられ、パックご飯として市販されるに至っている (図 10)。糖尿病の治療は長期間に及ぶことが多いため、煩わしい計量、米中心の日本型食生活の変更を、糖尿病患者に強いることなく食事療法を行うことが望まれている。今後益々、雪の穂のような機能性を持つ米が普及し、国民の生活の質を高めることが期待される。



図 10 高アミロース米「雪の穂」の市販パックごはん

## 謝辞

本研究は、筆者が福山大学生命工学部在勤当時、(独) 農業・食品産業技術総合研究機構(当時)とのプロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農作物の安定供給技術の開発」及び(株)三和化学研究所との共同研究において実施した成果を纏めたものである。

長きに渡りご指導を賜った井ノ内直良先生(福山大学生命工学部教授)、並びに、試料をご供与頂いた関係各位・各所に厚く御礼申し上げます。

(食品加工流通研究領域 食品品質評価制御ユニット 中浦 嘉子)

## 引用文献

- 1) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第1巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.2-3
- 2) 加藤茂苞, 丸山吉晴：稲の異なる種類間に於ける類縁関係の血清学的研究. 九大農学部学芸雑誌, **3**, 16-29 (1930).
- 3) 石谷孝佑編：米の事典 - 稲作からゲノムまで - 幸書房 p.96
- 4) 農林水産省：食糧需給表. <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/> (取得日：2016年10月3日)
- 5) お米と食生活に関するアンケート NTT レゾナント(株) <http://research.nttcoms.com/database/data/001277/> (取得日 2016年10月3日)
- 6) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.32
- 7) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.2
- 8) 花城勲, 太田健介, 竹田千重乃, 水上浩之, 竹田靖史：炊飯時に溶出する澱粉成分の構造と米飯の付着性. 応用糖質科学, **51**, 349-354 (2004).
- 9) 高見幸司, 中浦嘉子, 堀端哲也, 郡山剛, 井ノ内直良：新形質米の米飯物性と胚乳澱粉の性質との関係. 応用糖質科学, **51**, 355-362 (2004).
- 10) 公益社団法人 米穀安定供給確保支援機構：平成27年産水稻の品種別作付動向について. <http://www.komenet.jp/pdf/H27sakutuke.pdf> (取得日：2016年10月3日)
- 11) 横尾政雄, 平尾正之, 今井徹：1956年～2000年の作付面積からみた稲の主要品種の変遷 作物研究所研究報告, **7**, 19-125 (2005).
- 12) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p. 38
- 13) S. Hizukuri, Y. Takeda, N. Maruta and B. O. Juliano: Molecular structures of rice starch. *Carbohydr. Res.*, **189**, 227-235 (1989).

- 14) S. Ball, H. P. Guan, M. James, A. Myers, P. Keeling, G. Mouille, A. Buleon, P. Colonna and J. Preiss: From glycogen to amylopectin; A model for the biogenesis of the plant starch granule. *Cell*, **86**, 349-352 (1996).
- 15) A. Buleon, P. Colonna, V. Planchot and S. Ball: Starch granules; structure and biosynthesis. *Int. J. Bio. Macromol.*, **23**, 85-112 (1998).
- 16) C. P. Villareal and B. O. Juliano: Waxy gene factor and residual protein of rice starch granules. *Starch/Stärke*, **38**, 118-119 (1986).
- 17) S. Ball: Recent views on the biosynthesis of the plant starch granule. *Trends Glycosci. Glycotechnol.*, **37**, 405-415 (1995).
- 18) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.10
- 19) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.29
- 20) 櫛渕欽也監修: 美味しい米 第1巻 世界の米と日本の米 (社) 農林水産技術情報協会 p.193
- 21) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.62
- 22) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.158-159
- 23) N. Inouchi, K. Nishi, S. Tanaka, M. Asai, Y. Kawase, Y. Hata, Y. Konishi, S. Yue and H. Fuwa: Characterization of amaranth and quinoa starches. *J. Appl. Glycosci.*, **46**, 233-240 (1999).
- 24) S. Hizukuri: Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. *Carbohydr. Res.*, **141**, 295-306 (1985).
- 25) 中浦嘉子, 中尾恵子, 高木龍一郎, 海野良一, 林靖久, 井ノ内直良: 高アミロース米「雪の穂」の胚乳澱粉の性質と米飯物性. *応用糖質科学*, **1**, 86-94 (2011).
- 26) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.187
- 27) 石谷孝佑編: 米の事典 - 稲作からゲノムまで - 幸書房 p.90
- 28) B. S. Rao, A. R. V. Murthy, and R. S. Subrahmanya: The amylose and the amylopectin contents of rice and their influence on the cooking quality of the cereal. *Proc. Indian Acad. Sci.*, **36**, 70-80 (1952).
- 29) B. O. Juliano, L. U. Onate, and A. M. Mundo: Relation of starch composition, protein content and gelatinization temperature to cooking and eating qualities of milled rice. *Food Technol.*, **19**, 1006-1011 (1965).
- 30) 越智龍彦, 川上晃司, 三上隆司, 福森 武: 「硬さ・粘り計」による炊飯米物性の判定. *美味技術研究会誌*, **6**, 6-16 (2005).
- 31) 高橋節子, 杉浦智子, 内藤文子, 渋谷直人, 貝沼圭二: 新形質米の調理・加工適性に関する研究 (第2報) 米の食味と米澱粉の構造. *応用糖質科学*, **45**,



- 99-106 (1998).
- 32) T. Umemoto, T. Horibata, N. Aoki, M. Hiratsuka, M. Yano and N. Inouchi: Effects of variations in starch synthase on starch properties and eating quality of rice. *Plant Prod. Sci.*, **11**, 472-480 (2008).
  - 33) M. Ramesh, S. Z. Ali and K. R. Bhattacharya: Structure of rice starch and its relation to cooked rice texture. *Carbohydr. Polym.*, **38**, 337-347 (1999).
  - 34) 水上浩之, 竹田靖史: 新形質米米飯の咀嚼特性と澱粉の分子構造との関係. *応用糖質科学*, **47**, 61-65 (2000).
  - 35) 貝沼圭二: 澱粉の微細構造. *化学と生物*, **13**, 10-18 (1975).
  - 36) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.22-24
  - 37) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.161
  - 38) Y. Nakamura, A. Sakurai, Y. Inaba, K. Kimura, N. Iwasawa and T. Nagamine: The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two class. *Starch/ Stärke*, **54**, 117-131 (2002).
  - 39) Y. Nakamura, A. Sato and B. O. Juliano: Short-chain-length distribution in debranched rice starches differing in gelatinization temperature or cooked rice hardness. *Starch/ Stärke*, **58**, 155-160 (2006).
  - 40) T. Horibata, M. Nakamoto, H. Fuwa and N. Inouchi: Structural and physicochemical characteristics of endosperm starches of rice cultivars recently bred in Japan. *J. Appl. Glycosci.*, **51**, 303-313 (2004).
  - 41) K. Okamoto, K. Kobayashi, H. Hirasawa and T. Umemoto: Structural Differences in amylopectin affect Waxy rice processing. *Plant Prod. Sci.*, **5**, 45-50 (2002).
  - 42) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株)朝倉書店 p.147
  - 43) Y. Takeda, S. Hizukuri and B. O. Juliano: Structures of rice amylopectins with low and high affinity for iodine. *Carbohydr. Res.*, **168**, 79-88 (1987)
  - 44) 谷達雄, 吉川誠次, 竹生新治郎, 堀内久弥, 遠藤勲, 柳瀬肇: 米の食味評価に関係する理化学的要因 (I). *栄養と食糧*, **22**, 452-461 (1969).
  - 45) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 鎌田等, 河盛隆造: 健康成人における高アミロース米品種「雪の穂」米飯摂取時の食後血糖およびインスリン分泌に及ぼす影響. *日本病態栄養学会誌*, **15**, 167-173 (2012).
  - 46) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 鎌田等, 河盛隆造: 耐糖能障害者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の長期摂取による血糖プロファイルの改善効果. *日本病態栄養学会誌*, **18**, 375-385 (2015).

- 47) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 白田俊二, 中畑元伸, 伊藤克礼, 河盛隆造: 薬物療法中の2型糖尿病患者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の食後血糖およびインスリン分泌に及ぼす影響. 日本病態栄養学会誌, **19**, 111-120 (2016).



## Ⅳ 米粉パンの比容積に影響を与える因子

「米粉パン」と呼ばれるパンには様々なものがある。小麦粉に少量の米粉を添加して製造したものから米粉のみを主原料として製造した100%\*米粉パンまである。原材料の観点からこれらを大別すると表1のように4種類になる。本稿ではこの表のように、小麦の一部を米粉に置換したものを部分置換米粉パン、小麦から抽出したグルテンを増粘添加物とするグルテン添加米粉パン、そしてこれらに米粉100%のグルテンフリーパンを加え、米粉を使用して作られるパンを総じて「米粉パン」と記載する。

小麦粉というパンに適した素材があるのに、なぜ米粉を使用してパンをつくるのだろうか？日本において、その一番の目的は米の消費拡大である。国内の米の消費量は漸減していてピーク時の昭和37年には年間一人当たり118kg消費していたが平成26年では56kgと半分以下に落ち込んでいる<sup>1)</sup>。米の大部分は炊飯米として利用されているが、炊飯米としての利用だけでなく新しい形態での消費が期待されている。農林水産省で取りまとめた「21世紀新農政2008」においては『「ご飯」としてだけでなく、「米粉」としてパン、麺類等に活用する取組を本格化する』と記されている。新規用途向けの米の生産補助など、米粉利用を促進する政策も実施された。このような行政的な後押しもあり、米粉を製パンに利用する研究・開発は米の消費拡大の一環として行われてきた。また、近年の地産地消の流れもあり、地元で生産した米を使ってパンを作りたいという要望もある。農林水産省の資料によるとパンなどの新規用途の米粉の利用量は平成24年以降で年間2万トン台前半となっている<sup>2)</sup>。そのほか、東南アジアにおいては米の価格が小麦より安いのでパンの増量を目的として米粉が添加されている。さらに、アレルギー疾患への対応という目的がある。特に西欧においては小麦アレルギー対策という理由が最も重要である。例えば、小麦由来のグルテンを摂取すると自己免疫によって小腸の微絨毛が脱落するセリアック病が知られている。そのためグルテンを全く含まない素材でパンを作る需要があり、米粉を利用したパンが開発されている。

米粉をパンの製造に利用するにあたり当初の大きな問題点は米粉を多量に使用するとパンが膨らまなくなることであった。小麦粉の一部を米粉に置き換えた場合、2割程度までなら米粉を入れても膨らみに対する影響は少ないが、それ以上増量していくと増量に従い膨らみが悪くなる。膨らみを改善するという目的で様々な技術開発がなされた。

この膨らみの程度を定量的に示す指標が比容積である。比容積はパンの容積

\* ベーカーズパーセントによる表記で主原料である粉の量を100%とする。

(mL) をその重量 (g) で割った数値である。比容積が大きくなるほどパンはよく膨らんでいることになる。比容積が大きいとソフトな食感のパンとなる。小麦粉パンについて例えば山形食パンでは比容積は4～5になる<sup>3)</sup>。米粉を主原料としたパンではそこまでは膨らまない。これまでの技術でもせいぜい4程度である。本稿ではパンの比容積にスポットを当てて部分置換米粉パンおよびグルテン添加米粉パンの比容積を左右する米粉の因子について概説する。

### 米粉パンの事情

米粉パンには特有の事情があり、小麦粉全量を米粉にそのまま置き換えてもパンは出来ない。図1は文献をもとに作図したグルテンの模式図である<sup>4)</sup>。小麦粉にはグルテニンとグリアジンというタンパク質が含まれている。グルテニンは弾性があり、グリアジンは粘性を持つタンパク質である。小麦粉に水を加えてこねているうちにグルテニンとグリアジンが絡み合って生じるタンパク質の構造体がグルテンである。グルテンには適度な粘弾性がありパン生地のかなかで酵母から発生するガスを保持する役割を持っており、パンが膨らむための最も重要な成分である。しかし、米粉にはこのグルテニンとグリアジンが含まれないため、水を加えて練ってもグルテンができない。

### 米の製粉について

米粉は以前から和菓子や煎餅の原料として使用されてきた。製粉方法の例として、上下2つのロールの間に穀粒を挟み込むことによって粉碎するロールミル、

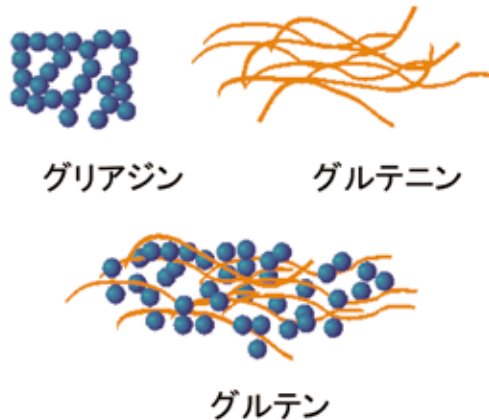


図1 グルテンの模式図

小麦粉に水を加えて捏ねると成分として含まれているグリアジンおよびグルテニンが絡み合ってグルテンが形成される。

回転するハンマーやピンを米に衝突させて粉碎するハンマーミルやピンミル，杵と臼により粉碎する胴搗き製粉，ブレードを回転させて生じた気流の中で米同士またはライナー（粉碎室の内壁）と衝突させる気流式製粉などがある。粉の平均粒径を小さくでき損傷澱粉の量を低く抑えられることから，近年は湿式気流製粉と呼ばれる製粉方法がパン用としてよく利用されている<sup>5)</sup>。

これに対し小麦粉では製粉はほとんどロールミルで行われている。米の粒は硬いため小麦のようには砕けやすすくないので，ロールミルで米を製粉すると粒径の大きな粉しかできない。これはあまりパンに向いていない。ロールミルは団子用の上新粉の製造に使用されている。図2は上新粉，市販のパン用米粉と小麦粉を比較した走査型電子顕微鏡写真である。上新粉は粒径が大きく，パン用の米粉および小麦粉は粒径が小さい。

### パンの構成材料

パンには様々な種類のものがあるが，これらは共通の材料から構成されている。小麦粉パンの基本的な材料は小麦粉，パン酵母，塩，水である。これに副材料として糖類，油脂，乳製品など加えている。米粉パンではこの小麦粉の一部あるいは全部を米粉に置き換えている。

上述したように米粉には小麦粉におけるグルテンの作用をする物質が存在しな

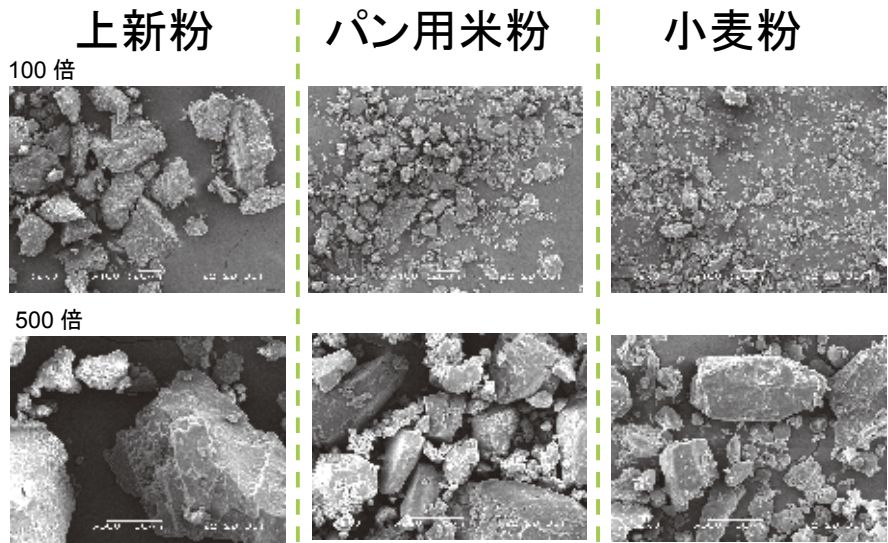


図2 上新粉，パン用米粉，小麦粉の比較

上新粉，パン用米粉，小麦粉の走査型電子顕微鏡写真。上段が<sup>100</sup>倍，下段が<sup>500</sup>倍の倍率。

い。米にもタンパク質は存在するがグルテンのような性質を持っていない。そこで米粉パンでは粘性の物質を添加するなどの工夫によりパンとして生地を膨らませている。例えば、小麦粉の一部を米粉に置換し小麦粉のグルテンの粘性を利用する、小麦粉から抽出したグルテンを添加する、米を一部糊化させて加える、あるいはグアガム等の増粘剤を添加するなどである。

## 米粉パンの種類

表1に示したように米粉パンには幾つもの製法(原材料の組み合わせ)がある<sup>6)</sup>。この4つの分類をまとめると、部分置換米粉パンおよびグルテン添加米粉パンから成る小麦粉パン的なパンの系統と、米粉のみのパン(グルテンフリー米粉パン)の2つの系統になる。

グルテンを含む前二者の米粉パンは通常的小麦粉パンに比較的近い形状、食感を持っている。これに対し米粉100%で調製したグルテンフリー米粉パンでは加水量が多く、ドロドロした生地のままパン型に流し込んで焼成することが多い。食感も蒸しパンに近い。食感は小麦粉パンと異なるがその代わりに小麦アレルギーに対応できるのはこのタイプのパンである。

## 比容積に影響を与える因子

### 1) 平均粒径

パンに適した米粉の平均粒径はある程度小さいことが必要であると言われてい

表1 米粉パンの種類

| 名称                   | 米粉割合  | 増粘添加物                                      | 特徴   |
|----------------------|-------|--|--|
| 部分置換米粉パン<br>(米粉入りパン) | ～20%* | 基本的に小麦から生じるグルテンを利用するが、少量の乾燥グルテンを添加する場合もある。 | 小麦粉の一部を米粉に置き換えたパン。米粉を2割程度まで置き換えるのは容易だが、3割以上増やすと比容積の低下などの影響がみられる。 |
| グルテン添加米粉パン           | ～85%  | 小麦から抽出した乾燥グルテンを添加する。米粉の15～20%程度添加する場合が多い。  | 米粉に乾燥グルテンを添加して製造したパン。  |
| グルテンフリー米粉パン(増粘剤添加)   | ～100% | グアガムなどの増粘剤を添加する。                           | 小麦由来の成分を使用していないので小麦アレルギーに対応可能である。                                |
| グルテンフリー米粉パン(増粘剤無添加)  | ～100% | 米を一部糊化させるなど米自体により粘性を生じさせる。                 | 小麦由来の成分を使用していないので小麦アレルギーに対応可能である。                                |

\* ベーカーズパーセント：主原料である粉の全量を100%として表記する。

る。江川によると、粒度の粗い上新粉を用いてグルテン添加米粉パンの製パン試験を行った場合は、発酵時に生地が割れガスが抜けて膨張しないという<sup>7)</sup>。しかしながら粉の平均粒径を小さくすると損傷澱粉が増加しやすい。このためか実験的には粒径が小さい粉を使用すると比容積が低下することがしばしば報告されている<sup>8) 9)</sup>。この点に関しては後でまた述べる。

## 2) 損傷澱粉

損傷澱粉は機械的な力などにより損傷を受けた澱粉のことである。小麦粉を走査型電子顕微鏡で観察すると大粒澱粉の中に割れている澱粉粒がみられる<sup>10)</sup>。米粉の場合は損傷を受けている部分は外観的には観察されないことが多い。現在のところ損傷澱粉の構造的な詳細は不明である。そもそも澱粉自体の構造も詳細な点に関しては不明である。

損傷澱粉の測定はメガザイム社の測定キットを用いた酵素処理法がよく用いられている<sup>11)</sup>。本法ではカビ由来 $\alpha$ -アミラーゼが健全澱粉粒には作用しにくいですが、物理的に損傷を受けた澱粉粒には作用するという原理を用いている。米粉の製パン適性には損傷澱粉含量が低いことが重要であるとされている<sup>5)</sup>が、後述のように米粉パンの比容積におよぼす「損傷澱粉」の影響は吸水量の増加であると考えられる。損傷澱粉含量の数値は上述のように酵素の作用性により測定しており、米粉の製パン特性を直接的に説明しているものではないという点に留意が必要である。

小麦粉の場合、適量の損傷澱粉の存在は吸水率を高め、生地を滑らかにする効果があるとともに、製パン中に小麦内在アミラーゼの適度な作用がおこる適度な範囲の損傷澱粉が製パンには必要であるとされている。そもそも小麦は粉になりやすい性質があり、粉に粉碎する時にそれほどエネルギーを加える必要はないので損傷澱粉含量が高くなる。小麦粉と米粉で損傷澱粉自体の性質が異なるということではなく、その存在量が問題である。

米粉に関しては、米が硬いために十分な平均粒径までに粉碎する過程で多大な機械的な力が加わり、その際に熱も発生し、それゆえ粉にダメージを与え損傷澱粉の量が増える場合が多い。このように米粉では製粉過程で損傷澱粉含量が高くなりやすい。このため米粉の製粉技術ではいかに損傷澱粉含量を下げるかが注目されてきた。ちなみに粉が硬いと機械的損傷を受ける率が高くなることに関して、小麦でも軟質小麦より硬質小麦を粉にした場合に損傷澱粉の量が多くなることが知られている<sup>12)</sup>。

上述したように損傷澱粉の影響はパン生地の吸水量の増加である。損傷澱粉により生地が多くの水を吸水するようになり、適度な生地の柔らかさを得るためにはより多くの水を生地に加える必要が生じる。この結果が焼成後のパンにどのような影響を及ぼすか、小麦粉パンでは図3のように考えられている（文献をもと



に作図)<sup>13) 14)</sup>。パン生地には無数の気泡が含まれているが、その1つを取り出して模式的に示した。大きな丸は1つの気泡の断面図である。内側には酵母から生じたガスが入っており、その周囲を気泡膜が包んでいる。気泡膜上に描かれた小さい白い丸は健全澱粉であり、水をあまり吸収していない。薄い水色で示したのは損傷澱粉で既に水を吸収している。いずれの場合も生地中には水分があり生地に柔軟性を与えている。焼成により健全澱粉は多量の水を吸収して膨潤しグルテンより水分を奪う。このことによりパンは硬化する。しかし損傷澱粉は既に水を吸っているので健全澱粉ほどは水を吸収することはできない。従って焼成後にはグルテンに水分が残ることになる。グルテンに水分が残っているとパンが硬化しないので焼成後にケービング（腰折れ）が起きやすくなる。これと同様の現象が米粉パンでも起きていると考えられる。

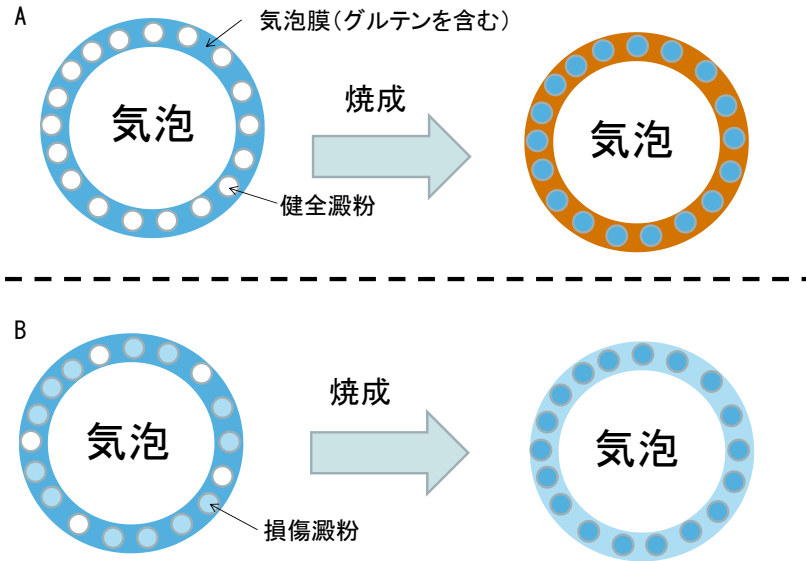


図3 損傷澱粉が多いと焼成後にケービングが起きる原因を示した模式図

A: 損傷澱粉が少ない場合の気泡, B: 損傷澱粉が多い場合の気泡

図中で水色の濃さが水分量の多少を示す。Aについて焼成前の生地気泡膜が青色なのは水を多く含んでいることを示す。健全澱粉は吸水量が少ないので白色で表現した。(矢印の右側の) 焼成後の状態に関して、焼成時に澱粉が糊化する際に気泡膜から水を奪い水分を含むので焼成後の澱粉を青で示した。Bについて健全澱粉と比較して損傷澱粉は吸水量が多いので水色で示してある。焼成後の状態に関して、澱粉が糊化する際に気泡膜から水を奪うが、損傷澱粉は焼成前から既に水分を含んでいるのでその分吸収する水の量が減るために気泡膜にAの場合よりも水分が残る。このため焼成後の気泡膜を水色で示した。

### 3) 吸水特性

吸水量が少なく吸水速度が速い米ほど部分置換米粉パンの比容積は増大する傾向であると松木らは指摘している<sup>15)</sup>。吸水量は損傷澱粉含量と、吸水速度は平均粒径と相関があったという。江川も濡れ特性が $0.02 \text{ mm}^2/\text{s}$ 以上がパンに適した条件としている<sup>7)</sup>。ここで濡れ特性とは、粉体に液体（ここではメタノール）を添加した際に粉体表面に液体が広がる速度を表す<sup>5)</sup>。

### 4) 安息角

安息角は粉体を積み上げた際に自発的に崩れることなく安定を保つ斜面の最大角度である。安息角は粉の粒子形、水分含量、粒子の大きさの影響を受ける。粒子が角張っていると安息角は大きくなる。例えば角張っている川砂は高く積み上げることができるが、粒が丸い海砂では流動してしまい安息角が小さくなる。また、粒子径が小さくなると安息角は大きくなる。宍戸らの報告<sup>5)</sup>から、江川は粒子形が丸い粒子がパンに適しているとして、安息角 $50^\circ$ 以下がよいパンの条件としている<sup>7)</sup>。

### 5) アミロース含量

高橋らの報告によるとグルテン添加米粉パンの最大比容積はアミロース含量が25%前後で得られる<sup>16)</sup>。低アミロース米はケーピングを起こしつぶれてしまう。また、高アミロース米はパンの硬化速度が速い傾向がみられ、中アミロース米（15～25%程度）が最もグルテン添加米粉パンに適しているとしている。

## 因子間の関係

著者らはハンマーミル、ピンミル、湿式および乾式の気流粉碎など10種類の米粉を使用してグルテン添加米粉パンを調製し（加水量80%）、パンの比容積に関係すると考えられる因子の相関関係を調べた（表2）<sup>17)</sup>。比容積と相関関係がみられたのは損傷澱粉含量であった。それに対して平均粒径の影響ははっきりしなかった。図4はこのうち損傷澱粉、平均粒径、比容積の関係を取り出して図にしたものである。今述べたように損傷澱粉と比容積には負の相関がみられた。また、Bの平均粒径と比容積のプロット図で●（青い丸印）は損傷澱粉含量が27.1%と極めて高く、平均粒径が小さいにもかかわらず、全体として比容積は小さい。このように損傷澱粉含量が高いと平均粒径が小さくても比容積は小さくなる。

表3は小麦粉の30%を米粉に置き換えて、加水量は一定のままホームベーカリーを使用してパンを焼き、パン用など市販の米粉の特性とパンの比容積の関係を調べたものである<sup>18)</sup>。通常はパン用に使用されない和菓子用の米粉も加えて比較した。この場合も損傷澱粉量が多い米粉では比容積は小さい傾向がみられた

表2 米粉および米粉パンの各特性値間の相関係数<sup>17)</sup>

|                       | 平均<br>粒径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 損傷澱<br>粉含量<br>(%) | 米粉水<br>分含量<br>(%) | アミロース<br>含量<br>(%) | ゆるめカ<br>サ密度<br>(g/mL) | 安息角<br>( $^{\circ}$ ) | スパチュ<br>ラ角<br>( $^{\circ}$ ) | 比容積<br>(mL/g) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|
| 損傷澱粉含量 (%)            | -0.380                        |                   |                   |                    |                       |                       |                              |               |
| 米粉水分含量 (%)            | 0.557                         | -0.667*           |                   |                    |                       |                       |                              |               |
| アミロース含量 (%)           | -0.402                        | -0.245            | -0.039            |                    |                       |                       |                              |               |
| ゆるめカサ密度 (g/mL)        | 0.787**                       | -0.397            | 0.281             | -0.530             |                       |                       |                              |               |
| 安息角 ( $^{\circ}$ )    | -0.537                        | 0.410             | -0.375            | 0.481              | -0.581                |                       |                              |               |
| スパチュラ角 ( $^{\circ}$ ) | -0.587                        | 0.609             | -0.756*           | 0.069              | -0.460                | 0.500                 |                              |               |
| 比容積 (mL/g)            | -0.126                        | -0.670*           | 0.656*            | 0.563              | -0.263                | -0.088                | -0.400                       |               |
| 硬さ (kPa)              | -0.211                        | 0.676*            | -0.831**          | -0.251             | -0.095                | 0.317                 | 0.576                        | -0.888**      |

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ 

ゆるめカサ密度：容器にゆるく充填した時の粉体の密度。

安息角：少しずつ粉体を水平面に落下させて積み上げた時にできる山の斜面と水平面との間の角度である。

スパチュラ角：スパチュラとはへらという意味で、粉体を積み上げた中にスパチュラを水平に埋め込み上方に引き上げた時にスパチュラの上に残った粉体の傾斜角度である。

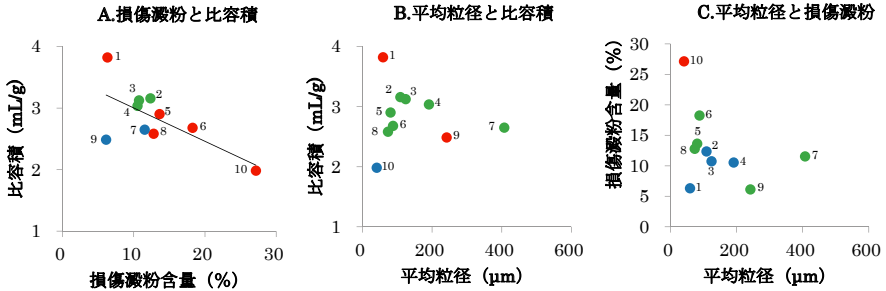


図4 損傷澱粉，平均粒径，比容積の間の相関性の散布図

A：損傷澱粉含量と比容積の相関性の散布図

平均粒径による区分 ●：< 100  $\mu\text{m}$ ，●：100 ~ 200  $\mu\text{m}$ ，●：> 200  $\mu\text{m}$ 

B：平均粒径と比容積の相関性の散布図

損傷澱粉含量による区分 ●：&lt; 10 %，●：10 ~ 20 %，●：&gt; 20 %

C：平均粒径と損傷澱粉含量の相関性の散布図

比容積による区分 ●：&lt; 2 mL/g，●：2 ~ 3 mL/g，●：&gt; 3 mL/g

散布図中の番号と米粉試料の製粉方法（番号は比容積値の降順）

1: 湿式気流製粉, 2: UDY 社サイクロンサンプルミルによる製粉, 3: ハンマーミル製粉 (2.0 mm スクリーンを使用), 4: レッチェ社超遠心式粉碎機による製粉, 5: 乾式気流製粉, 6: ハンマーミル製粉 (1.0 mm スクリーンを使用), 7: 小型電動臼による製粉, 8: 湿式気流製粉, 9: ピンミル製粉, 10: ハンマーミル製粉 (0.7 mm スクリーンを使用)

表3 米粉の特性および製パン比容積<sup>18)</sup>

| 試料名     | 平均粒径              |      | 損傷澱粉 |      | 比容積    |      |
|---------|-------------------|------|------|------|--------|------|
|         | ( $\mu\text{m}$ ) | s.e. | (%)  | s.e. | (mL/g) | s.e. |
| 米粉 A    | 51.9              | 0.27 | 2.87 | 0.03 | 3.48   | 0.02 |
| 米粉 B    | 91.2              | 2.19 | 5.49 | 0.11 | 3.41   | 0.04 |
| 米粉 C    | 68.1              | 1.18 | 3.66 | 0.07 | 3.55   | 0.01 |
| 米粉 D    | 68.9              | 0.45 | 3.19 | 0.05 | 3.52   | 0.01 |
| 米粉 E    | 87.2              | 3.62 | 4.10 | 0.05 | 3.47   | 0.01 |
| 米粉 F    | 57.2              | 0.64 | 3.06 | 0.08 | 3.50   | 0.05 |
| 上新粉     | 90.4              | 0.17 | 9.55 | 0.10 | 3.43   | 0.05 |
| 上用粉     | 92.5              | 0.51 | 4.85 | 0.08 | 3.55   | 0.01 |
| 玄米粉*    | 128               | 0.37 | 52.8 | 1.15 | 1.91   | 0.02 |
| 味甚粉*.** | 157               | 0.58 | 71.9 | 0.95 | 2.56   | 0.12 |
| 寒梅粉*.** | 201               | 0.36 | 72.9 | 0.67 | 2.14   | 0.10 |
| 羽二重粉**  | 79.4              | 0.41 | 22.4 | 0.17 | 3.26   | 0.14 |
| 最中粉**   | 83.0              | 0.39 | 20.9 | 0.24 | 3.28   | 0.01 |
| 牛皮粉**   | 135               | 0.29 | 7.71 | 0.11 | 3.58   | 0.02 |
| 大福粉**   | 97.9              | 0.23 | 6.60 | 0.29 | 3.41   | 0.03 |
| 小麦粉     |                   |      |      |      | 3.68   | 0.03 |

製パン条件：小麦粉 196 g, 各種米粉等 84 g, 油脂 20 g, 砂糖 20 g, スキムミルク 6 g, 塩 4 g, ドライイースト 3.6 g, 精製水 190 ml を配合し, エムケー精工(株)製の HBK-100 を用いて製パンした。

\*：玄米粉、味甚粉、寒梅粉において損傷澱粉の値が高い理由は製造工程の途中で加熱処理されており澱粉がアルファー化されているためである。

\*\*：味甚粉、寒梅粉、羽二重粉、最中粉、牛皮粉、大福粉は餅粉である。

( $R^2 = 0.848$ )。平均粒径と比容積の関係でも平均粒径が小さい粉の方が比容積が大きくなる傾向がみられた ( $R^2 = 0.557$ )。また、原因は明らかでないが牛皮粉では損傷澱粉含量の値がやや高いにも関わらず比容積は比較的大きかった。今後さらに比容積を決定するメカニズムについて解明する必要がある。

グルテン添加米粉パン<sup>19)</sup> および部分置換米粉パン<sup>15)</sup> に関して損傷澱粉含量が比容積と逆相関することが報告されている。損傷澱粉はパンの比容積に強く影響する因子である。これに対して平均粒径に関しては、平均粒径が小さくなるほど比容積が増大するという報告もあり<sup>5)</sup>、逆に平均粒径が小さい方が比容積が小さくなるという報告もある<sup>8) 9)</sup>。平均粒径が小さいと比容積が小さくすると報告される場合、平均粒径が小さくするとともに損傷澱粉含量が増大していることが多い。

米粉の特性の一つが他の因子と関係している場合が多い。そして米粉の持つ平均粒径や損傷澱粉含量などの因子を独立にコントロールできないことが多い。例

えば上述のように、平均粒径を小さくすると、損傷澱粉含量が増大する。この結果、損傷澱粉含量の影響を受けてパンは膨らみにくくなる。この場合、損傷澱粉の増大の影響を受けて平均粒径の効果は判然としにくい。このように複雑にそれぞれの因子がからみあっているためにこの相互関係をほぐして個別に論じるのは難しい。また、米粉は澱粉が複粒状態となって存在している。米粉として得られるのは単粒の澱粉か、複粒が部分的に破壊された粒子、複粒そのもの、複粒とその他タンパク質などの複合体の粒子である。もし任意の粒径の粒子を得ることができれば、粒子径と比容積の関係も定量的に明らかにできるだろう。そしてそれが米粉パンの膨らみに関する理論的な理解につながる。

### 現在の問題点と今後の展望

米粉パンに現在残されている問題点として次のものが考えられる。(1) 小麦粉パンに比べ価格が高くなる (2) 製造後に硬くなりやすい (3) 風味が乏しい (4) 米粉割合を高めると大規模製造が難しい、という点である。以下それぞれについて詳述する。

(1) 米粉パンは割高となりやすいがその内訳は原料米のコスト、製粉コスト、製パンコストから成る。原料米の価格については行政的な支援により小麦に近い価格に抑えることが可能になっている。製粉コストは小ロットであるためと製粉方法に手間がかかるために小麦粉と比較するとコスト高である<sup>2)</sup>。製パンコストに関してはリテールベーカリーでの製造を考えると小麦粉パンと比較して大きな差は生じない。この中で特に重要なのは製粉コストの低下である。

製粉コストが高い原因は前述のように製粉のロットが小さいことと、湿式気流製粉では米の浸漬および製粉後の乾燥という工程が加わること、がある。これらの問題の解決のためには湿式気流式製粉について低コスト化研究を行うという方向性と低コスト製粉の可能なピンミルなどで品質のよい米粉パンを製造可能にするという方向性の技術開発が考えられる。

(2) 製造後の保存日数の経過に伴い米粉パンが硬くなりやすい(老化しやすい)ことが指摘されている。米粉パンでは食べる直前に暖め直すことが多い。暖めることで老化して硬くなった米粉パンも軟らかくおいしく食べることができる。この製造後に硬くなりやすい点に関しては製造法の改良が望まれる。

(3) ある程度以上の量の米粉を含む米粉パンはもちりした食感があるものの、特徴・風味が乏しいということが指摘されている。しかし炊飯米を考えた場合、炊いた米を単独で食べるということはあまりない。他のおかずと併せて食べるのがほとんどである。その際には自己主張する味はかえって邪魔になる。あまり独特の味を持たない方が何にでも合う。米粉パンも総菜パンのような利用を考えるとあまり風味がないことが逆にメリットとして生きるだろう。

(4) 米粉パンの消費拡大と低コスト化を考えると工場でのライン製造が重要と

なる。小麦粉に少量の米粉を混ぜて製造する米粉入りパンでは工場でのライン製造も可能である。しかし、米粉割合を増加させた生地では十分な進展性を保持させることが困難であることや、粘着性が増すため、この生地を工場の生産ラインの機械に投入すると生地を流している途中でローラーによる引っ張りに耐えきれずぶつぶつと切れてしまう。これを生地の機械耐性がないという。したがって米粉を主原料とした米粉パンをライン製造することは難しい。現状としては少量の米粉を入れるだけに止めるか、リテールベーカリー等での手作業による小規模生産を行うことが考えられる。この点についても今後の技術開発が期待される。

これらの問題を解決するためにも基本に立ち返りパンの膨らむメカニズムの理論的な解明が重要である。メカニズムが解明されることによりさらなる技術開発が行われ、そして米粉の消費拡大につながるだろう。食品研究部門ではこれまでも米粉利用促進の研究プロジェクトに取り組んできた。また本稿では触れなかったが主原料として米粉のみを用いたユニークな米粉パンも開発している<sup>20)</sup>。著者自身もこの分野の研究にさらに貢献していきたいと考えている。

(食品加工流通研究領域 食品素材開発ユニット 與座 宏一)

## 引用文献

- 1) 農林水産省, 平成 27 年度食料需給表.
- 2) 農林水産省, 米の消費拡大について (2016).
- 3) 内田迪夫, パンの種類と製法, 製パンプロセスの科学, 第 2 版, 田中康夫, 松本博編, (光琳, 東京), pp. 1-26 (1997).
- 4) Huebner, F. R., Wheat flour proteins and their functionality in baking, *Baker's Digest*, **51**, 25-31 (1977).
- 5) 宍戸功一, 江川和徳, ベクチナーゼ処理による米粉の製造法及びその製パン適性 (第 1 報) 米の粉食文化に関する研究, 新潟県食品研究所・研究報告, **27**, 21-28 (1992).
- 6) 與座宏一, 岡部繭子, 島純, 米粉利用の現状と課題 - 米粉パンについて -, 日本食品科学工学会誌, **55**, 444-454 (2008).
- 7) 江川和徳, 米粉パンの開発, 農林水産技術研究ジャーナル, **26**, 11-16 (2003).
- 8) Murakami, S., Kuramochi, M., Koda, T., Nishio, T. and Nishioka, A., Relationship between rice flour particle sizes and expansion ratio of pure rice bread, *J. Appl. Glycosci.*, **63**, 19-22 (2016).
- 9) Hera, E., Martinez, M. and Gomez, M., Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread, *LWT-Food Sci. Technol.*, **54**, 199-206 (2013).
- 10) 遠藤繁, 小麦粉の物理的性状, 小麦の科学, 第 1 版, 長尾精一編, (朝倉書

- 店, 東京), pp.77-82 (2006).
- 11) Gibson, T. S., Al Qalla, H. and McCleary, B. V., An improved enzymatic method for the measurement of starch damage in wheat flour, *J. Cereal Sci.*, **15**, 15-27 (1991).
  - 12) 長尾精一, 小麦粉, 製パン材料の科学, 第1版, 田中康夫, 松本博編, (光琳, 東京), pp. 1-56 (1992).
  - 13) 松本博, 団野源一, 生地形成, 製パンプロセスの科学, 第2版, 田中康夫, 松本博編, (光琳, 東京), pp. 27-62 (1997).
  - 14) 団野源一, パン生地のミキシングとは何なのか? (その20), *Pain*, **32**, (12) 51-53, (1985) .
  - 15) Matsuki, J., Okunishi, T., Okadome, H., Suzuki, K., Yoza, K., and Tokuyasu, K., Development of a simple method for evaluation of water absorption rate and capacity of rice flour samples, *Cereal Chem.*, **92**, 487-490 (2015).
  - 16) 高橋誠, 本間紀之, 諸橋敬子, 中村幸一, 鈴木保宏, 米の品種特性が米粉パン品質に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **56**, 394-402 (2009) .
  - 17) 與座宏一, 松木順子, 岡留博司, 岡部繭子, 鈴木啓太郎, 奥西智哉, 北村義明, 堀金彰, 山田純代, 松倉潮, 製粉方法の異なる米粉の特性と製パン性の関係, 食品総合研究所研究報告, **74**, 37-44 (2010) .
  - 18) 與座宏一, 松木順子, 市販米粉の製パン性について, 食品総合研究所研究報告, **78**, 43-46 (2014) .
  - 19) Araki, E., Ikeda, M. T., Ashida, K., Takata, K., Yanaka, M. and Iida, S., Effects of rice flour properties on specific loaf volume of one-loaf bread made from rice flour with wheat vital gluten, *Food Sci. Technol. Res.*, **15**, 439-448 (2009).
  - 20) Yano, H., Improvements in the bread-making quality of gluten-free rice batter by glutathione, *J. Agric. Food Chem.*, **58**, 7949-7954 (2010).

## V 穀粉の吸水性の評価と調節

### 1. はじめに

調理の目的のひとつは、その素材のもつ特性を生かすように加工して食事として供することにある。澱粉を多量に含む穀類を食材として利用する場合、澱粉を糊化させることで消化吸収をよくして栄養効果を高め、糊化した澱粉ゲルがもちもちとした物性を生かすため、加水、加熱を伴う調理を行うことが多い。またその際には、(1)炊飯米のような粒食、(2)小麦粉のような粉末にしてパンや麺に加工、(3)コーンスターチのように澱粉を取りだしてゲル状食品やとろみづけに利用、といった方法がとられる。我が国で最も利用の多い穀類は米と小麦で、近年の食料自給率向上政策の一環として、主食用米以外の米粉用などの水稻作付け面積の拡大、多様な用途に対応した製造技術の革新と商品開発を軸とした米粉の利用拡大を図っている<sup>1)</sup>。このような背景から、特に(2)に関連した新たな米粉利用技術の開発が進められている。

米粉特有の物性を生かした多様な食品による需要創出につなげるためには、米粉の基本特性の解析と、その加工・調理特性との関係の解明が不可欠である。例えば、ういろう、団子などの水分を多く含む和菓子は、米澱粉糊化ゲルのもちもちとした特性が生かされる食品であり、米粉が十分に吸水することが重要となる。一方で、米粉パンでは、澱粉の糊化に必要な水分を吸水する必要があるものの、過度の吸水は生地べたつきや離水を招く。米粉に水を加えて生地を作製する際、粉が吸水すると、再水和し、膨潤し、可溶性成分が溶出することによって、生地の物性をはじめとする様々な重要な機能が発揮される<sup>2,3)</sup>。したがって、粉の機能を最大限に引き出して利用するためには、粉の吸水性を適切に評価することが重要であると考えられる。また、望まれる吸水特性をもつ米粉を自在に作製することができれば、米粉の新用途開発につながるものが強く期待される。本稿では、穀粉の吸水性測定法とその活用例、および吸水性の調節方法について紹介する。

### 2. 吸水性の評価法

小麦粉の吸水量を評価する方法は、これまでも、AACC 公定法である遠心法<sup>4)</sup>、ファリノグラフ吸水率<sup>5)</sup>、濾過法<sup>6)</sup>などが知られており、製パン性との関連が詳しく調べられている<sup>7,9)</sup>。一方で、吸水速度についても、生地作製時に材料を加える順番については生地の物性に影響を及ぼすと考えられることから、評価が試みられてきた。Baumann のキャピラリー法<sup>10)</sup>や粉体の濡れ性の評価<sup>11)</sup>などが知られているが、測定装置の作製や測定が面倒なことから、ほとんど利用されていない。筆者らは、土壌の最大容水量測定法<sup>12)</sup>と上記粉体の濡れ性の測定法を参



考に、特殊な器具を必要としない簡易な吸水測定法を開発した<sup>13)</sup>。以下具体的な方法を紹介する。

### (1) 用意する物

- ①底に1 cm 間隔で1～2 mm の穴を7つ開けた円筒容器。例えばラピッドビスコアライザーの測定容器（アルミ製，直径3.8 cm，高さ6.8 cm，厚み0.4 mm）に穴を開けて作製する。（図1）
- ②ガラス繊維ろ紙（円筒容器に合わせる。上記の場合は直径3.7 mm）ここではアドバンテック東洋ろ紙GA55を使用。
- ③25 g の重し
- ④バットにろ紙一枚，その上にペーパータオルを一枚敷く。これは缶とバットが密着するのを防ぐためである。缶を入れたときに水位が1 cm 程度の高さになるように蒸留水を張る。

### (2) 測定方法

- ①円筒容器の底に乾いたガラス繊維ろ紙を敷き入れて重量を測定した後，粉10 g を計り入れる。



図1 吸水評価に用いるもの

上から、バット、底に穴をあけた円筒容器、ガラス繊維ろ紙、重し

- ②粉の入った容器を机上数 cm の高さから落とすようにして軽くたたき (120 回), 缶の中の粉が均一に詰まるようにする。このとき, 粉の高さは約 12 mm となる。
- ③蒸留水を張ったバットに粉を入れた容器を浸し, 容器が浮かないように重しを乗せる。初期は 1~2 分間隔, その後は 5~10 分毎に水から容器を引き上げ, 缶の外に付着した水を素早くペーパータオルで拭き取り, 重量を測定し, 素早くバットに戻す (図 2)。重量の変化が観察されなくなるまで繰り返す。吸水によりバットの水位が下がるので, 適宜蒸留水を補充する。
- ④一試料あたり, 4 回程度測定し, 平均値を取る。
- ⑤粉の水分含量を勘案して全水分量を計算し, 粉 100 g 当たりの全水分量としてグラフにプロットする。
- ⑥時間経過に伴う吸水量の変化は,  $t$  を測定時間,  $Y$  を全水分量として,

$$Y=A(1-e^{-Kt})+B \quad (\text{式 1})$$

を当てはめることができる。このとき,  $A$  は吸水量,  $K$  は吸水速度係数,  $B$  は初期水分量を表す。吸水試験によって得られた吸水量から乾物重に対する全水分量  $Y$  を計算して,  $t$  と  $Y$  を軸にしたグラフにプロットし, 統計解析ソフト (例えば GraphPadPrism) を用いて式 1 に当てはめ,  $A, K, B$  を算出する。 $A$  の半分を吸水するのにかかる時間である半吸水時間  $H=\ln(2)/K$  は, 吸水速度の目安となる。

### 3. 粉碎方法の異なる米粉の吸水性の評価<sup>13)</sup>

コシヒカリ精米を气流粉碎 (湿式および乾式), ピンミル, ロールミルの方法で粉碎した。それぞれの粉の平均粒径 (レーザー回折式粒度分布計使用) と損傷



図 2 吸水性評価装置の全貌

澱粉含量（Megazyme キット使用）を測定した（表1）。吸水量を測定したときの吸水量の推移をグラフにプロットした（図3）。湿式気流 A と B は、いずれも湿式気流粉碎であるが、製粉事業者および粉碎機のメーカーが異なり、粒度分布が異なっているものである。

統計解析ソフトを用いて吸水量 A と半吸水時間 H を算出すると、表1のようになる。この例では、湿式の粉碎で得られた粉は吸水量 A が小さく、乾式の粉碎で得られた粉の吸水量は大きかった。コシヒカリ以外の品種でも、粉碎方法による吸水のパターンの違いは同様であり、吸水性は概ね粉碎方法により特徴があり、品種との関連性は高くないことがわかった。

小麦粉 / 米粉 = 70/30 の粉を用いて、加水率を一定にして製パンした米粉パンの比容積との相関を解析すると、吸水量 A が小さく（=吸水量が少なく）、半吸水時間 H が短い（=吸水が速い）米粉を使用したパンの比容積は高く、吸水量

表 1 粉碎方法の異なる米粉の吸水特性（コシヒカリ）

| 粉碎方法   | 平均粒径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 損傷澱粉含量<br>(%) | 吸水量 A<br>(g / 100 g) | 半吸水時間 H<br>(min) |
|--------|---------------------------|---------------|----------------------|------------------|
| 湿式気流 A | 81 $\pm$ 50               | 4.5           | 76                   | 2.3              |
| 湿式気流 B | 50 $\pm$ 29               | 5.1           | 80                   | 11.3             |
| 乾式気流   | 57 $\pm$ 39               | 15.3          | 127                  | 6.7              |
| ピンミル   | 161 $\pm$ 81              | 7.6           | 95                   | 3.3              |
| ロールミル  | 145 $\pm$ 78              | 8.0           | 100                  | 2.6              |

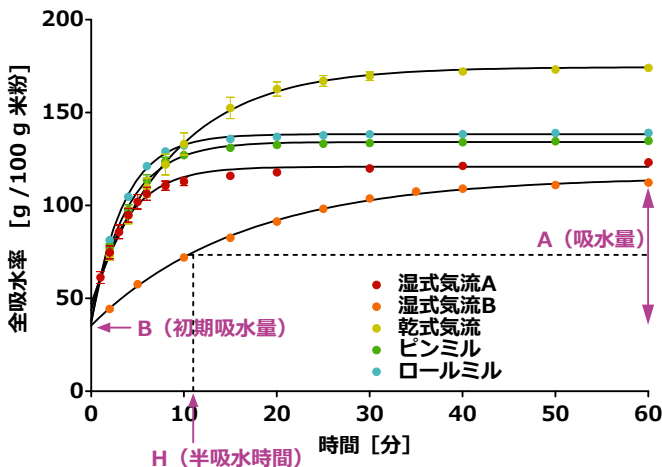


図 3 吸水過程の解析と曲線への当てはめ

が多く吸水の遅い米粉を使用したパンの比容積は低かった（図4）。

物理化学的特性との関連では、損傷澱粉含量と吸水量  $A$  には正の相関が認められた。アミロース含量はいずれとも相関は認められなかった。また、半吸水時間  $H$  は粒度分布との関連が認められた。同じ湿式気流粉碎でも、 $A$  と  $B$  で吸水量に有意差はないものの、半吸水時間は大きく異なった。これには、粒度分布が関係しているものと推測された。

ここでは米粉での測定例を紹介したが、トウモロコシ粉、オオムギ粉、ソバ粉、アワやヒエなどの雑穀粉など、多くの穀粉や、大豆粉、乾燥ヤムイモ粉などでも吸水特性を測定できることを確認している。残念ながら、損傷澱粉含量が60%以上の極めて損傷度の高い粉と小麦粉は測定ができなかった。これは、損傷澱粉やグルテンの吸水量が高いこと、吸水したこれらの粉は膨潤してろ紙のすぐ近傍で膜状になり、揚水を妨げることが原因と考えられる。一方で、ごく少量の吸水を測定する系にダウンスケールすることにより、損傷度の高い粉やグルテンなど吸水性の高い成分を含む粉で吸水性を測定することが可能になると考えられる。

#### 4. 穀粉の吸水性の調節

今回紹介したような静置吸水で吸収される水は、①粉の表面に吸着する吸着水、②粒と粒の間隙に入る毛管水、③内部へ吸収される吸収水の三形態が考えられる。米粉の吸水は大きく二段階に分けて進むと考えられる。吸水の初期段階では、毛管引力により米粉の粒子間に水が引き込まれ、米粉表面への吸着が起こる。次の段階では、米粉の内部へ水が浸透し、吸収水となる。初期の吸着水と次段階の吸収水それぞれに着目して粉の性質を改変することで、吸水性を細かく調

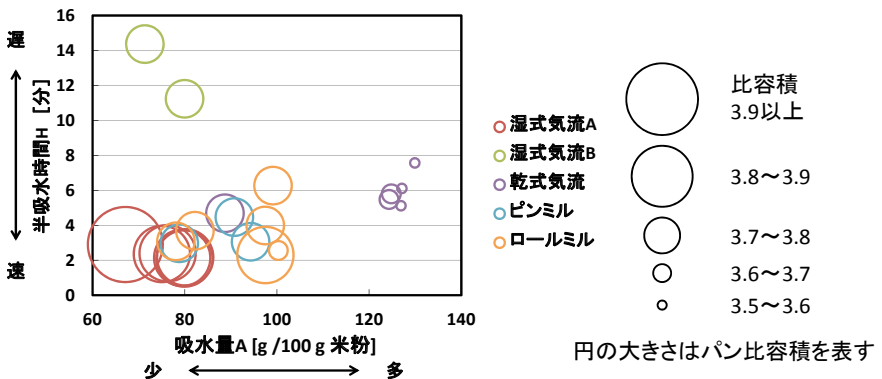


図4 各種米粉の吸水性と米粉パンの比容積

節することが可能になると考えられる。

小麦粉を塩素処理や乾熱することで粉表面の性質が変化し、ケーキの膨らみが改善することが知られている<sup>14)</sup>。小麦粉表面のタンパク質が疎水的になることで、気泡との親和性や澱粉への水の浸透に影響があると考えられる<sup>15, 16)</sup>。長期保存や乾熱処理した米粉でもやはり表面の親油性が変化しており、グルテン混合米粉パンの膨らみが悪くなることが示されている。また、このような米粉を水酸化ナトリウム処理してタンパク質を除去することによって、パンの膨らみが改善することから、タンパク質とグルテンの相互作用の変化が示唆されている<sup>17)</sup>。

筆者らは、穀粉を水酸化カルシウムで処理することにより、吸水特性を改変できることを見いだした。処理時間、濃度、温度を調節することで、吸水速度と吸水量を調節することが可能である<sup>18)</sup>。図5に極端に吸水速度が低下して撥水性を示すようになった粉の吸水曲線を示す。この例では、表面が改質されて疎水的になって水をはじくようになり、水が浸透するまでの時間が長くなったと推測された。このような粉では、例えば打ち粉に用いた場合に、生地を吸水を抑え、打ち粉の茹でどけを抑制することが可能である。米粉から順次タンパク質を除去した粉を用いて水酸化カルシウム処理粉を作製したところ、プロラミン、グルテリンの撥水性発現への関与が強く示唆された。

アニーリングおよび湿熱処理により澱粉の結晶化度を調製した米粉では、示差走査熱量測定による糊化エンタルピー（結晶の溶解に必要な熱量の指標となる）と吸水量との間に高い負の相関が認められ（図6）、澱粉の結晶性が低くなるほど吸水量が多くなることが示された。この例では、穀粉中の澱粉の結晶性が穀粉内部へ吸収される吸収水の量を決定づける要因であることを示唆している。

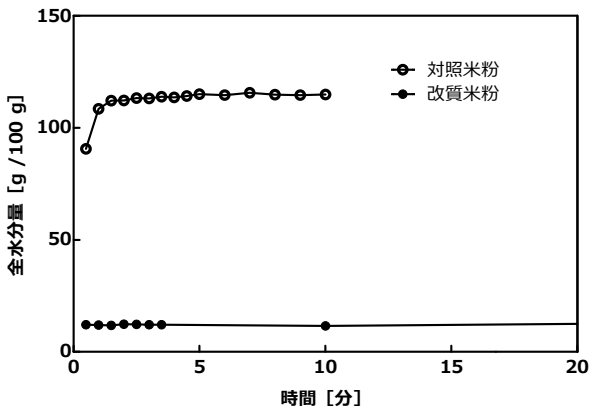


図5 水酸化カルシウム処理により改質した米粉の吸水特性

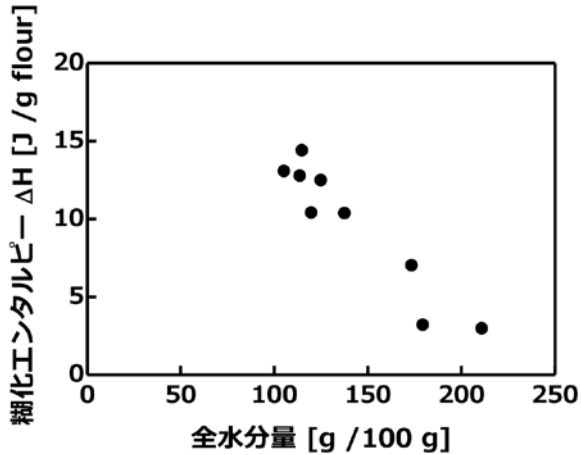


図6 澱粉の結晶化度を調整した米粉の糊化エンタルピーと吸水量との関連

## 5. おわりに

以上のように、特殊な装置を使用せずに簡易に吸水特性を評価できる手法は、実施場所を選ばないことから、生地作製時に材料を加える順番を検討したり、生地作製に適した粉を選別したりするときの予備試験に用いることができるほか、製粉工場の品質管理などにも利用することができる。

今回紹介しなかったが、酵素処理による澱粉の非晶領域の改変、湿熱処理による澱粉結晶領域の改変による吸着水の改変方法の検討なども行っている。様々な吸水特性の改変方法を組み合わせることにより、穀粉の吸水特性の微調整を行い、加工利用特性を改変することができるようになることで、今後素材の新たな利用法の開発につなげることが期待される。

## 謝辞

本研究は、農林水産省委託プロジェクト「低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発」および科学研究費助成事業（基盤研究（C））により実施された。

（食品加工流通研究領域 食品素材開発ユニット 松木 順子）

## 引用文献

- 1) 農林水産省. 米粉をめぐる状況について. 2016 [cited 2016.7.6]; Available from: <http://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/komeko/pdf/komeko2.pdf>.

- 2) Bushuk, W. and Hlynka, I. (1964) Water as a constituent of flour, dough, and bread. *The Bakers Digest*, **38** (12), 43-46.
- 3) Pilosof, A. M. R., Boquet, R., and Bartholomai, G. B. (1985) Kinetics of water uptake by food powders. *Journal of Food Science*, **50** (1), 278-279.
- 4) AACC International (Proposed November 3, 1999; revised and approved June 3, 2009.) Method 56-11.02. Solvent retention capacity profile, in *Approved methods of analysis*, 11th ed., AACC International: St. Paul, MN, U.S.A.
- 5) AACC International (Proposed November 8, 1995; revised and approved January 6, 2011.) Method 54-21.02. Rheological behavior of flour by farinograph: Constant flour weight procedure, in *Approved methods of analysis*, 11th ed., AACC International: St. Paul, MN, U.S.A.
- 6) 有坂將美, 中村幸一, 吉井洋一 (1992) 製粉方法を異にした米粉の性質. *澱粉科学*, **39**, 155-163.
- 7) Bushuk, W. (1966) Distribution of water in dough and bread. *The Bakers Digest*, **40** (5), 38-40.
- 8) Finney, K. F. and Yamazaki, W. T. (1946) Water retention capacity as an index of the loaf volume potentialities and protein quality of hard red winter wheats. *Cereal Chemistry*, **23**, 416-427.
- 9) Xiao, Z. S., Park, S. H., Chung, O. K., Caley, M. S., and Seib, P. A. (2006) Solvent retention capacity values in relation to hard winter wheat and flour properties and straight-dough breadmaking quality. *Cereal Chemistry*, **83**, 465-471.
- 10) Baumann, H. (1966) Apparatur nach Baumann zur bestimmung der flüssigkeitsaufnahme von pulvrigen substanzen. *Fette, Seifen, Anstrichmittel*, **68**, 741-743.
- 11) 久野洋, 阿部竜二 (1958) 粉体含量の吸液量と空隙量との関係. *工業化学雑誌*, **61**, 1445-1448.
- 12) 東京大学農学部農芸化学教室, 土壤実験法, 「実験農芸化学」 第3版 上, (朝倉書店, 東京). p. 305 (1988).
- 13) Matsuki, J., Okunishi, T., Okadome, H., Suzuki, K., Yoza, K., and Tokuyasu, K. (2015) Development of a simple method for evaluation of water absorption rate and capacity of rice flour samples. *Cereal Chemistry*, **92**, 487-490.
- 14) Russo, J. V. and Doe, C. A. (1970) Heat treatment of flour as an alternative to chlorination. *Journal of Food Technology*, **5**, 363-374.
- 15) Ozawa, M., Kato, Y., and Seguchi, M. (2009) Investigation of dry-heated hard and soft wheat flour. *Starch/Stärke*, **61**, 398-406.
- 16) Seguchi, M. (1984) Oil-binding ability of heat-treated wheat starch. *Cereal*

Chemistry, **61**, 248-250.

- 17) Nakagawa, M., Tabara, A., Ushijima, Y., Matsunaga, K., and Seguchi, M. (2016) Hydrophobicity of stored (15, 35 °C), or dry-heated (120 °C) rice flour and deteriorated breadmaking properties baked with these treated rice flour/fresh gluten flour. *Biosci. Biotech. Biochem.*, **80**, 983-990.
- 18) 松木順子, 徳安健, 與座宏一, 池正和, 撥水性を賦与した改質穀粒又は改質穀粒破碎物とその製造法. 特開 2015-149916, 平成 27 年 8 月 24 日公開.





食 糧 —その科学と技術—  
第 55 号

平成 29 年 3 月 29 日 印刷  
(非売品)  
平成 29 年 3 月 29 日 発行

〒305-8642  
茨城県つくば市観音台2-1-12  
国立研究開発法人  
農業・食品産業技術総合研究機構  
食品総合研究部門  
研究部門長 鍋谷 浩志

URL : <http://www.naro.affrc.go.jp/nfri-neo/>

印刷所 牛久印刷株式会社  
〒300-1236  
茨城県牛久市田宮町531-27