米の吸水過程の MRI による観察

日本においては、炊飯前に米を水に浸けることが習慣となっている。これにより米粒の中に水が浸透し、加熱されたときに米粒の中心までデンプンが十分に糊化して米がふっくら炊きあがる。弥生時代の昔から米を栽培し、米食に親しんできた日本人のやり方である。日本酒の醸造においても、麹菌を生育させる米は、蒸す前に水に浸す。浸漬時の米粒内への水の浸透とその結果である粒内水分分布は、炊飯後、加工後の米やその加工品の品質を決定する重要な要因である。そこで、水の分布を画像化できる磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging, MRI) を用いて、浸漬過程における米粒中の水分分布変化を追ってみたところ、水の浸透経路や水分分布は、米の胚乳のデンプン細胞の粗密や並び方を反映し、炊飯用の品種コシヒカリと、酒米用の品種山田錦とでは、水の浸透パターンが異なっていた。このことから、MRI により米粒内への水の浸透を観察することで、その米の加工適性の一面を評価できるのではないかと期待される。

吉田 充・堀金明美

1. はじめに

米の調理・加工過程における吸水や粒内水分分布は、炊飯後、加工後の米の品質を左右する大きな要因である。そこで、MRI で水浸時における米の吸水過程と吸水完了時の水分分布を画像化し、各種の米について吸水特性を調べることを考えた¹⁾。

MRI は核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance, NMR) という現象を利用した画像化技術で、主に医療の現場で無侵襲画像診断技術のひとつとして広く利用され、現在多くの病院に MRI 装置が導入されている。人体を対象とした低磁場 (1 テスラ (1 万ガウス) 程度) で大型の磁石を装備した医療用の MRI 装置の他に、小さな試料を 4 テスラ以上の高磁場中で分解能良く測定することを目的としたマイクロ MRI 装置があり、作物や食品の分析にも用いられてきている²⁾。MRI においては、磁石の作る磁場の中に試料を置き、試料中の水素核 (プロトン) による電磁波の吸収を測定する。感度よく観測できるのは液体や溶液状態の物質で、固体については分子運動が遅いために NMR 信号 (シグナル) の緩和が速く、一般的な方法では観測できない。生物体内に最も多く含まれる液体は水で

あるので、その水のプロトンのシグナルの空間分布を MRI で測定することにより、水分分布を知り、それを通して生体内の組織や器官の構造を観察することができるのである。水分含量が高い食品においても同様に MRI で水分分布や内部構造を画像化できる。

2. 米粒内への吸水の測定方法

米粒の MRI については、これまでに著者らの研究グループ等により、米の炊飯過程における水分分布変化や粒内の空洞の形成を観察した結果が発表されているが³⁻⁷⁾、吸水過程の観察のためには、生米という低水分の試料中における水分分布の変化を、空間分解能よく数分間という短い時間に測定しなければならない。そこで、炊飯米の測定に用いられたスピンエコー法ではなく、低水分の試料の画像をより短い時間で測定できるグラジエントエコー法を用いることにした。

試料の米一粒をプラスチックシートで保持して外径 5 mm の NMR 試料管に入れ、マイクロシリンジで水を注入して浸漬を開始した (第 1 図)。この米を入れた NMR 試料管を内径 5 mm の MRI 用ラジオ波送受信コイル内にセットし、7 テスラの超伝導磁石を装備したマイクロ MRI の測定が可能な NMR 装置

Observation of Water Penetration Process into Rice Grains by MRI

Mitsuru YOSHIDA and Akemi K. HORIGANE (National Food Research Institute, National Agriculture and Food Research Organization)

第1図 MRI測定装置への米粒試料のセット方法

(DRX 300 WB, Bruker Biospin) を用い、三次元グラジエントエコー法により 21~23°C 中で測定を行った。得られた 3 次元のデータセットから、米粒の縦断面及び横断面の画像を構築した。エコー時間を 1.1 msec に設定し、繰り返し時間 (T_r) およびパルスのフリップ角 (FA) は、ひび割れの中の自由水がよく観察でき、米粒の外の水のシグナルが弱くなるような値を選択し、一連の浸漬実験においてはその値を固定して測定を行った。縦断面画像用には、空間分解能を $65 \times 65 \times 130 \mu\text{m}^3$ (縦×横×厚さ) とし、1 画像の測定時間は試料の吸水速度に応じて 2 分 55 秒から 9 分 53 秒とした。横断面画像用には、空間分解能 $65 \times 65 \times 65 \mu\text{m}^3$ で、測定時間は 5 分 50 秒から 19 分 46 秒とし、米を水浸したままで時間を追って次々に同じ米粒の画像の測定を行い、吸水の様子を観測した。

3. コシヒカリにおける吸水

水分 14.9% に調製した搗精度 90% の炊飯用の品種コシヒカリの正常米の吸水の様子を示す米粒中央部の

縦断面画像及び横断面画像を第 2 図に示した。米粒の外の水を画像処理により除去し、米粒内に浸透した水のみを示してある。画像において、白く見える部分が米粒内に浸入した自由水で、その輝度が大きいほど水のシグナルが強く、水分含量が相対的に高いことを示している。デンプンやタンパク質に強く結合して存在する結合水はシグナルの緩和が速く、MRI では検出できない。

コシヒカリ正常米では、胚乳のデンプン貯蔵細胞の密度が疎な腹側 (第 2 図 a) や胚芽がついていた部分 (第 2 図 b) の中心線付近 (第 2 図 c) から吸水が始まり、その後ひび割れ (第 2 図 d) が生じ、これを通して水が米全体へ浸透し、45~60 分で吸水が完了した。背側より腹側からの水の浸透が速い様子は、特に横断面画像からよく見て取れる。胚乳の中心部の中心線付近は細胞の並びが粗く、ここに水が貯まりやすいことは、登熟期のイネの穎果の MR 画像にも現れている⁸⁻⁹⁾。胚乳表面の維管束が衰えた登熟中期には、背部維管束から胚乳中の背腹径線に沿った水の移動が優

第2図 コシヒカリ精白米の吸水過程のMR画像

上段及び中段，米粒中央部の縦断画像；下段，左の縦断画像の線的位置における横断画像。
a, 腹側；b, 胚付着部；c, 中心線；d, ひび割れ；e, 中心点。画像中の数字は水浸後の時間
(分)を表す。画像測定時の T_r は 85 msec で， FA は 40° 。

勢になる。すると，その中途にある中心点に水が入り，それが中心線を通して胚に達すると予想され，中心線は登熟中期の胚への水の供給経路となっているのではないかと考えられる。調理前の水浸時においても，精米によって胚が除去されて中心線が露出していると，まずそこから水が浸入し，吸水完了時も組織構造が疎で水を貯めやすい胚乳中心部の水分含量が周辺部に比べて高くなるのが，MR画像から明らかになった。精米後も胚が残っていると中心線からの水の浸入が抑制されて吸水速度は遅くなるが，吸水完了時に胚乳中心部の水分含量が高くなるのは変わらない（第3図A, B）。

コシヒカリの腹白米（第3図C）では，浸漬後すぐに腹側からの吸水が始まり，30分後にはほぼ吸水が完了し，腹白米では腹側の組織構造が正常米に比べてさらに疎であると見られた。腹白米では吸水速度は速いものの吸水完了時の水分分布パターンは正常米と同じで，ひび割れ部や中心部の水分含量がその他の部分に比べて高くなっているが，腹側が背側に比べて目立って水分含量が高いということはなかった。

4. 山田錦における吸水

酒米として有名な品種山田錦の米粒は，胚乳中心部に頻繁に不透明で白く見える心白部を有する。心白部は細胞の詰まり具合がゆるいか，また空隙ができていると言われているが，実際に山田錦に特徴的な線状心白を持つ米粒を水浸前にMRIで見ると，背腹径線路上にシグナルの観測されない空隙と思われる部分が確認できた。大きな心白部を有することが，麹菌の生育にとって有利で，良い酒米の条件とされており，山田錦はその性質を有する代表的な酒造好適米品種である。

水分15.7%搗精度90%の山田錦の米粒で平均的な大きさの心白部を有するものの吸水の様子を第4図に示した。山田錦においても，吸水は腹側や胚付着部から始まったが，水浸開始15分後に水が心白部（第4図c）に達すると，心白部内に急速に水が拡散した。米粒中心部の縦断画像で見ると，あたかも一気に胚乳全体に水が拡散したかのように見受けられるが，横断画像を見ると水浸開始20分後までに水が入ったのは主に背腹径線に沿った心白部の空隙であり，その後米

第3図 コシヒカリ精白米のいろいろな吸水パターン

A, 胚の一部が残っている粒; B, 胚が残っている粒; C, 腹白米。a, 腹側; b, 胚付着部; c, ひび割れ; d, 胚。画像中の数字は水浸後の時間(分)を表す。画像A, B測定時の T_r は 140 msec で, FA は 50° , 画像C測定時の T_r は 85 msec で, FA は 40° 。

粒の厚さ方向へ徐々に水の浸透が見られた。吸水は大体 45 分で完了した。

第4図に示したのは、コシヒカリに合わせて搗精度を 90% とした山田錦であるが、酒米は胚乳の周辺部に多く存在するタンパク質を除いて酒の味を良くするために搗精度を高くして使用する。搗精度を高めると吸水速度も速くなり、吸水完了までの時間は搗精度 80% でだいたい 15 分、70% で 12 分、60% で 9 分であった(第5図)。搗精度が上がるほど組織が密な周辺部が除去されて心白部が露出してくるので、水が入りやすくなる。吸水速度が速く、また心白部に貯水しやすい酒米は、吸水させすぎて蒸煮後に米がべとつかぬよう吸水時間の厳密なコントロールが必要であることが、MRI で見た吸水の様子からも推測できる。

5. コシヒカリと山田錦の吸水時の水分プロファイルの比較

MR 画像における各画素のシグナル強度の平均値を求めると、それはそのスライス位置における総水分含量に比例する。そこで、背腹径線に平行な各縦断画像における平均シグナル強度を求め、画像のスライス位置の米粒表面からの距離に対してプロットして、水分分布プロファイルを求めてみた(第6図)。

搗精度 90% のコシヒカリにおいては水浸 18 分から 36 分で、山田錦においては 9 分から 27 分で、水分プロファイルに大きな変化が見られ、45 分を過ぎるとどちらの品種においてもプロファイルはほとんど変化しなかった。

吸水完了時において、コシヒカリでは表面と中心部の水分含量が高くなっているが、山田錦では表面部分の水分が低く、中心部へ行くに従って水分含量が直線

第4図 山田錦精白米（搗精度 90%）の吸水過程の MR 画像
 上段及び中段、米粒中央部の縦断画像；下段、左の縦断画像の線的位置における横断画像。
 a, 腹側；b, 胚付着部；c, 心白部。画像中の数字は水浸後の時間（分）を表す。画像測定時
 の T_r は 85 msec で、FA は 40° 。

第5図 搗精度の異なる山田錦米粒の写真と吸水過程の MR 画像

第 6 図 コシヒカリと山田錦精白米（搗精度 90%）の吸水過程における水分プロファイル変化
グラフ中の破線は中心部の縦断画像のスライス位置を示す。

的に高くなる。水浸 27 分のコシヒカリでは表面から 0.7mm のところで、水浸 18 分の山田錦では表面から 0.4mm のところで水分プロファイルに U 字型の曲がりが見られた。これは、この部分を境に胚乳の果皮側と中心部側で細胞の並びや密度に差があり、水の浸透速度が違っているからであろう。

6. おわりに

コシヒカリと山田錦の例で見てきたように、水浸時の吸水経路や吸水完了時の水分分布は米粒の組織構造

や胚乳の硬度分布を反映しており、MRI で吸水過程や吸水完了時の水分分布を観察することにより、米の品種ごとの胚乳の構造の特徴を知ることができる。このようにして得られた米粒の吸水特性に関する情報は、加工目的に応じた品種の適性評価に用いることができ、品種の選別、育種の方向性決定にも利用できると考えられる。また、MRI を使った加工工程ごとの米粒中の水分分布の観察も可能であり、米の新しい加工流通技術の開発にも役立てられるであろう。

参考文献

- 1) Akemi. K. Horigane, Hitoshi Takahashi, Sachio Maruyama, Ken'ichi Ohtsubo, Mitsuru Yoshida : *J. Cereal Sci.*, **44**, 307-316 (2006)
- 2) 石田信昭, 小泉美香, 小川秀次郎, 狩野広美 : 日本食品科学工学会誌, **47**, 407-423 (2000)
- 3) A. K. Horigane, H. Toyoshima, H. Hemmi, W. M. H. G. Engelaar, A. Okubo, T. Nagata : *J. Food Sci.*, **64**, 1-5 (1999)
- 4) 永田忠博, 堀金明美 : 食品工業, **42**, 24-33 (1999)
- 5) A. K. Horigane, W.M.H.G. Engelaar, H. Toyoshima, H. Ono, M. Sakai, A. Okubo, T. Nagata : *J. Food Sci.*, **65** 408-412 (2000)
- 6) Ales Mohoric, Frank Vergeldt, Edo Gerkema, Adrie de Jager, John van Duynhoven, Gerard van Dalen, Henk Van As : *J. Magn. Reson.*, **171**, 157-162 (2004)
- 7) Midori Kasai, Andrew Lewis, Florea Marica, Sonoko Ayabe, Keiko Hatae, Colin A. Fyfe : *Food Res. International*, **38**, 403-410 (2005)
- 8) A. K. Horigane, W. M. H. G. Engelaar, S. Maruyama, M. Yoshida, A. Okubo, T. Nagata : *J. Cereal Sci.*, **33** 105-114 (2001)
- 9) 吉田 充, 堀金明美 : 農業技術, **57**, 165-169 (2002)