

MRI(核磁気共鳴イメージング)による米粒内部構造の計測

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者名	永田,忠博 堀金,明美
発行元	農林水産技術情報協会
巻/号	24巻9号
掲載ページ	p. 5-11
発行年月	2001年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



MRI(核磁気共鳴イメージング)による米粒内部構造の計測

永田 忠博・堀金 明美

独立行政法人 食品総合研究所

米粒の登熟と炊飯の過程をMRI(核磁気共鳴イメージング)により計測した。登熟過程では形態変化に加え、貯蔵デンプンの質的变化、さらには従来の推論であった水の移動経路を、MR画像により可視化した。炊飯米の計測では、加熱による水の動態とデンプン糊化の様子を示すことができた。加えて飯粒のMR画像から1粒ごとに複数の空洞が存在することがわかり、この空洞の形成メカニズムも明らかにできた。また3次元画像から空洞容積を定量し、コメ5品種の炊飯過程の容積変化を調べた。

本稿ではコメを例に、作物の生長と食品の調理という段階の計測結果を紹介するが、MRIの非破壊分析法としての利点を活かした多方面での応用が期待される。

1. はじめに

MRI(核磁気共鳴イメージング)は、医療の分野で画像診断法として広く普及している。この計測法は、もちろん農産物や食品にも使える。筆者らは医療用とは異なるマイクロMRI装置を用いて、いくつかの食材を分析してきた。思いがけない発見や、従来の仮説の証明というチャンスに恵まれたこともある。分析材料によっては、さらに面白い結果が出ると期待もしている。

ここではコメの登熟と炊飯の過程を例に、用いた手法や計測結果を紹介する。新たな活用の一助となれば幸いである。

2. ミクロMRI

医療用MRIによる人体の断層像は、水素原子のNMR(核磁気共鳴)信号を画像化したものである。MRIでは核磁気を有する原子が測定対象となるが、水素核を測定対象とするもの

が圧倒的に多い。測定原理は、電磁波エネルギーを吸収した核の応答の様子をNMR信号として取り出し、この信号に位置情報を加え、信号強度をマッピングすることにより画像を構成する、というものである。

しかし、生体を構成する水素核すべてを検出できるわけではない。蛋白質やデンプンなどの水素は、容易に平衡状態に戻ってしまうため、NMR信号が弱く画像化できない。したがってヒトでも農産物でも、得られるものは水や油脂の画像である。また顕微鏡やX線CTが組織の固体部分を観察しているのに対し、MRIは組織の液体部分を見ているともいえる。

MRIの最大の利点は、無侵襲、非破壊で、試料内部を2次元または3次元の画像にできることにある。本稿で紹介するのは、医療用MRIよりも高い空間分解能が得られるマイクロMRIという方法である。測定できる試料は、ヒトよりずっと小さくなる。磁場強度でいうと、医療用MRIでは0.5~1.5テスラ(1テスラは1万ガウス)、マイクロMRIでは4~18テスラという強い磁場の中で測定する。マイクロMRIでは、

1画素当たり 10^{-5} mm³の測定が可能であり、微小部分の情報を図示することができる。以下に述べる米の計測には、径2.5cm以下の試料が測定対象となる磁場強度7.1テスラの装置を使用した。マイクロMRIは、測定の磁場強度や得られる画像の空間分解能が異なるだけで、測定原理は医療用のMRIと同じである。以後はマイクロMRIも、MRIと述べる。

コンピュータグラフィックスの進歩やデータ処理の高速化により、MRIの3次元画像は、生体の内部構造をわかりやすく迅速に提示できるようになった。特定の器官あるいは組織を抽出して画像を再構成したり、距離、面積、体積などの計測も可能である。後述する炊飯米の長径・短径の長さ、空洞容積の計測も、こうした手法を利用している。

3. 登熟過程の米粒の成長

図1および図2にコシヒカリの開花後3日から45日の穎果の縦断画像及び横断画像を示す。白い部分ほどNMR信号が強く、水や油脂が多

い。胚乳のデンプン組織に注目すると、白から黒に変化している。これは、貯蔵デンプンが液相から固相へと、質的に変化したことを意味する。また、胚乳の中心部と周辺部で色調が異なり、固相への進行に部位間差があることもわかる。このように組織の状態をわかりやすく図示できるのも、MRIの特徴である。

得られた3次元画像を回転させることにより、穎果全体の成長の様子もよくわかった。粒の背腹径の拡がり最大に達するのは開花後15日であり、背腹径と直交する方向が最大に達するのは開花後20日から25日であった。これまでも、穎果の発達を示す外観図をイラストにより示した例はあるが、MR画像は登熟の全過程をさらに明確に提示している。

4. 穎果内の水の流路

開花後20日の3次元MR画像を回転させ、異なる3方向から得た画像を図3に示す。aでは穎果の背部維管束に沿ってすじ状の水の分布が認められる。これを回転させると、穎果の表層

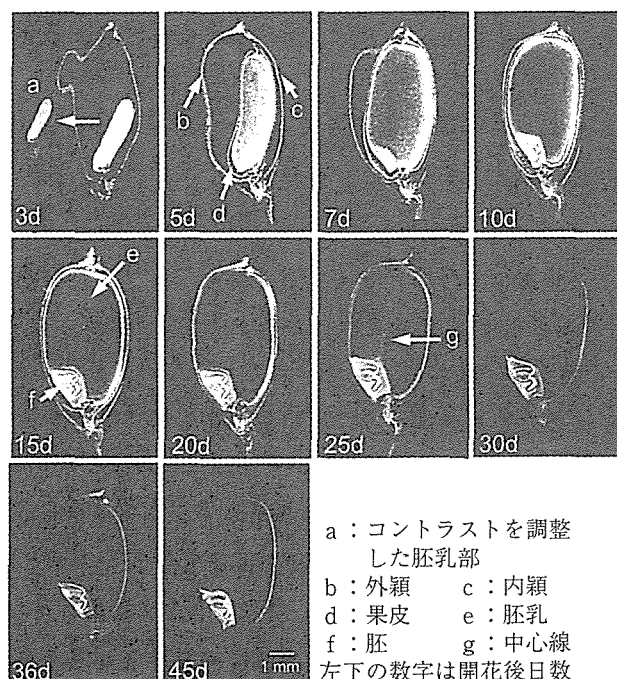


図1 穎果中央部における縦断MR画像

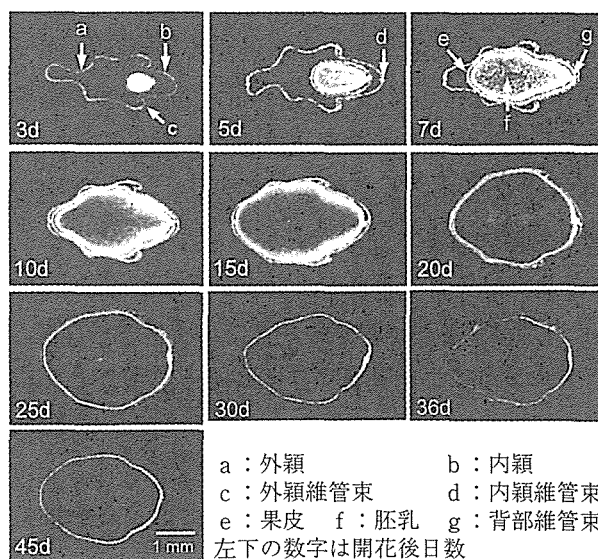


図2 穎果中央部における横断MR画像

に水が分布している様子がわかる。同様の水分分布は開花後7日から観察されたが、胚乳の水分が低下する開花後20日に、最も鮮明な画像が得られた。穎果表層における水の流路は、登熟中期における同化産物の転流経路として推測されており、3次元MR画像によりこれを示すことができたといえよう。

登熟後期になると、前述の穎果表層部の流路は退行し、水は背部維管束から胚乳の背腹径線に沿って流れ、腹側に向かうと推測されている。図2の横断画像を見ると、胚乳周縁部に分布していた水が、次第に胚乳内部へと分布するようになり、開花後25日では背腹径線上に観察された。これにより、登熟後期における流路も示されたといえよう。

ここで、図1の開花後25日の縦断画像で、胚乳の中心にすじ上の水が存在している点に注目したい。この位置は「中心線」と命名された組織に重なる。光学顕微鏡で完熟米の横断面を見たとき、中央に中心点が認められるが、これが縦に連なったものが中心線である。この中心線上の水が胚まで連続していることから、中心線が胚と胚乳を結ぶ水の通路であると考えられ

る。中心線上の水の移動方向は今後の検討が必要であるが、背部維管束から背腹径線に沿って流れる水が、それと直行する中心線へと流入し、胚に移動することは容易に推察できる。この時期の中心線の役割を明らかにすることは、生理学上重要であろう。

5. 水と油脂、さらには空洞の検出

MRIでは、低水分・低脂肪の試料から画像を得るのは困難である。穎果は成長に伴い水分が減少する。図1の開花後45日の画像でも、胚乳の表層と胚の部分のみ白くなっているが、これは水ではなく、油脂を検出したと考えられる。

これに対し、炊飯米は初期重量の2.2倍に吸水・膨潤し、水分含量が60~70%となるため、画像化は容易である。図4に示すのは、炊きあがったコシヒカリ1粒の3次元MR画像である。上部の長軸方向の画像に黒い部分が2カ所ある。下部の短軸方向の画像8枚は、長軸方向の右側の黒い部分付近を順次、図示したものである。黒い部分の形状は、円盤型といえる。この部分には水がほとんど無いということになり、何の組織もない空洞か、水を吸わないデンプン組織のいずれかと解釈せざるを得ない。

そこで、炊飯米を中心に2分割し、その切断面を実体顕微鏡で観測した。結果を図5に示す。切断面にはデンプン組織が分断された中空の部位が認められる。しかし、表面には傷はない。この結果から炊飯米に空洞があることを確認できた。これまでに多数の炊飯米を計測したが、家庭用自動炊飯器で炊いた米粒でも、実験用の炊飯装置で炊いた米粒でも、同じように空洞が認められた。私達が日常食べるゴハン粒の中にも空洞は存在するのである。

6. 空洞の形成機構

それでは、空洞はどのようにできるのだろうか？ 炊飯の各段階のMR画像を図6に示す。25℃の段階で、すでに米粒のヒビ割れに水が入

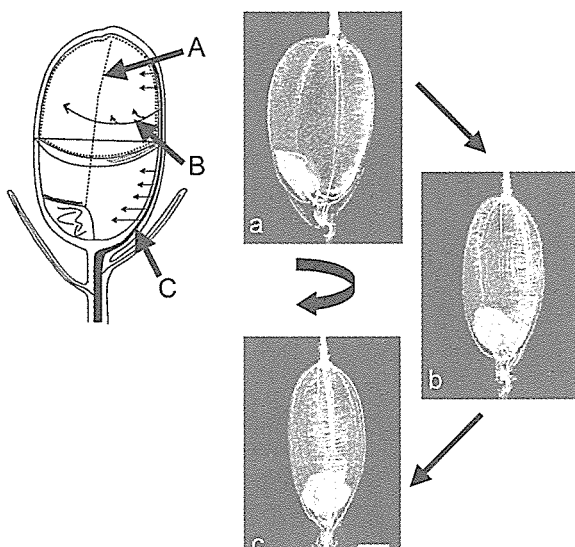


図3 開花後20日の背部維管束と胚乳表面の水の流れが見える3次元画像

a : 中心線 b : 水の流れ c : 背部維管束
a → b → c の順で回転 c のバーは 1 mm

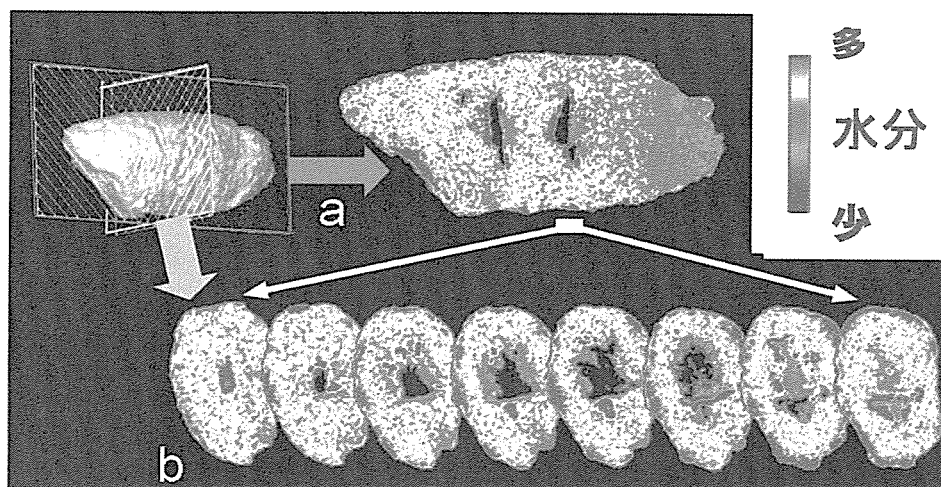


図4 炊飯米（コシヒカリ）の表面（a）と切断面（b）の実態顕微鏡像
 a：長軸方向のスライス画像 b：短軸方向のスライス画像

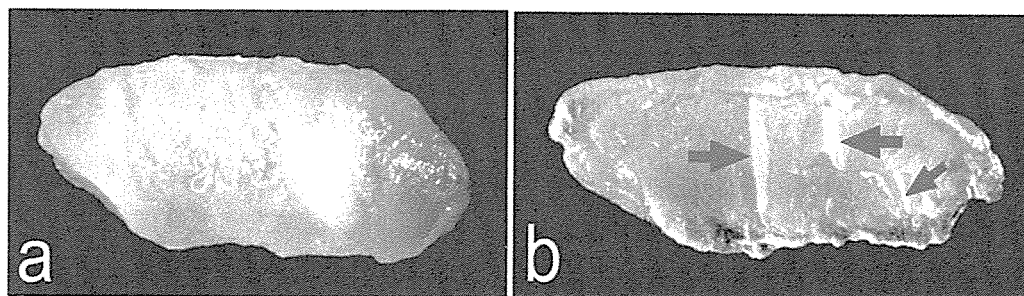


図5 炊飯米（コシヒカリ）の表面（a）と切断面（b）の実態顕微鏡像

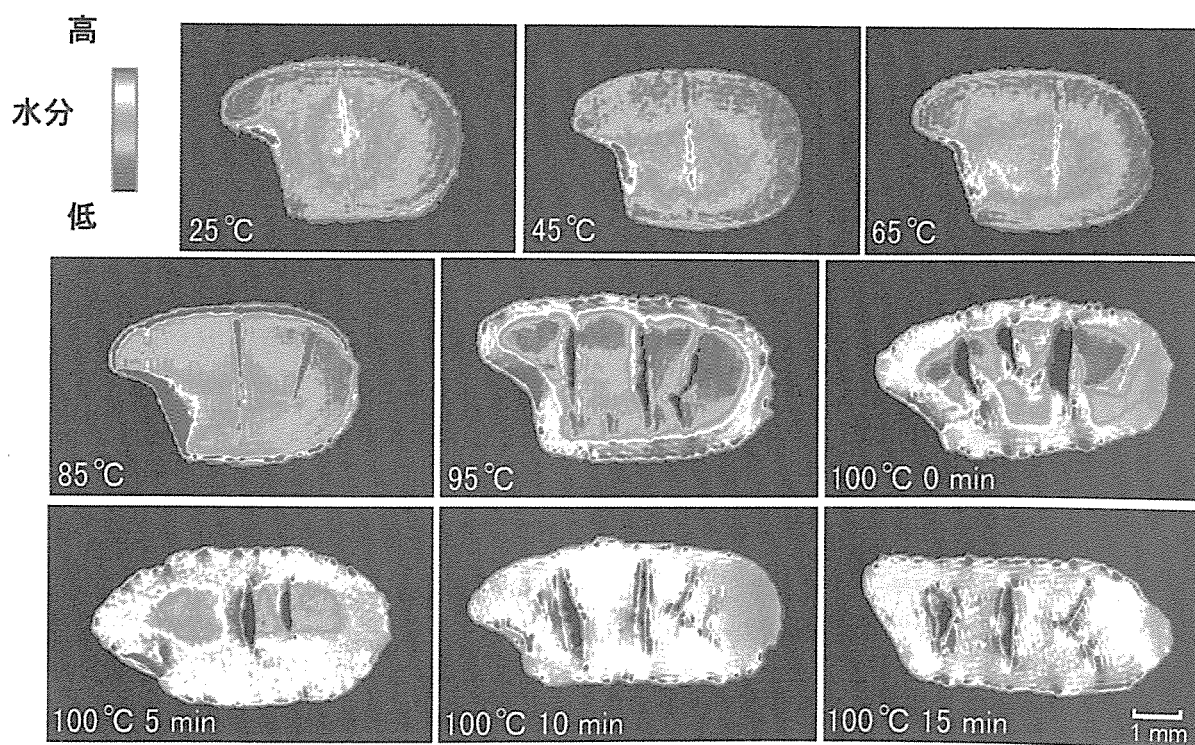


図6 炊飯過程におけるコシヒカリのMR画像

っている。このヒビ割れが空洞の起源となる。85℃で表面に高水分領域が出現し、表面のみデンプンが糊化したことがわかる。この糊化層は米粒をぐるりと囲んでいて傷口も塞いでいる。95℃では、糊化が進み外側の高水分領域の層は厚くなる。並行して、ヒビ割れ内部にあった水は周囲のデンプンに吸い取られる。表層が塞がれたことにより、外部の水も浸入できず、内部は空洞化する。

ヒビ割れの内部が癒着しないのは、なぜだろうか。各段階における米粒10粒の長径および短径の長さを図7に示す。長径は85℃より顕著な伸張が認められる。100℃5分では、85℃の1.3倍にまで伸びる。これに対して短径はほとんど伸張しない。もし長軸方向の伸張がなければ、ヒビ割れは癒着により消失するであろう。空洞は皿を2枚合わせたような円盤型のものが多いが、長軸方向への伸張が要因として考えられる。

7. 多粒の同時分析、そして空洞容積の計測

多数の米粒をまとめて観測したい場合もある。そのため、図8に示すような米粒8~10粒を同時分析できる器具を試作した。図7の長径・短径の長さは、この同時分析の画像から得た。

品種による差異を知るため、モチ米のコガネ

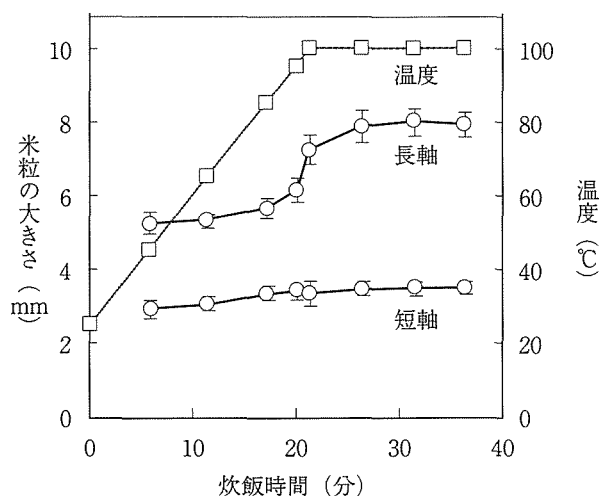


図7 炊飯過程におけるコシヒカリ10粒の大きさの変化

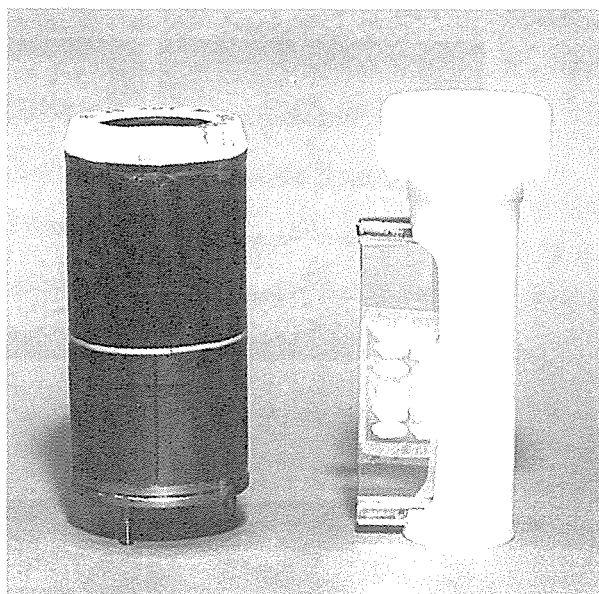


図8 多粒同時測定用のサンプルホルダー

モチとインディカ米のターハンを、コシヒカリと同じ条件で炊飯し、図8の器具を用いて同時分析した。そのMR画像を図9に示す。コガネモチには、コシヒカリのような大きさの空洞は認められない。しかし、小さな黒い部分は認められる。ターハンは空洞に加えて、表面がヒビ割れたままの亀裂というべき状態もあり、空洞の数もコシヒカリより多い。世界各地の炊飯となると、加水量、加熱方法は様々である。空洞(亀裂も含む)の数、形、大きさは、品種間差に加え、炊飯方法により各種各様となるであろう。

空洞の大きさが品種や炊飯過程で異なるので、多粒の同時分析法を応用して、空洞容積の定量を検討した。図10に示すように、8粒を同時に3次元測定し、1粒中の全ての空洞を抽出して行った。スライス画像と空洞の抽出画像を比較すると、全体として空洞はうまく抽出できている。

8. ジャポニカ米の空洞の品種間差

上記の空洞容積の定量法を用いて、炊飯過程におけるジャポニカ米の品種間差を検討した。空洞は糊化の進行に伴って形成されることから、分析材料は糊化特性に影響を与えるアミロ

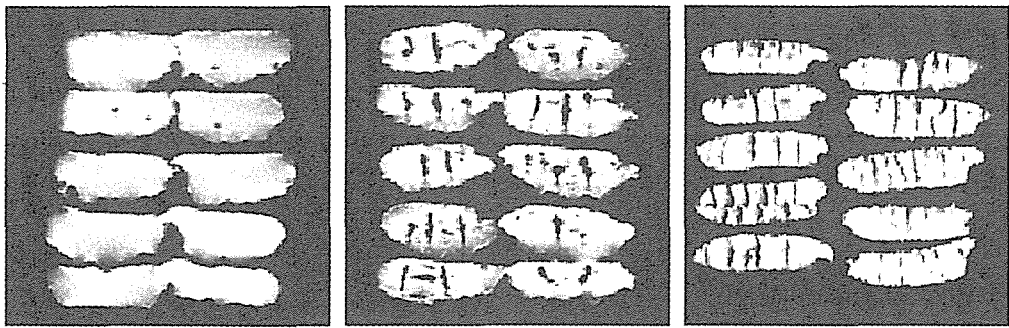


図9 コガネモチ (左:モチ米), コシヒカリ (中), ターハン (インディカ米:右) のMR画像

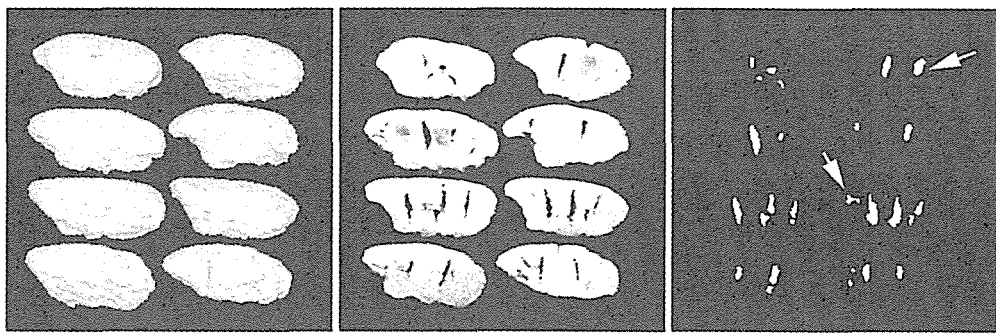


図10 炊飯米の空洞容積の測定
左から表面投影画像, スライス画像, 抽出した空洞

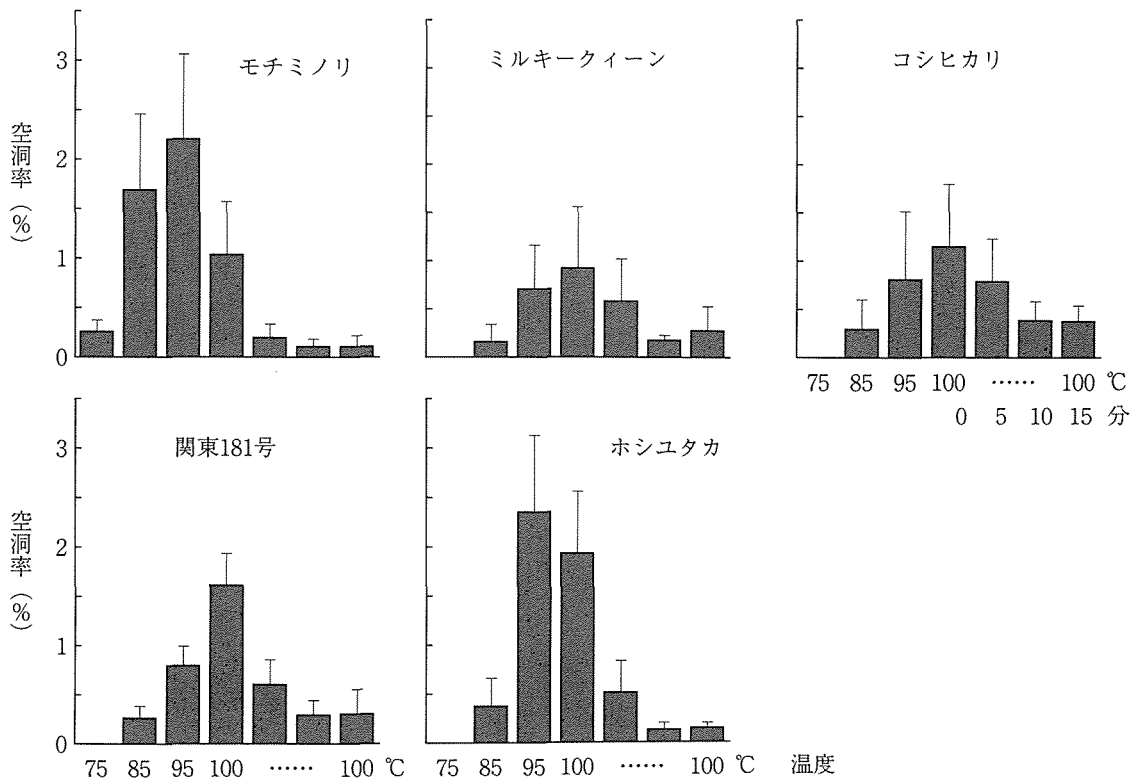


図11 空洞率 (空洞容積/米粒の全容積) の変化と品種間差異

ース含量の異なる5品種とした。すなわち、アミロースの無いモチミノリ、低アミロースのミルキークイーン、中アミロースのコシヒカリ、高アミロースの関東181号とホシユタカである。高アミロース米2品種には、インディカの血も入っている。

紙面の関係でMR画像を載せられないが、どの品種も、図6と同じような過程をたどって空洞が形成された。しかし、空洞の形成開始時期、消長、大きさなどは異なった。

5品種の空洞容積を算出し、炊飯米1粒中に含まれる空洞容積の合計が米粒に占める割合を空洞率として計算した結果を、図11に示す。どの品種でも空洞容積は95℃または100℃の沸騰開始時付近で最大となり、その後減少している。

空洞容積率の変動が特に大きいモチミノリとホシユタカについてみると、アミロース含量は全く異なるが、同じような変化を示している。モチミノリは表層部だけが糊化する初期段階で粒長が大きく伸張し、これに伴って空洞容積率も増大する。さらに加熱して糊化が中心部に至るころには、飯粒はそれ以上伸張しないため、デンプンの膨潤は飯粒内部に向かい、空洞は収縮する。飯粒の急激な伸張も、空洞の消失も、モチ米のデンプンがよく膨潤するという糊化特性によるものである。また、モチミノリが他の品種よりも早く空洞を形成しているのも、糊化開始温度が低いことによる。このように、モチミノリについては、デンプンの糊化特性が空洞形成に影響を及ぼすと考えられる。しかし、ホシユタカは、飯粒はあまり大きくならず、ヒビ割れの数が多いため、空洞容積率が大きくなる。そして、炊飯後期には粒長が伸びないため、モチミノリと同様、空洞総容積が小さくなる。

これに対して、コシヒカリは炊飯途中の空洞

総容積率が特に大きい訳ではないが、炊飯終了時には比較的大きな空洞容積を保持した。他の品種より、沸騰後の空洞の収縮が少ないとも言える。

以上のように、空洞容積とアミロース含量の相関は認められなかった。各品種の空洞の大小、数、形は、デンプンの糊化特性や米粒の形態変化が、複雑に重なった結果と考えられる。

9. おわりに

紹介してきたMR画像は水素原子核の密度画像であるが、水の運動性の違いを強調した画像も利用できる。使い分ければ、質の違う情報が得られる。筆者らはコメ以外にも、麺の製造工程や、ミニトマトの加熱処理でも、MRIの計測結果から興味ある知見を得ている。

麺の場合は、ゆで工程中の水の浸透や、良好な食感を持つゆでたての麺、ゆで上げ後のゆでのびの状態の水分分布も可視化できた。ゆでのびにくい麺の開発にも使えそうな結果である。

ミニトマトの場合は、1日だけ42℃の熱をかけると、赤くなるのが1週間ほど遅れる。トマト内部の水の運動性をMRIにより計測し、この成熟が遅れる現象に、水がどのように関わるかを明らかにした。

今後、様々な素材がMRIで分析され、新たな成果が得られることを期待している。

参考文献

- 石田信昭・他(2000)食工誌, 47: 407-423.
Horigane, A. K. et al. (1999) J. Food Sci., 64: 1-5.
Horigane, A. K. et al. (2000) J. Food Sci., 65: 408-412.
Horigane, A. K. et al. (2001) J. Cereal Sci., 33: 105-114.

〒305-8642 つくば市観音台2-1-12