

## 論文の内容の要旨

論文題目 MRI 法による炊飯および登熟過程の米粒内部構造に関する研究

氏名 堀金 明美

序論—米は、世界の人口の60 %の人々が、様々に調理して主食とする重要な食品である。その調理の基本は、精白米に適量の水を加えて加熱するという単純なものであるが、素材としての米の良否が食味に大きく影響を及ぼす。また近年我が国では、食生活の多様化や高級化にともなって多くの品種が作出され、米の品質や食味についての客観的かつ簡易迅速な評価法、米の品種特性を評価するための精度の高い分析法の開発が求められている。

炊飯米の食味には、米の主成分である澱粉の物理化学的な特性、品種、および調理条件が影響し、その評価は官能検査や様々な機器分析によって行われている。化学成分、澱粉の糊化特性あるいは物性などの試験は、官能検査との相関も高く、客観的な評価を与える方法として広く認められている。これらの試験は米粉あるいは炊飯米を用いて行われ、澱粉の糊化特性は、一般に米粉を用いて試験される。しかし、米は粒として食されること、そして澱粉貯蔵細胞が密に配列した組織構造を持つことから、糊化特性については粒としての評価、検討が不可欠である。

炊飯米内部の澱粉の糊化については、澱粉を対象とした組織学的研究が多数報告されているが、澱粉糊化反応に不可欠な水の吸収動態やその分布を明確にしたものはなかった。そこで、飯粒を無浸襲かつ非破壊で分析し、形態情報と

水の分布や運動性に関する情報が同時に得られる NMR マイクロイメージング法 (MRI 法) を用いて、炊飯過程における飯粒内部の水分分布と形態変化を調査した。これにより、炊飯米内部には空洞があることが初めて非破壊で明らかにされ、空洞の形成過程と品種間差異を検討した。炊飯過程における飯粒の解析は、低水分の穀粒に対する MRI 法の応用の可能性を示した。そこで、登熟過程における穎果 (Caryopsis) の形態形成と水分分布の変化を経時的に調査し、従来の形態学的な知見に水の分布に関する情報を加えるとともに、登熟過程における穎果と炊飯過程における飯粒の水分分布との関連について検討した。

実験材料—炊飯過程における飯粒内部の水分分布の調査には、ヒビ割れや心白、腹白のない透明度の均質な精白米に1.5倍重量の水を加え、洗米せずに室温で1時間浸漬し、昇温速度を正確に制御できる少量炊飯装置で調製した炊飯米を用いた。登熟過程における穎果内部の水分分布の調査には、コシヒカリのイネを屋外のポットで栽培し、開花日をマークした小穂を含む穂を刈り取り、その中から正常に発育した小穂を選び、直ちに測定に供した。

MRI 法—米粒の1粒分析または8~10粒の同時分析を、磁場強度7.1 Tesla、プロトン ( $^1\text{H}$ ) の共鳴周波数300 MHz の NMR スペクトロメータ (DRX300WB, Bruker) を用いて、Spin-echo 法により行った。複数粒の同時分析には、特製の多点同時分析用サンプルホルダーを用いた。2次元 (MSME 法) または3次元測定 (SE-3D 法) により得られたデータから画像処理により、2次元のスライス画像、3次元の表面投影 (Surface projection) 画像、あるいは MIP (Maximum intensity projection) 画像を再構成した。3次元画像は、炊飯米の内部構造、登熟過程の穎果の水分分布を理解する上で、極めて有効であった。2次元測定の MSME 法は、炊飯初期の低水分の飯粒は検出できないが、高水分となる炊飯後期の飯粒の迅速測定に適していた。3次元測定の SE-3D 法は、乾燥した精白米を除き、炊飯全過程の飯粒および登熟過程の穎果を調査するに十分な測定感度と空間分解能を示した。

炊飯米の空洞形成—コシヒカリの炊飯米内部の水分分布を調査したところ、炊飯米の内部には NMR のプロトン ( $^1\text{H}$ ) 信号が検出されない無信号領域が存在した。炊飯米の表面に亀裂などの異常はなく、外観から空洞の存在を予測することはできなかった。特製のナイフで炊飯米を切断し、その断面を実体顕微鏡により観察した結果、無信号領域は糊化した澱粉貯蔵組織に囲まれた開口部のない「空洞」であった。この空洞は、多点同時分析においても全てのコシヒカリの炊飯米に観察され、炊飯により生じる普遍的な現象と考えられた。

そこで、空洞がどのようにして形成されるかを明らかにするため、MRI 法により飯粒を経時的に調査した。試料となる飯粒は、炊飯過程を 9 段階に分け、設定温度または 100℃保持時間に到達した後、直ちに全量を炊飯装置から取り出し、必要があれば炊飯残余水を除去し、調製した。

MR 画像は、炊飯の進行による飯粒内の水分分布や飯粒形態の変化を明確に示した。これらの画像から、空洞は、浸漬時に存在するヒビ割れが原因で、表層の糊化によってヒビ割れの傷口が塞がれ、中の水がなくなると同時に、飯粒が長軸方向へ急激に伸び、ヒビ割れの隙間が拡大して形成されることが明らかとなった。また、糊化開始から沸騰までは、炊飯過程の中では短い時間であるが、飯粒内部の水分分布や飯粒の形態が急激に変化し、空洞が形成され、炊飯米の粒形や大きさが決定される重要な段階であることが示された。空洞の形状や大きさは、胚乳の組織構造や、飯粒の長軸方向への伸長が要因となって決定されると推測された。

空洞の品種間差異—コシヒカリ以外の品種でも空洞が存在するかどうかを、糯米（コガネモチとモチミノリ）とインディカ米（LPT123）により試験した。糯米では空洞が全くないか、あっても泡程度に小さく、インディカ米ではヒビ割れが多だけでなく、ヒビ割れの傷口が塞がらず、空洞とならない部分があった。このように、炊飯米内部は品種により異なることから、空洞容積を定量し、品種間差異を調査した。

澱粉の糊化特性はアミロース含量の違いにより影響を受けるといわれていることから、アミロース含量の異なるジャポニカ米の5品種—モチミノリ（アミロース含量、0%）、ミルキーQueen（10.0%）、コシヒカリ（16.1%）、関東181号（30.4%）、ホシユタカ（27.3%）—を用いた。炊飯米の空洞容積は、MRI 法による3次元測定データセットから Volume rendering 法により算出した。空洞の抽出方法と空洞容積の測定精度は、ジルコニウムビーズと寒天ゲルにより作製した空洞模擬ファントムにより検証した。炊飯米の空洞は、糊化澱粉により完全に囲まれたもののみが的確に抽出され、その容積が定量された。空洞容積の品種間差異は、分散分析および比較検定により解析した。

空洞はいずれの品種でも前述したコシヒカリと同様の経過をたどって形成された。また、空洞容積率（飯粒内総空洞容積／飯粒の体積）も5品種全てにおいて、沸騰開始前後で最大となり、沸騰の継続により次第に小さくなった。しかし、空洞形成の開始時期や形成される空洞の大きさは品種によって異なった。すなわち、糯米のモチミノリは粳米よりも早く空洞が形成され、沸騰時の空洞容積は5品種の中で最も大きかったが、炊飯終了時には最小となった。コ

シヒカリは、炊飯終了時には最も大きな空洞容積率を保持した。モチミノリ（糯米）とホシユタカ（高アミロース米）の炊飯過程における空洞容積率の変動パターンが酷似しており、アミロース含量との明瞭な関係は得られなかった。

空洞形成は糊化開始温度の低い品種で早く、沸騰時の空洞容積率はヒビ割れの多い品種で大きくなった。空洞容積率の品種間差異には、空洞の数、飯粒の膨張率や伸長率、糊化特性が関与し、炊飯終了時の空洞の大きさは、飯粒中心部の澱粉の膨潤と飯粒の体積膨張や伸長によって決定されると推測した。

登熟過程の穎果—コシヒカリのイネをポットで栽培し、登熟過程における小穂（spikelet）を MRI 法により調査した。小穂の MIP 画像は、穎果の発達と小穂内での穎果の空間配置を明確に示し、2次元 MR 画像は穎果の形態形成のみならず、胚乳の登熟に伴う貯蔵澱粉の液相から固相への質的変化をも示した。

また、登熟過程における穎果の MR 画像は、開花後20～25日において、胚乳の中心線に水が存在し、それが胚に達していることを初めて明らかにした。中心線はこれまで注目される組織構造ではなかったが、胚への水の移動経路としての重要な生理的機能を持つ可能性を示唆した。また、開花後15～20日の MIP 画像は背部維管束から胚乳表面に沿って流れるスジ状の水の分布を明示していた。このスジ状の水の分布は、組織学において推測されていた水の移動経路を、3次元画像で初めて実証した。

登熟後期に水は、穎果の背部維管束から背腹経線を通り、中心線を経て胚に達することを示したが、炊飯時には、この経路を逆にたどって水が浸透した。これらの成果は、低水分の穀粒にも MRI 法の応用が可能であることを示した。

総括—本研究から炊飯米内部には空洞が存在すること、空洞は浸漬時に存在するヒビ割れが原因となって、加熱中の糊化の進行と形態の変化によって形成されること、空洞はいずれの品種においても同じ経過をたどって形成されるが、その大きさは品種によって異なることが明かとなった。また、登熟過程における穎果内部の水分分布から、水の浸透しやすい部位や水の移動経路が示唆された。これらの成果は、炊飯米のテクスチャーなど食味の研究にとって重要な情報となり、米の品種特性あるいは加工適性の評価における応用が期待される。また、登熟過程における穎果の3次元画像などは、形態学、生理学への応用によるMRI法の新たな展開の可能性を示している。

以上のように本研究は、米粒の形態や水の状態を MRI 法によりに解析した基礎研究であり、食品加工学や調理学、作物生理学の分野への応用が期待される。