食品研究用小型 MRI によるキュウリの緩和時間強調イメージ

小泉美香[§], 内藤成弘, 狩野広美*, 拝師智之**

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

* くぬぎ山蛭雪研究所

** (株)エム・アール・テクノロジー

Examination of the Tissue Water in Cucumber Fruit by Small Dedicated Magnetic Resonance Imaging with a 1-T Permanent Magnet

Mika Koizumi[§], Shigehiro Naito, Hiromi Kano* and Tomoyuki Haishi**

National Food Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

* Oak-Hill Georgic Patch-Work Laboratory, 4-13-10 Miyamoto, Funabashi, Chiba 273-0003

** MRTechnology, Inc., Tsukuba, Ibaraki 305-8573

The morphology and physical state of tissue water of cucumber fruit were examined by magnetic resonance imaging (MRI) and compared using a 1-Tesla (T) permanent magnet that was devised for food research and a 7-T high-resolution magnet. Then, the distribution and mobility of water were analyzed between tissues by the relaxation time-weighted imaging methods. Sarcocarp, placentas, seeds and vascular bundles of the fruits in different physiological conditions were distinguishable by 1-T small MRI, while clear morphology was observed by 7-T high-resolution MRI. However, while low mobility of water in the tissues of low water content, such as the placentas, was not detected due to the fast T_2 decay of the signals in the high magnetic field of 7-T MRI, it was detected by 1-T MRI, which had slower T_2 decay of the signals. Moreover, the T_1 signal recovery was faster in the 1-T MRI than in the 7-T MRI. These results indicate that the small 1-T MRI is suitable for analyzing the physical conditions of water in respect to the detection of the low mobility of water and also for obtaining a strong T_1 contrast of morphology despite the lower quality of the images compared to the high-resolution images. The 1-T small MRI is therefore an effective method for studying the properties of food materials with a wide range in the amount and mobility of water.

(Received Aug. 12, 2008 ; Accepted Dec. 16, 2008)

Keywords : 1-T small magnetic resonance imaging, T_1 -weighted images, T_2 -weighted images, cucumber fruit, 7-T high-resolution magnetic resonance imaging

キーワード : 1T 小型磁気共鳴画像化装置, T_1 強調イメージ, T_2 強調イメージ, キュウリ, 7T 高分解能磁気共鳴画像化装置

Magnetic resonance imaging (MRI: 磁気共鳴画像法または磁気共鳴画像化装置) によれば非破壊的生体観測が可能である。MRI においては、観測対象中の水などプロトン(水素原子核)を含み運動性を有する化合物の分布(量)と動き易さ(運動性), または、組織構造の複雑さに基づく磁化率の乱れによってイメージコントラストが生じる。動物では、筋肉、骨など組織や臓器の違いで水の含量が広い幅で変化していることに加えて、組織ごとに構成物質や構造が顕著に異なるために、解剖学的な形態のイメージを得ることができる。さらに、生物にとって水は細胞における

代謝の場であるから、水の量と運動性を通して組織の代謝変動あるいは細胞の異常を検出することができる。この特徴により、医療の病態観察に広く MRI が使用されている¹⁾。また、MRI のこのような性質は、食品の内部構造を観察するためにも有用であり、青果物の罹病、損傷および劣化の観察に応用されてきた^{2)~5)}。しかし、青果物や食品に対する MRI の適用例は、装置が高価で設備、保守、操作が煩雑であり、使用時間の自由度が低いことなどのためにそれ程の拡がりを見せていない。

最近、食品研究に広く活用することを目的として磁場強度 1 Tesla (T) の永久磁石を用い、高い汎用性を有する小型マイクロ MRI が開発された。装置は非常に小型(設置面積 3 m² 以下)であるが、試料中のプロトンを含む液状化合物の量と運動性を非破壊的に検出し、その分布を画像にす

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

* 〒273-0003 千葉県船橋市宮本 4-13-10

** 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

[§] 連絡先 (Corresponding author), mkoizumi@affrc.go.jp

るという MRI の本質的性質は堅持している。その上、製作費は従来の MRI の 1/5 程度に抑えられ、軽い空調以外は付帯設備を必要とせず、装置は軽量（対床荷重 400 kg/m² 以下）、メンテナンスフリー（冷媒および冷却水不要）、卓上電源（100 V 15 A）使用であるから既存の研究室のどこにでも置き、安定性が高く、測定操作が容易⁶⁾⁷⁾で随時停止できる。よって、従来の共通機器の NMR 顕微鏡あるいはマイクロ MRI とは異なり特定の課題や少人数の研究グループによる専用使用に供することができる。しかし、磁場の強度は MRI のイメージの性質に影響を及ぼす。一般にはマイクロ MRI には高い感度と分解能を得るために 4.7 T 以上の超伝導磁石が使用されている中で、1 T の永久磁石を採用したことは例外的であり、静磁場強度を下げたことがイメージに及ぼす影響については明らかでない。

本報告では、水の状態が明確に異なる組織を持つキュウリ果実を用い、内部形態観察と水の量と運動性測定という側面について、高い分解能で鮮明な画像を測定できる高磁場型の 7 T 高分解能 MRI⁸⁾と 1 T 小型 MRI のイメージを比較し、低磁場型装置である食品研究用 1 T 小型 MRI が持つ性質を明らかにし、適切な応用について考察した。

実 験 方 法

1. 試 料

「もろきゅうり」として市販されている若取りしたキュウリ (*Cucumis sativus*) を購入し、新鮮なものを選択して試料とした。試料のサイズは太さ 20 mm 以下、長さ約 13 cm であった。各々の測定に供した試料は別の個体である。

2. 維管束の顕微鏡観察

両刃カミソリによりキュウリの果肉横断面の徒手切片を作成し、トルイジンブルーで染色した後、表皮下の維管束の形態を光学顕微鏡で観察、写真撮影を行った。

3. MRI 装置

1 T 小型 MRI ((株)エム・アール・テクノロジー)と、7 T 高分解能 MRI (Bruker DRX300 スペクトロメーター附属 MRI 装置)を使用した。¹H の共鳴周波数は、磁場強度 1 T では約 42.6 MHz、7 T は 300 MHz である。1 T 小型 MRI では、試料をそのままプラスチックの試験管 (内径 28 mm) に入れ、直径 30 mm の radio frequency (RF) 検出器に挿入した。7 T 高分解能 MRI では、試料をそのまま内径 22 mm のガラス試験管に入れて直径 25 mm の RF 検出器に挿入した。

4. MRI 測定

(1) 緩和時間強調イメージ

緩和時間 (T_1 および T_2) 強調イメージは、二次元 (two-dimensional : 2D) スピンエコー (spin echo : SE) 法により測定した。生体試料においては内部組織の不均質性により磁化率の乱れが生じるので、その影響を打ち消すために SE 法が用いられる。イメージは 128×128 マトリックスで測定した。撮像視野 (field of view : FOV) は 1 T 小型 MRI

では 30 mm、7 T 高分解能 MRI では 20 mm である。平面画素サイズは、1 T 小型 MRI では (234 μm)²、7 T 高分解能 MRI では (156 μm)² であった。スライス厚は 1 T 小型 MRI では 3.6 mm、7 T 高分解能 MRI では 1.0 mm とした。シグナル積算は、1 T 小型 MRI によるキュウリの組織形態を示した Fig. 1 は 2 回、その他は 4 回、7 T 高分解能 MRI では 2 回である。

SE 法の測定変数である繰り返し時間 (repetition time : TR) とエコー時間 (echo time : TE) を変えてイメージコントラストを変化させた。TR を短くすると長い T_1 を時定数として磁化が回復する運動性が高い水のシグナルが抑制されるので、運動性が低い水分子のシグナルが強調された T_1 強調イメージが得られる。一方、TE を長くすると、短い T_2 を時定数として減衰 (T_2 減衰) する運動性が低い水のシグナルが排除されるので、運動性の高い水分子のシグナルが強調された T_2 強調イメージが得られる⁹⁾。

1 T 小型 MRI では、TR を 5 s, 3 s, 2 s, 1 s, 0.8 s, 0.5 s, 0.3 s, 0.2 s の系列で短縮し、TE を 7 ms, 40 ms, 80 ms, 120 ms, 160 ms の系列で延長して T_1 強調および T_2 強調を組み合わせて測定した。TE 7 ms は SE 法において装置が設定し得る最短エコー時間である。

7 T 高分解能 MRI では、TE を 6 ms とし TR を 5 s, 2 s, 1.5 s, 1 s, 0.5 s, 0.3 s, 0.2 s, 0.1 s の系列で短縮して T_1 強調イメージ測定した。 T_2 強調イメージは、TR を 5 s とし TE を 10 ms 間隔で 10 ms から 100 ms まで延長して測定した。

(2) グラディエントエコー (gradient echo : GE) 法による三次元 (three-dimensional : 3D) 測定

GE 法では、SE 法とは異なり生体組織の不均質性による磁化率の乱れに基づく T_2^* を時定数とするシグナル減衰 (T_2^* 減衰) の影響を受け、組織間における微細構造の粗密を反映したコントラストがつく。1 T 小型 MRI では、TR 0.5 s, TE 2.18 ms, 128×128×128 マトリックス、シグナル積算 4 回の条件で測定した。FOV は 30 mm、イメージの立体画素サイズは (234 μm)³ である。7 T 高分解能 MRI では、TR 0.1 s, TE 5 ms, 256×128×128 マトリックス、シグナル積算 2 回の条件で測定し、256×256×256 マトリックスのイメージを構築した。FOV は 30 mm、イメージの立体分解能は (117 μm)³ である。

(3) MRI イメージ構築と処理

測定データは解析用コンピュータに転送されフーリエ変換された後、ImageJ (JAVA 言語で作成され公開された画像処理プログラム ver 1.33 ; <http://rsb.info.nih.gov/ij/>)、Scion Image (NIH Image を Windows に移植し公開された画像処理プログラム ; <http://www.scioncorp.com>)、NMRv2b ((株)エム・アール・テクノロジー) によって適宜イメージ化された。

各画素における T_1 値をそれぞれ算出して、分布イメージとした T_1 値のイメージ (パラメーターイメージ) は、TR

を系統的に短縮して測定した一連の T_1 強調イメージを基に, T_2 値のイメージは TE を系統的に延長して測定した一

連の T_2 強調イメージを基に, ImageJ によって計算し再構築した. MIP (maximum intensity projection : 最大シグナル強度投影法) イメージは ImageJ の機能によって構築した.

実験結果

1. 1T 小型 MRI によるイメージ

Fig. 1 にキュウリ果実横断面の組織を示す模式図とそれに対応するイメージを示した. イメージの輝度はシグナル強度に相当する. 測定条件は TR 2s, TE 40 ms, 積算は 2 回, スライス厚は 3.6 mm とした. イメージの解像度を高めるためにスライス厚を 1.8 mm にして測定したが, 形態の鮮明化よりシグナル強度の低下の影響の方が大きく画質向上の効果は小さかった. TR 2s, TE 40 ms あるいは 80 ms の条件では 1 回のシグナル取得でかなり強いシグナルが得られ, シグナル積算による画質の改善は 2 回積算で高い効果が認められた. 以下の測定においては, シグナル積算を 4 回とした.

Fig. 2 は TR (5s~0.3s) と TE (7ms~120 ms) を組み合わせて測定したイメージである. 1T 小型 MRI では,

Fig. 1 The diagram (A) and the 2D image (B) showing the tissues of a cucumber fruit

A 2D image (B) was measured by the spin-echo method with TR of 2s, TE of 40 ms and 2 accumulated transient acquisitions by a 1-T small MRI. Scale bar is 5 mm. Symbol *E* indicates epidermis; *P*, placenta; *S*, seed; and *SC*, sarcocarp. Symbols *VR*, *VEX*, *VEN* and *VFA* indicate vascular bundles of receptacle, exocarp, endocarp and fruit axis, respectively.

Fig. 2 The effects of TR and TE on the image contrast measured by the 1-T small MRI

The column indicates the change in image contrast by changing of TR and the row that by changing of TE. The measurements were carried out by the 2D spin-echo method with 3.6 mm slice thickness and 4 accumulated transient acquisitions. *P*, *VR*, *VEX*, *VEN* and *VFA* are the same as Fig. 1. Scale bar is 10 mm.

Fig. 3 The effects of TR and TE on the image contrast measured by a 7-T high-resolution MRI

A and B indicate T_1 -weighted images with TE of 6 ms, and C and D T_2 -weighted images with TR of 5 s. A and C are the images indicating the signal decrease by shortening TR or by elongating TE. B and D are the images adjusted brightness and contrast suitable for the individual images. Scale bar is 5 mm.

TR 5 s, TE 7 ms が、運動性が低い水から運動性が高い水まで最も広い範囲の水を検出できる測定条件で、基準のイメージである。このイメージは自由水（緩い束縛水と空間的に移動性が高い水）の分布を示す。基準イメージでは、胎座（*P*）のシグナルだけが弱く内部組織の形態は不明瞭であった。TR の短縮（ T_1 強調）により果肉（*SC*）のシグナル強度が低下して果実の表皮（*E*），外果皮維管束（*VEX*）および果実中心からのびた胎座の維管束が相対的に強調されたが、種子（*S*）のシグナルは弱くなり、胎座との区別が不明瞭になった（TE 7 ms, TR 1 s, 0.5 s および 0.3 s）。TR の短縮で強調された部位には運動性が低い水が分布している。一方、TE を延長（ T_2 強調）するに従って胎座と果肉のシグナルが弱くなり、80 ms および 120 ms（TR 5 s および 2 s）において種子と維管束が相対的に強調され、果肉の太い外果皮維管束以外に表皮直下の果托維管束（*VR*）の一部および果肉の内側の細い内果皮維管束（*VEN*）が認められた。また、果実の中心にある果心維管束（*VFA*）も認められた。これらの組織には運動性が高い水が存在している。果肉は T_1 強調イメージおよび T_2 強調イメージの双方でシグナルが弱くなったので、果肉の水は組織として中間の運動性を持つ。これに対して、維管束は、 T_1 強調イメージおよび T_2 強調イメージともに強調されるという、一見、矛盾する結果が示された。それぞれの緩和時間強調イメージでシグナル強度が高くなったのは維管束組織中の異なる部位であるが、この点については水の運動性と形態とを関

連させて Fig. 5 で検討する。

Fig. 2 は、TE を 80 ms または 120 ms に設定し、TR を 2 s 程度に短くすることにより、異なる組織間で明瞭なコントラストが得られることを示している。組織観察を目的とする時は、水の運動性を解析する場合とは異なり、観察対象である組織が他の組織と明確に区別され、画質が良く、なおかつ、最短の測定時間になるように TR と TE の組み合わせを最適化する必要がある。

2. 7T 高分解能 MRI によるイメージ

Fig. 3A および B に T_1 強調イメージ、Fig. 3C および D に T_2 強調イメージを示す。A と B および C と D は、それぞれ同じイメージであるが、表示スケールが異なる。一連のイメージを同じ表示スケールで示したのが A と C であり、TR の短縮および TE の延長にともないシグナル強度が減衰する。このように元のイメージのシグナル強度は減衰しているが、各々のイメージごとに最適な表示スケールを選択（明るさとコントラストを調整）すると、TR の短縮および TE の延長により強調された部位を明瞭にすることができる（Fig. 3B および D）。Fig. 2 は、明るさとコントラストをイメージごとに調整する表示法を採用していることで、TR の短縮によって運動性の低い水のシグナル、TE の延長によって運動性の高い水のシグナルが相対的に強調できているが、各々のイメージの間でシグナル強度を比較することはできない。高分解能 MRI のイメージは鮮明である。感度が高く、また、高い分解能を得られると同時に、

Fig. 4 Comparison of the images measured by the 3D gradient-echo method using the 1-T small MRI (A-C) with those using the 7-T high-resolution MRI (D-F)

A and D are slice images selected from the 3D image data. Maximum intensity projection (MIP) images using 4 slices (B) and 8 slices (E) are presented. C and F show the MIP images using whole slices of 3D image data. Measurements were carried out with TR of 0.5 s and TE of 2.18 ms for the 1-T small MRI (A-C), and with TR of 0.1 s and TE of 5 ms for the 7-T high-resolution MRI (D-F). E, P, VR, VEX and VFA are the same as Fig. 1. Scale bar is 5 mm.

スライス厚を 1.0 mm と小型 MRI の 1/3.6 にできることがその要因である。

Fig. 3B および D を Fig. 2 と比較すると、イメージ変化の本質は同じであるが、磁場強度の差異に基づく違いが認められる。運動性が低い水の存在する部位を強調する T_1 強調イメージに関して、1T 小型 MRI では、TE 7 ms として TR を短くするにしたがって維管束が明瞭に強調された (Fig. 2, TE 7 ms の列)。一方、7T 高分解能 MRI (Fig. 3B) では、TR を短縮した時に維管束が強調される度合いが 1T 小型 MRI のイメージに比べて弱かった。また、胎座のシグナルが最初から弱く、種子も維管束も TR の短縮によって顕著な強調は認められなかった。胎座、果肉、維管束および種子の間のコントラストを比較すると、高分解能 MRI では TE 6 ms で測定した T_1 強調イメージの変化 (Fig. 3B) は、小型 MRI における TE 40 ms の変化 (Fig. 2, TE 40 ms の列) に類似していた。すなわち、高分解能 MRI では短い TE (6 ms) において、小型 MRI における比較的長い TE (40 ms) に匹敵する T_2 強調を受けた。

運動性が高い水を強調する測定である T_2 強調イメージ (Fig. 3D) に関して、高分解能 MRI では、TE 10 ms の最初のイメージにおいてかなり強い T_2 強調を受けており、胎座のシグナルが著しく弱く、反対に、種子や維管束は明瞭であった。TE 延長の効果は顕著で、表皮外側の突起、種子、維管束などがさらに強調され、TE 50 ms では、果肉の内側の細い内果皮維管束が鮮明になった。磁場の高い装置では T_2 強調による変化が激しい。本測定では、装置に附属したマルチスピンエコー法のプログラムに従って最短の

TE を 10 ms としたが、 T_2 強調の初期の変化 (運動性の低い成分の変化) を観察するためには TE をさらに短くする必要がある。

Fig. 2 および Fig. 3 の結果から、1T 小型 MRI では TR 短縮による T_1 強調の効果が強く、7T 高分解能 MRI では TE 延長による T_2 強調の効果が強いと推定される。

3. 3D 測定による縦断面のイメージと MIP による維管束の描写

Fig. 4A-C は 1T 小型 MRI により TR 0.5 s, TE 2.18 ms の条件で、Fig. 4D-F は、7T 高分解能 MRI により TR 0.1 s, TE 5 ms の条件で GE 法により 3D 測定したイメージである。上記の測定条件は、 90° パルスラジオ波に対するそれぞれの装置の最適化条件である。

Fig. 4A および D は、3D イメージのデータセットから切り出した 2D スライスイメージである。1T 小型 MRI (Fig. 4A) では、表皮 (E)、果肉の太い外果皮維管束 (VEX)、および、果実中央の果心維管束 (VFA) が強調された。種子の外縁は暗く、種子の中心にシグナルの強い部位が存在し、それは内腔内の胎座 (P) へとつながっていた。7T 高分解能 MRI では種子のコントラストは逆になり、種子全体のシグナルが強調された (Fig. 4D)。また、内腔内の胎座にある細い維管束が強調された。Fig. 4B および E は表皮から果肉の厚みに当たる 4 スライス (Fig. 4B) あるいは 8 スライス (Fig. 4E) のデータを MIP で表現したイメージである。果肉の太い外果皮維管束 (VEX) が上下に通っており、表皮下の細い果托維管束 (VR) が認められた。Fig. 4C および F は 3D データ全体を MIP で表現したイメージ

Fig. 5 Vasculature in a cucumber fruit observed by an optical microscope (A and B) and measured by the relaxation time-weighted images (C and D)

Transverse sections of sarcocarp at vascular bundles of exocarp (A) and receptacle (B). The upper sides face to epidermis. The symbol v indicates phloem and x, xylem. Scale bars are 0.5 mm. A T_1 -weighted image (C) was measured with TR of 0.5 s and TE of 7 ms, and a T_2 -weighted image (D) with TR of 5 s and TE of 120 ms by the 1-T small MRI. VEX indicates a vascular bundle of exocarp and VR that of receptacle. Scale bar is 5 mm.

である。1T 小型 MRI の MIP (Fig. 4C) では左右の表皮下の維管束と種子の中央部分が強調された。一方、7T 高分解能 MRI (Fig. 4F) では、果肉の太い外果皮維管束が縦方向に明瞭に浮かび上がり、太い維管束同士は斜めに走る細い維管束で繋がれており、種子は全体がシグナルを与えた。

グラディエントエコー法においても 1T 小型 MRI は T_1 強調の効果が強く、7T 高分解能 MRI では T_2^* 減衰による磁化率の乱れの効果が強いと考えられる。

4. 維管束の構造と緩和時間イメージ

1T 小型 MRI の緩和時間強調イメージでは、維管束に TE 延長によって強調される運動性が高い水が存在する組織 (Fig. 2; TR 5 s, TE 120 ms) と、TR 短縮によって強調される運動性が低い水が存在する組織 (Fig. 2; TR 0.5 s, TE 7 ms) があることが示された。

Fig. 5A は外果皮維管束 (VEX), Fig. 5B は果托維管束 (VR) 周辺の横断面の光学顕微鏡写真で、写真上側が表皮である。キュウリは、中央に大きな導管 (x) の列が存在し、その外側と内側に篩部 (v) が存在している複並立維管束を有する。表皮側 (Fig. 5 の上側) には小さな篩部の細胞が整然と配列されているが、導管より内側のものは変形し、飛び離れた導管や不透明な細胞が篩部に不規則に混在して認められた (Fig. 5B)。Fig. 5C は、1T 小型 MRI を用い、TR 0.5 s, TE 7 ms の条件で測定した T_1 強調イメージ、Fig.

5D は、TR 5 s, TE 120 ms の条件で測定した T_2 強調イメージである。 T_1 強調イメージでは、外果皮維管束 (VEX) は単独の点となり、 T_2 強調イメージでは内外に別れた二枚の板様構造となった。前者は運動性が低い水の存在する部位、後者は運動性が高い水が存在する部位である。イメージの形態的な特徴を光学顕微鏡による観察と比較すると、運動性が高い水が存在するのは外果皮維管束の外側と内側に分離した篩部であり、運動性が低い水が存在するのは維管束の中心から内側の篩管に混じって存在する導管を含む組織である。

Fig. 2 および Fig. 3 の一連の T_1 強調および T_2 強調イメージデータを使用して、 T_1 および T_2 の値を計算してパラメータイメージを再構築すると、維管束には T_1 が長く運動性が低い水の成分 (Fig. 6A および B) と、 T_2 が長く運動性の高い水の成分 (Fig. 6C および D) とが同時に存在した。それぞれの装置で測定した T_1 および T_2 値のヒストグラムを比較すると、 T_1 値は、1T 小型 MRI では 7T 高分解能 MRI に比べて短い値が得られた (Fig. 6A および B)。 T_2 値は、7T 高分解能 MRI が 30~40 ms を中心に長い方に少し裾を引いた分布を示したのに対して、1T 小型 MRI は約 2 倍長い 70~80 ms をピークとして 200 ms を超える範囲で裾を引いた分布となった (Fig. 6C および D)。高磁場型装置は低磁場型装置より T_1 値は長く、 T_2 値

Fig. 6 Comparison of the T_1 and T_2 value images and their histograms measured by the 1-T small MRI and the 7-T high-resolution MRI

A and B are T_1 value images and their histograms, and C and D, T_2 value images and their histograms. The values were calculated using the relaxation time-weighted images measured by the 1-T small MRI in Fig. 2 (A and C), and by the 7-T high-resolution MRI in Fig. 3 (B and D). Scale bars are 5 mm.

が短くなることを示した。

考 察

作物の生理に深く関係する組織構造の非破壊的な観察、および、組織の水の状態計測という視点で、維持、操作の容易さと少人数による占有使用を目的に開発された低磁場型 1T 小型 MRI で測定したイメージの性質を、従来の高磁場型 7T 高分解能マイクロ MRI のイメージと比較して考察する。

1T 小型 MRI によって、キュウリ果実の果肉、胎座、種子および維管束など生理状態の異なる組織が明瞭に識別された (Fig. 2)。しかし、1T 小型 MRI は感度が低く、7T 高分解能 MRI に比べてイメージの鮮明度は劣った (Fig. 2 および Fig. 3)。7T 高分解能 MRI は、感度が高いのでスライスを薄く、分解能を高くできることに加えて、シグナル

の T_2 減衰が強いことがコントラストを生み、イメージを鮮明にした原因と考えられる (Fig. 3C および D)。詳細な解剖学的形態観察という点では、磁場強度が低く、それ故に感度が低い 1T 小型 MRI は不利である。

一方において、水の状態解析⁹⁾の基になる緩和時間強調イメージにおけるコントラストの変化 (Fig. 2, Fig. 3B および D) は、装置の磁場強度によって著しく異なり、二つの装置によるイメージはかなり異なる印象を示した。 T_1 値は、1T 小型 MRI (Fig. 6A) の方が 7T 高分解能 MRI (Fig. 6B) より短くなった。子牛の血液について磁場強度と T_1 値が正の相関を示すという報告¹⁰⁾と一致する結果である。それにともなう、1T 小型 MRI (Fig. 2) の方が 7T 高分解能 MRI (Fig. 3B) より T_1 強調の効果が強い。

7T 高分解能 MRI では、TE の延長に対してシグナルは急激に減衰する (Fig. 3C) ので、短い TE (6 ms) においても T_2 強調は強い (Fig. 3A)。1T 小型 MRI ではシグナル減衰は穏やかで、 T_2 強調は緩やかである (Fig. 2)。1T 小型 MRI (Fig. 6C) による測定の方が 7T 高分解能 MRI (Fig. 6D) の場合より T_2 値が長くなることは、 T_2 値のイメージより明らかである。これらの結果から、高磁場型 MRI はシグナル減衰が強いので、TE を著しく短くしなければ運動性が低い水を検出できない (Fig. 3C) ことが分かる。実際、高磁場型 MRI で低水分含量の試料のイメージを測定する場合には、非常に短い TE (1 ms) が使える検出器¹¹⁾、小さいフリップ角を使う FLASH (fast low angle shot) 法¹²⁾¹³⁾、および、極端に短い位相展開を使う SPI (single point mapping imaging) 法¹⁴⁾¹⁵⁾ など装置や測定法の工夫が行われている。それに対して、マッシュルーム¹⁶⁾、チェリートマトの果実および *Heracleum mantegazzianum* (ハナウドの仲間) の茎¹⁷⁾ で報告されたように、低磁場型 MRI の T_2 減衰は緩やかである。よって、1T 小型 MRI では、7T 高分解能 MRI では測定し難い低水分含量 (30 数%) のパンなどのイメージ測定が容易にできる¹⁸⁾。

緩和時間強調イメージ (Fig. 2 および Fig. 3) は、運動性が低い水 (T_1 強調)、あるいは、運動性が高い水 (T_2 強調) が存在する部位を強調することによって特定の組織を浮き上がらせて形態的特徴と同時に生理的特徴を捉えるために用いられる³⁾⁹⁾。Fig. 5 に示したように、1T 小型 MRI は、キュウリ果実において篩管の水の運動性が高く、導管の水の運動性が低いという生理的役割が分化した維管束組織間における水の状態の違いを形態とともに検出する能力を有する。

T_1 値および T_2 値のイメージ (Fig. 6) は、一般には、水の運動性の分布を表すと考えられる。 T_1 は、励起核スピンスが分子衝突により周囲あるいは環境との熱平衡状態に達する時間の指標であり、長いほど水分子の運動性は高い。生体では、細胞は活発なほど水の運動性が高くなるから、組織の代謝活性が T_1 値によって表されると考えられる。

これに対して T_2 は、均一な磁場において励起核スピン同士が熱平衡に達する（回転位相が分散する）時間の指標である。励起核スピンの回転位相の分散速度は熱運動による分子衝突に加えて、静磁場の変動と試料の磁化率の不均質性に基づく磁場強度の凹凸（不均一性あるいは乱れ）の影響を受け、シグナルは T_2^* を指標として減衰する。SE 法では、不均一な静磁場の影響はエコー形成によって除去されるので、 T_2 値も水の運動性を表し、代謝活性と相関すると考えられる。しかし、実際の測定では、磁場強度が高いほど試料の微細構造によって生じる磁化率の乱れ (T_2^*) の影響¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁹⁾ を受ける (Fig. 2 および Fig. 3C)。シグナルの T_2^* 減衰が強く現れる GE 法において、7T 高分解能 MRI では強い T_2^* の影響により、細胞構造が少なく磁化率の乱れが少ない生育初期の種子および維管束が強いシグナルを与えた (Fig. 4D および F)。これに対し、1T 小型 MRI では T_1 強調の効果が強く、種子では中心部だけのシグナルが強い。維管束のシグナルが強い (Fig. 4A および C) 原因も T_1 強調の効果であると考えられる。MIP イメージによる維管束構造の描写 (Fig. 4B, C, E および F) は、イネ穎果の登熟過程における水分分布の変化⁸⁾、および、リンゴ果実の保存における蜜入り消失過程⁹⁾ の追跡に見られるように、作物の生理作用の有効な解析手法である。

T_1 値のイメージ (Fig. 6A および B) では、代謝活性が高い種子の中心部には T_1 が低い部位があり、それが胎座まで伸びていることが認められた。この部位は、1T 小型 MRI の GE 法で測定されたイメージにおいて強調された種子の中心部 (Fig. 4A および C) に該当し、胎座から送られた貯蔵物質が最初に蓄積されて、代謝が抑制されている部位であると考えられる。 T_2 値のイメージ (Fig. 6C および D) では、7T 高分解能 MRI が果肉の内腔内の胎座の維管束を鮮明に描写した。パラメーターイメージ (Fig. 6) にすると、緩和時間強調イメージ (Fig. 2 および Fig. 3) では認められなかった構造を識別できることがある。これらのイメージでは、高磁場型 MRI の感度が良くシグナル/ノイズ比が高いことが有効に作用していると考えられる。

7T 高分解能 MRI のイメージ (Fig. 3) は鮮明⁸⁾¹²⁾ である。高磁場化によって感度を向上させ高い分解能と鮮明なイメージを得ようとすることはマイクロ MRI 開発の正しい方向の一つである。しかし、磁場強度が高いとシグナル減衰が速く、低水分領域の運動性が低い水の検出が困難となる。一方、磁場強度が低い 1T 小型 MRI は、中庸な分解能と一定水準のイメージ鮮明度ではあるが、シグナルの T_2 減衰あるいは T_2^* 減衰が緩やかであり、運動性が低い水の成分を検出できる (Fig. 2 および Fig. 5)。その結果、1T 小型 MRI では、イメージコントラストが 7T 高分解能 MRI とは異なり、強い T_1 強調の効果が得られる。すなわち、種子の貯蔵物質が蓄積された部位 (Fig. 4A) や果実の中心から種子につながる胎座の維管束 (Fig. 2 ; TR 1s, TE 7ms)

などのような運動性を著しく束縛された水が存在する組織を確認することができる。1T 小型 MRI は、低水分領域をも含む食品の内部構造の観察と、水の量と運動性の分布を基にしたゲル構造解析²⁰⁾ への応用に適していると考えられる。

要 約

磁場強度 1 Tesla (T) の永久磁石を用いて食品研究用に開発された小型 MRI によるキュウリ果実のイメージを、形態観察と細胞の水の量と運動性測定という側面において、7T 高分解能 MRI のイメージと比較した。組織の水の分布と運動性については、MRI における基礎的測定法である緩和時間強調イメージによって解析した。キュウリ果実のイメージでは、果肉、胎座、種子および維管束など生理状態の異なる組織が明瞭に識別された。7T 高分解能 MRI のイメージは鮮明に形態を示す。しかし、シグナルの T_2 減衰が強いために胎座のような低水分領域の運動性が低い水の検出が困難であった。一方、1T 小型 MRI はシグナルの T_2 減衰が穏やかであるため、胎座の運動性が低い水を検出できた。シグナルの T_1 による回復は、1T 小型 MRI の方が 7T 高分解能 MRI より速やかであった。よって、1T 小型 MRI は形態観察におけるイメージの鮮明さでは劣るものの、水の量と運動性測定においては広い範囲の運動性を持つ水を検出できる点、および、強い T_1 強調が得られる点で高分解能 MRI より有利である。1T 小型 MRI は、水の量と運動性が広い範囲にまたがる食品の有効な研究手法であると考えられる。

文 献

- 1) Morris, P.G., Nuclear magnetic resonance imaging in medicine and biology. Clarendon Press, Oxford (1986).
- 2) Chudek, J.A. and Hunter, G., Magnetic resonance imaging of plants. *Progress Nuclear Magn. Reson. Spectroscopy*, **31**, 43–62 (1997).
- 3) Faust, M., Wang, P.C. and Maas, J., The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Hortic. Rev.*, **20**, 225–266 (1997).
- 4) Clark, C.J., Hockings, P.D., Joyce, D.C. and Mazucco, R.A., Application of magnetic resonance imaging to pre- and post-harvest studies of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.*, **11**, 1–21 (1997).
- 5) 小泉美香, 狩野広美, 内藤成弘, 石田信昭, 田中敬一, 果実の保存と磁気共鳴画像法, *食科工*, **53**, 237–247 (2006).
- 6) Koizumi, M., Naito, S., Haishi, T., Utsuzawa, S., Ishida, N. and Kano, H., Thawing of frozen vegetables observed by a small dedicated MRI for food research. *Magn. Reson. Imaging*, **24**, 1111–1119 (2006).
- 7) Koizumi, M., Naito, S., Ishida, N., Haishi, T. and Kano, H., A dedicated MRI for food science and agriculture. *Food Sci. Technol. Res.*, **14**, 74–82 (2008).
- 8) Horigane, A.K., Engelaar, W.M.H.G., Maruyama, S., Yoshida, M., Okubo, A. and Nagata, T., Visualisation of moisture distribution during development of rice caryopses (*Oryza sativa* L.) by nuclear magnetic reso-

- nance microimaging. *J. Cereal Sci.*, **33**, 105–114 (2001).
- 9) Ishida, N., Koizumi, M. and Kano, H., The NMR microscope : a unique and promising tool for plant science. *Annals Bot.*, **86**, 259–278 (2000).
- 10) Dobre, M.C., Uğurbil, K. and Marjanska, M., Determination of blood longitudinal relaxation time (T_1) at high magnetic field strengths. *Magn. Reson. Imaging*, **25**, 733–735 (2007).
- 11) Terskikh, V.V., Feurtado, J.A., Ren, C., Abrams, S.R. and Kermode, A.R., Water uptake and oil distribution during imbibition of seeds of western white pine (*Pinus monticola* Dougl. ex D. Don) monitored *in vivo* using magnetic resonance imaging. *Planta*, **221**, 17–27 (2005).
- 12) Horigane, A.K., Takahashi, H., Maruyama, S., Ohtsubo, K. and Yoshida, M., Water penetration into rice grains during soaking observed by gradient echo magnetic resonance imaging. *J. Cereal Sci.*, **44**, 307–316 (2006).
- 13) Ruan, R., Litchfield, J.B. and Eckhoff, S.R., Simultaneous and nondestructive measurement of transient moisture profiles and structural changes in corn kernels during steeping using microscopic nuclear magnetic resonance imaging. *Cereal Chem.*, **69**, 600–606 (1992).
- 14) Ishida, N., Naito S. and Kano, H., Loss of moisture from harvested rice seeds on MRI. *Magn. Reson. Imaging*, **22**, 871–875 (2004).
- 15) Kikuchi, K., Koizumi, M., Ishida, N. and Kano, H., Water uptake by dry beans observed by micro-magnetic resonance imaging. *Annals Bot.*, **98**, 545–553 (2006).
- 16) Donker, H.C.W., Van As, H., Edzes, H.T. and Jans, A.W. H., NMR imaging of white button mushroom (*Agaricus bisporis*) at various magnetic fields. *Magn. Reson. Imaging*, **14**, 1205–1215 (1996).
- 17) Edzes, H.T., van Dusschoten, D. and Van As, H., Quantitative T_2 imaging of plant tissues by means of multi-echo MRI microscopy. *Magn. Reson. Imaging*, **16**, 185–196 (1998).
- 18) 小泉美香, 内藤成弘, 石田信昭, 狩野広美, 拝師智之, コンパクト MRI と水分の少ない食品—パンと菓子類—, 食品工業, **51**, 39–49 (2008).
- 19) Callaghan, P.T., Clark, C.J. and Forde, L.C., Use of static and dynamic NMR microscopy to investigate the origins of contrast in images of biological tissues. *Biophys. Chem.*, **50**, 225–235 (1994).
- 20) 渡部徳子, ゲル中の水の状態, 食科工, **44**, 816–823 (1997).
(平成 20 年 8 月 12 日受付, 平成 20 年 12 月 16 日受理)
-