超電導MRIを用いた西瓜空洞判定

斉藤 一功, 三木 孝史, 林 征治, 梶川 弘
 嶋田 雅生, 川手 剛雄, 西澤 節*, 池谷 大**
 木村 則幸**, 高畠 和夫**, 杉浦 伸裕***, 鈴木 基文***

梶神戸製鋼所電子技術研究所 神戸市西区高塚台 1-5-5

* 梶神戸製鋼所化学技術研究所 神戸市西区高塚台 1-5-5

** ジャパン・マグネットテクノロジー(株) 神戸市西区高塚台 1-5-5

*** 梶マキ製作所 浜松市篠ヶ瀬町 630

(1995年9月20日受理)

Void Detection of Watermelon by a Superconducting MRI

Kazuyoshi SAITO, Takashi MIKI, Seiji HAYASHI, Hiroshi KAJIKAWA, Masao SHIMADA,
 Yoshio KAWATE, Takashi NISHIZAWA,* Dai IKEGAYA,** Noriyuki KIMURA,**
 Kazuo TAKABATAKE,** Nobuhiro SUGIURA*** and Motofumi SUZUKI***

Electronics Research Laboratory, Kobe Steel Ltd., 1-5-5 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe 655-21

* Chemical Research Laboratory, Kobe Steel Ltd., 1-5-5 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe 655-21

** Japan Magnet Technology Ltd., 1-5-5 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe 655-21

*** Maki Engineering Ltd., 630 Sasagase-cho, Hamamatsu 435

(Received September 20, 1995)

Synopsis:

The possibility of utilizing MRI for the non-destructive quality evaluation of watermelons is described. MRI is a unique, non-destructive and non-invasive detection technique. Today it has become an important medical diagnostic modality. Recently several attempts have been made to utilize MRI for agricultural or industrial application. We have tried to apply MRI method to the detection of internal voids in watermelons. Our experimental apparatus consisted of a 0.5 T superconducting magnet with a bore 68 cm in diameter, an actively shielded gradient coil with high-power amplifiers and a PC-based spectrometer. From a practical point of view, it is not practical for the inspection of watermelons to take cross sectional images with two-dimensions, because it takes quite a long time. In order to increase measurement rate, we adopted a 1-D MRI. We have carried out void detection on 30 watermelons by this method and obtained convincing results.

Keywords: MRI, void detection, non-destructive evaluation, non-invasive evaluation, fruit

1. はじめに

MRI (Magnetic Resonance Imaging) は超電導マグネット技術の発達と相まって目覚ましい進展を遂げており、超電導応用の成功例である。現在 MRI は医学分野において重要な画像診断装置となっている。

MRI の特徴は非破壊・非侵襲で物体の内部情報を得られることにある。このような利点を生かせる分野は

医学以外にも数多く存在することからこれまでに様々な分野において応用の試みが報告されている。例えば、材料科学の分野においては、材料の品質評価を目的として、セラミック^{1,2)}やポリマーコンポジット³⁾、ゴム^{4,5)}等のイメージングが試みられている。またこの他に高分子の合成過程を MRI によってモニターする試み⁶⁾も報告されている。農業分野においては大豆⁷⁾や大麦種子⁸⁾、小麦種子⁹⁾、トマト果実¹⁰⁾等の成熟

Fig. 1 Photograph of the 0.5 T superconducting magnet used for void detection in watermelon.

過程における水分の分布変化が調べられている。またリンゴや桃、梨など^{11,12)}の果実類の非破壊品質検査への応用も、生産農家からの需要の高まりを背景に試みられている。我々もこうした応用の試みとして MRI を用いた西瓜の空洞検出を行った。

西瓜の内部空洞の非破壊的検出についてはこれまでに幾つかの手段が提案されており、それらのうちX線の透過量を測定する方法¹³⁾や、西瓜表面をハンマーで叩きその振動波形を解析する打音方式¹⁴⁾などが既に実用化されている。しかしながらX線方式では被曝に対

しての厳重な管理体制が必要になる他、消費者に与える印象の悪さが原因となって、広く使われるには至っていない。また打音方式では、ハンマー打点、集音点と空洞との位置関係によっては検出が不可能になることがある。このため、現状では人が手で叩くという昔ながらの手段をとる場合が多い。

西瓜は全重量の90%以上を水が占めるのでプロトン NMR の格好の測定対象物である。MRI の画像技術を西瓜の非破壊検査に用いれば、内部の様子が手に取るように分かり、空洞の検出も容易に行える。しかしながら、この画像法では測定に分単位の時間を要し、果実の品質評価に用いるのは実用的ではない。一般的な西瓜の大規模選果場では1時間当たり3,000~4,000個を処理している。そこで我々は1個当たりの測定時間を1秒以下とすることを目標として、1次元プロファイル法を用いた西瓜の空洞検出を試みたので報告する。

2. 実験

2.1 サンプル

実験サンプルには市販の西瓜 30 個を用いた。大きさはSサイズから5L サイズ迄のものを用いた。また等級も最低ランクのものから最高ランクのものまで優劣取り混ぜて準備した。

2.2 装置

実験に用いた超電導マグネットの写真を Fig. 1 に示

Fig. 2 Schematic representation of the MRI system.

Fig. 3 The 1-dimensional MRI sequence used for void detection in watermelon.

す。また NMR 装置全体の概略的なブロック図を Fig. 2 に示す。装置の基本的な構成と機能は、通常の医療用 MRI と同じである。

1) 超電導マグネットシステム

超電導マグネット (JMT 製) は水平ボアを持つ小型 MRI 用マグネットである (Fig. 1)。このマグネットは本来、人体頭部用として設計されたものである。中心発生磁場は 0.5 テスラ、クリアボア径は 680 mm である。マグネットは漏れ磁場を抑えるために 8 角形の炭素鋼製シールドで囲まれており、5 ガウスラインはマグネット中心から軸方向 1.0 m、径方向 2.8 m となっている。シールドを含む全体のサイズは高さが 1,800 mm、幅 1,600 mm、長さ 2,000 mm とコンパクトに設計されている。またマグネットは、移動の際の簡便性を考えて寒剤 (液体ヘリウム) を充填したままで移動可能なコールドシップタイプになっている。磁場均一度の誤差は超電導シムコイル、パッシブシム (磁性体)、常電導シムコイルにより中心 30 cm 球内で 1 ppm 以内に調整されている。また磁場の安定度は 0.05 ppm/h である。

2) NMR 分光計

NMR 分光計には SMIS 社 (英国) の製品を使用した。この分光計は IBM 互換のパソコンで制御される。RF アンプは American Microwave Technology 社 (米国) 製である。パルスの最大出力は 2 kW である。また勾配磁場発生には Magnex Scientific 社 (英国) のアクティブシールドタイプの勾配磁場コイルと Crown International 社 (米国) のアンプ (TECHRON 7700) を用いた。最大発生勾配磁場は 10 mT/m で最大値までの立ち上がり時間は 1 ms である。また傾斜磁場の直線性は中心 300 mm 球内で 5 % 以内の誤差に納まっている。

3) プローブ

プローブには 8 ラダーのバードケージコイル (ローパスタイプ) を採用した。コイルの直径は大きなサイ

Table 1 Parameters used in the NMR sequence for the void detection.

Number of sampling points	256
Sampling speed	25 kHz
Ta (repetition time)	25 ms
Echo time	12 ms
Number of slices	20
Slice thickness	20 mm
Slice separation	25 mm
Slice gradient strength	1.8 mT/m
Read gradient strength	2.0 mT/m

ズの西瓜が入るように 390 mm とした。長さは 500 mm である。分光計と同じく SMIS 社で製作された。

2.3 測定方法

Fig. 3 に 1 次元プロファイル法の測定シーケンスを示す。この図は RF パルスと勾配磁場の印加、および NMR 信号取得のタイミングを示している。

通常の MRI¹⁵⁾ と同じく、1 次元プロファイル法でも位置的な情報を NMR 信号に付加する原理は、勾配磁場と狭帯域 RF パルスの組合せによる方法である。まず選択性 90° パルスと勾配磁場 (slice gradient) の組合せによってサンプルのある領域を面として選択する。この面の向きは slice gradient の向きと一致しており、通常スライス面と呼ばれる。次にエコーを得るため slice gradient を印加しながら 180° パルスを加える。最後に、slice gradient と直交する向きの勾配磁場 (read gradient) を印加しながら信号を受信する。この信号をフーリエ変換すればスライス選択した面領域を read gradient の軸方向、すなわちスライス面と垂直な方向、にあたかも投影した様なプロファイルが得られる。

Table 1 に示す様に測定のパラメータを設定した。西瓜の蔓がついている部分を上、その反対側を下とするとき縦方向に切断したスライス面を 2 方向に投影してプロファイルを測定した (2 方向投影の理由は後述する)。実験では測定時間を 1 秒以内にするという条件を最優先の課題としパラメータを設定した。この条件のもとでは Ta は 40 ms になった。レーザーバゲイン等の装置の測定条件は全ての試料について同じになるように設定した。また測定した西瓜の空洞の大きさ、形状などを確認するために、すべてのサンプルについて MRI 画像を取得し判定の材料とした。

Fig. 4 Typical results obtained from the normal and voided watermelons. (a) The projection profiles obtained from a normal watermelon and its MR images. (b) The projection profiles obtained from a voided watermelon and its MR images. There are concavities on the profiles corresponding to the voids.

3. 結果と考察

3.1 1次元プロファイル

典型的な正常果と空洞果から得られた結果の例を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) は正常果から得られたプロファイルとその MRI 画像である。縦方向にスライスした場合の MRI 画像とそのスライス面を図中の上下方向に投影したプロファイルが示してある。プロファイルの横軸（周波数軸）は位置に相当する。またプロファイルの縦軸（信号強度の軸）は西瓜内部のプロトン量つまり果肉の量と対応している。Fig. 4(b) は同じ条件で測定された空洞果からのプロファイルと MRI 画像である。図中にはノイズレベルを 10 倍に拡大して示している。これはプロファイルの窪みにはほとんど影響を与えないレベルであり、装置の S/N が良好であることがわかる。

正常果のプロファイルは種、スジあるいは種の周りにある小さな空隙による小さな窪みがあるものの全体的に見ればほぼ半円形をしている。これに対して空洞果から得られたプロファイルには空洞による大きな窪

Fig. 5 Schematic illustration showing the projection profile obtained from a voided watermelon. In this case, the detection of the void depends on the direction of projection.

みが見られる。我々はこの窪みを特徴づける量として包絡線の下の方の窪みの面積をとることとした。ここで言う包絡線とは正常果のプロファイルに相当する。ところで 1 次元プロファイルにおける窪み面積を求める場合、Fig. 5 に模式的に示したような問題が生じる。すなわち空洞が細長い形状をしている場合、図のように

Table 2 Criteria for the void detection.

Area of concavity on the profiles (Arbitrary units)	Assumed result
0~20,000	No void
20,001~28,000	Small crack or small void (or No void)
28,001~80,000	Void
80,001~85,000	Border between void and large void
85,001~	Large void

縦方向への投影だけをとると種などによる窪みの影響で空洞の窪みが隠され、見誤る恐れがある。一方、横方向への投影では大きな窪みとなって現れ、他の原因と見誤ることはない。こうしたことから、実験に際しては2方向への投影を測定した。

3.2 空洞判定基準の設定

Fig. 4 に見られるように、種まわりの小さな隙間によるプロファイル上の窪み面積は小さく、また空洞による窪みは大きい。空洞による窪み面積とそれ以外の原因による窪み面積が識別可能かを調べるため西瓜5個について全ての窪みの面積と2次元MRI画像によるその原因との対応付けを行った。その結果をTable 2に示す。表から分かるように、窪み面積の違いにより正常果と空洞果、大空洞果に分けられることが分かる。またプロファイルには縦・横方向含め幾つかの窪みが生じるが、得られた窪みの面積のなかで最大面積

を持つものを代表値として選べば、それが正しく西瓜の空洞の有無を反映していることが分かった。従って以下の手順による空洞判定基準を設定した。

- ① 各サンプルの全てのプロファイルから窪み部分の面積を求める。
- ② 得られた窪み面積の中からサンプルの代表値として最大のものを採用する。
- ③ 代表値によって正常果／空洞果／大空洞果を判定する。

3.3 全サンプルについての空洞測定

Fig. 6 は測定した全てのサンプルについて、プロファイルの窪み面積の代表値を縦軸に、サンプル番号を横軸にプロットしたものである。上述の判定基準に基づき、図の縦方向は大きく3つの領域に分けられる。一番下は最大の窪み面積が20,000以下となる領域である。この領域に存在するサンプルは正常果であり、プロファイルの窪みは種や種の周りの空隙等によるものであると推定される。同様に真ん中の領域に存在するサンプルは空洞果、一番上の部分に存在するものは大空洞果を持つものであることが推定される。この推定を確認するために2次元MRI画像との比較を行った。この比較結果をTable 3に示す。

Table 3によれば殆どの試料について、1次元プロファイル法で得られた結果は正常果と空洞果の判定を正しく示していることが分かる。これは、現在実用化されている打音方式と比較しても、実用上遜色のない

Fig. 6 Summary of result. The abscissa shows sample number. The ordinate shows the maximum concavity area of each sample. The two bars show criteria for the determination.

Table 3 Comparison of the results for the void detection in 30 watermelons obtained by the 1-dimensional MRI (1D-MRI) method and the MRI image method.

Sample number	Determined by 1D-MRI	Determined by MRI imaging	Correspondence
1	Large void	Wide crack	◎
2	Large void	Large void	◎
3	No void	No void	◎
4	Large void	Large void	◎
5	Void	Wide crack	○
6	Void	Narrow crack	◎
7	No void	No void	◎
8	No void	No void	◎
9	Large void	Large void	◎
10	Void	Void	◎
11	No void	No void	◎
12	No void	No void	◎
13	Void	Large void	○
14	No void	Narrow crack	×
15	No void	Narrow crack	×
16	No void	No void	◎
17	Void	Large void	○
18	No void	No void	◎
19	No void	No void	◎
20	No void	No void	◎
21	No void	No void	◎
22	No void	No void	◎
23	No void	No void	◎
24	Void	Void	◎
25	No void	No void	◎
26	No void	No void	◎
27	No void	No void	◎
28	No void	No void	◎
29	No void	No void	◎
30	No void	No void	◎

精度である。但し、14番と15番の試料については、現実には細いヒビ割れ状の空洞があるのに正常果と判定している（これらの試料は、打音方式でも正常果と判定された）。これが今回の実験における測定精度の限界と考えられる。すなわち、小さな空洞によるプロファイルの窪みと、空洞以外の要素（種や種周りの空隙等）によるプロファイルの窪みが同じ程度になる場合には、空洞を判定できなくなる。

3.4 測定速度と精度

測定に要した時間は1個当たり 900 ms であった。

で測定速度の点では1 s 以下という目標値をクリアする事ができた。

一般的計測法と同様、本方法においても測定速度と精度はトレードオフの関係になっている。検出精度を向上させるためには、スライス厚を減らすことや投影方向を増やすこと、NMR 信号のサンプリング数を増やすこと等測定パラメータを更に検討する必要がある。本実験においてはスライス厚を 20 mm としたがこれを 10 mm にすれば相対的にプロファイル上の窪み面積が大きくなるため現在より小さい空洞の検出が

可能になる。ただしこの場合には、スライス面の厚さが減少した分だけ同時にスライス数を増やさなくてはならず、測定時間が2倍になってしまう。また方向についても現在の2方向から3方向にすれば測定精度が向上することが予想できるが、これも測定時間が1.5倍になる。こうしたことから実際の選果機械として実用化するためには、検出すべき空洞の大きさや許容される測定時間などを検討し、検出精度と検出速度のバランスを考えることが重要である。

また測定精度を上げ、同時に測定速度も上げるためにマグネットの仕様を見直すことも考えられる。今回使用したマグネットは本来、人体の頭部専用MRI装置向けに設計されたものであり、磁場均一空間は比較的小さい。こうした設計を見直して超電導マグネットの磁場均一空間を長くすれば複数の西瓜を同時に測定することが可能となり、測定時間は短縮される。

以上の様な要素を考慮して、実用上最も適切な条件や装置を得る事が今後の検討課題である。

4. ま と め

超電導マグネットの応用として、0.5テスラ超電導MRI装置を用い、1次元プロファイル法による西瓜の空洞検出を行った。1次元プロファイルに生じる窪みの面積から、正常果／空洞果／大空洞果の区別が可能になることが分かった。30個の西瓜を本方法で測定したところ、この内2個については小さな空洞を見逃したものの、残りの28個については正常果と空洞果、大空洞果の判定を正しく行うことができた。また測定

は1個あたり1秒以下で行えることが確認された。この結果、更なる精度向上の余地はあるものの1次元プロファイルによる西瓜空洞果検出の可能性が実証できた。

参 考 文 献

- 1) M. S. Conradi: J. Magn. Reson. **93** (1991) 419
- 2) M. R. Lizak and M. S. Conradi: J. Magn. Reson. **95** (1991) 597
- 3) P. Jezzard, et al: Adv. Mater. **4** (1992) 82
- 4) D.G.Cory, J.W.M. van Os and W.S.Veeman: J. Magn. Reson. **76** (1988) 543
- 5) A. G. Webb, et al: Polym. Commun. **30** (1989) 363
- 6) U. Günther, K. Albert and M. Grossa: J. Magn. Reson. **98** (1992) 593
- 7) 石田信昭, 小林登史夫, 狩野広美: 日本作物学会紀要 **57** (1988) 235
- 8) 石田信昭ら: 日本作物学会紀要 **58** (1989) 146
- 9) C. J. Jenner, et al: Nature **336** (1988) 399
- 10) N. Ishida, et al: Agric. Biol. Chem. **53**(1989) 2363
- 11) P. Chen, M. J. McCarthy and R. Kauten: Trans. ASAE **32** (1989) 1747
- 12) B. Zion, P. Chen and M. J. McCarthy: ASAE paper 93-3084 (1993)
- 13) 本間秀明: 食品流通技術 **18** (1989) 58
- 14) 原口和男: 食品流通技術 **18** (1989) 61
- 15) 日本磁気共鳴医学会編: NMR 医学—基礎と臨床—(改訂2版) 丸善, 東京 (1991) 41