

小型 MRI による果実内害虫の検出技術

食品総合研究所* 石 田 信 昭

はじめに

モモシクイガは果実表面に産卵し、ふ化した幼虫は果実内を食害して成長する。しかし、ふ化直後の幼虫の食入孔は非常に小さいため発見が容易でなく、内部を食害して成長する幼虫の存在も外観からはわからないため、被害果の発見は非常に難しいのが現状である。最近ではモモシクイガが生息しない台湾へのリンゴ輸出においてこの害虫が問題となり、防除法と検出法の開発が急がれている。このような状況の下、新しい果実内害虫の検出法として、農林水産省「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業（果実輸出における害虫付着果および食入果の流通阻止技術）」により農研機構・食品総合研究所が(株)エム・アール・テクノロジーおよび果樹研究所と共同で MRI 利用の可能性を検討している。ここではこれまで得られた結果をもとにして、MRI の果実など農産物への利用と、果実内害虫検出について紹介する。

I MRI とは

MRI (磁気共鳴イメージング) は医療診断装置として多くの病院で利用されている。人体の断面像を非破壊で見ることができ、がんの検出や病変部位の特定に威力を発揮している。同様の装置に MRI より前から使われていた X 線-CT がある。X 線は人体を透過するが、人体内の組織の透過係数が異なるため、この違いを利用して外から内部構造を見ることができる。しかし、X 線のエネルギーは強いいため生体組織へのダメージがあり、被爆の問題に注意が必要である。MRI ではエネルギーのずっと弱い (波長の長い) 電磁波を使っている。FM ラジオやテレビで使われているのと同じくらいの周波数の電波を利用しているため、生体へのダメージはほとんどないとされている。また、MRI では X 線と異なり、透過した電磁波の強さをもとに内部構造を見るのではなく、生体内に存在する水の NMR (核磁気共鳴) シグナルを利用している。NMR は化学物質の構造解析やタンパク

質の立体構造解析に利用されている分析装置であるが、MRI では水の NMR シグナルを使って生体内の水の分布をもとにイメージを作っている。NMR シグナルは、水素などの原子が磁場の中に入れられたときに特定の周波数の電磁波を吸収して共鳴現象を示すことを利用しているものであり、測定には物質を磁場の中に入れて電磁波を当てる必要がある。そこで、人体を測定する病院用の MRI では大きな磁石が必要となる。しかも、非常に均一性の高い磁場が必要であり、強い磁場であるほど感度や分解能が上がるため、これらを目指して磁石も精密で大きな形状となることが多い。このことが、MRI は大型で高価な装置となることの主要な要因となっている。また、強力な磁石の内部に試料があり、すべての操作は磁石内部とその周辺で行うため鉄製品の使用が制限されることが多く、装置の取り扱いや使用の自由度などに制限が多い。この面でも取り扱いにくい装置となっているのが実情であった。このような事情と MRI が人体計測に特化して発達してきた経緯もあり、医療以外の利用は一部で行われてきているだけであった。それでも様々な分野において MRI の利用を探る研究は行われてきた。植物や農産物の MRI による解析に関しても MRI の開発とともに行われてきている。

II MRI 画像と果実内構造

農産物や果実は水分を大量に含み、複雑な内部構造をもっているうえ、人体や動物のように測定中に動いたりすることがないため、MRI の機能を調べるための実験対象として都合がよく、MRI 開発における試しの試料として用いられることも多かった。さらにそれだけにとどまらず、植物や農産物それ自体 MRI を用いた研究の対象としても様々な研究が行われてきた (ISHIDA et al., 2000; 小泉ら, 2006)。MRI 開発のごく初期にリンゴの蜜入り (WANG and WANG, 1988) や洋なしの内部崩壊 (WANG and WANG, 1989) といった果実内部の障害が検出できることが、人体用の MRI を用いて示されている。これは人体同様、果実においても病変組織や生理的に異なる組織では水分含量や水の状態の違いを生じ、MRI のコントラストの違いとなって検出できることを示している。また、果実内の種子や維管束といった組織の違いは、MRI 画像でコントラストの違いとなって内部構造

Non-destructive Observation of Peach Fruit Moth in Apple Fruits by MRI. By Nobuaki ISHIDA

(キーワード: 果実, モモシクイガ, 磁気共鳴イメージング)

* 現 石川県立大学生物資源環境学部

を浮き上がらせることとなる (小泉ら, 2006)。図-1 に MRI で見たリンゴの断面画像を示す。MRI ではリンゴの種子とそれを取り巻く維管束が比較的強度の高いイメージとしてとらえられ、芯の空洞が黒く抜けたイメージとなる。下は蜜入りリンゴのイメージであるが、蜜入りの部分は果肉の細胞間隙にソルビトールを含んだ水がたまるために、他の組織より強いイメージを与える。このリンゴ組織の中で成長するモモシクイガの幼虫を検出できるかどうかが課題である。

昆虫の MRI による解析に関しては、MRI が内部構造を非破壊で計測できる特徴を用いて、マイクロイメージングと呼ばれる数 cm 以下の試料を精密に測定することのできる装置を用いた形態観察、内部構造観察の手段としての有用性が示されてきた (HART et al., 2003)。今回のような果実内部における虫の検出に関しては、近赤外 (TOYOSHIMA et al., 2006) による研究や X 線 (FORNAL et al., 2007) を用いた小麦内における昆虫の生育を調べた報告はあるが、MRI による果実内の昆虫の検出についての報告はない。そこで、実際問題となる成熟果に侵入した小さな虫の検出に先立って、害虫が侵入した大きさ 3 cm 程度のリンゴ幼果を試料として、リンゴ果実内の害虫が MRI によりどのように見えるのかを検討した (井原ら, 2008)。

III 果実内害虫の検出

測定に用いたのは、大型の人体用 MRI や、研究用と

して小さな試料の計測に用いられる、超電導磁石による高磁場 NMR をもとにしたマイクロ MRI ではなく、永久磁石を用いた小型 MRI である。これは我が国の高度な永久磁石製造技術と最近急速に進んでいるコンピューターおよび電子技術を使って開発された MRI であり (巨瀬, 2004)、人体用 MRI や高磁場型 MRI のような超電導磁石ではなく永久磁石を用いているため、磁石の維持に高価な液体ヘリウムや液体窒素はおろか電気すら必要なく、移動も可能であるという、現場において利用することを考えたときに非常に有利な点を備えている装置である。

図-2 に MRI の外観を示す。MRI の設置には特別な部屋は必要なく、この写真でも普通の空調の付いた部屋に設置してあり、大きさは事務机程度と小型である。図-3 はこの装置で測定したリンゴ幼果の写真 (左) と

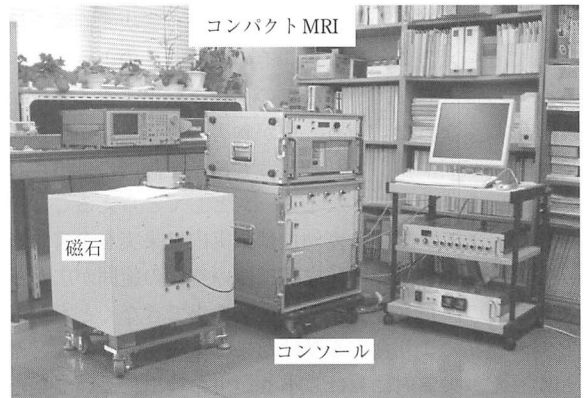


図-2 リンゴ幼果の計測に用いた MRI (共鳴周波数 40 MHz, 検出器径 3 cm)

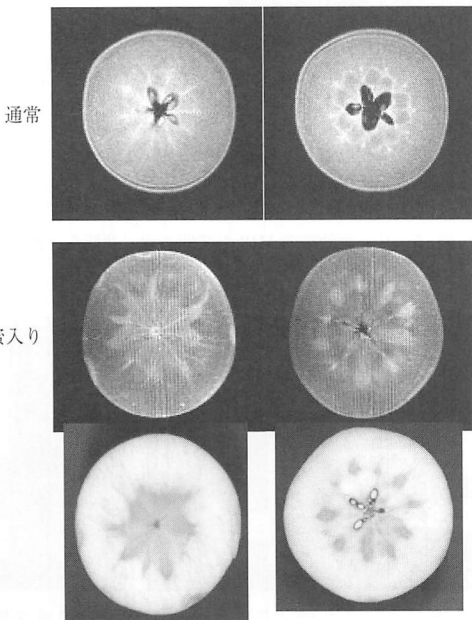


図-1 リンゴの MRI

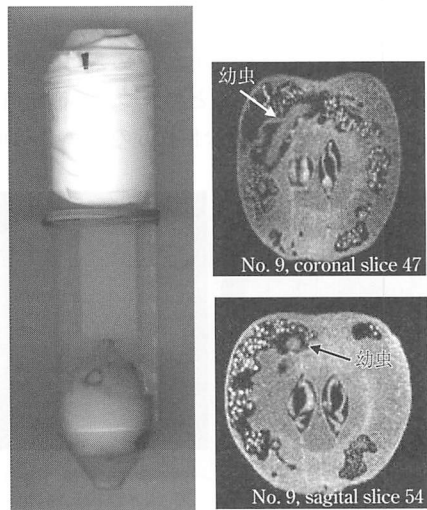


図-3 リンゴ幼果とその MRI (井原ら, 2008)

MRI 画像 (右) を示した。試料は径 3 cm のプラスチックの試料管に入れて装置の検出部に挿入する。右の画像はモモシクイガ幼虫が果実に食入してから 15 日程度経過しており幼虫はかなり大きく成長しているため、矢印で示すように虫はイメージとしてははっきりととらえている。MRI により果実内の虫を検出する際、理想的には果実は形がわかる程度に薄く見えている中に、虫だけが強調されて画像化されることが望ましい。そのため測定法や測定条件を変えた計測を検討するわけであるが、残念ながらリング果実内の虫の強度は、リング組織とほとんど同じかわずかに弱いイメージとしてしかとらえることができなかった。このため、虫の検出はその形態から見つけることになる。しかし、虫の存在場所と画像の断面はどのような位置関係になるかはわからず、図-3 右の画像のようにきれいな虫の横断面がとれればいいが、そうでないときは連続する断面から形態を想像しながらとらえるか、連続した画像から三次元画像を構築してとらえることになる。そのため、このように大きな虫ならばいいが、小さな虫の存在を検出することはかなり難しくなった。一方、虫が食害した果実はかなり大きく黒い空洞が検出されるとともに、空洞内に排出された糞は明るく強調されたイメージとしてとらえることができた。モモシクイガ幼虫は果実内で果実を食害しながら成長を続けるため、成長に伴い空洞の範囲が広がっていき糞の蓄積も多くなる。虫を検出できなくとも空洞と糞の存在により食害を受けた果実を識別できることがわかった。果実内における小さい虫の検出について見たのが図-4 である。

図-4 は虫が進入してからまだ日の浅い果実のイメージである。虫は小さく食害の程度も少ないことから、虫の存在を簡単に見つけることは難しいが、虫が掘り進んだ穴は黒い筋もしくは穴として認めることができる。MRI の計測で問題となることのひとつが、測定時間の問題である。ここで示すような何枚ものスライス面を計測

するためには、かなり長い測定時間がかかってしまう。その間に試料が動いてしまうと、画像は乱れてしまう。虫が活発に活動している場合は、測定時間内に虫が移動してしまい、虫のイメージがぼけて検出不可能になることが考えられる。図-5 は測定時間を短くするためリングの 1 断面のみを測定し、時間を変えて画像を得たものである。0 分では虫の断面が丸く見えているが、20 分後には形が崩れてぼやけており、140 分後では虫の姿は見えず食害した後の糞が残されている。虫が果実を食べながら移動していることがわかる。このようなことを考慮に入れつつ、実際の食用に供される試料について検討を行った。

直径約 8 ~ 9 cm の「さんさ」の成熟果を用いて人工的に接卵を行い、害虫の生育に伴うリング内部の変化を追跡した。測定に用いたのは図-6 に示すリングが入る

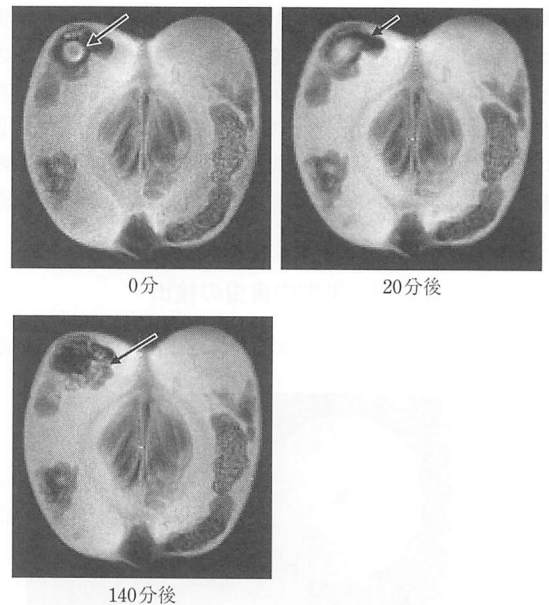


図-5 リング幼果の MRI の時間変化 (井原ら, 2008)

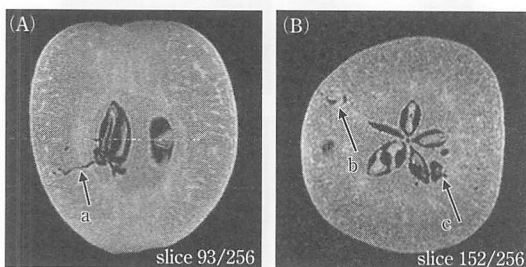
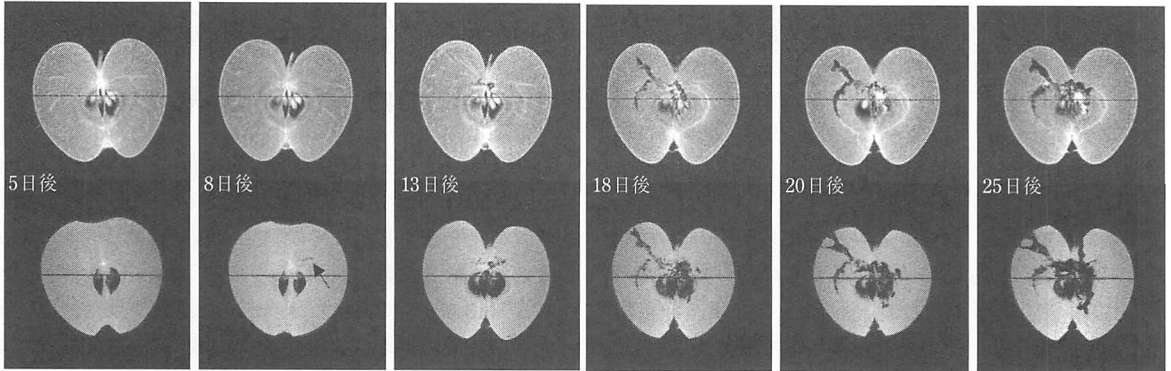


図-4 幼果中の害虫のイメージ：約 10 日後 (井原ら, 2008)
a: 食害孔 b, c: 害虫と思われる孔の中の白い点。



図-6 「さんさ」の計測に用いた MRI (共鳴周波数 8 MHz, 検出器幅 9 cm)

断面画像



画像解析を行った画像

図-7 果実の食害通路の検出：3D スピンエコー法

大きさの、幅 9 cm の検出器を備えた磁石で構成された装置である。磁石は磁場強度 0.2 テスラ（共鳴周波数 8 MHz）の永久磁石であり、その他のシステムはリンゴ幼果を測定したものと同等のものである。モモシクイガの幼虫はリンゴ幼果における計測でもわかるが、果実への進入直後は非常に小さく果実にあける空隙も小さいが、2 週間を過ぎたころから急激に大きくなる。しかし最大に成長しても長さ 12 mm、径 1 mm 程度なので、成熟したリンゴに比べかなり小さいものである。ここではまず果実内の害虫の検出と存在位置、活動の変化をとらえるために 11 cm の測定範囲全体を 64 枚に分割した断面のイメージを求め、その中から害虫による食害と害虫の存在位置の特定を試みた。図-7 はその 1 例である。上が中心付近のリンゴ断面のイメージで、ほぼ同じ位置を時間を追って並べてある。8 日後までのイメージには変化が見られないが、13 日後のイメージでは芯の上に穴が開いてきているのがわかる。18 日後では芯の上部から右にかけてと左上にはっきりと食害の穴が観察されるようになった。この穴は 20 日後、25 日後とさらに大きく広がるとともに、内部に輝度の高いところが所々観察され、糞が蓄積していることがわかる。測定終了後、果実を切ってみると、大量の糞が果実内部に蓄積していた。しかし、この測定では害虫それ自体を明確にとらえることはできなかった。ここに示したのはリンゴの 1 断面のみの経時変化であるが、虫は果実内を移動しながら内部を食い荒らしている。その様子を把握するためには他の断面を含めた評価が必要になる。その試みの一つとして、画像解析によりリンゴ中心部周辺の何枚かの画像から、穴の開いているところを抽出したイメージが下のイメージである。これを見ると、8 日後のイメージで

芯の右上にかすかな黒い横線が認められ、食害が生じていることが検出できている。その後、食害は芯の周辺と右側に広がって、20 日後には穴は外につながって幼虫が果実から脱出したことがわかる。さらに 25 日後ではその脱出孔の下および芯の右上にも新たな脱出孔が出現し、第二、第三の幼虫も脱出して行ったことがわかる。

MRI を用いた果実内害虫の検出技術の検討は始まったばかりである。MRI のポテンシャルとしては、果実内における害虫の開けた穴や糞を検出することは可能であることがわかった。非破壊で果実内の虫の動態を観察できる技術は、被害果実を観察する手法としては非常に有用な方法となると思われる。しかし、現場における被害果の検出手法としてはまだまだ越えなければならないハードルがたくさんある。どこにいるかわからない小さな害虫を検出するために、ここでは精密な測定を行っているので測定時間が 80 分もかかっている。今は果実の食入害虫に対し、現在の MRI の技術でどこまでせまることができるかを検討している段階であるが、被害果検出の時間短縮と精度に関しては今後の大きな課題である。

引用文献

- 1) 井原史雄ら (2008) : 応動昆 52(3) : 123 ~ 128.
- 2) FORNAL, J. et al. (2007) : J. Stor. Produc. Res. 43 : 142 ~ 148.
- 3) HART, A. G. et al. (2003) : J. Insect Sci. 3(5) : 1 ~ 9.
- 4) ISHIDA, N. et al. (2000) : Ann. Bot. 86 : 259 ~ 278.
- 5) 小泉美香ら (2006) : 日食科工誌 53(5) : 237 ~ 247.
- 6) 巨瀬勝美 (2004) : コンパクト MRI, 共立出版, 東京.
- 7) ——— (2004) : NMR イメージング, 共立出版, 東京.
- 8) TOYOSHIMA, et al. (2006) : Bull. Natl. Inst. Fruit Tree Sci. 5 : 87 ~ 94.
- 9) WANG, C. Y. and P. C. WANG (1989) : Hort. Sci. 24 : 106 ~ 109.
- 10) WANG, S. Y. and ——— (1988) : Sci. Hort. 35 : 227 ~ 234.