

メロンの熟度（硬度）と糖度の可視化

杉山 純一

独立行政法人 食品総合研究所

Visualization of Firmness and Sugar Content for Melons

Junichi SUGIYAMA

National Food Research Institute

キーワード：打音，近赤外分光，非破壊，硬度，糖度，メロン

1 はじめに

メロンにおけるおいしさとは、熟度（硬度）と糖度が大きな比重を占めている。これらを客観的に把握するためには様々な計測法が考えられる。今回は、既に実用化された打音による果実硬度計と研究用に開発した糖度の分布計測法を紹介する。

2 打音を利用した果実硬度の計測^{1) 2) 3)}

熟度の非破壊測定という点、一般的に馴染みが深いのは打音によるスイカの熟度推定であろう。キーンという高い音であれば未熟、ゴーンという低い音になれば適熟と言われ、産地には名人も居るようであるが、これを機器測定（所謂、周波数解析）で客観的な指標にするという試みもこれまで数多くなされてきた⁴⁾。しかし、果実の大きさの影響を補正するために果実重量をパラメータとした計算を取り入れたり、それ以上に、何故、果肉硬度によって音色が変化するのかその理論を裏付ける確証がなかなか得られなかった。

ところが、その解決は「ともかく果実表面でどんな現

象が起こっているかを調べて見たら」という私の恩師のアドバイス⁵⁾で氷解したのである。図1 (a) に、メロンを試料とした実験の様子を示す。メロンの赤道面上を24分割し、マイクを置けない打点近辺3カ所を除いた21カ所にマイクをぐるりと配置する。そして、叩いた瞬間の音をそれら21カ所で同時に取得し、コンピュータで解析した。（実際は、1個のマイクを次々と移動させて同じようなデータが得られるように工夫してある。）解析の一例として、図1 (b) に21カ所の打音信号を3次元座標に並べた鳥瞰図を示す。そこには、斜めに交差する直線模様が浮かび上がっているのがわかる。これが、打音の正体である。すなわち、叩いた応答波形（表面弾性波）が赤道面上を等速で伝搬していることを表している。また、同じデータを使って、コンピュータディスプレイ上に時間経過とともに各位置の音圧分布を表示すると、叩いてからメロン表面がどのように振動しているのかをアニメーションとして視覚的に表示できる。このアニメーションを各時刻ごとに表示したものを図2に示す。

これらは、赤道面だけの2次元での挙動を調べたものだが、実際のメロンは3次元体であることを考慮すると、いわゆる池の中に石を投げて出来る波紋の広がりのような

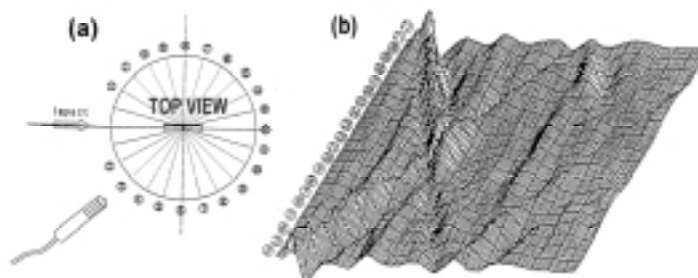


図1 時間・空間（位置）・音圧の3次元表示（鳥瞰図）
X軸：時間（0～12ms）Y軸：測定位置（②～22）Z軸：音圧

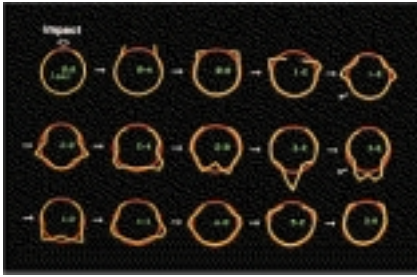


図2 振動状態のアニメーション
(数字は経過時刻 [ms])

な振動伝搬が生じていると考えられる。但し、メロンの場合は、池のような平面でなく、球面なので、振動は打点のちょうど反対側に一旦集まって大きくなり、そのまま交差してまた打点に向かって戻り、再び交差して反対側に戻っていく、といった現象が延々と減衰しながら続くことが明らかになった。なお、これは、図1(b)においては、斜めの交差する直線模様が繰り返されることに相当している。

さらに追熟による変化を調べると、果肉が軟らかくなるほど、図1(b)における直線の傾きが緩やかになり、振動の伝搬速度が低下していくことが観察された。また、様々な熟度の36個のマスクメロンについて、伝搬速度と破壊試験による果肉硬度を調べた結果、両者の間には高い相関が認められた。つまり、果肉が軟らかいほど伝搬速度が遅いということが明らかになった。これは、物理法則としてはごく当たり前のことで、例えば空気中の音速が343m/s(20°C)に対し、水中では1450m/sになるように、波を伝搬する媒体の物性が反映されたことに他ならない。一般的に、硬い物質ほど波の伝搬は早くなり、メロンといえども例外は許されないのである。このことは、伝搬速度が非破壊で測定できるメロンの直接的な硬度指標となりうることを示唆している。

以上のように、メロンを叩いた時に表面で起きている現象が思いのほか単純で理にかなったものであることがわかった。しかし、従来の周波数解析で指摘されている現象はどのように説明できるのであろうか。結論から言えば、「伝搬速度の低下は周波数解析では各周波数ピークの低周波側への推移として観察される」ということである。その証拠を図3に示す。図3(a)は収穫後1日目(細線)と5日目(太線)の実際の打音信号を表している。5日目の波形は追熟により軟らかくなっているため伝搬速度は遅くなり、1日目の波形より全体的に右側に間伸びしている。そこで、1日目の波形を時間軸方向に適度に拡大する(ここでは120%、点線)とぴったり5日目の波形と一致することがわかる。一方、図3(a)の波形を周波数領域から表したもの(パワースペクトル)が図3(b)である。この時間領域(a)－周波数領域(b)の変換は、図中に示したフーリエ変換という数式処理で行われる。この式の左辺は時間領域、右辺は周波数

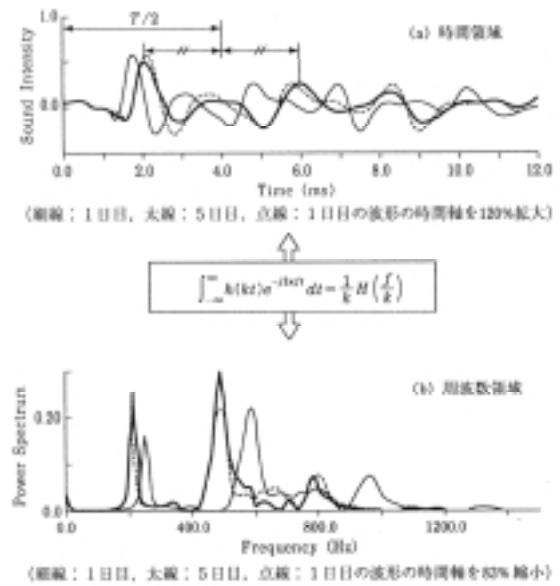


図3 伝搬速度と周波数の関係

領域を表している。さらに、左辺のkが右辺では1/kになっていることは、時間軸をk倍すると周波数軸は1/k倍に縮小することを意味している。つまり、図3(b)において、5日目の波形(太線)は1日目(細線)より従来からの指摘通り確かに低周波側に推移しており、これは、時間軸で1日目の波形を120%拡大したことに呼応して周波数軸では83%縮小(=100/120×100%)された波形(点線)と一致している。このように、伝搬速度の低下と周波数ピークの低周波側への推移は全く同じものであり、いふなれば、1つの現象を一方は時間領域から、他方は周波数領域からと見る角度を変えて観察しているに過ぎないのである。

とはいえ、実際に果肉硬度の非破壊指標として利用する場合は、両者に大きな違いが生じる。まず第一に、時間領域では、毎秒何メートルといった単位の伝搬速度で表すことにより、試料の大きさの影響を受けることはない利点がある。これは、前述の水中での音速を例にしても明らかで、大きな池の中で測った音速も、小さな水槽で測った音速も、おなじ水を媒体にしている限りは1450m/sという値は不変である。メロンにおいては、当初は、振動が一周するのに何ミリ秒かかるか測定し、周長の測定値とともに割り算して伝搬速度を算出していた。周長が計算に含まれるので、明らかに大きさの補正がなされているのがわかる。なお、現在は後述するような2本のマイクを使うことにより周長の測定を不要としている。一方、周波数解析では、解析対象が1カ所だけの打音信号という点で既に試料の大きさを表す空間情報が失われており、これを補うために重量等の代替パラメータがどうしても必要になってくる。加えて、周波数領域における波形(パワースペクトル)の形状はフーリエ変換という単なる計算処理による結果であり、各ピークその

ものが何らかの物理的現象を反映しているわけではない。従って、同一試料なら追熟しても類似の波形を示すため比較は容易であるが、異なる試料間においては、必ずしも類似の波形になるという保証は無く、比較にはそれなりの工夫が必要となってくる。

さて、メロンのように表面弾性波の伝搬が延々と続く現象はスイカにおいても観察され、また、程度の差こそあれ打音直後の伝搬現象は、パイナップル、カボチャ、丸トウガン、リンゴ、洋梨、そして驚くことにキュウリまでにも存在することが確かめられている^{6) 7) 8) 9) 10)}。かなり汎用的に硬さを非破壊で推定できることが明らかになるにつれて、もっと簡単に伝搬速度を測定できるシステムのニーズが喚起され、民間会社と共同研究により、瞬時に伝搬速度を計測できる非破壊果肉硬度計を開発した。図4にみられるようにピストル型のセンサ部には打撃機構と2つのマイクが備えられ、トリガを引くことにより、瞬時に2本のマイクで打音を取得し、その2つの打音の時間差から伝搬速度を算出する機構になっている。一般のノートパソコンと組み合わせ、携帯が可能であり、電源の無い畑でも利用できるように工夫されている。当初、伝搬速度の算出のためのサンプリング周波数の限界から測定対象はメロンのみであったが、その後、AD変換のハードウェアの進歩に伴い硬い農産物にも適用可能となり、ラフランスのような西洋なしにも定量解析が可

能であることが示されており、市販された装置 (<http://www.toyoseiki.co.jp/product1.html>) では、リンゴ、あるいは工業材料等の微妙な硬さの違いも検出できるように性能アップが図られている。

この装置の応用例として、生育中のメロン果実に関して、網目が現れる前から収穫して軟化するまでの生長計測の一例を図5に示す。計測開始時点の5/14においてはメロンの表面は滑らかな状態でマスクパターンは生じていない。伝搬速度は5/20まで徐々に上昇した。ここで、伝搬速度が高くなるということは、表面の張力が上昇する（つまり硬くなる）ことを意味していると思われる。そして、その伝搬速度のピークを迎える5/20において、一気に表面に亀裂が入り、マスクパターンの形成が始まった。その後は、伝搬速度はゆるやかな低下傾向を示した。メロンは6/25に収穫され、伝搬速度は追熟による軟化を反映して、その時から急激な減少へと転じた。別の実験で求めた適熟期は、この急勾配のちょうど中ほどに位置していた。

一方、実際のメロンの栽培農家では、経験的に指先で軽く叩き「かたい」、「ゆるい」といった判断から亀裂の発生時期を推測し、この時期の水管理と温度管理でもってきれいなネットを張らせることが行われている。本装置による生長計測は、生産者がこれまで職人芸として行ってきた技術を客観的に数値化し、科学的に裏付けたもの

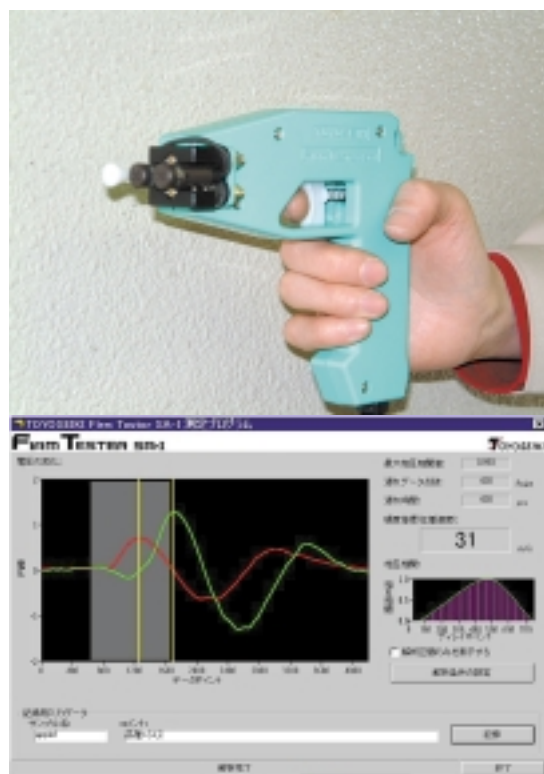


図4 非破壊果肉硬度計
(Firm Tester SA-I, 東洋精機製作所)

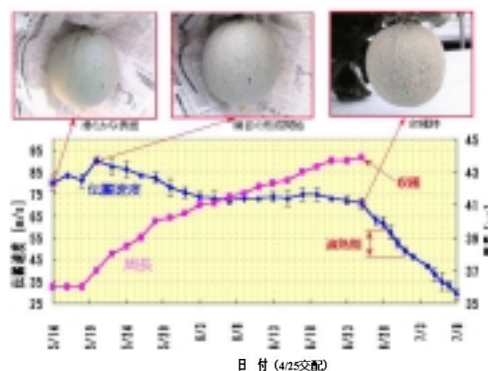


図5 メロンの生長計測

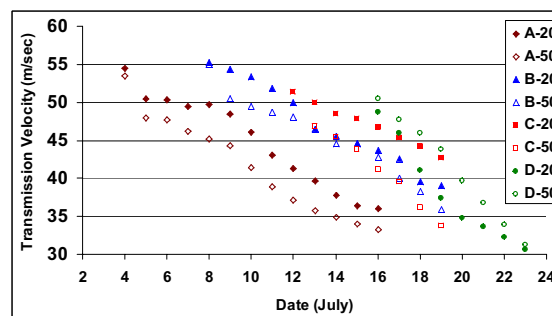


図6 堆肥投入量による日持ち性の違い
A, Dは収穫日, 20, 50は豚ふん投入量 [t/ha]

であり、今後、高品質メロン栽培への応用にも期待できるものと思われる。

さらに、堆肥量の異なるメロン栽培における日持ち性の違いを検証した例を図6に示す。その他、リンゴのボケの検出やマンゴーの熟度判定への適用を試み、本装置が有効に利用できることが確認されている。

3 光学的手法による糖度分布の可視化¹¹⁾

光を使った農産物の品質計測法として、最も実用化されているものに近赤外分光法¹²⁾がある。この技術は、近赤外スペクトル(波長-吸光度曲線)そのものが物質の化学構造の特定部分(官能基)による共振に由来することを利用して、逆に、特定波長の吸光度から注目する物質の定量を行うものである。実際には、一つの官能基が複数の吸収波長をもっており、また、試料は多成分からなるため、これらの吸光度が全て重ね合わさったものが近赤外スペクトルとして計測される。従って、そこから、注目する成分に関する情報を取り出すには、重回帰分析等の統計的手法が用いられる。例えば、米の食味計は、基本的には食味に関連する複数の化学成分を近赤外分光分析により算出し、それらを総合してスコアを表示するものである。また、桃、ミカンやメロン等の糖度を近赤外分光によって非破壊測定して、選別する技術も実用化され、全国の選果場に普及しつつある。しかし、一方で、甘いという糖度でありながら、食べてみるとそれほど甘くないとか、測る場所によってかなりの糖度のバ

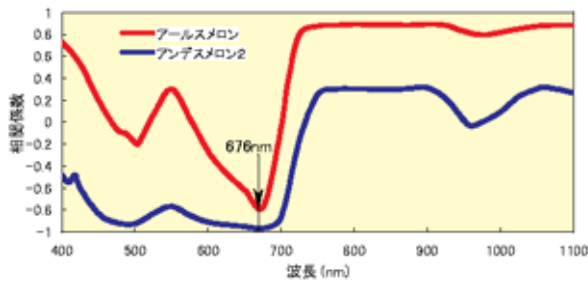


図7 メロン糖度の相関スペクトル

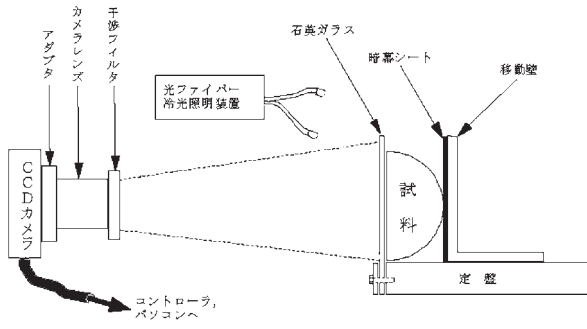


図8 分光画像取得装置

ラツキがあることも指摘されている。また、糖の蓄積過程が明らかになれば、新たな品質向上への取り組みも期待できる。そこで、これまでポイント測定であったこの近赤外分光法を、冷却 CCD カメラを用いた2次元画像測定に拡張し、各ピクセル毎に近赤外分光法にもとづく糖度推定を行い、メロン果実断面の糖の分布の可視化を試みた例を紹介する。

まず、糖度と相関の強い波長を決定するために、メロンの赤道部からφ20mmの円柱状に果肉を切り出し、内側果肉表面の相互拡散スペクトルを近赤外分光装置により400~1100nmの範囲で分光スペクトルを測定した。次に、そのスペクトル測定をした部分を厚さ2mmほど削り取り、果汁を絞ってデジタル糖度計でBrix糖度を測定した。同様に、果肉の内側から外側に向けて、スペクトルと糖度の測定を繰り返し、両者の単相関係数を波長に対してプロットしたのが、図7である。アンデス、アールスのいずれの品種も676nmで最大の逆相関をとることがわかった。これは、クロロフィルの吸収帯にほぼ一致し、逆相関であることから、クロロフィルの少ない所ほど糖度が高いことをあらわしている。

次に、分光画像を取得する装置を図8に示す。40万画



図9 画像処理の手順

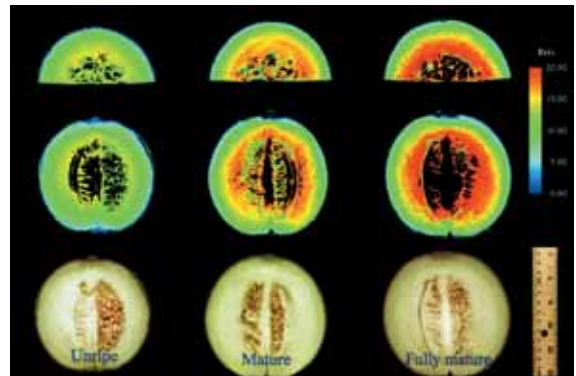


図10 メロン糖度の可視化画像

素 16bit 階調の冷却 CCD カメラにカメラ用アダプタを介してカメラレンズと干渉フィルタが取り付けられている。干渉フィルタは予備試験で確認した 676nm を中心波長とした半値幅 10nm のバンドパスフィルタである。照明は、光学的ノイズを押さえるために直流駆動のハロゲンランプを光源とする光ファイバー冷光照明装置を用い、影がでにくいように手前上方左右 2 カ所から被写体を照らしている。試料は、カメラとの焦点距離が常に一定になるように垂直に設定された石英ガラスに密着させ、暗幕シートを背景とする移動壁で押さえた。本装置で得られた画像は、各ピクセルが 16bit 階調 (65536 段階) の輝度値で表現されている。そこで、この輝度値を図 9 のようなプロセスで近赤外分光法の原理に基づき糖度値へ変換する。ここでやっている処理は、画像の補正をした後は、一画素ごとに忠実に近赤外分光法を適用し、実測した糖度値とのキャリブレーション式より、画素ごとに糖度の推定値を求めている。それをカラーマッピングすることで、図 10 のような熟度に応じた糖度分布が可視化できる。それぞれ、未熟果、適熟果、完熟果のメロンに対応している。いずれも収穫直後に測定したため、果肉はかためで、肉眼で見た目には糖度の違いはわからないが、可視化した像からは、日を追う毎にメロン内側に糖が蓄積していくのがわかる。また、場所によってかなり糖度が異なっており、糖度計等によるポイント測定においては、部位を特定して比較する必要があることが明らかになった。さらにいずれの図においても底部より頭部の方が糖度が高く、これは軟化が先に始まる底部の方が糖度が高いという一般通念が必ずしも当てはまらないことを示唆していた。

なお、この例では、実際に使われた波長は可視領域であるが、既に近赤外領域にある糖本来の吸収波長による可視化も試みられており^{13) 14)}、今後メロン以外の様々な農産物における糖の可視化へ発展させることが期待されている。

摘要

打音の伝搬速度がメロンの硬度と高い相関があることを明らかにし、伝搬速度を簡易に測定できる装置を実用化した。本装置により、メロンの生長時における硬度変化や堆肥投入量による日持ち性への影響を計測した。また、近赤外分光法をポイント計測から画像計測に拡張し、糖度の分布をカラーで可視化する手法を開発し、メロンの未熟果、適熟果、完熟果の糖度分布を明らかにした。

引用文献

- 1) 杉山純一. 1998. 打音によるメロンの非破壊計測—その原理から携帯用果肉硬度計の開発まで—. 農業および園芸. 73 (2) : 238-246
- 2) J. Sugiyama et al.. 1994. Firmness Measurement of Muskmelons by Acoustic Impulse Transmission. Transactions of the ASAE. 37 (4) : 1235-1241
- 3) J. Sugiyama et al.. 1998. Melon Ripeness Monitoring by A Portable Firmness Tester. Transactions of the ASAE. 41 (1) : 121-127
- 4) 杉山純一. 1994. 先端計測技術の植物への応用—ポストハーベストにおける事例—. 計測と制御. 33 (10) : 823-825
- 5) 杉山純一. 1999. 叩いて 10 年, 非破壊果肉硬度計の開発物語. 食品総合研究所ニュース. 54 (7) : 7
- 6) 林節男, 他. 1992. 打音の伝搬信号によるスイカの空洞果の検出. 富山県立大学紀要. 2 : 115-119
- 7) 杉山純一. 1992. 打音による青果物の品質評価. 食糧—その科学と技術—. 30 : 43-55
- 8) 林節男, 他. 1994. 打音の伝搬特性による青果物の品質評価. 富山県立大学紀要. 4 : 178-187
- 9) 林節男, 他. 1999. 打音の伝搬速度による青果物の鮮度と加工度合評価—キュウリとキーウィフルーツの場合—. 富山県立大学紀要. 9 : 87-92
- 10) J. Sugiyama et al.. 2001. Application of Non-destructive Portable Firmness Tester to Pears. Food Sci. Technol. Res.. 7 (2) : 161-163
- 11) 杉山純一, 他. 2001. メロンの糖度分布の 3 次元可視化. 日本食品科学工学会誌. 48 (4) : 263-267
- 12) 岩元睦夫, 他. 1994. 近赤外分光法入門. 幸書房 : 40-95
- 13) M. Tsuta et al.. 2002. Near-Infrared Imaging Spectroscopy Based on Sugar Absorption Band for Melons. J. Agri. Food Chem.. 50 (1) : 48-52
- 14) 蔦瑞樹, 他. 2002. ハイパースペクトルシステムによる近赤外分光イメージング手法, ~メロン糖度分布の可視化事例~. 映像情報メディア学会誌. 56 (12) : 2037-2040