微小振動による青果物の接触硬度測定システムの開発

乙部和紀*・杉山純一*・菊池佑二*

Firmness Measuring System of Fruits and Vegetables with a Light-Contact Vibrating Probe

Kazunori OTOBE*, Junichi SUGIYAMA* and Yuji KIKUCHI*

* National Food Research Institute, Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305

A system consisting of a probe, a vibrator and displacement sensors, and a servo analyzer was developed to evaluate firmness of fruits and vegetables nondestructively. The probe whose top has spherical surface was set with initial loading force of 5 gf to a sample. The sample was vibrated with multi-sine wave which has the frequency ranged from 20 to 200 Hz. Both the displacement (input) and force (output) signals were measured at the same probe and transferred to the servo analyzer. A transfer function was calculated by the servo analyzed. With theoretical consideration, proposed that anti-resonant frequency, f_n , could be used as an index of firmness. The relationship between f_n and dynamic modulus, G' , was examined in model specimens made of silicone rubber, which gave a logarithmic relationship with a correlation coefficient of 0.930. As an application to fruits and vegetables, tomatoes and strawberries in several storage conditions were measured by this system. In addition, conventional penetration test was also carried out to each sample. The initial force-displacement rate, w/d , which is equivalent to elastic modulus, was determined by the penetration test. There was the logarithmic relationship between f_n and w/d , which is the same as the model specimens' we observed, and the correlation coefficient was 0.899. These results indicate that this system is available for the easy and intact firmness evaluation for fruits and vegetables. (Received May. 31, 1993)

農産物の力学的特性測定法は、過去において様々な研究がなされ¹⁾²⁾、その重要性は農産物の輸入自由化と相まって益々増大している。しかし、実用性という観点でみると、迅速性や簡便性に重点が置かれ、非破壊法²⁾であることが必要条件となることから、困難を極める。そこで、最近の工学技術を用いて過去の知見を異なった視点から捉え直し、新しい(非破壊的な)手法を開発する研究が見受けられる。最近の例では、HIT カウンタ³⁾や打音解析による熟度あるいは空洞果判定法⁴⁾⁵⁾等が挙げられる。

著者らは、柔らかい青果物の力学的特性測定という点から、研究を始めるに当たって振動励起法⁶⁾に着目した。

これは、試料全体を加振して共振周波数を求め、果肉硬度あるいは熟度の指標とする手法である。過去にリンゴなどの硬い青果物に適用されており⁷⁾、まるごと測定できるという点では非破壊法としての要件を備えている。しかし、このままでは迅速性・簡便性などに問題があるため、青果物全体の力学的特性を定性的に調べる手法に留まっていた。加えて、加振部と検出部が分離しているために試料の大きさや形状が影響するとともに、柔らかい試料の場合には、その固定法にも問題があった。

そこで著者らは、日常的に柔らかい青果物の鮮度や熟度を吟味する際に、手で軽く触った感触(表面の力学的特性)で判断していることに着目した。この場合、人間

* 農林水産省食品総合研究所(〒305 茨城県つくば市観音台 2-1-2)

は青果物の大きさや重さをいちいち考慮して「硬い」「柔らかい」という判断をしているのではなく、単に触った指先の応答で判断しているだけである。これを機械に置き換えれば、正確さと定量性を備えた硬さ測定システムを実現できると考え、局所的に微小な変位を加えて、同一部分にて微弱な反力を測定するシステムを構築した（以下、接触硬度測定システムと呼ぶ）。また、本システムにより果皮部の力学的応答特性を伝達関数⁸⁾で表し、その挙動と青果物の硬さ指標の関連性を検討した。さらに、Voigt 型の力学的粘弾性体モデル⁹⁾の伝達関数と測定結果の対応から、硬さ指標の理論的な裏付けを試みた。

実験装置および方法

1. 測定原理

青果物の力学的モデルとして、バネとダッシュポットを組み合わせた様々なモデルが提案されているが、基本はバネとダッシュポットを一つずつ並列または直列に組み合わせた2要素モデルである。3要素以上のモデルは要素の係数決定の自由度が大きいため、測定データに合わせたモデルを作り易い反面、各要素の係数と現象との対応付けが難しくなる。したがって、本報では周波数範囲を限定することで時定数の異なる要素の寄与を無視できると考え、単純なモデルによる検討を行った。

Fig. 1 のような力学的モデル (Voigt モデル) の試料に正弦波状の変位を周波数掃引しながら加えると、各要素の定数によって決まる周波数において、質量 m に加わる力の振幅が増大したり減衰したりする。ここで、 k は弾性定数、 c は粘性定数を表し、それぞれ弾性率、粘性率に対応するパラメータである。 k_1 は測定器側の力学的要素、 k_2 および c は試料側の要素を表している。

Fig. 1 Schematic diagram of the dynamical model consisting of a Voigt body, a mass and an elastic element

m は、荷重検出器の検出部および試料の振動に関与する部分の質量を合わせたものである。また、 x_i は加えた変位、 x は質量の変位、 p_o は荷重検出器の出力を表しており、それぞれ時間を変数とする関数である。

この力学系の質量 m に関する運動方程式は次式のよう表される：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 (x_i - x) - k_2 x - c \frac{dx}{dt} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$p_o = k_1 (x_i - x) \quad \cdots \cdots (2)$$

次に (1), (2) 式について、初期値ゼロとした場合のラプラス変換をほどこすと、

$$H(s) = \frac{P_o(s)}{X_i(s)} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \cdot \frac{T_1^2 s^2 + 2\zeta_1 T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + 2\zeta_2 T_2 s + 1} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\zeta_1 = \frac{c}{2\sqrt{mk_2}}, \quad \zeta_2 = \frac{c}{2\sqrt{m(k_1 + k_2)}} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{k_2}}, \quad T_2 = \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}} \quad \cdots \cdots (5)$$

と表される。ただし、 $s = j\omega$ (ω は角周波数、 j は虚数単位) であり、 P_o 、 X_i は、 p_o 、 x_i をラプラス変換したものである。 $H(s)$ は力学系に与えた変位 X_i を入力、その結果生じたバネ k_1 の伸縮力 P_o を出力としたときの力学系の伝達関数と呼ばれる。また、 $H(s)$ は振動性2次要素を分母と分子に組み合わせた形をしており、 T 、 ζ はそれぞれ添え字で示された要素の時定数及び減衰率と呼ばれる。この関数は、 $s = j\omega$ を代入して極座標表示に書き換えることにより、増幅率を表す関数と入出力位相差を表す関数の積で表され、一般的に増幅率の常用対数をとったものをゲイン、入出力位相差を角度で表したものを位相と呼び、Bode 線図において周波数特性を表す際に用いられる⁸⁾。

$H(s)$ のゲインは、 $\omega T_1 = \Omega_1$ 、 $\omega T_2 = \Omega_2$ と置き、常用対数を Log で表すと、次式のように表される：

$$\text{Log} |H(\omega)| = \text{Log} \{1 - \Omega_1^2\}^2 + (2\zeta_1 \Omega_1)^2 \} - \text{Log} \{(1 - \Omega_2^2)^2 + (2\zeta_2 \Omega_2)^2\} \quad \cdots \cdots (6)$$

したがって Bode 線図上では、

$$\omega = 2\pi f_n = T_1^{-1} = \sqrt{\frac{k_2}{m}} \quad \cdots \cdots (7)$$

で極小になり、 $\omega = T_2^{-1}$ で極大となる。 T_2 は力の振幅が極大を示す通常の共振点であるのに対して、 T_1 は振幅の極小点であることから反共振点と呼ばれる。(4) 式の ζ は $\omega = T_1^{-1}$ 、 T_2^{-1} における共振の鋭さを表して

おり、 ζ が 1 より小さいほど、共振の幅が狭く、ゲインの大きな鋭い共振が得られる。

(7) 式より明らかなように、試料の弾性定数 k_2 と反共振周波数 f_n の 2 乗は比例することから、本報では f_n を青果物の硬さ指標に用いることを提案している。

2. 実験装置

試作器のシステム構成を Fig. 2 に示す。構成要素の概要は、動電型加振器、デジタル・スペクトラム・アナライザ (R 9211 C, アドバンテクト, 以下 DSA と略す)、変位及び荷重検出器 (どちらも UT-100 GR, ミネベア)、ストレイン・アンプ、変位信号発生器 (DSA に内臓)、電力増幅器、直流電圧計、微動装置などからなる。加振器の振動子には荷重検出器が取り付けられており、振動子の変位により生ずる接触圧力の変化を検出している。荷重検出部の試料に接触する部分 (以下換触子と呼ぶ) には、接触面形状を変えて測定可能なように、取り外し可能なジェラルミン製の円柱が取り付けられている。また、振動子の変位検出は支持台に固定された変位検出器 (検出部が振動子の他端に結合されている) で行っている。さらに、初期接触圧力の調節は、荷重検出器からの直流信号を電圧計で読み取って、微動装置で行っている。各検出器からの信号はストレインアンプで増幅され、交流信号成分のみ選択的に DSA の A・B 両チャンネルに入力される。

本システムの特徴として、加振器が一定周波数域内の周波数成分のみを均一に含んだ信号 (マルチサイン信号) で駆動される点が挙げられる。これにより周波数掃引と

同じ効果が得られると共に、掃引時間を要しないので迅速な測定が可能となっている。

また、従来の振動励起法との比較では、従来法は検出部と加振部の位置が分離しており、測定対象物に対して入力と反対側で出力を検出する方式が採用されていた。しかし、この方法では果実全体の振動を観察しているため、果重や大きさ等のスケールファクタが既知である必要があった。それに対して本システムは入力部と検出部が同一箇所であり、加えられる振動エネルギーも微弱である。したがって、減衰の大きな柔らかい試料では局所的な力学的特性のみを観察していることになるため、スケールファクタや試料の固定法に依らない測定が可能である。

3. データ処理方法

DSA に入力された信号は A/D 変換され、そのデータをもとに伝達関数が求められる。従来法は、検出器からの信号をフーリエ変換した周波数特性を、そのまま青果物の力学的特性として用いていたため、加振器の周波数特性も含まれていた。それに対して、伝達関数は入力と出力の比であることから、加振器の特性が相殺されて振動子と青果物表面との力学的相互作用のみを抽出できるという利点がある。また、青果物に初期接触圧力として一定の変形を加えると組織の流動性により応力緩和が生じるが、これは周波数特性上、極めて低周波数の振動現象とみなせる。この点を考慮して、本システムでは 20 Hz 以上の交流成分のみを測定対象とすることにより、応力緩和の影響を取り除く工夫が成されている。

Fig. 2 Schematic diagram of the firmness measuring system

4. 試料

(1) モデル試料

測定対象の力学的特性判別が可能であることを確認するため、モデル試料として主剤・硬化剤分離型のポッティング用 RTV シリコンゴム（信越化学，KE 108 RTV）を用いた実験を行った。RTV ゴムの硬化剤（同，CAT-108）の量を変えることにより、硬さの異なる試料 A～D 及び F の 5 種類のモデル試料を作製した。また、試料 E はシリコンゴムと性状の異なる試料として、同形状のブチルゴム製試料を作製した。試料形状は高さ 30 mm、直径 20 mm の円柱状に成形され、24 時間かけて硬化させた後、密閉容器内で 48 時間放置して安定させたものを使用した。さらに、接触子形状や試料に対する接触子角度、初期接触圧力などの測定条件を検討するため、接触面が平坦な円板状試料（直径 50 mm、高さ 15 mm）を RTV ゴムで同様に作製した。

(2) 青果物

本システムの青果物への応用例として、市販のトマト及びイチゴについて検討した。試料は熊本県産完熟トマト（品種名：桃太郎）21 個と栃木県産完熟イチゴ（品種名：とよのか）14 個を用い、それぞれについて貯蔵温度及び処理時間を変えることにより、硬さの異なる試料を得た。トマトの場合、手で触って大まかに硬さの異なる 3 つのグループに分け、中間の硬さのグループはより軟化させるために 6 日間 15℃ の環境に貯蔵してから実験に供試した。一方、イチゴは同一ロットの試料を無作為的に 7 個ずつ 2 つのグループに分け、それぞれ 5℃ と 15℃ の環境にて 1 日貯蔵した後、実験に供試した。

試料の固定法は、押せ傷が生じないように、中央にすり鉢状の穴をあけた木製の台を試料台上に置き、試料を置いただけで保持されるよう工夫した。

5. 実験方法

(1) モデル試料による確認試験

本システムによる測定に先立ち、微小体用動的粘弾性測定器（レオログラフマイクロ，東洋精機）でモデル試料の動的粘弾性パラメータ（動的弾性率，動的損失，損失正接）を測定し、各試料の力学的特性の参照値とした。測定は、縦振動モード，振動数 20 Hz，振幅 40 μm の設定で、試料下面と加振部，及び試料上面と検出部をそれぞれ瞬間接着剤で固定して行った。

次に本システムによる測定条件の検討として、接触部形状による測定の再現性を吟味した。接触部が平坦な円柱状（直径 2.0 mm）と球状（直径 3.15 mm）の接触子を用意し、各々の試料に対する接触子角度及び初期接

触圧力を変えて測定条件検討用モデル試料の測定値変動を調べた。この際、接触子角度を変えられるように、試料をマグネットスタンドに取り付けて試験台上に固定した。加振器入力電圧は 0.02 V（変位にして約 3.6 μm ）に固定し、初期接触圧力を 1～4 V（荷重にして約 2.5～10 gf）の範囲で均等に 4 段階に変化させて測定した。このときの初期接触圧力の偏差は、 ± 0.05 V の範囲で設定した。

これらの実験により最適測定条件を決めてから、次に硬さの異なる試料（A～F）の測定を行った。試料は試料台に立てた状態で瞬間接着剤により固定し、試料に対して垂直に接触子をあて、試料側面の中央部を測定した。

(2) 青果物の測定

試料側面・最大径の部分で、かつ試料の縦方向の中心軸に対して相対する 2 ケ所を本システムにより測定した。測定後、破壊試験による硬さの参照値として、同一箇所においてプランジャ貫入試験を行った。貫入試験にはクリープメータ（RE-3 305 型，山電）を用い、破断荷重測定モードにより測定した。測定点が中央になるように果柄部から果頂部を通る切断面で試料を 2 分割し、試料台に切断面を下にして設置した試料に対して貫入試験を行った。プランジャはテフロン製で、トマトでは直径 2 mm、イチゴでは、柔らかいために得られる信号が弱いことを考慮して、直径 5.5 mm のものを用い、測定範囲が最大で 2 kgf のロードセルにて測定した。切断面に対して垂直に移動速度 0.5 mm/s，貫入深さ 10 mm で行い、接触から停止までの変位と荷重を記録した。これらのデータから、硬さ指標として、試料接触時点より 1 mm 付近での荷重 w を変位 d で除した値 w/d と、破断時の最大荷重 w_m を用いた。ここで、 w/d は試料表面近傍での弾性係数を意図したものである。

以上 (1) および (2) の測定は、すべて室温（20℃）のもとで行われた。

実験結果及び考察

1. 測定条件の検討

(1) 伝達関数の確認

測定された変位-荷重信号から計算した伝達関数のゲイン及び位相特性を Fig. 3 に示す。20～500 Hz までの周波数範囲で測定した結果、ゲイン特性の 60 Hz と 300 Hz 付近に反共振点及び共振点を表すピークが確認された。また、位相特性においても反共振点並びに共振点付近で位相が 180 度近く反転していることが図から読み取れる。ただし位相特性から反共振周波数 f_n を決定

Fig. 3 An example of transfer function of silicone rubber

するのは難しいため、本報ではゲイン特性に着目して検討した。

(2) 接触角度、接触圧力の影響

試料形状が平面でないために、試料の置き方により接触角度が変化するので、接触角度による f_n の変動を、接触子の表面形状が平面と球の場合について調べた (Fig. 4)。図より明らかなように、平面状接触子では接触角度による変動が大きいものに対して、球状ではほとんど影響がみられない。

この理由は、半空間弾性体の境界平面に剛体を押圧した際の圧力分布の違いによるものと思われる。つまり、Boussinesqu の理論¹⁰⁾に基づくと、平面状接触子を対象物に押圧した場合、接触面の周縁部において圧力最大となるような圧力分布を生じる。このため、接触角度の変化等により接触子表面が均一に接触していない場合には、検出される接触圧力が極端に変化する。したがって、同じ接触圧力で測定していても、実際は接触の状態が異なるため、反共振状態が変化し易い。一方、凸体同士の接触圧力を扱った Hertz の理論¹⁰⁾より、球状接触子の場合には、接触面周縁部での圧力がゼロとなる圧力分布を生じる。このため、接触の仕方により検出される圧力に変化が生じないので、接触圧力を同じにすれば同じ接触状態を実現できる。ただし、球状接触子の場合でも、接触角度が大きすぎると圧力検出方向以外の圧力成分が増大して、平面状接触子の場合ほど極端ではないが、見かけの圧力が変化してしまう。したがって、青果物を測定する際もできるだけ接触子と試料表面が垂直な状態で測定することが望ましい。

次に、初期接触圧力を変化させた場合の f_n の変動について、どちらの接触子でも接触圧力の増加に伴って

Fig. 4 Effect of contact conditions on f_n

○ : Spherical contact probe
□ : Flat contact probe

f_n が増加していることがわかる (Fig. 4)。この理由として、接触圧力の増加により接触面積が増加するため、単位面積あたりの弾性率は同じでも接触面全体としての弾性率は増加すると考えられる。したがって、同じ接触圧力下で比較する必要があるため、圧力検出信号の S/N 比も考慮して、初期接触圧力は 5 gf 程度が適当であると思われる。

以上の結果から、以降では球状接触子を用いて初期接触圧力を 5 gf に設定して検討を行った。

(3) 試料の大きさの影響

スケールファクタの影響を調べるため、円柱状モデル試料 (D) の高さを 20 mm 及び 10 mm に変えて f_n の変化を調べた。測定は、円柱状モデル試料の場合と同様に行った。

その結果、 f_n の変動幅が ± 1 Hz 程度であることを確認できたことから、本手法はスケールファクタの影響を受けないことが示された。

2. モデル試料の力学的特性との対応

Fig. 5 は各モデル試料の動的粘弾性パラメータをプロットしたものである。動的弾性率 (E') に関しては約 0.1~1.5 MPa の間でほぼ等間隔に異なる物性値の試料が得られており、動的損失 (E'') や損失正接 ($\tan \delta$) についても、材質の異なる試料 E を除いてほぼ一定の傾向にある試料であることが示されている。試料 E は、感覚的には D と F の中間の硬さの試料であったが、 E'' や $\tan \delta$ が極端に他の試料より大きく、全く異なった性状であることがわかる。 E'' や $\tan \delta$ が大きい (粘性要素が大きい) 物質は、振動させたときのエネルギー損失 (運動エネルギーから熱エネルギーへの転換) が多いことを表す¹¹⁾。別の言い方をすれば、1. 測

Fig. 5 Dynamic viscoelastic characteristics of silicone rubber at 20 Hz

- : Dynamic modulus
●: Dynamic loss
□: Loss tangent

Fig. 6 Examples of frequency dependence of gain in model specimens

--- A D — E

定原理に述べたように E'' が大きいとは(4)式において ζ が大きいことであり、したがって試料 E の反共振ピークの高さが他の試料より小さく、ピーク幅の広い特性であることが予想される。Fig. 6 は試料 A, D および E の測定を行った結果であるが、明らかに試料 E は A, D に比べてピークが小さく、幅の広い特性を示しており、 $\tan \delta$ が同程度の A, D はピーク形状がほぼ同じであることがわかる。

以上のことから、本システムの測定結果は動的粘弾性の結果と同じ傾向にあることが示された。

次に、 E' と f_n との関係を Fig. 7 に示す。測定周波数範囲内では E' の周波数特性の変化率は充分小さい

Fig. 7 Correlation between dynamic modulus and f_n in model specimens

Contact force:

○: 5.0 gf; □: 7.5 gf; ×: 10 gf

—: Logarithmic approximate curve in 5.0 gf data

と考えると、(7)式の k_2 に E' をあてはめて考えることができる。その場合、質量は変化しないと仮定すれば、 f_n は k_2 の平方根に比例するという関係が得られる。それに対して、初期接触圧力が 5 gf における測定データを最小二乗法で近似した結果では、(8)式のように対数近似した場合が最も高い相関を示した ($r=0.930$)。

$$f_n = 15.89 \times \ln(E' \times 10^{-5}) + 21.56 \dots \dots \dots (8)$$

(7)式と(8)式の違いは、測定条件の検討の項でも触れたように、測定中の接触面積の変化及び試料の振動部分の質量変化に由来するものと考えられる。しかし E' と f_n の間に一義的な関係が見いだされ、本システムは硬さの比較を目的としていることから、実用上の問題はないものと思われる。

一方、共振点の周波数を試料全体で比較した場合、変動幅が 6 Hz 程度であった。共振周波数は測定原理に基づけば、(5)式から検出器の弾性定数 k_1 と試料側の弾性定数 k_2 の和の 2 乗に比例すると考えられる。ただし、 k_1 が k_2 より極端に大きい場合は k_2 の影響は現れにくく、実験結果もこれを裏付けているものと思われる。

3. 青果物の測定結果

(1) トマト

伝達関数の測定例を Fig. 8 に示す。実線は触った感触が硬いグループの試料、点線は柔らかいグループの試料の測定結果を表し、モデル試料の場合と同様に 100

Fig. 8 Examples of frequency dependence of gain in tomatoes

— Hard Soft

Hz 付近に反共振点を示すピークが生じている。また、各試料とも 50 Hz 付近にモデル試料ではみられなかった弱いピークが現れているが、ピークの位置が同じことから試料の特性に依らない（例えば試料台の共振など）振動を捉えていると思われる。従って硬さの指標とする反共振点として、ゲインが最小となる周波数を f_n とした。

f_n 近傍の特性を見ると、硬いグループの試料は柔らかいグループの試料と比較してピークの幅が狭く、全体的にゲインが大きい方向にシフトしている。モデル試料による実験結果に基づけば、ピーク幅は(7)式の w/d と関連しているので、青果物の粘性に関わる品質の指標として利用できる可能性がある。

Fig. 9 は硬さの違うトマトを、3種類の硬さ指標で表したものである。 f_n と w/d の場合、柔らかいグループは硬いグループに比べて値が小さい傾向が見られるのに対して、 w_m には一定の傾向が見られない。この理由として、各指標の表している力学的特性を考えてみると、 w/d は破断点より前の圧縮変形を表すことから、果皮近傍の圧縮弾性率的な値であると考えられる。一方の w_m は果肉の圧縮強度と果皮の破断強度を含んだ値と見なせる。従って、 w/d は組織の破壊を伴っていることから厳密には弾性率と異なるが、弾性に関する指標である点で f_n と関連性があると見なせる。それに対して、果肉が柔らかいものは w_m に果皮強度の影響がでやすいことから、他と異なる傾向が見られたと思われる。

次に、Fig. 10 は各試料の w/d に対して f_n をプロットしたものである。モデル試料の場合と同様に対数近似を行ったところ、次式の関係が得られた ($r=0.899$)。

Fig. 9 Difference of firmness indicated by the several indexes in tomatoes

■ Hard
▨ Soft
□ After 6 days storage at 15°C

Fig. 10 Correlation between f_n and w/d in tomato

— : Logarithmic approximate curve

$$f_n = 17.307 \times \ln(w/d) - 2.379 \quad \text{.....(9)}$$

このように w/d と f_n の関係が(8)式と同じ関数形で近似でき、弾性的指標 (w/d) と高い相関を示すことから、モデル試料と同様に青果物においても弾性的要素の違いを f_n により測定できることが示された。

(2) イチゴ

各指標による比較を行った結果を Fig. 11 に示す。貯蔵前後の f_n で比較すると、5℃ 貯蔵ではほとんど変化していないのに対して、15℃ では明らかに変化していることがわかる。他の指標で比較すると、トマトと同様に w/d では明かな違いがみられるが、 w_m ではほとんど差がない。この結果から、イチゴの場合も w/d に現れている変化が f_n に反映されていると考えられる。

(3) 青果物の種類による違い

種類別に各指標の大小を比較すると、 f_n では明らかにトマトよりもイチゴの方が大きい値を示している。それに対して w/d や w_m で比較すると、トマトとイチゴの大小関係が f_n の場合と逆転している。このように青果物の種類により貫入試験と f_n の大きさが異なる原因は、次のように考えられる。まず、果肉組織の特性としてイチゴは押せ傷が生じ易い（組織が破壊し易い）のに対して、トマトは弾力性があり、押せ傷が生じ難い（組織が破壊し難い）。一方、変形様式として、微小変形（数 μm ）の範囲では弾性変形のみであるのに対して、貫入試験では (1) で述べたように破壊を伴う塑性変形と弾性変形の両方が生じている。したがって、トマトとイチゴの場合には変形様式により弾性と破壊の寄与の仕方が極端に違って現れたものと考えられる。

Fig. 11 Difference of firmness indicated by the several indexes in strawberries

▨ storage at 5°C
■ storage at 15°C

以上のことから、組織の性質が異なる青果物間の硬さを f_n で比較するには、様々な測定条件における知見の蓄積が必要であると思われる。しかし、モデル試料を用いた実験や同種試料間の比較試験により、種類が同じ青果物であれば非破壊的な力学的特性指標として利用可能であることが示された。したがって、本システムは貯蔵・流通時における青果物の力学的特性の経時変化（追熟・鮮度低下）などに関する知見を得る手段として有効であると考えられる。

要 約

微小な振動を局所的に加え、柔らかい青果物表面の力学的特性を傷つけずに測定する装置を試作した。力学的特性の指標としては、試料表面の振動変位を入力、同じ接触子にて検出された応答圧力を出力とした伝達関数を用いた。はじめに力学的特性と指標との対応を調べるため、動的粘弾性測定により特性が既知のシリコンゴム製モデル試料を用いた実験を行った。さらに青果物の実測例としてトマト及びイチゴの表面硬度測定を行った。以上の実験の結果、次のような知見が得られた。

(1) Voigt 型の力学的粘弾性体モデルから導かれる共振点及び反共振点をモデル試料による実験により確認した。

(2) 反共振周波数 f_n は、球状接触子で測定した場合、接触面が平坦なものに比べて試料に対する接触角変動の影響が小さいことから、実用上は前者を用いるのが妥当であると判断された。さらに、同一の材料で大きさの異なるモデル試料により大きさの影響を確認した結果、大きさの違いによる f_n の変動はわずかに ± 1 Hz 程度であった。

(3) 動的弾性率 (20 Hz) の異なるモデル試料について、 f_n の挙動を調べた結果、動的弾性率と f_n の間に対数的な関係が認められた ($r=0.930$)。

(4) トマトを測定した結果、モデル試料と同様の周波数特性が観察された。また、硬さ及び貯蔵温度の異なるトマトについて、試料接触から 1 mm 付近での荷重 w を変位 d で除した値 w/d と f_n の間に、モデル試料と同様に対数的な関係のあることが明かとなった ($r=0.899$)。

(5) 同一ロットのイチゴを無作為的に 2 つのグループに分け、それぞれ 5℃ と 15℃ で 1 日貯蔵した後、トマトと同様の測定を行った。5℃ では貯蔵前後の f_n に変化がなかったのに対して、15℃ では f_n が低くなることを確認した。

文 献

- 1) 宮脇長人・矢野俊正：食品の物性 No. 6, 食品資材研究会編, p. 115 (1980).
- 2) 山本博道：食品の物性 No.8, 食品資材研究会編, p. 169 (1982).
- 3) 鷹尾宏之進：機械化農業, 6, 26 (1990).
- 4) 林 節男・杉山純一・乙部和紀・菊池祐二・臼井支朗：日食工誌, 39, 465 (1992).
- 5) 原口和男：農流技研会報, 117, 13 (1989).
- 6) 岩本睦夫：食品産業とセンサー—その開発と応用—, 食品産業オンラインセンサー技術研究組合編, (光琳), p. 114 (1991).
- 7) FINNY, E.E., JR.: *Trans. of the ASAE*, 13, 177 (1970).
- 8) 増淵正美：改訂自動制御基礎理論, (コロナ社), p. 21, p. 122 (1986).
- 9) 種谷 真一：食品の物理, (槇書店), p. 225 (1989).
- 10) MOHSENIN, NURI N. (林 弘通監・訳)：食品の物性, (光琳), p. 279 (1983).
- 11) 中川鶴太郎・神戸博太郎：レオロジー, (みすず書房), p. 416 (1970).

(平成 5 年 5 月 31 日受理)