

# 共振振動を用いた青果物の非破壊熟度判定技術と装置の開発

広島大学大学院生物圏科学研究科 教授 櫻井直樹

未熟な果実は硬く、過熟な果実は軟らかい。適熟すなわち食べ頃の果実には適度な硬さがある。硬さは熟度を表すことが昔から知られていた。そこで、果肉に棒を差し込む破壊法が現場で利用されているが、測定した値はそのグループの熟度の目安を与えるだけで実際に売られる果実の熟度を示すことができない。そこで非破壊で果実の硬度すなわち熟度を知る技術と装置を開発した。果実に微弱な振動を低周波から高周波まで短時間で与え、果実が共振する周波数を決定した。この共振周波数から、非破壊で果実の硬度を正確に測定する技術が開発できた。また、小型で携帯できる共振測定装置を開発し、メロン、キウイ、スイカ、ブドウなどを測定した。これにより、追熟が必要なメロンやキウイでは、未熟な果実の共振周波数から食べ頃の期日を予測できることが分かった。また共振法を用いるとスイカの肉質の評価や病原菌によるナシの内部障害も判別できることが分かった。

## 1. はじめに

青果物の摂取はビタミンなどの栄養上の問題だけでなく、近頃は青果物に含まれる食物繊維が免疫強化作用を持ち、また腸内環境を整えるといわれており、我々の健康に大きく影響する。しかし、一方で青果物の品質の安定性は工業製品(品質保証率 99.99%)に比べると著しく劣る。つまり当たりはずれが多い。1990年代からその問題を解決するために、光センサーによる糖度の非破壊測定が広まった。光による選別は短時間で済むため、1秒間に5~6個のリンゴを選別できる。しかし、光センサーは光を透過する果実を対象に行なわれるので、光を通しにくいメロン、スイカ、アボカドなどの果実には使えない。また、その選別原理はあらかじめ作成した検量線によるので、検量線を毎年取る必要があった。なぜなら、年による気候条件などの微妙な生育条件の違いが果実に蓄積され、前年度の検量線がそのまま今年度に適応できないからである。また、酸度は熟度が進むにつれて減少し、余りにも酸が抜けてしまうと糖度が高くても美味しく感じない。そこで、酸度も光で測定する試みが多くなされたがうまくいかなかった。

## 2. 破壊による熟度の測定

糖度は熟度のひとつの指標ではあるが、過熟となっても糖度が急激に減少するわけではないので、過熟を見抜けない短所がある。そこで、酸の抜けを同じ方法で見られればそれを補完する事ができるので、研究が進められたが精度の良い光による酸度の測定方法は開発されなかった。

一方、トマトのように熟度と果皮色が連動するものは、色センサーを用いて熟度が判別できる。色センサーも非常に高速度で選別できるので、光センサーと同様に全品検査が可能である。しかし、キウイフルーツ、ラ・フランス、メロン、スイカのように熟度が果皮色にまったく現れない果実も多数存在する。

昔から、果実の硬さは熟度を知るよい指標であることが知られていた。マグネス・テイラー型の硬度計は、今日でも用いられており、なんと 1925 年に発表されている。図1のように、果皮を剥いて果肉をむき出しにし、そこに棒を手で突き刺し、そのときの差し込む力をメモリから読み取るものである。この方法は現在でも現場で使われているが、棒を突き刺すときのスピードが速いと高い目の値が出、ゆっくり突き刺すと低い目の値が出る。すなわち個人差がある。つまり、検査する人によって違いが生じる。また、破壊法なので、抜く取り検査をすることはできるが、同じ個体を時間を追って測定したり、全品検査をすることはできない。

### これまでの果物の硬さの計り方 (マグネス・テイラー硬度計)



皮をむいて、果肉に棒を突き刺す力を読み取る  
破壊法で測ると売れない、食べれない

1. 全品検査できない
2. 原始的・物理学にあっていない

図1 これまでの果物の硬さの計り方(マグネス・テイラー型硬度計)

### 3. 非破壊による熟度の測定

非破壊で青果物の硬度を測定する方法は、Abbott ら(1968)によって始めて報告された。彼女たちは、リンゴを吊るして一方からスピーカーで振動を与え、リンゴの振動を点対称の位置で検出した。低い振動数から高い振動数まで徐々にスピーカーの振動数(音の高さ)を上げていくと、特定の振動数(音程)でリンゴが激しく振動する。これを共振(あるいは共鳴)という。この共振する周波数を測定すると、柔らかいリンゴは共振周波数が低く、硬いリンゴは共振周波数が高かった。リンゴは吊るされているので、自由に振動するが、彼女たちの測定方法はスピーカーの振動をリンゴに与えながら、対称点にレコードのピックアップカートリッジを取り付けて振動を測るという極めて制御が困難な実験系であった。これを選果現場などで応用することはできない。また、振動を与えていると共振はいろいろな周波数で次々と起こるので、どの振動数を硬度測定の計算に用いるかが確定できなかった。後に、低い周波数から2番目の共振周波数を用いるのが正確な硬度を与えることが分かった(Terasakiら1995)。

### 4. 打撃による測定法

リンゴをいちいち吊るして計っている現場では使えないので、トレーに入れたリンゴを小さなハンマーで軽く叩いて、その振動から共振周波数を計算で出し、選別する方法がSchmulevichら(1996)によって報告された。しかしハンマーによる打撃によって振動が持続するのは数十ミリ秒で、この間に十分なデータを得ることができず、正確な共振周波数を取得することができなかった。

また、ハンマーによる打撃法は、モモ等の軟らかい果実の測定にはむかない。そこで、打撃と似ているが果物表面に空気を吹き付けて、そのときにわずかにへこむ凹みをレーザー測距計で測定する方法も開発された(Hungら、1999)。しかし、この方法でも結局空気を吹きつけた局所的場所の固さしか得られないので、全体の果実の硬度情報、すなわち果実の平均的な熟度を正確に計測することができなかった。また、果実を機械的に軽く圧縮してそのへこむ程度を測定するHIT-Counter(HITはHardness(硬度)、Immaturity(未熟)、Texture(歯応え)の略)も開発された(Takao & Ohmori, 1994)、しかし、へこませる範囲を果実の種類や熟度に応じてあらかじめ細かく設定しなければならない煩雑さがあったため広く普及するには至らなかった。

### 5. 非破壊非接触測定—レーザードップラー法

そこで、Muramatsuら(2001)は、果物を振動台の上に載せ、強制的に振動させ、その振動を果実の上部にレーザーを当てて反射してくるレーザー光とのドップラー効果を利用して測定する方法を開発した(図2)。この測定方法はレーザードップラー法と呼ばれる。レーザードップラー装置は工場などで振動を測定する装置として活用されている。加振器とは入力信号に応じて

振動する台を備えたものである。原理はスピーカーと同じである。加振器の台の上に対象とする果実を載せ、いろいろな振動数で振動させ、その果実の上部の振動をレーザー光で測定する。感度は 5nm で、極めて高い。リンゴの上部の振動と加振台の振動の差がリンゴそのものの振動となる。共振ピークは高速フーリエ解析 (FFT, Fast Fourier Transformation) を用いて検出した。

図2に示した方法のすぐれている点は、

- (1)非接触で振動が測定できる、
- (2)振動台(加振器)の振動を同時にモニターしているので、正確な対象物の振動解析ができる、

という点である。(1)に関しては、測定する物体に触れることがないので、自由に物体が振動している状態で正確に測定ができるというメリットがある。(2)の点も重要であった。つまり、制御装置から振動させるための信号を加振器に与えても、本当に加振器がその指令どおりの振動をしているかどうかをモニターする(調べる)という点である。これまでの方法では、振動させている加振装置を疑わなかったが、この方法はそれを疑ったわけである。実際にスピーカーでも小さなスピーカーは低い音の信号を入れてもその通りには震えない。逆に大きな直径のスピーカーでは、高音信号にはその通りに反応しない。

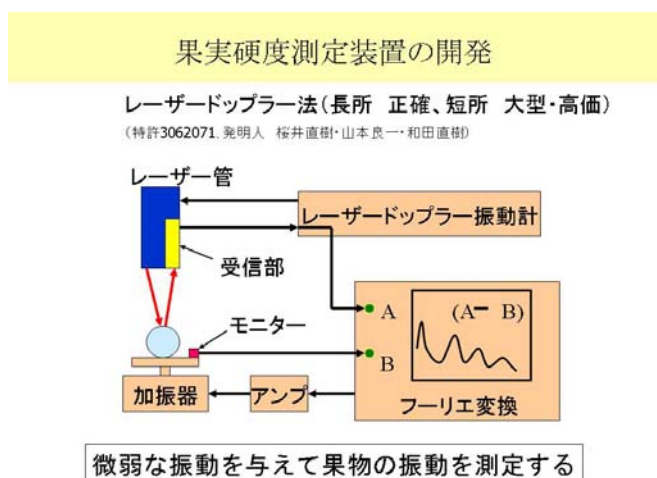


図2 レーザードップラー測定装置の概要図

## 6. 果実硬度の非破壊振動解析

加振器の信号を同時にモニターする方法では、リンゴの共振ピークが理論どおりの順番で得られる(図 3)ことが分かった(Terasaki ら、2001)。この図では、リンゴ(フジ)の共振ピークを示している。100Hz 以下のところに 1 次ピークが明瞭に出ているが、これは、果実の底部の局所的な情報しか反映していないことがのちに分かったので(Blahovec ら、2007)、通常は果実全体の硬度の計算には使わない。主にこれまで使われてきた共振ピークは 2 次ピークで、以下

の式から果実の硬度が計算できる(Cooke 1972)。

$$EI(\text{弾性指標}) = m^{(2/3)} * \rho^{(1/3)} * f_2^2$$

ここで、 $m$ は果実の重量、 $\rho$ は密度、 $f_2$ は第2共振ピークの周波数である。第2共振周波数で震えている果実は、大げさに言えば、ラグビーボールを縦にしたり横にしたりした状態で震えることが確認され(Terasaki ら 2001)、その振動理論によって上の式が導入された。

果実が柔らかくなると、共振ピークは左側すなわち低周波側に移動していく。つまり $f_2$ は減少していく。成熟中には $m$ はほとんど変化せず(実際は水分の蒸発により少しずつ減少する)、また密度も1から変化しないので、大きさがほぼ同じ果実ならば、第2共振ピークの周波数(第2共振周波数 $f_2$ )だけで果実の硬度変化が比較できる。また、同じ果実を何度でも測れるので、1個の果実の軟化状態を長時間にわたり追跡することができる。

例えば、メロンを収穫後に共振ピークを用いた非破壊振動法で硬度を測定すると、図4のようなになる。図4では、2つの品種のメロンのデータを載せている。縦軸は非破壊振動法で測った果実の硬度で横軸は収穫後の日数である。メロンはほぼ直線的に硬度が減少していく。そのスピードは、しかしながら、両品種で差がある。‘ベネチア’では硬度が10から6くらいになるのに3日くらいかかるが、‘雅春秋’では7日ほどかかる。つまり、‘雅春秋’のほうがゆっくり軟化していく。メロンの硬度を測定しながら、抜き取り検査をしながら実際に食べてみてその評価と硬度の関係を見たのが図5である。

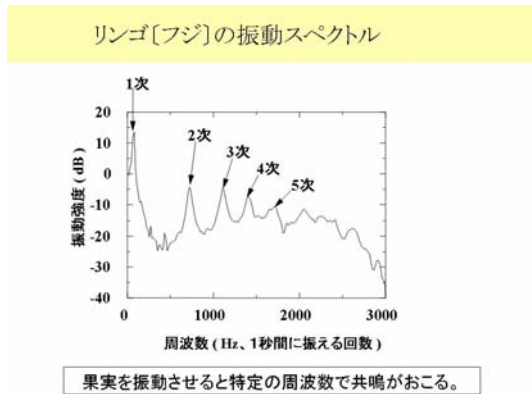


図3 リンゴ【フジ】の振動スペクトル

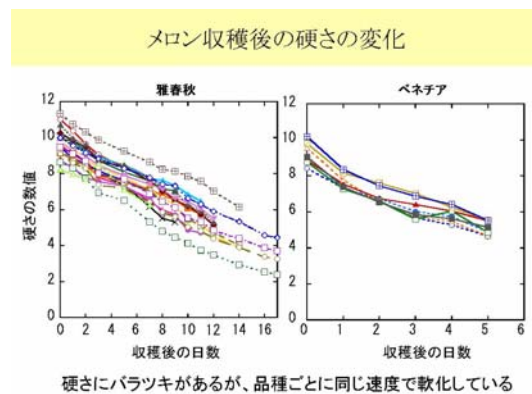


図4 収穫後のメロンの硬さの変化

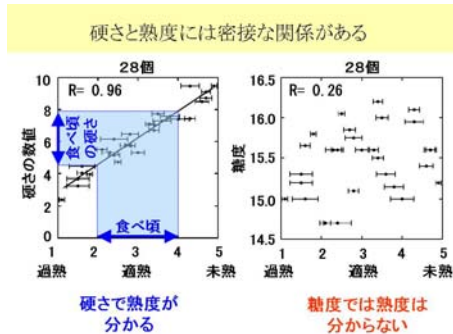


図5 メロンの硬さと熟度および糖度との関係

## 7. 果実硬度から食べ頃を予測する

図5の左の図は横軸に食味試験による適熟判定の数値をとり、縦軸には食べたときのメロンの硬度をとってある。これから分かることは、硬いメロンは未熟で、柔らかすぎるメロンは過熟で、適熟のメロンが示す硬度が存在するということである。つまり、硬度を調べれば熟度が分かる。この場合、5~8の硬度のメロンは切らなくとも適熟であることが予想できる。さらに、図4で示したように硬度の軟化は収穫後は直線的に減少するので、未熟なメロンの硬度を測れば、いつ食べ頃を迎えるかも簡単に予測できる。

図5の右図は食べたメロンの糖度を横軸にとり、硬度との関係を見たものである。糖度が高くとも低くとも食べたときの熟度とは無関係であることが示されている。しかし、注意すべきは収穫されたメロンの糖度はいずれも14.5度以上で十分糖度の高いメロンが収穫されていることである。収穫後はメロンの糖度はほとんど上がらないので、このようなデータになる。しかし、面白いことに、糖度が高くとも未熟なメロンは未熟と判断されている。これは、収穫後のメロンの食べ頃は、糖度が決めているのではないことを示している。

このようなデータを取るためのメロンの硬度を誰でも簡単に測定できる卓上装置を試作した(図6)。メロンを白い台に載せ、下から加振してメロンを振動させ、上に受振センサーを載せて第2共振ピークを自動的に検出し、硬度を自動的に計算するものである。この硬度と収穫後の硬度の減少速度から食べ頃に至る日数が計算できるので、メロンの食べ頃を示すシールを貼ることも可能となる。現場で使うためには、ノートパソコンを繋がず一体化した装置にすることが望ましい。

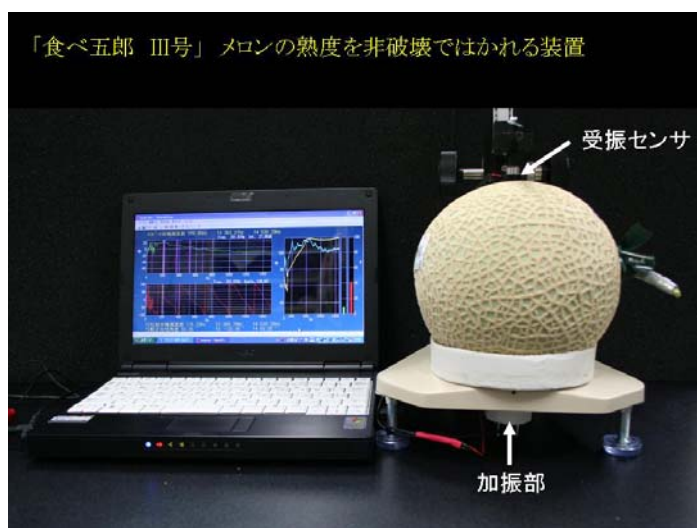


図6 「食べ五郎Ⅲ号」メロンの熟度を非破壊で測る装置



## 8. 非破壊測定の特長

このように非破壊で、果実の軟化現象を測定していると、興味深い事実が判明した。図7はキウイフルーツの硬度変化を個体別に詳細に測定したものである(Terasakiら、未発表)。キウイフルーツ(品種ハイワード)を収穫直後に熟成を開始させるためにエチレン処理し、その硬度変化を4週間にわたり追跡した。実際は100個近くを測定に用いたが、代表的な3個だけをプロットしている。収穫直後から測り始めたキウイフルーツは、すべてのキウイフルーツがほとんど同様な軟化パターンを1週間目までは示すが、そのあと大きな違いが現れる。あるもの(A)は、1週間経つと突然軟化スピードを速め、食べ頃硬度(青色の帯で示した)に2~3日で到達する。しかし、あるもの(C)は、しばらく軟化をせず、横ばいの状態が続き、2週間経ってからゆっくりと軟化を始める。(B)はその中間である。つまりキウイフルーツの軟化は2段階になっていることが分かった。最初の第1軟化ではすべてのキウイフルーツが同じように軟化するが、第2軟化に入るタイミングはバラバラである。ところが、収穫直後のキウイフルーツを低温(1度 C)で1ヶ月間保存してから室温に戻すと、この第2軟化のばらつきが抑えられ、室温に戻してから皆同じ4日目で食べ頃に到達する。注意すべきは、これまでのような個体をつぶし(破壊し)ながら硬度を測定する実験では、このような事実が判明しなかったことであ

キウイを一個ずつ測ると予想外のことが分かった  
(Terasakiら 2001年)

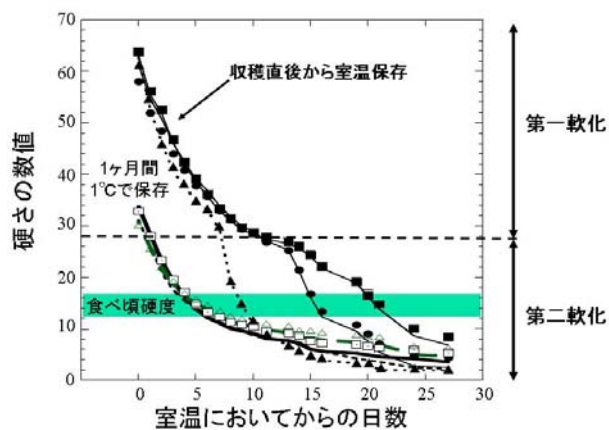


図7 キウイを1個ずつ測ると予想外のことが分かった

## 9. 共振法による内部品質の検定

さらに非破壊測定法は、果実内部の肉質の劣化をとらえることができる可能性がでてきた。図8は、2個のスイカの共振ピークを比較している。左は、肉質の良いスイカで、第2共振ピークから始まり高い周波数(第8共振ピーク)まで多くのピークが判別できる。ところが、鬆(ス)が入り砂っぽくなった果肉のスイカでは、第2ピークはかろうじて見えるが、それ以上のピークがほと

んど見えない。したがって、第2共振ピークの周波数だけでなく、それ以外の共振ピークにも果実の内部情報が含まれていることが分かる。

現在は栽培現場でも使えるような簡単で小型の振動測定装置を試作している(図9)。受振器と加振器は小さくなっており、両手で対象果実を挟むあるいは、下に加振器を置き、果実をその上に乗せ、測定できるようになっている。この装置でナシを計り、新しいことが分かった。

ナシ(幸水)は、樹上で生育中に病原菌が入り込み、果実を切ったときに芯が腐っている症状が現れることがある。これを、芯腐れ症と呼ぶ(図10)。種子の部分で腐れが収まっていれば、食べるときに種子の部分を取り取るので問題ないが、この症状が果肉に広がると問題となる。芯から腐り周辺部に拡大していくので、切らないとわからないことが大きな問題であった。幸水ナシに病原菌を接種して人為的に芯腐れ症を発生させ、共振法でその共振周波数を測定し、測定後にナシを半分に割って写真を撮り、芯腐れの部分の体積率を計算してプロットしたのが、図11である(Kadowakiら、投稿中)。第2共振周波数が500Hz以上のナシには芯腐れは体積率で5%以下とほとんどなく、500Hz以下のナシには大きな芯腐れが発見された。周波数500Hzを用いた場合の芯腐れ症の判別率は96.9%であった。芯腐れ症が共振法で分かる理由は、芯が腐るとそこが軟らかくなり、第2共振周波数が低下するためと考えられる。つまり、共振法で非破壊でナシの芯腐れが判別できるので、500Hz以上のナシは安心して出荷できることになる。

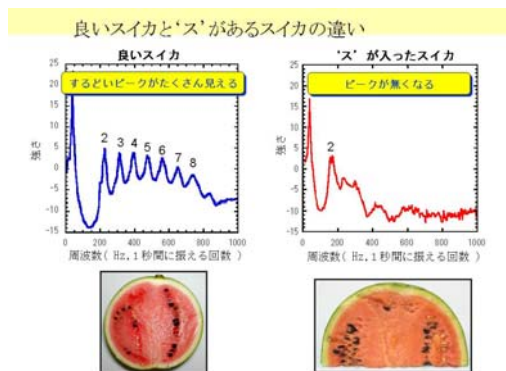


図8 良いスイカと‘ス’があるスイカの違い

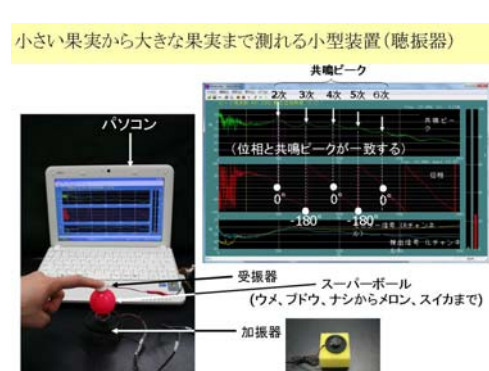
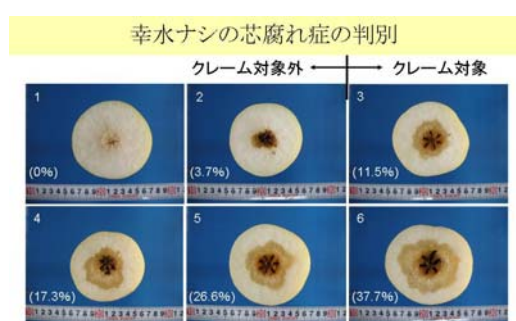


図9 大小の果実を測れる小型装置



果実の尻から病原菌が入るので、外からの見た目では分からない

図10 幸水ナシの芯腐れ症の判別

芯腐れの程度(体積%)と第2共振周波数の関係

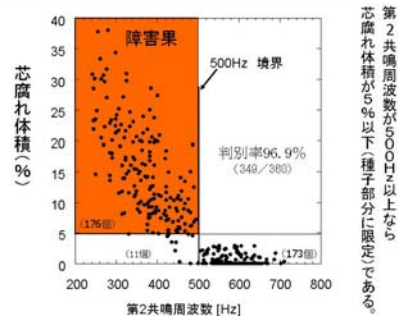


図11 芯腐れの程度(体積%)と第2共振周波数の関係



## 10.最後に

このように、振動共振法は果実の熟度や内部の肉質の評価を非破壊で判定できるので、判定したものを流通させることができる。将来この方法をさまざまな果実に適用し、青果物の食べ頃を消費者に正確に知らせれば、当たり外れのない青果物を流通させることができ消費者の満足度、購買意欲を高めることができる。また、青果物の品質が安定することにより小売店での廃棄率が低下し、売り上げ・利益率の増加などが期待できると考えられる。

### 参考文献

- Abbott, J. A., G. S. Bachman, R. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik (1968) Sonic techniques for measuring texture of fruit and vegetables. *Food Technol.* 22: 101-112.
- Blahovec, J., H. Akimoto and N. Sakurai (2007) Laser Doppler forced vibrology of soft agricultural products. *Applied Rheology* 17: 25111-1—25111-7.
- Cooke, J. R. (1972) An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Trans. ASAE* 15: 1075-1080.
- Hung, Y., S. E. Prussia and G. O. I. Ezeike (1999) Nondesutructive firmness sensing useing a laser-air-puff detector. *Postharvest Biol. Technol.* 16: 15-25.
- Schmulevitch, I., N. Galili and D. Rosenfeld (1996) Detection of fruit firmness by frequency analysis. *Trans. ASAE* 39: 1047-1055.
- Kadowaki, M., S. Nagashima, H. Akimoto and N. Sakurai (2012) Detection of core rot symptom of Japanese pear (*Pyrus phrifolia* cv. Kousui) by a nondestructive resonant method. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* (投稿中)
- Muramatsu, N., N. Sakurai, R. Yamamoto and D. J. Nevins (1997) Critical comparison of an accelerometer and a laser Doppler vibrometer for measuring fruit firmness. *HortTechnol.* 7: 434-438.
- Takao, H. and S. Ohmori (1994) Development of Device for Nondestructive Evaluation of Fruit Firmness. *JARQ* 28: 36-43.
- Terasaki, S., N. Wada, N. Sakurai, T. Yamanishi, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2001) Analysis of the vibration mode of apple tissue using electronic speckle pattern interferometry. *Trans. ASAE* 44: 1697-1705.