

# レザードップラー法を用いた果実粘弾性の非破壊測定

寺崎 章二

松下寿電子工業株式会社  
愛媛県西条市福武甲 247

## Non-destructive measurement of fruit visco-elastic property using a laser Doppler method

Shoji Terasaki

*Matsushita-Kotobuki Electronics Industries Ltd.  
247 Fukutake, Saijo, Ehime, Japan*

### 第1章 序 章

西暦2000年における全世界の果実生産は、リンゴ、ブドウ、バナナ、オレンジ類で、それぞれ6千万t強の生産があり、年々増加の一途をたどっている（FAO web site）。毎年、このように膨大な量の果実が市場に供給されるため、市場競争は年々激しさを増している。そのため、付加価値の高い果実、すなわち品質の良い果実を市場に供給する努力がなされている。果実品質には外部及び内部品質があり、大きさ、重量、色、形、傷などの外部品質の非破壊評価技術は、早くから確立されている。ところが、果肉硬度、糖度や酸度などの内部品質は外側では分からないため、非破壊で測定できる技術が望まれていた。近年、リンゴや蜜柑の糖度や酸度を近赤外線分析手法を用いて非破壊で測定する技術が実用化された（Kawanoら, 1992）。ところが、果肉硬度については、今日まで実用化されていない。本論文の目的は、果肉の硬度（粘弾性）の非破壊測定法を考察し、実用に供するための基礎技術を検討することにある。

### 第2章 果実の振動モードの解析

振動を利用して果実の粘弾性を測定する方法は、古くから研究されている（Clark and Mikelson, 1942; Nybom, 1962; Drake, 1962）。これらは概念的な報告や、工業材料の破壊試験をそのまま果実や食品に応用した研究であった。その後、Abbottら（1968）により、果実の粘弾性を非破壊評価する研究が報告された。彼らは、吊したリンゴの片方に振動を与え、反対側の振動スペクトルを測定した。その結果、リンゴの2次共振周波数が果肉弾性と強い相関を持つこと見出し、2次共振周波数 $f$ と果実質量 $m$ を用いた硬度指標 $f^2m$ を提案した。その後Finney（1970）は多数のリンゴで検証し、硬度指標 $f^2m$ の有用性を報告した。ところが、硬度指標 $f^2m$ は、果実重量が80g以下の小さいリンゴには適合しなかった（Abbottら, 1968）。

Cooke (1970) は、硬度指標  $f^2m$  の質量依存性を排除するため、共振時のリンゴを自由振動球と考え、低次から高次の振動モードを理論解析した。彼は、リンゴの2次共振をねじれモード  ${}_0T_2$  と結論し、果実のせん断弾性率を求める理論式を導出し、共振周波数  $f$  と果実質量  $m$  から硬度指標  $f^2m^{2/3}$  を提案した。ところが、Young と Bilanski (1979) はリンゴの共振を測定し、2次共振は球状振動の可能性を報告し、リンゴの二次共振はねじれモード  ${}_0T_2$  では無いと結論した。その後、Yamamoto と Haginuma (1980) や Armstrong ら (1989) は、果実共振を球状振動の一種である  ${}_0S_2$  モードや  ${}_1S_0$  モードと仮定し、果実の弾性率を計算する式を発表した。しかし、Woensel ら (1988) は、多くのリンゴの硬度を測定し、硬度指標  $f^2m^{2/3}$  と果肉硬度との間に強い相関があることを報告した。現在においても、この  ${}_0T_2$  モードに基づく硬度指標  $f^2m^{2/3}$  は、理論的根拠を失ったにも係わらず、広く使われている (Shmulevich ら, 1996)。

共振する果実の振動モードが決まらなると、果実共振から弾性率を求めることが出来ない。そのために、電子スベックルパターン干渉法 (ESPI) を用い、共振時の果実振動モードの決定を行った。ESPI は、被測定物にレーザービームを照射してその反射光と参照光との干渉像により、被測定物の振動を非接触でその場観察できる測定法である。試料には、古くから振動モードの研究がなされているリンゴを用い、その共振振動を水平、垂直および斜め方向から観察した。

1次共振での水平方向の干渉像は、果実の赤道に平行して多数の平行縞が見られ、2次から4次共振では平行縞が無くリング状の干渉縞が見られた。1次共振での平行縞の幅は、赤道部が一番広く、赤道部から遠ざかるに連れて縞幅が徐々に小さくなった。これは1次共振では、果実の下部のみが縦振動することを示しており、Young と Bilanski (1979) の予測を裏付けた。また、2次共振では、上方と水平方向にはリング状の干渉縞があり、かつ斜め方向にはこれらのリング状の干渉縞との間に明確なノーダルライン (振動しない領域) が見られたので、球状振動の  ${}_0S_2$  モードであると判明した。さらに、3次および4次共振では、干渉像のノーダルライン数とリング状の干渉縞の数より、各々  ${}_0S_3$  および  ${}_0S_4$  モードと決定された。

2次共振の振動モードが  ${}_0S_2$  モードと決定出来たので、剪断弾性率  $\mu$  は Yamamoto と Haginuma (1980) の式から次のように求められる。

$$\mu = \frac{6^{2/3} \pi^{4/3}}{i \eta_n^2} m^{2/3} \rho^{1/3} f^2$$

ここで、 $m$  は果実重量、 $\rho$  は果実密度、 $f$  は共振周波数、 $i$  は無次元固有振動数 (定数) である。下記に  ${}_0T_2$  モードに基づく Cooke (1970) の式を示す。

$$\mu = f_2^2 m^{2/3} \rho^{1/3} CR$$

ここで、 $m$  は果実重量、 $\rho$  は果実密度、 $f$  は共振周波数、 $CR$  は変換定数である。

両者の式から定数項を除けば、共に剪断弾性率  $\mu$  は  $f^2m^{2/3}$  に比例し、Cooke が提唱した硬度指標と同形になる。従来から報告された果実弾性と硬度指標  $f^2m^{2/3}$  との強い相関 (Woensel ら, 1988) は、この一致によるものと思われる。

### 第3章 キウイ果実の粘弾性測定

Finney (1970) は、Abbott ら (1968) の方法を改良して、より実用的な装置を作成した。しかし、果

実振動を接触式センサで検出しているため、オンライン選果には不向きであった。そこで、Muramatsuら(1997)は、非接触に果実振動を検出するためにレーザー Doppler 振動計(LDV)の利用を提案し、接触式センサに比べて正確な果実振動が検出できる利点を報告した。

このLDVを用いた振動測定装置を作成し、実際の果実に適用してその粘弾性測定を行った。測定対象には、熟度判定の難しい果実であるキウイフルーツ(145個)を用い、様々な熟度における粘弾性指標を求めた。弾性指標には、第2章で明らかにした $f^2m^{2/3}$ を用い、粘性指標には、Drake(1962)の提案した指標を用いた。

$$\eta = \frac{\Delta f}{f}$$

ここで、 $f$ は共振周波数の半値幅、 $f$ は共振周波数である。

レオメータによる果実硬度とLDVでの弾性指標 $f^2m^{2/3}$ の間には、強い相関( $r^2 = 0.967$ )が得られた。また、粘性指標は、適熟以降の果実の熟度と良い相関が有り、弾性指標 $f^2m^{2/3}$ とを併用することで、果実熟度をより明確に区別できることが明らかになった。

#### 第4章 キウイの粘弾性測定と細胞壁多糖類の分析

第3章で用いた粘性指標は、共振周波数が同じ物質同士での粘性評価には適する。しかし、果実は軟化すると共振周波数が低下するので、硬い果実と軟らかい果実との粘性評価には適さないことになる。そのため、新しい粘性指標の検討を行った。共振モデルには一自由度系を使い、その強制振動の運動方程式から、減衰比、共振周波数 $f$ 及び質量 $m$ を使って粘性項 $c$ が $c = 4 fm$ と導出できることを示した。 $m$ を果実質量とすれば、 $f$ と $c$ は振動応答から求められる。これらを、上記粘性項 $c$ に代入して得られる $4 fm$ を粘性指標とした。

次に、この粘性指標 $4 fm$ 及び弾性指標 $f^2m^{2/3}$ と熟する果実の細胞壁多糖類との関係を調べた。試験材料には、第3章と同様にキウイフルーツを用い、未熟から過熟までの6段階の熟度試料を各々4個ずつ作成した。これらの試料の細胞壁を、熱水、ペクチン、ヘミセルロース、およびセルロース画分に分画し、各画分での糖量、分子量、及び糖組成を測定した。その結果、追熟初期には、ヘミセルロース中のキシログルカンの糖量および重量平均分子量が劇的に低下し、また、ペクチン画分の中性および酸性ペクチンの重量平均分子量が追熟初期から中期では増加し、その後低下した。従って、果実の弾性低下は、初期にはキシログルカン、中期ではペクチンの寄与が考えられる。今回の実験では、後期以降では寄与物質の特定が出来なかった。これらの結果は、ペクチンのような特定の化学成分だけは果肉弾性を示す指標にならないことを示唆している。また、粘性指標 $4 fm$ は、追熟初期から中期にかけて増加し後期には低下し、この指標はペクチンの重量平均分子量と平行関係にあった。追熟中期は、細胞壁内のキシログルカンは大量に消費されており、かつ低分子化している。従って、ペクチン分子量の増加は、果肉粘性に大きく寄与していると考えられる。この事実は、粘性指標 $4 fm$ が、果実粘性を表している可能性が高いことを示唆している。

#### 第5章 セイヨウナシの粘弾性特性に及ぼす長期貯蔵の影響

本章では、これまでの成果に基づき、セイヨウナシ(ラ・フランス)を試験材料に選び、LDV法による粘弾性特性の変化を観測した。

セイヨウナシは、長期貯蔵すると正常に熟さない特異な果実である (Mellenthin and Wang, 1976)。同時期に収穫されたセイヨウナシを、16日貯蔵した群 (短期貯蔵群) と、171日貯蔵した群 (長期貯蔵群) に分け、各々の追熟時の粘弾性変化をLDVで測定した。短期貯蔵群は正常に熟し、弾性指標  $f^2 m^{2/3}$  はほぼ揃って低下し、その変化は単純な指数関数の式で表された。粘性指標  $f m$  は、ほぼ一定だった。長期貯蔵群では正常に熟さず、弾性及び粘性指標は大きく変化し、一様ではなかった。セイヨウナシは、貯蔵期間により熟し方の異なることが知られている。LDVでの結果は、貯蔵期間の異なる果実の追熟時の粘弾性変化の差を明白に表しており、生理プロセスに伴う粘弾性の変化を実時間計測できることを示している。

## 第6章 果実粘弾性の自動計測システムの構築

本章では、これらの成果を踏まえ、LDVによる果実粘弾性の自動計測システムを開発し評価を行った。粘弾性指標を自動計算するためには、振動スペクトルから、2次共振の周波数  $f$  と減衰比  $\zeta$  を自動認識しなければならない。

リンゴを含めた多く種類の果実の振動特性を解析した結果、各々の共振点は次式に示すような規則性が見られた。

$$\phi_n = -(90 + n \times 180)$$

$n$  は共振の次数である。例えば2次共振であれば、 $n$  は  $-270^\circ$  になるので、この位相の近傍のピークを求めれば、2次共振周波数  $f$  が決定できる。

次に、2次共振の減衰比  $\zeta$  は共振ピーク形状から求まるが、果実が軟化すると隣接する共振同士の干渉が起こりピーク形状の歪みが生じる。従って、測定された歪んだピーク形状から真のピーク形状に補正する必要がある。その補正のため、振動スペクトルは、次式による単共振の線形結合と仮定した。

$$|R(f_i)| = 20 \log \left[ \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2\zeta_i \frac{f}{f_i} \right\}^2}} \right]$$

ここで、 $f_i$  は任意の共振点での周波数、 $\zeta_i$  は減衰比である。

補正アルゴリズムは、上式に果実の振動応答から求めた各共振点での周波数と適当な減衰比  $\zeta_i$  を初期値として与え、線形結合した合成関数を作り、この合成関数と測定した振動応答との自乗誤差が最小になるように各共振の減衰比を最適化することで減衰比  $\zeta_i$  を求める。

本システムの検証のため、様々な熟度を持つキウイフルーツ (137個) やトマト (51個) などを測定したが、いずれも正確に  $f$  と  $\zeta$  を自動認識することができた。また、加振信号にランダム波を用いてリンゴの粘弾性指標の高速測定を検証した。弾性指標は0.25秒で計測できたが、粘性指標の計測には不向きであった。以上の結果より、本システムでの弾性指標の計測は、正確性及び測定時間ともに実用に供するレベルにあることを示している。

## 第7章 総合考察

本研究では果実を強制振動させたときの2次共振に焦点を当てて解析した。LDVで果実振動を測定すれば、極めて正確に果実振動スペクトルを得ることが出来ることを明らかにした。そのため、2次共振の周波数とピークの形状から正確に果実の弾性と粘性の指標を求めることができた。LDVを用いれば、2次共振ピーク以外にも、果実によっては5次共振ピークまで測定できる。従来注目されてきた2次共振だけでは無く、その他の高次共振は、果実内部の様々な物理特性を含んでいると考えられる。これらの情報を解析するため、様々な果実でさらに統計的および理論的解析を行えば、果実に含まれるより多くの物理的情報を得る可能性が有り、今後の研究が望まれる。