

力学的モデルによる果実 振動法測定シミュレーション

山本良一

果物を購入して、さて、食べようとする時、それがまだ十分に熟れていなかったり、熟れ過ぎていて食べるに耐えないといった経験をもち残念に思ったことのある人は多いだろう。果物によっては外から一目見ただけで熟れの状態は分からないものがある。熟れ状態を把握するには熟練を必要とするなどの話を聞くこともある。熟れの程度を知りたいと思うのは生産者と消費者の共通の思いであろう。

果物の熟度測定は客観的に測定するための方法が開発されてきている。測定方法が厳密であっても、方法によっては経験的な要素が大きくその測定値をさらに解析して理論的に取り扱うには耐えないものもある。さらに、手動的な方法や、インストロン型の試験機を用いた自動化した方法が考案されている (Kojima et al, 1991, 1992)。ところが、これらの方法では試料を調製して測定に供されることになる。このために果物を固定したり殺したりする必要がある。果実の熟するうえでの一般的な傾向や法則の研究にはむいてはいても測定された果物は流通価値を失ってしまう。もぎ取るか否かや選果場での選別での使用には限界がある。果物を傷つけることなく熟度を調べることができたらその利点は大きい。そこで、果物を傷つけることなく振動させ共鳴などをはかる方法が考案されている (Muramatsu et al., 1996, 1997 a, b)。これらの方法は原理的に非破壊測定であり、測定された果物を直接に市場に出すことができる。

果物を振動させて振動が共鳴する時の周波数や強度が測定される。振動を与える仕方と振動を検出する仕方によって方法が分かれる。原理的にはスピーカーやマイクを使って測ることができ、注意深く行えば測定は可能である (Matsumura et al., 1996, 1997 a)。マイクを接触する状態で果物の振動に影響を及ぼすので測定値が微妙に変わるなどの難点がある。接触をさせないで測れば振動を妨害することなく直接に振動が測定できる。このためにレーザー光で振動を測定する方法が開発された (Muramatsu et al., 1997 b, 1998, 1999; Terasaki et al., 2001 a, b, c)。本研究ではレーザー光を使って測定した果物の振動を力学的なモデルを使って表すことを試みる。

材料と方法

果物として市販のリンゴを使った。リンゴはそのままで、加工などを施さずに加振器 (G

21-001, 振研, 東京) にのせて, 振動させた。リングの上部にレーザードップラー振動計 (LV-1300, 小野測器, 横浜) のレーザー光をあて, リングの表面にレーザー光の焦点を結ぶようにピント調節を行った。レーザードップラー振動計は反射してくる光のドップラー効果による周波数の変化を読みとることで, リングの振動状況を測定する。振動周波数は 10 から 2000 ヘルツまでスキャンする場合と白色ノイズを与える場合とを検討したところ, 共鳴はどちらもほとんど同様に観測できた。測定された振動は高速フーリエ変換器 (CF-5210, 小野測器, 横浜) で解析し, 共鳴の周波数とその強度を測定した。

結果と考察

リングに振動を与えると, いくつかの周波数で果物が共鳴することが観察される (cf. Matsumura et al., 1998; Terasaki et al., 2001 a, b)。結果を図 1 に示す。いくつかの周波数でリングの振動が共鳴していることが分かる。

果物が熟していく過程で細胞壁の構成多糖が変化する。細胞壁構成成分の変化が細胞壁の粘弾性的な性質の変化の原因であると考えられている。一般に細胞壁の粘弾性的性質の測定はクリープや応力緩和法によって測定されている (Yamamoto et al. 1974)。それらの測定法によって測定された性質は粘弾性モデルによってシミュレートされる。応力緩和にはマクスウエルのモデル, クリープにはフォークトのモデルを使って解析される。しかし, マクスウエルのモデルやフォークトのモデルでは, 共鳴を表わすことができない。そこで粘性と弾性の要素に質量の要素を加えたモデルを採用することにした。これらの要素は特定の周波数で共鳴する。マ

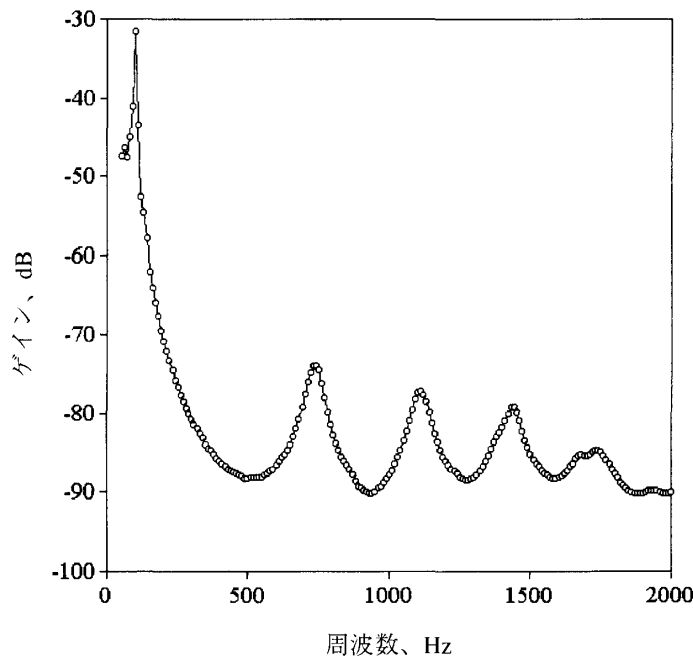


図 1 リングを振動させたときの共鳴。リングを加振器にのせて振動させてレーザードップラー振動計で, リングの振動状況を測定した。

クスウェルの要素に質量を加えた要素の共鳴は谷として現れる。一方、フォークトの要素の共鳴はピークである。リングの共鳴は図1に示したようにピークである。ここではフォークトの要素に質量を加えたモデルを採用する。その要素を図2に示す。

ここで採用したフォークトの要素に質量を加えた要素は一つの周波数でしか共鳴しない。リングには図1に示すように複数の共鳴が観察されるので、図2に示した質量を加えたフォークト要素が一つではリングの振動状況を表すことができない。複数の要素を結合する必要がある。共鳴のピークが5つあったので、要素を5個直列に結合したモデルを使用することにした(図3)。

複数の要素の各係数をどのように設定すればいいのかが問題となる。

リングの各共鳴周波数にある関係を調べた。図1に示すリングの共鳴周波数に順番の数を与え、その数に対して共鳴周波数数をプロットしたところ、第一共鳴周波数を除いてほぼ直線上にあることが分かった(図4)。このように周波数に倍数関係があるのは振動がオーバートーンで共鳴していることを示唆している。このことを考慮して複数のフォークト要素の弾性、粘性、質量係数の値には倍数関係を設けて独立な係数の数を減らすことを試みた。

モデルの係数を表1のように決めた。第二共鳴よりも周波数の高い共鳴は振動の一波長が短くなり、一波長内に含まれるであろう質量は周波数とともに小さくなるであろう。そこで、第二共鳴に該当する要素の弾性と粘性の係数をそのままの値として、質量を二倍ずつ小さくして、二分の一、四分の一、六分の一とした(表1)。第一共鳴は別の振動と考えて値を設定した。

表1の値を係数とするモデルの共鳴をつくって、そのモデルの色々な周波数での振動を計算した。計算によってえられた共鳴とリングの共鳴を比較したところ、かなりの一致が見られた(図1, 図5)。リングの共鳴は第二共鳴を基底とするオーバートーン共鳴であることが示

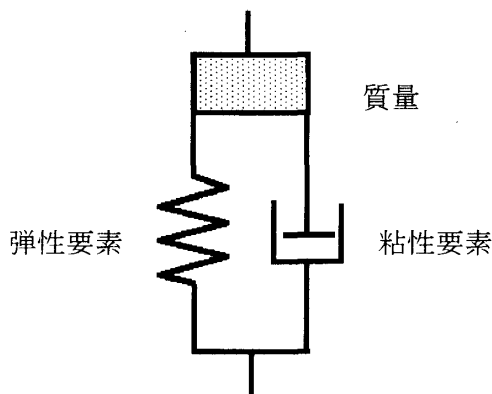


図2 フォークトの要素に質量を加えた。

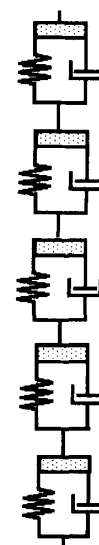


図3 質量を含むフォークトタイプのモデル。図2に示した要素を5個直列に結合した。

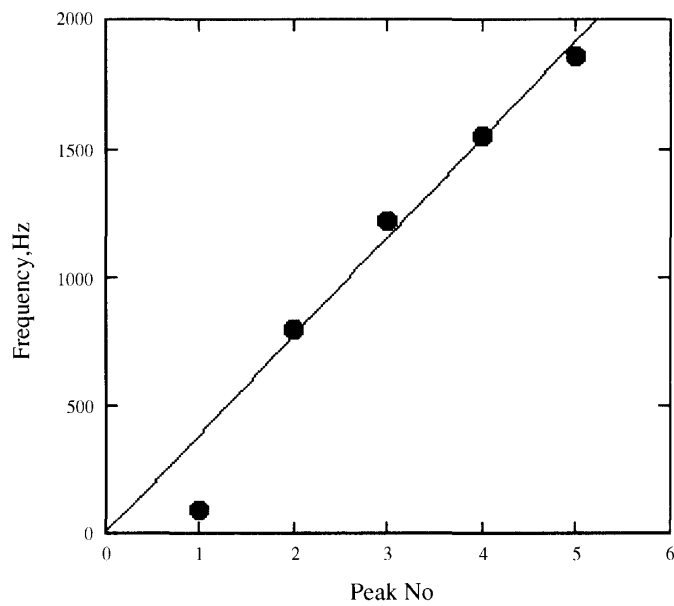
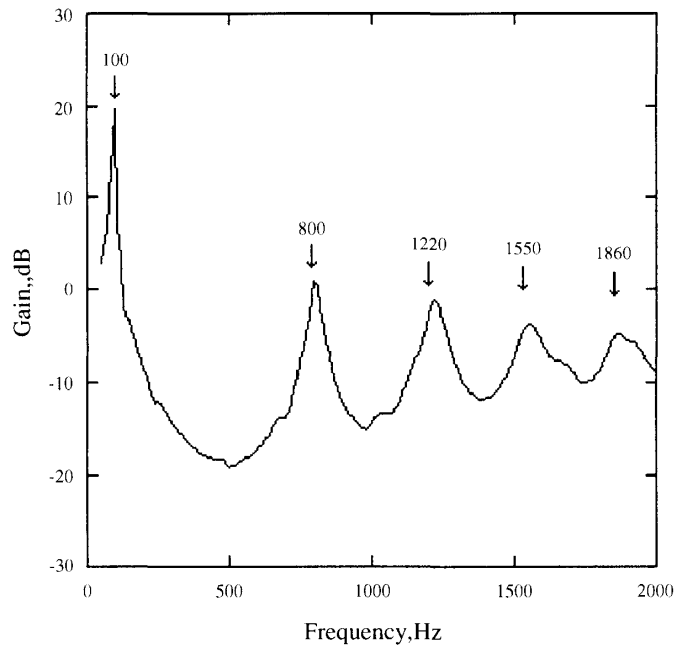


図4 リンゴの共鳴周波数（上図）と順位との関係（下図）。

表1 モデル要素の係数値

	第一要素	第二要素	第3要素	第4要素	第5要素
粘性係数	1	500	500	500	500
弾性係数	3000	1 E+06	1 E+06	1 E+06	1 E+06
質量	10	100	50	25	16.7

フォークトの要素に質量を加え、直列に5個つないだモデルの各係数の値（任意の単位）。

唆される。ちなみに、我々の研究グループの研究から、第二共鳴が熟度の進行と関係が深いことがわかってきている。第二共鳴周波数を使って果実の熟度が判断される方向に研究されてい

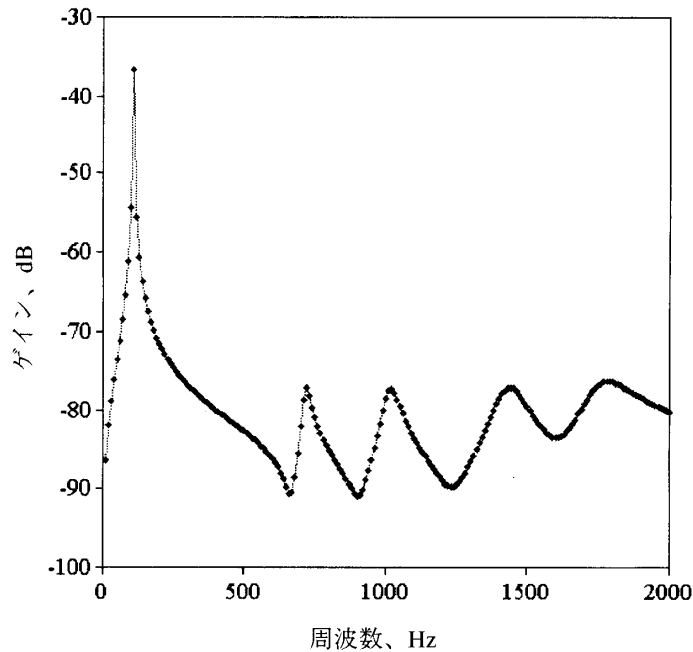


図5 モデルの共鳴の様子。図3に示したモデルを色々な周波数で振動させてその共鳴の様子を計算した。

る (Terasaki et al 2001 a, b)。

共鳴のモードとこのモデルの考え方が一致するのかをさらに検討する必要がある (cf. Terasaki et al., 2001 c)。リングの共鳴を表す力学的モデルの係数が果物の熟度のどのような様相を表現しているのか、さらに果物の細胞壁などのどのような成分の変化を表しているかをさらに研究して行く必要がある。リングの実際の振動は単純なオーバートーンとした振動には完全に一致することはなかった。このずれは、リングの振動のモードや球形に近い物体の振動をさらに厳密に考察しなければならないであろうことを示している。

このような方法で、果物の熟度の評価が非破壊的に行うことができ、将来この方法を利用して付加価値の大きな果物を出荷することができるようになるであろう。ここで表すことのできた物理的な性質の正確な評価に加えて、それらの性質の生化学的な基礎が明らかになる道筋が開ける可能性がある。

引用文献

Kojima K, Sakurai N, Kuraishi S, Yamamoto R and Nevins DJ (1991) Novel technique for measuring tissue firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Plant Physiology* **96**: 545-550

Kojima K, Sakurai N, Kuraishi S, Yamamoto R and Inaba A (1992) Physical measurement of firmness of banana fruit pulp: determination of optimum condition for measurement. *Post-harvest Biology and Technology* **2**: 41-49

Muramatsu N, Sakurai N, Yamamoto R, Nevins DJ (1996) Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums and tomatoes. *Hort. Science* **31**: 1199-1202

- Muramatsu N, Sakurai N, Yamamoto R, Nevins DJ, Takahara T, Ogata T. (1997 a) Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology* **12**: 221–228
- Muramatsu N, Sakurai N, Wada N, Yamamoto R, Tanaka K, Asakura T, Ishikawa-Takano Y, Nevins DJ (1997 b) Critical comparison of an accelerometer and a laser doppler vibrometer for measuring fruit firmness. *Hort Tech* **7**: 434–438
- Muramatsu N, Sakurai N, Wada N, Yamamoto R, Takahara T, Ogata T Tanaka K, Asakura T, Ishikawa-Takano Y, Nevins DJ (1998) Evaluation of fruit tissue texture and internal disorders by laser Doppler detection. *Postharvest Biology and Technology* Vol. **15**(1) pp. 83–88
- Muramatsu N, Sakurai N, Wada N, Yamamoto R, Tanaka K, Asakura T, Ishikawa-Takano Y, Nevins DJ (1999) Remote sensing of fruit textural changes with a laser doppler vibrometer. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **125**: 120–127
- Terasaki S, Wada N, Sakurai N, Muramatsu N, Yamamoto R, Nevins DJ (2001 a) Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser doppler vibrometer. *Transaction of Amer. Society of Agric. Engineers* **44**: 81–87
- Terasaki S, Sakurai N, Yamamoto R, Wada N, Nevins DJ (2001 b) Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by a laser doppler method. *J. Jan. Soc. Hort. Sci.* **70**: 572–580
- Terasaki S, Sakurai N, Yamamoto R, Wada N, Nevins DJ (2001 c) Analysis of the vibration mode of applied tissue using electronic speckle pattern interferometry. *Transaction of Amer. Society of Agric. Engineers* **44**: 1697–1705
- Yamamoto R, Fujihara S and Masuda Y (1974) Measurement of stress-relaxation properties of plant cell walls. In “Plant Growth Substances, 1973”, Hirokawa Pub, Tokyo, p. 788–795