

■振動からわかる果実の品質

はじめに

その昔、源義経がまだ牛若丸と呼ばれていた頃、「お寺の大きな鐘を小指一本で動かしてみせる。」と言って大人を驚かせた話が残っています。牛若丸は、物体の共振をよく知っていたのでしょう。お寺の鐘を撞く時によく見るとわずかに鐘が揺れます。その周期をよく見て覚えます。鐘が動いていないとき、覚えておいた周期で小指に力を入れて鐘を押すと、いつの間にか少しずつ重い鐘が動くのです。ブランコで少しずつ子供の背中を押していると、だんだん揺れが大きくなるのと同じです。またある映画では、金切り声を上げると、ワイングラスが割れるシーンがありました。これはある音程の声にワイングラスの共振が一致したため、グラスにエネルギーが与えられ壊れるのです。

私たちは、この共振あるいは共鳴と呼ばれる現象に着目し、生物（果実、野菜など）の硬さを測定し、その情報から果物や野菜の食べ頃、取り頃を判定する技術を開発しました。

以下にその原理を、詳しく解説いたします。

共振・共鳴とは

お寺の鐘を撞くと、ゴーンという音がします。突然カーンという別の音がするわけではありません。誰が撞いても、どのような力で撞いても同じ高さの音が聞こえます。これはこの鐘が固有の音の高さを持つからです。音の高さを決めているのは、この鐘が1秒間に何回震えているかによります。1秒間に何回震えるかを示すのが振動数という単位です。単位はHz（ヘルツ）で表します。鐘がある固有の音を出すのは、鐘が外から力を加えられると鐘がある特定の振動しかしないからです。これを固有振動数といいます。

音の高さと振動数の関係はいつでもラジオで聞くことができます。NHKで定時になるとよく時報がなります。ポッ、ポッ、ポッ、ピーというのを聞いたことがあるでしょう。最初の低いほうのポッは1秒間に440回振動している音なので440Hzです。最後のピーは880Hzです。音の高さはドレミで表すことができます。440Hzはラの音です。880Hzもラの音です。どちらもラの音ですが、880Hzは440Hzのラよりも1オクターブ高いといいます。アメリカの歌手マライヤ・キャリーは7オクターブの音を出せるといわれていました。

さて、お寺の鐘だけではなく、地球上に存在するあらゆる物体には、固有の振動数があります。野球のボールがバットに当たるとき、カキーンという音が

しますし、テニスや卓球でも音がします。スイカをたたいても音がします。スイカをたたいたときに、どのような振動が出るのかを特殊な装置で計ると、図1のようになります。

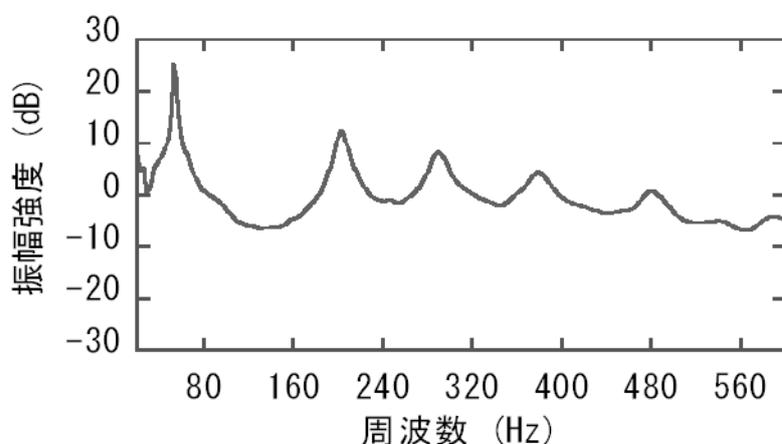


図1 スイカの共振スペクトル

この図は縦軸にスイカの振動の強さを、横軸には振動数をとっています。横軸の80というのは、1秒間に80回振動しているということです。この図をよく見ると、山がいくつも出ています。一番左から1次、2次、3次・・・共振ピークといいます。

実は今から30年以上前に、この2次ピークの共振周波数を使うと、物の硬さがわかることを式に表した人がいます。Cooke という人です。物の硬さは次の式で計算できます。

$$\text{硬さ} = (\text{第2共振周波数})^2 \times (\text{重さ})^{2/3} \times (\text{密度})^{1/3}$$

一般的に果物は未熟な時は硬く、腐ると軟らかくなります。ですから、硬さを測ると熟度がわかります。

私たちは、果物の第2共振周波数を測ることで、熟度を見積る技術を開発しました。この共振法の最大の特徴は非破壊という点です。果物を傷つけずに測れるので、測った果物を売ることができます。

今までも果物の硬さを測る道具はありましたが傷をつける方法なので、測った果物は売れません。ですから果物の硬さで熟度がわかっても、お客様にそれをお食べいただくことができませんでした。

振動法は、果実を傷つけることなく、同じ果実を測り続ける事ができます。そこで、同じ果実の硬さがどのように変化していくか、時間を追ってみる事ができます。最初にたくさんの果実を用意しておいて、それを測りながら、毎日少しずつ食べて評価すると、どの硬度のときが最もおいしかったかを示すグラフと、毎日どのように果実が軟らかくなっていくかを示すグラフが同時に2枚書けます。

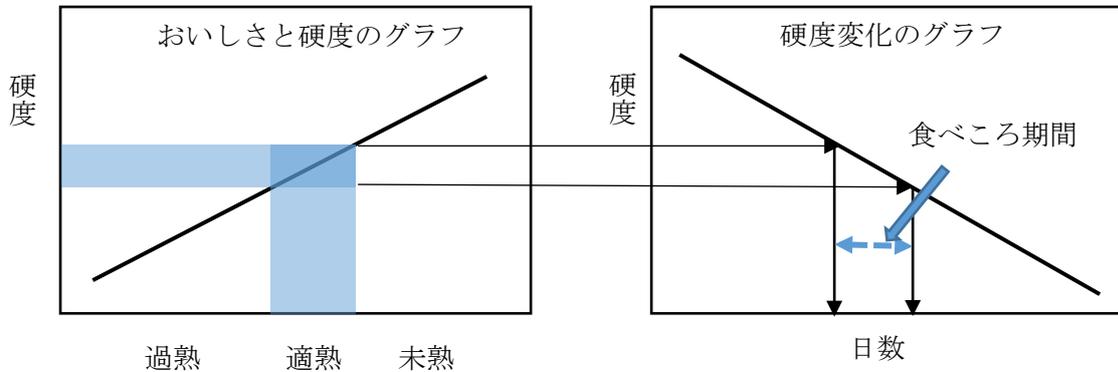


図2 硬度と食べごろ、及び収穫後の果実の硬度変化を示すグラフ

図2左のグラフは、毎日少しずつ果物を食べたときの評価（未熟～過熟）と硬度の関係です。未熟な果物は硬く、過熟になると柔らかくなることを示しています。食べごろには適度な硬さがあります。左のグラフから、果実の適熟の硬度範囲がわかります。適熟には幅があります。少し硬めでも、少し軟らかめでも、おいしいと判断できますので、その硬度にも幅ができます。

右のグラフは、毎日同じ果実の硬度を測ったときの変化です。果実は収穫後硬くなることはありません。必ず前より柔らかくなりますので、右のグラフは右下がりの軟化グラフといえます。横軸は収穫後の日数です。するとこのグラフから、左の適度な硬度を横切る日がわかります。右のグラフで青い矢印で示した期間が、食べごろの期間を示します。この図2右のグラフのもうひとつの使い道は、未熟な固い果実の硬度が分かれば、後何日で食べごろになるかを予測できることです。

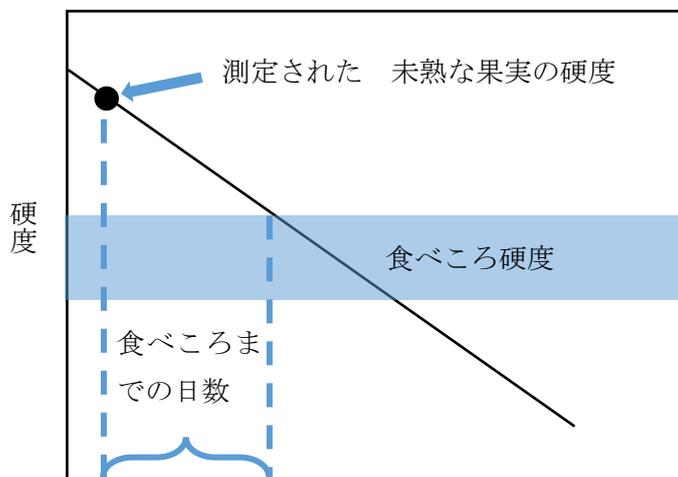


図3 日数

左の図(図3)のように、未熟な果実の硬度が分かれば、後何日で食べごろに到達するかが分かります。

このように、果実の硬度を測ると、食べころの硬度が分かり、それを利用すると、いつが食べころかを予測できます。

図3の軟化グラフは、果実によっても、また貯蔵する温度によってもグラフの傾きなどの形が変わりますので、あらかじめ、それぞれの果実の貯蔵温度別のグラフを作っておく必要があります。しかし、一度このようなマスターグラフを作っておけば、何年でも同じグラフを使うことができます。

【振動法による果実の内部評価について】

2010年ころから、果実の振動測定を用いると、外から見ても分からない果実の内部欠陥が分かるという報告が各地の試験場から寄せられるようになりました。果実の内部障害には、たとえばナシの芯腐れ、ナシの水浸果（果肉が茶色く変色する）、スイカの割れ、ももの核割れ（種子を包む殻が生育中に割れる現象）、カキの早期軟化などがあります。ナシの芯腐れや水浸果は、お客様からのクレームの対象となります。またスイカの割れは、家庭で食べるときにはあまり問題にはなりません、カットフルーツを作るときには最もおいしい部分がカットできずに崩れてしまうので、スイカ1個が丸ごと廃棄の対象となります。また、モモの核割れは、まだ果実が小さいころ樹上で起こるのですが、核割れした果実は種子が成長しないので栄養がいきわたらず、見た目は大きな果実になるのですが、甘くない果実ができてしまいます。どの果実の栽培でも行われていることですが、モモでもおいしい果実を生産するためには、果実が小さいときに1つの枝あるいは一定の葉の枚数に1個の果実だけを残し、あとは摘み取ってしまいます。このとき、核割れの起こったモモを残すと折角生育させても、意味がありません。これらの内部障害の起こった果実が振動法を使えば判別できることが分かってきました。

その原理は、共振周波数同士の比率です。図1に示しましたスイカの共振ピークについて言えば、第2共振を1.00として、第3、第4ピークの共振数の比率を出します。理論上は、1.00、1.50、1.93、2.33となります。ところが果実の中心に芯腐れや早期軟化や核割れのような異常があれば、第2共振周波数が異常に低くなり、この比率が変わります。たとえば、モモの核割れでは第3共振周波数÷第2共振周波数の値が1.5以上になります。

この理由は、第2共振ピークは中心の情報を反映し、それ以上の高次のピークはそれよりも外側の情報を反映しているからです。外側よりも中が軟らかい、第3共振周波数÷第2共振周波数の値が1.5以上になります。

またモモの核割れのように、元々堅い殻があるのにそれが割れてゆるむ事が、第2共振ピークが異常に低くなる理由です。

ナシの水浸果では、水浸状の部分はその回りの果肉より柔らかくなっています。この水浸状の部分が果肉のなかに点在する事が多いのですが、果肉の部分にこのような不均質な部分があることも、共振ピークの情報から分かります。またスイカの割れも、ピークの形状から判断できることが分かりました。

このように果実の非破壊振動測定により、食べころ情報だけでなく、内部障害も判別できることがわかり、ますます、応用範囲が広がってきました。

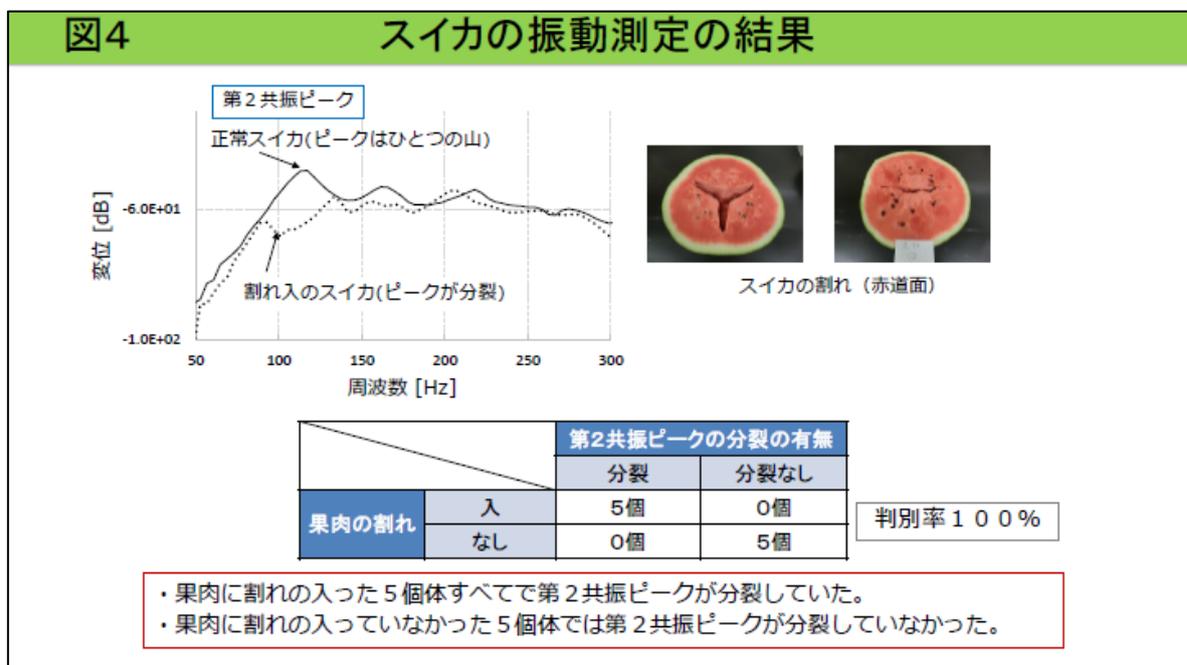


図4は、スイカの割れが判別できる様子を示したものです。図中の右の写真のように、割れのあるスイカは、左のグラフのように、第2共振や、第3共振のピークの山がひとつにならず、2つに割れます。図の下の表は、この判断基準で、実際のスイカを判別した結果です。10個のスイカを判別しました。割れの入ったスイカ5個のピークは全て割れていましたが、正常なスイカのピークは全く割れていませんでした。判別率は、100%でした。

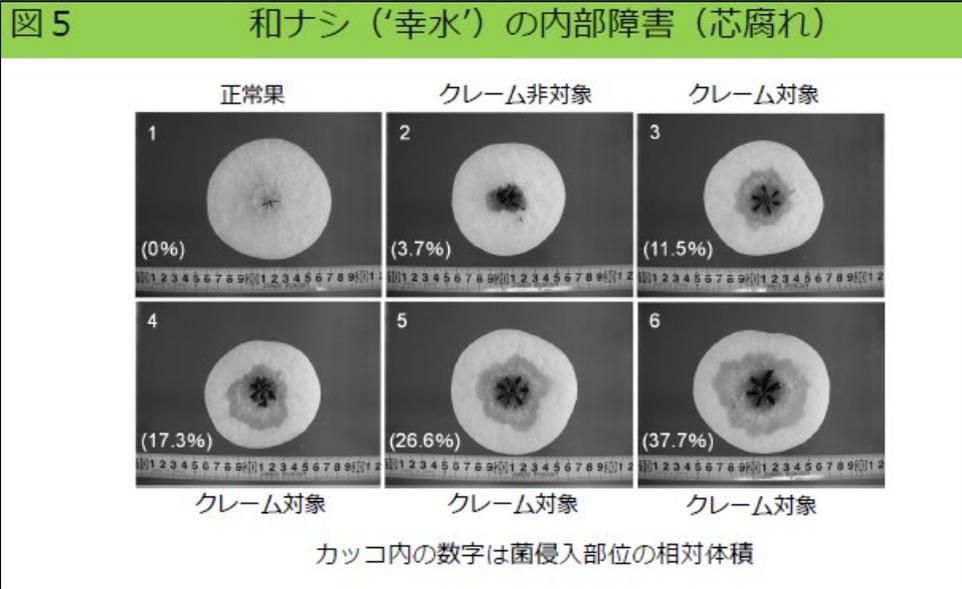


図5の写真は、ナシ(品種 幸水)の芯腐れを起こした果実の断面写真です。写真1は正常のナシで、写真2は種子の部分に芯腐れを起こしていますが、果肉にまで変色部分が侵入していないので、クレーム対象にはなりません。しかし、種子部分を出て果肉にまで芯腐れが及ぶと、クレームの対象になります。その体積は、全体の5%でした。言い換えれば、芯腐れが5%以上ある果実を判別できればよいことになります。

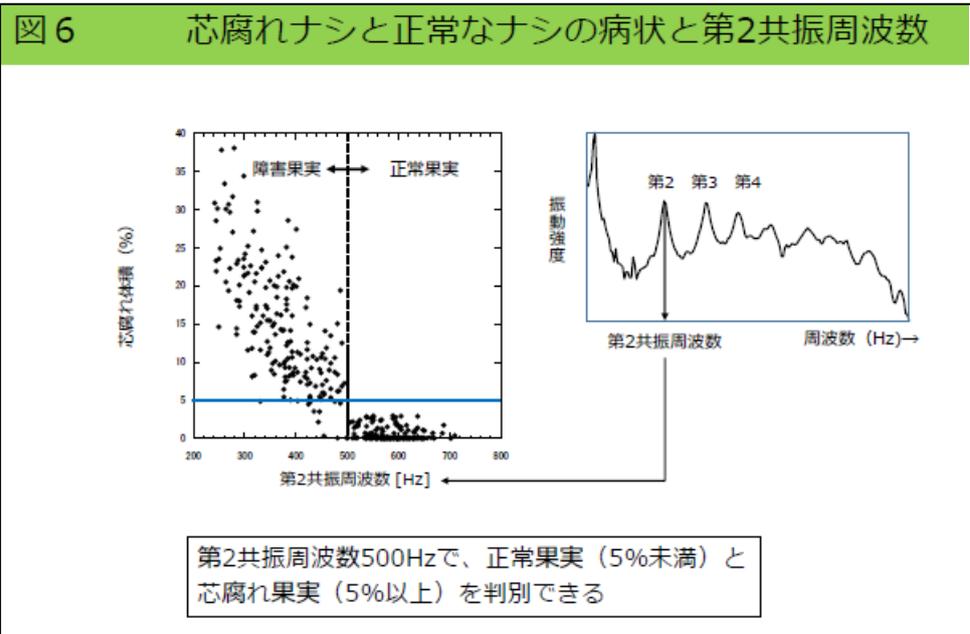
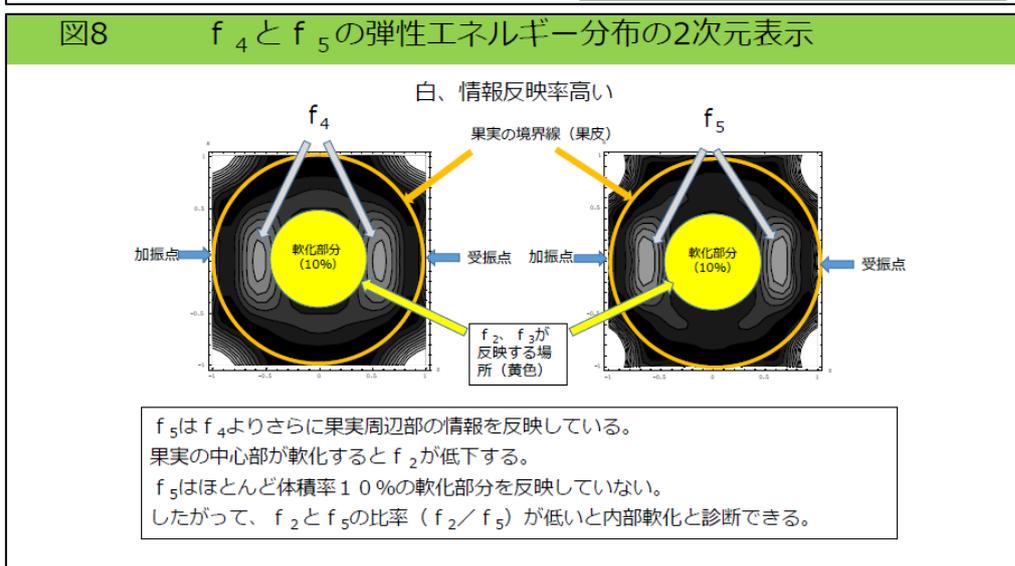
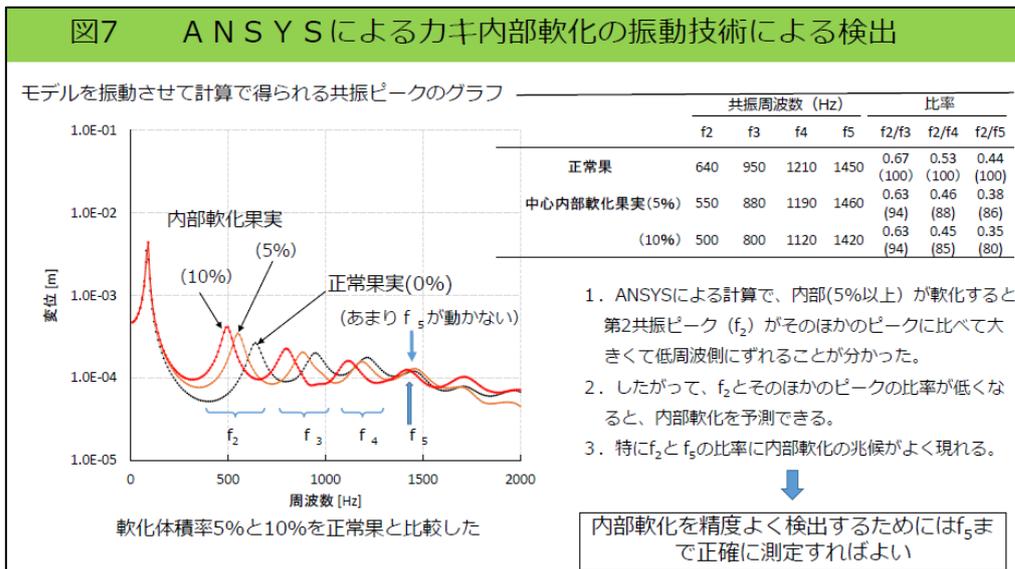


図6の左のグラフは、横軸にナシの第2共振周波数を、縦軸に芯腐れの体積(%)をとったものです。このグラフは共振を測定した後で、ナシを輪切りにして写真を撮って芯腐れの体積を測定したものです。第2共振周波数が、500Hz以上

の果実で芯腐れの体積が 5%以上のものはひとつもありませんでした。つまり、果実の共振を測り、その第 2 共振周波数が 500Hz 以上のナシには、芯腐れがほとんどないことが分かります。500Hz 以下のナシの中には、正常なものも若干含まれますが、全体の判別率は 96.9%でした。この数字の意味するところは、第 2 共振周波数が 500Hz 以上のナシを出荷している限りは市場には芯腐れが 5%以上のナシは出回らない。ただし、3%ほどの正常果は誤って廃棄される、というものです。



新聞やニュースなどで建物の「耐震強度」ということを聞いたことがあるかと思いますが、これを計算しているのはコンピュータです。建物の構造をコンピュータで再現し、コンピュータ上でその建物に振動を与え、建物の耐震性を計算する

のです。このプログラムのひとつが【ANSYS】と呼ばれるもので、振動を与えたときの様子を、コンピュータ上で再現できます。このプログラムを使って、果実の内部が、ほかの部分よりも軟らかくなったら、どういう共振ピークが出るかを計算してみました。すると、正常な果実と比較して、内部が軟らかくなった果実は第2や第3共振ピークが低下(図7では左に移動する)事が分かりました。これを使用して、第2共振周波数/第5共振周波数、という比率を指標にすれば、正常なものは0.44程度ですが、内部が軟らかくなった果実はそれよりも下がり、0.38、0.35と低くなることが分かりました(図7右上の表)。この理由は、図8にありますように、果実中心部の情報は、第2(f_2)、第3(f_3)共振周波数に反映されるが、第4(f_4)、第5(f_5)共振ピークはそれよりも外側の情報を反映しているからであることが分かりました。

参考資料

(1) 原著論文

1. Muramatsu, N., N. Sakurai, N. Wada, R. Yamamoto, T. Takahara, T. Asakura and D. J. Nevins (1997) Critical comparison of an accelerometer and a laser Doppler vibrometer for measuring fruit firmness. HortTechnology 7: 434-438.
2. Muramatsu, N., N. Sakurai, R. Yamamoto, D. J. Nevins, T. Takahara and T. Ogata (1997) Comparison of non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement for kiwifruit. Postharvest Biol. & Tech. 12: 221-228.
3. Muramatsu, N., N. Sakurai, N. Wada, R. Yamamoto, T. Takahara, T. Ogata and D. J. Nevins (1999) Evaluation of fruit tissue texture and internal disorders by laser Doppler detection. Postharvest Biol. Technol. 15: 83-88.
4. Muramatsu, N., N. Sakurai, N. Wada, R. Yamamoto, T. Takahara, T. Asakura and D. J. Nevins (1999) Remote sensing of fruit firmness by a laser Doppler vibrometer. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 125: 120-127. (0.842)
5. Terasaki, S., N. Wada, N. Sakurai, N. Muramatsu, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2001) Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer. Transaction of American Society of Agriculture and Engineering 44(1): 81-87.
6. Terasaki, S., N. Sakurai, R. Yamamoto, N. Wada and D. J. Nevins (2001) Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by a laser Doppler method.

J. Japan. Soc. Hort. Sci. 70: 572-580.

7. Terasaki, S., N. Sakurai, N. Wada, T. Yamanishi, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2001) Analysis of the vibration mode of apple tissue using electronic speckle pattern interferometry. *Transaction of American Society of Agriculture and Engineering* 44:1697-1705.
8. 長内敬明・元村佳恵・桜井直樹 (2003) 無袋リンゴ「ふじ」果実の臭化メチル処理が内部褐変の発生、果肉硬度、果肉の弾性に及ぼす影響 *日本食品科学工学会誌* 50 : 254-258.
9. 元村佳恵・長尾多実子・桜井直樹「6品種のリンゴ果実硬度のレーザー・ドップラー法による非破壊・非接触測定」(2004)元村佳恵・長尾多実子・桜井直樹、*日本食品科学工学会誌* Vol. 51(9) : 483-490
10. Murayama, H., I. Konno, S. Terasaki, R. Yamamoto and N. Sakurai (2006) Nondestructive method for measuring fruit ripening of 'La France' pears using a laser Doppler vibrometer. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75: 79-84.
11. Murayama, H., T. Katsumata, H. Endou, T. Fukushima and N. Sakurai (2006) Effect of storage period on the molecular-mass distribution profile of pectic and hemicellulosic polysaccharides in pears. *Postharvest Biol. Technol.* 40: 141-148.
12. Kuroki, S., M. Tohro and N. Sakurai (2006) Monitoring of the elasticity index of melon fruit in a greenhouse. *J. Japan. Hort. Sci.* 75: 415-420.
13. Terasaki, S., N. Sakurai, J. Zebrowski, H. Murayama, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2006) Laser Doppler vibrometer analysis of changes in elastic properties of ripening 'La France' pear after postharvest storage. *Postharvest Biotechnology and Technology* 42: 198-207.
14. Blahovec, J., H. Akimoto and N. Sakurai (2007) Laser Doppler forced vibrology of soft agricultural products. *Applied Rheology* 17:25111-1-25111-7.
15. Blahovec, J., S. Kuroki and N. Sakurai (2008) Precise correction in laser Doppler forced vibrology of soft products. *Biosystems Engineering* 99:156-160.
16. 中野有加、桜井直樹、藤路 陽、堀江秀樹、中野明正、鈴木克己 (2008) 弾性指標を用いたスライストマトの果肉硬度の非破壊評価、*園芸学研究* 7 : 543-5647.
17. Taniwaki, M., T. Hanada, M. Tohro and N. Sakurai (2009) Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration technique. *Postharvest Biology & Technology* 51: 305-310
18. Taniwaki, M., M. Takahashi and N. Sakurai (2009) Determination of optimum ripeness for edibility of postharvest melons using nondestructive vibration. *Food Research International* 42: 137-141.
19. Taniwaki, M., M. Tohro and N. Sakurai (2010) Measurement of ripening speed and determination of the optimum ripeness of melons by a nondestructive acoustic vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 56: 101-103.

20. Takahashi, M., M. Taniwaki, N. Sakurai, T. Ueno and H. Yakushiji (2010) Changes in berry firmness of various grape cultivars on vines measured by nondestructive method before and after veraison. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 79: 377-383.
21. 鈴木哲也、新川猛、櫻井直樹 (2011) 収穫後のカキ‘富有’果実における肉質評価と食べ頃予測、*園芸学研究* 10 : 421-427.
22. Akimoto, H., K. Nagai and N. Sakurai (2012) Viscosity Measurement by the Free Vibrations of Homogeneous Viscoelastic Sphere. *J. Applied Mechanics* 79: 041002 – 1-8.
23. Kadowaki, M., S. Nagashima, H. Akimoto and N. Sakurai (2012) Detection of Core Rot Symptom of Japanese Pear (*Pyrus pyrifolia* cv. Kousui) by a Nondestructive Resonant Method. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 81: 327-331.
24. 大江孝明・櫻井直樹 (2013) 携帯型振動硬度計によるウメ‘南高’果実の非破壊硬度測定と高品質梅酒製造への応用、*園芸学研究* 12 : 57-65
25. Terasaki, S., N. Sakurai, S. Kuroki, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2013) A New Descriptive Method for Fruit Firmness Changes with Various Softening Patterns of Kiwifruit. *Post. Biol. Technol.* 86: 85-90
26. Fumuro, M., N. Sakurai and N. Utsunomiya (2013) Improved accuracy in determining optimal harvest time for Pitaya (*Hylocereus undatus*) using the elastic index. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 82:354-361
27. Fumuro, M. and N. Sakurai (2014) Effects of Ripening Stage, Temperature, and Film Wrapping on the Elasticity Index as Determined by a Nondestructive Resonance Vibration Method and Fruit Quality in ‘Irwin’ Mango. *HortScience.* 49(6):791-797
28. 文室政彦・堀川勇次・櫻井直樹 (2014) ブラッドオレンジとハッサクのす上がり果判別における音響振動法の適用、*園芸学研究* 13 : 365-370
29. 鈴木哲也・新川 猛・中野浩平・神山真一・櫻井直樹 (2015) 音響振動法によるカキ‘早秋’の果肉評価と果肉硬度保持技術の開発、*園芸学研究* 14 : 75-81.
30. 文室政彦・佐々木勝昭・櫻井直樹 (2015) 多汁で肉質の柔らかいマンゴー’愛紅’果実の弾性指標と果実品質に及ぼす収穫時期および貯蔵温度の影響、*園芸学研究* 14 : 381-390.
31. Nakano, R., H. Akimoto, F. Fukuda, T. Kawai, K. Ushijima, Y. Fukamatsu. Y. Kubo, Y. Fujii, K. Hirano, K. Morinaga and N. Sakurai (2018) Nondestructive detection of split pit in peaches using an acoustic vibration method. *Hort. J.* 87: (in press).

(2) 総説

1. 櫻井直樹 2003年 レーザー・ドップラー装置による果実の非破壊的粘弾性測定 *日本バイオレオロジー学会誌* 17 : 92-97.

2. 桜井直樹 2004 年 果実の硬さで食べ頃・取り頃を知る技術 農業および園芸 75 : 1286-1292
3. Taniwaki, M. and N. Sakurai (2010) Evaluation of the Internal Quality of Agricultural Products Using Acoustic Vibration Technique. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 79: 113-128.
4. 桜井直樹 2012 年、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、Techno Innovation 84 : 36-41.

(3) 著書

1. Sakurai, N. (2002) Physical properties of fruit firmness and chemical structure of cell walls during fruit softening, In Physical Methods in Agriculture (eds. J. Blahovec and M. Kutilek), Kluwer Academic, pp. 311-341.
2. 桜井直樹 (分担執筆) 2006 年 加工食品ー野菜、果実 (「レオロジーハンドブック」、日本レオロジー学会編、丸善) p. 305-310.
3. 谷脇満・桜井直樹 (分担執筆) 2009 年、共振周波数 (「農産物性と計測方法」、西津、後藤、近藤、林、清水 編著者、コロナ社)