

「音の出る食感」と「音の出ない食感」

1章 食感について

1. 音の出る食感と、音の出ない触感

食感は、食品の3大要素【味、香り、食感】のひとつです。味については、味センサが、香りについては匂いセンサが最近開発され、数値化ができるようになりました。しかし、食感については長い間決定的な方法が見つかりませんでした。もちろん人を使えば官能試験で数値化する事ができますが、昨年、2年前、10年前の食感を人は覚えているのでしょうか？食感を数値として思い出すのは難しい。また、人間の感覚は、10倍の強さの信号を2倍と感じるようにできているので、細かい違いは分かりません。人間の感覚が10倍を2倍と感じるのは感度が悪くて欠点だと思われるかもしれませんが、そうではありません。広い範囲の強度を感じることができる長所でもあります。たとえば、耳の感度は1から100万倍の強さまで聞こえます。ですから、ひそひそ話もできますし、ジェット機が真上を通っても耳は壊れません。

これまで、M. C. Bourne、A. S. Szczesniak、Z. M. Vickersなど多くの研究者が食感を数値化しようとしてきました。ここで食感には二つあることをまず述べましょう。音の出る食感と、音の出ない食感です。音の出ない食感は『触感』といっても良いかもしれませんが。食感を表す言葉を、考えてみても分かります。たとえば、「パリパリ」、「ポリポリ」と言うのは音を表しています。「モチモチ」、「ネバネバ」と言うのは音は出ませんが、触感を表す言葉です。音は出なくとも、食品を口の中で感じる感覚なので「触感」と言う言葉を使いました。口ざわりといっても良いでしょう。食感・触感は両方とも、食品の性状に由来しているのですが、測定する原理は大きく異なります。まずは、音の出る「食感」の測定について述べてみましょう。

2. 音の出る食感の測定

まず研究者たちは、人が食品をかむときの音をマイクで録音しようとしてきました。被験者にものを食べさせて、口の近くにマイクを設置して、録音するのです。ところが実験を重ねていくうちに、多くの難問にぶつかりました。

その問題点を以下に挙げます。

- (1) 国によって、また研究者によって使うマイクや録音機器が異なるので、同じ食品を測定しても研究者によって違うデータが出る。
- (2) マイクと被験者の口までの距離や角度、研究室の広さなどで、得られるデータが大きく異なる。全く同じ測定条件を再現できないので、ほかの研究者のデータと比較できない。
- (3) 被験者により、同じ食品を食べても違う音ができる。理由は、被験者の口の大きさ、あごの骨の大きさ、噛む速度、唾液の量など個人差が大きいためです。

上記の(3)を克服するために、人間を使わずに、天ぷらをフォークで刺したり、ナイフを入れたりしたときの音を録音する方法も考案されましたが、スタンダードな測定法にはなりません。また、食品を台の上におき、上から硬いもので押して、壊れるときの音を台の上においたセンサで測定する方法も考案されました(A. Zdunek, 2010, 2011)。しかし、台の形状や大きさで得られるデータが異なり、また、破壊するときの超音波信号だけを取るために、超音波だけの測定になり、人の官能評価との整合性が取れませんでした。

そこで、食品の割れる音(音響振動)を直接計るために、食品を破壊する歯に見立てたプローブに直接センサをつけた測定装置を開発しました。その開発の顛末は、このHPの開発秘話に挙げています。

2章 音の出る食感測定法の原理

1節 天秤型食感測定装置(噛音2号)

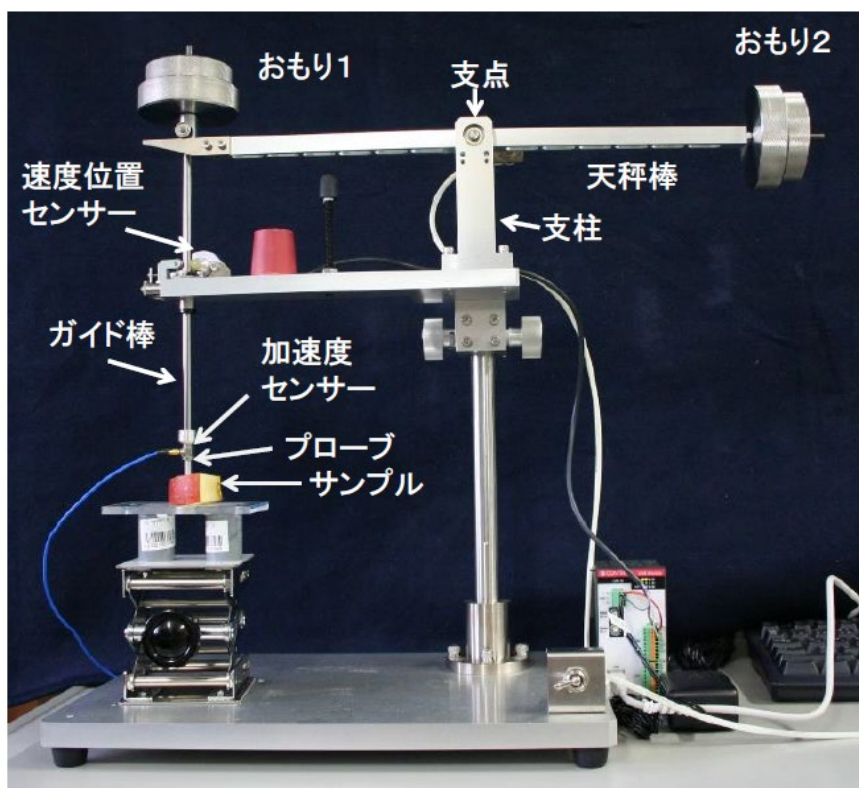
HPの製品紹介の製品開発秘話【食感測定装置1号】では、初期の装置を詳しく説明しています。初期の装置はプローブを油圧のピストンで押し、センサとして圧電素子を使っていましたが、最新の装置は、プローブを自由落下させ、センサに加速度ピックアップを使っています。天秤型食感測定装置(噛音2号)と名づけました。

プローブの駆動を油圧ピストン方式から天秤型の自由落下に変えた理由は、プローブがサンプルに当たって受け取る振動を、絶対的な物理量にしたいからです。振動は簡単な計算でエネルギー相当量にできますが、本当のエネルギー値にするためには、プローブの重量がどうしても必要です。ところが、油圧ピストンやモータ駆動でプローブを押ししていると、プローブの重量が確定できません。

プローブ自身の重量ではもちろんありませんし、かと言ってピストンの重量でもありません。油の重さでもありません。モータの重量でもありません。プローブの重量を確定するために、天秤型食感測定装置（嚙音2号）を新たに作りました。

装置の写真は下にのせました。支柱があり、支点で天秤の腕（天秤棒）が支えられています。左の腕にはガイド棒があり、その先にプローブが付いています。天秤棒の左右には錘をつけます。左の錘とガイド棒+プローブの重さの合計が、右の錘の重さよりも大きいと、天秤棒は反時計方向に回り、ガイド棒の先に付いたプローブが食品サンプルに差し込まれる仕組みです。ガイド棒の途中に速度位置センサ（位置と時間を測定する計器）をつけているところが味噌で、これ以前には分からなかったいろいろなことがわかるようになりました。

測定前は天秤棒は留め金で止められていますが、測定開始と同時に、留め金はずれ天秤棒が回転し始め、プローブがサンプルに刺さります。写真はプローブがサンプルに突き刺さった後の写真です。



特徴：
プローブ速度を変えられる
錘を変えることで慣性力を変えられる
プローブの速度変化がモニターできる
プローブの質量が決定できる

写真 天秤型食感測定装置（嚙音2号）

この装置は、天秤棒を動かすのに重力を利用し、モータを使わないので、モータの振動がプローブに伝わらず、食品から受け取る振動がそのままセンサで計れる利点があります。また、子供のあごは大人よりも小さいので、錘の重さを変えて同じ食品で大人と子供の食感を比較することができます。プローブの速度は左と右の錘の差が多ければ速くなりますし、少なければ遅くなりますので、調整が可能です。重力による落下ですので、人の咀嚼スピード（50～400 mm/秒）が実現できます。プローブの位置を正確に測定していますので、プローブがサンプルに突き刺さってから止まるまでの距離や時間を正確に測れ、食品摩擦係数（FFI, Food Friction Index）という新しい係数を求める事ができます（後述）。

先にも述べましたように、振動を物理量のエネルギー（単位ジュール、J）として求める事もできます。また、低い音から高い音別に食品から発生するエネルギーを表示することもできます（後述）。

得られた振動エネルギーは、食感エネルギー値（Energy Texture Index, ETI）と定義しました。式は以下のようになります。

$$ETI = (1/2) m \times \sum (cV_i/f)^2 / t$$

mは左右の錘やガイド棒の合計重量です。cは加速度ピックアップから出てきた電圧値を加速度そのものに変換する係数です。fは振動数です。tは測定時間で、ETIは単位時間に食品から発生する振動エネルギーと定義できます。次に、得られた振動エネルギーを低い音から高い音まで分けて表示する方法について説明します。

2節 周波数帯域の取り方（半オクターブ方式）

天秤型食感測定装置では、歯が食品をかむときの低周波（低音）から高周波（高音）までの振動エネルギー全体を物理量として測定できます。われわれの耳は、高い音と低い音を聞き分ける能力を持っています。したがって、食感も高い音のエネルギーと低い音のエネルギーを別々に数値化すると人の評価と合わせやすいと思われます。たとえば、バリバリとパリパリでは、パリパリのほうが、音が高そうです。そこで、プローブに付いている振動センサで得られる振動情報を周波数帯域別にフィルターにより分けて結果を出力するアルゴリズムが考案されました。得られる振動情報の範囲は、加速度センサの性能によってきまっており、たとえば4Hz～20000Hzです。20000Hzは人の耳が知覚できるもっとも高い音で、これ以上は耳に聞こえませんが、歯では感じているかもしれません。

たとえば、ピアノ（88鍵）の左から数えて25番目の鍵盤を鳴らすとラの音が

します。その周波数は110Hz（Hz、ヘルツ；振動の単位）です。110Hzの意味するところは弦が1秒間に110回震えるというものです。そこから1オクターブ高いラの周波数は、220Hz、さらに1オクターブ高いラの音は330Hzではなく、440Hzとなります。つまり人の耳は、2倍の音の高さを1オクターブという1単位として捉えています。

人の耳に聞こえる上限は20000Hz（子供はそうですが、歳をとるとこの上限が低くなることが知られています）でありますが、下限は20Hzといわれています。しかし、普通のスピーカでは20Hzの音は再現できません。普通のスピーカでは100Hz以上は出せます。それでも、十分音楽が楽しめます。そこで、100～20000Hzの音をオクターブで区切れば、100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600となり、20000Hzまで全部で8分割できます。しかし、8分割では細かい食感を評価することができません。そこで半オクターブという概念が使われました。半オクターブとは2の平方根すなわち、 $\sqrt{2}$ （約1.41）倍のことです。これにより100Hzから区切れば、140, 200, 280, 400, 560, 800・・・25600まで16帯域に分けて、より詳細な帯域別の食感エネルギー値が計算できるようになりました。加速度センサの感度は数Hzからあるので、上記に加えて、0～10, 10～50, 50～100Hzの3帯域を加え、全部で19帯域別の食感エネルギー値が計算できます（表1）。20番目の帯域は、普通の加速度ピックアップでは取れません。また、耳には聞こえない周波数帯域です。しかし、先にも述べましたように歯では感じているかもしれませんが、まだ研究はできていません。

表1 食感測定で得られる音響振動を分ける半オクターブフィルター

帯域番号	周波数範囲 (Hz)	帯域番号	周波数範囲 (Hz)
1	0～10	11	1120～1600
2	10～50	12	1600～2240
3	50～100	13	2240～3200
4	100～140	14	3200～4480
5	140～200	15	4480～6400
6	200～280	16	6400～8960
7	280～400	17	8960～12800
8	400～560	18	12800～17920
9	560～800	19	17920～25600
10	800～1120	20	25600～35840

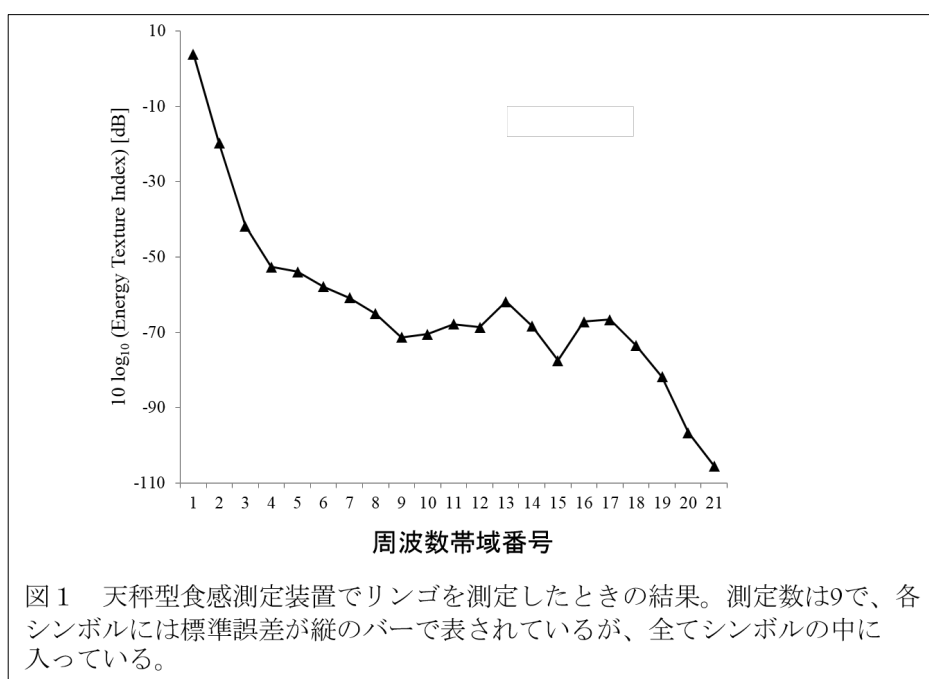
帯域番号1～3までは、半オクターブ間隔にはなっていない。帯域4から20までは2の平方根（1.4）倍になっている。

リンゴを分析したときの結果を下の図1に示します。リンゴは、赤道面で2セ

ンチ厚の輪切りにして台に置き、果肉部分に先端が楔形のプローブを差し込みました。縦軸にはエネルギー食感値を対数でとっています。真数で表すと、高音の値の変化が見にくくなるので、対数値にしています。横軸は周波数帯域番号で、表1に対応しています。全体としては、グラフは右肩下がりになっています。この意味するところは、プローブがサンプルから受け取る振動エネルギーは、高周波（高音）ほど低くなるということです。

3節 エネルギー食感値(ETI)と人の官能

図1で示したように、一般的にどのサンプルでもエネルギー食感値の帯域別



のグラフは、右肩下がりとなります。つまり、食品サンプルにプローブが挿入されたときの振動は、高周波数のものほどエネルギーが低いことを意味しています。一方、古くから人の聴覚感度は、低音から高音まで同じではないことが知られています。

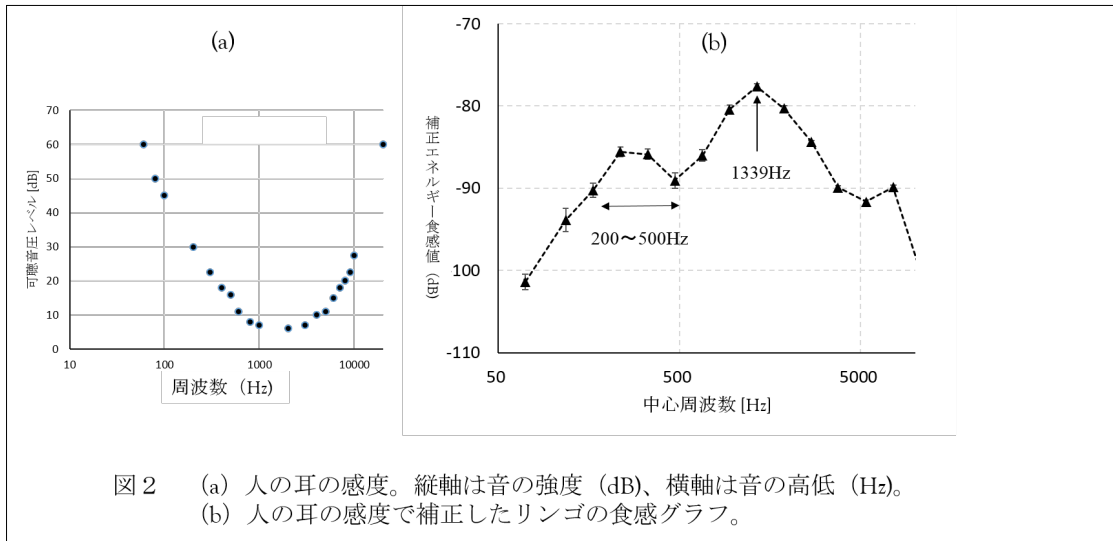


図2 (a) 人の耳の感度。縦軸は音の強度 (dB)、横軸は音の高低 (Hz)。
 (b) 人の耳の感度で補正したリンゴの食感グラフ。

図 2 (a) は、ヒトの聴覚の感度が周波数によって、どのように変化するかを模式的に表したものです。縦軸は音の強度をデシベルで、横軸は音の高低を周波数 (Hz) の対数で表しています。このグラフは聴力検査で行われるように、ヘッドフォンを耳につけて、どれくらい小さな音まで聞こえるか、で得られたものです。値が低いほど、小さな音でも知覚され、耳の感度が良いことを示しています。この図から、人の耳は 1000~5000Hz の音に非常に敏感で、それよりも高音でも、低音でも感度が悪くなることが分かります。赤ちゃんの泣き声には、2000Hz と 4000Hz 付近の音が多く含まれています。これは人の耳によく聞こえるだけでなく、実は不快な音なのです。それで放っておけないというわけです。うまくできています。

図 1 のリンゴのエネルギー食感値は、歯に見立てた楔形のプローブをサンプルに差し込んだときの振動をそのまま物理的なエネルギー値にしていますが、この振動が、人の脳に知覚されるときには、1000~5000Hz の音をもっとも敏感に捉えられます。そこで、このグラフ (a) をもとにして図 1 を補正すれば、脳が知覚する食感のレベルをグラフに表すことができます。この補正を行うとリンゴの食感値は図 2 (b) となります。

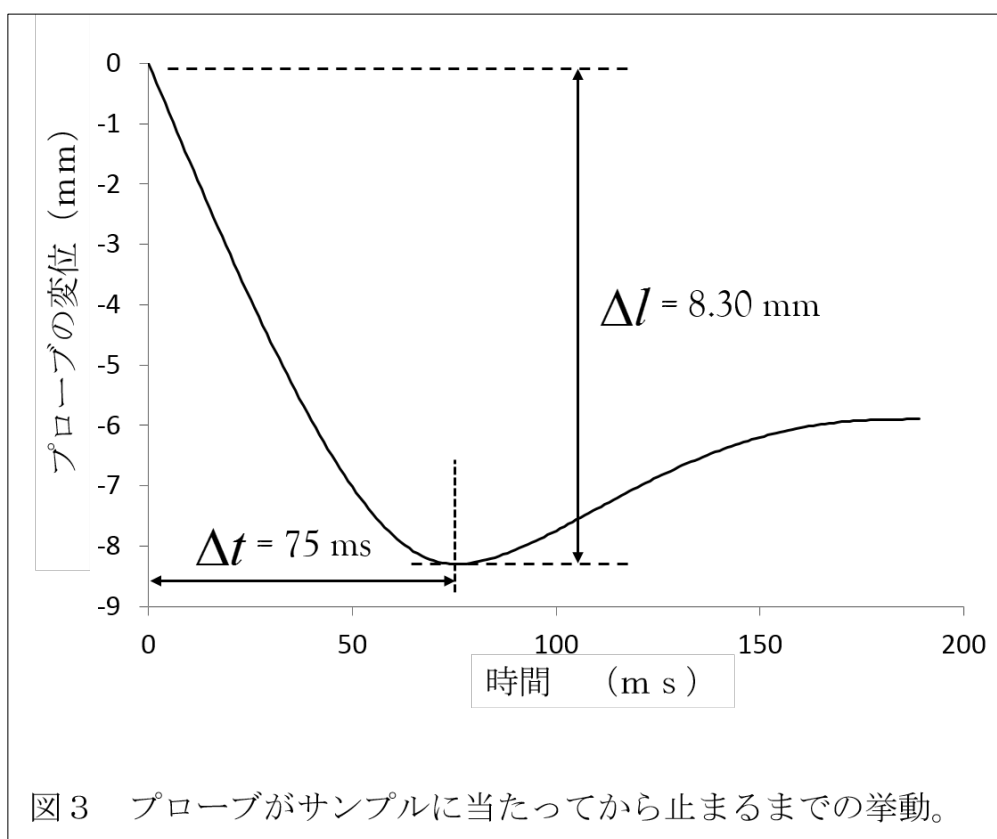
図 2 (b) では、200~500Hz と 1500Hz 付近に 2 つのピークが見られ、リンゴのサクサク感が 200~200Hz 付近、シャキシャキ感が、1500Hz 付近の音と関係があることを示唆していると思われます。

ここで紹介した食感測定法は食品を噛んだときの食感を物理的な音響振動エネルギーとして捉え、それを周波数別に分け、最後には脳に到達する信号レベルとして評価するものです。音響振動とは耳に聞こえる音の範囲の振動です。

4節 食品摩擦係数 (FFI, Food Friction Index)

食品を歯で噛むとゼリーのように歯がすっと入るものもあれば、クッキーのように歯に摩擦を感じるものもあります。食感測定装置は、音の出る食品の食感を測定するものですが、ギーギーいいながらしるドアの音は摩擦に原因があります。したがって、音の出るサンプルは摩擦が生じているといえるでしょう。摩擦の大小は摩擦係数と言う値で評価することができます。天秤型の食感装置には精度の高い位置センサが付いているので、プローブが食品に刺さってから止まるまでの挙動が非常に精度よく測れます。これを使えば、摩擦係数が計算できます。プローブが食品に刺さった後の挙動を詳しく見たのが図3です。

図3では、左端はプローブがサンプルに当たった瞬間で、横軸はその後の時間(ミリ秒)、縦軸は挿入距離です。サンプルの表面を0ミリとしているので、プローブが挿入されるとマイナスの値となります。時間精度は1ミリ秒、距離精度は1 μ mです。この図からプローブはサンプルに当たってから75ミリ秒後で最深部に到達し、少し上に戻って止まったことがわかります。最深部までの距離は8.30mmでした。これらの値をもとにすると食品摩擦係数(FFI, Food Friction Index)が、以下の式で定義できます。



$$\text{FFI} = (3/4) \times (m v_0 / \Delta l) \dots \dots \text{(式 1)}$$

$$\text{FFI} = (3/2) \times (m / \Delta t) \dots \dots \text{(式 2)}$$

mは質量、 v_0 はプローブがサンプルに当たるときの初速度、 Δl と Δt は図3に示してあります。初速度(v_0)はサンプルにプローブが入る直前の時刻と変位から計算します。両式ともmが出てきますが、mが既知なので計算ができます。逆に言うと、mが分からなければ、FFIは計算できません。この式でも分かるように、最深部までの距離(分母の Δl)が長ければ長いほど、つまり分母が大きいほどFFIは小さな値を取りますので、摩擦は少ないといえます。つまり摩擦が少ないから深くまでプローブが刺さるのです。また同じことですが、最深部に到達する時間(分母の Δt)が長ければ長いほどFFIが小さくなり、摩擦は少ないといえます。逆に早く止まる(Δl あるいは Δt の分母が小さい)と、摩擦係数が大きいことを示しています。

表2に、リンゴ、カキ、バナナのFFIを比較のために載せました。FFIの単位はkg/sです。表2では式1と式2で計算した値を両方載せていますが、両者は一致しています。リンゴがもっともFFIが高く歯が果肉に入りにくい。バナナはFFIが一番低く、歯が入りやすいと思われます。カキはその中間です。これらの結果は、官能試験ともよく合います。

表2 果実果肉の摩擦係数 (FFI) の比較			
計算式	FFI (kg/s)		
	リンゴ(15)	カキ(12)	バナナ(20)
式 (1)	23.6±0.7	20.5±0.8	12.4±0.1
式 (2)	23.6±0.7	20.5±0.8	12.4±0.1

数字は平均値と標準誤差。()内はサンプル数。

この摩擦係数の測定を行う上で注意すべきは、プローブの挿入によって割れるサンプルです。果実の果肉のように、果肉の途中でプローブが止まる場合はFFIが計算できますが、サンプルが測定中に割れてしまうとFFIは計算できません。またプローブがサンプルを突き抜けて止まる場合も、定義できないので、調整してサンプルの途中でプローブが止まるように錘の重さなどを調整する必要があります。

3章 音の出ない触感の測定（粘弾性測定）

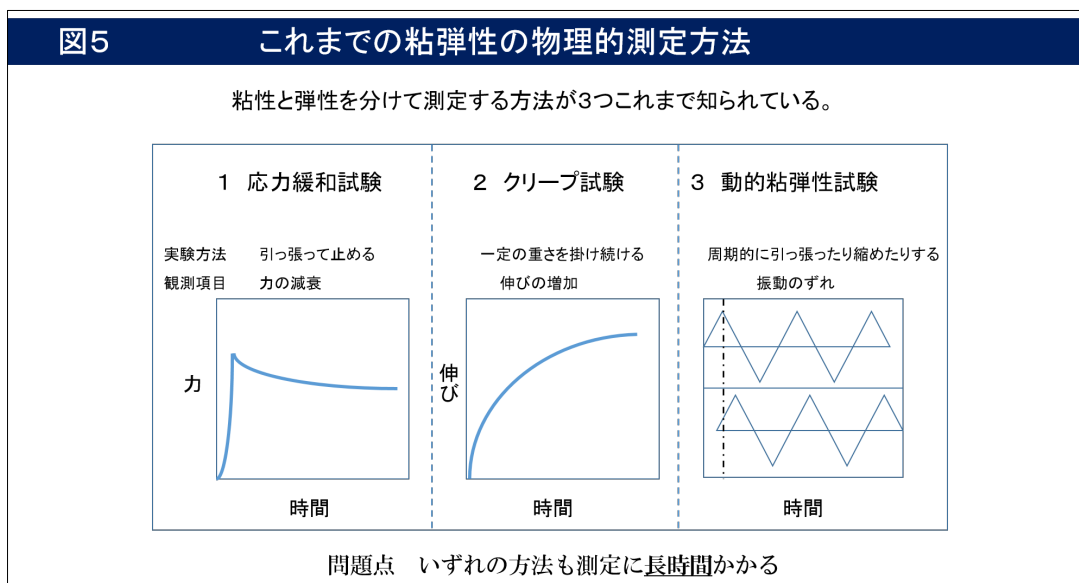
触感は、最初にも述べましたように、音の出ない食感です。その感じは、言葉で表現されますが、数値化できませんでした。しかし、その言葉を良く見てみると、たとえば柔らかい、硬いなど、食品の物理的性状に深く関係しています。食品が柔らかいか、硬いか、などは、物理学では粘弾性という性質に入ります。どのような物質にも、粘性と弾性の性質が共存しています。水は粘性が低い物質ですが、圧縮してもほとんど縮まないの、弾性は高いといえます。コンクリートの床や壁は、粘性が非常に高いといえます。

粘性とは力を加えているとだんだん変形していく性質です。風呂の水面に手を置いて力を加えれば、いくらでも下に行きます。水は粘性が低いといえます。同じように粘土に指を立てて力を入れると少しずつ指が入っていきます。粘性があるからです。同じ力を加えても、柔らかい粘土はよく凹みますし、固い粘土は、少ししか指が入りません。柔らかい粘土は粘性が低く、固い粘土は粘性が高いといえます。重要な点は、指を抜いても、へこんだところが戻らないことです。バネを押してもへこみますが、指を離すと、元に戻ります。これが、弾性と粘性の大きく異なる点です（図4）。



食品の性質には、化学的・物理的性質があり、粘弾性は物理的性質の中でも、硬度や、触感に関係する性質です。そこで、このような食品の粘弾性をきちんと計れば、触感が数値化できる可能性があります。しかし、粘弾性を測定するには、大変な手間とお金と時間がかかっていました。

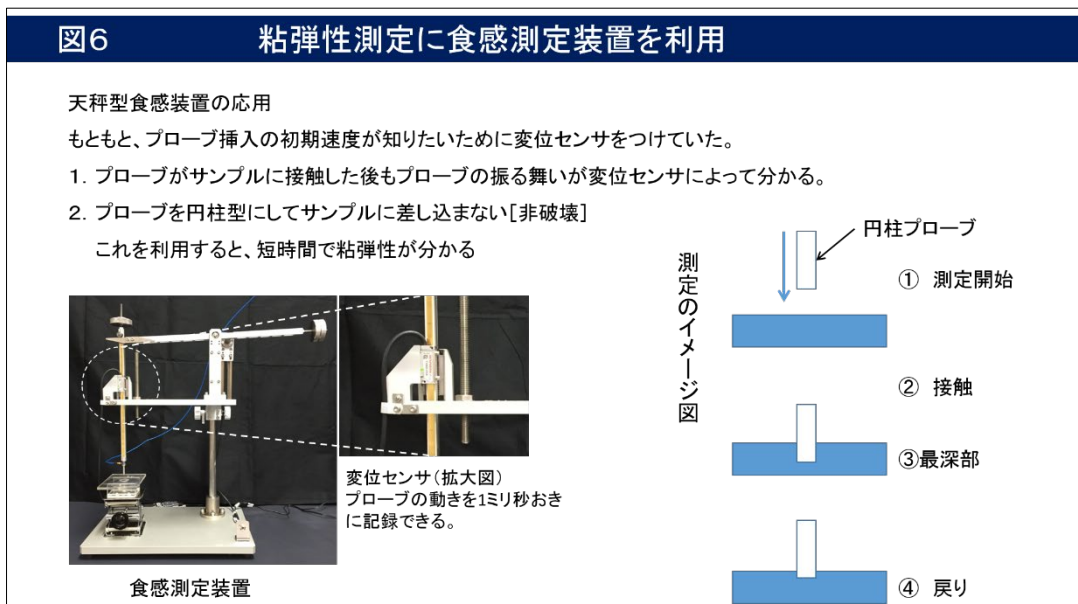
粘弾性を測定する方法は、以下の3つが知られています（図5）。



- 1 応力緩和法というのは、瞬間的にサンプルを引っ張ったり、押しつけたりにして、そのままにしておくと、最初に生じていた力（応力）がだんだん失われていく（緩和する）という性質を利用したものです。たとえば、麺を引っ張ると最初は抵抗力が生じますが、だんだんその力が失われていきます。引っ張るのをやめると、元の長さには戻らず、少し伸びた状態になってしまいます。逆に言うと、だからラーメンやそばやうどんができるのです。小麦粉の塊が、弾性しかなければ、いつまでたっても丸い塊のままで、細い麺にはなりません。応力緩和測定法の欠点は時間がかかることです。力の減少をできるだけ長く記録すればよいデータが得られますが、食品の場合時間が立つと性質が変化してしまうものもあり、長時間の測定には向かないものもあります。
- 2 クリープ試験は、逆に、サンプルに錘のようなものをつけて、その伸びを記録するものです。これも（1）とおなじく、測定には時間がかかります。また、サンプルに錘をかけたときに、瞬間的に伸びすぎの状態になってしまい、理想的な測定ができません。
- 3 動的粘弾性は、食品を2つの板の間で挟んで、その板を動かすことによりサンプルがどのように振舞うかを記録するものです。大変優れた測定法ですが、サンプルを二つの板にはさむのは大変難しいことです。液体試料は比較的簡単に計れます。しかし、ポテトチップスや、スナック菓

子を2つの板にはさむことはほとんどできません。またサンプルを平行に切ることは、言うほど簡単なことではありません。

そこで、天秤型の粘弾性測定装置を開発しました（図6）



この装置は天秤型の食感測定装置で測定しているとプローブがサンプルに入った後、上下にゆらゆらしながら止まる様子を見ていて気づいて開発したものです。ゆらゆらしながら止まるということは、弾性と粘性の性質を反映しているからです。この過程をきちんと測定して解析すれば、新しい粘弾性の測定装置ができることに気づきました。ただし、サンプルにプローブ（刃）が入ってしまうと、計算がややこしくなるので、底が平たい円柱型のプローブをサンプルにそっと当てるだけの測定条件にしました。この装置で、体積弾性率と粘弾性が測定できることがわかりました。しかも測定時間は1秒以内です。これなら、コロケの揚げたてと5分後の触感を比べることができます。

また、この装置の開発中に、もしヤング率が分かれば、ずり弾性率とポアソン比が計算できることに気づきました。ヤング率とは、物体をある一定の距離押ししたり伸ばしたりしたときに生じる抵抗力と押ししたりひっぱったりした距離の比です。そこで、プローブが最初にサンプルに当たり、少し沈んだときの距離とプローブが停止するときの速度変化からヤング率が計算できることがわかりました。このヤング率測定法と、別の装置で測定したヤング率はよく一致することは確かめました。ずり弾性率とは、たとえば羊羹を立てておいて、横か

ら押したときの抵抗力です。ヤング率は縦に押したときの抵抗力に関係します（図7）。

ポアソン比とは、その性質が物理学の教科書に古くから記載されているのに、本当に計る事が非常に難しかったものです。ものを台において上から押さえると、たとえばゴムなら、横に広がります。しかし食パンではほとんど広がりません（図7）。

図7 ポアソン比とずり弾性率の説明

$$\sigma(\text{ポアソン比}) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E}{3K_1} \right)$$

$(-1 < \sigma < 0.5)$

$$\mu(\text{ずり弾性率}) = \frac{E}{2(1 + \sigma)}$$

(E、ヤング率; K₁、体積弾性率)

ヤング率を測定すると、体積弾性率K₁から“ポアソン比”が、つぎに、ポアソン比とヤング率で“ずり弾性率”が求まる。
ポアソン比は食品のつぶれ方、ずり弾性率は食品の横方向への抵抗力を示す。

10

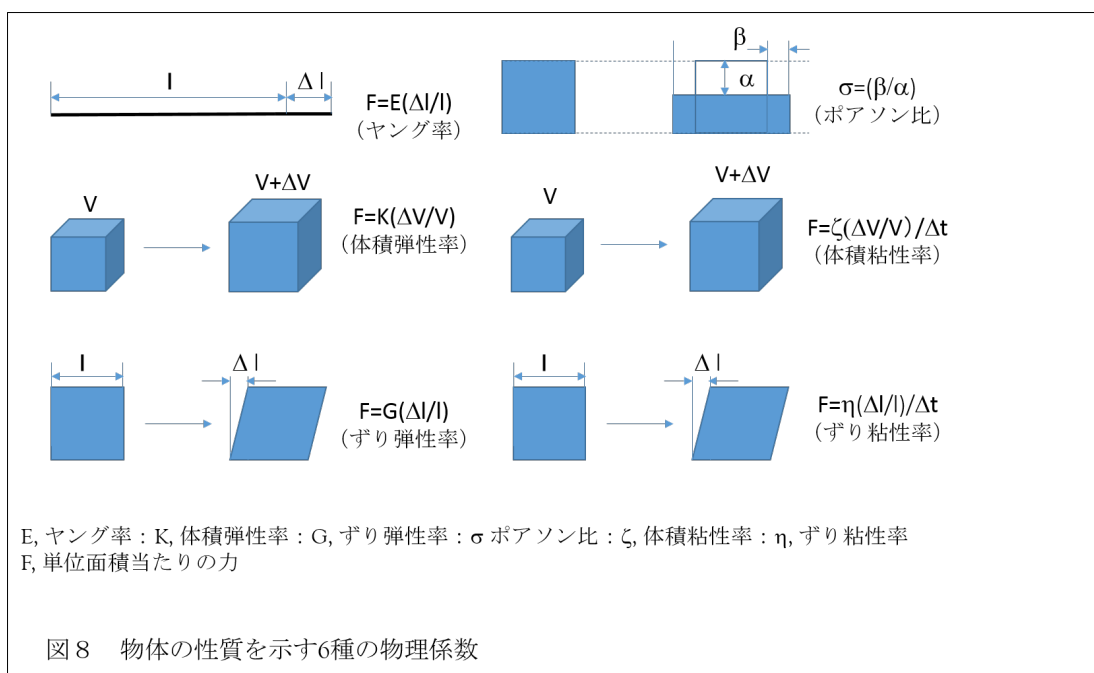
このように、体積弾性率とヤング率がわかると、計算でポアソン比が出るということがわかりました。これまで、どれだけ横に膨らむかをレーザー光線で測っていたポアソン比の測定は、大がかりで大変難しかったのですが、これも1秒以内に測定できることがわかりました。グミはゴムの値と同じく0.5近く、リンゴでは文献値と同じく0.2~0.3の値がでることがわかりました。

以下に、この装置で得られる物理係数について詳しく述べます。

先にも述べましたように、触感は、食品を歯でかんだときの、軟らかさ・硬さ・粘り気・もろさなど物理的な性質に帰属させることができるものが多くあります。物質の物性は、弾性と粘性が良く知られており、弾性には、ヤング率、体積弾性率、ずり弾性率の3種が知られています。粘性では、ずり粘性率と体積粘性率の2種が知られています。これ以外に、物体の物理的性質をあらわすものとしてポアソン比があります。以上6種の物理係数で物体の性質は全て表されます。したがって食品の6種の物理係数を測定できれば、少なくとも食品の物理

的性質を全て知ることができるので、これを組み合わせれば人の官能評価値を数値化できる可能性があります。逆に言えば、モチモチとかフワフワとかコロコロを直接計る手段はないのではないのでしょうか。

次に、各物理量を簡単に説明します（図8参照）。



- ・ヤング率・・・物体を一方方向に伸ばしたり圧縮したりするときの伸びと力の比
- ・体積弾性率・・・物体が全体的に拡大したり縮んだりするときの変形率と力の比
- ・ずり弾性率・・・物体を横に押したときの変形率と力の比
- ・体積粘性率・・・物体の体積変化速度とそれを妨げる力の比
- ・ずり粘性率・・・物体がずれるときの変形速度とそれを妨げる力の比
- ・ポアソン比・・・物体を押したときの横方向への変形と押した距離の比

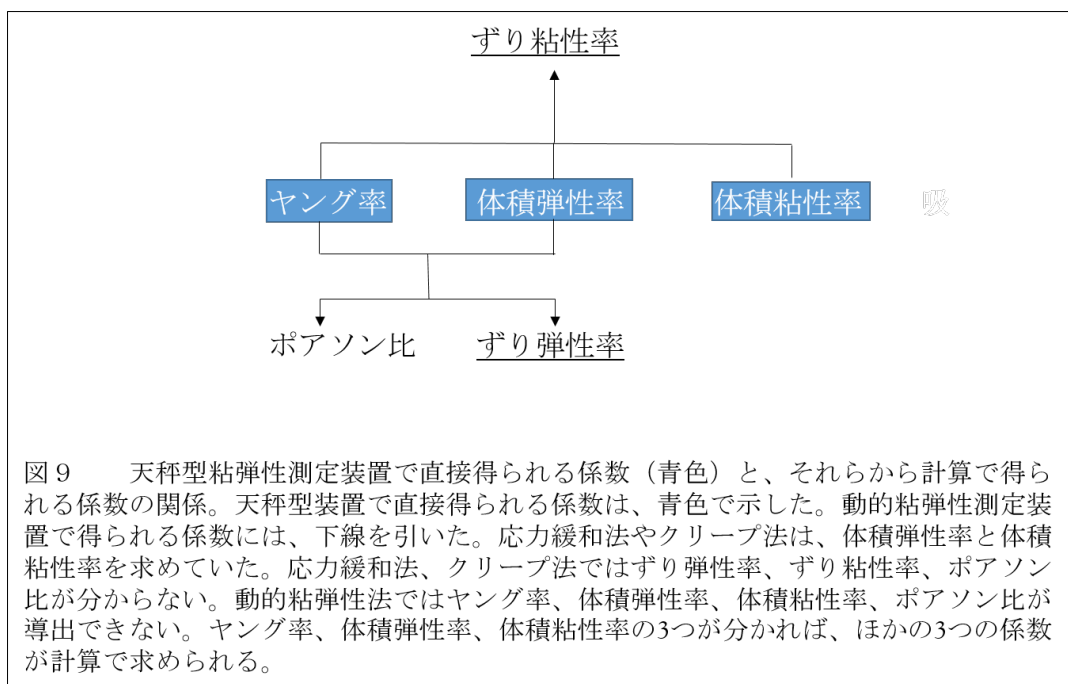
ヤング率(E)と体積弾性率(K)からポアソン比(σ)が、またヤング率とポアソン比からずり弾性率(G)が、次の式から出ます。

$$\sigma = (1/2) \cdot (1 - E/3K)$$

$$G = E / \{2 \times (1 + \sigma)\}$$

また、ヤング率・体積弾性率・体積粘性率から、ずり粘性率が出ます。このように1回の測定で、ヤング率、体積弾性率、体積粘性率が出れば、全ての物理係数が計算できます。この関係を図9に示します。前述したように、これまでの粘

弾性の測定には、応力緩和法、クリープ法、動的粘弾性測定法の 3 種があります。応力緩和法とクリープ法は、図 9 のパラメータのうち、体積弾性率と体積粘性率が測定できます。しかし、測定には長時間かかるという難点があります。動的粘弾性測定法では、ずり弾性率とずり粘性率が測定できます。しかし、サンプルの調整や測定に長時間かかるという難点があります。いずれの方法も、得られるパラメータだけでは、ほかの係数が計算できません。



天秤型の粘弾性測定装置では、これらの係数の内、ヤング率、体積弾性率、体積粘性率を短時間（1 秒）で測定できます。したがって、図 9 で示したように、ポアソン比とずり弾性率、ずり粘性率が計算で求められます。したがって、全 6 種の物性値が、1 秒の測定で全て求められるのです。

装置の構造は天秤型食感測定装置とほとんど変わりませんが、以下の 2 点で変更があります。

1. プローブは底が平らな円柱型である。
2. サンプルにプローブを当てたときに、跳ねないように近距離からプローブを落とす。

計算の都合上、サンプルと最初のプローブの間隔を正確に知る必要があります。そこで、レーザーでその間隔を常に 5 ミリにするために、サンプル台を自動的に上下させる機構が付いています。またサンプルの厚さを常に知るための測距機構が付いています。したがって、あまりサンプルを正確に切る必要がありません。

ん。しかし、できるだけ平行に切る必要はあります。

下の図 10 は、測定原理と計算方法を示したものです。右のグラフが実測データで円柱プローブがサンプルに当たってからの挙動を示したものです。縦軸は距離で、横軸はサンプルにプローブが当たってからの時間をミリ秒(1/1000 秒)単位で示したものです。一度プローブがサンプルに当たると(当たった位置を青の水平の破線で示しました)、ある程度プローブが押し込まれますが、そのうち最深部に到達すると弾性のため跳ね返ります。もしサンプルが完全弾性体で粘性が少しも無ければ、プローブは上がったたり下がったり、永久に動き続けます。しかし、サンプルに粘性の性質があれば、いつかはその振動が納まりプローブが停止します。その様子が図 10 の右の図です。プローブの当たった位置よりもサンプルが少しへこんだ位置で当たってから約 200 ミリ秒後にプローブが止まったことを示しています。

このプローブの挙動は左のモデルで説明できます。弾性はバネで、粘性はゴミ箱に液体の入った要素で示されます。このモデルでは、バネの要素が2つ、粘性の要素がひとつ、図のように繋がったモデルです。モデルの左下に書いてある式で、右のグラフを再現すると、いろいろな数値が計算できます。右のグラフの赤い点は実測値で、細い青い実線が式で再現したグラフで、両者はきれいに一致しています。このことは、左のようなモデルで、右のグラフを再現しても大丈夫であることを示しています。

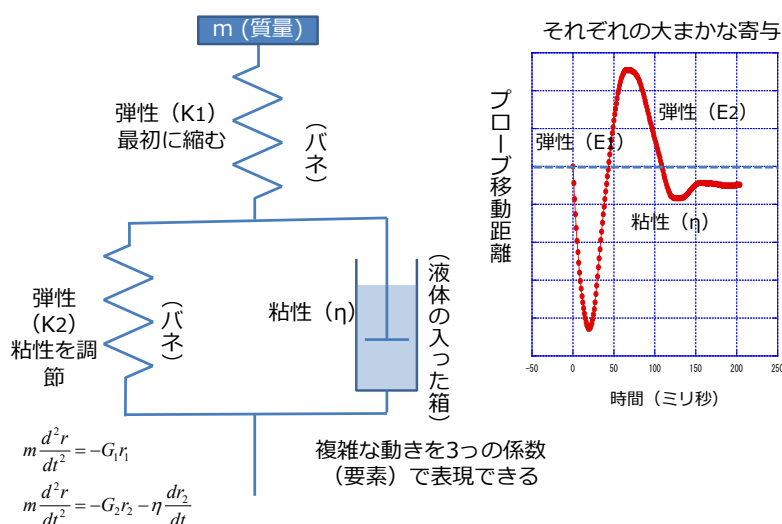


図 10 プローブの動きのモデルと粘弾性測定グラフ

バナナとイチゴの測定結果例を表3にまとめます。

表3 バナナとイチゴの粘弾性係数						
サンプル	ヤング率 (MPa/m ²)	体積弾性率 (MPa/m ²)	体積粘性率 (kPa・s)	ポアソン比	ずり弾性率 (MPa/m ²)	ずり粘性率 (kPa・s)
バナナ	2.39	10.4	67.2	0.469	0.813	37.2
イチゴ	0.57	0.64	12.7	0.423	0.200	3.0

バナナのポアソン比は 0.5 に近く、押さえた分だけ横に広がるイメージです。グミも 0.5 に近いです。ポアソン比は -1~+0.5 で定義されています。イチゴのポアソン比は 0.423 とバナナよりも小さいです。押すと、その分だけ横に広がらないことを示しています。イチゴ果実の内部には空洞が多いので、このような傾向が出ます。リンゴでもポアソン比は 0.2~0.3 で、0.5 から遠いです。リンゴも果肉に空気を多く含む果実として有名です。また食パンでも、真ん中をくりぬいて押ししても、横にはほとんど広がりません。組織サンプル内の空洞体積比率とポアソン比になんらかの関連があるのかもしれない。

イチゴのヤング率はバナナの 1/4 で、柔らかいことを示しています。体積弾性率も小さいです。体積粘性率とずり粘性率もイチゴのほうが低いです。これらが、イチゴとバナナの触感の違いを明確に表しているものと思われます。これらのパラメータと人の官能をどのように関連付けできるかは、これからの研究課題です。

参考文献

1. Roudaut, G., C. Dakremont, B. Pamies, B. Colas and M. Le Meste, Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. Food Sci. Tech. 13: 217-227 (2002).
2. Zdunek, A. and K. Konstankiewicz. Acoustic emission in investigation of plant tissue micro-cracking. Trans. ASAE 47: 1171-1177 (2004).
3. Zdunek, A., D. Konopacka and K. Jesionkowska. Crispness and crunchiness judgement of apples based on contact acoustic emission. J Text. Studies 41: 75-91 (2010).
4. Taniwaki, M. and N. Sakurai. Evaluation of the Internal Quality of Agricultural Products Using Acoustic Vibration Technique. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 79: 113-128 (2010).
5. 山田芳靖、土方啓暢、川原伸章、藤坂洋一、中川誠司、電学論 E124 巻、272-277 (2004).
6. 櫻井直樹 音響振動信号による野菜の食感の評価法 野菜情報 73 : 28-35 (2010).
7. 櫻井直樹 新しい食感評価法と装置 ジャパンフードサイエンス 2010-5 : 56-63 8 (2010).

8. 谷脇満、櫻井直樹 おいしさと音 FOODS&FOOD INGREDIENTS JOURNAL OF JAPAN 216 : 316-322(2011).
9. 櫻井直樹、食感測定装置による食感評価法の開発について、日本バーチャルリアリティ学会誌 18 : 34—35 (2013).
10. Sakurai, N., S. Iwatani, S. Terasaki and R. Yamamoto. Texture evaluation of cucumber by a new acoustic vibration method. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 74:31-35 (2005).
11. Sakurai, N., S. Iwatani, S. Terasaki and R. Yamamoto. Evaluation of ‘Fuyu’ persimmon texture by a new parameter, “Sharpness index”. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 74:150-158 (2005).
12. Iwatani, S., H. Yakushiji, N. Mitani and N. Sakurai. Evaluation of grape flesh texture by an acoustic vibration method. Post. Biol. Technol. 62: 305-309 (2011).
13. Taniwaki, M., T. Hanada and N. Sakurai, Development of a methodology for quantifying food texture using blanched bunching onions. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 75: 410-414 (2006).
14. Taniwaki, M., T. Hanada and N. Sakurai, Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor. Food Research International 39: 1099-1105 (2006).
15. Taniwaki, M., T. Hanada and N. Sakurai, Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. Postharvest Biol. Technol. 51: 80-85 (2009).
16. Taniwaki, M., M. Takahashi, N. Sakurai, A. Takada, M. Nagata. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. Postharvest Biol. Technol. 54: 106-110 (2009).
17. Taniwaki, M., N. Sakurai and H. Kato, Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. Food Research International 43: 814-818 (2010).
18. 鈴木哲也・新川 猛・櫻井直樹. 音響振動法によるカキ‘太秋’の食感評価. 園芸学研究. 12:433-438 (2013).
19. 鈴木哲也・新川 猛・櫻井直樹. 1-MCP 処理およびポリエチレン包装によるカキ‘太秋’の食感保持技術の開発. 園芸学研究. 13:275-282 (2014).
20. Iwatani, S., H. Akimoto and N. Sakurai. Acoustic vibration method for food texture evaluation using an accelerometer sensor. J. Food Engineering 115 : 26-32 (2013).
21. Akimoto, H. and N. Sakurai. A balance style device for acoustic measurement of food texture. Food Research International (in press) (2018).
22. Akimoto, H., N. Sakurai and D. Shirai. A new device for acoustic measurement of food texture using free running probe. J Food Engineering 215: 156-160 (2017).
23. Akimoto, H. and N. Sakurai. A balance style device for measurement of viscoelastic properties of food. Food Research International (in preparation) (2018).