

音の出る食感の数値化

この答えを出す前に、まず食感を文化として考えてみましょう。

食べ物をかんだ時に感じる食感を日本人ほど大切にする国民は少ないといえます。これは食感を表現する言葉がほかの言語に比べて圧倒的に多いことでも頷けます。少し思い出しても「パリパリ」「バリバリ」「シャキシャキ」「ボリボリ」「モチモチ」などがあります。最初のいくつかは、食べた時の音を表現しています。シャキシャキは、レタスなどの鮮度を表現する言葉です。またポキポキという食感を表す言葉は商品名にもなっています。

1. 昨年の夏に食べたスイカの食感を覚えていますか？

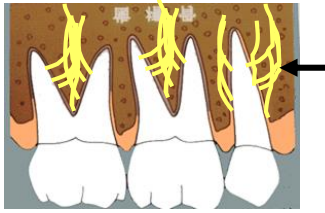
食感は食品の開発などで大変重要な位置を占めます。特に最近では食感を売りにした商品がたくさん開発されています。これまでに食感を客観的な数字で表現しようとした数々の試みがあります。ヒトは食感を記憶することが難しいからです。昨年の製品と今年の製品の食感の違いを正確に比較することがヒトにはできません。そこで、食感を客観的な数字として記録保存しようという研究がたくさん行われました。

その一つは、ヒトに食品を食べてもらい、その音をマイクでとるものです。ところがこの方法は難しい問題を含んでいることが分かりました。一つは被験者に由来するものです。食品を食べてもらう人の、口の大きさ、噛むスピード、出てくる唾液の量、が個人により異なるのです。それで同じ食品を試験しても同じデータが出ません。また、測定する部屋の大きさ、マイクの性能、マイクの位置・方向が結果に大きな影響を与えることが分かり、標準的な方法としては発展しませんでした。

もう一つは、食品を試験機で検査するものです。センサーを食品に挿入したりして破壊し、その時の「力」を測定するものです。多くの研究がなされましたが、人の感じる食感をぴったり合う指標が作れませんでした。

そこで、私たちは食感がなぜ生まれるかに立ち戻って研究を始めました。

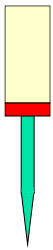
食感には、音の情報と触覚の情報が含まれています。音は歯が食品を破壊するときに生じます。触覚は、2つあります。一つは、歯が感じるもの。もう一つは歯以外の頬や上あご、舌が感じるものです。この中で、私たちは、歯が感じる食感に注目しました。歯で食品をかむと音がします。この音は空気の振動を通して耳に、またもう一つは頭がい骨を伝わって耳に到達します。いずれにしても歯



が食品を破壊した時に生じる振動に基づいています。ですから、この振動を直接測定すると食品の食感が測れるのではないかというのが、私たちが開発した装置の原理です。

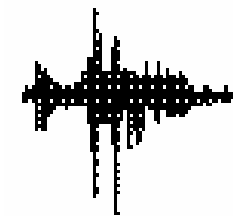
左の図の上の矢印のように歯の根元には多くの神経が張り巡らされており、歯を感じる振動を感知しています。歯が食品をかんだ時に生じる振動はすべてこの神経が感じているといえます。虫歯が痛いのもこの神経のせいです。

そこで、この歯の構造と同じ構造を持つプローブ（測定するために食品に挿入するもの）を作ろうと思いました。歯に見立てた金属製の棒の根元に振動を感知するセンサーを取り付けた構造が、歯医者さんの椅子に座って治療を受けているときに浮かびました。それが下の図です。



この図の赤い部分がセンサーです。下のとがっている部分が、プローブと呼ばれるもので、犬歯なら先がとがった三角錐、門歯ならマイナスドライバーのような形をしたアルミ製のものです。最初のひと噛みは門歯で破壊することが多いので、マイナスドライバー型をしたプローブを使うことにしました。センサーですが、振動の強弱を正確に電圧の変化に変えることのできる加速度センサーというものを採用しています。

このプローブを食品に差し込むと、その食品の性状に応じた振動が発生します。この振動をセンサーが電圧の変化としてとらえることができるのですが、その変化は下の図のように複雑です。



横軸は時間を表していますが、プローブがサンプルに突き刺さっていく状態を表していると考えられます。上半分がプラスの電圧で、下半分がマイナスの電圧です。振動ですから、

プローブは上下に振れ、それに応じてプラスとマイナスの電圧信号が出ます。この電圧の値をそのまま全部足すとゼロになってしまいます。それでは大きく振動しても、小さく振動しても同じ値になってしまいますので、少し工夫します。それは電圧値を2乗する方法です。こうするとすべての信号はプラスになります。しかし今度は振動の大きさが本当よりも大げさになってしまいますので、元の大きさに戻すために平方根を取ります。

数式であらわすと、下のようになります。

$$V = \sqrt{v^2}$$

ここで v はセンサーの出す電圧値です。大文字の V が振動の大きさを表すことになります。

これで振動の大きさは表現することができました。これだけで、食感の違いを表すことができるのでしょうか？もう一度食感を表す言葉に立ち戻ると、「ポリポリ」と「ボリボリ」では何となく音の高さが違います。この音の高さは食感を表す時にその食品の性状を知る重要な手掛かりを与えているのではないかと考えました。このように音の高さを感じる言葉は、「サクサク」と「ザクザク」、「カリカリ」と「ガリガリ」、「パリパリ」と「バリバリ」などたくさんあります。すべて濁点がついた方が音は低そうです。このようなことに気づくのは日本人だけかもしれません。

2. 食感と音の高さ

そこで、音の高さに注目することにしました。

音の高さは1秒間に何回振動するかという回数で決まります。低い音は回数が少なく、高い音は回数が多くなります。人の耳は毎秒20回以上振動する音を一番低い音と感じ、毎秒20,000回以上振動する音は聞こえません。1秒間に1回振動することを1Hz（ヘルツ）と表示します。ですから人の耳は20Hzから20000Hzまでの音を聞くことができるといえます。そこで、上の電圧の振動には多くの振動が含まれていると考えられますので、振動をフィルターにかけることにしました。フィルターとはある決まった振動数

帯域番号	帯域(Hz)
0	0-10
1	10-50
2	50-100
3	100-140
4	140-200
5	200-280
6	280-400
7	400-560
8	560-800
9	800-1120
10	1120-1600
11	1600-2240
12	2240-3200
13	3200-4480
14	4480-6400
15	6400-8960
16	8960-12800
17	12800-19920
18	19200-25600
19	25600-38400
20	38400-51200

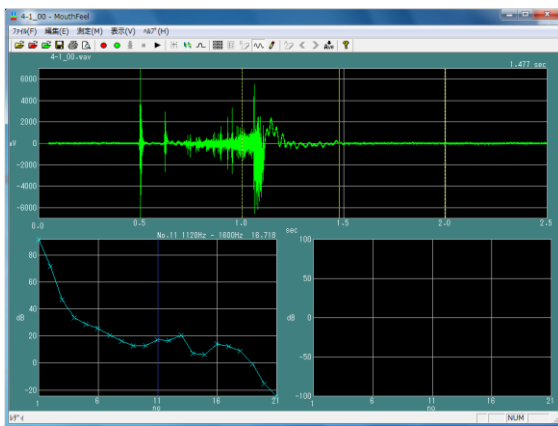
だけを通すフィルターです。例えば得られた振動を20~10000Hzと10000~20000Hzの2つのフィルターを通せば、ある食感について、それは低音が主なのか高音が主なのかわかります。2つのフィルターでは少なすぎるので、オクターブという概念を用いてフィルターを作りました。

プローブをサンプルに突き刺すとさまざまな振動が発生します。上に述べたように低音と高音の2つのフィルターを用いても大体のことはわかりますが、それでは荒すぎます。そこで、左の表のような21の帯域に分けました。この分け方の根本には、オクターブという考え方があります。人は、音の高さが2倍で一区切りという感覚があります。これがオクターブです。ピアノのドの鍵盤を押して出る音とオクターブ上の音はやはり同じドという名前です。しかし高いほうのドは低いほうのドの振動数が2倍になっています。そこで、

食感を表す振動の分け方もこの考えを取り入れることにしました。帯域番号 0 は人の耳には聞こえない音ですが、振動としてはとらえられます。この帯域は噛み応えなどを教えてくれます。

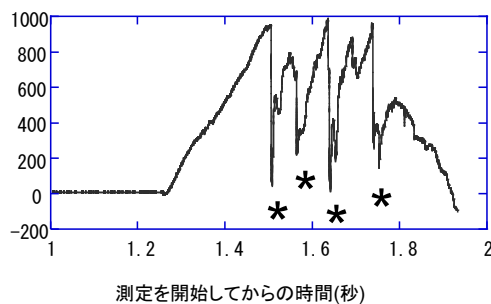
その後、10-50,50-100 は 100Hz までを適当に区切りました。100Hz の 2 倍は 200Hz なのですが、この調子で行くと、ヒトの耳に聞こえる限界である 20000Hz まで、わずか 12 の帯域でカバーしてしまいます。そこで半オクターブ

という考えを用いました。2 の半分は 1 ですが、「2 倍」の半分は $1.4 (\sqrt{2})$ です。そこで 100 の次は 140 というわけです。140 の次は 200 (100 の 2 倍) となります。全部で 21 の帯域になりました。最後の 18,19,20 帯域は人の耳にはほとんど聞こえない、超音波の領域です。しかし、耳には聞こえなくとも、歯は感じている可能性があるため、含めています。



下の図は、キュウリを材料にした時のプローブから発生する振動のデータとその解析画面です。上の画面で緑の線は、センサーから出た電圧をそのままグラフにしています。横軸は時間です。

上の電圧グラフの矢印で示した範囲がキュウリの果肉をプローブが突き刺した時に出る信号で、この部分を指定して計算させると、食感値のグラフが左下に出ます。横軸は帯域番号で、縦軸が食感の強さです。この左下のグラフを見ると、もちろん噛み応えの信号が出ていますが、帯域番号の 10~12 でグラフが上がっています。これはきゅうりのシャキシャキ感を表していると思われます。レタスでもこの帯域の食感値が上がります。キャベツではこれよりも低い帯域の食感値が上がります。これはキャベツの食感がシャキシャキではなく、ザクザクしているからだと思われ



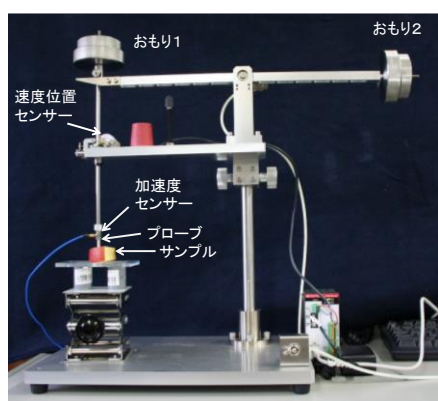
われます。

左の図はキャベツの葉を 4 枚重ねて測定した時の電圧グラフです。1 枚の葉をプローブが突き抜けるたびに鋭い谷 (星印) ができています。この範囲を特定して 1 枚 1 枚を区別して食感値を計算することもできますし、4 枚一緒に計算することもできます。この原理で、果実、野菜、ポテトチップスなどの食感を測定することができます (文献参照)

さて、最近開発が終わった、天秤型食感装置 (特願 2014-171731) を最後に

紹介します（下図）。この装置では、上に述べた食品の食感を表す振動情報だけでなく、食品の歯触りや歯どおりを知るための摩擦係数を測定することができる画期的な装置です。

3. 天秤型食感測定装置



左の図に示した天秤型の食感測定装置は、以下のような数々の利点があります。

- ① 左右の錘のバランスを変えることによりプローブ速度を任意に変更できる。
- ② 錘の重量を変えることで、大人と子供の食感を比較することができる。
- ③ 速度センサーを装備しているので、プローブがサンプルに挿入されてから停止するまでの速度変化をとらえることができる。
- ④ 錘の重量が確定できるので、振動情報から正確なエネルギー食感指標値を計算することができる。

測定操作を説明します。プローブは錘 1 の下に伸びている棒の先についています。プローブと棒の間に加速度センサーが挟まれています。少しだけ錘 1 の重さを錘 2 より重くしておきます。錘 2 を下げて、錘 1 を上げた状態でロックしておき、そのロックを外すと錘の重さの差に応じた速さで天秤が時計と反対方向にまわります。そしてプローブがサンプルに挿入されます。



大人の下あごの重さは1キログラム、子供の重さは500グラム。

まず①についてですが、人の噛む速度は30～200ミリ/秒といわれています。いわゆるモーターで動くこれまでの食感測定装置ではプローブ速度は最大でも40ミリ/秒ほどですので、到底人の咀嚼速度（噛む速さ）に対応していません。天秤型装置では錘1を錘2より重くすること（約50グラム）で、プローブの挿入速度を簡単に200ミリ/秒まで上げることができます。

②についてですが、ヒトがものを噛む時には実は下顎しか動いていません。ところが大人の下顎は1キログラムほどですが、子供の下あごの重さはわずかその半分の500グラムほどしかありません。もちろん、下あごを動かす筋肉の太さも違うでしょう。しかし、噛む速度は同じくらいです。そ

ここで、この天秤装置を使うと同じ食品を食べた時の大人の感じる食感と子供のそれとを比較することができます。わたくしたちの実験では、リンゴの食感は大人と子供で差が出ないのですが、キャベツでは子供は大人が感じるほどキャベツの食感を感じていないことが分かりました。

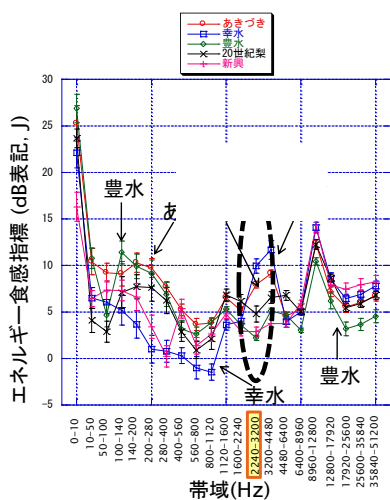
次に③です。この装置には図で示したように精密な、非接触型速度位置センサーがついています。これによりプローブがサンプルに刺さった後のプローブが止まるまでの位置や速度が検出できます。歯どおりの悪いものはプローブが早く止まりますし、歯どおりの良いものはゆっくり止まります。これを数値化することができるようになりました。この指標を「食品摩擦係数」と名付けることにしました。

最後に④についてです。錘 1 と 2 の合計が簡単にわかるので、サンプルにプローブが刺さるときの慣性力が計算できます。それでプローブがサンプルに刺さる前の運動エネルギー、サンプルに刺さっている時に生じる振動エネルギー、そして摩擦により失われるエネルギーの 3 つをすべて把握することができます。サンプルによって、摩擦係数の占める割合が大きなものもあるでしょうし、振動エネルギーで失われるエネルギーが大きいものもあるでしょう。これらを、区別することができます。

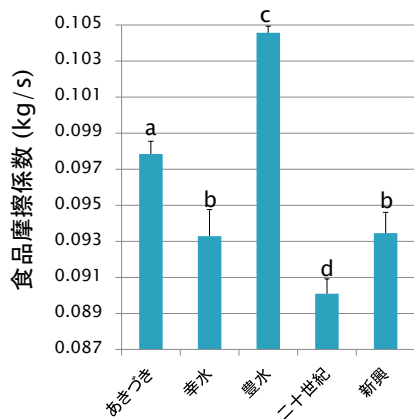
また、③に関して言えば、サンプルにプローブを挿入しても音がほとんど出ない、食パン、寒天、プリンなどやわらかい食品の食感を評価することができるようになりました。

最後に、いろいろなナシの品種の肉質を天秤型の食感測定装置で評価した結果をお見せしましょう。

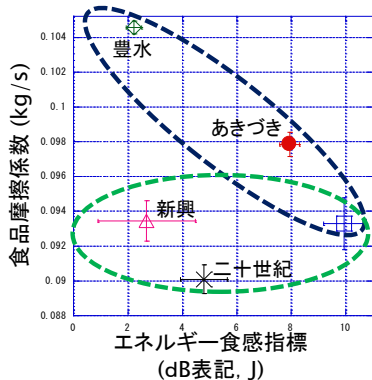
下の図は、5 種類の和ナシを装置で測定した時の振動エネルギーのグラフです。横軸が振動の高さ、すなわち音の高さを示しており、左が低い音、右が高い音で、最後の 3 点は耳に聞こえない超音波の領域を示しています。和ナシは、‘幸水’、



‘豊水’、新品種の‘あきづき’、‘新興’そして、昔からある’二十世紀’です。豊水は 100～400Hz（低音）が高く、6400～51200Hz(高音)で低い値を示しています。逆に、幸水は 100～400Hz で低い値を示し、2240～4480Hz までで高い値を示しています。このことは、豊水はザクザクという食感が主流で、幸水はサクサクという食感が主流であることを示しています。‘あきづき’は低音にも高音にも高い食感を示し、ザク



ザク感もサクサク感も両方示すといえます。‘新興’と‘二十世紀’はこれらの中に挟まれて、特徴がよく分かりません。そこで、③で上げた、食品摩擦係数を計算して棒グラフにして比較してみました(下左図)。豊水が最も高い摩擦係数を示し、二十世紀が最も低い摩擦係数を示しました。棒グラフの上についているアルファベットは同じアルファベット間には差がないことを示し、異なるアルファベット間には差があることを示しています。cのついていいる豊水はどの品種よりも摩擦係数が高いことを示しています。dのついていいる二十世紀はどの品種よりも摩擦係数が低いことを示しています。次に低い摩擦係数を示すのは幸水と新興で、両者には差がありません。あきづきはどの品種とも差がありますが、中間の摩擦係数を示しています。



幸水

摩擦係数と、振動エネルギーは全く異なる食品の性状を示しているといえるので、この二つの値を使って、和ナシの品種間の食感の違いを浮きたたせることができます。

振動エネルギーのグラフ(前頁)の黄色で示した帯域「2240~3200Hz」の数値を横軸にとり、摩擦係数を縦軸にとって、品種をプロットしなおしてみると左の図のようになります。

このグラフで分かることは、まず豊水が左の端に、‘幸水’が右の下に位置することです。つまり‘豊水’は高音のエネルギー食感指標は小さいが摩擦係数が大きい。‘幸水’は、逆に高音のエネルギー食感指標は大きいが摩擦係数が小さいという特徴がよく出ます。また、‘あきづき’はこの両者の中間に位置します。育種的に‘あきづき’は‘豊水’と‘幸水’を親に持ちますので、妥当な位置関係を示しているといえます。‘二十世紀’はサクサクした肉質が特徴ですが、歯どおりがよいことが食品摩擦係数の低さに出ています。

‘新興’、‘二十世紀’、‘幸水’の3品種は、食品摩擦係数では歯切れの良い肉質が特徴的なグループといえます。またエネルギー食感指標でも3者は区別されています。

以上のように、「エネルギー食感指標」というこれまでとは全く異なる食感指標で食品の食感を数値化できるだけでなく、同じ振動特性を示す食品でも、さらに「食品摩擦係数」という新しい指標を導入できたことにより、食品の特徴をよ

り細かく識別することが可能となりました。

この装置は、クッキーやせんべいなど、破壊できるものはもちろんのこと、食パンのように、破壊しても音の出ないサンプルに対しても摩擦係数が出ますので測定することができます。また、この摩擦係数により、食品が歯にまとわりつく粘稠性なども数値化できると思われ、いろいろな食品の食感を測定することができると考えられます。

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、同じサンプルを計っても、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する。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、台の形状や大きさが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。

I. 天秤型食感測定装置（嚙音 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（嚙音 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ためです。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）を支えています。左の腕には垂直のガイド棒があり、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。

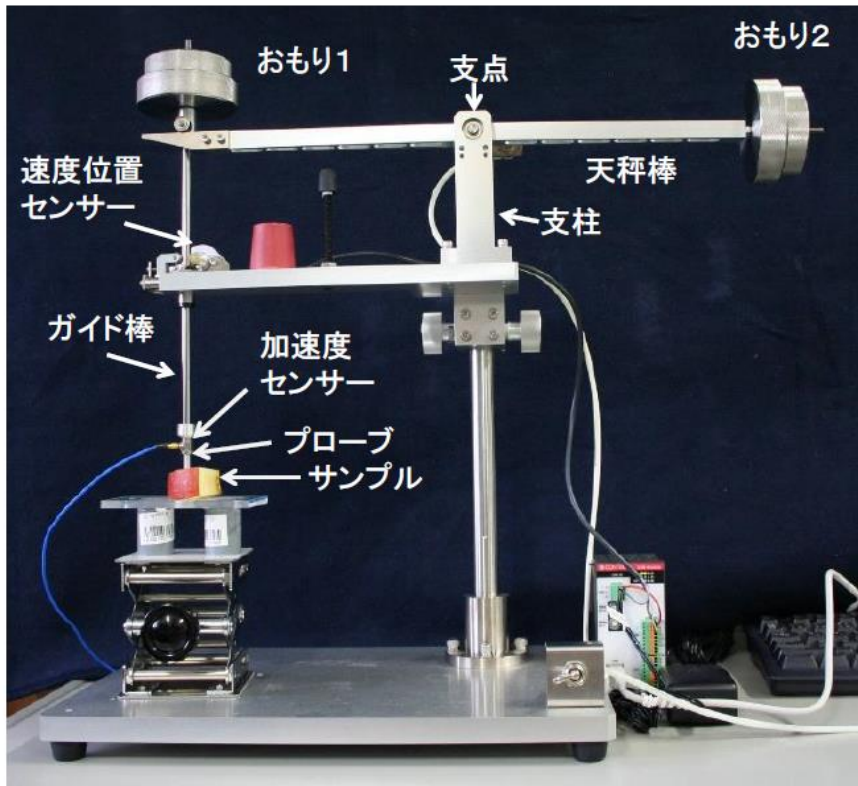


写真 天秤型食感測定装置（嚙音2号）

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

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。

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

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。

II. 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の音をオクターブという考え方で区切れば、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。この食感値を真数で表すと、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。これ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。

Ⅲ. 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。

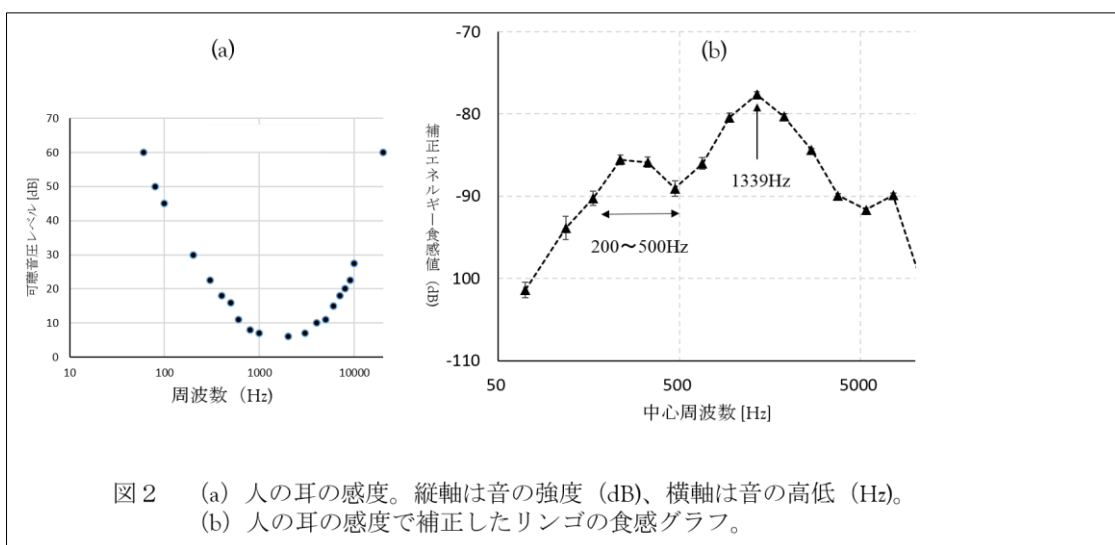
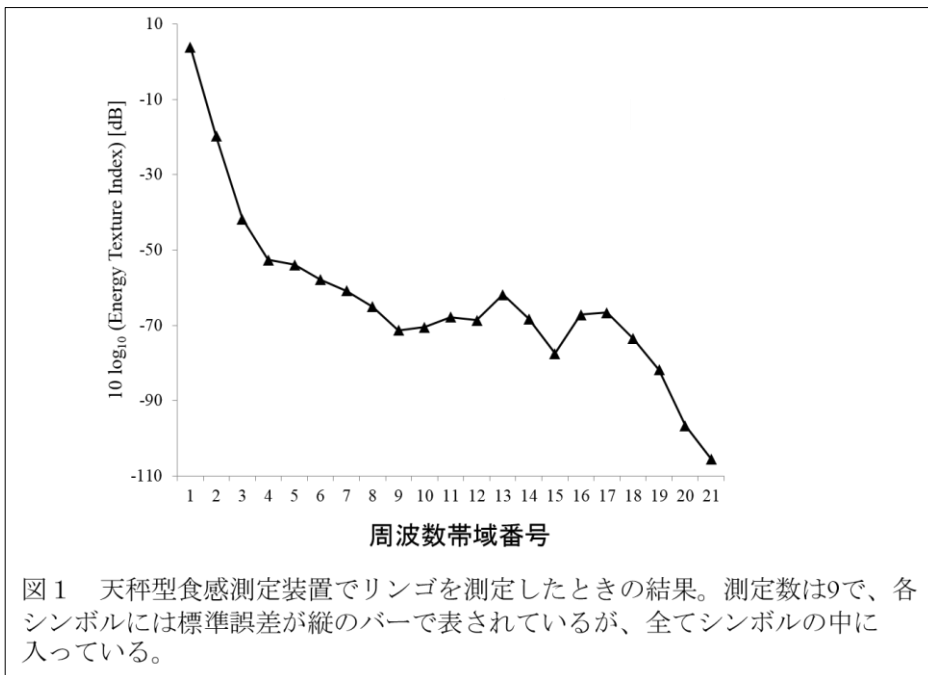


図 2 (a) は、ヒトの聴覚の感度が周波数によって、どのように変化するかを模式的に表したものです。縦軸は音の強度をデシベルで、横軸は音の高低を周波数 (Hz) の対数で表しています。このグラフは聴力検査で行われるように、ヘッドフォンを耳につけて、どれくらい小さな音まで聞こえるか、で得られたものです。値が低いほど、小さな音でも知覚され、耳の感度が良いことを示しています。この図から、人の耳は 1000~5000Hz の音に非常に敏感で、それよりも高音でも、低音でも感度が悪くなるのが分かります。赤ちゃんの泣き声には、2000Hz と 4000Hz 付近の音が多く含まれています。これは人の耳によく聞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

IV. 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止ま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速度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 $1\ \mu\text{m}$ です。この図からプローブはサンプルに当たってから 75 ミリ秒後に最深部に到達し、少し上に戻ってから止まったことがわかります。最深部までの距離は 8.30 mm 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。

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

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

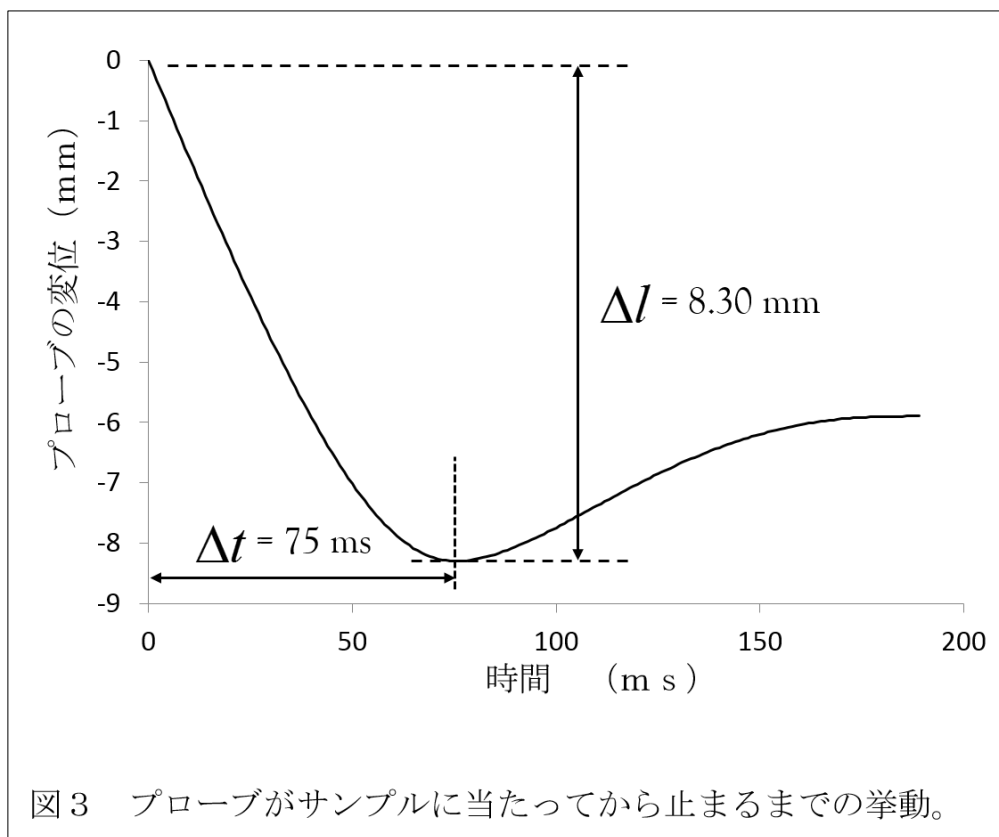


図 3 プローブがサンプルに当たってから止まるまでの挙動。

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できます。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。天秤型装置の大きな利点です。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。

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が計算できませんが、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。