

特集 ■ 食と VR

食感測定装置による食物の食感評価法の開発について



櫻井直樹
Sakurai Naoki

広島大学

1. はじめに

日本人ほど食感に敏感な国民はいないように思える。“沢庵ポリポリ、お茶漬けサラサラ”，という表現を外国語に直すことは難しい。ここで、使われるポリポリや、サラサラは日本語では、疊語という範疇に入る語だそう。これが沢庵ではなく、白菜の漬物ならその食感をあらわすのに別の言葉が用意されている。このように、日本語では食物の食感を表す言葉が豊富だ。食感の中にはモチモチ、ネチョネチョなど明確な音を発生しない語もあるが、ポリポリ、ガリガリ、カリカリなどは音を発生する食感を表している。しかし、どれほど“ポリポリ”しているかという数値化は大変難しい。2つを比べればどちらがポリポリしているかを判断できるが、昨年食べた沢庵と今日食べた沢庵の食感を比較することはほとんど不可能である。そこで、食感を数値化する方法を考えた。

食物を口に入れて咀嚼するときには多かれ少なかれ音が発生する。その音は、歯が食物を破壊しているときに生じていることは言うまでもない。ということは、その音は歯が食物を破壊するときに発生する振動が空気中を伝わったり、頭蓋骨の骨を伝ったりして耳に到着して聞こえているのであろう。それでは、ヒトは食物が破壊される時の音を耳で聞いてそれを基準に食感を判断しているものであろうか？ここに興味深い研究がある。

2. 食感は音か振動か？

Chirstensen と Vickers [1] は 1982 年、被験者の耳にヘッドホンをつけさせ、大音量の音楽を聞かせながら、クッキーの食感を判断してもらった。その結果、被験者はクッキーを食べる音がまったく聞こえなくても、正確にクッキーの食感を評価することができた。このことは、耳だけで食感を評価しているのではないことを示している。

それでは、何処で判断しているのであろうか？

歯医者で歯を削られるとある深さから途端に激しい痛みを生じる。歯の内部に神経が走っているからである。この神経は、虫歯ができると痛むが、ものを食べるときの振動を感知していると考えられる。つまり食物を破壊するときに生じる音の元になっている振動は、まず歯で感知されているということになる。それでは歯はどれほどの振動を感知しているのであろうか？

ヒトの振動に対する感覚はとてつもなく敏感である。皮膚の下には、メルケル細胞、マイスナー小体、ルフィニ終末、パチニ小体の 4 種類の感覚器官がある。パチニ小体は 1kHz の振動にも反応する。まだ歯が感じる振動についての研究には不明の点が多いが、歯がポテトチップスや、クッキーを食べたときの振動の違いをとらえていることは、間違いのないであろう。

3. 装置の開発

さて、冒頭に述べた“沢庵ポリポリ”であるが、日本語にはこれ以外にたくさんの食感を表現する言葉がある。“パリパリ”、“ポリポリ”、“シャキシャキ”などである。これらはすべて振動（音）に関する言葉のように思える。

そこで、歯が感じる振動をそのまま測定できれば、食感が数値化できると考えた [2]。その装置の概要を図 1 に示す。プローブは歯に相当し、それを食物に挿入する構造となっている。まず振動を検出する素子に、圧電素子を用いた。これは振動を電圧変化で出力し、また、電圧変動を与えることで素子に振動を起こすことのできるものである。

この装置の特徴は 2 つある。

ひとつ目は、プローブの駆動構造である。従来食品工学で用いられてきた食品物性測定装置でもプローブを食

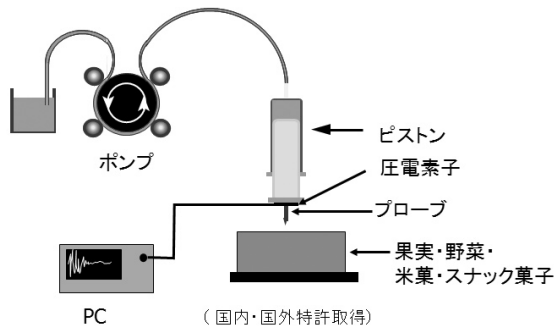


図1 食感測定装置の原理

品に挿入する構造を有しているが、その駆動方法はモーターと歯車によるものである。著者は従来の装置に図1のプローブと圧電素子をつけて測定してみたが、駆動時に非常に大きな振動ノイズが生じていることが分かった。そこで駆動部を、シリンダーとピストンを用いた液体駆動にした。これによりプローブを駆動するときの振動が大幅に軽減され、食感を示す振動測定を邪魔しないことが分かった。

2つ目は、振動の検出素子として圧電素子を使った点である。従来の食品物性測定装置で用いられている検出素子は、力の変化を検出するひずみ計というものである。ひずみ計は、力の変化に対応した電圧を出力するので、力を測定するには向いているが、振動を測定するには向いていない。実際、200Hz（1秒間に200回の振動）以上の振動をうまく測定できないことが分かった。圧電素子の代わりにいわゆる振動測定によく用いられる加速度センサーを使ってもよい。

これでプローブを食品に挿入したときの振動は電圧の変化としてとらえることができた。次はそれをどのように数値化するかである。

これまで、食感を測定する方法として食品を被験者に噛ませて、その音をマイクでとる方法なども報告されている。この場合、取得した音のデータは高速フーリエ解析にかけることが多かった。フーリエ解析とは、ある程度連続した時間の振動を解析し、どのような音の成分からできているかを解析する一般的な方法である。周期的な波が含まれていると威力を発揮するが、食品の破壊音のような短時間で終わる非周期的なデータの解析には向いていない。そこで、まったく新しい解析を行なうことにした。

4. データの前処理（多窓フィルター）

ヒトの耳は面白い性質を持っている。例えば音楽で使

うドレミファの音程は、周波数が2倍になると1オクターブという規準が与えられている。例えば440Hzはピアノの鍵盤の中心から少し右の“ラ”の鍵盤を押えたときの音である。この1オクターブ上の音はやはり“ラ”と呼ばれるが、その周波数は880Hzである。またその上に同じラが出てくるが、その“ラ”の音は、1760Hzであり、1320Hz（880 + 440Hz）ではない。このように音程については、ヒトの耳は2倍をひとつの単位（まとまり）として聞いている。また、音の大きさ（強さ）についてもdBという値が一般的に使われているが、これも普通の比例関係ではなく、音の強さの対数値がヒトの音の聴覚に比例していることを利用して定められたものである。つまり、音の大きさが10倍になって、はじめて10dB増加する。100倍になると20dB増加することになる。1000倍は30dBの増加となる。

このようにヒトの感覚では、倍数をひとつの単位として感じるようになっていていることを利用して、データの前処理を行なうことにした。まず食品にプローブを挿入して得られた振動の電圧データを、フィルターにかけて、特定の周波数の窓を通ってきたものを別々に取り扱うことにした。そのときに、ヒトが聴覚で感じることでできる最高値が20000Hzであることを考慮して表1のような帯域に振動を分けた。

表1 振動数のフィルター周波数

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

最初は0～10、10～50、50～100と分けているが、次からは半オクターブフィルターと呼べる19帯域とした。

すなわち 100 の次は $100 \times \sqrt{2}$ にあたる 140Hz とした。最高値が 25600Hz となっている。25600Hz までは、1 オクターブずつで分けると、わずか 9 帯域しか設けられないので、食感の評価が余りにも大雑把になる。そこで、半オクターブという概念を採用した。

このフィルターの概念を図 2 に示した。これにより、フーリエ解析では評価できなかった振動の高低に応じたデータが解析可能となった。高い音を多く含む食物は帯域の高いフィルターを通ってくる信号の強さが大きく、逆に低い音を多く含む食物は帯域番号の小さなフィルターを通ってくる信号の強さが大きくなる。

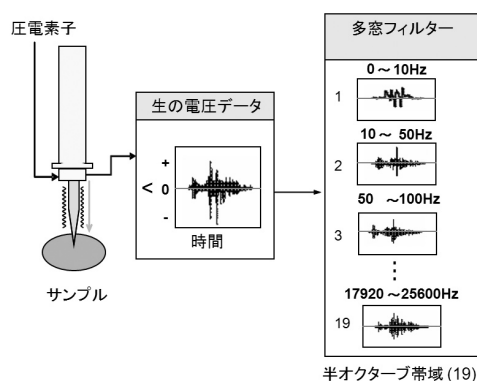


図 2 振動による食感測定の半オクターブフィルター原理

以上の装置と原理を一体化した最新の装置を図 3 に示した。ポンプで送液する液体はシリコンオイルを用いている。プローブを駆動するピストンをおさめるシリンダーは真鍮製にして、固有振動数を 30000Hz 以上にした。プローブの形状は、例えば、前歯（門歯）なら、マイナスドライバー型を、また犬歯なら三角錐を用いている。奥歯（臼歯）も食感には重要であるが、金属で作るのは難しく、また、臼歯は上下方向だけでなく、水平方向にも動くので、更なる工夫が必要であろう。



図 3 食感測定装置（“噛音”）

左がノートパソコン右が送液ポンプ、真ん中がプローブとそれを駆動するピストン。

5. 電圧の波形処理と食感指標の計算法 [3]

図 4 に様々な野菜を噛音で取得した、フィルターにかける前の電圧データを提示した。ダイコン、スイカ、リンゴの果肉にプローブが挿入されると、それに応じてプローブが振動し、それが出力電圧の振動となってデータが取れる。一方、キュウリのようにプローブが刺さっていくと、果肉が途中で割れるものは時々スパイクのような信号が出る。トマトはこの中では一番柔らかいので、振動強度は一番小さい。最下段の 3 つのデータは、葉物野菜で、それぞれ一枚の葉っぱにプローブを突き刺したものである。どれもひとつのスパイク状の信号しか取れていない。この信号はプローブが葉を突き破る瞬間の振動データで、時間長では約 30 ミリ秒である。データ取得スピードを 100kHz にしているので、1 秒間に 100000 個データが取れる。それで 30 ミリ秒でも、3000 個のデータが取れる。このようにすれば、非常に短いスパイク状の信号でも分析ができることが分かった。

次に、これらの上下する電圧値をどのようにして食感

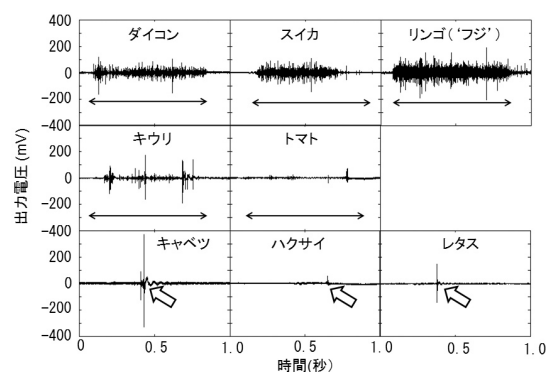


図 4 食感測定装置（噛音）で取られたフィルターを通す前の電圧振動データ
ダイコン、スイカ、リンゴ、キュウリ、トマトは矢印の間隔のデータを解析した。
キャベツ、白菜、レタスのような葉物野菜は、矢印で示したように、非常に短い信号しか取れない。

の指標にするかである。振動は物体が運動することになるので、その運動を 2 乗するとエネルギーに相当する値 $E = (1/2)mv^2$ となることを利用して、以下のように定義した。

食感指標 (Texture Index, TI) = $\sum (v^2) / n$ (データ数 n あるいは時間 t)

ここで v はプローブの振動速度である。センサーから出てくる電圧値 (V) とプローブの振動速度 (v) の間には以下のような関係がある。

センサーとしてピエゾセンサーを使った場合、ピエゾセンサーが位置に関する信号を出力していると仮定すると

$$v \approx V \times f$$

となる。ここで、 f はその振動周波数である。

センサーとして、加速度センサーを使った場合、出力電圧は加速度と比例するので

$$v \approx V / f$$

となる。

そこで、食感指標は、センサー別に定義することができる。

センサーがピエゾ素子の場合

$$TI = \sum (V \times f)^2 / n = (f^2 / n) \times \sum (V^2)$$

センサーが加速度センサーの場合

$$TI = \sum (V / f)^2 / n = (1 / n f^2) \times \sum (V^2)$$

TI は帯域別に定義されるので TI は 19 個計算される。また上式で使われている f は帯域の中心周波数になるので、その 2 乗は帯域の下側と上側の数字を掛け合わせたものに等しくなる。例えば表 1 の第 4 帯域で示せば、下限周波数は 100Hz 上限周波数が 140Hz なので $f^2 = 100 \times 140 = 14000$ となる。 n はデータ数でもよいし、単位時間（秒）でもよい。したがって TI は単位時間当たりのプローブ振動のエネルギーに比例し、エネルギー密度のような量を表す。

6. 野菜、果物、焼き菓子の食感の測定例

図 5 に野菜と焼き菓子の食感指標のグラフを示した。縦軸はヒトの音などに対する感覚と比較するために対数軸とした。横軸は 19 の帯域をとっている。まず、野菜と焼き菓子を比べると、全体的に焼き菓子のほうが食感指標が高い。左のグラフの野菜だけに注目すると、トマトがすべての帯域にわたり一番低い値を示している。トマトは噛んでもほとんど音が出ないが、振動データとしてはこのように表現することができる。つまりマイクロホンよりも感度がよいことになる。また、野菜によって

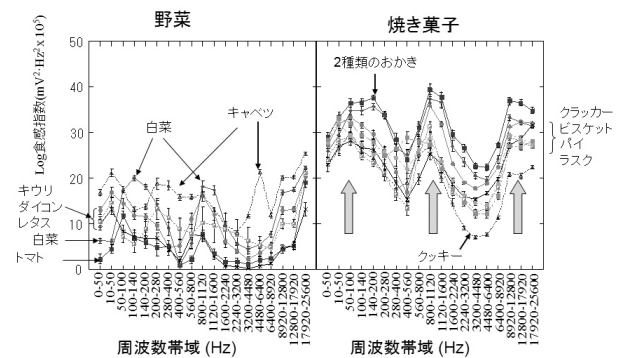


図 5 野菜と焼き菓子の食感指標 (TI) の比較
* 口絵にカラー版掲載

特徴が現れている。

キャベツはこれらの野菜の中で一番食感値が高い。特に中音域 (200 ~ 800Hz) と、高音域 (4480 ~ 6400Hz) にその特徴がよく現れている。また、同じ葉物野菜でも白菜はまったくキャベツとは異なる特徴を示す。すなわち、100 ~ 140Hz の値が高く、これは“ザクザク”感を示すように思える。また、800 ~ 1600Hz の値も高い。これをキャベツと比較すると、キャベツのシャキシャキ感は 4480 ~ 6400Hz に現れているように思える。

一方焼き菓子のほうでは、すべてのグラフに 3 つの山が見える (上向の矢印)。これが焼き菓子の特徴と言えるであろう。またその中で一番指標が高いのが日本のおかきであった。クラッカー、ビスケット、パイ、ラスクはこの順番に指標が並んでいる。特にクラッカーは 800 ~ 6400Hz まだが、ビスケットなどに比べて高いのでクラッカーのパリパリ感はこのあたりに出ている可能性がある。また、焼き菓子の中ではクッキーの指標が一番低かった。特に、2240Hz 以上の指標が、他の焼き菓子に比べて低いので、これがクッキーの特徴を現しているのではないかと考えられる。つまりクッキーは、パリパリしていないことを示していると言える。このほかに、ネギ [4]、キャベツ [5] やポテトチップス [6] の食感も報告している。

図 6 に異なる食感を持つブドウ 9 品種の測定例を示した [7]。昔はブドウといえばデラウェアしかなかったが、最近はパリパリした食感を持つ、例えばシャインマスカットのような品種が好まれるようになって来た。また、食感がそれらの中間のものも存在する。そこでこれらの品種別の食感が食感指標で区別できるかを検討した。すると特に、10 ~ 280Hz までの帯域で 3 者が区別できることが分かった。また、3200Hz 以上の帯域では 3 者の

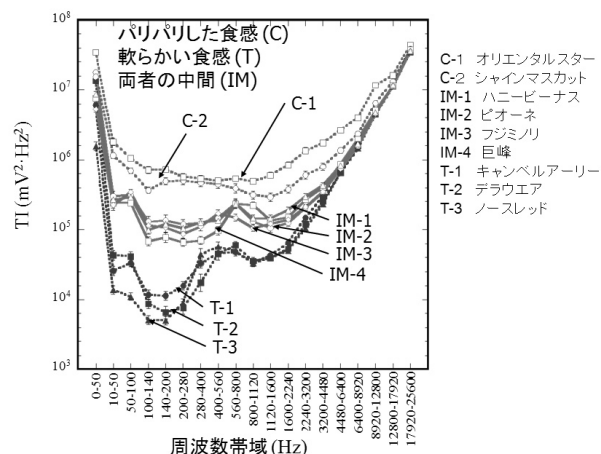


図 6 食感の異なるブドウの品種の比較

[7] Postharvest Biol. Technol. 62, pp.305-309 (2011) より転載

指標に差がないので、このあたりはブドウの食感としては評価されていないのかもしれない。またこのグラフから、最もパリパリした食感を持つ品種はオリエンタルスターで最も軟らかい食感を持つものは、ノースレッドであることも分かった。最も軟らかいノースレッドを噛んでもほとんど音がしない。しかし、食感測定装置のプロープはその振動をこのようにとらえることができる。このデータを年度ごとに取れば、年度ごとの各品種の食感が評価できる。ヒトの食味試験では、1年前の食感を記憶し続けることはほとんど不可能に近い。しかし、このように機械で測定