

基礎論文

食感呈示装置の開発

上村 尚弘*¹ 森谷 哲朗*² 矢野 博明*³ 岩田 洋夫*³

Development of a Food Simulator

Takahiro Uemura*¹, Tetsuro Moriya*², Hiroaki Yano*³ and Hiroo Iwata*³

Abstract: This paper describes development of a food simulator. A taste of food arises from mixture of auditory, chemical, and force sensation. This food simulator is a haptic interface that can generate a force to user's teeth when the user bites a food. It consists of a film-like force sensor and one degree-of-freedom manipulator. The food simulator generates a food texture according to the force profile captured from a user's biting force of a real food. Then the profile of the biting force is replayed by controlling the reaction force of the device.

Keywords : haptics, food texture, biting force, taste

1 はじめに

1.1 背景と目的

現在のバーチャルリアリティ技術において、臨場感を呈示する対象感覚は、視覚、聴覚、触覚などのさまざまな感覚がある。しかし、食感（口内感覚）についての研究はほとんど存在しなかった。食感、我々に残された最後の感覚であるといえる。

我々が物を食べる時、食品をただ口の中に入れても口内の触覚が食感を感知するのではなく、食べ物を噛むという動作を行って初めて食感を知覚することが出来る。物を食べるという動作は、我々が日常的に行う動作であり、そのような特定の動作を測定・呈示することによって、より高度な臨場感覚を実現することができるであろう。

我々は、味、形状、色、香り、食感（テクスチャー）などの要素によって食品のおいしさを感じている。味は、甘味、酸味、苦味、塩辛さなどの混合割合によって決定されるというが[1]、あまり味のない米やパンなどのおいしさは、テクスチャーが大きな役割をはたしていると考えられている[2]。ここで、テクスチャーとは「歯ごたえ」「口あたり」「舌触り」などの、口の中で感じる食品の力学的物性である。

本研究ではテクスチャーの力学的物性に直接関与する「歯ごたえ」に注目しテクスチャーの測定を行った。

測定方法は、圧力センサと共に食品を噛むという模擬的方法である。そうして測定された圧力変化の咀嚼力対時間のグラフを用いて、食品の力学的物性を呈示する装置の開発を試みた。

本論文では、テクスチャーの測定方法と呈示方法を述べ、SIGGRAPH2003でデモを行った際に集計した観察記録より、食感呈示装置で呈示された食感を人間はどのように感じるのかを考察する。また、デモで行った食感呈示には、咀嚼音や合成味物質を呈示し臨場感を高めている。それらについても呈示の方法、評価について述べていく。

1.2 関連研究

近年、食品のテクスチャー測定やテクスチャー評価の研究[3][4][5][6]は数多く行われているが、テクスチャーをどのように測定し評価するかは、複雑な要素が多いために明確に定まっていない。そのためテクスチャーの測定は、ある要素について個別に測定することが多い。食品のテクスチャーは、パネラーによる官能検査や、近年では測定機器などによって測定されている。パネラーによる評価は感覚的でわかりやすく、正確な評価が得られる。しかし、パネラーは選定や育成が難しく、パネラーの数も多くない。そこで最近では測定装置を用いて食品の物性解析や、破壊試験などを行い、食感を数量的に評価する試みが広く行われている[7][8]。食品の力学的物性を数量的に表わすことで、かたさが一定の食品を製造することが可能になり、パネラーを使用しなくとも食感を評価することができる。

また、味覚においても複雑な要素が多いため味を客観的に測定する方法が明確に定まっておらず、5つの基本味を化学的に表現することは困難とされてきた。しかし、近年、生体膜を模倣した脂質高分子膜を用い

*1: 筑波大学 理工学研究科

*2: 筑波大学 システム情報工学研究科

*3: 筑波大学 機能工学系

*1: Graduate School of Science and Engineering, Univ. of Tsukuba

*2: Graduate School of System and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

*3: Institute of Engineering Mechanics, Univ. of Tsukuba

た味覚センサ[9][10]というものが開発された。このセンサを用いることで、食品の味を数量的に表すことができる。もし食品の味を数量的に表せるならば、それらの基本味を合成して元の食品の味を再現できるはずである。デモで行った味物質の呈示には、5つの基本味を合成した「リンゴ」の味を体験者に味わってもらった。

2 食品の力学的物性の測定

2.1 食品の力学的物性

食感を測定するとき、食感の何を計測すべきかを考える必要がある。食品には、形や大きさ、化学的構造、組織的構造、力学的物性などが存在する。これらの中で、直接的な食感に近いものが力学的物性であろう。

そこで、食感を呈示するには食品の力学的物性を知る必要がある。人間が感覚的にとらえる食品の力学的物性は、「かたさ」「弾力性」などであるが、食感の最も重要な要素はかたさである。かたさは食品が固有に持っているもので、食品の破断応力に対応している。破断応力とは食品に力を加え続けると、ついに破壊するときの応力である。この応力によって食品のかたさが決定される。

破断した後の応力は、それぞれの食品の構造や被験者によって異なっている。被験者によって異なる原因は、食品の噛む位置、速さ、強さなどで、データを解析して平均的なかたさを求めることは難しい。

食品によって食感の特徴が、咀嚼時の最初の一噛みに現れるものもあれば、咀嚼過程の物性変化が食感の特徴になる場合がある。そこで、本研究で使用した食品は「煎餅」「グミキャンディー」などであるが、それぞれ異なった特徴を示している。

2.2 測定方法

食品の力学的物性をどのように測定するかは、今まで多くの研究がなされてきたが、テクスチャーを構成する要素が多すぎて決まった測定方法が確立されていない。前章で述べたようにテクスチャーの測定は、「歯ごたえ」の圧力を測定することを本研究のテクスチャー測定とする。

参考として他のテクスチャー測定方法を述べよう。テクスチャーの測定方法は基礎的方法、経験的方法、模擬的方法の3つに分類される[2]。

・基礎的方法

基礎的方法とは、粘性率や静的粘弾性定数などの物性値を、測定装置を用いて求める方法である。主な測定装置は、粘度計、粘弾性測定装置などである。

・経験的方法

経験的方法とは、はっきりと力学的に定義付けられ

ないが、経験的に食品の物性と関係付けられる特性値を測定する方法である。測定装置はテクスチャーアナライザーなどがあり、圧縮や突刺し、せん断などが行われる。

・模擬的方法

模擬的方法とは、手でこねたり咀嚼したりして実際に食品が扱われるときと同じような条件で測定する方法である。一般的な測定装置はないが、人間の顎運動を模した咀嚼ロボットなども開発されている[13]。

本研究では3番目の模擬的方法を採用した。後に呈示装置で食感を呈示する際に、できるだけ通常の咀嚼に近いということが重要だからである。模擬的方法の圧力測定は、薄いフィルム状の圧力センサ(FlexiForce: Tekscan社)の上に食品を乗せ、センサと一緒に噛むという方法である。センサの測定部分の直径は約14mm、厚さ約0.13mmであり、最大加重は110N(約11.2kgf)まで測ることが出来る。また、噛むことで測定部分が壊れるのを防ぎ、圧力を均一に伝えるため、厚さ2mm、直径10mmの円盤を測定部分に付けている。



図1 FlexiForce

噛み方はセンサを意識せず、普段通りに噛み、砕破し終わったら噛むのをやめ、途中で噛む力を緩めず最後まで一気に噛むという方法である。噛む歯の位置は、前歯、側切歯、奥歯など様々な場所で測定を行った。センサは、あらかじめデジタル圧力測定器でキャリブレーションをしてあり、グラフですぐに確認出来る。しかし、測定した値はノイズが混じり扱いづらいので、プログラムで平滑化を行った。サンプリング周波数は約1700Hzである。また、食品がどのように変形しているかを調べるため、歯の間隔が測定できる装置を同時に噛み、位置の測定も行った。



図2 測定の様子

2.3 咬合力の測定結果と考察

例として「煎餅」「グミキャンディー」の2種類の測定結果を紹介する。測定したのは食品を奥歯で噛んだときの、食品にかかる圧力と歯の間隔（位置）とそのときの時間である。時間を横軸に、圧力と位置を縦軸にとり、以下にそれぞれのグラフを示す。

測定を行った結果、波形の最大値や咀嚼時間、ピークの間隔などの情報が得られた。特に、一番はじめのピークが食品の破断応力であり、この値の前後にどのような関係があるかが重要になってくる。

しかし、測定を重ねるごとに食品の波形が毎回異なっていた。これは2.1節で述べたように、食品を噛む速さや強さなどの、個人差によってあらわれる特徴である。そのデータのなかで、破断応力が分かりやすいもの、噛み終わりに食品の物性と関係のない力が出ていないものを選んだ。

また、センサをそのまま噛んでしまうと唾液や食品の油などにより破損してしまう恐れがあるので、ビニル製のカバーを被せて噛んでいる。カバーの厚さは約0.15mmである。

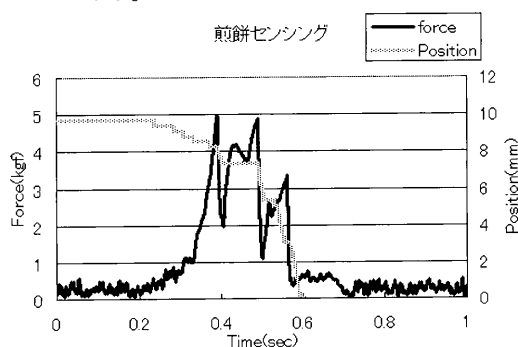


図3 煎餅の測定

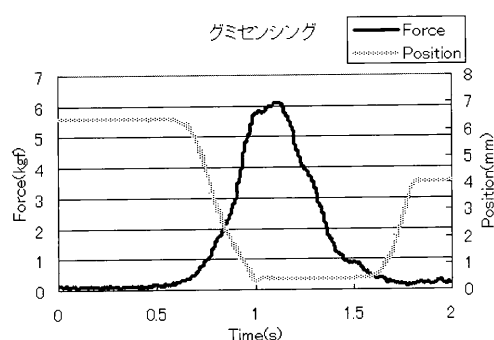


図4 グミキャンディーの測定

まず、図3の煎餅について見ると最初のピークが約5.0kgfであり、これが煎餅の破断応力である。その後、複数のピークが現れ、最初の破断応力から約0.2秒で噛み終わりとなる。同時に位置に注目すると、圧力の大小のピークに対応して位置が階段型に減少している。

破断応力に達した直後は一時的に圧力が低下するが、崩れた食品をつぶすために再び圧力が上昇し、それが複数回繰り返されてから、1回の咀嚼が終了する。これが、煎餅の特徴であり、複数のピークが煎餅のパリパリ感を出していると考えられる。

次に図4のグミキャンディーの波形であるが、位置対時間の関係を調べたところ、圧力が上昇し始めるのと同時にすぐに変形をはじめ、圧力約5.7kgfで位置が最小になり噛み終わっていた。図4では噛み終りの後約6.0kgfまで圧力が上昇しているが、これはグミキャンディーが5.7kgfで破断し、食品に関係のない咬合力があらわれたものである。

グミキャンディーの特徴は、噛みはじめから完全に破断するまで圧力がほぼ線形な値をとるので、ばね係数のような係数によって食品の力学的物性を求めることが出来る。この係数は、食品の厚さと圧力のかかり具合から決定される。このグミキャンディーの場合、厚さ約6.3mmなので約0.9(kgf/mm)となった。

3 食感呈示装置のシステム構成

3.1 設計方針

呈示装置では、咬合力の測定で得られた圧力と位置の波形を、装置から歯への力覚呈示で再現し、食感を呈示することを目的とする。装置は人間が噛む動作にあわせて動く必要があり、人間の口にあった形状にしなければならない。さらに、装置を小型にし、手に持って口へもっていけるようにすれば、人間にとってより自然な動作になるだろう。

また、食感を呈示する際、全ての歯に任意の力を加えることは難しい。それぞれの歯には役割があり、人間は物を食べる時、前歯で割るやちぎるという作業を行い、ある程度小さくしてから、奥歯で噛み砕く。どの歯も食感に関係があるが、ここではより使う頻度が高く咬合力の大きい奥歯に着目し、装置を奥歯で噛めるように設計した。

3.2 装置の構成

力覚呈示装置の外観を図5に示す。装置を噛むときには図のように装置を手で持ち、右の先端を口に入れて奥歯で噛む。衛生面を考慮口に入る部分にはゴムと布の2層のカバーをかぶせている。

装置は4節リンクをDCモータ(maxon motor, RE25)で駆動する1自由度の構造になっている。装置にはポテンショメータと圧力センサが装備されており、位置と圧力を同時に取得する。制御は1台のPCで行い、サンプリング周波数は約1700Hzである。



図 5 力覚呈示装置の外観

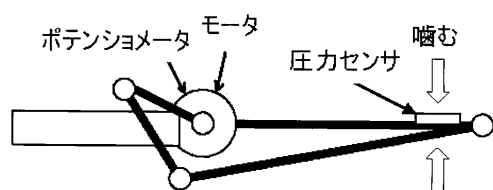


図 6 力覚呈示装置の機構

また、4 節リンクを用いたてこクラック機構を採用したため、リンクの姿勢によって最大出力が変化し、最低 7kgf、最高 28kgf の最大出力になる。呈示食品の厚みとなるストロークは約 10mm である。

3.3 位置制御方法

食品を呈示する際には、測定された咬合力をモータトルクに変換し出力すればよいが、例えば煎餅やクラッカーなどでは、その前に硬い面を作る必要がある。この外力がある場合の位置制御方法について述べる。この方法ではブレーキなどを用いずに、モータ、ポテンシオメータ、圧力センサで構成される装置で、硬い面を作っている。制御ループ中の基本計算式は次のようになる。実際に用いたパラメータの値も示した。

$$Power = K_p(\theta_d - \theta)(1.0 + K_f Force) - K_v \dot{\theta}$$

Power: モータ入力値 (V)

θ : ギヤ回り角度 (deg)

Force: 圧力センサ値 (kgf)

K_p : 位置ゲイン ($K_p = 0.2$)

K_v : 速度ゲイン ($K_v = 2.0$)

K_f : 圧力ゲイン ($K_f = 1.0$)

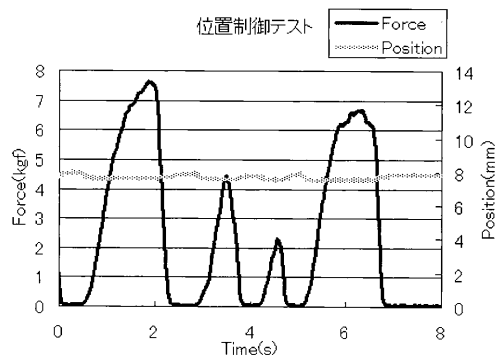


図 7 位置制御時に外力を加えたときの様子

この計算式では位置と圧力を同時に制御に反映している。圧力ゲイン K_f を導入することにより、外力が加わったときのみ Power が急激に大きくなり、位置が保たれる。

この制御方法を用いて適当な外力を加えた時の圧力と位置の関係を図 7 に示す。7kgf を超える外力が加わったときも位置が保たれ、振動が発生していないことが確認できる。

4 咬合力の呈示

4.1 咬合力の呈示方法

咬合力の呈示では、体験者が装置を噛んだと判定されたら、測定した圧力波形を出力する。しかし、食品の力学的物性を再現するためには、1つの制御方法で全ての食品呈示を行うことは困難である。そこで食品の食感をいくつかに分けて制御する必要がある。ここでは煎餅、クラッカーなどのかたい食品と、チーズ、グミキャンディーなどの変形しやすい食品について制御方法を述べる。

(i) 煎餅、クラッカーなどのかたい食品では、最初に 3.3 節の方法で硬い面を作り出し待機する。そして、歯からの力がその食品の破断応力に達したら、食品の変形過程のデータをそのまま出力する。変形過程のデータとは食品の破断から噛み終わりまでの圧力である。

(ii) チーズ、グミキャンディーなどの変形しやすい食品の厚さと応力は、反比例の関係にある。つまり、ばねのような応力を示すので食品ごとのばね係数を決定すれば、破断応力に達することができる。噛みはじめより、ポテンシオメータで厚さ（位置）を検出し、その厚さに応じてモータ出力を決定する。その後、噛み終わりを位置で判定し、モータ出力を抜いていく。

4.2 硬い食品の変形過程の呈示方法

かたい食品の呈示は噛みはじめから噛み終わりまでの時間が短く、制御が不安定になりやすい。また、圧力のピークからの勾配が緩やかになるという問題があった。これを解決するため 4.1 (i) を改良した呈示方法を紹介する。

最初に硬い面を作り出し待機するまでは同じである。その後、歯からの力が食品の破断応力に達したら、位置を次の小さな破断応力（第2のピーク）が起こっていたところまで移動させ、再び面を作る。圧力センサの値がその破断応力に達したら、第3のピークの位置に移る。これを噛み終わりまで繰り返すことによって、食品破壊の短時間の制御を行う。

この方法を用いることにより、ピークからの勾配が測定データと同じく急になり、破断が強調された。次節の煎餅の呈示結果ではこの呈示方法を用いている。

4.3 呈示結果

圧力センサによって測定した力学的物性値の値から制御に必要な情報を抽出し、前述の2つの制御方法によって食感の呈示を試みた。呈示する波形は図3の煎餅の波形と図4のグミキャンディーの波形である。呈示した結果得られた圧力と位置の波形を図8と図9に示す。

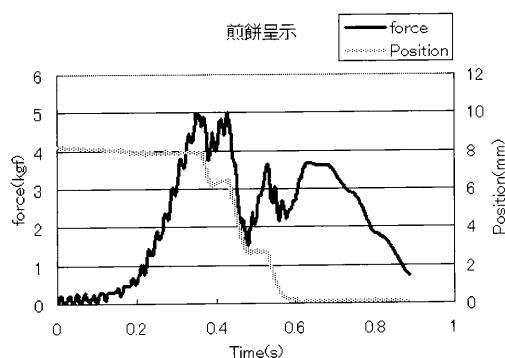


図 8 煎餅の呈示結果

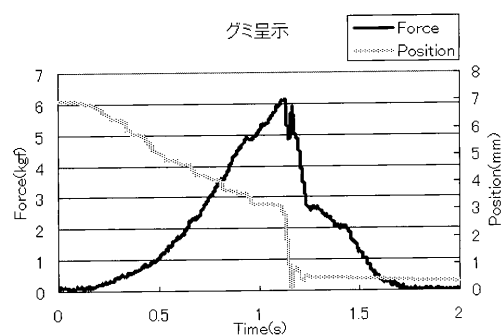


図 9 グミキャンディーの呈示結果

煎餅の呈示結果では、最初の破断応力が約 5.0kgf であり、測定結果と一致している。その後2つのピークの大きさも測定結果と一致した。位置の波形に注目すると圧力のピークに対応した階段型になっているのが確認できる。最後に位置が閉じた後にも圧力の山が見られるが、これは装置を勢い余って噛んだものである。

グミキャンディーの波形では噛みはじめから変形をはじめ、圧力が 6kgf 付近に達したところで噛み終わるという点で、測定結果と似た呈示結果が得られた。

ただし、これらの呈示結果は毎回同じ結果が得られるとは限らない。測定時と同様、装置を噛む歯、噛む速さ強さによって得られる波形が異なっている。

第6章ではデモンストレーションを行ったときの体験者の観察記録により、装置を実際に噛んだときにどう感じるかの評価を示している。

5 その他の感覚呈示

食品を食べるとき、人間は五感の全てを使ってその食品を味わっている。したがって、歯にかかる力覚だけでなく、他の感覚を与えることにより、より高い臨場感を出すことができるだろう。それだけでなく、力覚、聴覚、味覚などをシステムに取り入れることにより、様々な組み合わせによる感覚統合実験が可能となる。そのようにして、食品を食べるときそれぞれの感覚が持つ影響力を調査することも視野に入れている。

5.1 音の呈示

人間が食品を噛むときの音は2種類の経路で耳に伝わってきている。空気を伝わる気導音と、頭蓋骨から内耳に直接伝わる骨導音である。後者は噛んでいる本人にしかわからない音であり、これを利用すればより高い臨場感が得られると考えられる。本システムでは、骨伝導マイクで録音した咀嚼時の音を骨伝導スピーカーで呈示し、音圧マイクで録音した音を音圧スピーカーで呈示する。呈示するタイミングは、煎餅の場合であれば、最初の破断応力に達した時にあわせて音を再生すれば、違和感なく呈示できる。

図 10 のように骨伝導マイクは耳の中に入れて使用し、骨伝導スピーカーは耳横の頬骨にあてて使用する。

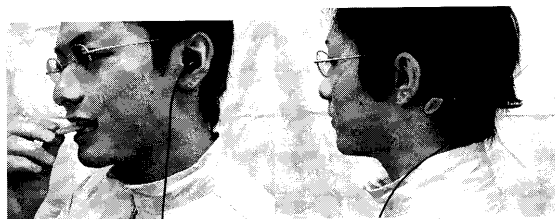


図 10 骨伝導マイク(左)と骨伝導スピーカー(右)

5.2 味の呈示

味は5つの基本味で分類することができる。甘味・塩味・酸味・苦味・うま味である。これらを組み合わせることによって、様々な味を作り出すことが可能となる。本研究では、リンゴの味を模した合成味を作り出すことに成功した。このように5基本味で様々な味を合成できるならば、装置による咀嚼に合わせて味物質を呈示することにより、高い臨場感を感じることができるであろう。

人間は舌の味蕾にある味細胞という受容器によって味を感じることができる。舌の部位によって感じる味の種類が異なっており、甘味は舌の先端、塩味・酸味は側端、苦味は基底部となっている。よって、実際に呈示するには全体にまんべんなく液体が行き渡るようにしなければならない。味物質の呈示には図11にあるようなシリンジポンプを用いて、チューブを食感呈示部に取り付け咀嚼と同時に液体を勢いよく放出するという方法で行った。

今回の呈示では、すでに合成された液体を呈示したが、このシリンジポンプを5台用いて五基本味をその場で合成・呈示することも可能だと考える。

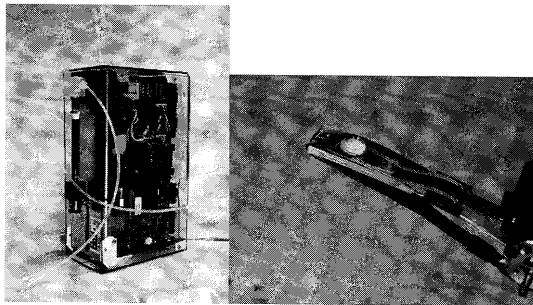


図 11 シリンジポンプ(左)と食感呈示部に付けられたチューブ(右)

5.3 視覚、嗅覚について

視覚と嗅覚については、食品を噛む動作とそれほど密接に関係していないため、本システムには取り入れていない。しかし、将来的にはHMDを用いて食品を映し出すことや、匂いの元を気化させて食品の匂いを出すことが可能だろう。

6 SIGGRAPH2003 における評価実験

6.1 SIGGRAPH2003 におけるデモ

2003年7月27日より31日までの5日間、カリフォルニア州サンディエゴにてACM SIGGRAPHが開催された。このSIGGRAPHのデモ展示であるEmerging Technologiesにおいて、我々は食感呈示装置「Food Simulator」をデモ展示し、世界中から訪れた様々な人々にこの食感呈示装置を体験してもらった。5日間

の全体験者数は654人であり、年齢性別関係なく体験させ、彼等のデモ体験の様子を観察し装置の評価として検証した。

デモには2種類のバーチャル食品を用意した。一つ目は煎餅の食感を呈示し、さらに臨場感を高めるためにあらかじめ録音した煎餅の咀嚼音を音圧スピーカーと骨伝導スピーカーで体験者に呈示した。二つ目はグミの食感を呈示し、臨場感を高めるためにリンゴ味の味物質の呈示を行った。この2種類のデモを体験した者に対して「何の食感か分かるか」「どんな食品を連想するか」という質問をし、その回答や意見を観察記録とした。

6.2 煎餅の呈示における観察記録

全体験者数は654人である。煎餅の食感呈示において、体験者から得られた有効回答数は274、有効回答率は約42%であった。「何の食感か分かるか」「どんな食品を連想するか」という質問に対し、

1. 「煎餅、又はクラッカーの食感であると答えた」
2. 「分からないが正解を教えると納得した」
3. 「分からず正解を教えても納得しない」

という3つの項目に分類し、2番目、3番目に該当した者の質問回答をまとめた。結果を図12から図14に示す。

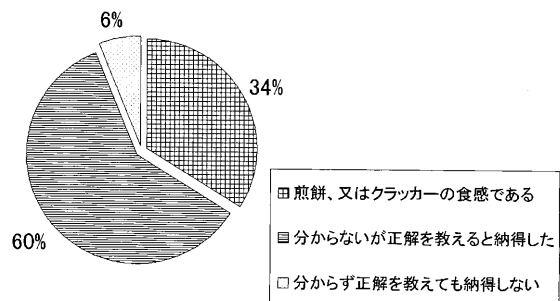


図 12 質問に対する回答の分類

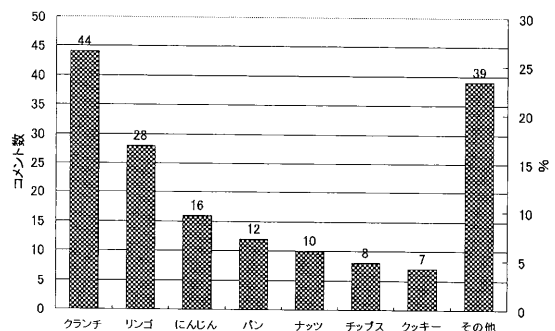


図 13 正解を教えると納得した体験者の質問回答

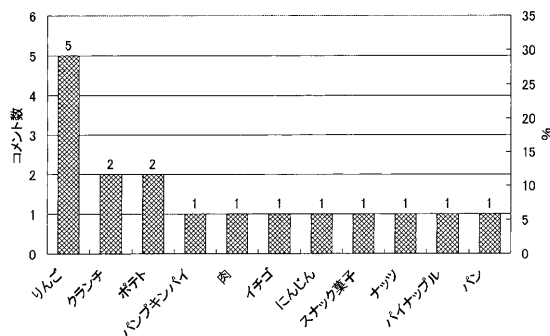


図 14 正解を教えても納得しない体験者の質問回答

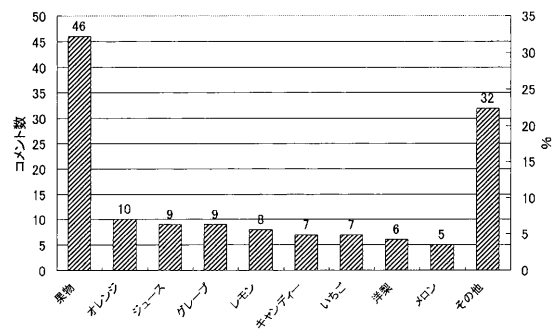


図 16 正解を教えると納得した体験者の質問回答

有効回答の約 34%が「煎餅、又はクラッカーの食感である」と答え、「分からないが正解を教えると納得した」と答えたのが約 60%であり、合計約 94%の質問回答が「呈示された食感は、煎餅、又はクラッカーであることを納得した回答である」という結果になった。

6.3 グミの呈示における観察記録

グミの食感呈示のデモでは、味物質が付加されるので味物質の効果に着目して評価を行った。また、6.2 節と同様の質問に対し、

1. 「リンゴであると答えた」
2. 「分からないが正解を教えると納得した」
3. 「分からず正解を教えても納得しない」

という、3つの項目に分類した。体験者から得られた有効回答数は 372、有効回答率は約 57%であった。集計結果を図 15 から図 17 に示す。

グミの食感でも、有効回答の約 61%が「リンゴである」と答え、「分からないが正解を教えると納得した」と答えたのが約 37%であり、合計約 98%の質問回答が「呈示された味は、リンゴであることを納得した回答である」という結果になった。

6.4 観察記録の集計結果に対する考察

本実験の結果、呈示された歯ごたえに対して 94%の人が、味に対して 98%の人が納得したことにより、本装置の有効性が確認された。

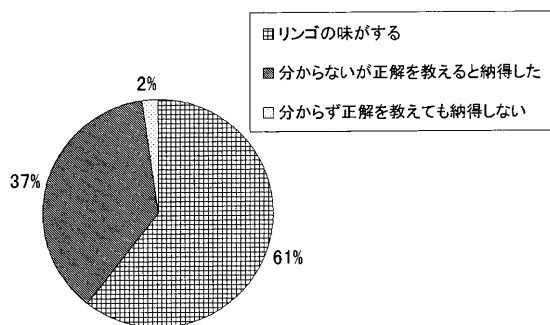


図 15 質問に対する回答の分類

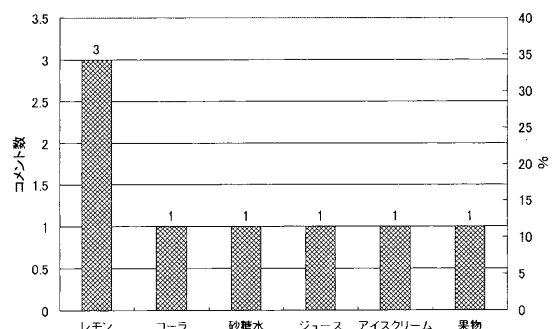


図 17 正解を教えても納得しない体験者の質問回答

正解を教えると納得した体験者の回答には、呈示した食感に近い食品を連想した回答が多く見られたが、正解を教えても納得しなかった体験者は、まったく性質の異なる食品を連想する回答が見られ、まったく分からなかった。ものを噛むという動作は個人差が大きいため、体験者によってはまったく分からない場合もあるという結果になった。

7 まとめと展望

人間の咀嚼運動は、食品の認識具合に応じて異なっている。食べ慣れた食品であれば、一定の速度、適切な圧力の加え具合によって咀嚼しているが、未知の食品に対しては咀嚼の速さはゆっくりになり、食品の変形具合を感じながら圧力を加えていく。このように、咀嚼には人間に依存する要素が大きいため食感の評価は困難なものになっている。

本研究にて行った力学的物性の測定は、最も自然な咀嚼運動における 1 回の咀嚼の圧力を測定し、食品によって異なる特徴を得ることができた。しかし、人間は食品を、前歯、側切歯、奥歯を使って噛み、複数回の咀嚼を経て食品を飲み込む。また、歯の表面や裏面にかかる力も考慮しなければならない。正確なテクスチャーの測定が確立されていないため、どのような測定をすべきかには課題も残る。

食感呈示装置においては、食品のかたさだけでなく、

破断応力後の圧力波形、食品の変形の仕方のある程度再現することができ、異なる食感が呈示できた。しかし、人間が食品を噛むという行為が能動的行為であるために、噛み方によらず毎回その食品の力学的物性を呈示することは困難であった。また、噛み終わった後に装置の厚さが残ることやカバーである布の舌触りなどが違和感となっていた。

力覚以外の感覚呈示では、咀嚼時の音と味を呈示することにより、聴覚、味覚と力覚の複合的な感覚呈示を実現した。その際にそれぞれの感覚がもつ影響力を調査することは今後の課題である。

食感呈示装置の開発は始まったばかりであるが、将来的には、エンターテインメントとしてバーチャル食品を体験することや、老人など咀嚼力が低下した人を対象にした咀嚼訓練などにも応用できると考えている。

参考文献

- [1] Kawamura, Y., Kare, M. R., Umami: A Basic Taste, Marcel Dekker, New York, (1987)
- [2] 森 友彦・川端 晶子 編「食品テクスチャー評価の標準化」、光琳、1997
- [3] Kohyama, K., Nishi, M., and Suzuki, T. Measuring texture of crackers with a multiple-point sheet sensor. *J. Food Sci.* 62(5), 922-925, 1997
- [4] Kohyama, K., Sakai, T., Azuma, T., Mizuguchi, T., and Kimura, I. Pressure distribution measurement in biting surimi gels with molars using a multiple-point sheet sensor. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 65(12), 2597-2603, 2001
- [5] Kohyama, K. et al., Chewing patterns of various texture foods studied by electromyography in young and elderly populations. *J. Texture Studies*, 33(4), 269-283 (2002)
- [6] Kohyama, K. et al., Patterns observed in the first chew of foods with various textures. *Food Sci. Technol. Res.*, 7(4), 290-296(2001)
- [7] Szczesniak, A. S., Classification of textural characteristics, *J. Food Sci.*, 28, 385-389(1962)
- [8] Szczesniak, A. S., Texture is a sensory property, *Food Qual Prefer*, 13, 215-225(2002)
- [9] K. Toko, T. Matsuno, K. Yamafuji, K. Hayashi, H. Ikezaki, K. Sato, S. Kawarai, Multichannel Taste Sensor Using Electric Potential Changes in Lipid Membranes *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 9, pp. 359-364(1994)
- [10] K. Toko, Electronic Tongue, *Biosensors & Bioelectronics*, Vol. 13, pp. 701-709(1998)
- [11] Nakamoto, T., et al., Active Gas Sensing System Using

Automatically Controlled Gas Blender and Numerical Optimization Technique, *Sensors and Actuator B*, 41 pp183(1994)

- [12] Davide, F., et al., *Virtual Olfactory Interfaces: Electronic Noses and Olfactory Displays, Communication Through Virtual Technologies*, IOS Press(2001)
- [13] Takanobu, H. et al., Integrated Dental Robot System for Mouth opening and Closing Training, *Proc. Of ICRA2002*, 1428-1433(2002)

(2003年10月10日受付)

[著者紹介]

上村 尚弘 (学生会員)



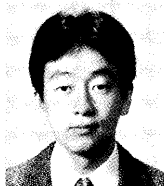
2002年横浜国立大学工学部生産工学科卒業。同年、筑波大学大学院理工学研究科入学、現在に至る。

森谷 哲郎 (学生会員)



2003年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同年、筑波大学大学院システム情報工学研究科入学、現在に至る。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 99年筑波大学機能工学系講師、現在に至る。力覚呈示、移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫 (正会員)



1981年 東京大学工学部機械工学科卒業、1986年 東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士)、同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学機能工学系教授。ハプティックインタフェース、ロコモーションインタフェース、没入ディスプレイの研究に従事。工学博士。1998年 東京テクノフォーラム21 ゴールドメダル受賞。2001年文化庁メディア芸術祭優秀賞受賞。