

# 骨伝導マイクロフォンを用いた咀嚼回数指導方式の提案

## Advising the Number of Mastication by Using Bone-Conduction Microphone

宇野 修司<sup>\*1</sup>   有泉 亮<sup>\*1</sup>   金田 重郎<sup>\*1</sup>   芳賀 博英<sup>\*1</sup>  
 Shuji Uno   Ryo Ariizumi   Shigeo Kaneda   Hirohide Haga

<sup>\*1</sup> 同志社大学大学院工学研究科  
 Graduate School of Engineering, Doshisha University

These days, not well chewing foods causes a sickness of a chin. In order to make a good chewing, some companies developed the mastication counting systems such as “Kamikami-sensor”. However, it only shows mastication count. Furthermore, users set the sensor under their chin, so it disturbs eating meals. Therefore, we need to develop the system which is easy to use and advises appropriate mastication count. In this paper, we propose the method for counting mastication and advising appropriate mastication count. To implement it, we use sensors which are called bone-conduction microphones. With them, we can detect the mastication action and the hardness of foods. Then the system advises appropriate mastication count. We developed the prototype system implemented by using this proposed method. As a result of experiment, the effectiveness of it was proved and this system is easier to use than Kamikami-sensor.

### 1. はじめに

近年、食事中における咀嚼回数の減少により、肥満・顎の縮小・口腔内の病気など身体に様々な悪影響を与えていることが報告されている。その原因として、食事内容が歯ごたえのある食事から、柔らかく味付けの濃い食事へ移行していることが挙げられる。それらの食事は、ハンバーグやスパゲティなど現代の若年層の好む食事であるため、特に若年層の咀嚼回数の減少が懸念されている。

この現状を改善するため、咀嚼回数向上を目的とした咀嚼回数測定システムの提案・開発が行われており、現在市販化されているものとして“かみかみセンサー”が挙げられる。しかし、かみかみセンサーはあくまで咀嚼回数を提示するまでに過ぎない。また、かみかみセンサーは顎の下部にセンサを装着するため食べづらいという使用感の問題点も挙げられている。よって、咀嚼回数を向上させるために何か情報を提供して指導し、また、ユーザが使いやすいシステムであることが望ましい。

そこで、本論文では骨伝導マイクロフォンと呼ばれるセンサを用いて咀嚼回数の提示に加え、口腔内に含んだ食品の適切な咀嚼回数を提示するシステムを実現する方式の提案、及びユーザが使いやすいシステムを実現する方法を提案する。具体的には、2個の骨伝導マイクロフォンを用いて咀嚼検出と食品の噛みごたえ度を検出し、咀嚼回数と口腔内に含んだ食品の適切な咀嚼回数をユーザに提示する。

そして、プロトタイプシステムとかみかみセンサーによる評価実験の結果、100回の咀嚼において、咀嚼検出回数の誤差平均値は、プロトタイプシステムで11.25回、かみかみセンサーで31.4回となり、プロトタイプシステムの方が約20%精度の高い咀嚼回数を提示し、また、食品別に適切な咀嚼回数を提示したことにより、本提案方式によるシステム実現の有効性を確認できた。また、センサの装着方法を改善することにより、ユーザに負担をかけない食事を実現できたことがアンケート調査により判明した。

### 2. 提案方式

本提案方式では咀嚼回数の提示に加え、口腔内に含んだ食品の適切な咀嚼回数を、ユーザに提示するシステムを実現する方式とユーザが使いやすいシステムを実現する方法である。

本提案方式から実現可能な咀嚼回数指導システムの概要を図1に示す。本研究では2個の骨伝導マイクロフォンを左右の耳の後ろに取り付け、咀嚼時の上下歯が接触したときの音の振動を取得する。そして、取得したセンサ情報から、咀嚼と食品の噛みごたえ度の2つの情報を検出し、咀嚼回数と口腔内に含んだ食品の適切な咀嚼回数をユーザに提示する。適切な咀嚼回数は、食品の噛みごたえ度から決定されると言われており、『料理別咀嚼回数ガイド』には各食品の適切な咀嚼回数が掲載されている。このガイドを用いて、咀嚼回数30回未満の食品を「柔らかい食品」、30回以上50回未満の食品を「普通の食品」、50回以上の食品を「硬い食品」の3段階に区別した。これまで咀嚼した回数と今食べている食品の3段階での適切な咀嚼回数を提示する。以上により、提案方式を実現する。

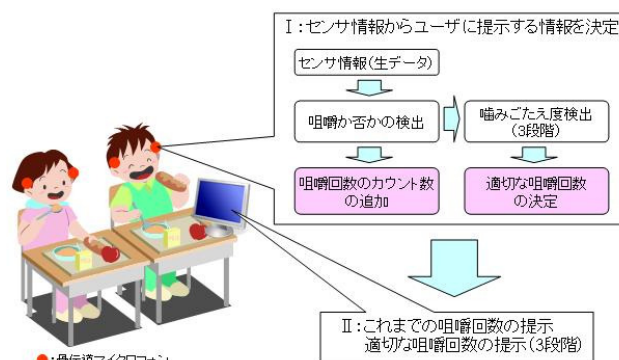


図1: システムの概要

#### 2.1 咀嚼情報の取得方法

咀嚼時の振動を取得するため、図2に示す骨伝導マイクロフォン(メーカー:小野測器, 型番:NP-2110)を使用する。センサの装着箇所はユーザに負担をかけない箇所であることを前提とし、顎からなるべく近く、皮膚が薄く、筋肉の動きが少ない箇所を選んだ結果、左右の耳後ろ部分に1つずつセンサを装着す

る。センサの装着方法はマジックテープが付いたゴムバンドにセンサを取り付け、額から後頭部へ巻きつけて装着する。

また、データを取得する際のサンプリング周波数は、咀嚼時の接触音を取得し周波数分析を行った結果、咀嚼時に現れる高周波成分はせいぜい 2000Hz 程度なので、ナイキスト周波数と高速フーリエ変換を考慮して 4096Hz に設定する。なお、このセンサは単なるコンデンサであるため出力値は電荷容量の変化値である。よって、電荷信号を電圧信号へ変換するためのチャージアンプが必要となる。今回は図 3 に示すチャージアンプ(メーカー:小野測器, 型番:CH-1200)を使用する。

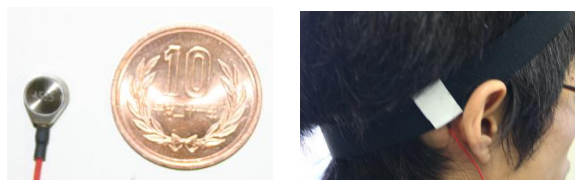


図 2: 使用するセンサ(左)と装着箇所(右)



図 3: 使用するチャージアンプ

## 2.2 咀嚼回数提示方法

咀嚼回数を提示するためには咀嚼しているかを検出する必要がある。そのためには 2 つの情報検出する。第一に生データから振幅の変化部分を検出する。口腔内に何も含まず 5 回咀嚼したとき(以降、この咀嚼を「素噛み」と呼ぶ)の生データを図 4 に示す。図中の橙色枠内の振幅が咀嚼時に出力する生データであるが、咀嚼時に振幅の大きい波を出力するのが特徴的である。これは素噛みに限らず、いかなる食品を咀嚼した場合でも同様な出力をするため、咀嚼回数の検出に必要な情報である。信号変化部分検出手法は、前後の時間の出力値の差が一定以上になったときに信号の変化部分であると判断する。

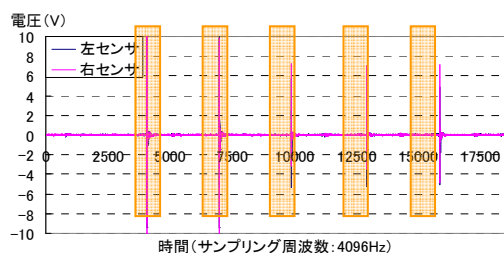


図 4: 素噛みで 5 回咀嚼したときの生データ

第二に人間の動作を検出する。なぜなら、例えば人間が食事を口に運ぶときに前にうつむく動作のセンサ出力は、図 5 のように振幅の大きい生データを出力し、第一の手法のみでは人間の動作も咀嚼と誤検出する可能性があるためである。人間の動作判定手法は、左右センサの各時間の電圧値の差で判断する。咀嚼時は左右センサが同時刻で同等の信号を出力するのに対し、図 5 の矢印時刻の左右センサの出力には振幅差がある。なぜこのような出力差が生まれるかという点、一般に食事を口腔内に運ぶときに前にうつむく動作は、例えば食品を口腔内に運び

やすくするために箸の持つ側の方へ頭を斜めに動かすという動作なので、左右のセンサ部分付近で異なる動きをしているからと考えられる。従って、頭を動かさずにそのまま前にうつむいて口腔内に運ぶ場合は、左右センサ部分付近で同等の動きをするため同時刻で同等の電圧値を出力し誤検出すると予想される。しかし、実際にその動作で確認実験を行った結果、同時刻で同等の電圧値を出力することは稀であり、そもそもそのような動作で食事をする人はいない。したがって、左右センサの出力値の差から動作時のセンサ出力と咀嚼時のセンサ出力を識別できる。以上、信号の変化部分を検出し、その振幅が人間の動作でないかと検出されたとき咀嚼部分として判断する。

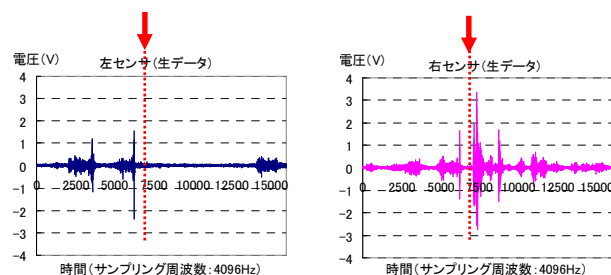


図 5: うつむき時の左右センサ生データの比較

## 2.3 適切な咀嚼回数の提示方法

適切な咀嚼回数を提示するためには、噛みごたえ度を検出する必要がある。歯から伝わる音の振動は食品による咀嚼の仕方の違いや、咀嚼したときに食品から鳴る音の違いによって異なる。その違いが各料理の噛みごたえ度に依存するため、生データの波形と音の周波数分析から食品の噛みごたえ度を検出する。分析する生データは食品の形状が整っているときに各食品の持つ特徴であるため、咀嚼開始から 5~6 回までの生データを分析する。また、本研究で検出した噛みごたえ度から料理別咀嚼回数ガイドを用いて咀嚼回数 30 回未満の食品を「柔らかい食品」、30 回以上 50 回未満の食品を「普通食品」、50 回以上の食品を「硬い食品」の 3 段階に区別する。

まず、普通の食品と硬い食品を 400Hz 以上の各周波数の含む割合から区別する。図 6 の通り、硬い食品ほど高周波成分が多いことが分かる。この違いから普通の食品と硬い食品の区別が可能である。

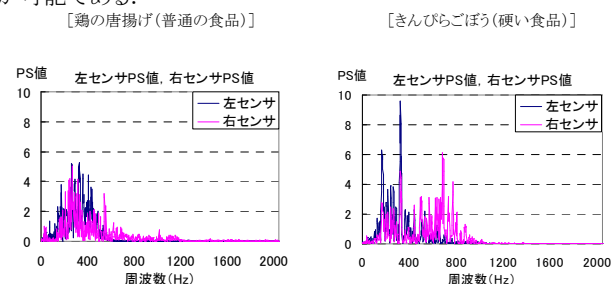


図 6: 食品の噛みごたえ度による周波数成分の違い

次に、柔らかい食品を生データの波形から区別する。柔らかい食品の食べ方には舌で押し潰す食べ方と、1 噛み目で簡単に噛み切って上下歯を強くぶつける食べ方がある。前者の場合は高周波成分の割合が少ないため周波数分析の方法で識別可能である。これに対し、図 7 は後者の場合で咀嚼した結果であるが、後者の場合は高周波成分の割合が多くなるため、硬い食品と識別不可能となる。しかし、生データは図 2 で示す素噛

みの生データとはほぼ同等の波形であることから、高い相関を示したときに柔らかい食品であると判断する。

さらに、食品の噛みごたえ度を自動検出する「食品の噛みごたえ度自動検出手法」について説明する。まず、咀嚼検出手法で咀嚼を行ったと判断したときの窓の始点から 0.5 秒間(データ数 2048)の左右センサ生データを抽出し、フーリエ変換を行う。

次に、そのデータを移動平均することで各周波数の割合を明確にし、移動平均後の左右センサの各周波数のパワースペクトル値の和を求める。ここまで処理したデータの 400Hz 以上の各周波数のパワースペクトル値の和と、抽出した生データと素噛みの生データとの相関から食品の噛みごたえ度を判定する。

また、咀嚼開始から 1 噛みのみの生データで判定するのは信用できないため、咀嚼開始から続けて食品の噛みごたえ度判定を行い、始めに 3 回判定された噛みごたえ度を最終的な噛みごたえ度として決定する。以上、高周波成分の割合と素噛みの生データとの相関によって 3 段階の噛みごたえ度に区別する。

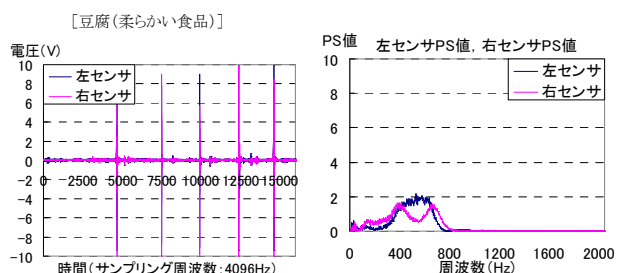


図 7: 豆腐咀嚼時の生データとパワースペクトル

### 3. プロトタイプシステム

提案方式の有効性を検証するためプロトタイプシステムを構築する。今回構築したプロトタイプシステムの構成を図 8 に示す。また、プロトタイプシステムのモニタに提示する咀嚼回数と適切な咀嚼回数の提示例を図 9 に示す。本章では、プロトタイプシステムの構築に使用したハードウェアの説明、及び咀嚼時と食品の硬度を検出するソフトウェア開発の環境について述べる。

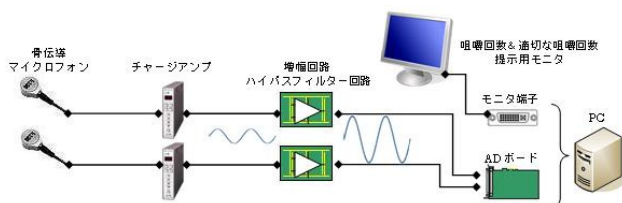


図 8: プロトタイプシステムの構成

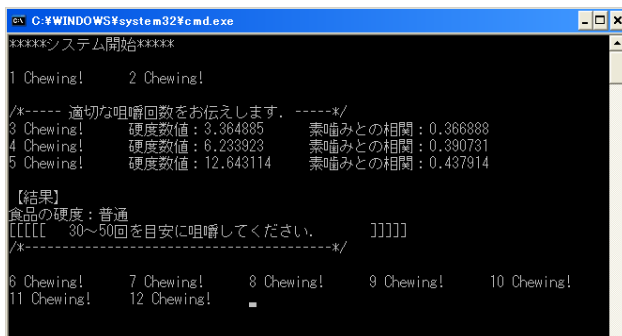


図 9: プロトタイプシステムの提示例

### 3.1 ハードウェア部

プロトタイプシステムの構成において、ハイパスフィルタ回路と増幅回路を搭載した自作の基盤に接続する理由について説明する。第一にハイパスフィルタ回路は、咀嚼時に出力する生データのうち高周波成分のみの生データを PC に取り込むためである。低周波成分は人間の身体の揺れや皮膚のわずかな動きなどによるものが多いため、PC へ取り込む前に咀嚼検出と食品の噛みごたえ度を検出するときの弊害になる低周波成分を除去することにした。

第二に増幅回路は、チャージアンプから出力される電圧信号の振幅が極めて小さいことによるセンサ情報の劣化を防ぐためである。なぜセンサ情報が劣化するかというと、今回使用する AD 変換ボード(メーカー:Interface, 型番:LPC-321012)は分解能 12bit・レンジ幅 ±10V、つまり、電圧値のメモリ間隔は 0.0048V となる。この環境に対して、咀嚼時のチャージアンプからの電圧信号の最大はせいぜい 0.02V であり非常に荒いデータになってしまうため、レンジ幅を広く使用するために今回は 500 倍の増幅回路を作成した。

### 3.2 ソフトウェア部

2.1 節, 2.2 節, 2.3 節で述べた手法を元にプロトタイプシステムのソフトウェアを構築する。そのフローチャートを図 11 に示す。また、噛みごたえ度自動検出の処理は、処理量が膨大になり、リアルタイム処理が難しくなるため、行列演算や膨大なデータを高速に演算するという利点がある MATLAB エンジンライブラリを用いて演算を行うことにより、本システムのリアルタイム処理を可能にしている。

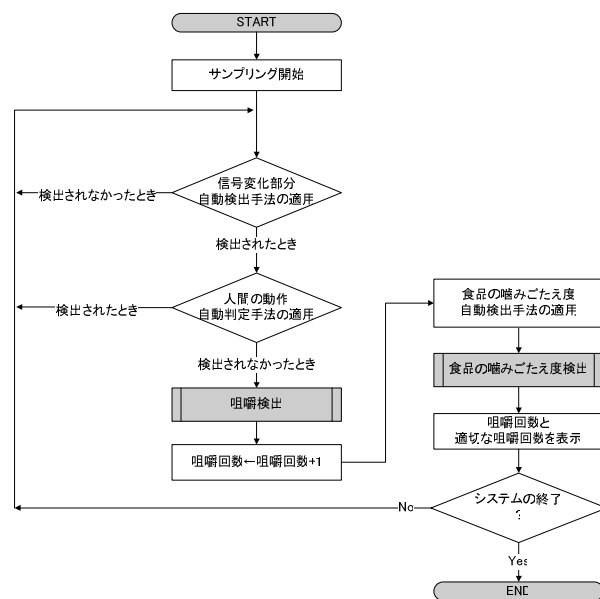


図 11: プロトタイプシステムのフローチャート

## 4. 評価実験

### 4.1 実験内容

本提案方式の評価実験は、プロトタイプシステムとかみかみセンサーを用いて行った。実験内容は被験者 20 名(男性:16 名, 女性:4 名)に以下の 4 つの実験を 3 回ずつ行い、終了後に両システムの使いやすさについてアンケート調査を行った。今回行う 4 つの実験の目的は、[実験 1][実験 2][実験 4]はプロ

トタイプシステムとかみかみセンサーが正しく咀嚼回数を提示しているかどうかの精度検証・比較を行うための実験であり、[実験3]は適切な咀嚼回数を提示しているかどうかの精度検証を行うための実験である。

・プロトタイプシステム

[実験1] ガム 100 回咀嚼×3 回

[実験2] 弁当を普段どおりに 100 回咀嚼×3 回

[実験3] 各噛みごたえ度別の 6 つの食品を咀嚼×3 回

柔らかい食品:豆腐, かぼちゃの煮物
普通の食品:ご飯, 鶏の唐揚げ
硬い食品:きんぴらごぼう, たくあん

・かみかみセンサーの使用

[実験4] 弁当を普段どおりに 100 回咀嚼×1 回

(※)「普段どおり」とは、食べ方や食べるものや順序などの制限はなく、自由に身体や頭を動かしながら食べる食べ方である。

## 4.2 実験結果

### (1) 咀嚼検出の精度結果

[実験1][実験2][実験4]より、被験者全員の咀嚼回数の結果の平均を求め、実際の咀嚼回数と両システムが提示した咀嚼回数との平均誤差を表1に示す。

表1:咀嚼回数の誤差比較

実験1	実験2	実験4
12.2 回	10.3 回	31.4 回

### (2) 噛みごたえ度検出の精度結果

[実験3]より、プロトタイプシステムの食品の噛みごたえ度の検出の正解率を表2に示す。

表2:噛みごたえ度検出の正解率

柔らかい食品	普通の食品	硬い食品
豆腐 83%	ご飯 63%	きんぴらごぼう 92%
かぼちゃの煮物 44%	鶏の唐揚げ 69%	たくあん 100%

### (3) アンケート集計結果

アンケートでは、両システムのうちどちらが使いやすいかについて回答してもらった。その結果、プロトタイプシステムの方が使いやすいという回答率が 100%であった。その理由を記述してもらった結果、過半数以上の人がかみかみセンサーは顎の下部にセンサを装着するため違和感や装着感があったり、咀嚼時に口を開くときの妨げになったりすると記述していた。また、両システムの欠点を記述してもらった結果を表3に示す。

表3:両システムの使いやすさにおける欠点(被験者の意見)

プロトタイプシステム	かみかみセンサー
<ul style="list-style-type: none"> <li>装着が困難。</li> <li>食事中センサの線が邪魔。</li> <li>ゴムバンドの締め付けが装着感あり。</li> <li>ゴムバンドの装着は他人から見られて恥ずかしい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>食事中に違和感あり。</li> <li>咀嚼時のセンサのズレ。</li> <li>咀嚼時の口の開きに制限あり。</li> <li>センサが喉に接触し負担。</li> <li>咀嚼回数結果の個人差が大きいので信頼できない。</li> </ul>

## 5. 考察

まず[実験2][実験4]から、100回の咀嚼において、咀嚼検出回数の誤差平均値は、プロトタイプシステムで 11.25 回、かみかみセンサーで 31.4 回となり、プロトタイプシステムの方が約 20%、検出精度が良いことを実証できた。かみかみセンサーの検出精度が低下した理由は、咀嚼時に顎の下部にあるセンサのズレと考えられる。これに対し、プロトタイプシステムは咀嚼時のセンサのズレはないため検出精度が向上したと思われる。

次に[実験1][実験2]の結果の誤差が 1.9 回と小さいことから、人間の動作による咀嚼回数の誤検出は、ほとんどないことを確認できた。[実験1]のガムの咀嚼は、食品を口腔内に運ぶという動作がないので動作による誤検出はない。それに対し、[実験3]の弁当の咀嚼はそのような動作はあるが両結果の誤差はほとんどないので、本研究で行った人間の動作による咀嚼回数の誤検出の補正は有効であると分かった。

そして[実験3]から、かぼちゃの煮物を除いて、噛みごたえ度の検出精度が良いことを実証できた。かぼちゃの煮物が誤検出する理由は、かぼちゃの食物繊維の含有量の違いや調理の仕方の違いによると考えられる。したがって、本実験では柔らかい食品に部類しないかぼちゃの煮物を使用したと考えられ、誤検出したとは言い切れないと思われる。

現在の提案方式では噛みごたえ度の検出結果から『料理別咀嚼回数ガイド』を参照して適切な咀嚼回数を決定しているが、今後は噛みごたえ度の検出結果から直接適切な咀嚼回数を決めるように食品の専門家の意見を取り入れて式を定義する必要があると考えられる。

一方、アンケート結果から、被験者全員がかみかみセンサーよりプロトタイプシステムの方が使いやすいという意見になった。しかしプロトタイプシステムは、特に女性に多かった意見として、ゴムバンドを頭部に巻きつけるときに髪の毛が邪魔で取り付けが難しいという意見があった。この解決法の一つとして、耳にかけるイヤホンのような装着方法が簡単と思われるので、今後新しく作成したい。また、本研究で用いた骨伝導マイクロフォンの有線が食事の邪魔になるという欠点も挙げられた。無線で高性能な骨伝導マイクロフォンがあるかどうかは不明であるが、もしそのようなセンサがあれば導入したい。

## 6. まとめ

本実験結果より、本提案方式によって咀嚼回数と食品別に噛みごたえ度を検出できることを実証でき、咀嚼回数と食品別に適切な咀嚼回数を、ユーザに提供するシステムを実現する要素を確立することができた。しかし、今後の課題として次の 2 つを挙げる。第一に、本論文で提案した咀嚼検出手法の唯一の欠点である、会話を咀嚼として誤検出することを改善する検出手法を考案すること。第二に、本提案方式では各個人の咬合力の違いによって咀嚼検出、食品の噛みごたえ度の検出精度に個人差があるので、咬合力が異なる場合でも、それぞれを検出可能な検出手法を考案すること。これらの課題を解決し、高精度かつユーザが使いやすい咀嚼回数指導システムの実現を目指したい。

## 参考文献

- [齋藤 05] 齋藤滋: “よく噛んで食べる 忘れられた究極の健康法”, 生活人新書, 2005.
- [日本咀嚼学会 06] 日本咀嚼学会: “咀嚼の本 一噛んで食べることの大切さ”, 2006.
- [齋藤 02] 齋藤滋: “料理別咀嚼回数ガイド”, 風人社, 2002.