

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	食感のバイオメカニクス
Title(English)	
著者(和文)	門脇廉
Author(English)	Ren Kadowaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9451号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:伊能 教夫,蜂屋 弘之,山浦 弘,岸本 喜久雄,宮崎 祐介
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9451号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

平成25年度 学位論文(要約)

食感のバイオメカニクス

指導教員 伊能 教夫 教授

東京工業大学

大学院理工学研究科
機械制御システム専攻

門脇 廉

目次

第 1 章	緒論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	関連研究と本研究の課題設定	3
1.3	本論文の構成	6
第 2 章	擬音語を用いたスナック菓子の食感の官能評価	7
2.1	緒言	7
2.2	評価項目の選定	9
2.2.1	食感を表す擬音語	9
2.2.2	印象を表す形容詞	9
2.3	官能評価手法の予備的検討	12
2.4	結言	16
第 3 章	スナック菓子の内部構造と食感の関係	17
3.1	緒言	17
3.2	結言	18
第 4 章	スナック菓子の材料特性の評価法	19
4.1	緒言	19
4.2	結言	21
第 5 章	人体頭部の振動特性の食感への影響	23
5.1	緒言	23
5.2	有限要素解析を用いた頭蓋骨の振動特性の推定	24
5.2.1	有限要素モデル	24
5.2.2	解析結果	25
5.3	咀嚼音の計測システム	28
5.3.1	咀嚼音の計測	28
5.3.2	頭部寸法の計測	28
5.4	計測結果	31
5.5	考察	36
5.5.1	代表被験者の特性	36
5.5.2	一般小人および成人被験者全体の特性	38

5.6 結言	44
第 6 章 スナック菓子の特徴と人体の特徴を総合した食感評価	45
6.1 緒言	45
6.2 結言	46
第 7 章 結論	47
7.1 総括	47
7.2 今後の課題	50
参考文献	53
第 1 章	53
第 2 章	54
第 3 章	55
第 4 章	56
第 5 章	57
第 6 章	57
第 7 章	58
本論文に関連する業績	59
謝辞	63

第 1 章

緒論

1.1 本研究の背景と目的

動物にとって食物の摂取は生命を維持する上で必要不可欠な行為であるが、我々人間にとっては、栄養分を体内に取り入れるという以上の意味がある。それは、食べることで自分が楽しみであるということである。食物を咀嚼する際の様々な歯ごたえや破碎音は快い感覚を伴う。このような感覚は、化学的な味の要素と合わせて、しばしば味わいと表現される。人間は味わいの優れた食物を求め、様々な食品や調理法、料理を創造してきた。そして、食べることに對する様々な取り組みの総体が食文化として継承され、発展し続けている。

また、食べることの楽しさは生活の質 (Quality of Life, QOL) に大きな影響を与える。このことは、栄養学的には必要としなくても、嗜好に訴える様々な食品が市販されていることから窺える。中でも菓子類については人によって嗜好が異なるため、それに合わせて多様な製品が提供されている。また、体力の衰えた高齢者にとっては、娯楽の種類が制限されるために食事の楽しさの重要性が高い。そのため、栄養バランスに十分配慮したうえで、より味わいの優れた食品を食べる機会を増やすことが QOL の向上に大きく寄与すると考えられる。

以上のことから、食品の味わいを改善したり、新しい味わいをもつ食品を開発することの重要性は高い。そして、これらの取り組みを客観的に進めるための、食品の味わいに関する分析と評価の手法が工業的に不可欠になっていると考えられる。

食品の味わいは、化学的な味やにおい、物理的な食感などの様々な要素によって構成されている。そのため、総体としての味わいを評価するためには、構成要素を知覚している各種の感覚に注目することが不可欠である。この点に関して、例えば味やにおいは、その知覚メカニズムが明らかにされてきており、客観的な評価技術も発展しつつある [1][2]。その一方で、食感に関しては多方面から研究がなされているものの [3][4][5]、そのメカニズムを十分に解明できているとは言えない。これは、食品咀嚼時に口腔内で起こる力学現象と食感との関連が詳細に調べられていないことによると考えられる。そのため、現状の食感の分析や評価は定性的なレベルにとどまっている。

食感を客観的に評価するためには、人間が食品を咀嚼したときに生じる力学現象をひとつひとつ考察していく必要がある。すなわち、食感が食品と人体の力学的な相互作用で生じる

という観点が重要である．そこで，本研究ではこの観点に則り，機械工学と生体工学の両面からアプローチして，食感の客観的な評価手法を開発することを目的とする．

1.2 関連研究と本研究の課題設定

食感とは、学術的にはテクスチャーと呼ばれ、「食品から受ける物理的特性の感覚の総体」と定義される場合が多い [3][4][5]。この定義では視覚的に得られる食品の形状や表面性状、口腔での食品との接触で感じられる温感なども含まれる。しかし、この定義に関係する物理的な特性は非常に多岐に渡り、すべてを同時に評価するのは困難である。そこで、本研究では特に食品を咀嚼した際に感じる歯ごたえや音に注目し、これらのような咀嚼時の破壊に伴う物理的な感覚の総体を食感と定義する。これは、食品の破壊に伴って生じる荷重や音を力覚や触覚、聴覚によって受容することで生じる感覚であり、市場で一般的に用いられている「食感」という語の意味ともよく対応していると考えられる。

食感の評価に関連する研究は、主に個別の食品の原材料と製法を対象とした調理学、家政学に立脚した研究 [6]~[9] と、主に計測された食品の特性や挙動を対象とした工学的な研究 [10]~[21] の2種類に大別できる。このうち、工学的観点から行われた研究は、さらに食品を圧縮破壊した際の荷重の変動に着目したもの [10]~[15] と食品破壊時の音に着目したもの [16]~[19]、およびそれらを統合したもの [21] に分けることが可能である。

食品の荷重試験を用いた食感評価手法で代表的なものは、Szczeniak らが開発したテクスチャープロファイルから発展した方法である [10][11]。この方法は食品を圧縮破壊した際の荷重プロファイルから一部分を抽出し、その部分の形状を特徴量として数値化したものである。特徴量には官能評価の結果と良く相関したものが提示されており、かたさ (firmness) や凝集性 (cohesiveness)、弾力性 (elasticity)、もろさ (brittleness) などがある。また、Taniwaki らは、圧縮破壊時の荷重変動を周波数解析して特徴を見出す方法を提案している [15]。

食品を圧縮した際の荷重が食感に大きな影響を与えていることはほぼ確実であるものの、特にかたくてもろい固形食品の場合には咀嚼時の音も食品の価値に影響を与えていると考えられる。咀嚼音に着目した研究では、被験者に実際に食品を咀嚼させて生じた音を録音して解析するという方法をとっている場合が多い [16][18][19][21]。また、音の種類に関しては空气中を伝播する気導音のほか、頭蓋骨中を伝播する骨導音も対象としている研究が見られる [18][21]。

上に挙げた各種の食感評価手法は、その基本となるデータの計測手法について分類すると以下の2種類に分けられる。

一つは、人間の咀嚼を模擬した機器を用いて食品を圧縮、破壊した際に得られるデータを利用する手法である。この手法には、測定用の機器さえあれば再現性の高い安定したデータを簡便に取得可能であるという利点がある。しかし、データが食品の特性だけでなく測定機器の特性にも依存することから、特定の機器が必要であったり、機器固有の特性によって本来の咀嚼とは異なる現象が生じる可能性があるといった欠点も抱えている。

これに対して、もう一つの手法は、実際に被験者に食品を咀嚼をさせ、そこで生じた荷重や音などを計測するというものである。この手法の場合、機器による模擬的な咀嚼とは異なり、咀嚼時に起きる本来の現象を計測することが可能である。しかし、複数人の被験者を用いた場合、被験者間の個人差によってばらつきが生じる。個人差の影響を排した標準的なデータとするためには、多くの被験者に協力を募らなければならない、そのために必要なコス

トは大きい。また、このようにして得られた標準的なデータは現実には存在しない平均的な人物のデータとなっているため、それぞれ異なる特性を持つ実在の個人との関連は薄くなっている可能性がある。

そこで、本研究では食感が食品と人体との間の力学的な相互作用によって生じることに焦点を当て、図 1.1 に示すように、食品の特性と人体の特性を総合的に扱うことでこの問題の解決を試みる。特に、食品については老若男女誰が食べても食品自体は同じであるという基本的な事実に対応するため、測定機器の特性に依存しない幾何学的構造や物性に着目し、その巨視的な特性と微視的な特性の両方を取り扱う。また、食品とは独立に咀嚼運動や頭部の動特性などを人体の特性として導入することで、特性の異なる人体ごとに、異なった食感が生じる可能性を考慮する。

上記の研究を遂行するため、評価対象とする食品を選ぶにあたり、本研究ではスナック菓자에注目した。スナック菓子は、その商品価値に歯ごたえや音といった食感が大きく寄与する食品である。また、幼児から高齢者まで幅広い年齢層で好まれ、それぞれの世代で嗜好が異なると思われるという特徴もある。こうしたことから、より良い食感のスナック菓子を開発するために工学的な検討を行う意義は大きい。さらに、日本のスナック菓子のバリエーションは世界的にも非常に豊富で、日本独自の食文化との関わりという観点からも興味深い。

一方、工学的な観点からは、スナック菓子が工学的に扱いやすい食品であることを指摘できる。スナック菓子の食感は基本的には破砕時の挙動によって生じるが、このときの変形量自体は他の食品に比べて小さい。そのため、複雑な大変形の挙動を考慮しなくても材料力学的な基本特性を把握できると考えられる。また、スナック菓子は工業的に生産される加工食品であるため、個体間で構造や材料の特性が揃っていると期待される。そして、それらの特性は開封後も急激に変化することはない。市販品を継続的に入手できることと合わせ、これらの性質は食感の研究に適している。そこで、本研究では食感を評価する対象としてスナック菓子を選定した。

第2章以降で述べる本研究の課題は以下の通りである。

課題 1 官能評価による食感の数値化

課題 2 食品の構造の定量化

課題 3 食品の材料特性の詳細な測定

課題 4 人体頭部の振動特性が食感に与える影響の解明

課題 5 食品と人体の特性から食感を評価する数理モデルの構築

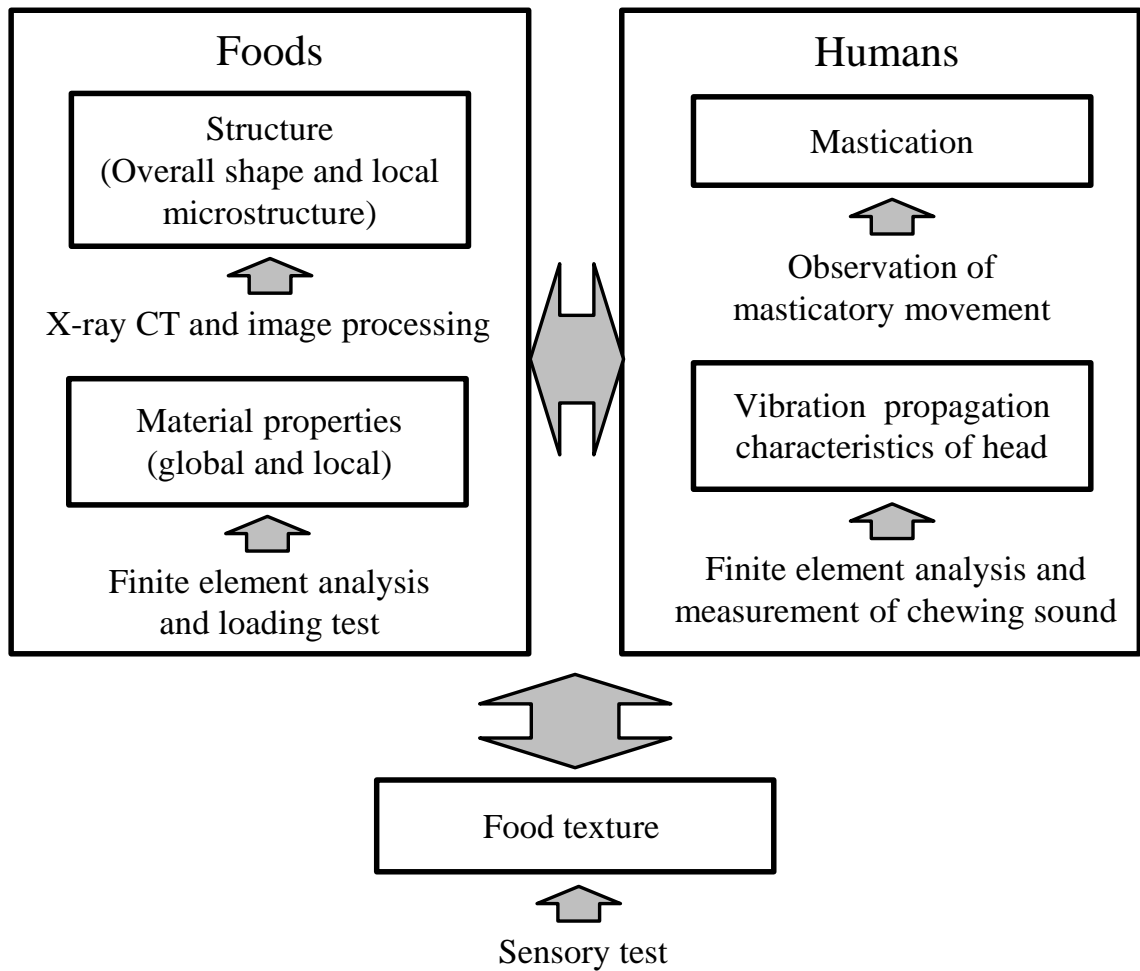


Fig. 1.1 Overview of our texture study for foods and humans

1.3 本論文の構成

本論文は以下のように構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、食感に関する従来研究と本研究の課題設定を述べる。

第2章では、加工食品の食感を数値化するために行った官能評価について述べる。

第3章では、加工食品の特性としてX線CTで撮影した内部構造に着目し、CT画像から特徴量を抽出する。また、得られた特徴量を、同じ加工食品に単純圧縮試験を施したときの破壊挙動と比較する。

第4章では、加工食品の生地が持つ局所的なヤング率および破壊強度を測定する手法の開発と、その手法で測定された材料特性について述べる。

第5章では、頭部寸法と頭部の振動特性との関係について有限要素解析や実験をもとに考察し、食感に大きく寄与している咀嚼音に対して、人体の頭部寸法が与えている影響について述べる。

第6章では、食感に関して行った官能評価と、他の解析結果との関連を統計的に考察し、食品の特性と人体の特性を用いて食感を客観的に表現する数理モデルの構築について述べる。

第7章では、本論文の結論、および今後の課題について述べる。

第 2 章

擬音語を用いたスナック菓子の食感の官能評価

2.1 緒言

食感を客観的に評価することは、客観的な手法で得られる食品や人体の物理量と食感との対応を定量的に求めることに他ならない。こうした場合、物理量は一般的には測定結果としての数値である。そして、これらの数値と食感の間の量的な関係を明らかにするためには、食感も何らかの数値で表現されていなければならない。

食感は感覚量であるため、数値化のためには官能評価を実施するのが現状では最も合理的である。先行する食感研究においても、例えば Szczesniak らは食品破碎時の荷重プロファイルを官能評価の結果と対応付けている [10]。また、音に注目した Salvador らや Dacremont らの研究も感覚量としての食感を数値化するために官能評価を用いた [14][18]。ただし、ここで使われている官能評価は、彼らの物理的な食感評価手法とは完全に独立に食感を数値化する手法であった。すなわち、客観的な食感評価にどのような物理的指標を用いているかに関わらず、かたさ (hardness) やもろさ (brittleness) などの数値化を試みるものであった。

一方、本研究では食感を表す擬音語に着目した。元来、日本語は世界的に見ても食感に関する表現が発達している言語であると言われている [22]。そして、その多くを擬音語が占めていることも諸外国語と比べて特徴的である [23]。こうした傾向は一般的に使われる食感表現にも共通しており、擬音語によってはほぼすべての日本語話者に通じる言葉もある [24]。一般に浸透しているこれらの擬音語は、非専門家にとっても直観的にわかりやすい指標であると考えられる [25][26][27]。さらに、食感を評価するという立場からは、擬音語に対して上記とは別の有効性を見出すことができる。それは擬音語が、その字義の通り音を模擬していると考えられる点である [28]。このことは、元の音に含まれる物理的な特徴が、擬音語に何らかの形で保存されている可能性があることを意味する。擬音語を使うことによって、「かたさ」や「もろさ」といった語では表現しきれない咀嚼時の破壊挙動を評価できる可能性がある。また、本研究では食感に関して、人体の特性を加味した個人差も議論するが、こうした観点を考慮した官能評価はほとんど行われていない。このように、擬音語を使うという点、

人体の特性を加味した個人差も検討するという点で、本研究における官能評価は従来とは異なる観点からのアプローチとなる。

そこで本研究では、スナック菓子の食感を表すのに用いられる代表的な擬音語に注目し、擬音語が表す食感の強さを被験者に評価してもらった。対象は市販のスナック菓子とした。

評価方法に関しては、各擬音語に当てはまる食感の強さによって対象の菓子を順位づけしてもらう方法、および各擬音語に当てはまる食感の強さを採点してもらう方法を採用した。また、同時にSD(Semantic-Differential)法と呼ばれる印象評価手法を用い、食感の多面的な把握を試みた。

本章ではまず、この研究で注目した擬音語の選定および、SD法で用いる印象評価用形容詞対の選定について述べる。次いで、研究室学生による官能評価、公募で集めた被験者による評価について述べ、その結果および統計処理によって浮かび上がった評価手法の特徴や個人差について議論する。

2.2 評価項目の選定

2.2.1 食感を表す擬音語

本研究では食感の官能評価に「さくさく」、「かりかり」、「ぱりぱり」、「がりがり」の4種類の擬音語を用いることとした。これらの選定に際しては、まず対象とする食品がスナック菓子であることを注目し、その破砕音を模擬した擬音語であることを重視した。日本語の擬音語に関する研究では、破砕音に関する多くの擬音語は、第1音節に閉鎖音、第2音節に「り」を含むことが指摘されている [28][29]。また、閉鎖音の中にも清音、半濁音、濁音の区別がある。そのため、本研究では第1音節に閉鎖音、第2音節に「り」を含む擬音語で、閉鎖音が清音、半濁音、濁音である語を各1語ずつ、早川らによるテクスチャー用語の一覧表より抽出した [24]。この一覧表は、広範な調査対象から収集した食感表現に対して複数の専門家群が妥当性を判定し、その出現頻度および妥当度を数値として示したものである。上記の条件に適合する擬音語を出現頻度の高い順に抽出した結果、「こりこり」、「ぱりぱり」、「がりがり」の3語が得られた。しかし、同じ一覧表を用いた研究において、「こりこり」から連想される食品は鶏軟骨や漬物などであり、スナック菓子との関連は薄いことが示唆された [30]。そのため、本研究では第1音節に清音をもつ破砕音の表現として、「こりこり」に代え、出現頻度でこれに次ぐ「かりかり」を選定した。また、第2音節が「り」にならないものの、スナック菓子を想起させるとされる「さくさく」は上述の表において出現頻度が高かった [24][30]。そこで、本研究では「かりかり」、「ぱりぱり」、「がりがり」に「さくさく」を加えた4語を選定した。

2.2.2 印象を表す形容詞

本章で述べる官能評価では、スナック菓子の食感を擬音語4語によって評価する手法を主体としている。このアプローチはあらかじめスナック菓子と関連の深い単語に絞っているため、スナック菓子の食感を深く議論することができる利点を持つ。しかし、4語という比較的少ない語彙による評価では対象食品の食感を多面的に把握することができないおそれもある。そこで、本研究では Semantic-Differential 法（以下 SD 法）を用いて、各食感の印象の把握を試みた。

SD 法は人間の感覚を数値化する手段の一つで、「かたい⇔やわらかい」のように正反対の意味を持つ形容詞対を用いるものである [31][32]。この手法では、ある程度の横幅を持った紙面の左右両端に、それぞれ正反対の意味を持つ形容詞を記載し、間を線で結ぶ。この線上には等間隔で目盛が設けられ、被験者は自身の得た感覚がどちらの形容詞に近いかという観点から適切な位置の目盛に印をつける。ここでは感覚と形容詞における意味上の距離が紙面での幾何学的な距離に反映されていると考えることができる。

SD 法で用いる形容詞対に関しては、英語による評価では Osgood らが選んだリストを参考にするのが有効であるが、この直訳では日本語の印象を正確に表現できない恐れがある。そこで、本研究では井上らが過去の SD 法の利用事例を網羅的に検討してまとめた 68 対の形

容詞対を参考に、本研究で用いる形容詞対を選定した [33]。選定は以下に示す5段階を踏み、最終的に表 2.1 に示す 27 の形容詞対を用いた。なお、本研究では形容詞対を便宜的に主形容詞と副形容詞に分け、形容詞対が構成する尺度の名称には主形容詞を名詞化したものを用いた。これは、例えば主形容詞を「明るい」、副形容詞を「暗い」とし、これらが構成する尺度の名称を「明るさ」とする、ということである。

Step1. 物理的特性と、それによって惹起される印象を表現するにあたり、まったく関係ないと考えられる形容詞対を除く。例えば、「親切な⇔不親切な」は人間同士のコミュニケーションを想定した場合に生じる心理であり、本実験との関連は薄いと判断した。

Step2. 複数の形容詞対で意味上の重複が見られた場合には使用頻度の低い方を除く。例えば、「たくましい⇔弱々しい」は「強い⇔弱い」と重複する場面が多いとみなして除いた。

Step3. 複数の意味を持つ形容詞対は分析を複雑にするので、個別の意味に対応する複数の形容詞対で置き換える。それができない場合には、複数の意味を持つ形容詞対を残したうえで、個別の意味を持つ形容詞対を用いて意味を切り分けられるようにする。例えば「きれいな」は「美しい」と「清潔な」の二つの意味を持つ。この場合は「きれいな」を除いた。また、「明るい⇔暗い」には物理的な明るさと心理的な明るさの二つの意味が含まれると考えられるが、これを分離するために「明るい⇔暗い」に加えて「陽気な⇔陰気な」を採用した。

Step4. 食感から受ける印象として不自然なものを除く。例えば、「丸い⇔四角い」は菓子の外見と混同してしまう恐れもあり、今回は除いた。

Step5. 従来の食感評価で多く用いられてきた5つの指標を形容詞対として加える。ここで加えた5つの指標とは、「なめらかな⇔ざらついた」、「たべやすい⇔たべにくい」、「しつかりした⇔しなやかな」、「ねばりがある⇔もろい」、「湿り気がある⇔乾いている」である。

Table 2.1 Adjective-pairs for semantic differential method

Main-adjectives	Sub-adjectives
明るい	暗い
やわらかい	かたい
静かな	うるさい
陽気な	陰気な
美しい	醜い
重い	軽い
活発な	不活発な
はげしい	おだやかな
楽しい	苦しい
鋭い	鈍い
気持ちのよい	気持ちのわるい
複雑な	単純な
落ち着いた	落ち着きのない
やさしい	こわい
かわいらしい	にくらしい
清潔な	不潔な
まとまった	バラバラな
元気な	疲れた
親しみやすい	親しみにくい
あつい	つめたい
すばやい	のろい
豊かな	貧しい
なめらかな	ざらついた
たべやすい	たべにくい
しっかりした	しなやかな
ねばりがある	もろい
湿り気がある	乾いている

2.3 官能評価手法の予備的検討

官能評価を実施する際に、評価方法とその結果の分析方法は、計画段階で考慮しておくべき重要な事柄である。このうち、まず評価方法について考えると、今回の官能評価では特定の食感の強さという感覚量を測るものであるため、評価対象の順位づけ、または採点が有効であると考えられる。

一方、評価結果の分析方法については、評価によって得られた数値がどのような尺度として扱えるかが最も基本的な検討項目である。尺度は、データの質の点で名義尺度、順序尺度、間隔尺度、比例尺度の4種類に分けられるが、評価後の分析手法の多様さや解釈のわかりやすさを考えると、間隔尺度または比例尺度が望ましい。しかし、こうした尺度の基準を良く満たしたデータを得ることは一般的には容易ではない。そのため、官能評価の結果に対しては、例えば5点満点のような採点形式の評価を採用したとしても、点数から順位を計算し、順序尺度のデータとして扱う場合がある。ただし、採点形式から得た結果を順位に変換する場合には同点時の扱いが問題となる。この点で、順序尺度として扱うことが予めわかっているならば、採点ではなく、被験者に順位をつけてもらう方が統計的な厳密さを確保することができる。

そこで本研究では、擬音語を用いた官能評価を計画するための予備的検討として、学生を被験者とし、彼らに順位づけによる官能評価を行ってもらった。そして、この結果を基に、より適切な官能評価の実施方法を検討し、次節以降の官能評価を計画した。

今回の順位づけ評価では、被験者に特定の食感を思い浮かべてもらい、その食感の強さに応じて食品を比較し、順位を決めてもらった。また、被験者が思い浮かべる食感を限定するためには、被験者に擬音語を提示して、その擬音語が表す食感を思い浮かべてもらうという方法をとった。被験者は当研究室に所属する23歳の男子学生3名とした。彼らは食感の重要性は認識しているものの、本研究には主体的に関与していない学生である。提示する擬音語については「さくさく」、「ぱりぱり」、「がりがり」の3種類とした。擬音語の選定には、事前に被験者を含む複数の学生に対して行ったアンケートを利用した。このアンケートではスナック菓子の食感から想像される擬音語を自由に挙げてもらい、馴染み深いと思われる擬音語を抽出した。また、対象とするスナック菓子は市販の5種類とした。このスナック菓子を図2.1に示す。このほか、評価の実施にあたり、以下の事柄を徹底した。

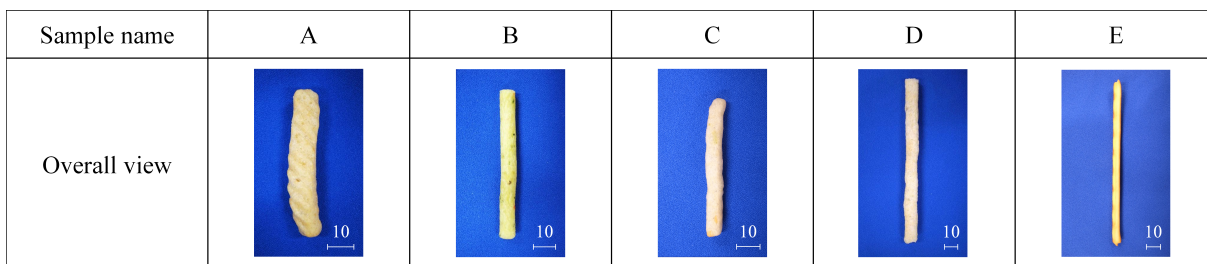


Fig. 2.1 Outside view of snack foods for the sensory test

- 体調不良によって通常時の判断ができなくなることを防ぐため、当日に体調が悪い場合は後日に実施する。
- 直前に摂取した食品の影響を防ぐため、直前の食事から 30 分以上の時間を空けて評価を行う。
- 同様の目的で、評価直前には被験者に洗口してもらう。
- スナック菓子の銘柄が判明して食感に対する先入観が生じることを防ぐため、評価終了まで被験者に銘柄を明かさない。
- 上記の目的および視覚的情報で食感が判断されることを防ぐため、評価中は被験者にアイマスクを着用させる。
- 評価中に被験者が水を欲した場合はそれに応じる。また、1 種類の食感について評価し終えたら水を勧める。

以下に、具体的な官能評価の手順を示す。本評価では、以下の Step 1 から Step 5 までを、3 種類の擬音語それぞれに対して行う。

Step1. 評価の監督者は 5 種類の菓子里に番号を振り、それぞれを適量入れた皿に蓋をして並べる。また、被験者がいつでも飲んだり洗口したりできるように、コップに水を入れ準備する。

Step2. 被験者 1 名は着席した状態でアイマスクを着用する。

Step3. 監督者は菓子里を提示する前に 3 種類の擬音語が表す食感のどれについて評価するかを被験者に伝える。

Step4. 監督者は菓子里の番号を告げてから被験者の手元に皿を置き、菓子里を食べるように促す。被験者は手元に皿があることは手触りで認識できるので、その皿の中の菓子里をつまんで適量食べる。被験者はすべての菓子里を食べ終えたのちも、順位を定めるためにすべての菓子里を自由に選択して食べることができる。その際は菓子里の番号を監督者に告げ、監督者は告げられた番号の菓子里を被験者に提供する。

Step5. 被験者は順位づけが完了したら、監督者に順位と菓子里の番号の対応を告げる。

以上の情報は、被験者の候補となった者に対して評価の 4 日前に文書で示され、了解を得られた者のみを被験者とした。なお、今回は被験者としての参加を依頼された者で参加を拒否した者はいなかったことを付記する。

この官能評価で得られた、3 被験者、3 種類の食感に関する 5 種類の菓子里の順位データに対する基礎的な統計処理の結果を以下に示す。ここではまず、各食感について被験者間の順位の一致性を調べた。この指標は、被験者が菓子里につけた順位を食感ごとにまとめた場合に、

Table 2.2 Kendall's coefficient of concordance for each food texture

Texture	Kendall's coefficient of concordance
Sakusaku	0.378
Paripari	0.667
Garigari	0.689

3名の間での順位づけが一致するかどうかを表す。この分析には Kendall の順位の一貫性係数を用いた。表 2.2 に各食感について算出された Kendall の順位の一貫性係数を示す。

Kendall の順位の一貫性係数は 0 から 1 の範囲で変動し、1 に近づくほど各順位づけがよく一致していることを示す。このことから、さくさく感に比べてぱりぱり感、がりがり感が被験者間で一貫性の高い食感であるとわかる。ただし、最も値の大きながりがり感でも、統計上よく用いられる 5% の有意水準には達さなかった。そのため、この有意水準では今回の被験者 3 名が同じ判断をしていたと言うことはできない。このことは、評価に個人差があったことを示唆している。本研究では、最終的に食感の個人差に踏み込んだ評価ができることを目指しているため、個人差を反映できていることは目指す方向と一致している。

次に、各被験者について、食感の間の順位の一貫性を調べた。用いる分析手法は上と同様に Kendall の順位の一貫性係数である。表 2.3 に各被験者について算出された Kendall の順位の一貫性係数を示す。

Table 2.3 Kendall's coefficient of concordance for each panel

Panel	Kendall's coefficient of concordance
Panel A	0.111
Panel B	0.444
Panel C	0.733

今回の被験者の中では、被験者 C の順位づけにおいて、3 種類の食感に関する順位が最も高い一貫性を示した。この値は有意水準 5% で有意であり、被験者 C の各食感に対する判断には共通点が多かったことを示している。一方、値が最も小さかったのは被験者 A で、一貫性係数の観点から見ればこの被験者はそれぞれの食感に対してばらばらな順位づけをしていたことを意味する。しかし、このことは被験者 A が各食感をそれぞれ別の要因に基づいて判断していたということでもあり、被験者 A は食感をよく区別していたという解釈もできる。

この官能評価では、擬音語が表している食感の強さを順位として数値化した。ここではある程度個人差を考慮することができ、順位尺度に合わせて構築された手法を適用できることが示された。

このほか、予備的検討としての観点からは、順位づけという評価方法、および実施に関する知見が得られた。

まず順位づけという評価方法について考える。この方法の長所は、評価方法がわかりやす

く、被験者が理解しやすいことである。特に順位を1位に限る場合、「一番さくさくしていたお菓子はどれですか」という質問だけで幼児でも理解することができる。被験者を一般の人々、特に幼児や小学生などに広げる場合には有用であると考えられる。

一方で、今回の官能評価においては、食感評価における順位づけという手法が被験者に大きな負担を強いていることがわかった。これは、順位づけのために被験者がすべての菓子の食感を記憶しなければならないことに起因している。評価では同じ菓子を何度も食べることが許されているものの、互いに差の少ない菓子の中で順位づけに苦労している場面が見られた。また、評価中に極端に多くの菓子を食べることは評価の正確さを低下させるおそれがある。この問題は、順位づけに一对比較法を用い、被験者の記憶の負担を減らした場合でも発生するため、評価対象の種類が多くなれば一对比較法も適用しにくい [34]。

また、結果を解釈するための情報が少ないという問題点もある。これは例えば「1位と2位、4位と5位の菓子で食感の強さの差に量的な違いがあるかどうか」といった詳細な情報が得られないことによっている。こうした情報の少なさは、適用できる統計手法の少なさにも影響し、評価結果の多面的な解釈と活用を阻む。この問題を解決するには、統計的な厳密さでは順位づけに劣るものの、食感評価に採点を用い、点数を間隔尺度とみなして分析することが有効であると考えられる。

このほか、実施手順に関して、開眼で官能評価を行うべきであることもわかった。これは、アイマスクを装着していると非常に食べにくいことが被験者から指摘されたためである。また、先行研究では視覚をマスクングすることによって咀嚼の時間が長くなることも報告されている [35]。こうしたことから、アイマスクを装着した状態は自然な摂食や咀嚼を妨げる可能性があり、官能評価において望ましくないと考えられる。なお、菓子を見せなかったのは銘柄による先入観を生じさせないためであったが、実際には手触りと食感だけのおおむね銘柄が判明してしまっていた。こうした事柄を総合すると、アイマスクを外しても銘柄の把握に関して大差は無く、食べやすさの点から開眼の状態で評価を行うべきであると結論付けた。

以上の実施方法の改善は2.4.2節および2.4.3節で述べる成人を被験者とした評価で活かすこととした。

2.4 結言

本章では、官能評価による食感の数値化について論じた。本研究では、擬音語に着目し、順位づけと採点による食感の数値化を試みた。被験者としては、著者と同じ研究室に所属する学生、および公募を通じて集めた外部の小人、成人被験者の協力を得た。この評価の結果、小人被験者による順位づけからは、各被験者の結果にある程度の共通性が見られたこと。また、それにより、彼らの結果と彼らの頭部寸法、咀嚼音などを比較することに意義があると考えられた。研究室所属学生および外部の成人被験者による評価からは、本研究で注目した4種類の擬音語、5種類のスナック菓子について、スナック菓子同士で食感に違いがあるか、擬音語同士で評価結果に違いがあるかが分析できた。その結果、今回の擬音語と菓子の組み合わせでは、ほぼすべての擬音語に関してスナック菓子による違いが見られた。これに対応して、スナック菓子でも半数以上の銘柄において、それぞれのスナック菓子に特徴的な食感があることがわかった。また、擬音語が表す食感同士の関係について調べた結果、さくさく感とがりがり感の間には負の相関が見られること、菓子同士の比較においてこれら二つの食感の差が他の二つに比べて大きいことが明らかとなった。

このほか、一般成人被験者によるSD法を用いた評価では、「やわらかさ」や「なめらかさ」、「しっとり感」といった菓子の変形や摩擦に関わる印象が食感評価で重要になっていることが示された。

第 3 章

スナック菓子の内部構造と食感の関係

3.1 緒言

食感を客観的に評価するためには、官能評価に対応する食物咀嚼時の物理的な特性が必要である。この物理的特性は測定機器や測定条件に依存する量ではなく、食品や人体そのものが持つ特性であることが望ましい。すなわち、食品について言えば、荷重プロファイルのように圧縮速度や圧子の形状に依存する特性よりも、食品内部の幾何学的構造や材料特性の方が望ましい。

このことを踏まえてスナック菓子を見てみると、市販の菓子が様々な内部構造を有していること気付く。また、前章で述べたようにスナック菓子の食感には、構造体としての菓子の破壊が大きくかかわっている。そのため、内部構造は咀嚼時の破壊挙動に強く影響していると考えられる。そこで、本研究ではスナック菓子の内部構造に着目し、そこから構造的特徴を表す特徴量を抽出して、官能評価の結果との関係を調べた。

本研究では、内部構造の観察に X 線 CT を利用し、撮影された菓子の断層画像から画像処理によって特徴量を抽出した。そして、前章で述べた官能評価の結果と比較することで、スナック菓子の食感を内部構造によって説明、評価することを試みた。本章では、まずこの特徴量を提案し、実際のスナック菓子から得られた特徴量について議論する。次いで、菓子の破壊挙動との比較を行う。最後に、擬音語を用いて行った官能評価の結果と特徴量との関係を検討して、提案した特徴量によって食感スコアを説明するための数理モデルについて述べる。

3.2 結言

本章ではまず、食感を評価するための食品の特性として、内部構造に注目し、スナック菓子のX線CT画像から抽出できる特徴量を提案した。この特徴量は棒状のスナック菓子を対象としたもので、太さ、内部での生地平均占有率、太さ方向の占有率のばらつき、表面付近への占有率の偏りの4種類である。次に、本研究で対象としている5種類のスナック菓子からこれらの特徴量を抽出した。その結果に主成分分析を適用したところ、今回用いた菓子では外形が異なっても横断面の面積は似通っていることなど、菓子の内部構造を考察できることがわかった。

また、食感と深い関わりがあると考えられる食品破壊時の荷重プロファイルをスナック菓子への荷重試験によって取得した。それらと内部構造の特徴量を比較した結果、圧縮によって荷重が上昇する挙動と内部構造とが関連していること、および、提案した特徴量が破壊挙動に影響している構造的特徴をある程度抽出できていると考えられた。

そこで、本研究では5種類のスナック菓子、4種類の食感について行われた官能評価の結果と内部構造の特徴量を比較し、内部構造の特徴量によって官能評価結果を推定する数理モデルを構築した。多重共線性を生じずに得られたのはさくさく感とがりがり感に関する数理モデルであった。これらの数理モデルからは、破壊挙動や食感との関係を推察でき、一定の妥当性を有していることが示唆された。しかし、適合度を表す自由度調整済み決定係数は高くなく、提案した特徴量だけでは情報が不足していた。この不足分については、内部の空隙の形状に関する情報のほか、特に生地の材料特性を含んでいないことが影響していると考えられる。そこで、本研究ではスナック菓子の食感評価に用いる食品の物理的特性の一つとして、生地の材料特性にも目を向ける。また、被験者間の個人差についても検討していく。

第 4 章

スナック菓子の材料特性の評価法

4.1 緒言

第 3 章では食品の内部構造に注目し、X 線 CT 画像から特徴量を抽出して、官能評価の結果と比較した。その結果、幾何学的な内部構造だけでは食感を十分に表せず、食品に関する何らかの別の情報を得る必要性が示された。特に、食品の材料特性であるヤング率や破壊強度は荷重履歴に深く関わっており、食感との関連性も高いと考えられる。

食品の変形や破砕に関わる物性を測定する研究は数多く報告されているものの [10][44]～[49]、その大半は咀嚼時に近い状態の食品に荷重を加え、その際の荷重と変形の関係を利用するに留まっている。しかし、一般的に食品は不均質な材料であるため、材料特性はスナック菓子内部の各所で異なっていると考えるべきである。また、各部の材料特性の分布も食物破砕時の挙動に大きな影響を与えていると考えられる。例えば、前章の図??に見られる荷重の細かな変動は食品の局所的な破壊によると推定できるが、こうした微小な変動の傾きや極大値は局所的な材料特性に強く影響されている可能性が高い。これらの荷重変動は全体のプロファイルと比較すれば微小であるが、歯根膜に存在すると言われている機械受容器はこの大きさの変動を十分に知覚できる感度を有していることから、食感の評価においては無視できない挙動である [50]。また、複数回の噛み込みを行うとスナック菓子は粉状に碎かれるが、破砕後の食感も菓子の食感を構成する要素の一つである [51]。破砕後は、第 3 章で述べたような巨視的な内部構造の影響が弱くなるために、相対的に材料特性の影響が強くなる。この点でも、スナック菓子の生地が持つ材料特性は食感に対して重要であると言える。

食品の材料特性に関しては、クッキーのヤング率を測定し、菓子中のデンプンの状態と比較、考察した和田らによる研究がある [44]。しかし、彼らが用いている手法には、圧縮荷重を受けている断面積を見積もるにあたり、大きな誤差を含んでしまうという欠点がある。彼らは、圧縮荷重を受ける面積として圧子の水平面への投影面積を用いているが、その場合には試験片内部の空隙や試験片表面の凹凸などによる断面積の減少を無視していることになるからである。そのため、スナック菓子の巨視的な変形挙動から求めた見かけのヤング率は、実際の材料特性としてのヤング率よりも低く見積もられてしまう。同様に、Keetels らは荷重を受ける面積を試験片形状から求めてパンの材料特性を算出しているが、この手法では数

10 mm オーダという比較的大きな試験片の内部で材料特性が均一であることを前提としている [48].

一方、破壊強度に関しても、例えば Szczesniak らは早くから食品のもろさとの関連を指摘しているが、その議論はあくまで巨視的な荷重と変位の関係についてであり、食品内部の応力に詳細に触れたものではない [10]. 先に述べた荷重プロファイルの微細な変動は、食品の局所的な破壊を示しているが、従来の試験方法では破壊箇所を特定できず、またその箇所周辺の応力状態もわからなかったためである.

このように、先行研究を鑑みると、スナック菓子のような不規則かつ不定形で、個体に対して大きな空隙を有する脆性食品の局所的な材料特性を測定する手法はこれまで開発されてこなかったと言える.

そこで、本研究では食品から取り出した微小な試験片について、その材料自体のもつヤング率、および破壊強度を測定する手法を開発した. 本手法は、試験片の形状情報を X 線 CT から取得し、更に荷重-変形関係を微小荷重の荷重試験から取得したうえで、有限要素解析を用いて両者の情報を統合することによって試験片のヤング率と破壊強度を算出するものである. 予め試験片が食品のどの位置から取り出されたかがわかっているならば、本手法を用いることで食品の当該箇所のヤング率や破壊強度を推定することが可能である.

本章では局所的なヤング率の測定手法および破壊強度の測定手法を提案し、スナック菓子内部のヤング率分布および破壊強度の分布が得られることを示す.

4.2 結言

本章では、スナック菓子の食感に寄与している特性として、スナック菓子の生地が持つヤング率と破壊強度に注目し、その測定について述べた。まず、生地の局所的なヤング率について、本研究で新たに開発した測定手法を示し、市販されている5種類のスナック菓子に対して適用した結果を示した。この測定手法はスナック菓子から取り出した10 mm³程度の小さな試験片に対してX線CT撮影、微小荷重試験、有限要素解析を行ってそのヤング率を求めるものである。この測定手法によって得られた菓子のヤング率は、スナック菓子1個体全体を圧縮して求めた巨視的なヤング率に比べて顕著に大きな値であった。これは、スナック菓子の疎な内部構造が巨視的なヤング率に影響していることを示すとともに、本手法で得られる生地のヤング率が従来の測定手法では得られなかった値であることを示している。また、局所的な値が測定できることを利用して、スナック菓子の個体内におけるヤング率分布も求めた。

次に、スナック菓子の生地の局所的な破壊強度についても本研究で開発した測定手法を述べ、市販の菓子を測定した結果を示した。また、破壊強度においてもスナック菓子の個体内での分布を求めた。

これらの提案手法では有限要素解析の役割が重要である。現在はこの解析に線形解析を用いているため、試験片の荷重-変形関係を線形とみなせることが適用条件となっている。今回対象としたスナック菓子では線形解析で大きな問題は生じなかったが、今後は非線形解析の導入も検討する予定である。また、本章では、試験片形状を適切に制御できれば、有限要素解析の回数を減らせる可能性も示した。これについても今後の課題として検討していく。

第 5 章

人体頭部の振動特性の食感への影響

5.1 緒言

第 4 章では食品の材料特性としてスナック菓子の生地が持つヤング率と破壊強度を挙げ、これらを微細な内部構造を考慮して測定する手法について論じた。これは第 1 章で述べた本研究の課題 3 に相当する。本章では、課題 4 の人体頭部の特性と食感の関連性について考察する。食品を咀嚼する際の音は、食品の構造や材料の特性と並んで、固形食品の食感に寄与する重要な要素の一つである。これは、スナック菓子の食感が「さくさく」、「がりがり」などの擬音語で表現されていることから窺える。また、スナック菓子に限らず、漬物やてんぷら、生のレタスなど破碎時に特徴的な音がする食品の食感を評価するためには、咀嚼音の分析が不可欠である。

一方、咀嚼音の発生と伝播に注目すると、この音は口腔での食品の破碎によって発生し、空気と頭蓋骨の二つの伝播経路を通して知覚される音であると言える。空気を伝播する音は気導音、頭蓋骨を伝播する音は骨導音と呼ばれており、どちらも食感に寄与していることが、これまでの研究でも指摘されている [16][18][19][21]。しかし、従来の研究では、咀嚼音の発生や伝播について、人体の持つ物理的な特性を含めた検討がほとんど見られない。特に音の伝播現象は口腔周辺の共鳴特性や、頭蓋骨の振動特性といった人体頭部の持つ物理的特性の影響を受けている。そのため、個人によって頭部の振動特性が違えば、同じ食品を食べていても、聞こえている音は異なってくると考えられる。特に、小人と成人では食感の好みも異なる場合がしばしばあるが、これは頭部寸法の違いによる頭蓋骨の振動特性の違いと関連している可能性がある。こうした事象を十分に解明できれば、年齢や体格などの個人の物理的特性を考慮した食感評価が可能になり、将来的には特定の消費者にターゲットを絞って食感をデザインするといった展開につながると期待される。

そこで本章では、頭部寸法とそれに伴う口腔や頭蓋骨のスケールが咀嚼音に及ぼす影響を実験計測および有限要素解析を行って議論する。

5.2 有限要素解析を用いた頭蓋骨の振動特性の推定

5.2.1 有限要素モデル

頭蓋骨の振動特性が咀嚼音に与える影響を調べるため、2種類の有限要素モデルを作成した。本研究ではこれらのモデルにモーダル解析を実施し、固有振動数と固有モードを調べた。

本研究では、頭部の固有振動数を調べるための基礎的な有限要素モデルとして、図5.1のモデルを作成した。このモデルは頭蓋骨の脳頭蓋部分を半球殻で近似したもので、底部の平板には大後頭孔を模した穴を設けてある。モデルの大きさについては、頭部寸法と固有振動数の関係を調べるために大小2種類を用意した。各部の寸法は幾何学的に相似となっている。表5.1に各寸法を示す。また、物性値は文献[57]をもとに、表5.2のように設定した。要素は四面体二次要素とした。

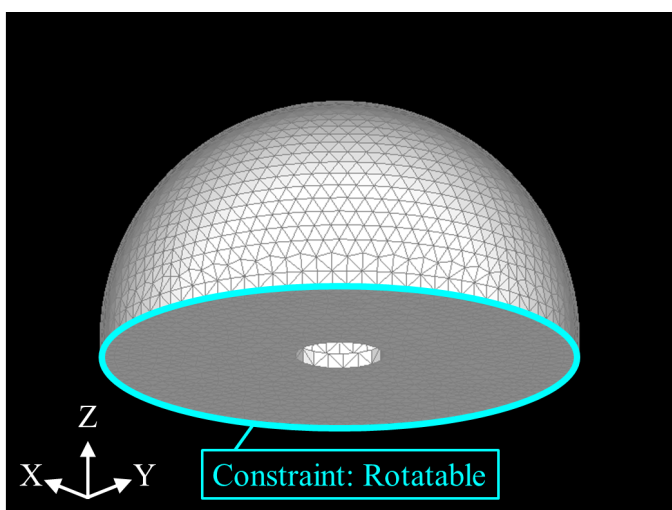


Fig. 5.1 Half-spherical shell model

Table 5.1 Size of the half-spherical shell models

Model size	R (mm)	t (mm)	d (mm)
Small	70	4.375	26.25
Large	80	5	30

Table 5.2 Material properties of skull models

Young's modulus (MPa)	8.75×10^3
Poisson's ratio	0.25
Density (kg/m^3)	1.479×10^3

もう一つの有限要素モデルは、人体の頭蓋骨をもとに作成した図 5.2 である。このモデルは、固有振動数および固有モードを調べるために作成した。頭部寸法の違いによる影響についても調べるため、モデルの寸法は幾何学的相似のもとに大小 2 種類を作成している。ここでは、小さい方のモデルは頭幅 W を 140 mm、大きい方のモデルは W を 160 mm とした。また、頭蓋骨モデル全体に与える物性値には表 5.2 の値を用いた。要素は四面体二次要素とした。

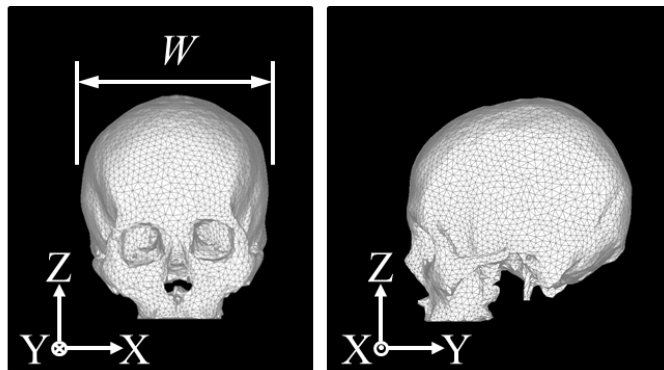


Fig. 5.2 Skull-shaped model

5.2.2 解析結果

表 5.3 に、半球殻モデルの固有振動数を示す。このうち、1 次の振動モードは実質的に半球殻の底面のみが面外方向に振動するものであるため、実際の頭部では考えにくい。そのため、実質的に頭部の振動を近似したものとして議論できるのは 2 次以上の固有振動数である。この半球殻モデルからは、現実的な頭蓋の固有振動数は 1500 Hz 以上であると推測される。

Table 5.3 Natural frequencies of half-spherical shell models

Mode number	1	2	3	4
Small model	1040	2010	3190	3250
Large model	910	1760	2790	2840

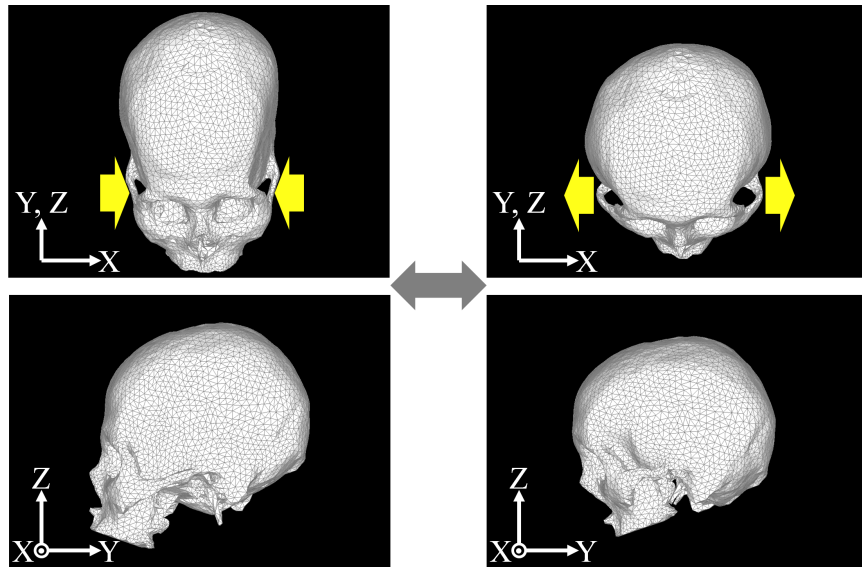
次に、頭蓋骨の形状に忠実なモデルの固有振動数を表 5.4 に示すとともに、1 次、2 次の振動モードを図 5.3 に示す。固有振動数をみると、頭幅を 160 mm とした大きな頭部のモデルにおいて 1 次モードが 1870 Hz となっている。この値は、他の研究において乾燥頭蓋骨から実験的に求められた値とおおよそ一致している [58][59]。実際の頭部においては、軟組織が加わるために固有振動数はより低くなり、減衰も大きくなると推測される。

モード形状を見ると、まず 1 次モードでは、頭蓋骨全体が前後につぶれるような変形を呈し、その影響で頬骨弓が左右に張り出している。骨体表面の変位をみると、この頬骨弓の左

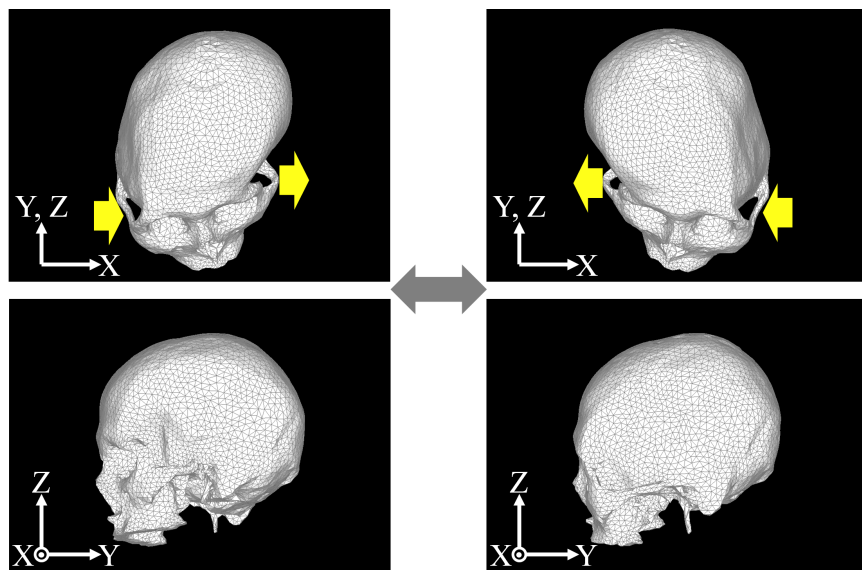
右方向の変位が最も大きい。また、2次モードにおいては額や眼窩の周辺を中心にして頭蓋骨が左右に曲がるような変形を呈している。頬骨弓はこの振動モードにおいても大きく変形し、振動によって左右に交互に張り出す運動を示している。

Table 5.4 Natural frequencies of skull-shaped models

Mode number	1	2	3
Small skull model	2140	2780	3190
Large skull model	1870	2430	2790



(a) First mode



(b) Second mode

Fig. 5.3 Vibration mode shapes of skull-shaped model

5.3 咀嚼音の計測システム

5.3.1 咀嚼音の計測

頭蓋骨の振動特性が咀嚼音にどのように影響しているかを知るためには、実際の咀嚼音を計測する必要がある。特に食感には骨導音と気導音の両方が影響するため、それらを同時に計測することが重要である。また、計測時には食品を咀嚼している必要があるため、計測機器には咀嚼運動を妨げないこと、咀嚼運動によるノイズを受けにくいことが求められる。

そこで、本研究では図5.4に示す咀嚼音計測用のヘッドセットを製作した。これを用いた計測の様子を図5.5に示す。ヘッドセットはヘッドホン型の機器とニット帽から成り、それぞれ骨導音と気導音を計測する。骨導音の計測はヘッドホン型の機器で被験者の頬骨付近を左右から挟んで行う。この部分は、図5.6に示すように加速度ピックアップ（NP-3412、小野測器）がアルミニウム合金板とポリエチレン製の薄いテープを挟んで頬骨上の皮膚に接触している。この部分の頬骨は頬骨弓と呼ばれる薄く細い部分になっており、皮膚から頬骨弓までの距離が短い。このため、減衰の小さな骨導音を計測できる。また、頬骨弓と皮膚の間には大きな咀嚼筋がないため、咀嚼運動に由来するノイズを受けにくく、ヘッドセットを押し当てても咀嚼運動が阻害されにくいといった利点もある。なお、ポリエチレンテープは被験者の皮膚にアルミニウム合金板が直接接触れるのを防ぐとともに、被験者ごとに貼りなおすことで衛生面に配慮した。

一方、気導音の計測はニット帽側に取り付けられた一対の計測用マイクロホン（MI-1235）によって行われる。マイクロホンはニット帽に対して柔軟なゴムひもで固定され、被験者の骨導音が振動としてマイクロホンに混入することを防いでいる。また、小人と成人の両方を計測対象とするため、ニット帽は大小2種類を用意した。計測では、上記の機器から得られた左右の骨導音と気導音、計4チャンネルを51.2 kHzのサンプリングレートで記録した。

5.3.2 頭部寸法の計測

本研究では、咀嚼音計測時に被験者の頭部寸法も計測した。計測したパラメータは図5.7に示す頭長、頭幅、頭囲の3種類である。計測方法は、頭長、頭幅については計測担当者が被験者の頭部に定規をあて、目盛を読むことで行った。また、頭囲は被験者の頭部に柔軟なメジャーを巻きつけ、最大の周長を頭囲とした。これらの寸法は、頭長や頭幅を有限要素モデルを作成するうえでの指標としたほか、頭囲を5.5節、6章で述べる考察に用いた。

なお、値の再現性は、被験者の姿勢や髪の色が様々であったことを考慮すると、頭部の全周に接触させて測った頭囲の数値が最も高いと考えられる。

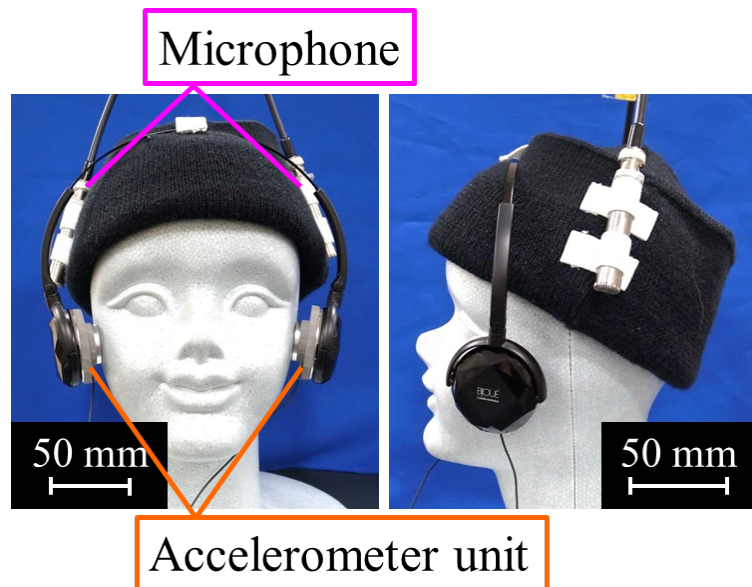


Fig. 5.4 Original headset for measurement of chewing sound

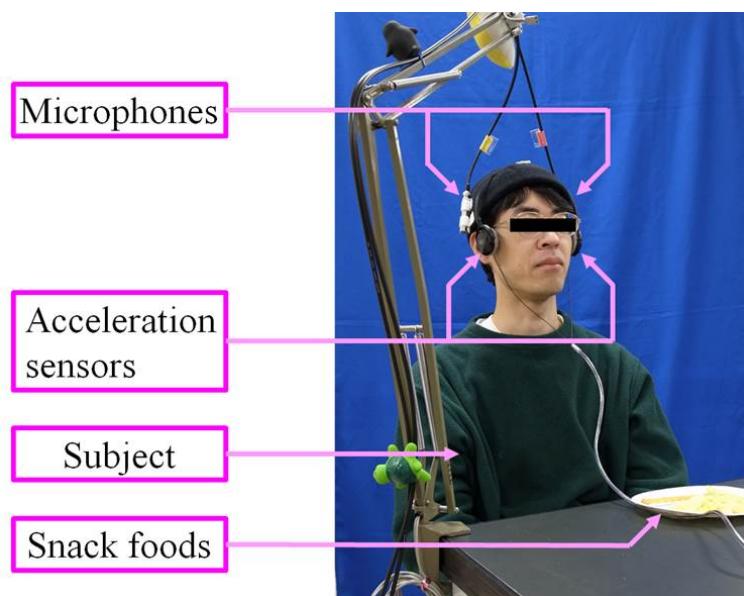


Fig. 5.5 Overview of measurement of chewing sound

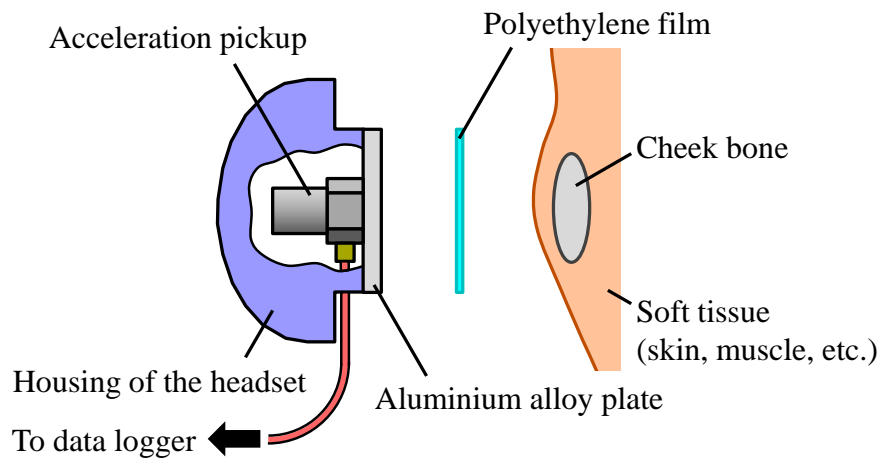


Fig. 5.6 Sectional view of headphone-like instrument measuring bone conduction sound

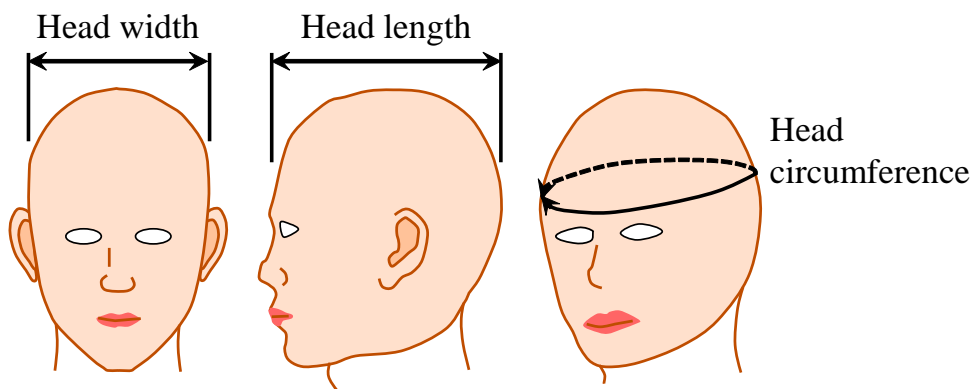


Fig. 5.7 Measured parameters of human head

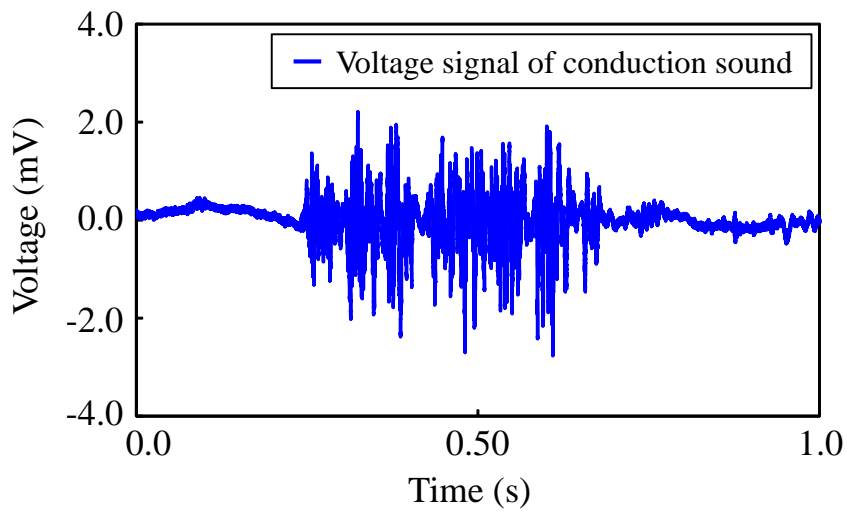
5.4 計測結果

公募を通して協力の得られた小人5名、成人5名の一般被験者に3名を加えた13名の被験者から頭部寸法と咀嚼音を計測した。このうち、一般被験者10名については同時に第2章で述べた官能評価も行った。これらの被験者のデータから頭部寸法と咀嚼音の関係を調べるにあたり、本研究ではまず、上記の13名の被験者から、特に頭の大きさが異なっていた2名を代表被験者として抽出した。抽出した代表被験者は、頭囲が580 mmと大きかった成人と頭囲が500 mmと小さかった小人である。本論文では、この代表被験者をそれぞれS1, S2と呼称する。

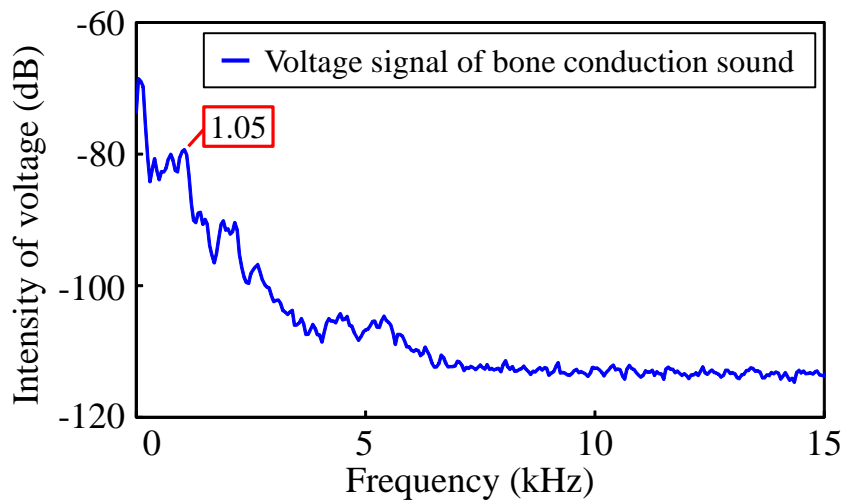
図5.8に、代表被験者S1が菓子Aを咀嚼したときの、左側の骨導音の波形とそのパワースペクトル、および1/3オクターブ解析の結果を示す。図5.8(a)に示す時系列の波形は、菓子Aを口に入れてから嚥下するまでの全波形から、口に入れた直後の最初の噛み込みを抜き出したものである。次に、図5.8(b)はこの波形を短時間FFTによって周波数分析したものである。短時間FFTにおける1区間のサンプル数は1024、区間同士のオーバーラップは512、窓関数はHann窓とした。最後に、図5.8(c)は骨導音の波形を1/3オクターブ解析によって分析したものである。このオクターブバンドは1区間のサンプル数を8192、区間同士のオーバーラップを4096、窓関数をHann窓とした短時間FFTの結果をもとに描かれている。

次に、図5.9に、代表被験者S1が菓子Aを咀嚼したときの、左側の気導音の波形とそのパワースペクトル、および1/3オクターブ解析の結果を示す。短時間FFTを用いたパワースペクトルの算出、および1/3オクターブ解析には骨導音の場合と同じ方法を用いた。

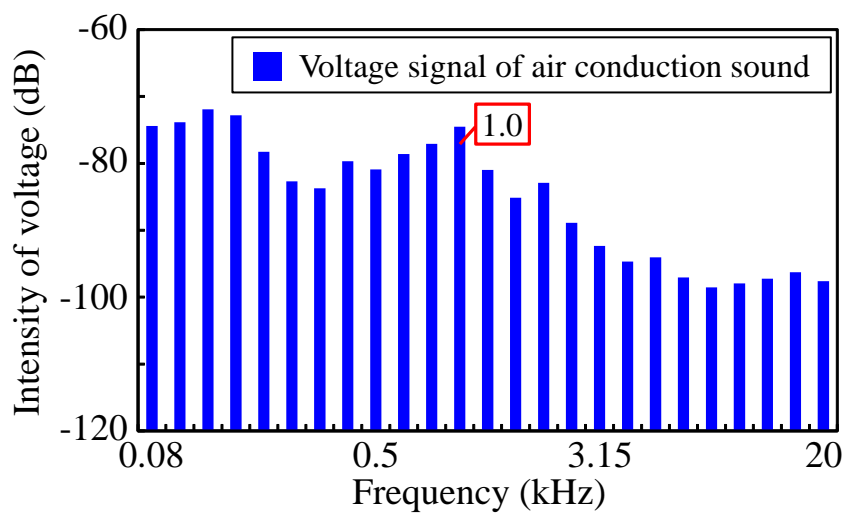
同様に、図5.10、図5.11には代表被験者S2が菓子Aを咀嚼した時の咀嚼音とパワースペクトル、1/3オクターブ解析の結果を示す。なお、気導音は事前にマイクロホンの較正を行うことで電圧信号を音圧に変換してあるが、骨導音は加速度ピックアップが出力した電圧信号を直接用いて波形を描いている。



(a) Measured signal

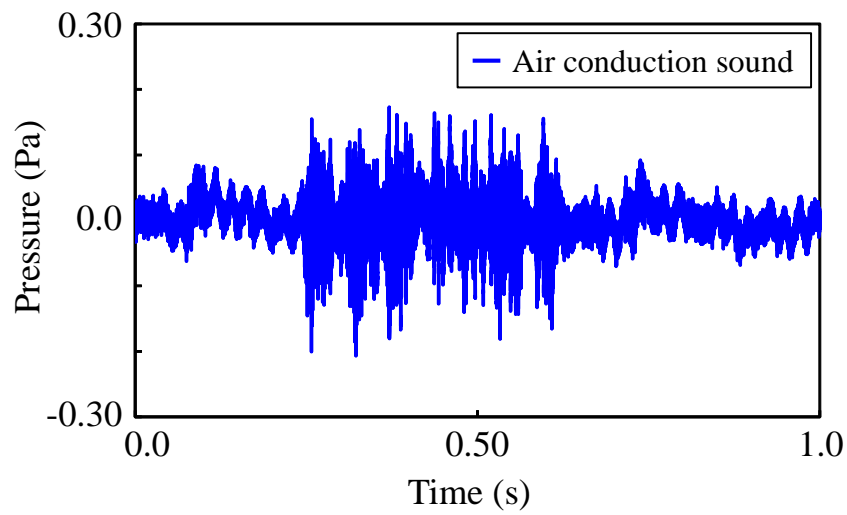


(b) Result of frequency analysis with short time FFT

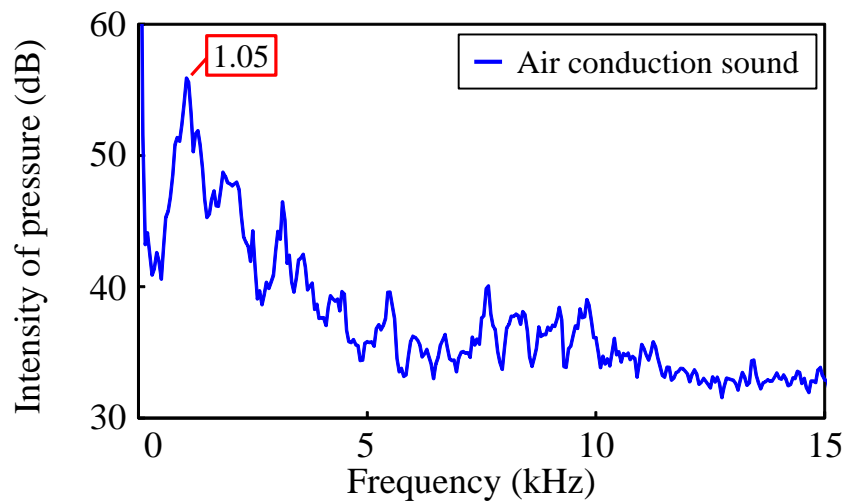


(c) Result of 1/3 octave band analysis

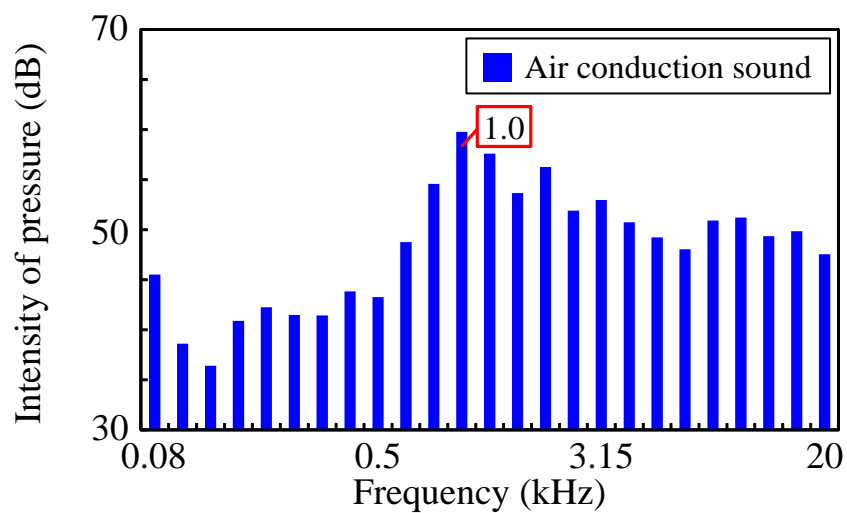
Fig. 5.8 Bone conduction sound and its spectrum of subject S1



(a) Measured signal

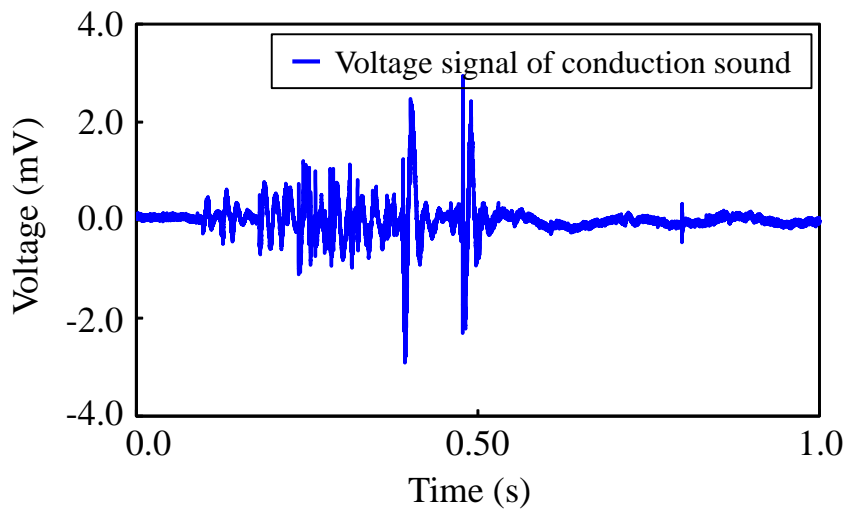


(b) Result of frequency analysis with short time FFT

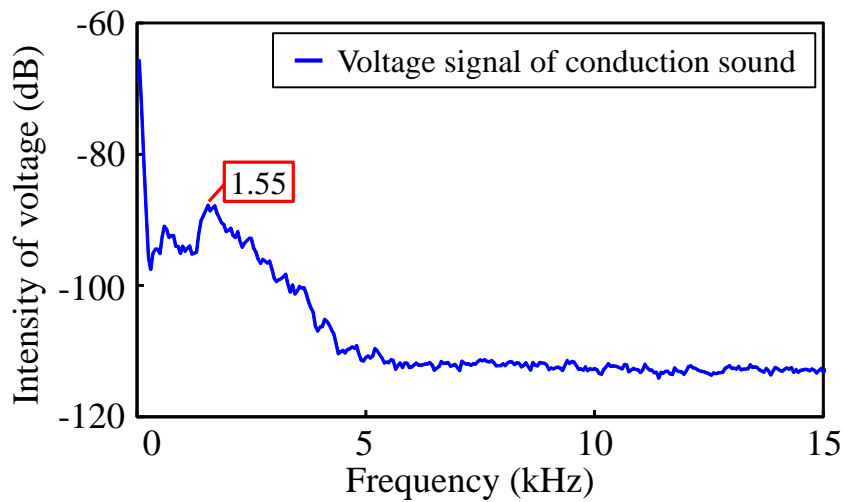


(c) Result of 1/3 octave band analysis

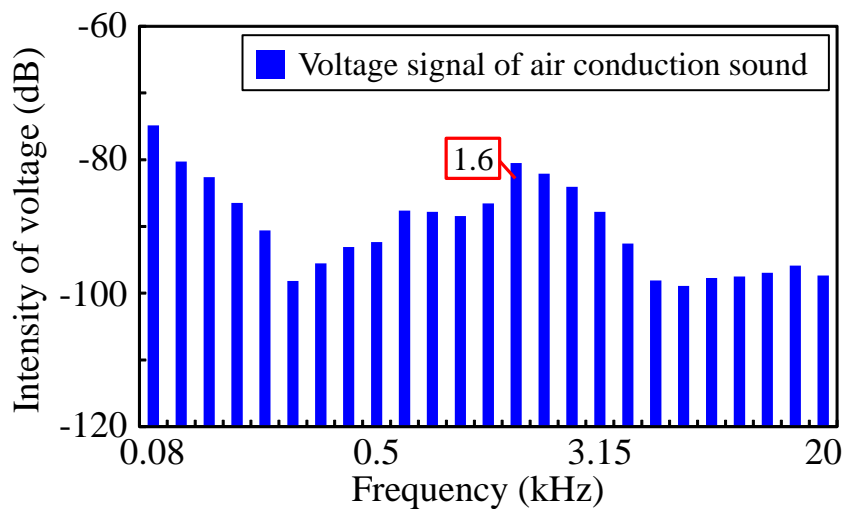
Fig. 5.9 Air conduction sound and its spectrum of subject S1



(a) Measured signal

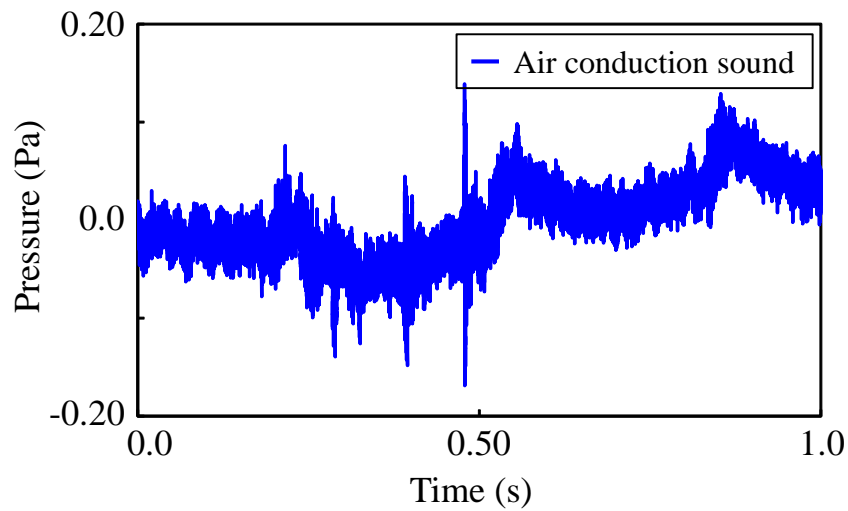


(b) Result of frequency analysis with short time FFT

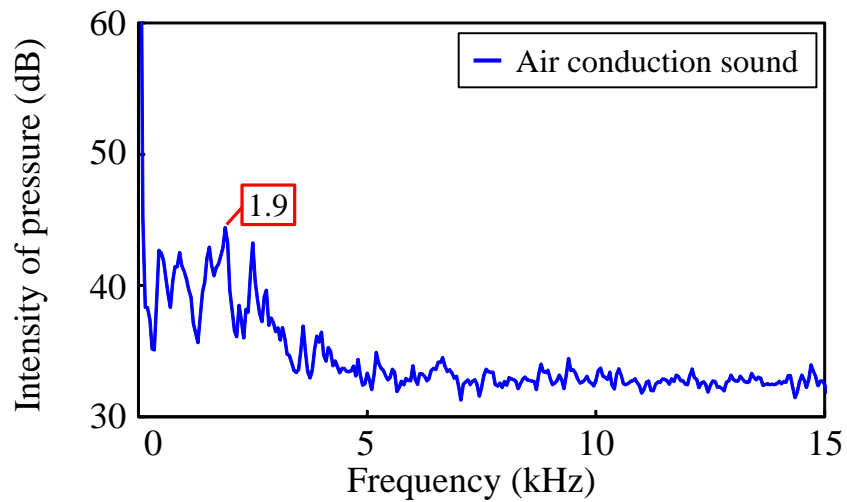


(c) Result of 1/3 octave band analysis

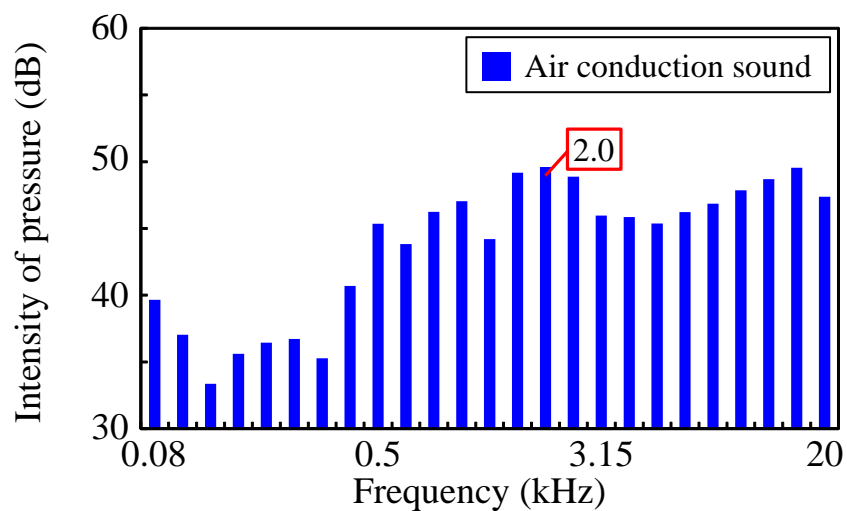
Fig. 5.10 Bone conduction sound and its spectrum of subject S2



(a) Measured signal



(b) Result of frequency analysis with short time FFT



(c) Result of 1/3 octave band analysis

Fig. 5.11 Air conduction sound and its spectrum of subject S2

5.5 考察

5.5.1 代表被験者の特性

まず、5.4節で示した時系列の波形からは、代表被験者 S1 と S2 の間で波形そのものが大きく異なることが見てとれる。また気導音と骨導音を比較した場合、今回の計測システムにおいては、骨導音の方が SN 比が高くなっていたこともわかる。

次に、これらの波形を周波数分析した結果に注目する。これらの結果では、骨導音、気導音ともに 1000~2000 Hz の領域にいくつかのピークを観察することができた。これらのピーク周波数を図 5.8(b), 5.9(b), 5.10(b), 5.11(b) に示した。骨導音においては、成人被験者である S1 で 1050 Hz, 小人被験者である S2 で 1550 Hz という値であった。また、気導音においては S1 で 1050 Hz, S2 で 1900 Hz という値であった。これらのピークは 1/3 オクターブ解析の結果にも現れており、S1 では骨導音、気導音ともに 1000 Hz に、S2 では骨導音で 1600 Hz, 気導音で 2000 Hz に見られた。これらの結果からは、周波数軸上における骨導音のピークが、頭の大きい被験者ほど低くなることが推察される。

また、ピークをとる周波数は 1000~2000 Hz の間にあり、おおまかには頭蓋骨の固有振動数と同様の範囲をとっている。すなわち、骨導音については頭蓋骨の固有振動との間に何らかの関連があることが示唆されたと言える。一方で、気導音もピークの周波数はほぼ同様の範囲に存在した。これについても頭蓋骨の固有振動が影響を与えていた可能性はあるものの、頭蓋骨-皮膚-空気の間には音響インピーダンスに大きなギャップがあり、頭蓋骨の振動が気導音のピークを支配する要因であるとは考えにくい。これに関して、本研究では気導音の周波数分布に口腔でのヘルムホルツ共鳴が関わっている可能性を挙げる。ヘルムホルツ共鳴は、図 5.12 のように広い空間と狭い開口部、および開口部と空間をつなぐ管路が存在するときに見られる共鳴現象である。口腔におけるヘルムホルツ共鳴も音声学の分野で古くから知られ、発声時の調音に関わっているとの報告がある [60][61]。今回注目している一回目の噛み込みのときには、図 5.13 のように口がわずかに開き、口腔内にはある程度の広さの空間が存在していた。このような環境で音が発生すれば、ヘルムホルツ共鳴が発生する可能性があると言える。そこで、生じうる共鳴周波数が上記のピーク周波数と近いかどうかを知るため、図 5.13 に示したパラメータを用いて試算を行った。共鳴周波数を求める式は式 (5.1) である。各パラメータについては、開口部断面積 S を $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 口腔内容積 V を $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, 絞り部長さ L を $2 \times 10^{-2} \text{ m}$ とした。

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (5.1)$$

この計算では、共鳴周波数が約 1 kHz となるという結果が得られた。この数値は概算ではあるものの、計測された気導音のピークと同じオーダを持っている。式 (5.1) からは、口腔が大きいと共鳴周波数が低下することもわかるため、頭の大きさと口腔の大きさに正の相関があると仮定すれば、頭が大きいほど低い周波数成分が共鳴するという関係が成り立つ。よって、周波数軸上における気導音のピークも、頭が大きくなるほど低周波数側にシフトする可能性が高い。

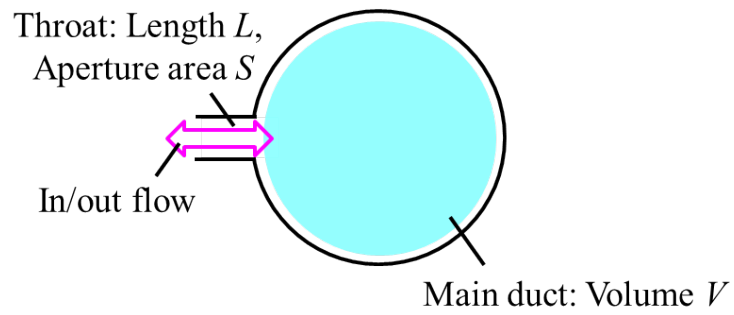


Fig. 5.12 Schematic of helmholtz resonance

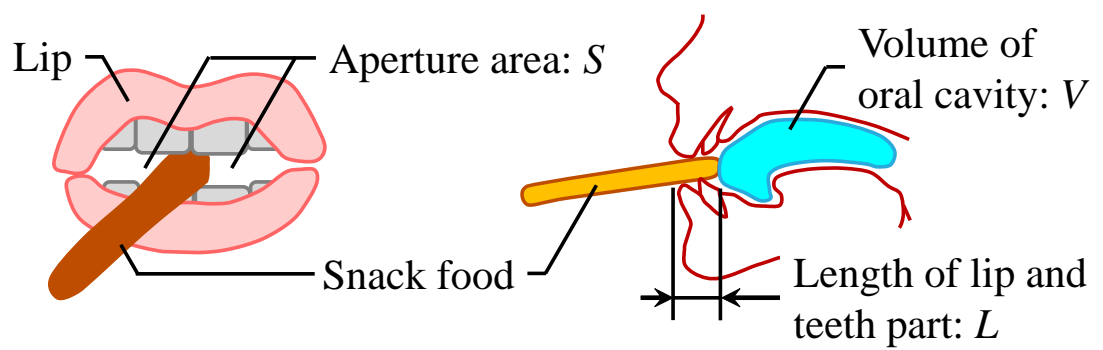


Fig. 5.13 Schematic of helmholtz resonance in oral cavity

このほか、本研究では図5.14に示す実験システムを用いて、口腔で共鳴が生じる周波数の範囲を実験的に調べた。この実験では、小型のスピーカを被験者の口腔の近くに設置して単一周波数の正弦波を再生し、被験者はその再生音が共鳴するように口腔の形を調節する。共鳴していれば、録音された音は当該周波数が強調されたものとなる。図5.15に、500 Hzで共鳴させた場合の周波数成分を示す。共鳴の前後で500 Hzの成分が変化していることがわかる。本研究では1名の被験者に対してこの実験を行い、400~4000 Hzでの共鳴を確認した。この結果は気導音でピークをとった1000~2000 Hzを含むものであり、咀嚼中の口腔形状に応じた共鳴がこれらの周波数成分を強調していたことを示唆している。

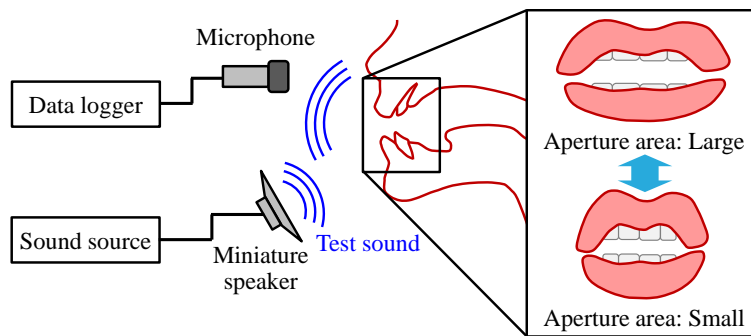


Fig. 5.14 Schematic of experimental system for recording helmholtz resonance in oral cavity

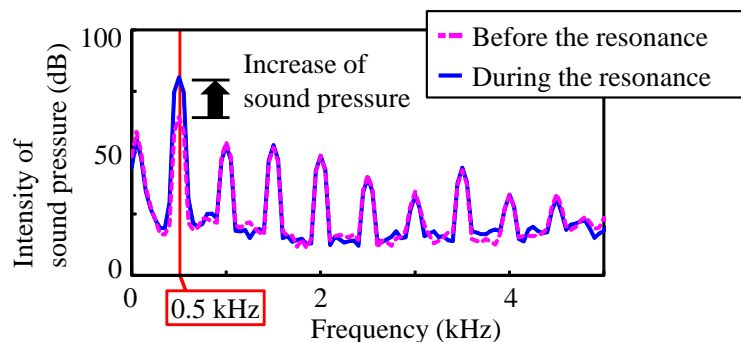


Fig. 5.15 Result of resonance in oral cavity at 0.5 kHz

5.5.2 一般小人および成人被験者全体の特性

本章では、これまで13名の被験者の中から特に頭部寸法の異なる2名の被験者を抽出し、その咀嚼音と頭部の物理的特性について議論してきた。本節ではこの議論をもとに、より多くの被験者の咀嚼音を分析して、頭部寸法と咀嚼音との関係の解明を試みる。

本節では上記の13名の被験者のうち、公募を通して集めた10名の被験者の咀嚼音を用いる。この10名の内訳は、小人5名、成人5名である。また、すべての被験者において咀嚼音の計測と同時に2章で述べた官能評価が行われた。

この10名のデータに対する分析は、図5.16に示す流れで行った。以下に、その内容を順を追って示す。

Step1. 噛み込み1回分の波形の抽出: 複数回の噛み込みが録音された咀嚼音波形から、各菓子のはじめの1回分の噛み込みに対応する波形を自動で抽出する。咀嚼音は骨導音と気導音が同期して録音されているが、このうちS/N比の比較的良い骨導音を基準にして波形を抽出する。初めに、骨導音を示す電圧の絶対値に閾値を設ける。本論文では、この閾値を経験的に1 mVとしている。そして、閾値未満の電圧が連続して0.2秒以上続く区間を無音部と定義し、波形中の無音部以外の区間を噛み込みとする。ただし、噛み込みと定義した区間のすぐ外側には、1 mVの閾値より絶対値の小さな信号が存在する可能性が高い。そこで、先に噛み込みと定義した区間を前後に0.1秒ずつ広げる。この結果得られる複数の噛み込みのうち、最初に現れるものが1回目の噛み込みの波形である。また、気導音は骨導音と同じ時刻を抜き出せば良い。この手順で波形を抜き出す様子を図5.17に示す。

Step2. 1/3オクターブ解析: 抽出した音に対して1/3オクターブ解析を行う。この分析では、周波数分布のピークを検出するための元データとして、図5.8(b)のような短時間FFTの結果ではなく、図5.8(c)のような1/3オクターブ解析の結果を用いた。これは、スペクトルではピークの近傍も同様に強度が大きいいため、オクターブ解析によってそれらの強度がまとめられ、より明確にピークが定まる傾向があるためである。また、オクターブ解析は、周波数に関するヒトの知覚特性が等比的であることを反映している。この特性は周波数成分と人間の感覚との関連を考察するのに有効であるため、オクターブ解析は騒音の分析でよく利用されている。咀嚼音の分析も周波数成分と感覚との関連が重要であることから、オクターブ解析は有効であると考えられる。

Step3. ピーク周波数の検出: 1/3オクターブ解析の結果からピーク周波数を検出する。ピークを探す範囲は代表被験者2名の結果を参考に、下限を800 Hz、上限を2500 Hzとした。なお、ここで示す周波数は1/3オクターブ解析で得られた1/3オクターブバンドの代表周波数である。すなわち、ピークを探す範囲は800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2000 Hz, 2500 Hzの各1/3オクターブバンドとなっている。

Step4. ピーク周波数と頭囲の相関係数の算出: ピーク周波数と頭囲の関係を相関係数として求める。本研究では、上記の分析で得られたピークをとる周波数の値と、被験者の頭の大きさを比較し、スナック菓子ごとに両者の相関を求めた。被験者の頭の大きさを表す指標には、もっとも計測の再現性が高いと思われる頭囲を用いた。図5.18, 5.19にその結果を示す。これらのグラフは横軸に被験者の頭囲、縦軸にピークをとる周波数を配したものである。また、グラフ中には最小二乗法によって線形近似を行った際の近似曲線を示し、視覚的に相関関係を把握できるようにした。

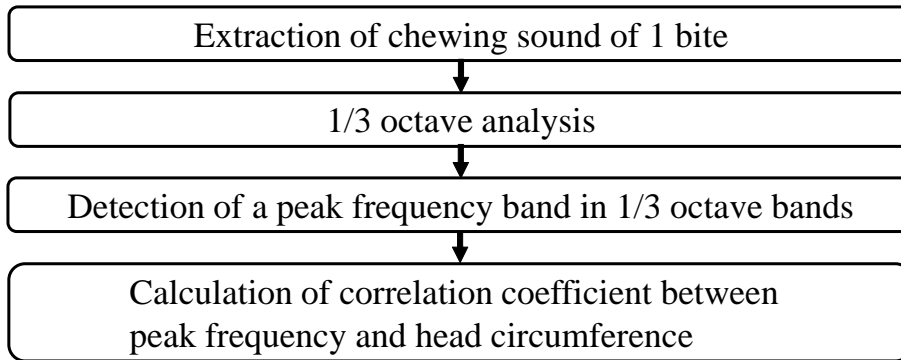


Fig. 5.16 Flow chart of analytical process of chewing sound

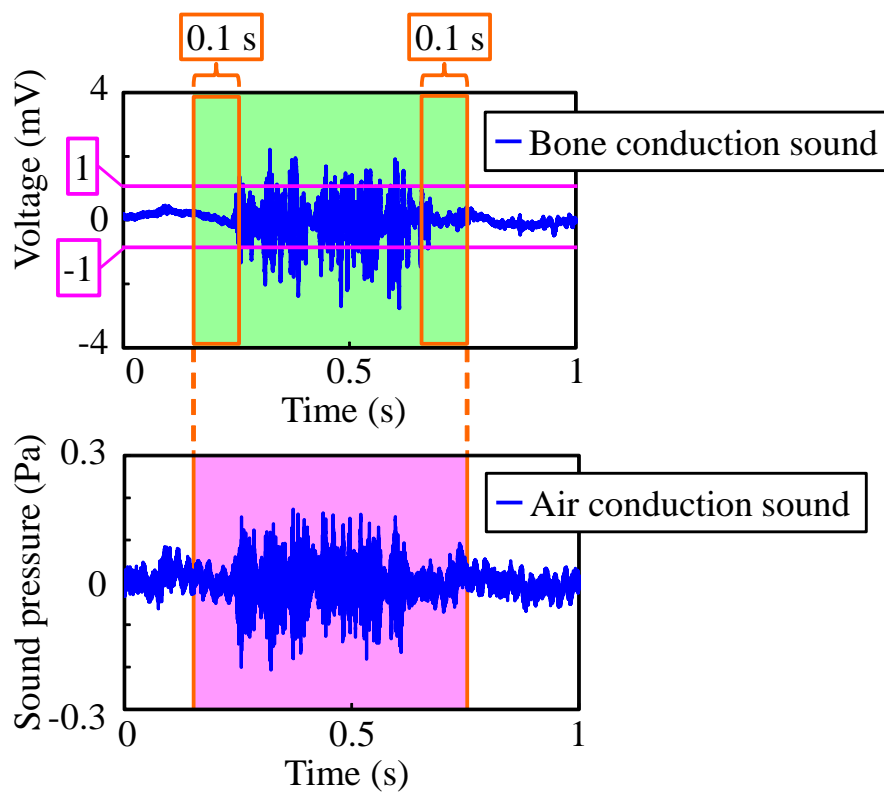


Fig. 5.17 Extraction of chewing sound of 1 bite

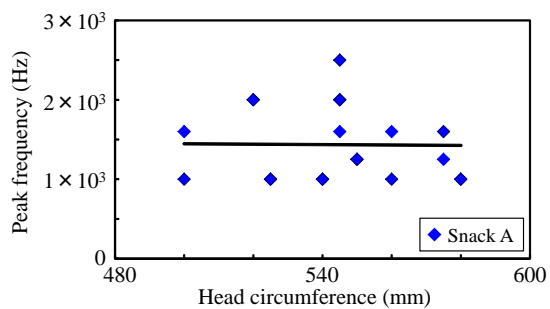
その結果、骨導音では5種類の菓子のうち4種類で負の相関関係が見られた。また、気導音では5種類の菓子のうち2種類で負の相関関係が見られた。これらの負の相関関係は、頭が大きいほど低い周波数にピークが生じていたことを意味する。今回の分析の場合、特に骨導音で負の相関が見られることが多かった。この結果は5.2.2節で述べた頭蓋骨の大きさと固有振動数の関係と同様の傾向を示し、ヒトの頭の大きさが咀嚼音に影響を与えていることを示唆している。また、頭部寸法と咀嚼音の間に関連があることは、頭部寸法が食感に対しても影響を与えている可能性が高いことを意味している。例えば Seymour らは、Crunch twist

と呼ばれる固形食品の crispness が、圧縮破壊時の音に含まれる 0.5~1.9 kHz の周波数成分に対して正の相関を有していたことを報告している [17]. crispness は日本語におけるさくさく感やかりかり感に近いと考えられることから、菓子の咀嚼音においても同様の周波数帯が存在する可能性がある。このように特定の食感を催す周波数帯が存在する場合、ピーク周波数の移動によってその周波数帯の強度が変化し、結果として食感に影響が現れることになる。本研究で得られた 1000~2000 Hz のピークが食感とどのような関わりを持っているかは今後調べていく必要があるが、小人と成人との間の嗜好の差を説明する材料として、頭部寸法と咀嚼音の関係は重要であると考えられる。

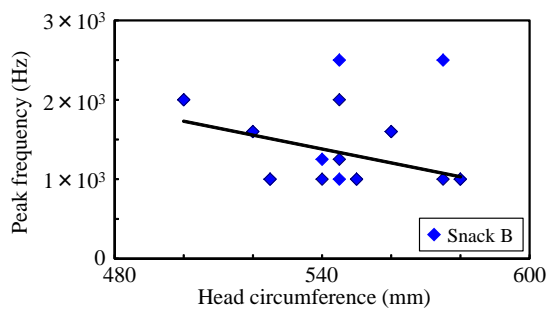
一方、気導音に関しては、負の相関が支配的であるとは言えない結果になった。このように傾向が菓子ごとのにばらついた原因には、気導音が被験者の咀嚼運動の影響を強く受けるものであったことが挙げられる。これは、5.5.1 節で述べた口腔の共鳴周波数が口腔の形によって決まるためである。すなわち、咀嚼運動が被験者間で異なることによって口腔の形が被験者ごとに様々に変わり、結果として咀嚼音の特徴がばらついたと考えられる。実際に、今回は自由な咀嚼で食べて良いという条件であったので被験者間では食べ方に違いがあった。例えば、ほぼ一定の速度で食品を噛み潰す場合や、歯を突き立ててからわずかに時間をおいた後に折り取るように破碎する場合などである。これらは咀嚼力の観点から考えると、個人の癖だけでなく咀嚼筋力の大きさや咀嚼の巧みさの違いからも影響を受けているように思われる。一定速度で噛み潰すためには、かたい食品の脆性的な破壊に咀嚼速度が影響を受けないだけの筋力が必要であるが、筋力の比較的弱い小人や女性は、こうした咀嚼運動を苦手としていた可能性が高い。こうしたことから、被験者によって咀嚼中の口腔の形が異なり、気導音の特性が定まらなかったと考えられる。

この問題を解決するためには、被験者をより細分化して分析することが必要であると考えられる。これは、事前に咀嚼力や咀嚼の巧みさを測定することによって被験者を分類したり、咀嚼音計測と合わせて口腔周辺の軟組織の形状を計測し、咀嚼運動で被験者を分類するといった試みである。咀嚼時の気導音に口腔の共鳴現象が関連している可能性があることを念頭に置いたこれらのアプローチによって、頭部寸法と気導音の関係をより正確に把握できることが期待される。また、咀嚼運動を分析する取り組みは、骨導音のピーク周波数と頭囲の関係にも影響を及ぼすと考えられる。現段階では、これらの相関関係は負であるものの、その相関の強さは強いとは言い難い。今後、咀嚼運動や被験者の咀嚼能力を考慮することで、よりはっきりとした相関関係が観察できることが期待される。

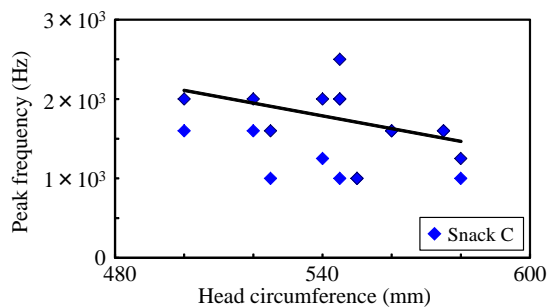
このほか、頭部の振動特性と咀嚼音の関係をより深く把握するためには、有限要素解析を高度化することも重要である。本研究では頭蓋骨を模した有限要素モデルの固有振動数の解析を行ったが、この有限要素モデルに対して動的な荷重や加速度を加えた場合の応答を調べれば、頭囲と骨導音の関係を計算機上で示すことも可能になると考えられる。この解析は、頭囲が大きいほど咀嚼音のピーク周波数が低くなるメカニズムを示すものとして重要である。また、頭蓋骨モデルに軟組織を加え、食感を評価するための、より発展的な頭部有限要素モデルを作成、解析することも今後の課題とする。



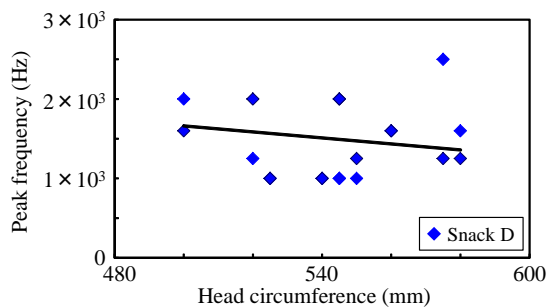
(a) Snack A



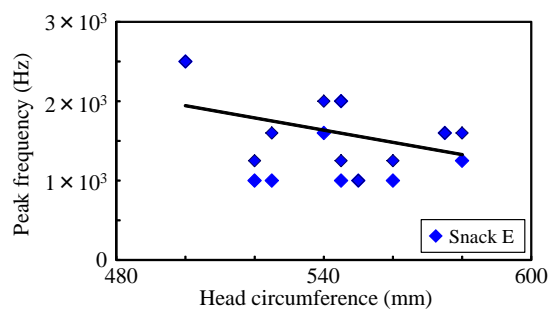
(b) Snack B



(c) Snack C

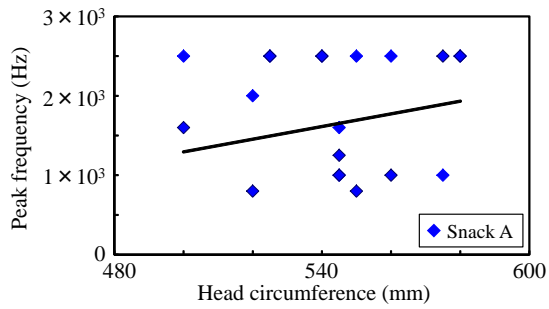


(d) Snack D

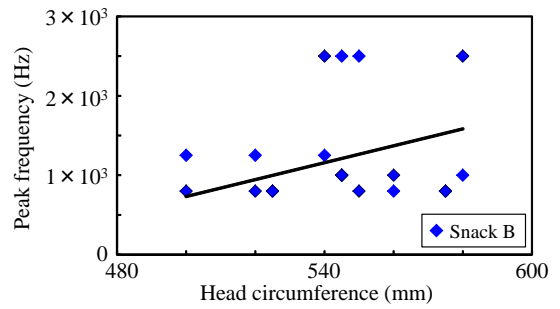


(e) Snack E

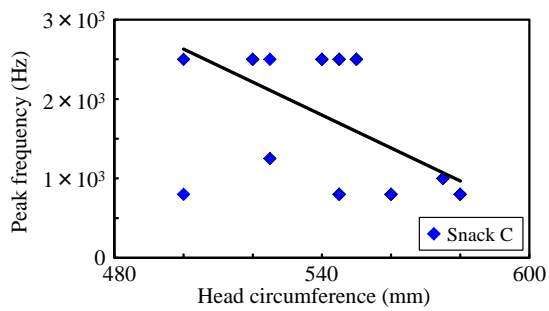
Fig. 5.18 Relationships between peak frequency of bone conduction sound and head circumference



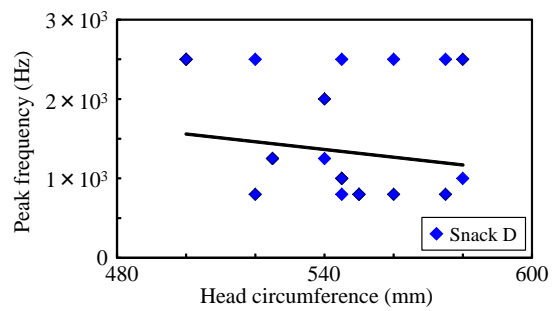
(a) Snack A



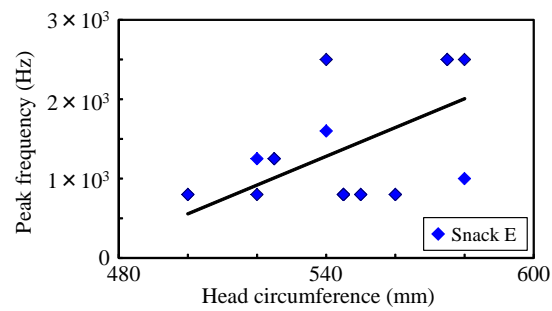
(b) Snack B



(c) Snack C



(d) Snack D



(e) Snack E

Fig. 5.19 Relationships between peak frequency of bone conduction sound and head circumference

5.6 結言

本章では、食感に重要な影響を与えていると考えられる咀嚼音と人体の振動特性との関係を議論した。まず人体の特性としては、有限要素解析によって頭蓋骨の固有振動数、固有モードを求めた。そして、頭蓋骨の低次の固有振動数が1000～2000 Hzに存在すること、頭蓋骨が大きいほど固有振動数は低下することを示した。また、咀嚼時の気導音の特性から口腔でヘルムホルツ共鳴が発生している可能性があることを指摘し、その共鳴周波数を推定した。その結果、口腔での共鳴は400～4000 Hzで発生する可能性があり、口腔が大きいほどその周波数は低下することがわかった。

次に咀嚼音に関しては、公募によって協力を得た一般の験者10名を含む13名から頭部寸法と咀嚼音のデータを採取した。咀嚼音は、骨導音と気導音を独立に測定できるヘッドセットを製作、使用して測定した。得られた咀嚼音を短時間FFTや1/3オクターブ解析によって周波数分析したところ、1000～2000 Hzの区間にピークがあり、そのピークの周波数と頭部寸法との間には負の相関が見られた。この相関関係は骨導音において顕著であり、頭蓋骨の固有振動数と頭部寸法との関係と同様の傾向であった。このことから、頭蓋骨の振動特性が咀嚼時の骨導音に影響を与えていると考えられた。

その一方で、気導音と頭部寸法との間の負の相関は明確ではなかった。その原因として、本研究では被験者による咀嚼運動の違いを挙げ、特に咀嚼筋力が小さな小人や女性と咀嚼筋力の大きな男性とで咀嚼運動が異なっている可能性を述べた。今後は、口腔での共鳴に注目し、被験者を咀嚼力や咀嚼運動によって分類することで咀嚼時の気導音と頭部寸法との関係をより詳しく理解することができると期待される。また、現状では咀嚼音と食感との関係について明確でない部分が多い。特に、本研究で取り上げた1000～2000 Hzに存在するピークが食感に与える意味については、今後の定量的な分析が望まれる。

第 6 章

スナック菓子の特性と人体の特性を総合した食感評価

6.1 緒言

本研究は客観的な指標に基づいてスナック菓子の食感を評価することを目指している。その方法として、本章では官能評価での食感スコアを食品や人体の物理的な特性によって説明する数理モデルの作成を提案する。この数理モデルを用いることで、菓子を食べる人の頭部寸法とその菓子の物理的特性がわかれば、その人がどの食感をどの程度強く感じるかを予測可能になることが期待される。すなわち、生身の被験者を用いて主観の混じった評価を得るのではなく、定量化された物理量から食感を評価することができる。これは、客観的な指標に基づく食感評価であると言える。

そこで、本論文ではまず、第2章において学生および一般の小人と成人を対象に官能評価を実施して食感をスコアとして数値化した。次に、第3章においてスナック菓子の内部構造を複数の特徴量によって定量化し、それらの特徴量で食感のスコアを説明する数理モデルを作成した。しかし、内部構造を指標とした数理モデルは説明できる食感が限られており、そうした食感においてもデータへのあてはまりが良いとは言い難かった。そのため、本研究では食感のスコアを説明するための指標に、菓子の内部構造だけでなく、菓子の生地が持つヤング率と破壊強度、菓子を咀嚼する人体の頭部寸法を導入することを述べた。そして、第4章ではスナック菓子の生地のヤング率と破壊強度を求め、第5章では食感への寄与が大きい咀嚼音と、人体の頭部寸法との関係を考察した。本章ではこれらの議論をもとに、スナック菓子の内部構造と材料特性、並びに被験者の頭部寸法によって、菓子の食感スコアを説明する数理モデルを構築する。また、得られた数理モデルの性質について、前章までの内容をもとに議論する。

6.2 結言

本章では、市販のスナック菓子に対する官能評価で得られた食感のスコアを、菓子の内部構造や材料特性、被験者の頭部寸法によって説明する数理モデルを構築した。その結果被験者群の違いによって数理モデルはやや異なっていたものの、全体の傾向は共通していた。今回対象としたスナック菓子では、さくさく感とがりがり感において比較的あてはまりの良い数理モデルが得られた。それらの数理モデルからは、スナック菓子の内部構造だけでなく、材料特性も食感に寄与していることが示された。また、かりかり感の数理モデルを構築する過程では、人体の特性を考慮することによって数理モデルのあてはまりが改善することも示された。この結果は、客観的な食感評価において、食品の特性と人体の特性の両方が重要であることを意味し、食感に注目した食品開発において重要な知見であると考えられる。

その一方で、数理モデルのあてはまりの良さについては、特にかりかり感とぱりぱり感で課題が残った。これらの数理モデルのあてはまりが良くなかった原因には、かりかり感やぱりぱり感において菓子による差が小さかったことが挙げられた。この点を改善し、より良い数理モデルを構築するためには、これらの食感が高いと期待されるポテトチップスのようなスナック菓子を対象に含めることが有効であると考えられる。また、菓子を湿気させて食感をコントロールすることも、より良い数理モデルの構築に寄与すると考えられる。

このほか、数理モデル全体について、あてはまりを改善するための方策として、特に内部構造における幾何学的な形状の評価と小人を対象にした官能評価の改善、人体の特性としての咀嚼力の評価、ならびに数理モデルの非線形化を挙げた。今後は、これらの改善によって提案手法の有効性を高めていきたい。

第 7 章

結論

7.1 総括

本研究は食感が食品と人体との力学的な相互作用によって生じることに着目し、機械工学と生体工学の両面から食感を検討することによって、客観的な食感評価手法の開発を目指した。本論文ではまず、対象をスナック菓子としたうえで、擬音語を用いた官能評価で食感を数値化する手法を提案し、市販の菓子の食感を調べた。次に食品の機械的特性として内部構造と生地材料特性を挙げ、内部構造を定量的に把握するための特徴量を提案した。また、生地材料特性についてはヤング率と破壊強度を X 線 CT 画像ベースの有限要素解析と微小力による荷重試験によって測定する新たな手法を開発した。一方、人体の特性としては、頭蓋骨の固有振動数を有限要素解析で求めたほか、口腔のヘルムホルツ共鳴について理論式と実験をもとに議論した。そして、頭蓋骨の固有振動が咀嚼時の骨導音と関連し、口腔のヘルムホルツ共鳴が咀嚼時の気導音と関連している可能性を実測した咀嚼音のデータから指摘した。最後に、これらの知見を用いて内部構造の特徴量と生地材料特性、頭部寸法から加工食品の食感を予測、評価するための数理モデルを構築した。

第 1 章では、本研究の背景と目的、課題設定を示した。ここではまず、食感が QOL に寄与することを述べ、その改善や新食感の開発において食感の客観的な評価手法が必要であることを述べた。そして、現状の食感評価手法に定性的なものが多いことを示すとともに、食感が食品と人体の力学的な相互作用の結果であることに着目して、食品と人体のそれぞれから食感に関わる物理的な特性を求め、食感を評価すべきであることを指摘した。そして、以下の 5 つの課題を設定した。

課題 1 官能評価による食感の数値化

課題 2 食品の構造の定量化

課題 3 食品の材料特性の詳細な測定

課題 4 人体頭部の振動特性が食感に与える影響の解明

課題 5 食品と人体の特性から食感を評価する数理モデルの構築

第2章の内容は第1章で述べた課題1に相当する。本章では、官能評価による食感の数値化について述べた。官能評価で得られるデータは客観的な食感評価手法の研究を行うために不可欠である。ここでは、食感が擬音語を使って表現されていることに注目し、「さくさく」、「かりかり」、「ぱりぱり」、「がりがり」の4種類の擬音語を評価項目として用いる官能評価手法を提案した。そして、この手法を小人および成人被験者に適用して評価結果を収集した。また、得られた結果の統計的分析についても述べた。

第3章の内容は第1章で述べた課題2に相当する。本章では、食品の特性の一つとして内部構造を挙げ、スナック菓子の複雑で不定形な内部構造を定量的に表現するために4種類の特徴量を提案した。提案した特徴量は、細長い菓子に対する太さ、内部における生地占有率とそのばらつき、占有率から算出した菓子表面付近への生地の偏在の程度である。まず、これらの特徴量を用いて市販のスナック菓子进行分析し、特徴量同士の関係、および対象とした菓子の特徴について述べた。また、単純な圧縮試験によって菓子の破壊挙動を計測し、特徴量との関係を論じた。これらの考察をもとに、第2章で得た官能評価結果を内部構造の特徴量のみから説明する数理モデルを構築した。この試みではさくさく感、がりがり感とする2種類の食感を説明するモデルが得られたが、数理モデルのあてはまりは良いとは言い難く、かりかり感とぱりぱり感は数理モデルが得られなかった。このため、スナック菓子の食感評価は菓子の生地の材料特性や人体の特性も含めて総合的に行われる必要があると述べた。

第4章の内容は第1章で述べた課題3に相当する。本章では、内部構造と並ぶ食品の特性としてスナック菓子の生地の材料特性を挙げ、特に食感への寄与が大きいと思われる特性としてヤング率と破壊強度に注目した。そして、これらの特性を測定する手法を提案し、提案手法で得られた材料特性について論じた。提案手法は、菓子から10 mm³程度の試験片を取り出し、そのX線CT画像をベースとした有限要素モデルを作成する一方、同じ試験片に対して微小力による荷重試験を行い、荷重試験の力学条件を用いた有限要素解析によって材料特性を同定するものである。この手法は、かたくてもろく、複雑な微細構造を持っているスナック菓子から生地そのもののヤング率や破壊強度を測定することができる。従来測定されてきた巨視的なヤング率との比較では、提案手法で得られるヤング率が巨視的なヤング率に比べて5~700倍大きいことや、巨視的なヤング率に内部構造の影響が大きいことを示した。また、試験片が小さく、菓子内部の局所的な材料特性が測定できることを利用して、スナック菓子個体内のヤング率と破壊強度の分布を示した。

第5章の内容は第1章で述べた課題4に相当する。本章では、人体の特性として頭蓋骨の固有振動数と口腔でのヘルムホルツ共鳴に注目し、食感への寄与が大きいとされる咀嚼音とこれらの振動特性との関係について述べた。頭蓋骨の固有振動数は頭が大きいほど低下するほか、値はおおよそ1000~2000 Hzであることがわかった。また、口腔でのヘルムホルツ共鳴は口腔が大きいほど低下するほか、400~4000 Hzで観察されることがわかった。一方、咀嚼音については骨導音と気導音を独立に測定した結果、どちらにおいても1000~2000 Hzの区間にピークが見られることが多く、そのピークの周波数と頭部寸法との間に負の相関が見られた。この相関関係は骨導音で顕著であり、頭蓋骨の固有振動数と頭部寸法の間に見られる関係と同様であった。また、気導音についてはピークをとる周波数と頭の大きさとの関

係は明確ではなかったが、口腔での共鳴現象を念頭において咀嚼運動や咀嚼力によって被験者を分類することで、より明確な傾向が得られる可能性があることを述べた。

第6章の内容は第1章で述べた課題5に相当する。本章では、第3章での提案にもとづいて菓子の内部構造と材料特性、および頭部寸法から食感を説明する数理モデルの構築について述べた。その結果、学生を被験者とした官能評価と一般成人を被験者とした官能評価のいずれにおいても、内部構造と材料特性を合わせて用いることで、内部構造のみを用いる場合よりもあてはまりの良い数理モデルが得られた。頭部寸法も加えた場合は、さくさく感やがりがり感ではあてはまりが改善しなかったが、かりかり感の数理モデルでは改善が見られた。ここで構築した数理モデルは、食品の特性とそれを咀嚼する人体の特性を計測すれば、どのような食感が感じられるかを官能評価なしに予測、評価できるものである。また、破壊挙動から特徴量を求めて食感を評価する従来の手法と異なり、食品そのものの特性が食感と結び付けられている。そのため、実現したい食感があるときにどの特性をどのように変化させれば良いかという知見をこの数理モデルから得ることができる。これらの利点は従来の食感評価手法にないものであり、食感の改良や新食感食品の開発といった場で有用となることが期待される。

7.2 今後の課題

本研究に関する今後の課題を各項目別に挙げる。

[適切な説明変数の選定]

本研究で構築した数理モデルは官能評価の結果をスナック菓子の内部構造の特徴量と材料特性、被験者の頭囲で説明するものである。そのため、数理モデルの性質は説明変数としてどのような特性に注目するかによって決まる。今回の場合、かりかり感やぱりぱり感については良好な数理モデルと言えるレベルに達しなかったが、その原因の一つが説明変数の選定にあると考えられる。特に内部構造に関して、空隙の幾何学的な形状を表す特徴量は有効であると考えられ、導入を検討している。また、被験者の咀嚼能力も重要である。被験者の咀嚼能力は、食品の機械的特性とともに、食品の破壊挙動を決める要素の一つとなっているためである。食品の破壊は咀嚼運動と連動して起こる事象であるため、破壊挙動が異なれば歯牙に加わる荷重のプロファイルや咀嚼筋の収縮速度も異なっている。これらの荷重や運動が感覚器官によって知覚されていることを考慮すると、咀嚼能力に関する指標も説明変数として有効である可能性が高い。同様に、被験者の咀嚼運動は口腔の共鳴に影響していると考えられることから、咀嚼運動のタイプで分類することによって被験者間の食べ方の違いを数理モデルに取り込める可能性がある [63]。この実現には本研究で用いた計測システムに加えて咀嚼運動を計測するシステムが必要になるが、これは歯学的な観点からも興味深いテーマである。

[数理モデルへの非線形性の導入]

数理モデルの構造に関しても改善の余地があると考えられる。本研究では数理モデルの基本的な特性を知るために線形モデルを用いたが、非線形性を導入することであてはまりが良くなる可能性がある。例えば、被験者の個人差を表すパラメータと食品の構造や材料特性との間の交互作用を考慮することである。これによって、咀嚼力の弱い被験者がかたい食品を食べた時の咀嚼運動の変化を反映できる可能性がある。

[官能評価手法の改善]

数理モデルの改善に加えて、官能評価手法の改善も重要である。その方策として、ここでは、小人による評価結果も数理モデルの構築に用いることのできるような官能評価の実現と、評価対象とする菓子の範囲の拡大を挙げる。まず、小人による官能評価については、彼らにとって理解しやすい評価方法であることと、できるだけ多くの情報が得られることの両立を目指すべきと考えられる。今回小人被験者に対して行った、各食感の1位を尋ねる方法は、被験者が理解しやすい評価方法ではあったが、結果から得られる情報が少なかったことは否めない。この問題に対しては、被験者一人に対して時間をずらした複数回の実験を行うこととし、評価実験一回当たりの菓子の種類を減らしたうえで一対比較を行う、といった方法を検討している。

[評価対象とする食品の適切な選定]

評価対象とする菓子の選定も官能評価の質に大きく影響するので重要である。提示する菓子は、官能評価のスコアのばらつきを大きくするように選定することが望ましい。これは、ある食感を評価する数理モデルを構築したいときに、その食感を強く感じる菓子とそうでない菓子が必要であることによる。本研究の場合、かりかり感やぱりぱり感の数理モデルのあてはまりが良くない要因の一つとして、菓子の選定が不十分だったことが挙げられる。すなわち、対象の菓子の間でかりかり感やぱりぱり感に明確な違いが現れなかったということである。この問題を解決する方法としては、評価したい食感がどのような菓子で強いのかを予備実験によって見極めたり、菓子を湿気させることで意図的にかりかり感などの低い菓子を作成するといったことが考えられる。

[材料特性測定における試験片形状の計測精度の検証]

本研究で開発した菓子の材料特性の測定手法に関しても、検討すべき事柄がある。それは、有限要素モデルの形状忠実性についてである。スナック菓子内部の微細構造をどの程度のスケールまで有限要素モデルで再現するかは X 線 CT 画像に必要な解像度に関わる。今回は、予備的にスナック菓子を走査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察し、工業用マイクロ X 線 CT の解像度ではほぼ妥当な形状計測が可能であることを確認したが、今後スナック菓子の種類を変えたり、他の食品を扱うことになった際には再び同じ調査が必要である。その上で、より解像度の高い断層画像が必要となる可能性もある。この課題はスナック菓子の素材や焼成といった化学的な要素との関係が強いため、今後の研究では菓子の材料科学的な知見も取り入れていきたい。生地を構成するデンプンの糊化や加熱による物性変化をよく把握することは、提案した材料特性測定手法の妥当性検証に役立つだけでなく、所望の材料特性を持った食品を製造するためにも必要である。そのため、この分野の研究も今後の重要な課題であると考えられる。

[材料特性測定への非線形解析の導入]

材料特性の評価には、現在線形の有限要素解析を用いているが、ここに非線形解析を導入することも今後必要になると考えられる。これは、特に荷重試験で破壊を生じさせる破壊強度の測定において、非線形挙動が現れている可能性があるためである。非線形解析を行う場合には、非線形項に関わるパラメータを別に測定するか、仮定する必要があるが、スナック菓子からその値をどう得るかが検討課題となる。今後、有限要素解析における非線形性導入の方法とその効果を検討していく予定である。

[頭部の振動特性が食感に影響するメカニズムの詳細な検証]

本研究では頭囲が大きいほどさくさく感やかりかり感が強まるという結果が得られたが、それがどのようなメカニズムによるのかを調べることも重要である。第5章、第6章では咀嚼音のピーク周波数と関連付けた仮説を論じたが、この仮説を検証するための実験は行っていない。これについては、現在、頭部の有限要素モデルを用いた動解析の利用を検討してい

る。本論文では、頭蓋骨の固有振動数と固有モードを調べるために、頭蓋骨を模した有限要素モデルを作成、解析しているが、同じモデルを活用すれば、歯牙部に動的な荷重や加速度を入力したときの頭蓋骨の挙動も調べることができる。例えば、頸部を固定して歯牙部に動的な荷重を加え、外耳周辺の振動をシミュレートした場合、固有振動数に等しい周波数成分にピークが立つような周波数分布が得られると予想される。この周波数分布は頭蓋骨モデルの大きさに応じて変化すると考えられることから、頭の大きさと骨導音の関係を推定することが可能である。さらに、頭部の振動特性を調べるための有限要素モデルは現在のところ頭蓋骨のみで構成されているが、脳などの軟組織の効果も検討すべき事柄であると言える。

[棒状のスナック菓子以外の食品への適用]

本研究では棒状のスナック菓子を対象としたが、提案する食感評価手法の基本的な枠組みは、異なる形状のスナック菓子、およびスナック菓子以外の食品にも適用できる。ただし、その場合には食品が持つ構造や材料特性のうち、食感に影響すると考えられるものをあらためて吟味する必要がある。例えば、せんべいやポテトチップスのような棒状でないスナック菓子を対象にする場合には、構造の特徴量を対象の形状に合わせて再定義する必要があると考えられる。また、スナック菓子同様歯ごたえや音が重要な食品であっても、漬物のように変形が大きかったり、フライやトーストのように脆性部分が表面のみに偏在している場合もある。これらに対しては、ヤング率や破壊強度だけでなく、非線形な変形特性や付着性を指標とするなど、材料特性に関する検討も必要である。さらに、米飯や羊羹のように咀嚼時の破碎音が目立たない食品の食感には、頭部の振動特性が影響しているとは考えにくい。同様に、官能評価の項目として擬音語が有効でないこともあり得る。これらの食品の食感を評価するためには、官能評価の項目を再検討するほか、人体の機械的特性として咀嚼運動を利用するなどの工夫が必要になると考えられる。

[実用に向けた各種の検討]

最後に、本研究で示した数理モデル構築プロセスを食品産業で用いるための検討事項について述べる。本研究は、食品そのものの特性と、それを咀嚼する人体の特性から食感を評価するための第一ステップとなると考えている。スナック菓子のような食品の材料特性が測定可能になり、食品の特性と人体の特性を合わせて用いることが食感評価に有効である可能性が示されたことで、今後は本研究で提案したアプローチを他の食品にも適用していく予定である。また、被験者数を増やすことによる統計的な有効性の向上にも取り組みたい。そのためには、上記の課題に加え、数理モデルを得るまでのプロセスをより洗練されたものにする必要がある。例えば、試験片を作成する作業の省力化や、X線CT画像からの有限要素モデル作成と境界条件の設定を容易に行えるインターフェースの開発、4.7.1節で述べたような有限要素解析の回数を減らす工夫も重要である。今後、これらも視野に入れながら研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

第1章

- [1] 都甲潔ら: “感性バイオセンサ-味覚と嗅覚の科学-”, 朝倉書店, (2001)
- [2] 日本化学会: “味とにおいの分子認識”, 学芸出版センター, (1999)
- [3] 西成勝好, 大越ひろ, 神山かおる, 山本隆: “食感創造ハンドブック”, サイエンスフォーラム, (2005)
- [4] Kilcast D.: “Texture in food Volume 2: Solid foods”, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, (2004)
- [5] 山野善正ら: “進化する食品テクスチャー研究”, エヌ・ティー・エス, (2011)
- [6] 畑江敬子, 郭 恩廷, 島田淳子, 韓国冷麺のテクスチャーの特徴づけ, 日本家政学会雑誌, **48**-7, (1997), pp. 613-619.
- [7] 平島 円, 堀 光代, 固体食品のテクスチャーの好みに関する調査: 第1報 クッキー, 岐阜市立女子短期大学研究紀要, **55**, (2005), pp. 81-84.
- [8] 平島円, 半固体食品のテクスチャーの好みに関する調査: 第1報 牛乳かん, 岐阜市立女子短期大学研究紀要, **55**, (2005), pp. 85-87.
- [9] 野坂千秋, 箕輪澄乃, 星川恵里, 久保田浩二, 大越ひろ, 渡邊乾二, ホワイトソース物性へ及ぼす調理操作条件の影響-シェフと非熟練者の攪拌条件の例-, 日本調理科学会誌, **34**-1, (2001), pp. 10-16.
- [10] Szczesniak A. S., Brandt M. A. and Friedman H., Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and sensory methods of texture evaluation, *Journal of Food Science*, **28**, (1963), pp. 397-403.
- [11] Brandt M. A., Skinner E. Z. and Coleman J. H., Texture Profile Method, *Journal of Food Science*, **28**, (1963), pp. 404-409.
- [12] 岡部 巍, 食品のテクスチャーの測定に関する研究(第1報): 固形食品の粘稠性測定器の試作と検討, 京都女子大学食物學會誌, **23**, (1969), pp. 18-22.

- [13] 岡部 巍, 食品のテクスチャー測定における咀嚼曲線の解析, 京都女子大学食物學會誌, **32**, (1977), pp. 1–13.
- [14] Salvador M., Varela P., Sanz T. and Fiszman S. M., Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis, *Food Science and Technology*, **42**, (2009), pp. 763–767.
- [15] Taniwaki M., Hanada T. and Sakurai N., Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor, *Food Research International*, **39–10**, (2002), pp. 1099–1105.
- [16] Drake B. K., Food crushing sounds. An introductory study, *Journal of Food Science*, **28**, (1963), pp. 233–241.
- [17] Seymour S. K., Hamann D. D., Crispness and crunchiness of selected low moisture foods, *Journal of Texture Studies*, **19**, (1988), pp. 79–95.
- [18] Dacremont C., Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods, *Journal of Texture Studies*, **26**, (1995), pp. 27–43.
- [19] Chauvin M. A., Younce F., Ross C. and Swanson B., Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: Relationship with acoustic determinations, *Journal of Texture Studies*, **39**, (2008), pp. 345–368.
- [20] Bruwer M. J., MacGregor J. F. and Bourg W. M., Fusion of sensory and mechanical testing data to define measures of snack food texture, *Food Quality and Preference*, **18**, (2007), pp. 890–900.
- [21] 豊島尊, 土屋欣也, 佐藤史明, 橘 秀樹, 音響解析および咀嚼圧力解析によるフライ調理食品のテクスチャー評価, 日本食品科学工学会誌, **51–8**, (2004), pp. 388–394.

第 2 章

- [22] Drake B. K., Sensory textural/rheological properties-A polyglot list, *Journal of Texture studies*, **20**, (1989), pp. 1–27.
- [23] Nishinari K., Hayakawa F., Xia C. F., Huang L., Meullenet J. F. and Sieffermann J. M., Comparative study of texture terms: English, French, Japanese and Chinese, *Journal of Texture Studies*, **39**, (2008), pp. 530–568.
- [24] 早川文代, 井奥加奈, 阿久澤さゆり, 齋藤昌義, 西成勝好, 山野善正, 神山かおる, 日本語テクスチャー用語の収集, 日本食品科学工学会誌, **52**, (2005), pp. 337–346.

- [25] 早川文代: “食語のひとつとき”, 毎日新聞社, (2004), pp. 2-3.
- [26] 石原一志, 坪田 康, 奥乃 博, 日本語の音節構造に着目した環境音の擬音語への変換, 電子通信会技研報 SP 音声, **103**, (2003), pp. 19-24.
- [27] 池田岳郎, 早川文代, 神山かおる, テクスチャを表現する擬音語・擬態語を用いた食感性解析, 日本食品工学会誌, **7**, (2006), pp. 119-128.
- [28] 田中基八郎, 松原謙一郎, 佐藤太一, 異音の表現における擬音語の検討: 衝突音等の単発音やうなり音の場合, 日本機械学会論文集 C 編, **61**, (1995), pp. 4730-4735.
- [29] 比屋根一雄, 澤部直太, 飯尾 淳, 単発音のスペクトル構造とその擬音語表現に関する検討, 電子通信会技研報 SP 音声, **97**, (1998), pp. 65-72.
- [30] 早川文代, 風見由香里, 井奥加奈, 阿久澤さゆり, 西成勝好, 神山かおる, 日本語テクスチャー用語の対象食物名の収集と解析, 日本食品科学工学会誌, **58**, (2011), pp. 359-374.
- [31] Snider J. G. and Osgood C. E., “Semantic differential technique : a source book.”, Chicago, Aldine Pub. Co., (1969)
- [32] 市原 茂, 総説・セマンティック・ディファレンシャル法 (SD 法) の可能性と今後の課題, 日本人間工学会誌, **5**, (2009), pp. 263-269.
- [33] 井上正明, 小林利宣, 日本における SD 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の外観, 教育心理学研究, **33-3**, (1985), pp.253-260.
- [34] 大越ひろ, 神宮英夫: “食の官能評価入門”, 光生館, (2009), pp. 80-87.
- [35] van der Bilt A., Poctaruk R. L., Frasca L. C. F., van der Glas H. W. and Abbink J. H., The influence of auditory and visual information on the neuromuscular control of chewing crispy food, *European Journal of Oral Science*. **119**, (2011), pp. 427-434.

第 3 章

- [36] Kohyama K. and Nishi M., Direct measurement of biting pressures for crackers using a multiple-point sheet sensor, *Journal of Texture Studies*, **28-6**, (1997), pp. 605-617.
- [37] 竹下登紀子, 中沢文子, 咀嚼中の第一大臼歯の咀嚼速度と食品物性の関係, 日本家政学会誌, **58-3**, (2007), pp. 129-137.
- [38] Garrahan N. J., Mellish R. W. E. and Compston J. E., A new method for the two-dimensional analysis of bone structure in human iliac crest biopsies, *Journal of Microscopy*, **142-3**, (1986), pp. 341-349.

- [39] Vesterby A., Gundersen H. J. G. and Melen F., Star volume of marrow space and trabeculae of the first lumbar vertebra: Sampling efficiency and biological variation, *Bone*, **10**-1, (1989), pp. 7-13.
- [40] Parfitt A. M., Mathews C. H., Villanueva A. R., Kleerekoper M., Frame B. and Rao D. S., Relationships between surface, volume, and thickness of iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss., *Journal of Clinical Investigation*, **72**-4, (1983), pp. 1394-1409.
- [41] Mioche L. and Peyron M. A., Bite force displayed during assessment of hardness in various texture contexts, *Archives of Oral Biology*, **40**, (1995), pp. 415-423.
- [42] 井上敬介, 嶋村一郎, 岸 正孝, 食品性状の差異が咀嚼運動速度に及ぼす影響, 歯科学報, **101**-8, (2001), pp. 739-753.
- [43] Komuro A., Morimoto T., Iwata K., Inoue T., Masuda Y., Kato T. and Hidaka O., Putative Feed-Forward Control of Jaw-Closing Muscle Activity During Rhythmic Jaw Movements in the Anesthetized Rabbit, *Journal of Neurophysiology*, **86**-6, (2001), pp. 2834-2844.

第 4 章

- [44] 和田淑子, 焼き菓子のテクスチャーと物性に関する研究, 日本家政学会誌, **50**-9, (1999), pp. 903-914.
- [45] 中野典子, 森奥登志江, クレープ生地 of 物性と官能特性に及ぼすそば粉の影響, 調理科学, **23**-2, (1990), pp. 174-179.
- [46] Scanlon M. G. and Zghal M. C., Bread properties and crumb structure, *Food Research International*. **34**, (2001), pp. 841-864.
- [47] Attenburrow G. E., Goodband R. M., Taylor L. J. and Lillford P. J., Structure, mechanics and texture of food sponge, *Journal of Cereal Science*. **9**, (1989), pp. 61-70.
- [48] Keetels C. J. A. M., Visser K. A., van Vliet T., Jurgens A. and Walstra P., Structure and mechanics of starch bread, *Journal of Cereal Science*. **24**, (1996), pp. 15-26.
- [49] Keetels C. J. A. M., van Vliet T. and Walstra P., Relationship between the sponge structure of starch bread and its mechanical properties, *Journal of Cereal Science*. **24**, (1996), pp. 27-31.
- [50] Manley R. S., Pfaffman C., Lathrop D. D. and Keyser J., Oral sensory thresholds of persons with natural and artificial dentitions, *Journal of Dental Research*, **31**, (1952), pp. 305-312.

- [51] 本間 済, 河野正司, 武川友紀, 小林 博, 櫻井直樹, 煎餅を用いた食塊形成能力からみた咀嚼能力評価法, 日本顎口腔機能学会雑誌, **10**, (2004), pp. 151–160.
- [52] 大橋吉春, 一般用超速硬化型瞬間接着剤「ハイスピード EX」, 東亜合成研究年報, **4**, (2001), pp. 40–42.
- [53] 大津展之, 判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌 D, **63**, (1980), pp. 349–356.
- [54] 加藤みゆき, 津田淑江, 長野宏子, 阿知和弓子, 大迫早苗, 永島伸浩, 西堀すき江, 堀 光代, 森山三千江: “フローチャートによる身近な調理の科学実験”, 地人書館, (2008), pp. 12–15.
- [55] JIS K7161: Plastics–Determination of tensile properties–Part 1: General principles, Japanese Standards Association, (1994)
- [56] 谷村眞治, 林 寛幸, 山本照美, 各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性, 日本機械学会論文集 (A 編), **77**, (2011), pp. 1347–1356.

第 5 章

- [57] 西本哲也, 村上成之, 阿部俊昭, 小野古志郎, ヒト頭蓋骨の機械的性質と急性硬膜外血腫の発生に及ぼす骨破壊の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), **61**–591, (1995), pp. 58–64.
- [58] Khalil T. B., Viano D. C. and Smith D. L., Experimental analysis of the vibrational characteristics of the human skull, *Journal of sound and vibration*, **63**–3, (1979), pp. 351–376.
- [59] Khalil T. B. and Viano D. C., Comparison of human skull and spherical shell vibrations–Implications for head injury modeling, *Journal of sound and vibration*, **82**–1, (1982), pp. 95–110.
- [60] 勝木保次, 時實利彦, 口腔及び附属管腔の固有振動数に就て. 日本音響学会誌. **5**–4, (1944), pp. 13–16.
- [61] Arai T., Educational systems in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract. *Acoustical science and technology*. **28**–3, (2007), pp. 190–201.

第 6 章

- [62] Gibson L. J. and Ashby M.: “Cellular solids: Structure and properties–Second edition.” Cambridge, Cambridge University Press, (1997)

第7章

- [63] 齋藤 極, 伊能教夫, 木村 仁, 小関道彦, 藤川泰成, 浅間雄介, 小川尚己, 榎宏太郎, 個別顎運動表示システムを用いた咀嚼筋群の動態観察, 顎顔面バイオメカニクス学会誌, **16-1**, (2010), pp. 1-6.

本論文に関連する業績

学術雑誌および国際会議論文集 (査読付)

第2章

第3章

1. 門脇 廉, 伊能教夫, 木村 仁, 擬音語で提示される食感とスナック菓子の内部構造の関係, *日本咀嚼学会雑誌*, **22-1**, (2012), pp. 36-43.

第4章

2. Kadowaki R., Inou N. and Kimura H., Measurement of Microscopic Young 's Modulus of Crispy Foods, *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering*, **50**, (2013), pp. 79-83, IACSIT Press.
3. Kadowaki R., Inou N. and Kimura H., Mechanical Property of Crispy Foods Focusing on the Microstructure, *Proc. of The 6th International Conference on MicroManufacturing ICOMM/2011*, (2011), pp. 685-690.

第5章

4. Kadowaki R., Inou N. and Kimura H., Effect of Vibration Characteristics of Skull in Mastication of Crispy Foods on Food Texture, *Journal of Medical and Bioengineering*, **2-3**, (2013), pp. 186-190, Engineering and Technology Publishing.

第6章

第7章

講演論文集 (本人が発表)

1. 門脇 廉, 伊能教夫, 木村 仁, 液体油脂を含むスナック菓子の局所的な機械的特性の測定, 日本食品工学会第 14 回 (2013 年度) 年次大会講演要旨集, (2013), p. 95.
2. 門脇 廉, 伊能教夫, 木村 仁, 微小荷重試験と有限要素解析を用いたスナック菓子の局所ヤング率測定法の提案, 日本食品工学会第 13 回 (2012 年度) 年次大会講演要旨集, (2012), p. 137.
3. 門脇 廉, 伊能教夫, 木村 仁, 食感のバイオメカニクス (スナック菓子の微細構造と食感の官能評価), 第 24 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (CD 版), 11-47, (2012), 8A-46(CD-ROM).
4. 門脇 廉, 小関道彦, 木村 仁, 伊能教夫, 食感のバイオメカニクス: 咀嚼時の頭蓋骨の振動特性, 第 22 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 9-55, (2010), p. 166.
5. 門脇 廉, 小関道彦, 木村 仁, 伊能教夫, 食感のバイオメカニクス: 加工食品の内部構造に関する破砕時の荷重履歴の特徴量, M&M2009 材料力学カンファレンス講演論文集, (2009), pp. 456-457.
6. 門脇 廉, 伊能教夫, 小関道彦, 木村 仁, 食感のバイオメカニクス: 加工食品の内部構造と破砕時の力学的特性の関係, 第 21 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 53, (2009), pp. 407-408.

受賞

1. ICFEB2013 Best Papers (2013年)
“Measurement of Microscopic Young ’ s Modulus of Crispy Foods”

謝辞

本研究を全面的に御指導，御教授下さいました東京工業大学理工学研究科機械制御システム専攻 伊能教夫教授に深く感謝の意を表します。

また，ご多忙の中，本論文を審査下さり，貴重な御助言を下さいました東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 蜂屋弘之教授，山浦弘教授，機械物理工学専攻 岸本喜久雄教授，大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 宮崎祐介准教授に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり，御指導下さいました東京工業大学理工学研究科機械制御システム専攻 木村仁助教に御礼申し上げます。また，頭蓋骨の有限要素モデルなどについて貴重な御助言を下さいました信州大学繊維学部機械・ロボット学系バイオエンジニアリング課程の小関道彦准教授に御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり数多くの助言を下さり，諸事御協力下さいました伊能研究室の皆様に御礼申し上げます。

また，研究に専念できるよう様々な面で生活を補助して下さいました両親に感謝の意を表します。

なお，本研究は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金，および公益財団法人浦上食品・食文化振興財団平成 22 年度学術研究助成，公益財団法人すかいらーくフードサイエンス研究所平成 24 年度学術研究助成を受けて行われたことを付記いたします。