

米菓の食感に及ぼす咀嚼振動の影響に関する研究

Xuanpeng Wang^{*1}・勝野那嘉子^{*2}・勝又明敏^{*3}・松原一生^{*3}・藤原 周^{*3}・山谷健太^{*4}・竹井 亮^{*4}・高橋 肇^{*4}・松下光次郎^{*5}・今泉鉄平^{*2}・西津貴久^{*2†}

要 旨

米菓の咀嚼振動がクラックレットと称する短い振動が多数集合して構成されたものと考え、その最小単位の振動の周波数領域情報に基づいた咀嚼振動解析法を新規に考案した。口腔内への咀嚼振動刺激提示実験から、実際に喫食しなくても、振動刺激のみで食感に関する知覚が喚起されることを実証した。また、オリジナルの咀嚼振動と特定のクラックレットを欠損した振動を提示したときの識別実験から、正規化クラックレットエネルギーが米菓の食感の知覚に影響を与えることが示唆された。

[キーワード] 米菓, テクスチャー, 咀嚼振動, クラックレット, 振動刺激提示

The effect of chewing vibrations on the perception of rice cracker texture

Xuanpeng Wang^{*1}, Nakako Katsuno^{*2}, Akitoshi Katsumata^{*3}, Kazuki Matsubara^{*3},
Shu Fujiwara^{*3}, Kenta Yamaya^{*4}, Ryo Takei^{*4}, Hajime Takahashi^{*4}, Kojiro Matsushita^{*5},
Teppei Imaizumi^{*2}, and Takahisa Nishizu^{*2†}

Abstract

We developed a novel approach for analyzing chewing vibrations in which vibration signals are isolated as short vibrations called cracklets and analyzed based on the frequency domain of each signal. The results of an oral stimulus test demonstrated that the perception of food texture was evoked only when the vibration stimuli were presented without actual food consumption. A discrimination test in which we used a discrimination ratio to examine the differences between the original chewing vibrations and modified vibrations created by deleting some cracklets demonstrated that segments of normalized cracklet energy affected the sensory texture perception of rice crackers.

[Keywords] rice cracker, texture, chewing vibration, cracklet, presenting vibration stimuli

*1 国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学連合農学研究科 : 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

United Graduate School of Agricultural Science, Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan

*2 国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学応用生物科学部 : 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan

*3 学校法人朝日大学歯学部 : 〒501-0296 岐阜県瑞穂市穂積 1851

School of Dentistry, Asahi University, 1851 Hozumi, Mizuho, Gifu, 501-0296, Japan

*4 亀田製菓株式会社 : 〒950-0198 新潟県新潟市江南区亀田工業団地 3-1-1

Kameda Seika Co., Ltd., 3-1-1 Kameda Kogyo Danchi, Konan, Niigata, Niigata, 950-0198, Japan

*5 東海国立大学機構岐阜大学工学部 : 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

Faculty of Engineering, Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan

† Corresponding author : nishizu@gifu-u.ac.jp

1. 緒言

破砕性食品の食感は、咀嚼中の食品の破壊に伴って生ずる振動によって知覚される感覚である。こうしたテクスチャーを把握するために、官能評価法、もしくはテクスチャープロファイルアナリシス (TPA) に代表される機器分析法の二通りの方法がある。前者はパネリストが食感そのものを直接評価するものであり、人間の感性に根差したテクスチャー情報を得るためには理想的な方法であると言える。しかし、再現性のいい結果を得るためには、よく訓練されたパネリストを使う、あるいはなるべく多くのパネルを使う必要がある。後者の機器分析法は感覚的な評価法に比べて、得られる評価結果の再現性がよいとされる¹⁾。例えば、破砕性食品のテクスチャーは、曲げ試験²⁾、せん断試験³⁾、および圧縮試験⁴⁾により評価される。これらの試験評価は、テクスチャーアナライザーと呼ばれる圧縮・引張試験機を用いて、複雑な前処理もなく、短時間に測定することができる。一方、得られた結果が、官能評価の結果と相関がないことがある。また、同じ品目でも形状や大きさによって評価値が異なることがあるため、全姿測定には適さないことが多い。破壊振動によるテクスチャー分析も機器分析法の一つであるが、サクサク感やカリカリ感といった食感、咀嚼振動を感知することで知覚されるものであり⁵⁾、こうした機器分析法の問題の影響を受けにくい方法となる可能性がある。破砕性食品は、ガラス化した澱粉やたんぱく質成分からなる素材からなっていることが多いために圧縮力が作用した時に破断しやすく、食品によっては薄くて壊れやすいセル構造体と呼ばれる多孔質構造を有している。咀嚼により破断面から発生する微小振動を体性感覚として感知するとともに、振動を頭蓋骨や周囲の空気を通じて音として感知し、それらを例えばサクサク感の知覚の手がかりとしている。咀嚼振動やそれに伴って発生する音に着目した機器測定は、人間への刺激入力を直接測定しているということに他ならず、前述の形状や大きさが及ぼす影響を排除できる可能性がある。これまで、食品の破壊音の振幅やイベント数^{6,7)}、平均音圧レベル⁸⁾、振動波形のフラクタル次元⁹⁾などの評価指標が報告されてきた。一方、日本では「サクサク」のように、破砕性食品の食感を表現する擬音語 (オノマトペ) が数多くあり、官能評価における「言葉」として利用されてきた。早川らの日本語テクスチャー用語体系¹⁰⁾には、「サクサク」「パリパリ」「カリカリ」のような破砕性食品の食感に深く関連する用語が収録されている。こうしたオノマトペを利用した官能評価と前述の咀嚼振動の指標値との関係は、もっぱら統計的手法によって分析されてきた。実用的には有効なやり方であるが、咀嚼振動のどのような成分が人間の食感知覚にどのように

影響しているかについてはまだ検討されていないのが現状である。もし食感知覚に影響を及ぼす振動成分を特定することができれば、期待する食感を発現させるような製品開発の際に、官能評価することなく咀嚼振動を収集するだけで開発指標の設定と検証を容易に実現できるようになる。

そこで、咀嚼時の振動を検出・記録でき、また振動信号を入力することで口腔に振動を与えることが可能な口腔内装置を開発し、様々な食感をもつ米菓を対象として記録した咀嚼振動と、その振動信号から食感の知覚に関連すると思われる振動成分を欠損した人工的な咀嚼振動を与えた時の識別試験を通じて振動刺激が食感におよぼす影響について定量的な評価と検討を行うこととした。なお、本研究の官能評価と口腔内試験については、朝日大学病院医学倫理審査委員会の承認 29014 を受けて実施した。

2. 材料および方法

2.1 材料

ソフトタイプからハードタイプまでさまざまなテクスチャーを示す 10 種類の米菓 (未調味市販品、現在未流通のものを含む) を本研究の米菓試料として使用した。米菓は吸湿することで食感に変化することが知られている。そのため、吸湿を防止するために、製造後すぐにアルミ蒸着袋に入れて密封し、測定直前まで常温下で保管した。詳細を表 1 に示す。S1, S2, S3, S5, S6, S7, S8, S9 については石橋ら¹¹⁾が先行研究結果と官能評価結果により採用した米菓と同じ品種であった。S10 は、中本ら¹²⁾が報告したテクスチャー研究において使用されたものと同じ品種であった。すべての試料は、一口で口の中に入れられるように、体積が約 3.5 cm³ になるようにカットした。試料密度は、質量を菜種置換法によって測定した体積で除することによって決定した¹³⁾。

20 名のパネリスト (著者らの研究室に所属する 20 歳から 24 歳までの男女各 10 名からなる「言葉出し」のパネル) に表 1 に示した米菓を試食してもらい、食感についての「言葉出し」と試料ごとに最も適切と思う評価用語の選抜を行った。

表 1 供試米菓

試料番号	材料米	焼成方法	みかけ密度 (g/cm ³)	試料番号	材料米	焼成方法	みかけ密度 (g/cm ³)
S1	うるち米	油ちょう	0.480	S6	うるち米	焙焼	0.395
S2	もち米	焙焼	0.139	S7	うるち米	焙焼	0.180
S3	うるち米 もち米	焙焼	0.408	S8	うるち米 もち米	焙焼	0.236
S4	もち米	焙焼	0.187	S9	うるち米 もち米	焙焼	0.354
S5	うるち米	焙焼	0.396	S10	うるち米	焙焼	0.797

2.2 口腔内装置

米菓咀嚼中の咀嚼振動を検出するために上口蓋部に装着する振動検出用口腔内装置 (図 1A) を 10 名のパネリスト (20 歳から 28 歳までの男性 4 名と女性 6 名からなる「咀嚼評価」のパネル、そのうちの 9 名は「言葉出し」のパネルから無作為に抽出) 全員分を試作した。この装置は、プラスチック製の上口蓋リテーナーに圧電フィルム (22.0×10.0×0.2 mm, Measurement Specialties 製, SDT1-028K) を貼付したものである。リテーナーは、各パネリストの口腔印象をもとに、上口蓋の形状に一致するように成形した。リテーナーは上口蓋に密着するように装着され、咀嚼中に生じた振動が上口蓋からリテーナーに伝播して舌と対向する面に貼付された圧電フィルムで検出される。この口腔内装置を装着して米菓試料を咀嚼したときの機械的振動を検出し、増幅器を経由して PC 用専用プログラムを利用してデジタル信号として記録した。

同様の方法で製作した上口蓋リテーナーにアクチュエーター (日本電産株式会社製, LD14-002) を埋め込んだ振動再生用口腔内装置 (図 1B) を試作した。PC 用専用プログラムで振動信号を増幅器経由でアクチュエーターに入力し、口腔内に疑似的な咀嚼振動を与えた。咀嚼振動によって食感が惹起されるのならば、その食感惹起に影響の大きい振動成分を意図的に削除した修正振動を加えた時に、食感が知覚されないはずである。この再生用口腔内装置はそうした修正振動による知覚実験に供するために開発したものである。

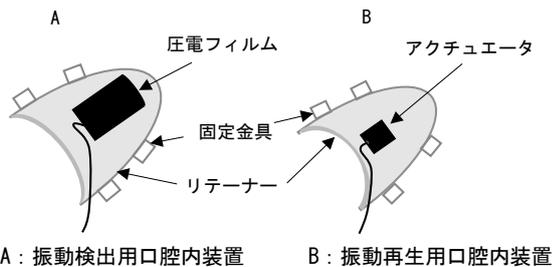


図 1 口腔内装置の概略図

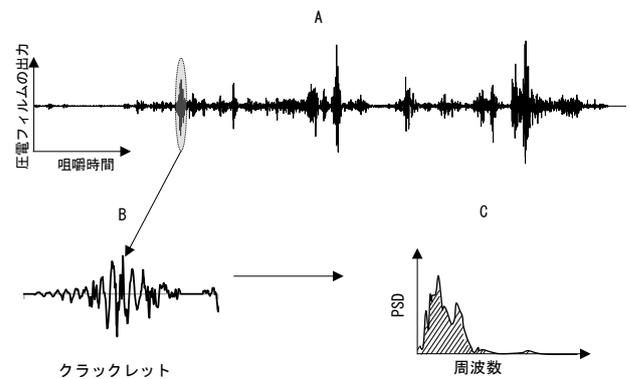
2.3 咀嚼振動波形の評価方法

振動検出用口腔内装置で検出した米菓咀嚼振動波形の一例を図 2A に示す。振動波は振動の始点と終点がある一かたまりの独立波 (図 2B に一例を示す) が多数集合して構成されている。本研究ではこの小さな振動のことを、crack (鋭い一撃の音) に let (小さい) を付けてクラックレット (cracklet) と称する。振動波形に Savitzky-Golay フィルターを利用して低周波成分を除去した後、立ち上がり閾値 (測定データのノイズをおおよそ除去することができる閾値を振幅値データの最大値の 0.26 % とし、本実験

で得たすべてのデータに適用した) を超えるクラックレットを抽出した。専用プログラムを用いて、各クラックレットについて、最大エントロピー法 (Burg 法アルゴリズム、予測誤差フィルターの次数 20) によって算出されたパワースペクトル密度 (PSD) の 10 Hz から 22.1 kHz までの積分値 (図 2C に一例を示す) を求めた。式 (1) に示すように、PSD の積分値を本実験で得られたすべてのクラックレットのパワースペクトル密度積分値の中で最も大きい値で除して正規化したものを以下、正規化クラックレットエネルギー (式中の E) と称する。クラックレットの出現時刻 (噛み始めを起点として振動信号が前述の閾値を超えた時刻) とその時の正規化クラックレットエネルギーをプロットしたものを図 3A に、そして自然対数で表した E の階級別のヒストグラムを図 3B に示す。このグラフの縦軸は 1 秒当たり正規化されたクラックレット個数であり、これを以下、クラックレット頻度 [s^{-1}] と称する。

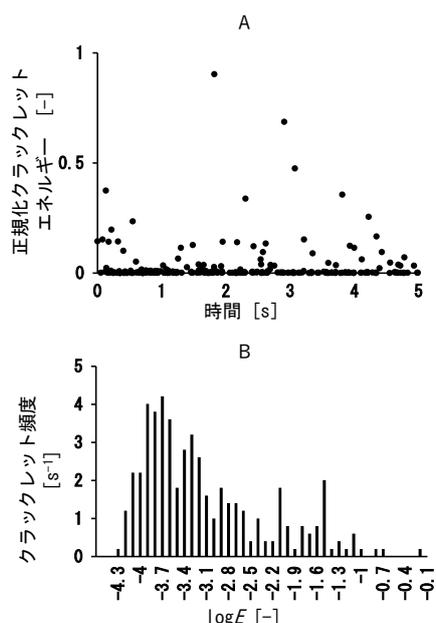
$$E = \frac{E_0}{E_{\max}} \quad (1)$$

E_0 : クラックレットのパワースペクトル密度積分値 [a. u.], E_{\max} : すべてのクラックレットのパワースペクトル密度積分値の中で最も大きい値 [a. u.] (a. u. は任意単位を示す)



A : 咀嚼振動波形
B : クラックレット
C : 最大エントロピー法により算出されたクラックレットのパワースペクトル密度

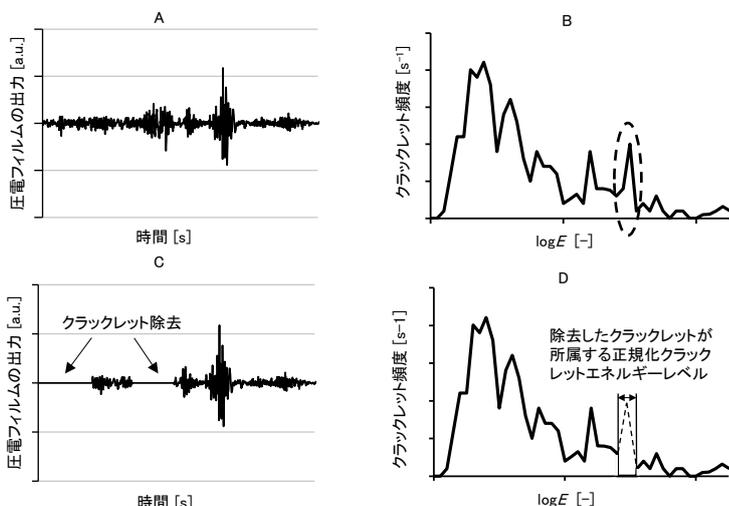
図 2 米菓の咀嚼振動波形とクラックレット



A: 正規化クラックレットの出現時刻とその時の正規化クラックレットエネルギー
 B: 自然対数で表した正規化クラックレットエネルギー一階層別ヒストグラム

図3 正規化クラックレットエネルギーの分布

図4A, 4Bに咀嚼振動波形とEのヒストグラムの一例を示す。図4B中のヒストグラムの破線領域に所属するすべてのクラックレットを除去した修正振動波形は図4Cに示すようになる(その時のヒストグラムを図4Dに示す)。その振動波形は図4Bに示すように、該当するクラックレットが完全に除去された波形となる。この振動を以下、修正振動と称する。修正振動波形信号の作成は統計ソフトR(v.3.6.1)を用いて行った。



A: オリジナルの咀嚼振動波形
 B: 正規化クラックレットエネルギーのヒストグラム (ここでは、ヒストグラムは棒グラフの棒の上端を線で結んだもの)
 C: クラックレットを除去した修正振動波形
 D: 除去されたクラックレットが所属する正規化クラックレットエネルギーラベル, なお a. u. は任意単位を示す

図4 修正振動の作成過程

2.4 実験方法

2.4.1 官能評価

まず、前述の「言葉出し」のパネル(20名)に10種類すべての米菓試料(大きさ3.5 cm³)を試食してもらい、それぞれ咀嚼時の食感やテクスチャーを表すのに最適と判断した言葉を収集した。本パネルは、「言葉出し」パネルと同一であり、「言葉出し」の際に十分なディスカッションを行っていることから、前述した「咀嚼評価」パネルも含めて、ほぼ全員が訓練されたパネルと言える。収集したすべての言葉を早川らの日本語テクスチャー用語体系¹⁰⁾と照合し、用語体系に収録されているいくつかの用語に集約した。次いで10種類の米菓試料による官能評価を実施し、選定したテクスチャー用語の中から、試料の食感を最もよく表している用語を一つだけ選定させた。式(2)に示すように、あるテクスチャー用語を選択したパネリスト数をパネリスト総数で除したものをテクスチャー用語選択比R₁と定義し、米菓試料ごとにすべてのテクスチャー用語についてR₁を計算した。その後、統計ソフトR(v.3.6.1)を用いて、官能評価結果に関して因子分析を行い、テクスチャー用語のグルーピングに繋げた。

$$R_1 = \frac{N_0}{N} \quad (2)$$

N₀: 当該テクスチャー用語を選択したパネリスト数, N: パネリスト総数(20)

2.4.2 咀嚼振動取得と振動成分の抽出

振動検出用口腔内装置を装着した「咀嚼評価」のパネル(10名)に10種類の米菓試料を咀嚼してもらい、咀嚼振動の測定と記録を行った。測定開始直前に試料を口腔に入れて、上下顎の切歯と臼歯で試料を軽く挟み、1噛み分だ

けの咀嚼振動を測定した。1 噛みの時間はクラックレットの重なりを防ぐために約 5 秒とし、パネリスト 1 名あたり、1 種類の米菓について 5 回の測定を行った。振動データは 16 bits, 44.1 kHz サンプリングの WAV 形式で保存した。

米菓サンプルの咀嚼振動データを用いて前述の方法で E の階級別ヒストグラムを求めた。パネリストごとにこのヒストグラムデータを主成分分析 (PCA) することで得られるパラメーターを咀嚼振動の特徴量とすることとした¹⁴⁾。パネリストごとに、各主成分について E の全階級の因子負荷量の平均値を計算した。式 (3) に示すように、 E の階級別に、因子負荷量の平均値を超える因子負荷量を示すパネリストの数をパネリスト総数で除した比 A を算出した。

$$A = \frac{N_1}{N_T} \quad (3)$$

N_1 : 因子負荷量の平均値を超える因子負荷量を示すパネリスト数, N_T : パネリスト総数 (10)

2.4.3 振動刺激提示実験

振動再生用口腔内装置を装着した「咀嚼評価」のパネル（「言葉出し」のパネルもつとめる 9 名）に再生用咀嚼振動を提示する実験では、修正振動信号を制御用 PC からアンプを介して口腔内装置に埋設されたアクチュエーターに入力することで振動刺激を与えた。まず、ある食感を持つ米菓の咀嚼振動を記録し、その振動だけを口腔内に与えた時に人間はその食感を覚えるかどうかを確認した。パネリストにある米菓を喫食した時の食感を、提示するテキスト用語の中から選択させた。次にそのパネリスト自身の咀嚼振動を記録した後、その再生用咀嚼振動を口腔内に提示し、同様に想起される食感を表現する用語を、提示するテキスト用語の中から選択させた。以上のことを 9 名のパネリストそれぞれに対して実施した。測定は試料それぞれについて 3 回ずつ行った。その際、データ提示の順番が評価に及ぼす影響を除くために、同一品種のデータを 3 回連続して提示せず、品種に関係なくランダムに提示した。式 (4) に示すように、品種ごとに注目する用語を選択したパネリスト数を全パネリスト数 (9) で除した値を用語選択比 R と定義した。

$$R = \frac{N_R}{N_T} \quad (4)$$

N_R : 記録した再生用咀嚼振動を提示した時、当該の米菓試料を喫食した時と同じ食感を感じたパネリストの数, N_T : パネリスト総数 (9)

振動再生用口腔内装置を装着した「咀嚼評価」のパネル（「言葉出し」のパネルもつとめる 9 名）に対して、同一品種についてオリジナルの再生用咀嚼振動とその修正振動（後述の 8 種類）を提示したとき、両者を識別できるか

どうかの実験を実施し、式 (5) に示すように、オリジナルの咀嚼振動と修正振動を識別できたパネリスト数をパネリスト総数で除したものを識別比 d と定義した¹⁵⁾。

$$d = \frac{N_d}{N_T} \quad (5)$$

N_d : オリジナルの再生用咀嚼振動と修正振動を識別できたパネリスト数, N_T : パネリスト総数 (9)

また式 (6) に示すように、3 回の繰り返し測定で識別比が 1 であった振動刺激提示実験の数をパネリストが受けた振動刺激提示実験の総数で除したものを、各パネリストの振動刺激に対する感度 Z と定義した。

$$Z = \frac{N_Z}{N_P} \quad (6)$$

N_Z : 3 回の繰り返し測定で識別比が 1 であった振動刺激提示実験の数, N_P : パネリストが受けた振動刺激提示実験の総数

3. 実験結果と考察

3.1 官能評価

10 種類の米菓試料の官能評価の結果、表 2 に示すように 9 個のテキスト用語（日本語）が選抜された。9 個の用語はいずれもオノマトペと呼ばれる擬音語であることから、本研究の結果と考察は日本語を日常的に使用する地域に限定される。

表 2 9 個のテキスト用語 (参考文献 10 から引用)

用語	中分類 ¹⁰⁾	小分類 ¹⁰⁾
カリカリ	力学: 破碎	破碎や折れやすさ
ガリガリ	力学: 噛みごたえ	かたさや強い噛みごたえ
サクサク	力学: 破碎	切れやすさ
ザクザク	力学: 破碎	繰り返しの破碎
バリバリ	力学: 破碎	破碎や折れやすさ
バリバリ	力学: 破碎	破碎や折れやすさ
ポリポリ	力学: 噛みごたえ	かたさと破碎
ポリポリ	力学: 噛みごたえ	かたさと破碎
ふわふわ	力学: 凝集の小ささ	膨らんだ感じのやわらかさ
	幾何学: 空気	軽さと膨らみ

テキスト用語選択比のデータについて因子分析を行ったところ、因子 1 から 5 までの固有値は順に 4.084, 2.325, 1.223, 0.649, 0.365 となった。また 2 因子までの寄与率が 81.0 % であることから、因子数 2 とすることが合理的であると判断される。因子 1 と因子 2 の因子負荷量をプロットしたグラフを図 5 に示す。また 9 個の用語は図 3 中に示すように 4 つのグループが該当した。これら用

語の選択比が最も高い米菓試料は、それぞれ「S6」「S10」「S7」「S1」であった。以降の咀嚼振動実験の分析では、これらを4つのグループからの代表的な試料品種とテクスチャー用語として扱うこととした。

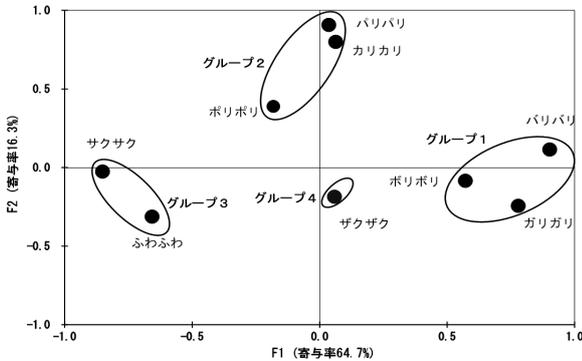


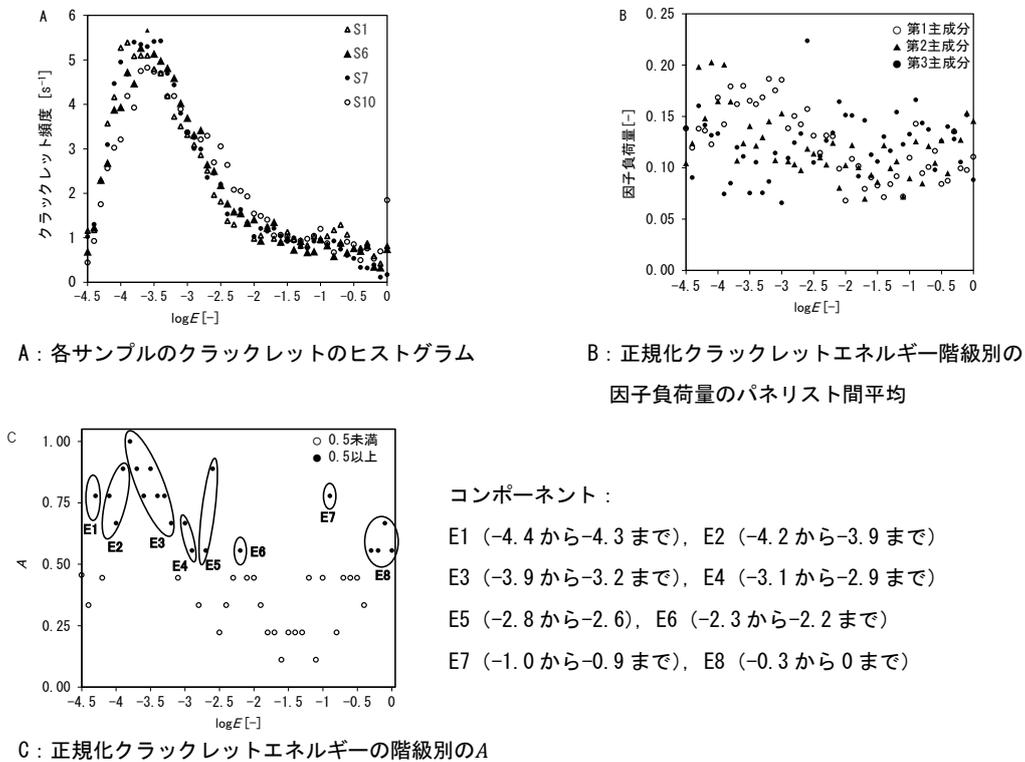
図5 米菓のテクスチャーに関する官能評価の因子分析

3.2 咀嚼振動分析と振動成分の抽出

米菓試料「S1」「S6」「S7」「S10」のEの階級別ヒストグラムを図6Aに示す。Eの常用対数值 $\log E$ は-4.5から0までを46階級に分割した。ヒストグラムより、いずれの試料も $\log E$ が-3.5付近にクラックレット頻度の最大ピークを持つ分布であることが明らかになった。またグループ2のS10は、 $\log E$ が-3.5以下で頻度が他の3つのグループに比べて最も小さかったが、 $\log E$ が-2.7以上で最も大きい傾向にあった。対照的に、グループ3のS7は $\log E$ が-0.7

から0の間で頻度が最も小さかったが、-3.5から0の間で頻度は最も大きい傾向にあった。以上の結果は、グループ間の差が単峰性分布の裾の引き方の違いに表れていることを示唆している。

正規化クラックレットエネルギーデータの主成分分析を行い、その第1主成分、第2主成分、第3主成分について、クラックレットエネルギーの階級別に因子負荷量のパネリスト間平均の値をプロットしたグラフを図6Bに示す。図6Bのデータを元に式(3)で定義したAを階級ごとに計算し、3つの主成分でそれぞれ算出したAの平均値が0.5を超える階級、すなわち過半数のパネリストの因子負荷量が平均を超える階級を官能評価に影響を与える可能性がある階級成分候補とした(図6C中の黒点プロット)。さらにその候補階級を、図6C中に示すように、白点プロットが入るまで黒点プロットが連続する一続きの範囲をコンポーネントと称し、8つのコンポーネントE1~E8に分類した。ここで、E2とE3は白点プロットで分割されていないが、それらを合わせたコンポーネントの範囲が他のコンポーネントの中で最大のコンポーネントE8よりも2倍以上も大きいため、バランスを考慮して、プロット点の中の最大値を境に前半(E2)と後半(E3)にそれぞれ分割した。この8つのコンポーネント単位でクラックレットを欠損させた修正振動波形を作成した。



A: 各サンプルのクラックレットのヒストグラム

B: 正規化クラックレットエネルギー階級別の因子負荷量のパネリスト間平均

C: 正規化クラックレットエネルギーの階級別のA

図6 正規化クラックレットエネルギーの階級別ヒストグラム

コンポーネント:

E1 (-4.4 から -4.3 まで), E2 (-4.2 から -3.9 まで)

E3 (-3.9 から -3.2 まで), E4 (-3.1 から -2.9 まで)

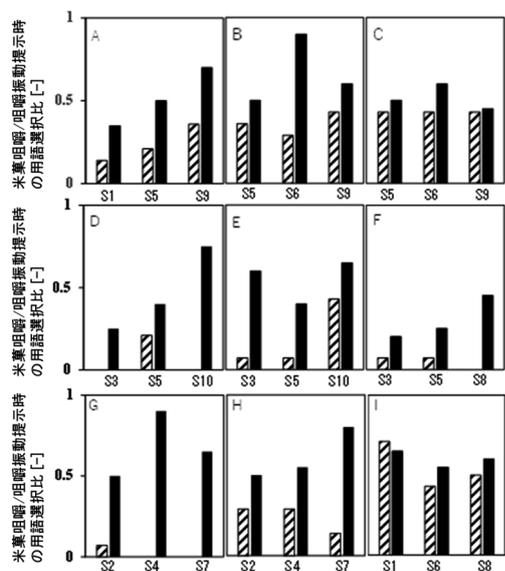
E5 (-2.8 から -2.6), E6 (-2.3 から -2.2 まで)

E7 (-1.0 から -0.9 まで), E8 (-0.3 から 0 まで)

3.3 振動刺激提示実験

3.3.1 振動刺激提示による食感の知覚喚起

米菓試料を喫食した時、および再生用咀嚼振動刺激提示時の注目する用語別の選択比を求め、テクスチャー用語別に米菓咀嚼時の用語選択比を大きい順に3つを選び、それぞれに対応する米菓試料の再生用咀嚼振動刺激提示時の用語選択比を図7に示す。「ザクザク」「バリバリ」「ガリガリ」「ボリボリ」「サクサク」「カリカリ」のテクスチャー用語で評価される米菓については、再生用咀嚼振動刺激提示時の用語選択比がゼロを示すものがなく、その再生用咀嚼振動を提示するだけでこれらの食感に関する知覚が喚起される可能性があることが明らかになった。「カリカリ」を除くテクスチャー用語は、図5に示す因子分析のプロットにおける因子1の軸で得点が大きく異なる因子得点を持つテクスチャー用語である。一方、「パリパリ」「ポリポリ」「ふわふわ」のテクスチャー用語で評価される米菓については、再生用咀嚼振動刺激提示時の注目する用語別の選択比がゼロを示すことがあり、再生用咀嚼振動だけではこうした食感に関する知覚が喚起されない可能性があるものと考えられる。



グループ1：A（ポリポリ）、B（ガリガリ）、C（バリバリ）
 グループ2：D（パリパリ）、E（カリカリ）、F（ポリポリ）
 グループ3：G（ふわふわ）、H（サクサク）
 グループ4：I（ザクザク）

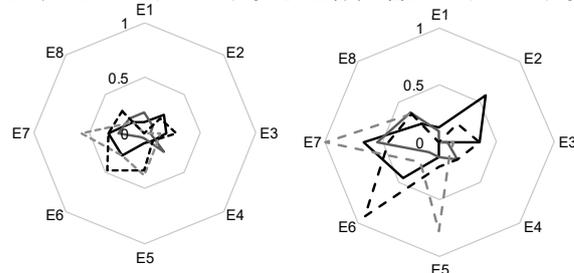
米菓咀嚼時の用語選択比を大きい順に3つ選び、それぞれに対応する米菓試料の咀嚼振動刺激提示時の用語選択比をプロットしたもの、咀嚼振動提示時 (□)、米菓咀嚼時 (■)

図7 米菓咀嚼時と咀嚼振動刺激提示時の注目する用語別の選択比

3.3.2 振動刺激提示による食感の識別

3.2 で選定した E1~E8 のコンポーネントをそれぞれ一つずつ欠損させて作成した修正振動を提示した時の識別比を図8Aに示す。8つのコンポーネントの中で最大の識別比は約0.5であった。式(6)で定義した識別感度の高い、つまり、同一組み合わせの正答率が高い3名のパネリストの識別比の結果を図8Bに示す。図8Bの方が、図8Aに示されるすべてのパネリストの識別比と比較して大きく、最大値は1.0であった。また図に示さないが、この3名を除いたパネリストの識別比の最大値は約0.4であった。このことから咀嚼振動が食感知覚の喚起に及ぼす影響を検討するためには、この3名のパネリストの結果を用いる方がより適していると考えられる。図8Bにおいて識別比がゼロとなるデータセットから、E1コンポーネントは、グループ3と4の食感喚起にはあまり影響を与えず、同様にE2コンポーネントはグループ2と3、そしてE4コンポーネントはグループ1の食感喚起にあまり影響を与えなかったことを示唆している。逆に、識別比が0.78以上となったデータセットからは、E7コンポーネントとE5コンポーネントはグループ3の、そしてE6コンポーネントはグループ4の食感の喚起に影響があることが明らかになった。またE2コンポーネントとE7コンポーネントはグループ1（識別比はそれぞれ0.57, 0.67）の食感の喚起に影響を与えるものと推察される。

A：すべてのパネリストの平均 B：正答率の高いパネリストの平均



グループ1(—)、グループ2(—)、グループ3(- -)、グループ4(- -)

図8 E1からE8までのコンポーネントに所属するクラック用語別の選択比

前述のように、今回のデータセットの中で食感喚起に比較的影響の大きい咀嚼振動コンポーネントはE2, E5, E6, E7であった。この結果は、これらのクラックレットエネルギーレベルを持つクラックレットがほとんどない（クラックレット頻度が 0 s^{-1} に近い）と、その食感を感じることができなくなるということを意味している。逆に、この頻度が大きくなる（クラックレットの数が増える）ほど、その食感を知覚しやすくなることが予想される。一方、クラックレット頻度はE2とE5コンポーネントの方がE6やE7よりも大きい（図4A）が、識別比はE2やE5コンポーネン

トの方がやや小さい (図 8B)。また, E3 コンポーネントのクラックレット頻度は今回のデータセットの中で最も大きい, グループ 2 の識別比はゼロであった。つまり, E3 コンポーネントのエネルギーレベル帯のクラックレットは, 数多く存在しても食感の知覚には寄与しないということである。以上のことから, クラックレット頻度が食感の喚起に与える影響の大きさは, クラックレットエネルギーの大きさによって異なることが推察される。

4. 結言

米菓の咀嚼振動の測定データと官能評価結果の統計解析から, 特徴的な食感をもたらす咀嚼振動の候補成分を選抜した。その候補成分を除去した振動刺激を口腔内に提示した時の官能評価から, その候補成分が食感知覚の喚起に支配的に関わるかどうかを検討する手法を新規に提案した。米菓の咀嚼時の特徴的な食感と咀嚼振動の関係について実験的に検討を行った結果, 以下の成果を得た。

- 1) 米菓咀嚼中の咀嚼振動を検出するために上口蓋部に装着する振動検出用口腔内装置を開発した。あわせて任意の咀嚼振動刺激を口腔内に提示するために上口蓋部に装着する振動再生用口腔内装置を開発した。
- 2) 米菓の咀嚼振動は, 振動の始点と終点がある一かたまりの独立波が多数集合して構成されていることを見出し, その独立波をクラックレットと称することを提案した。咀嚼振動からクラックレットを抽出し, パワースペクトル密度を計算するプログラムを開発した。
- 3) 10 種類の市販米菓を用いて咀嚼食感の官能評価を行い, 米菓食感を「カリカリ」「ガリガリ」「サクサク」「ザクザク」「パリパリ」「バリバリ」「ポリポリ」「ポリポリ」「ふわふわ」の 9 個のテクスチャー用語で表すことができることを示した。また因子分析により, 9 個の用語を 4 つのグループに分類できることを示した。
- 4) 実物の米菓を咀嚼することなく, その再生用咀嚼振動を提示するだけでこれらの食感に関する知覚が喚起される可能性があることを明らかにした。ただし, 再生用振動刺激を提示するだけでは知覚を喚起できない食感用語があることを明らかにした。
- 5) クラックレットのパワースペクトル密度から正規化クラックレットエネルギーを計算し, このエネルギーの階級別のクラックレット発生頻度のヒストグラムを作成した。このデータを主成分分析 (PCA) することで, 膨大なデータ数を縮約した。因子負荷量から咀嚼振動の特徴量の候補となる正規化クラックレットエネルギー階級を選定し, それを欠損させた修正

振動波形信号を作成し, 振動再生用口腔内装置を経由して口腔内に振動刺激として提示した。欠損前の信号との識別比から食感に関する知覚喚起に及ぼす影響を判断する手法を提案した。

- 6) 米菓咀嚼振動の正規化クラックレットエネルギーの大きさとクラックレット頻度が, その食感に関する知覚喚起に影響を与えている可能性を見出した。
- 7) 本手法により咀嚼振動が食感知覚の喚起に及ぼす影響を検討する場合, 識別能力がより高いパネリストを選定する方がより有効な結果が得られる可能性がある。

ここで提案する分析方法により, 咀嚼振動と人間の感覚に頼る官能評価を実験的に直接関連付けることができれば, 期待する食感を持つ製品を開発する過程で, 時間や費用のかかる官能評価の替わりとして本測定法を有効に利用できるものと考えられる。

本研究は, 科学研究費補助金 (JP20H01613) の助成によって実施したものである。

参考文献

- 1) Zdunek A., Cybulska J., Konopacka D, Rutkowski K.: New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples, *Journal of Food Engineering*, 99(1), 83-91, 2010.
- 2) Vickers Z.M., Christensen C.M.: Relationships between sensory crispness and other sensory and instrumental parameters, *Journal of Texture Studies*, 11(3), 291-307, 1980.
- 3) Bhattacharya M., Hanna M.A.: Textural properties of extrusion-cooked corn starch, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 20(4), 195-201, 1987.
- 4) Nixon R., Peleg M.: Effect of sample volume on the compressive force-deformation curves of corn flakes tested in bulk. *Journal of Texture Studies*, 26(1), 59-69, 1995.
- 5) Varela P., Salvador A., Fiszman S.M.: Methodological developments in crispness assessment: Effects of cooking method on the crispness of crusted foods, *LWT - Food Science and Technology*, 41(7), 1252-1259, 2008.
- 6) Saeleaw M., Schleinig G.: Effect of blending cassava starch, rice, waxy rice and wheat flour on physico-chemical properties of flour mixtures and mechanical and sound emission

- properties of cassava crackers, *Journal of Food Engineering*, 100(1), 12-24, 2010.
- 7) Salvador A., Varela P., Sanz T., Fiszman S.M.: Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis, *LWT - Food Science and Technology*, 42(3), 763-767, 2009.
- 8) Primo-Martín C., Sözer N., Hamer R.J., Van Vliet T.: Effect of water activity on fracture and acoustic characteristics of a crust model, *Journal of Food Engineering*, 90(2), 277-284, 2009
- 9) Tesch R., Normand M.D., Peleg M.: Comparison of the acoustic and mechanical signatures of two cellular crunchy cereal foods at various water activity levels, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 70(3), 347-354, 1996.
- 10) 早川文代：日本語テクスチャー用語の体系化と官能評価への利用, *日本食品科学工学会誌*, 60(7), 311-322, 2013.
- 11) 石橋 賢, 深瀧 創, 宮田 一乗: 米菓を対象としたシズル語の印象評価:ーオノマトペを中心にー, *人工知能学会論文誌*, 30(1), 229-236, 2014.
- 12) Nakamoto H, Nishikubo D, Kobayashi F: Food texture evaluation using logistic regression model and magnetic food texture sensor, *Journal of Food Engineering*, 222, 20-28, 2018.
- 13) 細井 友加里, 山谷 健太, 竹井 亮, 勝野 那嘉子, 西津貴久: 米菓の物性と構造が口どけ感に及ぼす影響, *日本食品科学工学会誌*, 65(12), 573-582, 2018.
- 14) Johnson R. A., Wichern D. W.: *Applied multivariate statistical analysis*. 6th ed, Chapter 8, Prentice-Hall (NJ), 2007.
- 15) Sivakumaran M.H., Mackenzie A.K., Callan I.R., Ainge J.A., O' Connor A.R.: The Discrimination ratio derived from novel object recognition tasks as a measure of recognition memory sensitivity, not Bias, *Scientific Reports*, 8(1), 1-13, 2018.

(受付：2021年3月3日, 受理：2021年3月27日)