“音”による食感の可視化

Objective Evaluation of Crispy and Crunchy Textures of Foods by Acoustic Analysis

杉山 妙

日清オイリオグループ株式会社
中央研究所
〒235-8558
神奈川県横浜市磯子区新森町1番地

Tae SUGIYAMA
The Nisshin Oillio Group, Ltd.
Central Research Laboratory
1 Shinmori-cho, Isogo-ku Yokohama,
Kanagawa 235-8558, Japan

村野 賢博

日清オイリオグループ株式会社
中央研究所
〒235-8558
神奈川県横浜市磯子区新森町1番地

Yoshihiro MURANO
The Nisshin Oillio Group, Ltd.
Central Research Laboratory
1 Shinmori-cho, Isogo-ku Yokohama,
Kanagawa 235-8558, Japan

論文要旨：食品の「おいしさ」には、人の五感で知覚される味・香り・食感・外観といった様々な要素が複雑に関わっている。揚げ物やスナック菓子等の固形食品の「おいしさ」評価では、サクサク・パリパリという“音”で表現される食感(テクスチャー)が重要であり、これを客観的に評価する手法が開発されている。本稿では、筆者らの研究グループが開発した「食感音響評価システム」による、咀嚼を模した食品破碎とその破碎音の解析結果を中心に、“音”による食感評価方法について解説する。

Abstract: Palatability of foods depends on many factors, such as flavor, texture, and appearance. Textures such as crispness, crunchiness, hardness, and fragility are essential in many foods and evaluated by sensory tests in general. Although food scientists and engineers have attempted objective evaluations of the characteristic textures of different foods, an optimal method for the texture evaluation is yet to be developed. Here, we focused on the theory that texture can be evaluated based on the sound created during mastication. We developed a device mechanically capable of crushing foods. By combining this food crushing device with a method to analyze the crushing sounds, we aimed to construct an objective system for texture evaluation. In this report, we introduce our system and some acoustic analysis results. It is showed that the sounds of food crunched are useful to indicate its crispness objectively.

Key words: food texture, acoustic analysis, mastication sounds, onomatopoeia

1 はじめに

人が食品を食べるときに感じる「おいしさ」は、視覚・嗅覚・味覚・聴覚・触覚の五感によって知覚され、総合的に判断されている。高橋ら¹⁾は、「おいしさ」にかかわる食品自体の状態を化学的要因と物理的要因に大別している。化学的要因には味と香りがあり、物理的要因には、テクスチャー、外観、音、温度があるとしている。柳本²⁾は、食べ物の「おいしさ」にかかわる感覚特性を調べた結果、固形食品ではテクスチャーの貢献度が高く、液状食品では味の貢献度が高いことを示している。これらのことから、食感(テクスチャー)を可視化し、

正しく客観的に評価する試みは、「おいしさ」を創造・比較する上で重要な技術領域となっている。

早川³⁾は、官能評価に用いられるテクスチャー語彙の構造を解析し、言語が異なっても、破碎の表現および空気による軽さの表現が主要な構成要素であるという共通点を見出している。また、日本語のテクスチャー用語は、445語と他言語に比較して多いが、そのうち約7割を擬音語・擬態語(オノマトペ)が占めることに起因すると推察している。例えば、揚げ物の「おいしさ」を表現するサクサク・サクッ・カリッ・パリパリ等のテクスチャー用語はすべて擬音語であり、いずれも極めて認知度が高い³⁾。このことから、食品の「おいしさ」と“音”で表現される食感(テクスチャー)が密接な関係にあることが分かる。

連絡者：杉山 妙
E-mail: t-sugiyama@nisshin-oillio.com

また、テクスチャー用語は商品パッケージや広告等で、消費者の感性に訴えて購買意欲を高めるためにも活用されている。オノマトベによって、商品の食感を直感的に伝えることで「おいしさ」を感じさせる効果や、商品への期待感と実際の食感との齟齬を軽減する効果が見込まれている⁴⁾。また、広告では適切なオノマトベを使用することによって、インパクトを与えて記憶に残らせる効果や、商品の差別化・識別化に繋げる効果も期待されている⁵⁾。

現在、食品の研究開発における食感の評価方法としては、実際に食べて評価を行う官能評価試験が一般的である。官能評価試験は実感に即して高感度である一方、熟練技術を必要とし、日間・拠点間比較が難しいという課題もある。そこで、誰でも再現性高く評価できる客観的な方法として、様々な機械・装置が開発されてきた。食品を押し潰して圧力や振動等を測定するレオメーターやテクスチャーアナライザー等の機器や、食品の構造を観察できるデジタルマイクロスコープが市販されているが、多様な食感を実感どおりに評価できる完璧な方法は未だない。

食感（テクスチャー）の定義として、日本産業規格（JIS Z8144 官能評価分析－用語）では、(食品の)テクスチャーは「口内で知覚できる食品の物理的特性、又は触覚、視覚及び聴覚によって判断できる食品の構造若しくは組成に関する特性」とされている。国際標準化機構（ISO 11036:2020）では、texture は「all the mechanical, geometrical and surface attributes of a product perceptible by means of mechanical, tactile and, where appropriate, visual and auditory receptors」（力学的、触覚的、および適切な場合は視覚的および聴覚的に知覚できる、製品の力学的、幾何学的および表面の特性すべて）とされている。

上記定義でも触れたように、食感には聴覚的に知覚される特性も含まれることから、食べたときの“音”が「おいしい」と認識される食品は、「おいしい」食感を有していると言うことができる。“音”は、食品破壊時の振動の伝播によるものであり、その破壊特性はすなわちテクスチャーそのものである⁶⁾。したがって、咀嚼などによる食品破碎時に発生する“音”を解析することは、食感を評価する上で重要である。

食感や「おいしさ」の知覚における“音”の重要性を示す研究は、1960年代前半にはDrake⁷⁾により行われ、1970～90年代にはVickers^{8, 9)}、Lee^{10, 11)}、Dacremont^{12, 13)}、Duizer¹⁴⁾らにより数多く報告されている。Dacremontら^{12, 13)}は咀嚼音をFFT解析し、アーモンドや人参等の食品を3種類の食感に分類している。Duizerら¹⁴⁾は

スナック菓子、Leeら^{10, 11)}はポテトチップスの咀嚼音をFFT解析し多変量解析を行っている。また、Zampiniら¹⁵⁾は、ポテトチップスの咀嚼音のうち高周波成分または全周波数の音圧レベルを増幅してフィードバックすることで、クリスピーネス（パリパリした食感）が強く感じられることを発見し、2008年にはイグノーベル賞を受賞している。

以上のように、食品の「おいしさ」の構成要素として食感（テクスチャー）が重要であり、食感は咀嚼音によって特徴づけることができる。このことから、食感を客観的に評価するために、機械的に咀嚼を再現し、このとき発生する破碎音や振動を解析する手法が試みられている¹⁶⁻¹⁸⁾。

本稿では、筆者らの研究グループが開発した「食感音響評価システム」による咀嚼を模した食品破碎とその破碎音の解析結果を中心に、“音”による食感評価方法について解説する。

2 “音”による食感評価

2・1 食感音響評価システム

実際に人が食べたときの音（咀嚼音）は、耳に伝わる経路によって気導音と骨導音に分けられる。気導音は空気を伝播して鼓膜に達する音で、食べている本人だけでなく周囲の人にも聞こえ、通常のマイクで録音できる。骨導音は歯から骨を経て直接内耳に伝わる音で、食べている本人にしか聞こえないが、額や耳の後ろ等に装着し振動を検知するコンタクトマイクがあれば録音できる。しかし、人が食べたときの咀嚼音は、口に含む量や噛み方、頭蓋骨の大きさ等の影響を受けるため、音量や音質、リズムには個人差があり、同じ食品であっても発生する音も知覚する音も人それぞれ異なる。したがって、客観的に評価するためには機械的に咀嚼を再現したときの音（破碎音）を解析する必要がある。

筆者らは、食品を再現性良く破碎し録音する装置（Fig. 1）と、破碎音から食感を評価する音響解析ソフトから構成される「食感音響評価システム」を開発し、評価対象食品の食感（テクスチャー）評価を行っている¹⁹⁾。本システムは、食品を試料台に載せてスイッチを押すと、エア駆動によって静かに試料台が上昇する。食品は、上部に固定してあるヒトの歯を模した破碎歯に当たり、押し潰される。そのとき発生した音（破碎音）を高性能マイクで収録し、音響解析ソフトを用いて音量・音質を表す各指標を算出する。それらと、サクサク感等の官能評価結果とを予め対応付けておくことで、以降は本システムによって食感を客観的に数値化できる。なお、本システムの破碎音は気導音であり、骨導音は加味されていない。

Fig. 1 Device to cut and crunch foods. (A) "Artificial teeth" : for cutting and crunching samples, (B) Sample stage, (C) Air cylinder, (D) Microphone.

Fig. 2 "Acoustic" and actual scores in sensory evaluation test.

いが、破碎音を聞いたときにイメージした食感の点数(音響官能評価点数)と、実際に食べたときの官能評価点数が高い相関を示すことが確認できている (Fig. 2)。したがって、破碎音の解析により、実際の食感を評価することができる。

破碎音は、様々な周波数や音圧を含んだ複合音である。周波数解析にはFFT法などの定幅分析と、オクターブ分析などの定比幅分析がある。人の耳の周波数分析機能は等比的であることから、本システムでは音量の指標として、1/3オクターブ分析にて音圧レベル(単位: dB)という物理量を算出した。また、音質の指標としてシャープネスとラフネスを用いた。どちらも人の耳にどのように聞こえるかを考慮した心理音響評価量であり、コンサートホール設計などにも利用されている。

Fig. 3 1/3 octave-band analysis of Japanese croquette. Number of days of frozen storage (■; 0, ▲; 4, ●; 7, ×; 11) and background noise (◆).

Fig. 4 Correlation between sound pressure levels and scores in sensory evaluation test.

シャープネス(単位: acum)は音の甲高さを表し、音の高低バランスが高音域側に偏ったときに大きな値をとる。ラフネス(単位: asper)は音の粗さ感を表し、音の大きさ(ラウドネス, 単位: sone)や周波数が短い周期(毎秒70回)で変動するときに最大となる。この変調周波数は、音の変動は分かっても一つ一つの音を聞き分けられないレベルであり、例えば、毎秒4回では音を聞き分けられて変動感を感じ、毎秒200回では変動があることも分からず滑らかに聞こえるという、人の耳の特性が考慮されている。

2・2 揚げ物の評価事例

「食感音響評価システム」を用いた破碎音の音響解析

Fig. 5 Correlation between sharpness and scores in sensory evaluation test.

Fig. 6 Correlation between roughness and scores in sensory evaluation test.

結果と食感の相関について事例を示す。コロッケの冷凍保存試験では、破碎音の大きさ（音圧レベル）はいずれの周波数帯域においても日数経過に伴い低下する傾向が見られる（Fig. 3）。また、保存日数によらず分布割合が大きい1,600～3,150 Hz帯域の合成レベル（dBの和）を算出すると、サクサク感の官能評価点数と高い相関を示す（Fig. 4）。同様に、音質の指標であるシャープネスとラフネスも、食感官能評価点数と高い相関を示す（Figs. 5, 6）。

コロッケ等の揚げ物では、調理工程で衣側から水分が抜けて、フライ油脂に置換される。出来立ての揚げ物はサクサクで油っこくないが、その食感を長時間にわたり維持することは難しい。保存中に食感が劣化していく主な原因は、揚げ物の内側から衣部への経時的な水分移行であり、フライ油脂によっては劣化の進行を抑制できることが報告されている^{20, 21)}。そこで、2種類の油脂（大豆油、パームオレイン油）で調理したコロッケを例に、冷凍保存による食感変化を経時的に比較した。官能評価

結果からは、大豆油よりもパームオレイン油で調理したコロッケの方がサクサク感を維持することが示されている。これらの破碎音の音響解析を行うと、パームオレイン油で調理したコロッケでは音圧レベル・シャープネス・ラフネスの経時変化が緩やかなことが分かる（Table 1）。このように、音響解析によって冷凍保存に適したフライ油脂の選択を客観的に行うこともできる。

2・3 スナック菓子の評価事例

破碎音の音響解析結果と食感の相関は、評価対象の食品によって異なる。その評価事例として、あるスナック菓子では標準品aと比較品b, cの外観形状が等しく、音圧レベルの差異が小さいが（Fig. 7 (A)）、比較品bのシャープネスは小さく、ラフネスは大きいという音響解析結果が得られている（Fig. 7 (B), (C)）。このときの官能評価結果から、シャープネスはサクサク感・軽さと、ラフネスはガリガリ感・かたさとの相関が示唆されている。したがって、食感を評価するためには音量だけでなく音質も重要であると言える。ただし、各指標と食

Table 1 Actual score in sensory evaluation test and results of acoustic analysis.

	フライ油脂	調理直後	保存4日目	保存7日目	保存11日目
食感官能試験点数	大豆油	4.0	3.1	2.0	0.5
	パームオレイン油	4.0	3.4	2.8**	1.0
音圧レベル [dB]	大豆油	59.4	57.6	55.7	52.2
	パームオレイン油	59.3	58.8***	57.5***	52.6*
シャープネス [acum]	大豆油	1.71	1.58	1.49	1.44
	パームオレイン油	1.71	1.62*	1.56**	1.46*
ラフネス [asper]	大豆油	1.11	0.91	0.77	0.72
	パームオレイン油	1.12	0.98**	0.93***	0.82*

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p < 0.005$ (対大豆油)

Fig. 7 Acoustic analysis of snacks (A) Sound pressure level, (B) Sharpness, (C) Roughness.

Fig. 8 Three kinds of potato chips: A, B, and C.

Fig. 9 Acoustic analysis of potato chips (A) Loudness, (B) Sharpness, (C) Roughness. Letters indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

感の対応付けは食品毎に異なるため、その都度検討が必要である。

また、市販のポテトチップス3種の食感評価事例を示す。試料Aは標準的な平らで薄い形状でパリッとした食感、試料Bはウェーブカットで厚いが割れやすいサクッ・ホロッとした食感、試料Cは堅くてカリカリとした食感である (Fig. 8)。音量の指標として、音圧レベル (物理量) の代わりにラウドネス (心理音響評価量) を用いて、破碎音の音響解析を実施した。ラウドネス・シャープネス・ラフネスの値を比較すると、3種のポテトチップス間に有意差があり (Fig. 9 (A)~(C)), 心理音響評価量を用いて食感を客観的に評価できることが示された。

3 おわりに

本稿では、食品の「おいしさ」にかかわる食感の可視化にあたり、“音”の重要性とその評価方法について紹介した。このほかにも、咀嚼時の音に関する研究事例として、ヒトの咀嚼をさらにリアリティ高く再現する装置を用いた評価方法や、それぞれの食品・食感に特化した評価方法等の報告がなされている。牧野ら²²⁾は、人間が骨伝導により咀嚼音を取得する仕組みを模倣し、アクリル歯・アクリル骨・左右ふたつの振動センサからなるシステムを試作している。主成分分析から求めた破碎音の定位感・広がり感は食感と高い相関を示し、冷凍保存したコロッケを用いてクリスピー感の特徴量も抽出して

いる。また、西津^{6, 23)}は、天ぷら衣の微細構造が壊れる際の破碎振動が小さなクラック振動の集合体であること、その発生頻度がサクサク感の官能評価結果と高い相関があることを示している。

人の咀嚼を模した装置を用いた破碎現象を、音や圧力等の物理的指標から解析するというアプローチは客観性が高いものの、官能評価結果（実感）との対応付けや特徴量の抽出といった点では課題を有する。その課題を解決するために、近年では食感評価にAI技術を組み合わせ、特徴量の抽出や食感の判別に活用する事例も増えてきている。加藤ら²⁴⁾は、破碎音と荷重のデータを用いてCNNモデルを構築し、スナック菓子5種を判別できると報告している。吉田ら²⁵⁾は、圧縮試験時に計測した圧力の生データを用いて機械学習による食感分析を実施しており、市販のポテトチップス3種を約80%の確度で判別できると報告している。このように、食感評価技術に異なる技術を組み合わせることによって、多様な食品の評価や、官能評価試験における課題が解決される可能性もある。

また、“音”による食感評価研究を社会実装する方向性として、咀嚼音の増強や呈示により、むしろ人の知覚を変化させる試みも行われている。小泉ら²⁶⁾は、咀嚼音を提示できる「食感拡張装置」を試作し、ポテトチップスやビスケットの食感知覚を変化させている。遠藤ら²⁷⁾は、筋肉咀嚼音のフィードバックによって介護食の食感が好ましく知覚される可能性を示している。今後、ウェアラブル端末等の進化にともない、食感評価研究は“音”の活用によって積極的に人の感じ方を変化させ、「おいしさ」を増強する技術へと発展することも期待される。

文 献

- 高橋亮, 西成勝好, ぶんせき, **8**, 388-394 (2010). (Takahashi, R. *et al.* *Bunseki*, **8**, 388-394 (2010))
- 柳本正勝, 日本調理科学会誌, **35**, 32-36 (2002). (Yanagimoto, M. *J. Cookery Sci. Jpn.*, **35**, 32-36 (2002))
- 早川文代, 日本食品科学工学会誌, **60**, 311-322 (2013). (Hayakawa, F. *J. Jpn. Soc. Food Sci.*, **60**, 311-322 (2013))
- 石橋賢, 深瀧創, 宮田一乗, 人工知能学会論文誌, **30**, 229-236 (2015). (Ishibashi, K. *et al.* *Trans. Jpn. Soc. Artif. Intell.*, **30**, 229-236 (2015))
- 隅田孝, 四天王寺大学紀要, **67**, 295-314 (2019). (Sumida, T. *Shitennoji University Bulletin*, **67**, 295-314 (2019))
- 西津貴久, 日本調理科学会誌, **50**, 127-132 (2017). (Nishitsu, T. *J. Cookery Sci. Jpn.*, **50**, 127-132 (2017))
- Drake, B. K., *J. Food Sci.*, **28**, 233-241 (1962).
- Vickers, Z. M., Wasserman, S. S., *J. Texture Stud.*, **10**, 319-332 (1980).
- Vickers, Z. M., Carol, M. C. *J. Texture Stud.*, **11**, 291-308 (1980).
- Lee Iii, W. E., Deibel, A. E., Glemblin, C. T., Munday, E. G., *J. Texture Stud.*, **19**, 27-38 (1988).
- Lee, W. E., Schweitzer, M. A., Morgan, G. M., Shepherd, D. C., *J. Texture Stud.*, **21**, 165-178 (1990).
- Dacremont, C., *J. Texture Stud.*, **26**, 27-43 (1995).
- Dacremont, C., Colas, B., Sauvageot, F., *J. Texture Stud.*, **22**, 443-456 (1991).
- Duizer, L. M., Campanella, O. H., Barnes, G. R. G., *J. Texture Stud.*, **29**, 397-411 (1998).
- Zampini, M., Spence, C., *J. Sens. Stud.*, **19**, 347-363 (2004).
- 相良孝昭, 佐伯剛, 山口誠, 日本食品工業学会誌, **16**, 350-354 (1969). (Sagara, T. *et al.* *NIPPON SHOKUHIN KOGYO GAKKAISHI*, **16**, 350-354 (1969))
- Seymour, S. K., Hamann, D. D., *Transactions of the ASAE*, **27**, 1245-1250 (1984).
- Sanz, T., Primo-Martín, C., Van Vliet, T., *Food Res. Int.*, **40**, 63-70 (2007).
- 豊島尊, 土屋欣也, 佐藤史明, 橘秀樹, 日本食品科学工学会誌, **51**, 388-394 (2004). (Toyoshima, T. *et al.* *J. Jpn. Soc. Food Sci.*, **51**, 388-394 (2004))
- 白澤聖一, 日本農芸化学会2003年大会講演要旨集, 東京, 203 (2003). (Shirasawa, S. *Annual Meeting of the Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry*, 2003 (Tokyo), Abstract 203 (2003))
- 新谷勲, 丸山武紀, 今村正男, 牧野輝男, 松本太郎, 油化学, **19**, 313-318 (1970). (Niiya, I. *et al.* *J. Jpn. Oil Chem. Soc.*, **19**, 313-318 (1970))
- Makino, Y., Ono, N., Ando, S., Sano, F., Toba, S., *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. SICE 2002*, **4**, 2163-2166 (2002).
- 西津貴久, 日本食品工学会誌, **21**, 53-62 (2020). (Nishitsu, T. *J. Jpn. Food Eng.*, **21**, 53-62 (2020))
- Kato, S., Wada, N., Ito, R., Shiozaki, T., Nishiyama, Y., Kagawa, T., *Future Internet*, **11**, 68 (2019).
- 吉田駿介, 武政誠, 人工知能学会全国大会論文集 第34回全国大会, 1F4OS2b03-1F4OS2b03 (2020). (Yoshida, S. *et al.* *Proceedings of the Annual Conference of JSAI, 34th Annual Conference*, 2020, 1F4OS2b03 (2020))
- 小泉直也, 田中秀和, 上間裕二, 稲見昌彦, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **18**, 141-150 (2013). (Koizumi, N. *et al.* *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, **18**, 141-150 (2013))
- Endo, H., Ino, S., Fujisaki, W., *Appetite*, **116**, 493-501 (2017).