

多孔質固体食品のテクスチャーの 評価に関する研究 第2報

Proposal of Texture Evaluation Method of Porous Solid Foods II

行方 千晴、二宮 和美、太田 みふあ
谷米 (長谷川) 温子、熊谷 仁

Chiharu NAMEKATA, Kazumi NINOMIYA, Mifua OTA,
Atsuko HASEGAWA-TANIGOME, and Hitoshi KUMAGAI

1. 緒言

おいしさに影響を及ぼす要因のうち、知覚的要因には味覚で感じる味、嗅覚で感じる香りのほか、触覚・聴覚で感じる食感（テクスチャー）があり、特に、固形の食品では歯応えや口当たりなどの食感がおいしさに大きく影響する。早川らは、日本語の食感を表す擬音語・擬態語に関して特徴づけを行い、食感表現を収集し、445語もの用語から成るリストを作成した。外国語の研究結果と比べると、英語やドイツ語で約100語、フランス語227語、中国語144語と、日本語の食感表現の数の多さがうかがえる^{1)~3)}。ただ、こうした食感を表す擬音語・擬態語と機器測定で求められる客観的な物理量との関係は難しい。

テクスチャーと関連する力学的な機器測定は多数存在する。しかし、ヒトの食感覚には、微小変形下での測定（静的粘弾性測定や動的粘弾性測定など）より大変形を伴う力学的測定が対応するといわれている^{4)~6)}。

これまで食感に関する研究は、破断試験や定速圧縮試験をはじめとする力学的測定や官能検査など数多くなされてきた^{7)~9)}。しかし、多孔質固体食品に関しては、破断応力や破断点の個数測定以上の定量的な議論はほとんど見当たらない。

前報¹⁰⁾において我々は、サクサクなどの擬

音語で表現される多孔質固体食品の食感に着目し、市販の多孔質固体食品および自作の焼菓子（クッキー）に関して、定速圧縮試験から得られる物理量を用いて食感の数値化を試みた。最初に、市販の多孔質固体食品を用いて、定速圧縮試験によるテクスチャー評価法に関して検討を行った。次いで、配合を変えた数種類の自作のクッキーのテクスチャーに関して検討を行った。その結果、破断試験から f vs. γ 曲線を微分し、得られた df vs. $d\gamma$ の頻度（個数）の分布から食感を評価しうることを示した¹⁰⁾。

本研究では、多孔質固体食品の“しっとり感”と、“ほろほろ”、“サクサク”、“ザクザク”などの「固体的な」食感の差異に着目し、材料あるいは保存条件の異なる自作クッキーに関して、定速圧縮試験から得られる測定値を用いて食感の数値化を試みた。

2. 方法

2.1. 試料および自作クッキーの調製方法

小麦粉として、薄力粉である「日清バイオレット」（株式会社日清製粉ウェルナ、東京）を用いた。砂糖として、グラニュー糖は「PGKグラニュー糖」（大日本明治製糖株式会社、東京）、粉糖は「NZ粉糖」（日新製糖株式会社、東京）を用いた。油脂として、無塩バターである「雪印北海道バター食塩不使用」（雪印メグミルク株式会社、東京）を用いた。鶏卵はレギ

ユラー卵（株式会社タカムラ、富山）を用いた。

材料の混練には、卓上混捏機 キッチンエイド（KitchenAid KSM3311XHT, KitchenAid, USA）（図1）を使用し、回転数や混捏時間などを統一することで、安定した試料が調製可能となった。アームは平面ビーターを用いた。

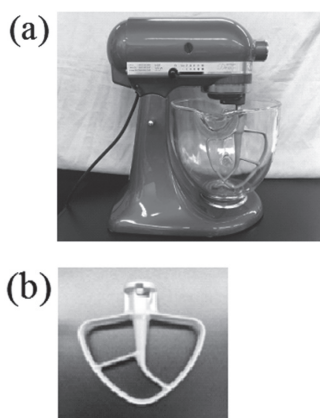


図1 クッキー調製に使用した機器（KitchenAid KSM3311XHT）
(a) 本体
(b) 平面ビーター

クッキーの調製法を図2に示す。室温に戻した無塩バターをキッチンエイドで2分攪拌し、砂糖（グラニュー糖あるいは粉糖）を加え2分攪拌後、蒸留水（および鶏卵）を加え2分攪拌した。次に、小麦粉を加え2分混捏し、ボウル壁面に付着した生地を剥ぎ落とし、さらに1分混捏した。混捏後、生地をひとまとめにし、4℃の冷蔵庫で30分寝かした後、厚さ5mm、直径45mmの円形に成型した。成型した生地は、180℃に予熱したオーブン（ガス高速オーブン DR320C, 株式会社ハーマン、大阪）で15分焼成後、室温で30分放冷し測定に用いた。

材料の配合割合および調製したクッキーの食感を表1に示す。本研究では、小麦粉は薄力粉、油脂は無塩バターを用いた。また、糖としてグラニュー糖、鶏卵無添加のクッキーをコン

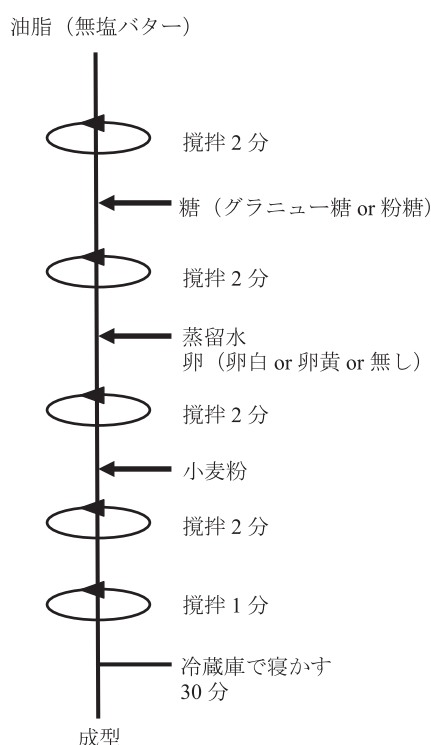


図2 クッキーの調製手順

表1 自作クッキーの配合割合

| | N コントロール | A 粉糖クッキー | B 卵白クッキー | C 卵黄クッキー |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 薄力粉 (g) | 200 | 200 | 200 | 200 |
| グラニュー糖 (g) | 60 | 0 | 60 | 60 |
| 粉糖 (g) | 0 | 60 | 0 | 0 |
| 無塩バター (g) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 蒸留水 (g) | 40 | 40 | 5 | 5 |
| 卵白 (g) | 0 | 0 | 35 | 0 |
| 卵黄 (g) | 0 | 0 | 0 | 35 |
| 食感 | ほろほろ | サクサク | ザクザク | しっとり |

トロール（以下、クッキー N）とした。クッキー N は、“ほろほろ”した食感であった。クッキー N に対して、糖を粉糖に置き換えたクッキーを粉糖クッキー（以下、クッキー A）とする。クッキー A は、“サクサク”した食感であった。クッキー N に卵白を添加したクッキー

ーを卵白クッキー（以下、クッキー B）とする。クッキー B は、“ザクザク”した食感であった。クッキー N に卵黄を添加したクッキーを卵黄クッキー（以下、クッキー C）とする。クッキー C は、“しっとり”した食感であった。

2.2. 定速圧縮試験

装置は、レオメータ（レオナー RE-3305C, 株式会社山電, 東京）を用いた。測定は、直径 ϕ 3 mm × 高さ 22 mm の樹脂製円筒型プランジャー（株式会社山電, 東京）を用い、測定速度 1 mm/s, 歪み 90% まで圧縮し（図 3）、荷重 f vs. 歪み γ のプロットを得た。次に、ソフトウェア解析により微分波形（ $df/d\gamma$ vs. γ プロット）を算出した。

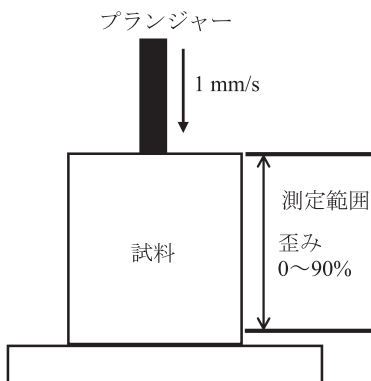


図3 定速圧縮試験と歪み

2.3. 吸湿試料の調製

“しっとり感”に対する水の影響を評価するため、クッキー N を吸湿させ、テクスチャー変化を測定した。クッキー N を、飽和塩化ナトリウム溶液にて相対湿度 75% に調整したデシケーターへ入れ、 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の恒温器内に一定時間（1 日、3 日、5 日、7 日）保持した。

2.4. 含水率測定法

クッキー N, クッキー A, クッキー B, クッキー C を吸湿させたクッキーを乳鉢で粉碎し秤量瓶へ入れ、 $135^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の乾熱器で 2 時間

乾燥させ、以下の式から含水率を算出した。

$$\text{含水率} [\%] = \{(\text{乾燥前の重量}) - (\text{乾燥後の重量}) / (\text{乾燥前の重量})\} \times 100$$

3. 結果

図 4 に、自作クッキーの荷重 f vs. 歪み γ 曲線を示す。“ほろほろ”した食感のクッキー N に関しては、歪み 5% 付近に破断に伴う鋭いピークが確認され、歪み 50% 付近まで荷重は一定値を示した（プランジャー下部にやや固い層があることを意味する）。“サクサク”した食感のクッキー A（粉糖使用）では、歪み 20% 以下で破断に伴うと考えられる 2 つの大きなピークが、歪み 20% 以上では荷重の小さな多数の破断点がみられた。“ザクザク”した食感のクッキー B（卵白使用）ではクッキー N と比較して、鋭いピークが歪み 20% 以下に 1 つ認められ、歪み 50% 付近に荷重が大きな破断点がみられた。一方、“しっとり”した食感のクッキー C（卵黄使用）はクッキー N と比較して、緩やかなピークが認められ、その荷重は小さくなった。

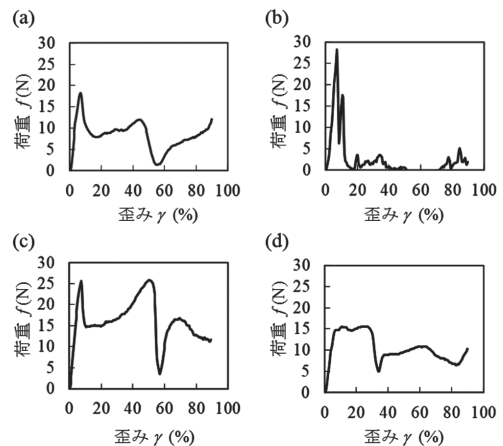


図4 自作クッキーの破断曲線
(a) クッキー N (b) クッキー A
(c) クッキー B (d) クッキー C

図 5 に、自作クッキーの微分波形を示す。クッキー N とクッキー A の微分波形は、 $df/d\gamma$ の

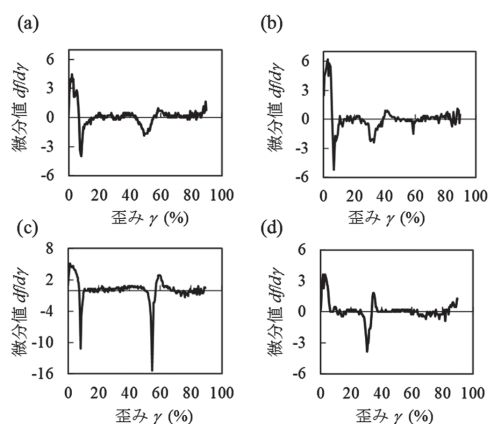


図5 自作クッキーの微分波形
(a) クッキーN (b) クッキーA
(c) クッキーB (d) クッキーC

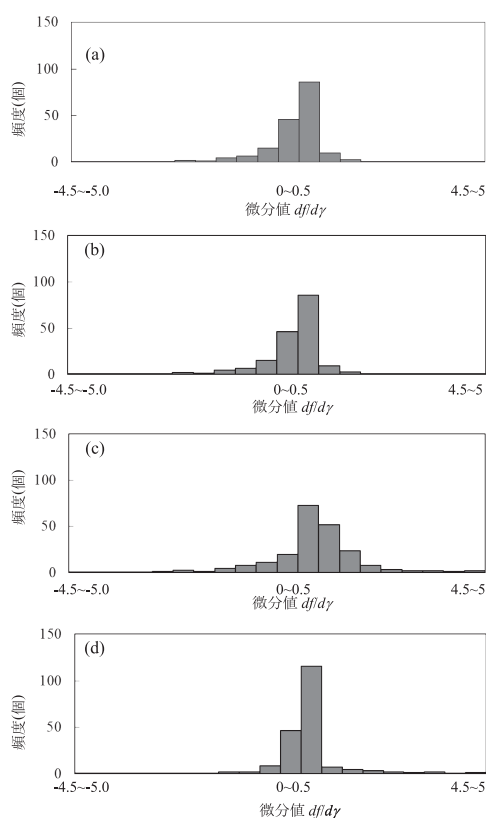


図6 自作クッキーの $df/d\gamma$ の頻度分布
(a) クッキーN (b) クッキーA
(c) クッキーB (d) クッキーC

値が変化する歪みの位置は異なるものの、比較的似たプロフィールだった。“ザクザク”した食感のクッキーBでは、歪み7%および55%で鋭いピークが見られた。クッキーCでは、歪み30%付近に大きな $df/d\gamma$ 値の変化が観察された。

図6に、自作クッキーに関して $df/d\gamma$ の頻度分布を示す。 $df/d\gamma$ の頻度分布においては、クッキーN、クッキーA、クッキーBには広がりが見られ、クッキーCは0付近の一定値の範囲に集まった。

図7に、クッキーNに関して、吸湿に伴う f vs. γ 曲線と微分波形の変化を示す。相対湿度75%下で保存1日の試料では、保存0日（作り

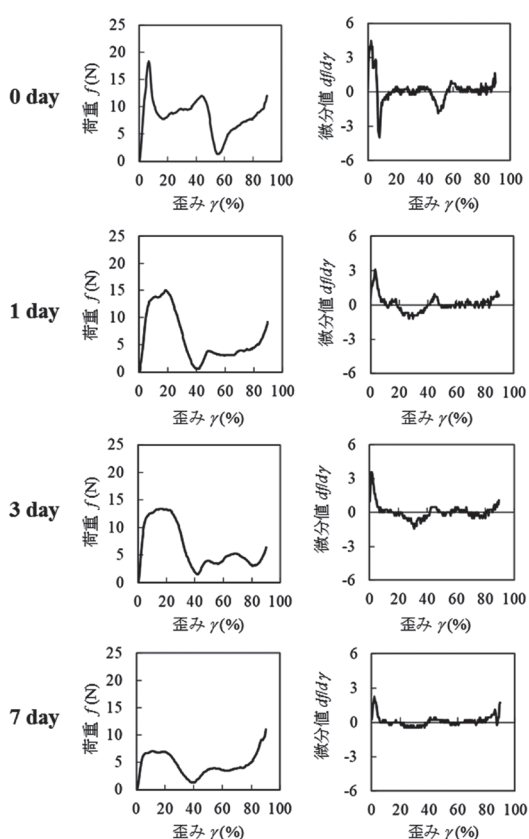


図7 吸湿に伴う破断曲線（左）と微分波形（右）の変化（クッキーN）

たて)の試料で見られる低歪みでの鋭い破断のピークが消滅した。また、相対湿度75%下での保存日数の経過に伴い、歪み0~40%に見られる破断荷重が減少した。また、各歪みにおける $df/d\gamma$ の値の幅は保存日数の経過に伴い小さくなる傾向がみられた。

図8に、クッキーNに関して、吸湿に伴う $df/d\gamma$ 値の頻度分布の変化を示す。相対湿度75%下での保存日数の経過に伴い、 $df/d\gamma$ 値の頻度分布の幅は狭くなる傾向がみられた。

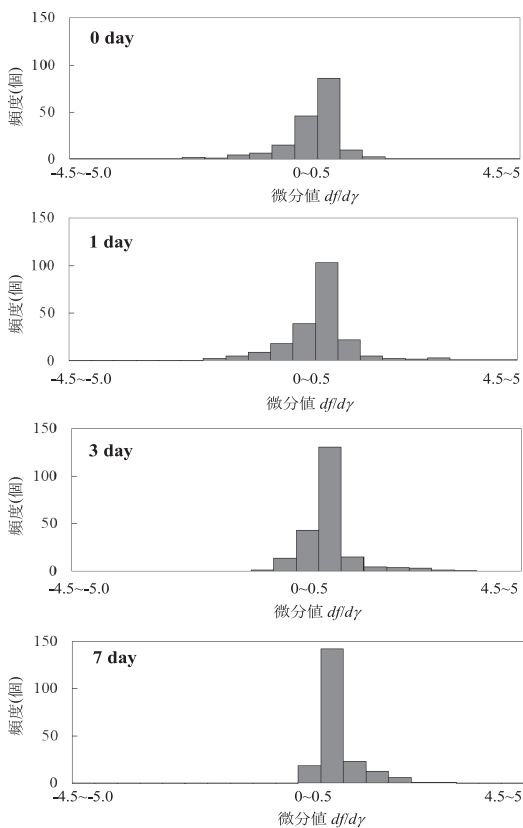


図8 吸湿に伴う $df/d\gamma$ の頻度分布の変化(クッキーN)

図9に、相対湿度75%下で保持したクッキーNの含水率変化を示す。保存日数の経過に伴い含水率が約6%から約12%に上昇した。

図10に、クッキーN、クッキーNを7日間

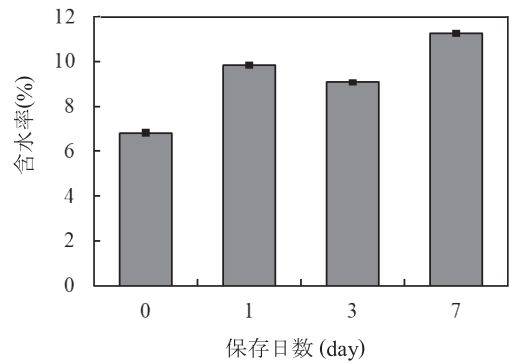


図9 クッキーNの吸湿に伴う含水率の変化

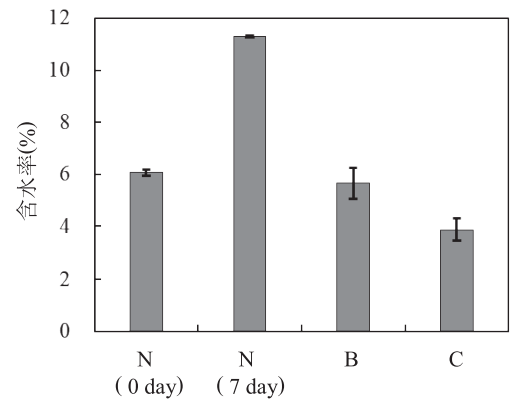


図10 各種クッキーの含水率

吸湿させたクッキー、クッキーB(卵白使用)、クッキーC(卵黄使用)の含水率を示す。クッキーN(保存0日)とクッキーBの含水率は、約6%だったが、クッキーCの含水率は約4%と最も低かった。

4. 考察

前報においては、市販の多孔質固体食品に関して、“しっとり”とした食感のイングリッシュマフィンおよびパウンドケーキ，“サクサク”とした食感のクッキーを用いて検討を行った。その結果、マフィンおよびパウンドケーキでは f vs. γ 曲線はゆるやかな曲線を描き、破断点は

見られなかった。一方，“サクサク”とした食感を持つクッキーでは，多数の破断点が見られた。また，マフィンおよびパウンドケーキは，微分値 $df/d\gamma$ に大きな変化が見られず，クッキーに関しては， $df/d\gamma$ の値が大きく変化した。さらに，マフィンの方が $df/d\gamma$ の頻度分布の幅が狭かった¹⁰⁾。本研究においても，図6～図8にみられるように，“しっとり”した食感のクッキーC（卵黄使用）や吸湿したクッキーNは，“ほろほろ”（クッキーN），“サクサク”（クッキーA），“ザクザク”（クッキーB）した食感のクッキーに比べて， $df/d\gamma$ の値の変化はやや小さく， $df/d\gamma$ の頻度分布の幅が狭かった。このことから，本研究においても $df/d\gamma$ の頻度分布により，多孔質固体食品の“サクサク感”，“しっとり感”などの食感を定量的に評価しうることが示された。

図4に示すように，クッキーB（卵白使用）のクッキーにおいては，クッキーの f vs. γ 曲線に2つの荷重の大きな破断点が観察された。1つ目の破断点は，プランジャーがクッキー表面の組織を破壊する際の抵抗によると考えられる。2つ目の破断点は，プランジャーがクッキー中層に到達する際，表面の組織や内部の構造が破壊され，それらが蓄積した粉体層が圧縮，破壊されたことが原因と考えられる。つまり，本研究では円筒状のプランジャーによる貫入試験を行ったことにより，破壊された粉体層の抵抗を検出したため， f vs. γ 曲線は噛み砕いた時にクッキーが崩れる“ザクザクした”食感を反映したことを意味する。ただ，“ほろほろした”食感のように一度咀嚼後に完全に崩れるようなテクスチャーの食品の場合，円筒状プランジャーを用いた貫入試験よりも面積が大きなプランジャーを用いた圧縮試験の方が，テクスチャーをより反映した測定値を得られる可能性が考えられる。テクスチャーによるプランジャーの選定については今後の課題である。

早川らは，食感覚の擬音語・擬態語はテクスチャー用語を中心に構成されており，パウンド

ケーキは“しっとり”，クッキーやせんべいは“サクサク”とした用語に分類されると述べている¹⁾。食感表現は，含有する水分の影響も受けるといわれており，“しっとり”した食品のほうが“サクサク”した食品よりも水分を多く感じる傾向にある。前報で使用したマフィンの水分は46%であり，比較的水分の多い多孔質デンプン食品である¹¹⁾。一方，通常のクッキーの水分は約3%であるため，クッキーは水分の少ない多孔質デンプン食品といえる¹¹⁾。図10に示すように，本研究で調製したクッキーの含水率は約4%から6%である。また，図9に示すように，クッキーNは相対湿度75%下，7日間で含水率が約12%まで上昇した。乾燥食品は湿気を帯びるとテクスチャーが変化し，品質が劣化しやすくなる。特に，クッキーやせんべいは吸湿して軟化し，湿気ると“サクサク”“パリパリ”とした食感が失われ食味が低下する。これらの機構には，水を可塑剤とするガラス転移が関わっているとされる¹²⁾。低水分含量の食品であるキャンディー，パスタ，シリアルおよびクッキーなどはガラス（非晶質の固体）であり，昇温あるいは水分の吸湿・収着によってラバー（ゴム）化する¹³⁾⁻¹⁵⁾。この現象および温度はそれぞれガラス転移，ガラス転移点 T_g とよばれている。近年，ガラス転移は食品の劣化や保存に関わる現象を説明する概念として着目されてきている。食品の吸湿と食感の関係については，ガラス転移に関するものも含めて様々な研究がなされているが，頻度分布による詳細な研究はなされていない¹²⁾¹⁶⁾⁻²⁰⁾。

和田らおよび肥後らは，吸湿により糊化度の高い米煎餅およびコーン製品は，試料内部での結着力が強く，結合水が多いため硬化するが，クッキーなどの小麦粉製品は糊化度が低く試料内部での結着力が弱いため軟化すると報告しており¹⁸⁾⁻²⁰⁾，本実験の結果と合致する。また，相対湿度75%下では水の可塑性効果により，試料のガラス転移点 T_g が下がり，試料は徐々にラバー化していると考えられる。ガラス転移

点 T_g の水分含量 Wg (15 ~ 25℃) については、焼菓子で 14 ~ 22%, 小麦デンプンで 18 ~ 22% との報告されている¹⁶⁾¹⁷⁾。図 9 に示すように、クッキー N の含水率は、相対湿度 75% 下において、約 6% から 7 日間で約 12% まで増加している。吸湿に伴うクッキーの可塑化によりクッキーのガラス転移点が低下した結果、しっとりした食感になったと考えられる。

図 7 に見られるように、相対湿度 75% 下で保存 1 日の試料では、保存 0 日（作りたて）の試料で見られる低歪みでの鋭い破断のピークが消滅した。これは、試料の表面の吸湿によると考えられる。また、相対湿度 75% 下での保存日数の経過に伴い、歪み 0 ~ 40% に見られる破断荷重が減少した。これは、保存日数の経過に伴い、水が試料内部に拡散したことによって試料の可塑化が内部まで進み、プランジャーにかかる抵抗が小さくなったためと考えられる。

図 10 に見られるように、卵黄を使用したクッキー C は、含水率がクッキー N やクッキー B に比べて含水率が低いにも関わらず、しっとりした食感を示した。卵黄を使用していないクッキーでは、水分とグリアジンの相互作用によってグルテン構造が形成されるといわれている²¹⁾²²⁾。クッキー C においては、卵黄に含まれる界面活性成分が油脂に対してミセルを形成し、油脂がクッキー組織中に均一に分散することでグルテン形成を抑制し、しっとりした食感を示したと考えられる²³⁾。

以上から、クッキーの“しっとり感”は水分量だけでは決定しないことが示された。また、 f vs. γ 曲線や $df/d\gamma$ の頻度分布により、多孔質固体食品の“サクサク感”、“しっとり感”などの食感が定量的に評価しうることが示された。

前報では、 f vs. γ 曲線の歪み範囲を三領域 (0 ~ 30%, 30 ~ 60%, 60 ~ 90%) に分けて解析することにより、試料の部位による食感の差異が $df/d\gamma$ の頻度分布により評価しうることを示した¹⁰⁾。本研究において相対湿度 75% 下で吸湿させたクッキー N に関しても、試料表面

と内部では、含水率もテクスチャーも異なっている可能性がある。吸湿させたクッキーをはじめ、本研究で検討した試料に関しても、 f vs. γ 曲線の歪み範囲を三領域に分けて解析を行うことが今後の課題である。

5. まとめ

しっとりした食感の吸湿したクッキー N (コントロール) と卵黄を使用したクッキー C は、含水率には大きな差があったが、 $df/d\gamma$ の頻度分布はどちらも狭かった。このことから、 f vs. γ 曲線や $df/d\gamma$ の頻度分布により、多孔質固体食品の“サクサク感”、“しっとり感”などの食感が定量的に評価しうることが示された。また、しっとり感は水分量だけでは決定しないことが示された。

参考文献

- 1) 早川文代, 畑江敬子, 島田敦子: 日本食品科学工学会誌, 47, 197-207 (2000).
- 2) 池田岳郎, 早川文代, 神山かおる: 日本食品工学会誌, 7, 119-128 (2006).
- 3) 早川文代: 日本家政学会誌, 60, 69-72 (2009).
- 4) 熊谷仁, 秋間彩香, 谷米 (長谷川) 温子, 二宮和美: 「高齢者用食品の開発と市場動向」, 株式会社シーエムシー出版, 東京, 2019, pp. 10-30.
- 5) 熊谷仁, 秋間彩香, 谷米 (長谷川) 温子, 二宮和美, 熊谷日登美: 化学と生物, 57, 279-288 (2019).
- 6) 熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子: 「進化する食品のテクスチャー研究」, 株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, 2011, pp. 183-199.
- 7) 四宮陽子: 日本調理科学会誌, 33, 198-203 (2000).
- 8) 森岡克司, 志水寛: 日本水産学会誌, 56, 531-536 (1990).
- 9) 土屋京子, 島村綾, 成田亮子, 加藤和子,

- 峯木眞知子, 長尾慶子: 日本調理科学会誌, 46, 275-280 (2013).
- 10) 二宮和美, 行方千晴, 太田みふあ, 谷米(長谷川) 温子, 熊谷仁: 共立女子大学家政学部紀要, 69, 77-84 (2023).
- 11) 「日本食品成分表 2022 八訂」, 医歯薬出版, 東京, 2022.
- 12) 川井清司: 日本食品工学会誌, 19, 9-14 (2018).
- 13) 熊谷仁, 熊谷日登美, 高田昌子: 「食品工学入門—食品製造・保存の考え方」, アイ・ケイコーポレーション, 東京, 2006.
- 14) E. Shimazaki, A. Tashiro, H. Kumagai, and H. Kumagai: *Biosci. Biotech. Biochem.*, 81, 743-749 (2017).
- 15) 熊谷仁: 日本食品工学会誌, 21, 161-169 (2020).
- 16) S. Louise and L. Harry: *J. Food Eng.*, 22, 143-188 (1994).
- 17) A. Mizuno, M. Mitsuiki and M. Motoki: *J. Agric. Food Chem.*, 46, 98-103 (1998).
- 18) 和田淑子, 小川慶子, 肥後温子: 日本食品科学工学会誌, 49, 771-781 (2002).
- 19) 和田淑子, 肥後温子: 日本食品科学工学会誌, 54, 253-260 (2007).
- 20) 肥後温子, 和田淑子, 佐藤之紀: 日本食品科学工学会誌, 59, 572-582 (2012).
- 21) 山崎清子, 島田キミエ, 渋谷祥子, 下村道子, 市川朝子, 杉山久仁子, 米田知恵, 大石恭子: 「New 調理と理論 第二版」, 同文書院, 東京, 2021, pp. 111-121, pp. 339-342.
- 22) 片桐実菜, 北畠直文: 化学と生物, 52, 530-534 (2014).
- 23) 和田淑子, 橋本慶子: 日本栄養・食糧学会誌, 40, 505-508 (1987).