

# 糖質食品のおいしい食感と物性と構造の解析

誌名	応用糖質科学：日本応用糖質科学会誌 = Bulletin of applied glycoscience
ISSN	21856427
著者名	片岡,明日香 中村,卓
発行元	日本応用糖質科学会
巻/号	9巻4号
掲載ページ	p. 243-248
発行年月	2019年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat





調理学を用いた糖質研究

# 糖質食品のおいしい食感と物性と構造の解析



片岡明日香 (かたおか あすか)<sup>1</sup>

中村 卓 (なかむら たかし)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 明治大学農学研究科農芸化学専攻 学生

<sup>2</sup> 明治大学農学部農芸化学科食品工学研究室 教授

## 1. はじめに：おいしさをデザインする食品構造工学

食品に望まれる属性として、安全・健康・おいしさ・価格がある。我々の研究室では「おいしさ」を食品サイドから追究し、食品構造の制御によりおいしさをデザインする『食品構造工学』の確立を目指している(図1)<sup>1)</sup>。特に、おいしさは咀嚼による食品構造の破壊に伴う変化にあるという立場から研究を進めている。

おいしさについて、ヒトからの視点である認知心理学における嗜好性(快)から整理すると、おいしさは親近性と新奇性のあいだの覚醒ポテンシャル領域にあると考えられる。親近性は単純接触効果で知られる馴染みのあるものを好む、いわゆるお袋の味に代表される期待通りのほっこりするおいしさである。新奇性は変化や複雑さから受ける期待以上(期待を裏切る)の刺激による、おもしろさに代表されるワクワクするおいしさである。

食品の視点からおいしさの要因を整理すると、化学的な風味と物理的な食感(テクスチャー)に分けて考えられる。食感は咀嚼による食品構造の破壊過程で力学特性と構造状態の変化が知覚・認知され言葉で表現される。つまり、食品構造が食感を決定すると考えられる。そのため、①蛋白質・澱粉・油脂のような多成分の高分子が食品加工(混合/加熱/冷却)でどのような過程を経て食品構造を形成するのか? ②形成した食品構造が咀嚼で破壊され、どのような力学特性と構造状態の変化から食感が発現するのか? これらの過程を具体的にイメージ化できれば、効率的な製造と望む食感の実現につながると考えられる(図1)。

## 2. 食感：知覚レベル(物理的)と認知レベル(感性的：オノマトペ表現)

食感を意味する言葉を整理すると知覚レベルと認知レベルの2種類があると考えられる(図2)。知覚レベルは生得的で生まれながらに持っている感覚からなる。物性(物理単位)と相関が認められる。この知覚レベルは力学特性と構造状態(幾何学特性)に分けられる。さらに力学特性は弾性(固体的性質)と、粘性(液体的性質)からなる。これらはレオロジーを基盤とした粘弾性として理解されている。構造状態は幾何学特性ともいわれており、摩擦や粗滑に対応するものである。これら摩擦や潤滑はトライボロジーを、粗滑や大小などの形態はモルフォロジーを学問的基盤としている。

もう1種類の食感表現である認知レベルは習得的で、経験により獲得されたもので感性的な嗜好を伴っている。食品のおいしい感性的な食感表現は認知レベルの直感的・統合的ないわゆるトップダウン判断である。そのため、おいしさを表現する認知レベルの感性的な食感(例えば、もちもち)を知覚レベルの具体的な特性一言で説明するのは難しい。このようなおいしい感性的な食感表現を具体化するためには、咀嚼過程における知覚レベルの食感(かたさ・粗滑等)がどのように組み合わせ変化しているのかを咀嚼過程の時間軸に沿ってボトムアップ的に意識化し解析する必要がある。

日本語における食感を表現する用語として445語が早川らによってあげられ、約7割がオノマトペ(擬音語・擬態語)であった<sup>2)</sup>。これらは食感(テクスチャー)用語体系として整理されており、食感大分類3、中分類15、小分類

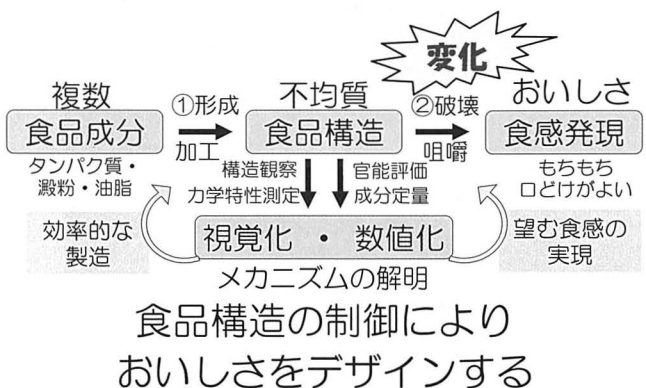


図1. 食品構造工学の概念図

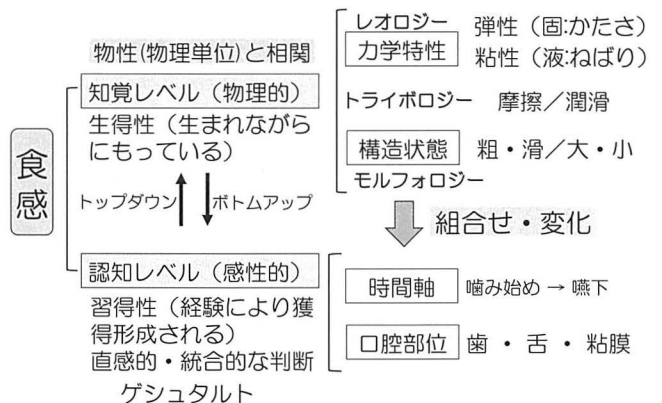


図2. 食感の分類

64 に分類されている。大分類である力学的特性 (mechanical attribute), 幾何学的特性 (geometrical attribute), その他の特性 (other attribute) は, ISO11036 Texture Profile の3要素と対応している。早川らの分類では, 大分類において用語の重複を許しており, 二つ以上の大分類に属している用語が69個ある。なかでも, 「クリーミー」と「口どけがよい」の2語は大分類三つのすべてに挙げられている。このことからわかるように, 重複する食感用語は知覚レベルの複数の意味の組合せから統合的に判断されている。

以上のように, ヒトは咀嚼によって食品構造を破壊する過程で, かたさ, 粘り, 粗さ, 潤滑といった食感を知覚する。さらに, これら複数の要素の組み合わせが咀嚼過程で変化し, 「もちもち」や「口どけがよい」食感としておいしさを表現している。

### 3. 「もちもち」食感の見える化：タピオカ澱粉の効果とメカニズム

「もちもち」食感を発現する素材としてタピオカ澱粉が知られている。例えば, 「もちもち」したタピオカパールの入ったタピオカドリンクがヒットしている。タピオカ澱

粉を使用するとなぜもちもち食感になるのかがわかれば, タピオカ澱粉を添加しなくても「もちもち」食感を付与するアイデアを導き出せると期待される。

タピオカ澱粉を添加するとゲル状食品を圧縮変形したときにタピオカ澱粉粒が伸びた構造をとり, ゲルがやわらか

### 大変形試験 + 構造変化の観察

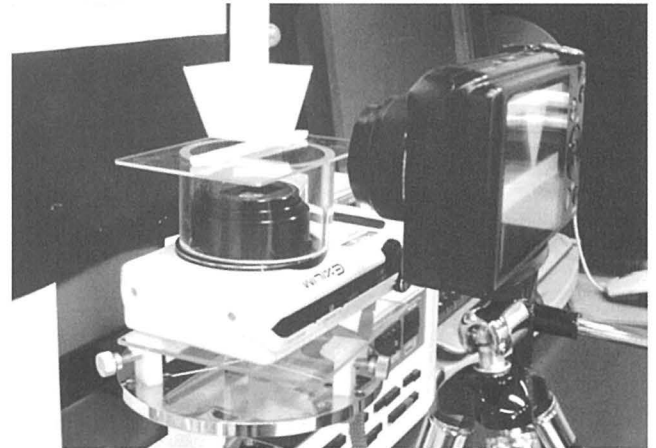


図3. 大変形試験と同時に構造変化をデジタルカメラで2方向から観察

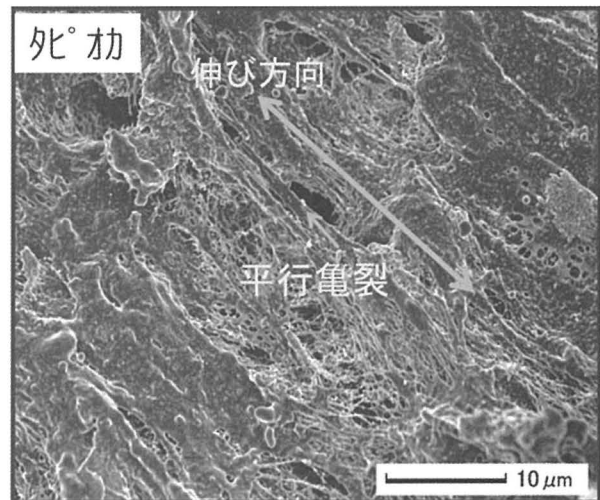
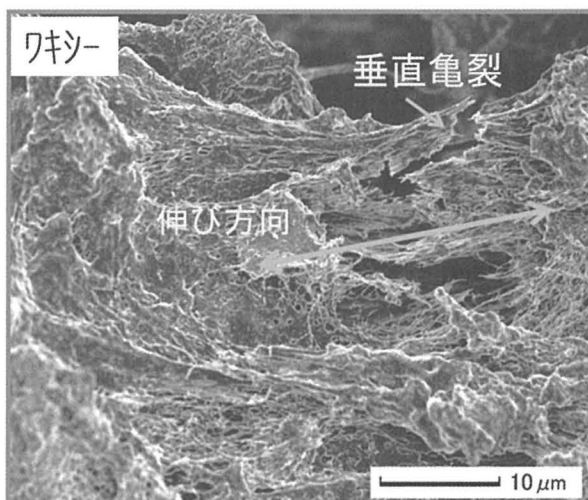
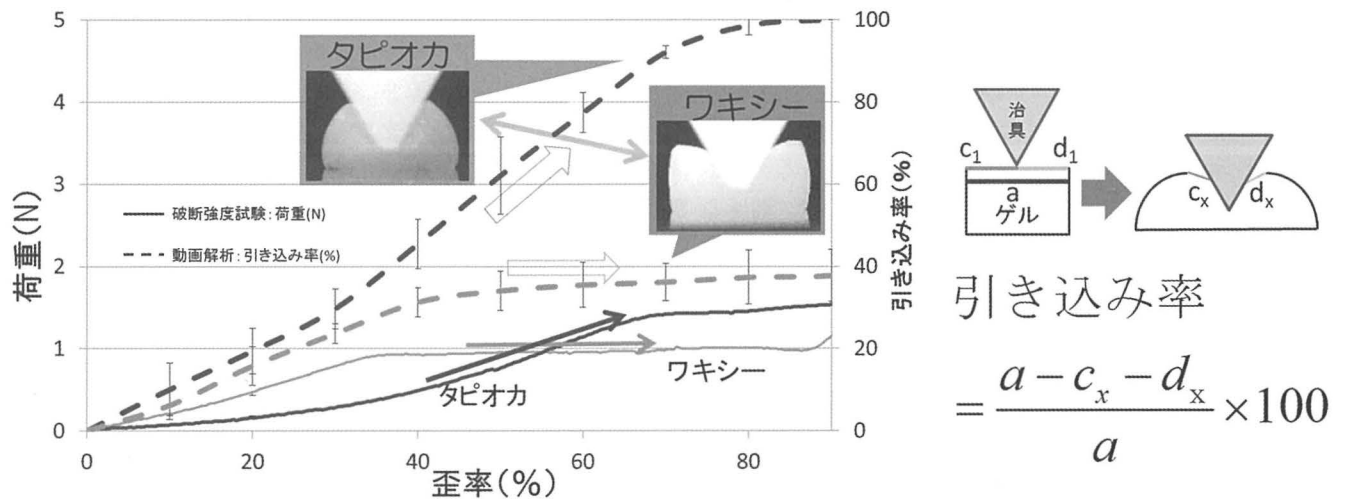


図4. ワキシ-コーンスターチとタピオカ澱粉のゲルを用いた破断試験 (荷重歪曲線) と構造変化観察 (引き込み率・SEM観察)

く壊れにくい性質を表した。そのために力学測定において低歪率における応力が小さく、高歪率においては応力が大きくなり、また複数回圧縮したときに応力が保持される性質を示したと考えられた。以上の力学的性質を咀嚼過程における人間の知覚表現と関連づけると、『噛み始めは応力が小さい、すなわちやわらかいが、噛みしめたときは応力が大きく噛み応えがある。咀嚼2回目以降もその応力が持続し歯応えが持続する。さらに咀嚼中に少し付着性がある、すなわち少し歯に付く』ことで、人間は「もちもち」という食感を認知していると考えられた。

似た食感を示すワキシコーンスターチ（糯種澱粉）とタピオカ澱粉の両ゲルのもちもち食感の違いについて、物性・構造から比較分析の例として示す。破断強度試験において荷重歪曲線を得るだけでなく、試料の変形時の様子を2台のデジタルカメラで側面と底面から動画撮影する（図3）ことにより、応力変化の構造的な理由を明らかにした。得られた荷重歪曲線と引き込み率を図4上段に示した。タピオカはワキシコーンに比べ低歪ではやわらかく高歪ではかたいことが明らかとなった。その理由は高歪でも治具にまとわりつき引き込み率が上昇し続けたためと考えられる。このときの走査型電子顕微鏡（SEM）観察の結果を図4下段に示した。ワキシコーンでは伸び方向に対して垂直な亀裂が形成されたのに対してタピオカでは繊維がほぐれた様な伸び方向と平行な亀裂を生じた。タピオカ澱粉の伸びやすさ（曳糸性）が低歪におけるやわらかさと高歪における切断されにくさを生じ、もちもち食感を発現していると考えられる<sup>9)</sup>。

#### 4. うどんの「つるつる」食感：澱粉とバイタルグルテンの影響

うどんのおいしい食感には「もちもち感」の他に、唇で挟んですするときに感じる「つるつる感」が重要な要素である。「つるつる」とは、表面が滑らかなものを吸い込むように食べるときに使われ、心地よく唇を滑る感じを表す擬音語・擬態語である。そのため、「つるつる食感=つるみ」にはうどんの表面状態が重要であると考えられる。最近では、うどんの食感改良に加工澱粉やバイタルグルテンを使用するのが一般的であり、咀嚼する際の「もちもち感」は、前述のようにタピオカ澱粉を添加することで付与されることがわかっている。その一方で、うどんの「つるつる感」に与える影響はまだ明らかでない。そこで、ここでは、加工澱粉とバイタルグルテンの添加がうどんの「つるつる食感」にどのような影響を与えるのか検討した。その結果、うどんの「つるつる食感」には「光沢」と「しなやかさ」が重要であった。澱粉の添加によって、物性面の「しなやかさ」・見た目の「光沢」が共に増加し、「つるみ」に良い影響を与えた。一方、バイタルグルテンの添加では、物性面への影響は小さかったが、見た目の「光沢」に悪影響を与えた。したがって、うどんの「つるつる食感」には、澱

粉は物性・見た目に正の相関、バイタルグルテンは見た目に負の相関があることが明らかとなった<sup>7)</sup>。

#### 5. シフォンケーキの感性食感の見える化

シフォンケーキはメレンゲによって膨らむスポンジケーキの一種で、咀嚼前半に「ふわふわ」「しっとり」、咀嚼後半に「口どけのよさ」といった特徴的な食感によっておいしさが表現される。しかし、これらのおいしい食感がどのような知覚的要素の組み合わせにより認知されているのか、さらにその要素がどのような力学的特性・構造変化から示されているのか明らかではない。そこで、澱粉を添加したシフォンケーキを用いて、官能評価によりおいしい食感がどのような知覚的要素の組み合わせにより認知されているかを検討し、さらにその要素を物性測定・構造観察により見える化するまでおいしい食感を解析した。

澱粉はタピオカ（A）、コーン（B）、ワキシコーン（C）、ハイアミロースコーン（D）を用い、小麦粉のみをコントロール（O）とした。澱粉は、小麦粉の25%を置換した。ケーキは、卵・砂糖・牛乳・油・小麦粉・澱粉を混ぜ合わせ型に入れた後、オーブンで170℃40分焼成し、作製した。測定には焼成後室温で約1日保存し、30mm角の立方体に切り出したものを用いた。

官能評価では咀嚼前半と咀嚼後半を意識した計12項目について行い、その結果を統計ソフトウェアIBM SPSS Statisticsを用いて解析した。主成分分析の結果（図5）から、咀嚼前半（図5A）の「ふわふわ」は壊れにくくやわらかな食感、「しっとり」はなめらかで付着性のある食感、咀嚼後半（図5B）の「口どけのよさ」は広がりやすく、口残りしにくく、粗さがなく、適度に付着のある食感であることが明らかになった。またサンプルをそれぞれ、A、Cは「しっとり」及び「口どけのよい」グループ、O、B、Dは「ふわふわ」のグループに分けられた。

咀嚼前半をイメージした物性測定では、テクスチャー解析においてA、Cで付着性が有意に高く、官能評価（咀嚼前半）の「付着性」の結果と正の相関がみられた。さらに、O、B、Dにおいては2回目圧縮時の高さから算出した圧縮後のサンプルの回復率が有意に高く、これは官能評価（咀嚼前半）の「壊れにくさ」の順位と正の相関傾向がみられた。また、摩擦力の測定においては摩擦力がCにおいて有意に低く、これは官能評価（咀嚼前半）の「なめらかさ」と負の相関がみられた。

物性測定では、咀嚼前半をイメージしたクリープメーターによるテクスチャー解析（2回圧縮）・触感計による表面の摩擦力測定、咀嚼後半をイメージしたクリープメーターによる口どけ食感解析（加水時26回繰り返し圧縮）を行った。咀嚼後半をイメージした物性測定の口どけ食感解析では、A、Cにおいて圧縮15回目以降で高い付着力がみられ、さらに荷重が低下し始める回数が早かった。これは口腔内でケーキが早く崩れることを示し、荷重低下の

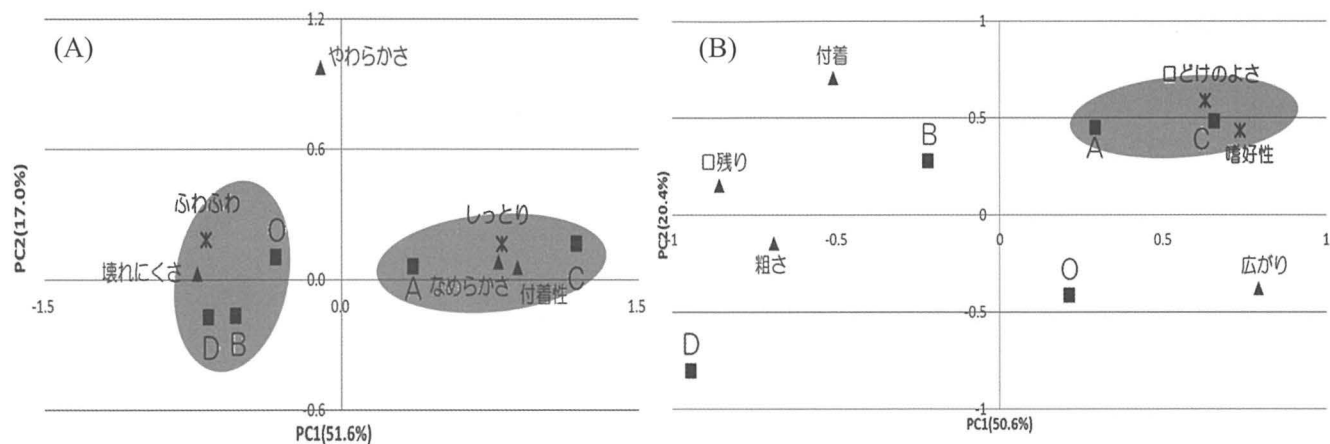


図5. 官能評価の主成分分析  
(A) 咀嚼前半, (B) 咀嚼後半.

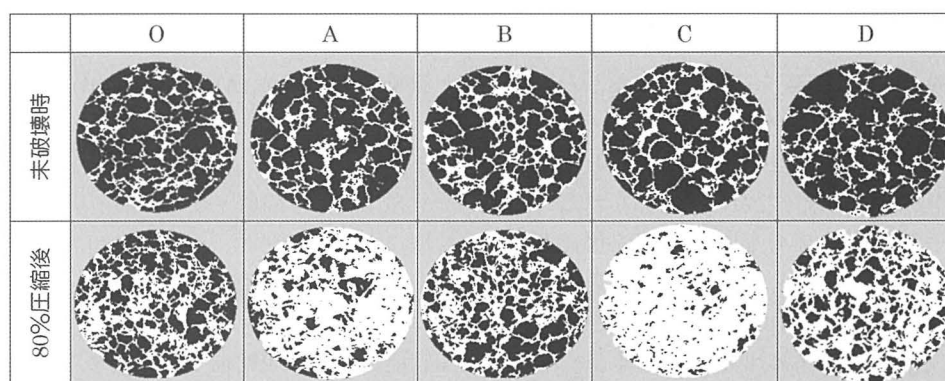


図6. X線CTによる未破壊時と80%圧縮後の気泡観察像  
白は生地, 黒は気泡. 大変形試験と同時に構造変化を観察.

早さが広がりやすく, 口残りしにくい食感に繋がったと考えられる.

構造観察では未破壊時と80%圧縮後の気泡をX線CTで観察した(図6). その結果, O, B, Dにおいて80%圧縮後も気泡が保持されている様子が認められた. これは官能評価(咀嚼前半)の「壊れにくさ」と正の相関があると考えられる.

以上のように, 「ふわふわ」は壊れにくくやわらかな食感で, 壊れにくさはテクスチャー解析の圧縮後のケーキ回復率及びX線CTにより観察された圧縮後の気泡保持性から見える化できた. 「しっとり」はなめらかで付着性のある食感で, なめらかさは触感計による摩擦力から, 付着性はテクスチャー解析の付着性の値から見える化できた. 「口どけのよさ」は広がりやすく, 口残りしにくく, 粗さがなく, 適度に付着のある食感で, 広がり口どけ食感解析の荷重低下の回数から, 付着は口どけ食感解析の付着力の大きさから見える化できた. このように, 官能評価で食感を知覚的要素に分解し, それらを物性測定・構造観察と相関づけることで最終的においしい食感を解析することができた.

## 6. ホワイトクリームの口どけ食感の見える化

ホワイトクリームのおいしさ表現である『口どけがよい』は, 力学的特性・幾何学的特性・その他の特性という三つの知覚レベルの基本食感要素すべてに属する認知レベルの食感である. そのため口どけ食感, 時間経過に伴う複数の知覚食感変化の組み合わせによりマッピングできると考えられる. 工業的に製造される冷凍コロッケ用ホワイトクリームは, 加工時の機械適正として保形性が必要なため, 構造を形成する蛋白質や澱粉が添加される. しかし, これらの成分を添加すると『口どけ』が低下することが知られている. そこで, 構造形成成分の異なる3種のホワイトクリームを用いて, 口どけ食感を力学的要素・構造的要素から見える化することを目的とした.

小麦粉ベースのコントロール (Co) とそれに蛋白質 (Pr) または澱粉 (St) を添加した3種のホワイトクリームをサンプルとして使用した. 官能評価は, 『口どけ』と知覚レベルの食感(「付着性」, 「舌触りのなめらかさ」など)について7段階の採点法を実施した. この際, 口に入れてから飲み込むまでの時間経過を意識して評価するよう指示をした. その結果, 官能評価の『口どけ』はコントロールで有意に良かった. 知覚レベルの食感ではすべての項目で有

意差がみられた。主成分分析の結果、『口どけ』低下の原因は蛋白質添加による「舌触りのなめらかさ」の低下すなわち舌触りのざらつき、澱粉添加による「付着性」の増加と考えられた。

クリープメーターで繰り返し圧縮試験を行い、そのときのサンプルの分散の様子をデジタルカメラで撮影し、巨視的構造を観察した。繰り返し圧縮試験終了後のホワイトクリーム分散状態の違い(図7 上段)に着目すると、コントロールはクリームが広く分散している様子がみられた。一方、蛋白質はクリームが凝集している様子がみられた。さらに走査型電子顕微鏡(SEM)で未破壊構造を観察した結果(図7 下段)、コントロールでは粗な構造、蛋白質では密な構造がみられた。この結果を圧縮試験終了後の様子と関連づけると、コントロールは微細構造が粗であるため、構造の破壊に伴ってクリーム内部に水が流入しやすく、クリームが広く分散したと考えられる。一方、蛋白質は微細構造が密であるため、構造の破壊に伴ったクリーム内部への水の流入が少なく、クリームが凝集したと考えられる。つまり、微細構造に起因して圧縮試験終了後の分散

もしくは凝集の状態が変化するため、蛋白質では舌触りがざらつくことが明らかとなった。また、繰り返し圧縮試験時の付着力は澱粉で有意に大きい結果となった。すなわち澱粉は口腔内により付着しやすいため、「付着性」が高く評価されたと考えられる。

以上のように、蛋白質・澱粉を添加すると口どけ食感が低下するが、それぞれの原因は蛋白質では「舌触りのざらつき」、澱粉では「付着性」と異なることが明らかとなった。さらに、「舌触りざらつき」は繰り返し圧縮試験とSEMによる構造観察、「付着性」は付着力と関連づけられ、図8のように時間経過と咀嚼部位を軸に取った2次元上にマッピングすることで口どけ食感を見える化できた。この『テクスチャーマッピング』により、例えば「口どけがよい」で表現されるおいしさを、ヒトそれぞれの一言で終わらせるのではなく、テクスチャーマップ上のどの物性をどのタイミングで重要視するのかが異なるためと視覚的にわかりやすく説明でき、さらなる食品開発につながると期待される。

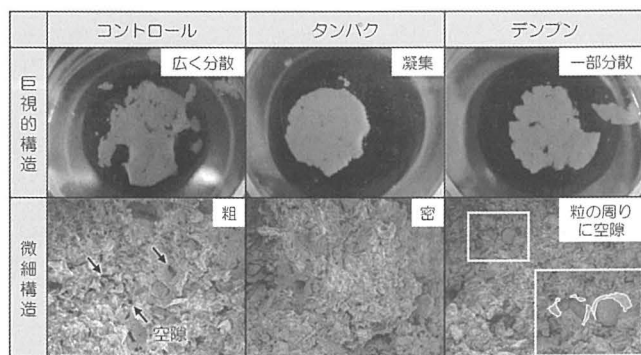


図7. ホワイトソースの構造観察

上段は破壊構造、デジタルカメラによる底面からの巨視的構造観察。下段は未破壊構造、走査型電子顕微鏡による微細構造観察。

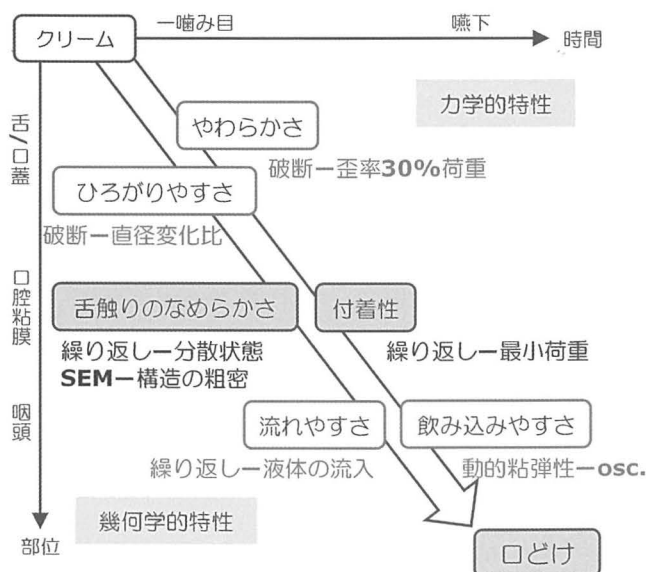


図8. 口どけのテクスチャーマッピング

OSC : oscillatory stress test.

## 7. まとめ：食品構造工学～「おいしい」食感のデザイン～

現在の食品開発では、知覚レベルの食感表現(かたさ・粒の大きさ)ではなく、おいしさを示す感性的・統合的な食感表現(もちもち・口どけがよい等)の実現が望まれている。我々は、おいしさは変化であるという立場から、食品構造の破壊過程に着目し、おいしい感性食感の見える化を目指している(図1)。ヒトが評価する官能評価で、咀嚼による「もちもち」や「口どけがよい」のようなおいしい感性食感表現をかたさや粘り等の物理的単位と相関性のある知覚レベルの食感へ翻訳する。また、咀嚼のモデル破壊として機器分析で力学特性を測定し、構造状態を電子顕微鏡で観察することで、破壊のメカニズムを明らかにする<sup>89)</sup>。これらを関連づけることで、おいしい食感のデザインに応用できると考えている。実際の食品は複数成分が多様な不均質構造をとる個別事例である。しかし、不均質構造の形成と破壊のメカニズムを電子顕微鏡観察からイメージ化する食品構造工学は、「おいしい」を得るために「どの様な不均質構造をいかにして安定的に製造するか」具体的アイデアを導き出す基盤となり、効率的製造と望む食感の実現に貢献できると期待している。

### 文献

- 1) 渡部幸一郎, 水越実, 中村卓: 食品構造工学～食品成分の構造化の解析と食感素材の開発～. 日本食品機械研究会誌 食品加工技術, 27, 131-140 (2007).
- 2) 青山博明, 森口奈津美, 山田芳, 中村卓: おいしい食感と食品構造. 食品と科学, 54(12), 59-64 (2012).
- 3) 中村卓: 新しい食感のデザイン法. 食品と開発, 54 (4), 4-7 (2018).
- 4) 中村卓: 食品の食感とおいしさ. 高分子, 67, 593-594 (2018).

- 5) 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**, 311-322 (2013).
- 6) 中村卓：食品のおいしさと食感デザイン～食品開発の具体化方法～. 明日の食品産業, **491**, 29-35 (2018).
- 7) 中村卓：麺の食感の見える化に関する研究～感性的なおいしい食感への加工条件および調理条件の影響～. 飯島藤十郎記念食品科学振興財団年報, **32**, 387-394 (2017).
- 8) W. Fu and T. Nakamura: Explaining the texture properties of whey protein isolate/starch co-gels from fracture structures. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **81**(4), 839-847 (2017).
- 9) K. Inoue, W. Fu, and T. Nakamura: Explaining the different textures of commercial processed cheese from fractured structures. *International Dairy Journal*, **97**, 40-48 (2019).