

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14802

研究課題名（和文）咀嚼時の食品の変形・破断挙動が食感と心地良さを生み出す機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism by which food deformation and fracture behavior during mastication creates food texture and palatability

研究代表者

小川 剛伸（Ogawa, Takenobu）

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：10793359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：「咀嚼時に食品の構造がどのように変形・破断すると、いかなる食感と心地良さが生まれるのか？」は不明であり、多くの食品製造工業では、経験に基づく試作と食感評価を繰り返すことで、食感の改良を図ってきた。本研究では、製造時（食品の構造）から、咀嚼時（変形・破断挙動）、脳での認知時（食感と心地良さ）までに生起する現象に関し、人工知能を用いて統合化を図り、論理的に食感の改良を図るための基礎を確立することを目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製造時（食品の構造）から、咀嚼時（変形・破断挙動）、脳での認知時（食感と心地良さ）までの全現象を統合化して、食感と心地良さの予測を目指した点に学術的な意義があると考えている。また、現在、食品の構造に基づく食感の予測は、推察の域を出ていない。そのため、食品製造工業では、多くの場合、経験的な知見を基に食感の改良を図っている。このような状況において、全現象を統合化し、食感等の改良を論理的に実施可能にすることは、大きな社会的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The relationship between the deformation and breaking behavior of food structure during mastication and texture, and the relationship between the behavior and the palatability created by texture, are unclear. For this reason, many food manufacturing industries have attempted to improve texture by repeating experimental production and texture evaluation based on empirical knowledge. In this study, we aimed to establish a basis for logically improving texture by using artificial intelligence to integrate the phenomena that occur during production, mastication, and brain recognition.

研究分野：食品工学

キーワード：食感 美味しさ イメージング 人工知能

1. 研究開始当初の背景

食感は、食品の美味しさ(心地良さ)を決める重要な要因であり、咀嚼時に歯で食品を圧縮して、その際に食品から押し返される力に起因する。食品を圧縮した際の微小変形については、粘弾性等に関するレオロジーを基礎学術とした理論が構築されている。一方、咀嚼時は、破断を含む大変形が直接的に関与するが、この大変形における現象は、確率的であることが知られており、非常に複雑で極めて難解である。そのため、食品の咀嚼時の変形・破断機構は不明であり、製造時の食品の状態と、その食品を咀嚼した際の脳での認知の関連は十分にわかっていない(図1に研究背景の概要を示す)。

食感の定量化は、機器による計測法と人の感覚による官能評価法がある。テクスチュロメーターは、プランジャーで食品を圧縮した際の歪みと、プランジャーに負荷される応力を計測し、両者の関係から約8種類の食感を定義付ける。しかし、テクスチュロメーターを含む既存の機器は、食品に付加した力に対し、食品が反発する力や挙動を平均的に計測しており、食品内における局所的・非均質的な変形・破断挙動を計測できる機器は存在しない。また、食感とそれに基づく心地良さは、脳で認知されるが、その際の神経学的・脳機能学的な機構は、十分にわかっておらず、食感と心地良さの評価には、官能評価が不可欠である。

これまでに、機器計測や官能評価で得られた食感を基に、その食感を生み出す可能性を有する食品の特徴的な構造を探索する試みは行われてきたが、構造から食感を定量化することはできず、推定の域を出ていない。そのため、現在の食品製造工業では、多くの場合、経験的な知見を基に試作と食感評価を繰り返すことで、食感の改良を図っている。

研究代表者は、食品の構造から食感を定量的に予測するために、人工知能(AI)の活用に着目してきた。AIを活用するには、AIが学習するための多量かつ高質の情報が必要であるため、食品の高質な構造データを多量かつ短時間に計測できるようにした(Nat. Commun., 2021)。これにより、一部の食感をAIで定量的に予測することに成功した。しかし、多くの食品は5~20種類の複数の食感を併せ持っており、全ての食感と、さらには食感から得られる心地良さを予測するには至っていない。

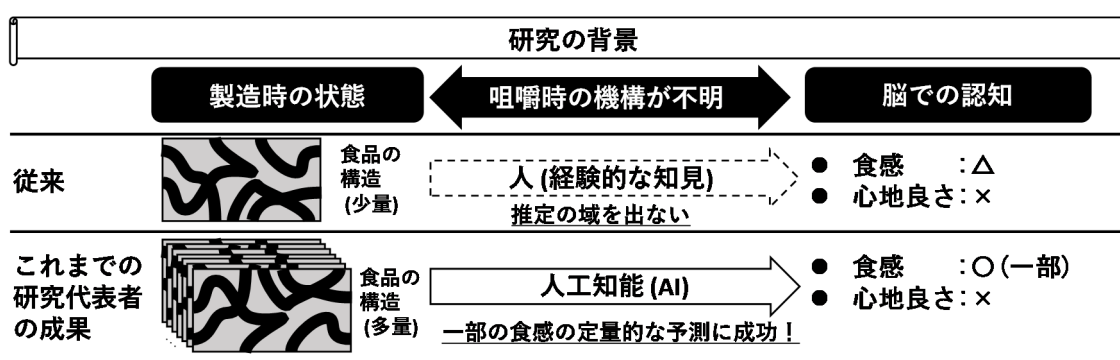


図1. 本研究の背景

2. 研究の目的

本研究では、澱粉やゼラチンゲルの食感を例に、食品の製造から、咀嚼、脳での認知までに生起する現象を統合化し、食感と心地良さを論理的に予測する基礎の確立を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 圧縮時の食品内部における変形・破断挙動を計測する機器の開発

咀嚼時の大変形現象をAIで解明するには、AIに学習させるための多量の情報が必要であり、圧縮時の食品内部における変形・破断挙動を高い空間分解能かつ時間分解能で計測することが不可欠である。通常、カメラを用いて撮影時の空間分解能を高めようとする(より拡大して撮影しようとする)程、撮影できる範囲が狭くなり、場所を移動させながら多数回にわたり撮影する必要が生じる。このため、試料全体を撮影するのにより長い時間を要する。一方、撮影する時間を短くするために、1回の撮影で済ませようすると、空間分解能は低くなる。すなわち、高い空間分解能と短い計測時間(時間分解能)は、トレードオフの関係にある。人は咀嚼時に5~10 μm程度の大きさまで食塊として感知できるため、数 μmの空間分解能で食品の変形挙動を計測することが必要となる。しかし、数 cm程度の食品試料について、数 μmの空

モアレ現象の例

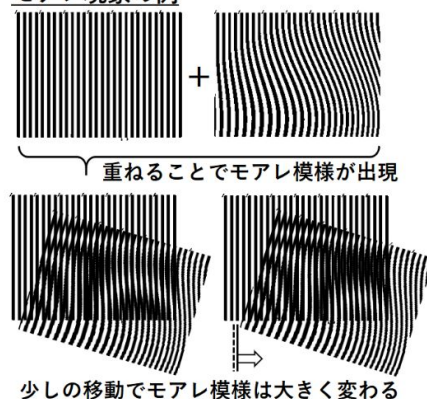


図2. モアレ模様の生起

間分解能で数十ミリ秒以内に計測することは汎用的なカメラでは非常に困難である。このトレードオフの関係を開くために、モアレ現象を適用した。図2に示すように、モアレとは2種類の繰り返し模様を重ね合わせた際に、それらの周期のずれにより発生する模様である。そして、2種類の繰り返し模様が少し移動しただけで、このモアレによる模様は大きく変化する。そのため、モアレによる模様を解析することで、もとの繰り返し模様の移動量を約1,000倍の精度で検出できるという特徴を有する。つまり、低倍率で広範囲を撮影しても、高い空間分解能で変形挙動を計測することが可能となる。この原理を用いて、圧縮時の食品内部における変形・破断挙動を計測する機器の開発を実施した。

(2) 食感の心地良さを脳波から定量化する新規アルゴリズムの開発

心的な変化に対する即応性が高い脳波を解析することで、リアルタイムに人が感じる快・不快等を測定できることが報告されている。また、快・不快等の測定には、脳波の異なる2つの周波数の組み合わせの使用が有効であることが示されているが、測定対象に依存する経験的な結果である。そのため、食感による心地良さを対象として、脳波の異なる3つ以上の周波数の組み合わせを探索することが不可欠である。しかし、3つ以上の周波数の組み合わせは、非常に膨大な数となり、見つけ出すことは困難である。そこで、機械学習によるパターン解析を適用することで、周波数の組み合わせ(パターン)を網羅的に検出し、最適な周波数の組み合わせを特定することを試みた。

(3) 製造時(食品の構造)から、咀嚼時(変形・破断挙動)、脳での認知時(食感と心地良さ)までの現象の人工知能による予測の統合化

食品の製造時から、咀嚼時、脳での認知時までに生起する現象は、非常に複雑かつ難解であるため、十分にわかっていない。そのため、食品の構造、変形・破断挙動、脳での認知までを統合して、食感と心地良さを予測できない。そこで、食品の構造から、変形・破断、食感と心地良さを予測するに際して、解明されていない複雑かつ難解な現象をあえてブラックボックスにしたまま、AI(深層学習)を用いて解析することを試みた。

4. 研究成果

(1) 圧縮時の食品内部における変形・破断挙動を計測する機器の開発

まず、2種類の澱粉を主成分とするゲルを調製した(図3)。次に、直方体に成型した試料の側面に格子状の模様を描画し、プランジャーで縦方向に圧縮する際の試料側面を横方向からカメラで撮影した(図4)。カメラ内には、CCDセンサーが格子状に配列されており、これら2つの格子状模様よりモアレが生じる。

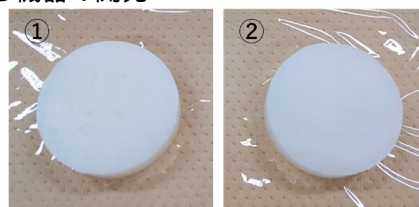


図3. 作製したゲル試料の外観とは、それぞれ玉蜀黍澱粉と馬鈴薯澱粉を主成分とする。

次に、開発した装置の計測精度を評価するために、構造解析CAEソフト(Prepomax, ver 1.3.4)を用いて、試料の微小変形時における線形圧縮挙動のシミュレーションを行った。その結果、試料圧縮時の応力 歪み曲線において、実測値とシミュレーションによる予測値は一致しており、少なくとも微小変形時には精度良く計測できることがわかった(図5)。さらに、2種類のゲルを圧縮した際のモアレ模様を解析した結果、人の咀嚼精度を凌駕する約2 μmの空間分解能かつ30 msの時間分解能を達成できていることがわかった。

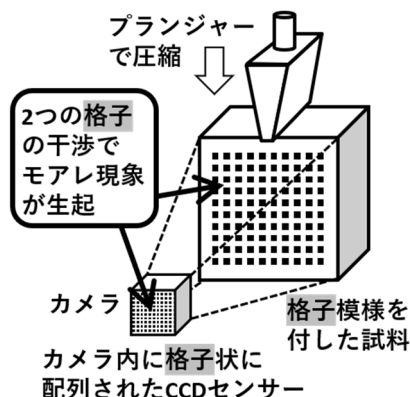


図4. 開発した装置の概略図

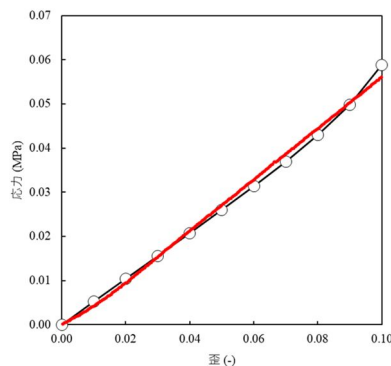


図5. 試料圧縮時の応力 歪み曲線プロット(○)と赤線は、それぞれ実測値とシミュレーションによる予測値を示す。

(2) 食感の心地良さを脳波から定量化する新規アルゴリズムの開発

左前頭部に配置する1個の電極で計測する簡易型脳波計であっても、国際10-20法に従って20個程度の電極を頭部全域に配置する大型脳波計と同水準で脳波を計測でき、快・不快等の感情を計測できることが示されている。本研究においても同様の簡易型脳波計を使用した。日本人大学生を被験者とし、食品試料を咀嚼する際の脳波について、1~30 Hzの範囲を0.25 Hz刻みで計測した。この際、各試料の食感に対する心地良さをアンケート調査した。目を閉じた際の安静時に対して、咀嚼時に変化する脳波の活動電位とアンケート調査で得られる心地良さの強度をセットにして、全被験者の脳波に共通して現れる周波数ごとのパターンを機械学習で網羅的に解析した。そして、この網羅的解析により得られる周波数の組み合わせを用いて、脳波データから心地良さを数値化するアルゴリズムを開発した。

(3) 製造時(食品の構造)から、咀嚼時(変形・破断挙動)、脳での認知時(食感と心地良さ)までの現象の人工知能による予測の統合化

食品試料の構造について、研究代表者が独自に開発した透明蛍光化法(*Nat. Commun.*, 2021)を用いて多量の画像を取得した。そして、AIを用いて、食品の構造から変形・破断挙動を予測した。一方、食品試料の食感は、官能評価で数値化した。そして、変形・破断時のモアレ画像に対し、官能評価による食感と心地良さを教師データとして、それぞれ別のAIに学習させた。本AIには、研究代表者がこれまでに使用してきた畳み込みニューラルネットワークを用いた。全データのうち、半量を学習用、残りを学習精度の検証用として実施した結果、70~90%の精度で予測することに成功した。最後に、学習したAIを解析し、変形・破断に影響を及ぼす特徴的な食品の構造、ならびに食感と心地良さに影響を及ぼす特徴的な変形・破断挙動を推定した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 小川剛伸 | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 食品を透明にすることで食感を視る | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 アグリバイオ | 6. 最初と最後の頁 79-81 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 小川剛伸 | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 AIを用いて食感を生み出す鍵を探す | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 アグリバイオ | 6. 最初と最後の頁 75-77 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 小川剛伸 | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 透明にすることで“見える”食品の内部構造 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 化学と生物 | 6. 最初と最後の頁 113-115 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1271/kagakutoseibutsu.60.113 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 小川剛伸 | 4. 巻 227 |
| 2. 論文標題 人工知能を用いた食品の高品質化への挑戦 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Foods and Food Ingredients Journal of Japan | 6. 最初と最後の頁 108-114 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34457/ffij.227.2_108 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 小川剛伸 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 AIを活用した食品テクスチャー計測とデザイン | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 食品と開発 | 6. 最初と最後の頁 7-9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 T. Ogawa | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Elucidation of the mechanism by which the internal structure of food controls the quality | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry | 6. 最初と最後の頁 935-945 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/bbb/zbad088 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計16件(うち招待講演 10件/うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 北川美奈、木本悠作、小川剛伸、谷史人 |
| 2. 発表標題 人のテクスチャー感覚の予測を目指した新たな食感機器計測法の開発 |
| 3. 学会等名 日本食品科学工学会第69回大会・第18回若手の会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 山崎博道、小川剛伸、谷史人 |
| 2. 発表標題 汎用的な食品の透明化法の開発 |
| 3. 学会等名 日本食品工学会第23回(2022年度)年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 瀬良早香、小川剛伸、谷史人 |
| 2. 発表標題 人工知能を用いたパンの新規物性解析法の開発 |
| 3. 学会等名 日本農芸化学会関西支部第519回講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 小川剛伸、瀬良早香、平山祐輔、谷史人 |
| 2. 発表標題 透明化した食品の三次元蛍光計測法 |
| 3. 学会等名 日本食品工学会・第22回（2021年度）年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎博道、小川剛伸、谷史人 |
| 2. 発表標題 汎用的な食品透明化法の開発による食品内部の三次元微細構造の解明 |
| 3. 学会等名 日本農芸化学会2023年度大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 山崎博道、小川剛伸、谷史人 |
| 2. 発表標題 食品の透明蛍光イメージングにおける透明化と膨潤の制御 |
| 3. 学会等名 日本食品工学会第24回（2023年度）年次大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 3次元イメージングと人工知能を用いた麵の食感解析への挑戦 |
| 3. 学会等名 Cereals & Grains Association日本支部、2021年度第1回講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 人工知能を用いた美味しさのデザイン |
| 3. 学会等名 京都大学インダストリアルデイ2021-XR（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 AIを用いた食感デザイン～透明にした麵から食感を予測する～ |
| 3. 学会等名 京大テックフォーラム（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 水とグルテンが麵の食感を支配する機構の解明 - 色変化と透明化により食感を可視化する - |
| 3. 学会等名 日本食品科学工学会・第69回大会、第13回研究小集会 食品と水（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 食品の内部構造の可視化と食感予測 |
| 3. 学会等名 第33回食品ハイドロコロイドシンポジウム、食品ハイドロコロイド研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 食品テクスチャーのAIによるデザイン |
| 3. 学会等名 食品開発展2022記念セミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 AI を用いた食品の品質予測と品質を支配する機構の解明 |
| 3. 学会等名 日本農芸化学会2023年度大会、農芸化学分野における『見る・創る』イノベーションへの挑戦（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 A I が実現する新たな食品分析と評価 |
| 3. 学会等名 日本食品科学工学会第70回記念大会、26C 食の可能性を広げる新しい品質評価・印刷・包装技術（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 A I を用いた食感の予測とデザイン |
| 3. 学会等名 食品ニューテクノロジー研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川剛伸 |
| 2. 発表標題 A I を用いた食感のデザイン - 透明化した食品の構造から食感を予測する - |
| 3. 学会等名 関西イノベーションイニシアティブ・京大オリジナル、微生物でみる農業研究の可能性～フードテック・機能性食品・グリーンプロダクツ（生物農業）で成長産業に挑む～（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

| | | |
|--|------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Transparentizing reagent and transparentizing method | 発明者 小川剛伸、松村康生 | 権利者 京都大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2023-505665 | 出願年 2023年 | 国内・外国の別 国内 |

| | | |
|--|------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Transparentizing reagent and transparentizing method | 発明者 小川剛伸、松村康生 | 権利者 京都大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、22767290.4 | 出願年 2023年 | 国内・外国の別 外国 |

| | | |
|--|------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Transparentizing reagent and transparentizing method | 発明者 小川剛伸、松村康生 | 権利者 京都大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、18/281,175 | 出願年 2023年 | 国内・外国の別 外国 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|