

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14421

研究課題名（和文）食品の品質推定における人工知能の活用 - 食感と抗肥満性の予測 -

研究課題名（英文）Predicting food quality using artificial intelligence

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） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、加工食品に応じた食品素材、加工方法・条件を論理的に決め、喫食時の受感や生理機能性等を含む加工食品の品質を自在に制御するための学術的手法を確立することを目的とした。本研究で得られた特に顕著な成果としては、加工に応じて変化する食品内部の構造を高精度かつ高速に計測する技術確立したこと、ならびにその計測した構造をもとに、人工知能を用いて食感等の品質を予測可能にしたこと、さらに人工知能を逆解析することで、構造が品質を支配する機構の一端を解明したことが挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

食品の内部構造と五感での受感などの関係は、これまで推論の域を出なかったが、人工知能を用いることで直接的に解明できることを実証した点に本研究の学術的な意義がある。これまでの工業的な食品製造では、限られたデータと経験的な知見を基に試行錯誤的に加工方法や条件を決めてきたが、これが論理的に決定できるようになることは重要である。より美味しく、かつ一層の健康の維持が可能な加工食品を開発・製造していくことはあくなき人類の欲望であるが、本研究の遂行により、食を通じた人生の楽しみを失うことなく、健康の維持・改善が将来的に可能になる点に社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to establish an academic method for freely controlling the quality of processed foods, including the feeling of eating and physiological functionality, by logically determining the food material, processing method and conditions according to the processed food. The particularly remarkable results obtained in this study can be summarized in the following three points: 1) Established a novel technology to measure the internal structure of food that changes according to processing with high accuracy and high speed. 2) Made it possible to predict quality such as texture using artificial intelligence based on the structure measured using the developed technology. 3) Elucidated a part of the mechanism by which structure controls quality by back-analyzing artificial intelligence.

研究分野：食品工学

キーワード：AI 品質 食感 イメージング 構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現代の食生活において加工食品は必要不可欠な存在である。加工食品の製造は、製造時間およびコストの低減といった製造効率を追求することから始まり、費用的制約や賞味期限等の時間的制約がある中で、美味しさに対する消費者からの要求に応えながら進化を続けてきた。美味しさは、咀嚼や嚥下を含む喫食時の五感（視覚、嗅覚、味覚、触覚、聴覚）等での受感に基づいていると考えられている。触覚や聴覚は、タンパク質や澱粉、脂質等で形成される食品内部の微細構造の咀嚼・嚥下時における破壊に起因する受感であり、嗅覚や味覚は、その微細構造の破壊時に口腔内に放散される成分とヒトの受容体との化学的な相互作用で生じる受感である。さらに、微細構造の多様性をもたらす受感の強度や時間的な変化の幅が美味しさに深みを与えている。一方、近年の健康志向の高まりとともに、生理的な調節機能や疾患予防機能など、食品の生理機能が注目されるようになった。食品に含まれる生理機能性物質の探索や、消化・吸収時におけるそれらの物質の作用機序の解明などが精力的に進められており、特定保健用食品（トクホ）のように、特定の保健効果が科学的に証明された食品は今や1200品目を超えている。しかし、口腔・腸管内で起きる破壊・物質移動・化学変化・相変化等の様々な現象は非常に複雑かつ未解明であり、最新のスーパーコンピュータを用いても全てを模擬できない。そのため、どのように食品を加工すると、咀嚼・嚥下時における微細構造の破壊が如何に変化し、それが食感等の受感にどのように影響するのか？ さらに、その後の生理機能性の発現にどのように影響するのか？については不明である。

2. 研究の目的

研究代表者は、食品製造から、体内での咀嚼・嚥下、消化・吸収までの過程を包括化・体系化することにより、「加工食品に応じた食品素材、加工方法・条件を論理的に決め、喫食時の受感や生理機能性等を含む加工食品の品質を自在に制御するための学術的手法を確立する」ことを最終目標としている。本研究では、最終目標の達成に向けた前段階として、対象試料を麺としたうえで、研究代表者が発案した“人工知能の活用”により、加工食品内部の微細構造から、食感および生理機能性等の品質を予測可能にするための基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 透明化による3次元微細構造のイメージングと可視化

① 試料の調製

各種試験に供した麺試料は、以下の手順で作製した。まず、麺用の小麦粉（粗タンパク質8.5%、灰分0.34%）500gに160gの蒸留水を加え、ミキサー（KitchenAid）で20分間混練した。その後、テフロン製のダイスを装着した押し出し式パスタマシーン（Bottene）を用いて製麺した。その際、押し出し時のパスタマシーン内部は、ダイヤフラムポンプを用いて減圧した。麺の幅と厚みは、それぞれ約1.9mmと0.8mmであり、これを基準試料とした。また、グルテンタンパク質の微細構造を変化させた麺試料を7種類作製した。

② 試料の透明化と蛍光イメージング

研究代表者が新規に開発した透明化試薬 SoROCS（引用文献①）を用いて、試料の透明化処理を実施した。試料の不透明度と膨潤度は、それぞれ、冷却 CCD を搭載した画像撮影システム（GE Healthcare、ImageQuant LAS 4000）および一眼レフカメラ（Canon、EOS-70D）で画像を撮影した後、画像処理ソフト ImageJ を用いて定量化した。透明化した試料については、二光子励起顕微鏡（Olympus、正立型 FV1200MPE-BX61WI、倒立型 FV1000MPE-IX83）、共焦点顕微鏡（Olympus、倒立型 FV3000、倒立型 FV1000D BX61）、ライトシート顕微鏡（Carl Zeiss、Lightsheet Z.1）を用いてイメージングした。顕微鏡の制御は、各顕微鏡に付属のソフトウェアで行った。

③ レンダリングアルゴリズムの開発

プログラミングはC#で行い、コンピューターグラフィックスライブラリーOpenGLを使用した。VRゴーグルは市販のものを用いた。

(2) 食感の定量化

食感は、クサビ形のプランジャーを装着したクリーブメーター（Yamaden）を用いた圧縮試験により定量化した。なお、圧縮は、20Nのロードセルで0.1~0.5mm/sの速度で麺試料の厚みに対して99%となるまで実施した。

(3) AIを用いた構造からの食感等の予測

人工知能には、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた。本研究では、最大164層までのCNNを構築した。

4. 研究成果

(1) 透明化による3次元微細構造のイメージング

① SoROCS を用いた透明蛍光化法の改良

研究代表者はこれまでに、麺等の食品を透明にする試薬 SoROCS を開発してきたが、さらなる改良を図ることで、高い透明度を維持したまま、グルテンタンパク質などの構造の保持を達成することを目指した。種々の検討の結果、SoROCS に浸漬する前に、試料を固定化すると良いことが分かった (図 1)。固定化することで、麺の不透明度は 3.54 から 5.58 へと一時的に増加したが、SoROCS に 3 日間浸漬することで 1.27 まで低下させることができた。また、透明化に伴い、試料は 2.23 倍に膨張したが、グルテンタンパク質の主要骨格に対する形態学的な解析を行ったところ、膨張による構造の変化は認められなかった。そこで、これらの改良した方法で透明化した試料について、イメージング時の空間分解能を測定した。透明化した麺の表面から約 1 mm の深度に埋め込んだ 0.49 μm の蛍光ビーズを二光子励起顕微鏡で計測した結果、半値全幅 (full width at half maximum: FWHM) は 0.51 μm であり、SoROCS で透明化した試料は、サブミクロンの空間分解能でイメージングできることがわかった。さらに、透明化処理後の厚さが 2 mm 程度の麺について、まるごとイメージングすることに成功した。

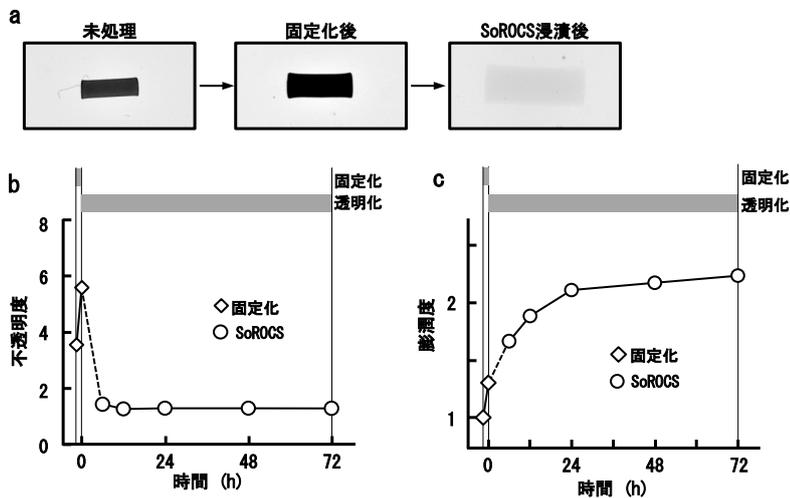


図1 透明化の影響。外観の経時変化 (a)、不透明度の経時変化 (b)、膨張度の経時変化 (c)。文献①から引用した。

以上のように改良した SoROCS を用い、食塩あるいはグルテンの小麦粉生地への添加量を変えて調製した麺について、透明蛍光化法により内部の 3 次元構造をイメージングした。

また、二光子励起顕微鏡に比べて、深度イメージングの性能はおとるものの、汎用性の高い共焦点顕微鏡を用いて、イメージングを行った。その結果、対物レンズの作動距離と同じ 600 μm の深度 (麺の表面からの距離) まで、グルテンタンパク質の 3 次元構造を計測できた。本結果は、SoROCS の透明化の性能が非常に高いことを示す。

なお、SoROCS を用いた透明蛍光化法について報告した論文が Nature Communications 誌に掲載され、さらにその論文が同誌の Biotechnology and methods 部門における Editors' Highlights に選出された (引用文献①)。

② SoROCS を用いた透明蛍光化法による米粒内部のイメージング

米粒内部のタンパク質は、食味を決定する重要な因子である。割断した米粒断面の顕微鏡観察、あるいは外表面から徐々に削った米粉末の化学分析により、米粒は外表面ほどタンパク質を多く含有することはよく知られている。しかし、粒内全域にわたり、一細胞レベルでのタンパク質の詳細な分布については不明であった。そこで、麺以外の試料についても SoROCS が有用であることを示すために、米粒を対象に透明蛍光化法を実施した。

植物学の分野において、葉に薬液を浸潤させる際、葉を酵素で処理する手法が開発されている。そこで、同様に米粒を酵素処理することで SoROCS 溶液の浸潤を促進できるようにした。しかし、米粒を酵素溶液に浸漬すると、米粒にひび割れが生じた。これは、浸潤の初期に、急激な膨潤が起こることで、内部応力が局所集中するためであると考えられた。そこで、処理前の米粒の含水率を上昇させること、かつ溶液の粘度を高めること、さらに浸潤初期に低温を保持することで浸潤初期の膨潤速度を抑制することを試みた。その結果、ひび割れを生起せず、かつ非常に高い透明度を達成した米粒を得ることができた。この米粒をライトシート顕微鏡で計測することで、米粒全体のタンパク質の分布をはじめて 3 次元的に可視化することに成功し、米粒内において、タンパク質は局所的に不均一に分布していることを一細胞レベルで明らかにした。

③ イメージングで得られた 3 次元構造の可視化

上記の①および②で例示したように、麺内部のグルテンタンパク質の微細構造や米粒内部のタンパク質の分布について、サブミクロンレベルの空間分解能で 3 次元的に計測することに成功した。これにより、パソコンのソフトウェアを用いて、食品内部の任意の断面における微細構造を自在に観察できるようになった。しかし、微細構造における 3 次元的な繋がりや形状を立体的に把握するには限界があった。そこで、バーチャル・リアリティ (VR) 技術を活用するという着想のもと、透明蛍光化法に最適なレンダリングアルゴリズムを開発して、3 次元微細構造を VR ゴーグルで立体視できるようにした。

(2) AI を用いた構造からの食感等の予測

麺やパンなどの小麦粉食品内部のグルテンタンパク質の微細構造は、生地 of 混捏や発酵などの過程で非常に複雑なネットワーク状となり、麺の食感やパンの膨らみ・柔らかさ等の各種品質を決定する。しかし、この微細構造と品質の関係については、熟練技術者の経験に多くを頼っているのが現状であり、各種品質を理論的に予測できない。それは、各製パン過程で生起する現象を記述する支配方程式群が多相・多成分・非線形であるため、数値解の取得が極めて困難であることに起因する。一方、AI は、生起しているメカニズムが未知であっても、その部分をブラックボックスとしたまま高精度に結果を予測することが可能であり、近年、各分野で画期的な成果を上げている。しかし、AI を用いるためには、予め AI に学習させる「大量かつ高質なデータ」が必要となる。つまり、グルテンタンパク質の微細構造から各種品質を予測するには、「大量かつ高質な微細構造のデータ」を短時間で取得する必要があるが、それは非常に困難であるという課題があった。そのような中で、研究代表者が開発した SoROCS を用いた透明蛍光化法は、本課題の解決を図ることができる。すなわち、蛍光観察時に、励起光面の位置を連続的に移動させるだけで、予め蛍光標識した食品内部の微細構造を高速かつ大量に計測できるばかりか、従来のように試料を一枚ずつ薄くスライスする必要がないため、微細構造を破壊することなく、高い分解能で高質な二次元画像の計測が可能になる。

本研究では、7 種類の麺試料について、透明蛍光化法で微細構造を計測した。また、クリープメーターを用いた物性試験を実施し、圧縮時の応力および歪率を測定した。そして、これらの数値データとグルテンタンパク質の微細構造の画像データを用いて、AI の教育（学習）および検証を行った。AI には、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた。CNN は層構造となっており、一般的に多層になるほど、学習に要する計算コストは増大するが、予測精度は高くなる。本研究では、最大 164 層までの CNN を構築し、検討を行ったが、22 層の深さをもつ比較的単純な CNN を用いても、高い精度で食感を予測できることがわかった。なお、CNN の予測精度の検証には、学習に用いた麺の異なる場所で計測した構造の画像データを用いて、CNN に圧縮応力および歪率を予測させた。

さらに、学習後の CNN を用いることで、AI がグルテンタンパク質の微細構造のどのような形状的特徴を認識し、学習したのかを解析した。すなわち、グルテンタンパク質の微細構造の画像を学習が完了した CNN に入力し、複数の層に畳み込まれる過程の画像を解析した。途中の異なる層における 2 枚の画像を比較すると、深層にいくにつれて、AI はより大きなブロックで微細構造を捉えていることがわかった。さらに、CNN での解析後の画像ともとの画像とを重ねることで、もとの微細構造のどのような部位が食感を生み出す鍵となっているかを調べた。その結果、従来の人間による推定においても着目されてきた、特に太さや複雑性といったグルテンタンパク質の微細構造は、CNN においても非常に多くの領域で強く認識されていた。一方で、CNN は、澱粉粒をグルテンタンパク質が取り囲む領域のうち、特に真円状の領域といった、これまでに人間が着目していなかった微細構造についても強く認識していることがわかった。これらの人工知能による新たな示唆は、グルテンタンパク質の微細構造と食感の関係についての理解を深化するのに有用であると考えられる。一方、AI を用いた生理機能性の発現の予測については、高い予測精度が得られなかった。これは学習データが十分でなかったことが原因の一つと考えられ、この点に関しては、今後の課題である。

<引用文献>

- ① T. Ogawa and Y. Matsumura, Revealing 3D structure of gluten in wheat dough by optical clearing imaging, *Nat. Commun.*, 12(1), 1708, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 224
2. 論文標題 透明化による麵内部の三次元構造の可視化と人工知能を用いた食感の予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Foods and Food Ingredients Journal of Japan	6. 最初と最後の頁 286-295
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 Takenobu Ogawa and Yasuki Matsumura	4. 巻 12
2. 論文標題 Revealing 3D structure of gluten in wheat dough by optical clearing imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1708
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-22019-0	査読の有無 有
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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菊池茂花、小川剛伸、谷史人
2. 発表標題 透明化手法を用いた米粒タンパク質の3次元分布の可視化
3. 学会等名 日本食品科学工学会第66回大会・第15回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川剛伸、谷史人
2. 発表標題 バーチャル・リアリティーで体現した食品内部の3次元マイクロ構造
3. 学会等名 日本食品科学工学会第66回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 麵等の食品試料を透明化する試薬およびその透明化法 (Optical clearing reagent for carbohydrate-containing sample and optical 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、63/160,269	出願年 2021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
---------	---------