

助教	2009年 京都大学農学部卒業
小川 剛伸	2011年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了
	2011年 日本学術振興会特別研究員 DC1
共同研究者	2014年 京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了
谷 史人	2014年 日本学術振興会特別研究員 PD
	2016年 京都大学大学院農学研究科助教
	現在に至る

食感を支配する小麦粉食品内部の三次元ネットワークの マイクロ構造に及ぼす食品の製造・加工条件の影響

概要

食品内部のマイクロ構造は、製造時の品質や喫食時の食感などを決定する非常に重要な因子である。本研究では、麺内部のグルテンタンパク質のマイクロ構造を対象とし、製造・加工条件がこのマイクロ構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。そして、食塩等の添加にともなう、マイクロ構造の劇的な変化を三次元的に可視化し、人工知能を活用することで、食感を生み出す特徴的なマイクロ構造の推定が可能であることを示した。

背景および目的

麺やパンなどの小麦粉食品中のグルテンタンパク質は、三次元的なネットワーク状のマイクロ構造を形成し、製パン時の膨らみや喫食時の食感などを決定する非常に重要な因子となっている。例えば、食塩を小麦粉生地に添加すると生地が「引き締まる」とか、生地を熟成させ過ぎると生地が「ダレル」といった調理学的な現象はよく知られているが、その際のグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造がどのように変化しているのかについては十分に理解されていない。それにより、食品製造・加工の分野において、食塩などの添加物の種類や量、ならびに混練・成型などの製造・加工条件をどのように変えれば、どのような食感になるのかについては、経験則によるのみで、論理的な決定については暗中模索の状態である。

本研究では、麺を例に、喫食時の食感を自在に制御することを目指し、グルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造に及ぼす製造・加工条件の影響、ならびにグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造が食感に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

材料および方法

製麺

麺内部のグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造は、食塩やグルテン、加工澱粉等の添加物、ならびに圧延成型や押し出し成型といった製麺方法や条件の影響を大きく受ける。そこで、三次元ネットワークのマイクロ構造が食感に及ぼす影響をより詳細に調べることを目的に、本報では、代表例として、食塩およびグルテンを添加した場合について報告する。また、製麺操作による試料間のバラつきを低減させるために、押し出し成型を採用した。以下にその方法を記す。

麺用の小麦粉（粗タンパク質 8.5%、灰分 0.34%）500 g に 160 g の Miili-Q 水を加え、ミキサー（Hobart、N50）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 1.9 mm と 0.8 mm であり、これをコントロール試料とした。なお、食塩あるいは粉末状のグルテン（Nacalai tesque）の添加にともない、加水量を増加させた。

構造観察

麺内部のグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造は、「透明化」と「蛍光観察」を組み合わせる方法で可視化した。生体試料用の透明化溶液⁽¹⁻³⁾では、麺などの食品試料を完全に透明化できないため、これまでに我々が開発した SoROCS 溶液を用いた^(4,5)。可視化の方法を以下に簡潔に記載する。

まず、麺試料を SoROCS 溶液に 30℃ の条件下で浸漬し、透明にした。なお、十分な透明度が得られているかを確認するために、冷却 CCD を搭載した画像撮影システム（GE Healthcare、ImageQuant LAS 4000）で経時的に試料を撮影し、透明度を計測した。次に、透明化した試料を二光子励起蛍光顕微鏡（Olympus、FV1200MPE-BX61WI）を用いて計測した。この際、励起レーザーは、InSight DeepSee（Spectra-Physics）を用い、対物レンズは、25 倍の透明化試料専用（XLSLPLN25XGMP、NA = 1.0、WD = 8 mm、RI = 1.41~1.52）のものを用いた。対物レンズの RI 値は、透明化した試料のそれと同じになるように設定した。なお、蛍光シグナルは、GaAsP PMT で検出し、顕微鏡に付属のソフトウェア（Fluoview FV10-ASW）で制御した。

圧縮試験

食感は、クサビ形のプランジャー（Yamaden、No. 49）を装着したクリープメーター（Yamaden、RE2-33005B Rheoner II）を用いた圧縮試験により定量化した。なお、圧縮は、20 N のロードセルで 0.1 mm/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。

結果および考察

麺の透明化

コントロール試料を SoROCS 溶液に浸漬し、透明化した。同じ試料を腐敗防止のために 0.5%(wt/wt)のアジ化ナトリウムを添加した水に浸漬した場合と比較すると、SoROCS 溶液の場合、6 時間後にはかなり透明度が増し、12 時間後ではほぼ透明となり、3 日後には目視では確認できない程度まで透明にすることができた。一方で、水の場合、麺試料の膨潤により、浸漬時間の延長とともに不透明度が増加した (図 1 (A))。この挙動を経時的に計測すると図 1 (B)に示すようになることがわかった。

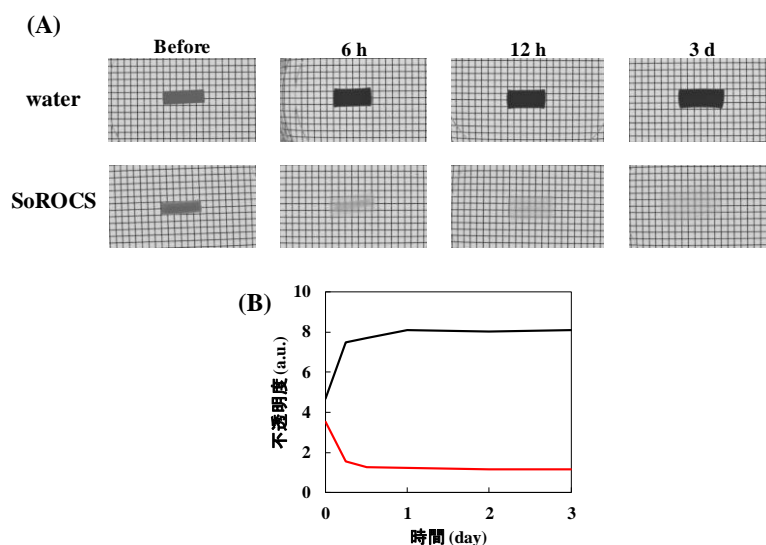


図 1 水と SoROCS 溶液に浸漬した際の麺試料の様子。(A) 格子状の線を印字した透明フィルムを麺試料の下に敷き、上から CCD カメラで撮影した画像。不透明な麺試料は、画像中央部に長方形状に写っている。(B) CCD カメラで撮影した画像の輝度値より麺試料の不透明度を計測した。不透明度の値が大きいほど、不透明であることを示す。なお、黒線および赤線はそれぞれ水および SoROCS 溶液に浸漬した麺試料である。

麺内部のグルテンタンパク質

次に、透明な麺試料について、蛍光ラベルしたグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造を観察した (次頁の図 2 (A) ~ (D))。食塩の添加量が(A)、(B)、(C)と増加するにしたがって、マイクロ構造は変化し、それにともない圧縮に要する応力は低下した (次頁の図 2 (E))。これは、三次元的なネットワークの繋がりが弱まることで、麺の骨格を形成する構造が脆くなり、圧縮に抗する力が低下したことを示す。一方、グルテンを添加すると、麺内部に形成されるグルテンタンパク質の量は増加したが、ネットワーク状のマイクロ構造はほとんど変化せず、圧縮に要する応力はわずかに増大するにとどまった。この結果についても、三次元的なネットワークが圧縮応力、すなわち食感に大きな影響を及ぼすことを示す。このような意味で、試料の透明化による内部のマイクロ構造を三次元的に理解することは重要であると考えられる。

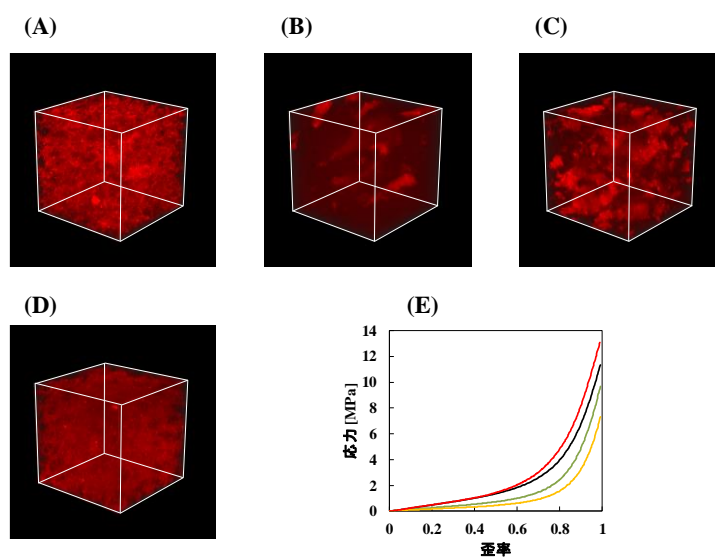


図2 麺内部のグルテンタンパク質の三次元ネットワークのマイクロ構造。(A) はコントロール試料の麺であり、(B) および(C) は食塩を、(D) はグルテンを添加した。コントロール試料では、グルテンタンパク質がハニカム状の細やかなネットワーク構造を形成しているが、(B)、(C) と添加する食塩濃度を増大させると、グルテンタンパク質の凝集と再分散が認められた。(E) は各種麺試料の圧縮時の応力-歪み曲線を示す。黒線、緑線、黄線、赤線は、それぞれ(A)、(B)、(C)、(D) の麺試料に対応する。

さらに、マイクロ構造から食感を予測できるようにするために、前述した以外の麺試料を含め、種々の麺内部のグルテンタンパク質のマイクロ構造と圧縮時の応力を人工知能に学習させた。そして、各麺試料について異なる場所で計測したマイクロ構造の画像データとそれに対応する圧縮時の応力を用いて人工知能の学習（予測）精度を検証した結果、95%以上の精度で圧縮時の応力を予測できた。さらに、学習後の人工知能を解析することで、長年の謎であった「食感を生み出す食品内部の特徴的な構造」を推定できることがわかった。本成果は、食感などの品質を自在にデザインするための学術的な基盤の確立につながることを期待できる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご援助賜りましたサッポロ生物科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の一部は、京都大学大学院医学研究科医学研究支援センター蛍光生体イメージング室のご支援を賜りました。

引用文献

- (1) Hama, H, et al., (2011) *Nature Neurosci.*, **14**. 1481–1488.
- (2) Chung, K, et al., (2013) *Nature*, **497**. 332–337.
- (3) Ke, MT, et al., (2013) *Nature Neurosci.*, **16**. 1154–1161.
- (4) 小川剛伸、松村康生 (2016) 日本農芸化学会 2016 年度大会、4E050.
- (5) 小川剛伸、谷史人 (2018) 日本農芸化学会 2018 年度大会、2B10p16.