

新規計測・解析法の開発による食品品質を支配する複雑機構の解明

小川 剛伸 (京都大学大学院農学研究科)

ogawa.takenobu.6v@kyoto-u.ac.jp

既存の食品製造プロセスは、経験則に基づくものが多く、製造工程で生起する現象の十分な理解に基づいて合理的に設計・運転されているものは多くない。乾燥および復水（吸水）プロセスもそのような例の一つである。そこで、含水率に依存して食品の輝度が変化することに着目した新たな含水率分布の計測法を開発し、食品内部における水の移動機構を解明した。また、食品は生物資源を原料としており、製造時には多くの複雑な化学的・物理的な現象が生起するため、全現象を定量的に解析することは不可能に近い。そこで、現象を学術的に理解するための新たな解析法として、全現象を人工知能（A I）内に再現する「A I 網羅的・逆解析法」を開発した。そして、麺内部のグルテン構造が食感（品質）を支配する複雑機構の解明を例に、本法の有効性を示した。本法は、様々な未知の複雑現象の解明に有用となることが期待できる。

はじめに

これまでに構築されてきた食品製造プロセスは、試行錯誤の繰り返しにより得られた経験則に基づくものが多く、製造工程で生起する現象の十分な理解に基づいて合理的に設計・運転されているものは必ずしも多くない。そのような例の一つとして、乾燥および復水（吸水）プロセスが挙げられる。保存性と輸送性を向上させるために水分を低減した乾燥食品は、吸水により食感や消化性等を向上させた後に喫食される。喫食時の品質は、乾燥および吸水時における水の移動挙動により大きく変化するが、食品内部における水の移動挙動は十分に解明されているとはいえない。演者らは、麺を試料対象として、食品内部における水の移動機構の解明に挑んだ。一方、このように機構が十分に解明できていない主な原因として、食品は生物資源を原料としており、かつ多くの化学的・物理的な現象が複雑に関与することが考えられる。そのため、現象を高精度で予測できる経験式を構築しても、その汎用性は低い。また、基礎式を解くにしても、食品が複雑な生物素材であるため、信頼できる各種の物性値等が得られず、生起する全現象を定量的に解析することは不可能に近い。そこで演者は、食品という非常に複雑な物体を加工する際に生起する現象の全体像を人工知能（A I）で再現し、現象を包括的に理解するための新たな解析法「A I 網羅的・逆解析法」を開発した。そして、麺内部のグルテンの構造が生み出す現象の解析に本法を適用し、その有効性を検証した。これらについて以下で概説させていただく。

1. 食品内部における水の移動機構および水の移動にともなう品質の決定機構の解明

食品内部における水の移動機構に関する既往の研究では、水の移動を直接的に高精度で計測できないことが大きな課題であった。そこで、水の移動挙動を定量的に測定する新たな計測法を開発し、この課題を解決した¹⁾。本計測法は、含水率に依存して食品の輝度が変化するという、多くの人が体験しているにも関わらず見逃していた現象に着目したものであり、汎用的なデジタルカメラで撮影した食品断面の画像上の各位置の輝度から含水率を計測するものである。本計測法は単純な原理であるが、既存の核磁気共鳴画像法や中性子ラジオグラフィ法では達成できなかった

た高い空間分解能を実現し、また低含水率までの非常に迅速な測定を可能とした (図 1 A)。さらに、装置が格段に安価である。本法で測定した麺内部の含水率の分布は、これまで食品科学者が予想していたものと大きく異なっていた。含水率の分布を詳細に解析した結果、従来の定説である濃度勾配に基づく拡散では説明できない極めて特異な現象を複数見出した (図 1 B ①~④)。その一例を挙げると、既存の水の拡散に基づくモデルでは、境界条件として、表面の含水率が瞬時に平衡値に達するとされていたが、実際は緩慢な速度で上昇していた (図 1 B 中の④の横矢印)。この現象の解明に際して、太さのない仮想的な麺を推定することを着想した。すなわち、種々の直径の麺を吸水させた際の平均含水率を直径が 0 mm の方向に外挿することで、無限に細い仮想的な麺の含水率を求め、これより拡散の影響を排除した水の移動挙動を推算した。その結果、直径が 0 mm の麺は、グルテンのみで作製した麺と同様の吸水挙動を示すことを見出した。以上より、高分子であるグルテンの弛緩が麺内での水の移動に対する律速となっているという新たな移動機構の一端を明らかにした²⁾。

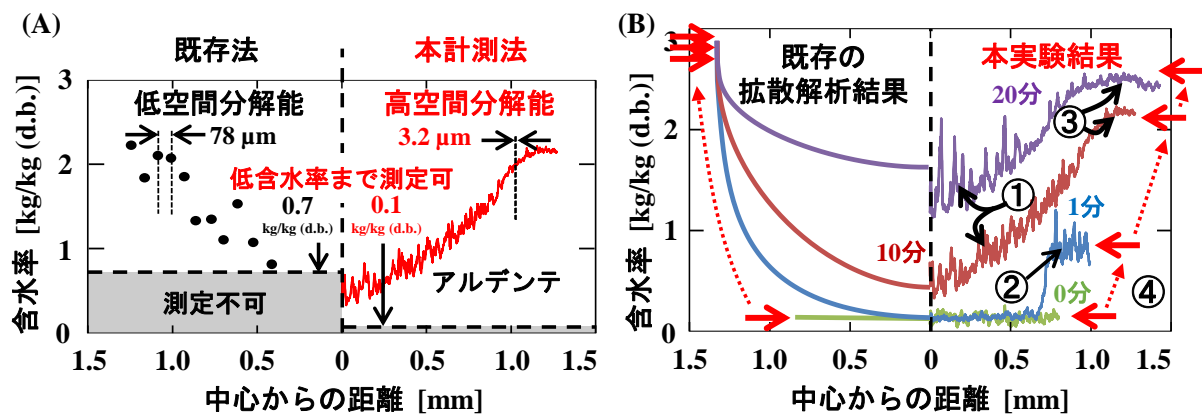


図1 麺内部の含水率分布。(A) 既存法と演者らが開発した計測法の比較。開発した新規法は、空間分解能が高く、含水率の低い領域まで測定でき、長年にわたり不明であった最適な茹で状態“アルデンテ”における含水率分布の計測に初めて成功した。(B) 既存の拡散モデルで解析した結果と新規法で計測した実験結果の比較(0~20分吸水した際の結果)。実際の含水率分布は、不均一(ギザギザ)な吸水(①)、吸水初期における麺表面の含水率の急激な上昇(②)、吸水後期における麺表面付近の含水率が一定の領域の出現(③)、図中に赤矢印で示す麺表面の含水率の緩慢な上昇(④)等、極めて特異な形状であることを見出した。

また、水の移動機構の解明により、麺内部での水の移動を任意に制御できるようになり、食品内部での含水率分布と食感の関係を解明した。すなわち、レオメータでの圧縮試験で得られる破断応力および破断歪率を基に食感を定量化し、破断応力および破断歪率は、それぞれ、低含水率領域およびグルテンの骨格構造の脆弱化に独立して影響を及ぼすことを見出した。そして、これらの知見を基に、喫食時の食感を支配している機構を明らかにした³⁾。さらに、明視野画像の解析に基づき、食品内部のクラックと表面形状を定量化する方法等を開発した。これらの計測法の適用により、加工条件が品質に及ぼす影響を体系化し、高品質な乾燥食品を合理的に製造するための基礎的な理論を構築した⁴⁾。

2. AI網羅的・逆解析法の開発と食品の種々の品質を支配する機構の解明

食品製造時に生起する非常に複雑な現象は、多くの場合、既存の方法を用いて解析することが極めて困難、または不可能である。そこで演者は、複雑な現象全体をAIで再現することにより、現象を包括的に理解する「AI網羅的・逆解析法」を考案した。この解析法では、入力と出力から成る既知の相関データセットを網羅的にAIに学習させることで、任意の入力からそれに対応する出力を予測できるようにした。一方、AIを用いて予測可能であっても、入力と出力との相関はブラックボックスのままであり、AIの思考(判断)過程は不明である。そこで、既知の相関データセットで学習を完了させたAIを逆解析することで、現象を支配する根源的かつ特徴的な要因を探索できるようにした。すなわち、複雑な機構の解明を可能にした。演者は、種々の条件で調製した麺内部のグルテンの構造が食感を生み出す現象を例に、AI網羅的・逆解析法の有効性を検証した。一般的に、AIの予測精度を高めるには、大量かつ高質の入力データを取得することが不可欠である。しかし、大量かつ高質のグルテンの構造画像を取得する手法は存在しなかった(図2A)。そこで、試料の透明化と蛍光計測を組み合わせる手法に着目した(図2B)。そして、麺等の食品を透明にできる新規物質の発見に基づき、食品内部の構造を高速かつ高空間分解能でまるごと三次元計測できる画期的な手法を開発した(図2C、D)⁵⁾。これにより、未知であったグルテンの三次元構造の解明に初めて成功するとともに、グルテンの構造画像を入力、麺の硬さ等の食感値を出力とし、その相関を網羅的にAIに学習させることを可能にした。その結果、AIにより任意のグルテンの構造から麺の食感値を高い精度で予測できるようになった。

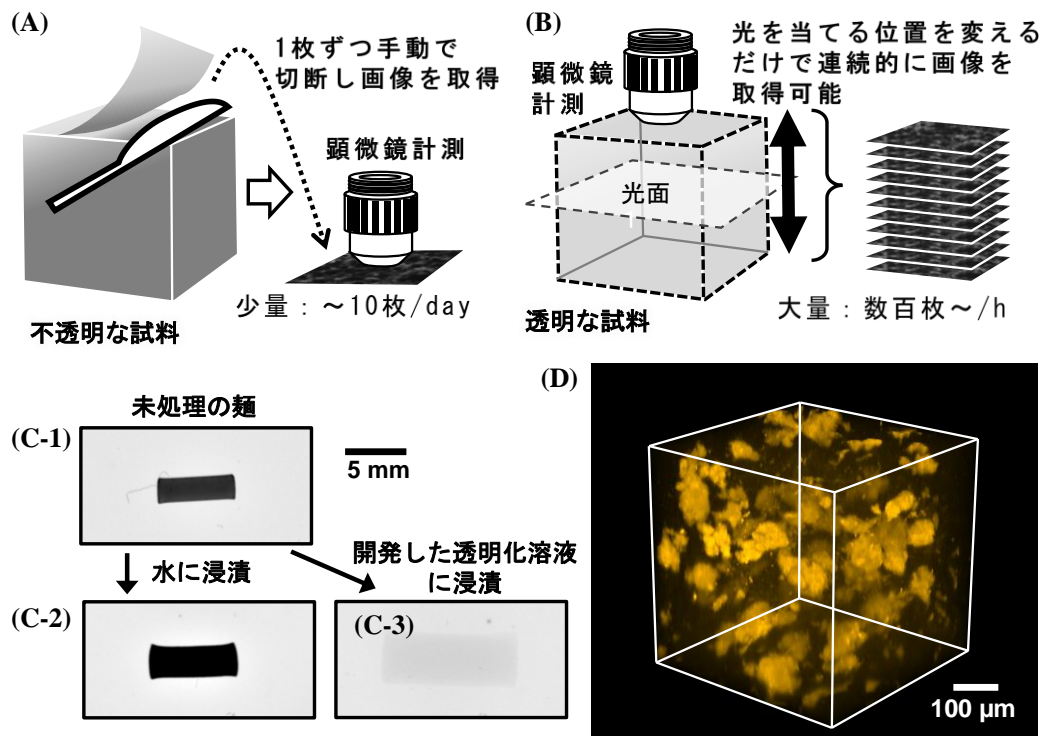


図2 透明化による三次元構造の計測。(A)従来の画像計測では、試料を一枚ずつ物理的に切断し、薄層切片を作製した後に画像を取得するため、微細な構造が破壊される可能性があるだけでなく、膨大な時間と労力を要する。(B)新規法では、試料を“透明化”することにより、顕微鏡計測時に励起光の位置を連続的に移動させるだけで、食品内部の詳細な構造を高速に計測することができる。(C)麺等の食品を透明にする新規物質(サリチル酸ナトリウム)の発見により、食品の透明化を可能にした。(D)開発した新規法により、麺内部のグルテンの三次元構造を計測することに初めて成功した。

次に、学習済みのA Iを逆解析することで、A Iが出力を予測する際に強く認識したグルテン構造領域を探索した。その結果、食感を生み出す基となる特徴的な複数の基幹グルテン構造を発見した。このように、A I網羅的・逆解析法により、食品製造プロセスで生起する複雑な現象を予測・解明できることを明らかにした。すなわち、従来の解析法では、基礎式や信頼できる物性値等を得ることができないため、解析が不可能であった現象に対しても、A I網羅的解析法は、入力から出力を予測できることを示した。また、A I逆解析法は、介在する現象や機構を解明することができ、従来の理論解析、数値解析、実験解析に加えた、新たな解析法となり得ることを示した。このように、A Iの中に対象とする現象を再現することで、食品素材の種類や量、製造時の各種条件などの因子（入力）から、美味しさ等を含めた食品の種々の品質（出力）を予測することが可能となり、包括的かつ学術的に食品の品質を自在にデザインできる道が拓けた⁹⁾。

おわりに

食品の製造プロセスは、依然として熟練技術者の経験や試行錯誤の繰り返しに頼っている部分が多く、未知なる現象の宝庫である。今後とも「コロンブスの卵」的な発想や革新的なブレイクスルーを大切にしながら、先人達が築き上げられた学術基盤をもとに、高品質な食品の合理的な製造を通して、農学の学術的な発展に貢献できるよう、一步ずつ着実に邁進していきたい。

謝辞

本賞にご推薦くださいました公益社団法人日本農芸化学会 会長 松山 旭先生、ならびにご支援をいただきました学会の諸先生方に厚く御礼申し上げます。本研究は、京都大学大学院農学研究科食品生物科学専攻農産製造学分野、同研究科農学専攻品質評価学分野、ならびに同研究科食品生物科学専攻食環境学分野（現、食品化学分野）において行われたものです。本研究を行う機会を与えていただき、卒業研究当初から現在に至るまで終始温かいご指導ご鞭撻を賜りました京都大学 名誉教授、京都先端科学大学 特任教授 安達修二先生に厚く御礼申し上げます。また、博士研究員時代に食品化学の観点から新たな方向性をご教授いただき、ご指導を賜りました京都大学 名誉教授、同大学生存圏研究所 特任教授 松村康生先生に深く感謝申し上げます。さらに助教着任後、日々の研究教育活動に対するきめ細やかなお気遣いのご指導、ご支援をいただいております京都大学大学院農学研究科 教授 谷 史人先生に深謝いたします。本研究を進めるうえで、様々な分野の先生方にご指導、ご協力をいただきました。また本研究の遂行を支えていただきました研究室のスタッフ、および共に研究を行った在学生、卒業・修了生、ならびに企業の皆様に感謝いたします。

引用文献

- 1) Ogawa T. and Adachi S.*: Food Bioprocess Technology, 7:1465–1471 (2014).
- 2) 小川剛伸*: 日本食品工学会誌, 21:25–36 (2020).
- 3) Ogawa T. and Adachi S.*: Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 80:769–773 (2016).
- 4) Ogawa T. and Adachi S.*: Drying Technology, 35:1919–1949 (2017).
- 5) Ogawa T.* and Matsumura Y.*: Nature Communications, 12:1708 (2021).
- 6) 小川剛伸*: FFI ジャーナル, 224:286–295 (2019).