



食品の内部構造が品質を支配する機構の解明

京都大学大学院農学研究科 小川 剛 伸

はじめに

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。保存性や輸送性の点から水分を低減した乾燥食品は、吸水により食感や消化性を向上させて喫食される。喫食時の品質は、乾燥および吸水時の水の移動挙動により大きく影響されるが、食品中での水の移動挙動は十分に解明されているとはいえない。著者らは、麺を例として、食品中での水の移動機構の解明に取り組んだ。なお、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挙げられる。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の不足により、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。そこで著者らは、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(AI)で再現し、現象を包括的に理解するための新たな解析法「AI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食感を生み出す現象の解析に本解析法を適用し、その有効性を検証した。その概要を以下に示す。

1. 食品中での水の移動機構の解明

食品中における水の移動機構に関する従来の研究では、水の移動を直接的かつ高精度で計測できないことが大きな障害になっていた。そこで、水の移動挙動を定量的に測定する新たな方法を開発し、この課題を解決した¹⁾。この測定法は、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、汎用的なデジタルカメラにより撮影した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。本測定法は極めて単純な発想であるが、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高い空間分解能を実現し、また低含水率までの測定を可能とした(図1A)。さらに、装置が格段に安価である。この方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想像していたものと大きく異なり、極めて特異な形状をしていた(図1A)。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1A中の④の横矢印)。この現象に対して、直径の異なる麺の吸水量を外挿することにより、無限に細い仮想的な麺の吸水挙動が推測できる(図1B)という新奇な着想と、示差走査熱量分析、熱重量分析等の汎用的な測定法を駆使することにより、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を明らかにした。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²⁾。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理論を構築した。

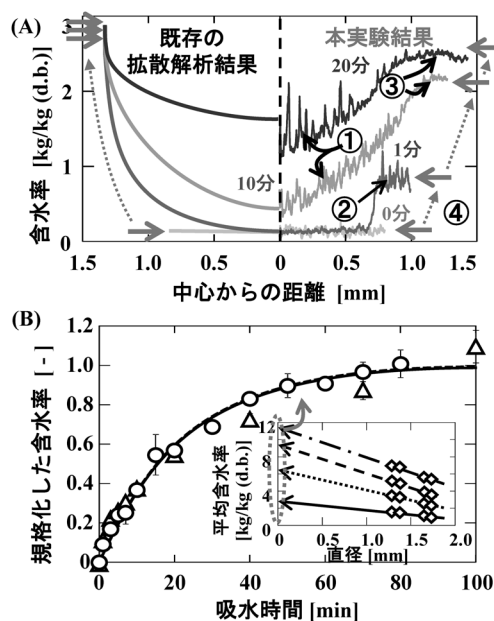


図1. 麺内部の含水率分布の経時変化とその推算法
 (A) 既存の拡散モデルで解析した結果と新規法で計測した実験結果の比較(0~20分吸水した際の結果)。実際の含水率分布は、不均一(ギザギザ)な吸水(①)、吸水初期における麺表面の含水率の急激な上昇(②)、吸水後期における麺表面付近の含水率が一定の領域の出現(③)、麺表面の含水率の緩慢な上昇(④)等、極めて特異な形状を示すことを見出した。(B) 太さ0 mmの麺(—○—)とグルテン麺(---△---)の規格化した含水率の経時変化。挿入図: 太さのない仮想的な麺の含水率の推算例。5分(—), 20分(⋯), 40分(---), および80分(⋯)吸水した際の挙動を示す。種々の直径の麺の平均含水率を直径が0 mmの方向に外挿することで、太さのな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。すなわち、グルテンネットワークの弛緩が水の移動を抑制する機構を解明した。

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

食品製造プロセスで生起する非常に複雑な現象は、既存の方法に基づいて解析することが極めて困難、または不可能であるため、著者らは、複雑な現象全体をAIで再現することにより、包括的に現象を理解する「AI網羅的・逆解析法」を考案した。本解析法では、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の予測を可能にした。一方、入力と出力との相関はブラックボックスであり、AIの判断過程は不明である。そこで、この学習済みの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、複雑な現象の機構の解明を可能にした点に学術的な価値がある。著者らは、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。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鍵である。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。そして、図2に示すように、サリチル酸ナトリウムが麺等の食品を透明にできることを発見し、食品内部の構造を高速かつ高空間分解能で三次元計測できる画期的な手法を開発した³⁾。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(畳み込みニューラルネットワークに深層学習)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した。次に、学習済みのAIを逆解析することで、AI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、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、AI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

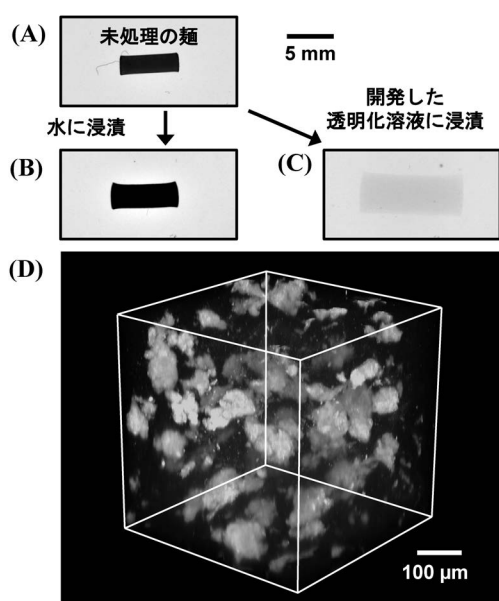


図2. 麺の透明化によるグルテンの三次元構造計測³⁾
(A)~(C) 麺等の食品を透明にする新規物質(サリチル酸ナトリウム)の発見により、食品の透明化を可能にした。(D) 本透明化により、麺内部のグルテンの三次元構造を計測することに成功した。

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、AI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、AI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⁴⁾。このように、AI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。

おわりに

この度、幸運にも農芸化学奨励賞を賜ったことに感謝しつつ、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、農芸化学の学術的な発展に貢献できるよう、一歩ずつ着実に邁進していきたい。

(引用文献)

- 1) T. Ogawa and S. Adachi, *Food Bioprocess Technology*, Vol. 7, p 1465–1471, (2014)
- 2) T. Ogawa and S. Adachi, *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, Vol. 80, p 769–773, (2016)
- 3) T. Ogawa and Y. Matsumura, *Nature Communications*, Vol. 12, 1708, (2021)
- 4) 小川剛伸, *FFI* ジャーナル, Vol. 224, p 286–295, (2019)

謝辞 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。食品工学研究者として私を一から育成してくださった中で、特に、アイデアと工夫によりブレイクスルーを生み出し、課題を解決していく楽しさを教えていただきました。このことは、現在においても研究・教育に取り組むうえでの大きな原動力となっています。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。すべての方のお名前を挙げることはできませんが、親身に相談に乗っていただき共同研究をさせていただいた先生方、および実験装置や実験材料を提供していただいた先生方ならびに企業の方々には心から御礼申し上げます。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の皆様、卒業・修了生の皆様に感謝いたします。最後になりましたが、本奨励賞にご推薦くださいました日本農芸化学会関西支部長入江一浩先生、ならびにご支援をいただきました関西支部の諸先生方に厚く御礼申し上げます。