◇◇◇◇ 解説 (2018 年度日本食品工学会奨励賞) ◇◇◇◇

麺の乾燥および吸水動力学

小 川 剛 伸

京都大学大学院農学研究科

Drying and Rehydration Kinetics of Noodles

Takenobu OGAWA

*Division of Food Science and Biotechnology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University,
Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Drying is the oldest method for preserving food, and rehydration is one of the simplest methods of cooking. The behavior of water transfer inside foods during the drying and rehydration processes varies depending on the manufacturing and cooking conditions, respectively, and the food quality is strongly affected by the behavior. Existing manufacturing and cooking processes, which have relied on great experience and build through trial and error, cannot quickly and accurately respond to the diverse demands of recent years, such as health consciousness and insatiable pursuit for palatability. Therefore, the theoretical study that enables rational food production has been strongly demanded. However, the phenomena and mechanisms of water transfer and their effects on the quality are not well understood. Focusing on the pasta with relatively simple composition, we have elucidated the phenomenon and its mechanism of water transfer occurring during drying and rehydration processes, and also investigated the effect of the water transfer on pasta quality. This review provides the overview of our findings.

Keywords: drying, rehydration, noodle, pasta

1. 緒 言

食品製造における乾燥は、最も古い歴史をもつ食品の保存法であり、茹でること（吸水）は、最も簡便な調理法の1つである。乾燥過程および吸水過程における食品中の水の移動挙動は、製造時および調理時の条件によって大きく異なり、その挙動により、食品の品質は大きな影響を受ける。経験と試行錯誤に多くを頼ってきた既存の製造法では、近年の健康志向や美味しさへの飽くなき追求といった多様な要求に対して、迅速かつ的確に応えることが困難である。そのため、合理的な食品製造を可能にする体系的な理論研究が強く求められてきた。しかし、水の移動現象と移動機構、それらが食感などの品質に及ぼす影響については、必ずしも十分に解明されていないように思われる。筆者らは、粗挽きの小麦粉であるデュラムセモリナのみからなり、組成が単純なパスタを研究対象として、乾燥および吸水過程で生起する水の移動現象とその機構、そ

して水の移動挙動が品質に及ぼす影響を明らかにしてきた。本論文では、麺の乾燥挙動、デジタルカメラを用いた麺の特性評価、麺の吸水挙動、乾燥および吸水が麺の品質に及ぼす影響の順番に、これまでに得られた筆者らの知見について解説する。

2. 麺 の 乾 燥

2.1 水分収着等温線と水の部分モル体積

水分収着等温線は、ある温度における水分活性と食品素材の含水率との関係を表し、水分子と食品素材の間の相互作用を反映する。そして、水分収着挙動の温度依存性より、熱力学的な特性を知ることができる。パスタを乾燥させる伝統的なプロセスでは、乾燥空気の温度は30~40℃であり、現在の工業的なプロセスの最大乾燥温度は80~95℃である。したがって、多様なパスタの乾燥プロセスを合理的に設計するには、パスタの原料であるデュラムセモリナの水分収着等温線が広範囲の温度で必要となる。デュラムセモリナの水分収着等温線は、多くの食品と同様、Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) 式で良く表現できる (Fig. 1) [1]。すなわち、低い水分活性においては、デュラムセ

(受付 2020 年 2 月 13 日, 受理 2020 年 2 月 27 日)

〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

† Fax: 075-753-6285, E-mail: ogawat@kais.kyoto-u.ac.jp

Fig. 1 Desorption isotherms of water onto durum wheat flour at (Δ) 30°C, (□) 40°C, (▽) 50°C, (◇) 60°C, (▷) 70°C, and (○) 80°C. Curves are calculated to best-fit the observed moisture contents to the GAB equation.

モリナの表面に水分子が単層を形成し、水分活性が高くなると水分子の吸着が多層となり、さらに高い水分活性ではデュラムセモリナと水分子の相互作用は弱まり、細孔が水で埋まると考えられる。

水分吸着等温線の他に、食品素材と相互作用している水の特性を調べる手法として、ディラトメトリ法が挙げられる。この手法は、一定温度条件下で、非常に少量の水を食品素材に加えた際に、その食品素材の体積変化から水の部分モル体積を求めるものであり、測定には、上部に細いガラス管を有し、側方からシリンジで水を挿入できる孔をもつガラス製のフラスコを用いる (Fig. 2 inset)。まず、このガラス製のフラスコに、よく乾燥させたデュラムセモリナを入れて、ドデカンで容器を満たす。そして、一定温度に保ちながら、側部からシリンジで少量の水 (物質質量 Δn) を入れ、体積

Fig. 2 Partial molar volume at 25°C of water sorbed to the durum wheat flour for various moisture contents.

Inset: Schematic diagram of the equipment used for dilatometry: (a) capillary, (b) dodecane, (c) glass syringe with water, (d) durum wheat flour, (e) stirrer, and (f) casetometer.

変動がなくなったのを確認した後、加水前後の体積増加量 (ΔV) から、近似的に見かけの水の部分モル体積 ($\Delta V / \Delta n$) を求めていく (Fig. 2) [2]。通常、他の異なる物質から力を受けていない水 (バルクの水) は、1 mol で約 18 cm³ である。しかし、水がデュラムセモリナに単分子層吸着している領域では、非常に強く双方が作用しているため、約 9 cm³/mol とバルクの半分程度であった。その後、水を少しずつ加えていくと、吸着が単分子層から多分子層へと移行し、水の部分モル体積は徐々に増大した。そして、含水率が約 0.2 kg-H₂O/kg-dry matter 以降で一定となった。つまり、デュラムセモリナ内の細孔を埋めるような水は、バルクの水とほぼ変わらないことを意味する。なお、25°C において、デュラムセモリナがガラス状態からラバー状態に移転する際の含水率 [3] は、約 0.2 kg-H₂O/kg-d.m. であり、興味深い。

2.2 熱重量分析による乾燥挙動の解析

乾燥がどのように進行し、いつ終わるのかを予測することは、食品を製造するうえで重要であり、乾燥挙動を記述するモデルは非常に多く提案されている。一方で、それらのモデルを用いて予測するためには、種々の物性値が必要となる。これらの物性値は、論文などの文献を参考する場合も多いが、より精度よく予測するには、少なくとも実験室規模の乾燥装置を用いて実測することが不可欠であり、それには多量の試料を要する。筆者らは、数十ミリグラムという少量のスケールで測定を行う、熱重量測定 (Thermogravimetry: TG) に着目し、パスタの乾燥時の含水率の変化を高精度に予測する手法を開発した [4]。なお、TG は試料を一定の速度で加熱や冷却、あるいは一定の温度で保持したときの試料の重量変化を測定するもので、一般的には、気固反応や結晶水の定量など、熱反応プロセスの分析に用いられる。

まず、加水したデュラムセモリナをアルミ製の容器に圧入して、疑似的なパスタ試料を作製した。この際、Fig. 3 の内図に示すようにガラスシリンジを用いることで、押し固める圧力を調節することができる。このように作製したパスタ試料の重量を一定温度、一定湿度の条件で TG を用いて測定した。湿度の調節は、TG 装置の測定部に、飽和塩溶液中でバブリングさせた空気を送り込み行った。温度を一定速度で上げながら測定する、定速昇温条件での TG 解析も実施したが [5]、本稿では割愛する。乾燥特性曲線は、試料の含水率に対して乾燥速度をプロットしたものであり、重要な情報を得ることができる。その一例を Fig. 3 に示す。本実験においては、試料の量が少ないこともあり、材料予熱期間はみられず、乾燥速度が一定の定率乾燥期から始まった。この期間に、約 20% 程度の水が蒸発するこ

Fig. 3 The drying characteristic curve obtained by thermogravimetry at 90°C and 20.6% RH.
Inset: Schematic diagram of the equipment used for sample press: (a) glass syringe, (b) sample, (c) pressure gauge, (d) variable throttle, and (e) vacuum pump.

とがわかった。その後、含水率の低下にともない乾燥速度が低下する減率乾燥期に移行した。食品の乾燥を予測する多くのモデルでは、定率乾燥期を考慮せず、はじめから減率乾燥期と見なしているものが多いが、筆者らは、定率乾燥期を考慮して、パスタの乾燥挙動を記述するための簡易的なモデルを提案した [4]。なおこのモデルでは、以下の3つのことを仮定している。①パスタ内部での伝熱は速く、温度は一樣である。②物質移動係数は含水率に依存しない。③乾燥に伴う収縮は無視できる。そうすると、定率乾燥期における乾燥速度、ならびに減率乾燥期における含水率の変化量はそれぞれ式 (1) および式 (2) で表される。

$$R_w = \frac{w}{S} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dX}{d(t/L^2)} = -k(X - X_e) \quad (2)$$

そこで、TGの結果をもとに定率乾燥期における乾燥速度、および減率乾燥期間における物質移動係数を算出し、それぞれ温度と湿度の関数として表した [4]。また、平衡時の含水率については、前述した水分収着等温線 [1] をもとに、温度および湿度の関数とした [4]。

工業的なパスタの乾燥工程では、温度と湿度を連続的あるいは段階的に変化させるプログラム乾燥が用いられる。そこで、TGより得られた物性値および、構築したモデルと拡散方程式の解析解 [6] を用いて、実際のパスタをプログラム乾燥した際の含水率変化を予測できるか調べた。その結果、円柱状のパスタであるスパゲッティなどを乾燥した際の結果を良好に表すことができた (Fig. 4)。とくに、本モデルは、定率乾燥期を考慮しているため、乾燥初期を非常に精度よく予測できていることがわかる (Fig. 4 inset) [4]。パスタの場合、0.12 kg-H₂O/kg-d.m. 程度の含水率になるまで乾燥す

Fig. 4 Comparison of the experimental drying curve with the calculated ones with (-) and without (- -) considering the constant drying-rate period. Spaghetti (cylindrical pasta) was dried under three-step program conditions: Step 1 is 1 hour at 40°C and 60% RH, step 2 is 5 hours at 60°C and 75% RH, and step 3 is 1 hour at 30°C and 60% RH.
Inset: The extended figure for the early stage of drying.

るが、乾燥終了時刻を推定するには、定率乾燥期の考慮は必ずしも重要ではない。しかし、乾燥初期には、非常に速く含水率が低下するため、ひび割れ (クラック) が起こりやすい。クラックの発生は、パスタの品質の低下につながるため、初期の含水率の制御は重要であり、そのような意味で定率乾燥期の考慮は必要であろう。また、収縮はパスタの形状やガラス転移などが関与する複雑な現象であり [7]、十分に理解されているとはいえない。高精度な含水率の予測は、収縮に起因するクラックの発生機構を解明するのにも役立つだろう。

3. 汎用的なデジタルカメラを用いた麵の特性評価

家電として販売されている汎用的なデジタルカメラは、コストパフォーマンスに優れている。筆者らは、デジタルカメラを用いて、麵の特性を簡便に測定する手法を3つ考案した。

3.1 表面粗さの定量

パスタの表面粗さは、調理 (吸水) の速度やパスタソースの絡みやすさといった品質に大きく影響する。一般的に、表面粗さの測定には、接触粗さ計などの接触型とレーザー走査顕微鏡などの非接触型の2種類が用いられる。表面が比較的柔らかいパスタの表面観察には、非接触型の機器が適しており、国際標準化機構 (ISO) および日本工業規格 (JIS) の要件を満たしているレーザー走査型顕微鏡による測定が好ましい。しかし、現在ではかなり改善されているようであるが、測定試料に急傾斜や陰影があると、レーザーの反射率の低下や

遮断が起こるため測定精度が悪化するという原理的な欠点が存在する。

表面が粗い物体は、より多くの光を表面で屈折あるいは散乱させる。筆者らは、この点に着目して、デジタルカメラで撮影したパスタの透過画像をもとに、急勾配や陰影のある部分を含むパスタであっても、表面粗さを高い精度で迅速に測定できる方法を開発した[8]。種々の材質（ブロンズ、アルミニウム、ポリカーボネート、ポリプロピレン、テフロン）のダイスで成型したパスタについて、デジタルカメラで撮影した画像を Fig. 5 (A) に示す。パスタの伝統的な製法では、ブロンズ製のダイスを用いており、このダイスの穴より射出成型されたパスタの表面は粗くなる。粗くすることで、パスタソースが良く絡むことを期待している。一方、ブロンズ製のダイスは摩耗が速いこともあり、近年の工業的な製造では、テフロン製のダイスが主流である。テフロン製を用いると、パスタの表面は滑らかになる。

これらのパスタの表面をレーザー走査型顕微鏡で計測した際の表面粗さの分布（最も深い位置を基準とした高さの分布）を Fig. 5 (B) に示す。テフロン、ポリプロピレン、ポリカーボネート製のダイスで作製したパスタの表面粗さの分布は、低い領域でシャープなピークとなり、アルミニウム製およびブロンズ製では、高い領域でブロードなピークとなった。

デジタルカメラで撮影したパスタのカラー画像をモノクロ化して、画像内でパスタが写った範囲を対象に、輝度値の頻度（ヒストグラム）を算出した。ここで、輝度値の範囲は0～255（黒から白、8ビット）であり、値が大きいほど白いことを示す (Fig. 5 (C))。表面が滑らかなパスタは、表面での光の散乱が少なく、パスタ

タを通り抜けて来る光が均一であるため、より大きな輝度値を狭い範囲で示した。一方、ブロンズ製およびアルミニウム製のダイスを用いて作製したパスタは、表面が粗いため、小さな輝度値を広い範囲で示した。レーザー走査型顕微鏡による粗さ分布とデジタルカメラによるヒストグラムを比較すると、双方の形状はよく一致しており、比較的高精度で表面粗さの分布を計測できることがわかった [8]。

3.2 クラックの定量

2.2でも述べたがクラックが生じたパスタは、日本において商品価値が著しく下がる。工業的な製造において、製造ラインの始動時などに、非常に稀にクラックが生起するようである。従来では、特定パターンを見つけ出すパターン認識や物体の輪郭を検出するエッジ検出といった画像処理アルゴリズムを組み合わせることでクラックを検出することが試みられてきた。しかし、ブロンズ製のダイスで作製したパスタは表面が粗く、一般的に用いられるクラック検出のアルゴリズムでは、粗い表面をクラックと誤認識する問題点がある。そこで、デジタルカメラで撮影したパスタの画像からクラックのみを検出する手法を開発した [9]。詳細は割愛するが、本手法はパスタをデジタルカメラで撮影した画像の輝度値のヒストグラムに着目したものであり、輝度値のヒストグラムの形状的な特徴量をもとにクラックを識別することで、表面の粗いパスタについてもクラックを検出できるようにした。

近年では、人工知能 (AI) の発達により、クラックの生起をはじめとする不良品の選別に AI を用いることが注目を集めている。そのような中で、従来の画像処理は、時代遅れになっているのかもしれないが、AI と

Fig. 5 (A) Transmission images of spaghetti extruded through dies made of (a) bronze, (b) aluminum, (c) polycarbonate, (d) polypropylene, and (e) Teflon. The diameter of each spaghetti was 1.7–1.8 mm. Images were trimmed from their original size to enhance the visualization of surface roughness. (B) Examples of height-level frequency distributions derived from laser scanning microscopy, for spaghetti extruded through dies. (C) Examples of gray-level frequency distributions.

異なり学習が不要であることは長所であろう。とくに、パスタのクラックのように、発生が稀な現象に対しては、AIに学習させる教師データの収集が課題となる。

3.3 含水率分布の測定

乾燥パスタの最適な茹で状態は、アルデンテとよばれ、調理学的には髪の毛1本の芯が中心に残った状態を指す。パスタを吸水させると、水は表面から内部へと入っていくため、パスタ内部の含水率は一様ではなく、分布が生じる。パスタは含水率の増加にともない、色が明るくなる。筆者らは、この色の変化にもとづき、パスタ内部の含水率分布を測定する方法を開発した[10]。この方法は、次の5つのステップからなる。

最初のステップでは、吸水させたパスタを2セット用意する。1セットは含水率分布の測定用であり、もう1セットは、色の明るさ（輝度）と含水率を相関させる検量線の作成用である。検量線を作成するためのパスタは、吸水後、70℃で3日間静置してパスタ内の含水率分布を均一にする。2番目のステップでは、2セットのパスタを切断し、その断面を上方からデジタルカメラで撮影する (Fig. 6 (A))。3番目のステップでは、カラー画像をモノクロ化する (Fig. 6(B))。4番目のステップでは、内部の含水率分布を均一化したセットを用いて、モノクロ画像のグレースケールと含水率とを相関させる検量線を作成する。最終ステップでは、含水率分布を測定するためのセットについて、検量線をもとに、グレースケールを含水率に変換する。これにより、パスタ内部の含水率分布を測定することができる。

食品中の含水率分布は、多くの場合、核磁気共鳴画像 (MRI) 法や中性子ラジオグラフィ法で測定される。今回開発した装置の空間分解能（約 3.2 μm）は、MRI法を使用して得られる空間分解能の約 20 倍であり、原理的には可視光の波長程度まで高めることができる。

Fig. 6 (A) Schematic diagram of the equipment used for measuring moisture distributions: (a) digital camera, (b) cold light illuminator, (c) illumination box, (d) light shield, and (e) sample. (B) The cross-section images of pasta rehydrated during 10.2 minutes which was acquired using the digital camera (f) and digitally processed (g), respectively.

また、MRI 法では、アルデンテ時の中心部に存在する含水率が低い領域を原理的に計測することが困難である。本手法は、空間分解能が高いだけでなく、そのような低い含水率についても測定することを始めて可能にした。

4. 麺の吸水

4.1 吸水挙動

4.1.1 一定温度下における吸水挙動

スパゲッティを一定温度で吸水させた際の含水率の変化を Fig. 7 に示す [11]。パスタ [11-12] やうどん [13-14] といった麺類だけでなく、多くの食品でも同様の挙動を示す。吸水時間をスパゲッティの直径の2乗で除した値に対して含水率をプロットすると、太さが異なるスパゲッティ（正確には、太さによってフェデリーニやスパゲッティーニと呼称が変わる）であってもそれらの吸水挙動は、一本の曲線で表される。後述するように、吸水は非常に複雑な現象であるが、この結果は、含水率勾配を駆動力とする拡散がパスタの吸水挙動に強く関与していること示唆している。これらのことを考慮して、筆者らは次式を用いて吸水挙動を解析した。

$$X = \frac{a \times (t/d^2)}{b + (t/d^2)} + X_0 \quad (3)$$

上記の式は双曲線型であり、吸水初速度（ $t=0$ のときの速度）は a/b となり、最大の含水率（平衡時の含水率） X_e は $a + X_0$ （ a は初期の含水率 X_0 より十分に大きいので $a + X_0 \approx a$ と近似できる）で表すことができる。吸水初速度 a/b と平衡時の含水率 a の温度依存性を Fig. 8 に示す [11]。吸水初速度 a/b は、低温から高温にかけてアレニウス型の温度依存性を示し、近似直線の傾きより算出した活性化エネルギーは 30.5 kJ/mol であった。一方で、平衡時の含水率 a は、その温度依存性 (Fig.

Fig. 7 Rehydration of spaghetti at (○) 90℃, (△) 80℃, (□) 70℃, (◇) 60℃, (▽) 55℃, (◁) 50℃, and (▷) 20℃. Curves are calculated to best-fit the observed moisture contents to eq. (3).

Fig. 8 Temperature dependencies of (Δ) the equilibrium moisture content a and ($\circ$) the initial rate of rehydration a/b .

8におけるプロットの傾き) から約 40℃以下の低温領域, 約 40~60℃の遷移領域, 約 60℃以上の高温領域に分けられ, 低温領域と高温領域のそれぞれにおける近似直線の傾きより算出した吸水のエンタルピー変化は, 1.44 と 25.1 kJ/mol であった. このスパゲッティを示差走査熱量計 (DSC) で測定すると, 糊化開始温度 (T_{onset}) と糊化ピーク温度 (T_{peak}) は, それぞれ 45.3 と 60.5℃ とそれぞれ遷移領域の開始温度と終了温度とほぼ一致する.

4.1.2 吸水溶液中の塩の影響

工業的に製造される多くのパスタは, うどんなどと異なり, 加水した小麦粉 (デュラムセモリナ) に食塩を添加しない. その代わりに, 吸水時に 0.5~1% (w/v) の食塩水を用いる. 種々の濃度の塩溶液で吸水させた際の含水率を時間に対してプロットすると, Fig. 7 と同様に, 双曲線型の式 (3) でよく表すことができ, 塩濃度が高くなるほど, 含水率は低下した [15]. しかし, 実際に食する塩濃度程度では, 大きな差はみられないようである.

塩の添加が吸水挙動に及ぼす影響を調べるために, 喫食はできないが, 食塩の他に塩化リチウムと塩化カリウムの溶液などで吸水試験を行った. そして, 無限円柱に対する拡散方程式の解析解をもとに, 見かけの拡散係数を算出した. 用いた塩は溶液中で電離していると考えられ, 塩化物イオンは共通であることから, 各カチオンの結晶半径 ($\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+$) に対して見かけの拡散係数をプロットした (Fig. 9). 結晶半径が大きくなるほど, 見かけの拡散係数が大きくなり, 矛盾しているようであった. 一方, 水和を考慮すると各カチオンの半径 (ストークス半径) の大きさは, 結晶半径とは逆の順番となる ($\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$). そのため, ストークス半径に対して見かけの拡散係数をプロットすると, ストークス半径が大きくなるほど, パスタの吸水は遅くなるという妥当な結果が得られた. ただし, この見かけの拡散係数は, カチオンの挙動を直接的に表すも

Fig. 9 Relationships between the apparent diffusion coefficient at 60℃, the crystalline radius (closed symbols) and the Stokes radius (open symbols) for ($\circ$) 1.83 mol/L LiCl, ($\square$) NaCl, and (Δ) KCl solutions.

のではないことに注意されたい.

4.1.3 パスタの表面粗さの影響

テフロン製のダイスで作製したパスタの表面は, 一見滑らかであるが, 顕微鏡で拡大すると Fig. 10 の内図のように, 凹凸が認められる. 3.1 で述べたが, ブロンズ製のダイスで作製したパスタは表面が粗い. 種々の材質で作製したスパゲッティを円柱と仮定して算出した単位表面積あたりの初期の吸水量は, 表面が粗いほど大きい (Fig. 10 に $\circ$ で示す) [16]. しかし, 表面の凹凸を考慮して, 単位表面積あたりの初期の吸水量を計算すると, 表面の粗さに依存しないことがわかる (Fig. 10 に $\bullet$ で示す). ダイスの材質が異なると, 押し出し時にパスタに加わる圧力は変わるが, 糊化温度や平衡時の含水率には影響を及ぼさなかった [17]. ブロンズ製のダイスで作製したパスタは, テフロン製のパスタと比較すると, 最適な含水率まで吸水するのに要する時間が約 1 分短い. このような時間の短縮は, 茹で水と接する表面積が増えたことに起因するようである.

Fig. 10 Dependence of the momentarily rehydrated amounts of water per unit area for ($\circ$) smooth and ($\bullet$) rough on the calculated average roughness. Inset: AFM image of the surface of spaghetti extruded through Teflon die [22].

4.1.4 定速昇温下における吸水挙動

4.1.1において、平衡時の含水率の温度依存性から、パスタの糊化温度を把握できることを解説した。この方法では、一定の温度で吸水しているため、温度を変えて複数回、吸水試験を実施する必要がある。そこで筆者らは、吸水の温度を直線的に上げていく、定速昇温条件を採用することで、1回の吸水試験から糊化温度を簡略的に計測することを考案した[18]。異なる昇温速度で吸水した場合の含水率の変化をFig. 11に示す。含水率は、ある時間(温度)を境に急増し、それぞれ時間に正比例した直線で近似できる。この2本の直線の交点温度を計測すると、それらはDSCによる糊化開始温度と糊化ピーク温度の中間に位置した(Fig. 11 inset)。糊化温度は、測定法により多少の差異がみられるため、本手法により得られた糊化温度は、妥当であると考えられる。

4.2 吸水機構の推定

前述したように、パスタを吸水すると内部には含水率の分布が形成される。前項までに解説した吸水挙動の解析においては、この分布を考慮せずに、平均的な含水率を用いている。平均的な値からであっても、非常に多くの有用な情報を得ることができるが、やはり“平均的”であって、詳細な吸水機構を考究するには、パスタ内部における水の移動を調べることが不可欠である。

3.3で解説した測定法を用いて、乾燥パスタを吸水した際の含水率分布の経時変化を調べたところ、従来の拡散モデルをもとに予測されていた含水率分布と形状がかなり異なっており、次のようなユニークな特徴がみられた(Fig. 12)[10]。すなわち、①吸水後の全ての含水率

Fig. 12 Moisture distributions of spaghetti rehydrated for (a) 0, (b) 1, (c) 10.2, and (d) 20 min.

分布の形状に幅が10~40 μm 程度の細かな凹凸が認められた。②1分間吸水した初期において、表面付近のみで含水率が急激に上昇した。③10分以降の吸水後期では表面付近に含水率がほぼ一定の領域がみられた。④熱水と接する表面の含水率が徐々に増加した。

デュラムセモリナ中の澱粉の粒径は、2~40 μm 程度であり、①の含水率分布の細かな凹凸の間隔とほぼ一致する。澱粉粒は、粒径により吸水性が異なることが知られており、この細かな凹凸は、澱粉粒の不均一な吸水挙動を反映していると考えられる。本手法では、測定空間分解能が従来法に比べて向上したことで、詳細にパスタ内部における水の移動挙動を計測できる。②のような含水率の急激な上昇は、パスタ表面に形成された非常に小さな(目に見えないような)亀裂に熱水が入り込み、表面付近の澱粉粒が糊化することで生じたと考えられる。また、デュラムセモリナに対するガラス転移曲線[3]より、この付近でガラス状態からラバー状態に移行しているようである。従来の拡散モデルによると、水の移動は含水率勾配を駆動力としており、③のように含水率が一定の領域では、水は移動できず、矛盾が生じる。また、パスタの表面では、熱水と接しているにも関わらず、その含水率の上昇が非常に遅いようである。“表面”における吸水挙動を明らかにするために、“表面”と“太さのない直径が0 mm”が同等とみなせるであろうことに着目し、太さのない直径が0 mmの仮想的なパスタを考えた[19]。しかし、そのようなパスタは存在しないため、さまざまな直径のパスタの平均含水率を測定し、それらの値に対して、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パスタの含水率を推算することを考えた(Fig. 13 inset)。直径0 mmのパスタの含水率は、太さがないにも関わらず、瞬時に平衡値に到達せず、時間に対して徐々に増加した(Fig. 13)。次に、デュラムセモリナからグルテンを取り出し、グルテンのみからなる麺を作製して、吸水挙動を調べたところ、先ほどの直径0

Fig. 11 Rehydration curves for spaghetti at the different temperature-raising rates. The temperature-raising rates were (∇) 0.50, ($\square$) 0.77, ($\triangle$) 1.00, and ($\circ$) 1.38 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Inset: Relationships of the ($\blacksquare$) onset and ($\bullet$) peak temperatures in differential scanning calorimetry (DSC) and the changed-point temperature by the proposed method for the 8 different noodles.

Fig. 13 Changes in the normalized moisture contents for (—●—) 0 mm pasta and (—■—) gluten pasta. Inset: Estimation of the moisture content of infinitely thin pasta with initial diameters of (○) 1.30, (△) 1.35, (◇) 1.63, and (□) 1.71 mm by extrapolation at the rehydration times of (a) 5, (b) 20, (c) 40, and (d) 80 min.

mm のパスタの吸水挙動と非常によく一致した (Fig. 13). なお、これらのパスタの平衡時の含水率は異なるため、Fig. 13 では規格化した含水率でプロットしている。高分子であるグルテンは、吸水によりエネルギー的に有利な構造を自発的に獲得しようとして、そのネットワーク構造が弛緩すると考えられる。このような高分子の弛緩の進行は非常に緩慢な過程であることが知られており、グルテンの網目状のネットワークに囲まれた澱粉粒は、糊化による膨潤が抑制される。

以上のことから、パスタ内部での水の移動機構を推察すると次のようになる。乾燥パスタには、乾燥時に生じた非常に小さい（目視では判別できない程度の）亀裂があり、熱水に浸漬すると即座に、この亀裂から熱水が入り込む。熱の移動は速いため、パスタの温度は中心部であっても、比較的短時間のうちに熱水の温度まで到達して、ガラス状態からラバー状態に移転する。糊化の速度は、拡散のそれに比べて非常に速いため、表面付近の亀裂から供給される熱水は、その近傍の澱粉の糊化に使用され、パスタ内部へは届かない。そのため、吸水初期には、表面より少し内側に急激な含水率分布の段差が形成されると考えられる。しかし、含水率の勾配が非常に大きいため、拡散により水は中心部へと徐々に移動するようになる。一方、パスタ内部では、澱粉粒がネットワーク状のグルテンに取り囲まれており、澱粉粒は拡散によって移動してくる水を利用して速やかに糊化・膨潤しようとするが、周りのグルテンがその膨潤を抑制する。律速となっているグルテンのネットワークが弛緩すると、そこに内包されている澱粉粒が即座に水を取り込むため、パスタの表面付近では含水率が一定の領域が生じ、含水率の勾配がなくても含水率が上昇すると考えられる。さらに、吸水した澱粉は、膨潤するため、含水率が一定の領域が

広がっていく。このように、パスタは吸水の進行にともない、膨張していくが、表面と中心とでは含水率に勾配が生じるため、この勾配を駆動力とする拡散により、水はゆっくりと内部に移動していく。それにより、中心付近では、放物線に近い含水率分布を形成すると考えられる。

4.3 含水率分布と食感

麺を茹で過ぎるとコシがなくなるというように、含水率分布は食感を決定する重要な因子であるが、含水率分布と食感の関係は十分にわかっていない。そこで筆者らは、種々の条件で吸水させたパスタの含水率分布と、クリープメーターを用いた破断試験で得られる破断応力および破断歪率の関係を調べた [20-21]。吸水の温度 (60℃, 80℃, 100℃) が異なると、同一の平均含水率となるまで吸水させてもそれらの含水率分布は異なり、高温ほど、パスタの表面と中心部の含水率の差が増大する傾向がみられた (Fig. 14 (A-a))。そして、高温で吸水するほど、破断応力は増大したが、破断歪み率は同じであった (Fig. 14 (A-b))。一方、実際の調理に使用する濃度としては現実的ではないが、吸水溶液中の食塩濃度 (0, 0.1, 1.0, 2.0 mol/L) を大きく変えて、同様に、同一の平均含水率となるまで吸水させても、4 種類の麺の含水率分布は重なった (Fig. 14 (B-a))。これらのパスタの破断応力は、ほぼ同一であったが、塩濃度が高くなるほど、破断歪み率は低下した (Fig. 14 (B-b))。以上の結果より、低い含水率領域に依拠して大きな破断応力を示すこと、吸水溶液中の食塩濃度が増大するほど小さな破断歪率を示すこと、含水率分布は、破断応力に独立して影響を及ぼすことがわかった。これらの知見は、必ずしもすべての吸水条件で成り立つとは限らないが、食感を制御するうえで重要であろう。

5. 乾燥および吸水現象が品質に及ぼす影響

前述したように、工業的なパスタの乾燥工程では、温度と湿度を連続的あるいは段階的に変化させるプログラム乾燥が用いられる。温度と湿度は、乾燥後あるいは喫食時の品質に影響を及ぼすと考えられるが、このようなプログラム乾燥における温度と湿度の組み合わせは膨大となる。そのため、所望する品質となる最適な乾燥工程の設計は、非常に困難を極める。

筆者らは、まず、異なる 3 種類のプログラム乾燥 (最高温度が 50℃, 70℃, 85℃) で作製したスパゲッティについて、種々の品質 (乾燥直後の色、表面構造、食感特性、ならびに吸水後の破断特性、ソースの絡み度) を調べた [22]。その後、より詳細に温度と湿度の影響を明らかにするために、恒温恒湿条件 (温度: 50, 70,

Fig. 14 (A-a) Moisture distributions and (A-b) representative examples of stress-strain curves for spaghetti rehydrated at (···) 60°C, (---) 80°C, and (—) 100°C in distilled water. (B-a) Moisture distributions and (B-b) representative examples of spaghetti rehydrated at 100°C in (—) distilled water, (---) 0.1 mol/L NaCl solution, (···) 1.0 mol/L NaCl solution, and (-·-) 2.0 mol/L NaCl solution.

85°C, 湿度: 50, 60, 70, 80%RH) で乾燥した 12 種類のスパゲッティについて, 上記と同様に, 種々の品質を調べた [23]. 本稿では, ソースの絡み度についてのみ解説する. ソースの絡み度については, デキストラン溶液を仮想的なソースとして用い, 1 本のスパゲッティが保持できる量からソースの絡み度を推算する装置を考案した (Fig. 15). ソースの絡み度は, 乾燥状態のスパゲッティ表面の粗さが必ずしも重要ではなく, 吸水後のスパゲッティの 2 バイトテクスチャー試験 (Texture Profile Analysis: TPA) から得られる付着性と負の相関がみられた. TPA 試験では, クリープメーターを用いて試料を 2 回圧縮した際の応力と歪みの関

係 (応力-歪み曲線) を計測し, 付着性はこの応力-歪み曲線において, 1 回目の圧縮直後の引っ張り過程で応力が負となる領域の面積と定義される. 付着性にはスパゲッティ内部からのアミロースの溶出が関与しており, 低温で乾燥するほど, 酵素が失活しないため, 吸水時のアミロースの溶出量が増大するといわれている. つまり, 吸水時にスパゲッティから溶出したアミロースは, 表面に薄いゲル状の膜を形成し, 表面を滑らかにするため, ソースの絡み度を低下させると考えられる. ただし, アミロースは, 脂質やタンパク質, 多糖と相互作用を示すことが報告されており [24], 使用するソースとの相性も重要であろう.

以上の研究で得られた知見が, パスタに留まらず, 多くの食品の品質を合理的に設計するための乾燥および吸水技術の開発に繋がると幸いである.

6. 現在までの取り組みと今後の展望

本稿では, 麺の乾燥挙動, デジタルカメラを用いた麺の特性評価, 麺の吸水挙動, 乾燥および吸水が麺の品質に及ぼす影響について解説した. とくに, まず, デュラムセモリナに対して水分子が単層から多層に吸着していく過程で, 水の部分モル体積が増加するため, 乾燥したパスタ中の水は, バルク中のそれとかなり性質が異なることが示された. また, 定率乾燥期とその後の減率乾燥期での乾燥挙動を区別して記述することで, 任意の条件 (温度, 湿度および時間) で乾燥した際のパスタの平均含水率を高精度に予測するモデルを提案した. 次に, 汎用的なデジタルカメラであっても, 簡

Fig. 15 Schematic diagram of the equipment used for measuring the sauce retention of differentially dried, cooked spaghetti. (a) balance, (b) thermocouple, (c) sample, (d) heating mantle, (e) sauce, and (f) temperature controller.

便にパスタの表面粗さの計測やクラックの検出ができるだけでなく、高価な専用の測定機器に勝る精度でパスタ内部の含水率分布を計測できることがわかった。さらに、吸水時の平均含水率を測定することで、例えば、澱粉の糊化状態などを把握できることが示された。また、パスタ内部の含水率分布の経時的な変化を可視化することで、非常にユニークな水の移動挙動を見出し、それをもとに水の移動機構を推察した。最後に、乾燥および吸水挙動が、食感やソースの絡み度などの品質に及ぼす影響について検討した。

以上のように、はじめは水の移動挙動に着目して研究を進めてきたが、食感などの品質を検討するうえで、グルテンの重要性を改めて認識するに至った。とくにグルテンは構造が鍵であり、多くのグループが研究してきたが、3次元的な構造については、不明な点が多く残されている。そこで筆者らは、麺などの食品を透明にする新たな試薬を開発し、多光子蛍光顕微鏡を用いることで、麺内部のグルテンの構造をはじめて3次元的に可視化できるようにした。この透明化試薬は、米粒を透明化することもでき、ライトシート顕微鏡で計測することで、米粒内部のタンパク質の分布を1細胞レベルの空間分解能でまると解析することができる。さらに、バーチャルリアリティ技術を活用することで、あたかも麺や米粒の内部に飛び込んだかのように、計測した3次元構造を可視化する技術も開発している。また、透明化手法を用いることで、食品内部の構造について、高速かつ大量に高精細な画像を取得できるようになり、構造の解析に人工知能(AI)を使用できるようになった。構造とそれに対応する食感をAIにあらかじめ学習させることで、AIが未知の構造であっても食感を予測できる可能性を見出している。そして、AIが学習した内容を解析することで、食感に影響を及ぼす構造について、これまで人間が気付かなかったような興味深い知見が得られることがわかってきた[25]。特定の食感を決定するような鍵となる構造が存在するのか？あるいは、構造が複数組み合わせることではじめて特定の食感を生み出しているのか？など、まだまだ不明なことは多いが、AIなども活用しながら、食品研究に微力ながら尽力していきたい。

謝 辞

本受賞対象となった研究は、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において行ったものです。本研究を行う機会を与えていただき、学生の時から終始温かくご指導と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 安達修二先生に心より感謝申し上げます。本研究テーマは、学部4年時の課題研究(卒業論文)の際にいただいたもの

です。はじめは1年間だけ取り組むつもりでしたが、安達先生にご指導いただきながらの研究にのめり込み、気が付けばあっという間に11年が経ちました。途中で麺を扱うテーマから遠のいた時期もありましたが、この間に行った数々の研究はどれも思い出があるものばかりです。その中でもとくに、デジタルカメラを用いて含水率分布を測定する手法は、アイディアと工夫次第でブレイクスルーを生み出せることを知れた大変よい体験でした。このように、新たなアイディアを出すことで課題を解決していく楽しさは、安達先生に教えていただいた数多くのことの中の1つであり、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、常的に確なご助言を賜りました先生方、研究の遂行をサポートしていただきましたスタッフの皆様、ともに実験や議論をしてくださった卒業生および在学生の皆様に感謝申し上げます。本研究の一部は、コンソーシアム形式で企業との共同研究として行ったものであり、その参加メンバーであった京都大学大学院農学研究科教授 松村康生先生、准教授 林 由佳子先生、助教 松宮健太郎先生、岐阜大学大学院連合農学研究科教授 西津貴久先生、ならびに企業の多くの方々に厚く御礼申し上げます。また、松村康生先生には、博士課程修了後、研究員として受け入れていただき、2年半にわたりご指導を賜りました。それまでの食品工学的な手法に加えて、食品化学的な手法を学ぶことができた貴重な期間であり、前述の透明化溶液の開発につながりました。京都大学大学院農学研究科教授 谷 史人先生には、現在、日々の研究・教育活動に対するきめ細やかなお気遣いにご指導、ご支援を賜っております。AIなどを用いた研究と並行して、生化学的・分子生物学的な手法を教わることで、より研究の幅を広げ、新たな展開を図ることができているように思います。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

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いようですが、それは裏を返せば、それだけ積みあげられた先人達の知恵が素晴らしいことの証左であるように思われます。この度、幸運にも奨励賞を賜ったことに感謝しつつ、「コロンブスの卵」的な発想を大切にしながら、先人達が築き上げられた学術基盤をもとに、一歩ずつ着実に発展させる一助となれるよう邁進していく所存です。これからも日本食品工学会の皆様のご指導のほど、何卒よろしくお願い申し上げます。

NOMENCLATURE

- a : parameter in Eq. 3, $\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dry matter}$
- b : parameter in Eq. 3, $\text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
- d : diameter, m

k : mass transfer coefficient, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

L : thickness, m

R_w : drying rate, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

S : drying area, m^2

t : time, s

w : dry weight of the sample, kg

X : moisture content at time t , $\text{kg-H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}\text{-d.m.}$

X_0 : initial moisture content at $t=0$, $\text{kg-H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}\text{-d.m.}$

X_e : equilibrium moisture content, $\text{kg-H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}\text{-d.m.}$

References

- 1) A. Chuma, T. Ogawa, T. Kobayashi, S. Adachi; Moisture sorption isotherm of durum wheat flour. *Food Sci. Technol. Res.*, **18**, 617-622 (2012).
- 2) A. Hasegawa, T. Ogawa, S. Adachi; Dilatometric measurement of the partial molar volume of water sorbed to durum wheat flour. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **77**, 1565-1568 (2013).
- 3) B. Cuq, C. Verniere; Characterisation of glass transition of durum wheat semolina using modulated differential scanning calorimetry. *J. Cereal Sci.*, **33**, 213-221 (2001).
- 4) T. Ogawa, T. Kobayashi, S. Adachi; Prediction of pasta drying process based on a thermogravimetric analysis. *J. Food Eng.*, **111**, 129-134 (2012).
- 5) T. Ogawa, S. Koizumi, S. Adachi; Thermal analysis of drying process of durum wheat dough under the programmed temperature-rising conditions. *Food Bioprod. Process.*, **92**, 9-13 (2014).
- 6) J. Crank; *The mathematics of diffusion*, 1st ed., Oxford U. P., Oxford, UK, 1975.
- 7) N. Mizuno, T. Ogawa, S. Adachi; Shrinkage and tensile stress of sheet-like and cylindrical pastas with various moisture contents. *Food Biosci.*, **2**, 10-14 (2013).
- 8) T. Ogawa, S. Adachi; A simple method to measure the surface roughness of spaghetti using a digital camera. *Food Sci. Technol. Res.*, **23**, 237-240 (2017).
- 9) T. Ogawa, S. Adachi; Detection of cracks in dried spaghetti using transmission images. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **81**, 750-754 (2017).
- 10) T. Ogawa, S. Adachi; Measurement of moisture profiles in pasta during rehydration based on image processing. *Food Bioprocess Technol.*, **7**, 1465-1471 (2014).
- 11) T. Ogawa, T. Kobayashi, S. Adachi; Water sorption kinetics of spaghetti at different temperatures. *Food Bioprod. Process.*, **89**, 135-141 (2011).
- 12) U. Aimoto, T. Ogawa, S. Adachi; Water sorption kinetics of spaghetti prepared under different drying conditions. *Food Sci. Technol. Res.*, **19**, 17-22 (2013).
- 13) T. Roppongi, T. Ogawa, S. Adachi; Water sorption kinetics of wheat noodle with different diameters. *Food Sci. Technol. Res.*, **20**, 241-246 (2014).
- 14) K. Katsuki, T. Ogawa, S. Adachi; Water sorption kinetics of wheat flour noodles with added chemically-modified starch. *Starch - Stärke*, **70**, 1700280 (2018).
- 15) T. Ogawa, S. Adachi; Effect of salts on the water sorption kinetics of dried pasta. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **77**, 249-252 (2013).
- 16) T. Ogawa, S. Adachi; Effect of surface roughness on rehydration kinetics of spaghetti. *Jpn. J. Food Eng.*, **15**, 101-104 (2014).
- 17) M. Yoshino, T. Ogawa, S. Adachi; Properties and water sorption characteristics of spaghetti prepared using various dies. *J. Food Sci.*, **78**, E520-525 (2013).
- 18) A. Hasegawa, T. Ogawa, S. Adachi; Estimation of the gelatinization temperature of noodles from water sorption curves under temperature-programmed heating conditions. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 2156-2158 (2012).
- 19) T. Ogawa, A. Hasegawa, S. Adachi; Effects of relaxation of gluten network on rehydration kinetics of pasta. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **78**, 1930-1934 (2014).
- 20) T. Ogawa, S. Adachi; Moisture distribution and texture of spaghetti rehydrated under different conditions. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **80**, 769-773 (2016).
- 21) T. Ogawa, S. Adachi; Effects of drying conditions on moisture distribution in rehydrated spaghetti. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **78**, 1412-1414 (2014).
- 22) T. Ogawa, A. Chuma, U. Aimoto, S. Adachi; Characterization of spaghetti prepared under different drying conditions. *J. Food Sci.*, **80**, E1959-1964 (2015).
- 23) T. Ogawa, A. Chuma, U. Aimoto, S. Adachi; Effects of drying temperature and relative humidity on spaghetti characteristics. *Drying Technol.*, **35**, 1214-1224 (2017).
- 24) A. M. Hermansson, K. Svegmärk; Developments in the understanding of starch functionality. *Trends Food Sci. Technol.*, **7**, 345-349 (1996).
- 25) T. Ogawa; Visualization of the three-dimensional structure inside noodles by clearing and prediction of food texture using artificial intelligence (in Japanese). *Foods & Food Ingred. J. Jpn.*, **224**, 286-295 (2019).

要 旨

乾燥過程および吸水過程における食品中の水の移動挙動は、製造時および調理時の条件によって大きく異なり、その挙動により、食品の品質は大きな影響を受ける。経験と試行錯誤に多くを頼ってきた既存の製造法では、近年の健康志向や美味しさへの飽くなき追求

といった多様な要求に対して、迅速かつ的確に応えることが困難である。そのため、合理的な食品製造を可能にする体系的な理論研究が強く求められてきた。しかし、水の移動現象と移動機構、それらが食感などの品質に及ぼす影響については、必ずしも十分に解明されていないように思われる。筆者らは、粗挽きの小麦

粉であるデュラムセモリナのみからなり、組成が単純なパスタを研究対象として、乾燥および吸水過程で生起する水の移動現象とその機構、品質への影響を調べてきた。本論文では、これまでに得られた筆者らの知見について解説した。