

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560045

研究課題名(和文) デジタルカメラ画像の解析による調理特性の新たな評価法の開発

研究課題名(英文) Development of method to estimating cooking properties by analyzing image monitored with a digital camera

研究代表者

安達 修二 (Adachi, Shuji)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90115783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：乾燥スパゲッティを例として、デジタルカメラにより撮影した透過光による画像を解析することにより、調理特性に大きく影響する表面粗さを定量的に評価する新たな方法を開発した。提案法で評価した表面粗さは単位面積当たりの初期吸水量は強い正の相関を示した。また、透過光画像からスパゲッティ内部のクラックを定量的に評価する方法を開発した。さらに、スパゲッティを乾燥するときの温度と湿度が茹で麺の品質諸特性に及ぼす影響を明らかにした。デンプン水溶液の透過強度から初期の老化に伴う色の変化を定量化する新たな方法を開発した。その方法により茹でた小麦麺を冷蔵保存したときの老化過程を定量的に評価できることを示した。

研究成果の概要(英文)：A novel method was developed for dried spaghetti as an example to estimate surface roughness quantitatively by monitoring and analyzing the transmitted-light image through the spaghetti using a digital camera. The surface roughness evaluated by the method was strongly correlated with the initial amount per unit surface area of water sorbed by the spaghetti. Another method was also developed to estimate the degree of cracks existing within the spaghetti from the transmitted-light image. The effects of drying temperature and humidity on the properties of cooked spaghetti were elucidated. A method was proposed to quantify degree of starch retrogradation in the early stage of storage by measuring the transmitted-light strength. The method could be applied to estimate quantitatively the degree of retrogradation of starch in the cooked wheat noodle.

研究分野：食品工学

キーワード：調理特性 画像解析 デジタルカメラ パスタ

### 1. 研究開始当初の背景

食品のテクスチャーは、表面の粗さや内部の構造によって大きく影響される。これらはレーザーマイクロスコプや電子顕微鏡などで測定されているが、いずれの方法も高価な装置を必要とし、また凹凸が激しく急勾配の面は正しく測定できないという短所がある。そこで研究代表者らは、スパゲッティを茹でると色が変化することに着目し、切断面の反射光をデジタルカメラで撮影した画像を解析することにより、一般的な手法である核磁気共鳴画像法などより高分解能で水分分布を精度よく求める格段に廉価な方法を開発した [1]。このことにより、乾燥方法や茹で加減の異なるスパゲッティ内の水分分布を測定し、テクスチャーとの関係を詳細に議論することを可能にしていた。

### 2. 研究の目的

乾燥スパゲッティを例として、上述した水分分布を求める方法を発展させ、透過光による画像をデジタルカメラで撮影し、それを解析することにより、調理特性に大きく影響する表面粗さや空洞（クラック）の有無を定量的に評価する新たな方法を開発する。また、提案法で評価した表面粗さやクラックの程度と、スパゲッティの吸水特性や茹で麺のテクスチャーとの関係を検討する。これらの知見に基づき、透過光画像の解析により、非破壊的に乾燥食品の調理特性を予測する方法を確立する。スパゲッティを例として開発した方法論を、他の麺などにも適用し、その汎用性を検証する。

### 3. 研究の方法

(1) デジタル画像の解析による表面粗さの定量法の確立と調理特性との相関

デュラムセモリナと水を 100 : 32 の重量比（湿量基準）で混捏したドウを、ブロンズ、アルミニウム、ポリカーボネート、ポリプロピレンおよびテフロン製のダイスを装着した電動パスタマーン (Magica, Bottene, Italy) を使用して減圧下（約 40 kPa 以下）で押し出し、表面粗さの異なるスパゲッティを作製した。このようにして得られた生麺を所定の温度（最高温度 85°C）と相対湿度（約 40~80%）に制御した乾燥機で 5 時間 50 分間乾燥し、乾燥スパゲッティ（乾量基準含水率=約 0.12 kg-H<sub>2</sub>O/kg-d.m. ; 約 500 g, 直径 1.8 mm）を作製した。それらを用いて、以下の検討を行った。

①表面粗さの定量法の確立：表面の粗さにより透過光の色の濃淡が変化することに着目し、光度にムラのない LED 発光板の上に試料をおき、その上方から透過光による画像を高解像度のデジタルカメラ (EOS-7D, キヤノン, 東京) で撮影した。市販のソフトウェア (Origin 8.1J, OriginLab) を用いて、その画像を RGB (red, green, blue) に分解した。RGB の 3 種の濃淡画像のうち、blue の画像がもっとも濃淡の識別が容易であったことから、blue の濃淡画像を採用し、その濃淡強度

を 0~255 の諧調に数値化した濃淡ヒストグラム（分布）を作成した。

一方、同じ試料の表面粗さを共焦点レーザー型のデジタルマイクロスコプ (VK-8710, キーエンス, 大阪) で測定し、表面の凹凸情報を含む、表面構造のデジタルデータを取得した。

デジタルカメラによる濃淡分布およびデジタルマイクロスコプによる深度分布のそれぞれから、Microsoft Office Excel<sup>®</sup>を用いて、コントラスト、分散、歪度、尖度などの識別指標（統計量）を算出した。

②表面粗さと調理特性の相関：乾燥スパゲッティをほぼ同じ長さ（8 cm 程度）に切断し、それをほぼ 100°C に保持したコンカルチュープに 1 本ずつ入れ、所定時間（5 秒~120 分）後に取出し、速やかに表面の水をキムワイブなどで拭ったのち、重量を測定した。また、その試料を 135°C で 5 時間乾燥したのちの重量も測定し、その差から含水率を算出した。このような測定により、表面粗さの異なる試料の吸水挙動を測定した。

(2) デジタル画像の解析によるクラックの有無とその程度の定量法の確立

乾燥パスタは、クラックが発生すると商品価値が著しく低下するため、製造および保存の際にクラックの発生を防止することが重要である。クラックの発生機構は未解明な部分が多いが、応力-ひずみ方程式（構成式）に基づき、クラックの発生を予測する試みがなされている [2]。しかし、クラックの有無は目視により判別されており、クラックを定量的に検出する方法が求められている。我が国で市販されている乾燥スパゲッティはテフロン製またはブロンズ製のダイスを用いて製造させている。そこで、テフロン製およびブロンズ製のダイスを用いて作製した生スパゲッティを、研究代表者らの既報 [3] に基づいて、温度と相対湿度を制御し、内部に割れ（クラック）をもつ乾燥スパゲッティとクラックのまったく入っていない乾燥スパゲッティをそれぞれ調製した。このようにして調製した乾燥スパゲッティを、上記と同様に、光度にムラのない LED 発光板の上におき、透過光による画像をデジタルカメラ (EOS-7D) で撮影した。その画像を RGB に分解したのち blue のみ（理由は (1) と同じ）の画像を得た。クラックを検出するための画像処理法には二値化法やエッジ検出法などがあり、米や卵のひび割れの検出に既に適用されている [4]。しかし、ブロンズ製のダイスを用いて製造した伝統的なパスタは表面がザラザラしており、また、パスタの内部には小麦粉特有の斑点が見られるため、これらの画像処理法は適用できなかった。そこで、(1) と同様に、透過光による画像に基づいて濃淡分布を取得し、(1) と同様の識別指標（コントラスト、分散、歪度、尖度など）を算出した。

(3) 乾燥条件が品質特性に及ぼす影響

乾燥スパゲッティの伝統的な製法では、30～50℃程度の低い温度が採用されてきたが、製造時間の短縮や食感の改善、微生物の増殖抑制を目的に、70℃程度のより高温での乾燥方法が開発され、近年では、85℃や110℃〔5〕といった非常に高温での乾燥が主流となってきた。乾燥工程で発生するクラックの抑制は、製品として市場に流通させるうえで最低限の条件であるが、近年の消費者の食品の品質に対する要求はますます多様化しており、乾燥工程を設計する際には、クラックの発生を抑制するだけでなく、乾燥時の温度や湿度が、テクスチャーを初めとする種々の品質に及ぼす影響を体系的に把握することが求められている。そこで、乾燥時の温度（50, 70 および 85℃）および湿度（50, 60, 70 および 80%RH）を変えることにより、合計 12 種類の乾燥スパゲッティを作製し、乾燥時に含水率が減少する挙動（乾燥曲線）、乾燥後の色、表面構造、構造強度、吸水特性、喫食時のテクスチャー、ソースの保持性などの様々な品質に及ぼす乾燥温度および湿度の影響を検討した。

（4）白色化に基づくデンプンの老化挙動の解析と老化がテクスチャーに及ぼす影響

茹でた麺を保存すると、デンプンが老化し、食感が悪くなるだけでなく、消化性が低下する。デンプンの老化の程度を測定する方法には、老化デンプンが再糊化する際の吸熱量に基づく示差走査熱量（DSC）法〔6〕、酵素を利用したBAP法〔7〕、近赤外線やX線〔8〕を用いた方法が挙げられる。しかし、これらの測定法では、老化の初期に起こる、可溶化したアミロースがゲル化する比較的速い過程〔9〕をリアルタイムで計測することが困難である。そこで、老化初期にデンプンゲルの不透明度が増す、すなわち白色に変化することに着目し、デンプンの老化の程度を定量的に計測する方法を、以下の手順で開発した。①色の変化に基づくデンプンの老化の測定：高濃度の小麦デンプン水溶液を用いて、デンプンの老化挙動を色の変化に基づいて測定できるかを検討した。50 mL容の遠沈管に小麦デンプンの水溶液（10～40%）を調製し、90℃の湯浴で10分間加温することによりデンプンを糊化させた。糊化させたデンプン試料をガラス製のセル（10.5 mm×10.5 mm×45 mm（W×D×H））に充填し、種々の温度（-20～70℃）で保存し、保存中のデンプン溶液の色の変化を分光透過率より評価した。すなわち、タングステンハロゲン光源（LS-1, Ocean Optics, Dunedin, FL, 米国）から光ファイバ（R400-7-UV-VIS, Ocean Optics）を通して白色光をガラスセルの側面に照射し、その透過光を超高感度ファイバマルチチャンネル分光器（QE65000, Ocean Optics）で測定した。また、デンプン水溶液を直径8 mmの円柱型プランジャー（No. 6, 山電）で圧縮したときの応力をクリープメータ（RE2-33005S, 山電, 東京）を用いて測定

した。

②色の変化に基づく麺の老化の評価：後述するように、デンプン水溶液を用いた上記の検討で、色の変化に基づいてデンプンの老化の程度を測定できることが示されたので、次に、茹で麺を保存したときのデンプンの老化挙動への適用を検討した。小麦粉を用いて（1）と同様の方法で生麺を作製し、98℃で所定の時間吸水させた。その後、麺内部での水の移動が色の変化に及ぼす影響を排除するために80℃に保ち、麺内部の含水率を一様にし、5℃で保存した。所定の保存時間後に試料麺を取り出し、ステンレス刃で麺線方向に対して垂直に切断し、多機能拡張型ファイバ光源装置（PICL-NSX, 日本ピー・アイ, 東京）を用いて上部から光を照射しながらマクロレンズ（MP-E 65 mm, キヤノン）を装着したデジタルカメラ（EOS-40D）で撮影して断面画像を取得した。その画像をRGBに分解したのちblueのみ（上述と同様の理由による）の画像を得た。

（5）デンプンおよびグルテンの添加による麺の吸水挙動と品質

麺の品質が低下する要因の一つは、上述したように、デンプンの老化によるテクスチャーの低下である。そこで、テクスチャーを改善するために、化工デンプンまたはグルテンを添加することが行われる。しかし、これらの添加が、調理した麺の品質を決定する吸水特性にどのような影響を及ぼすかは十分に解明されていない。そこで、化工デンプンまたはグルテンの添加が茹で麺の特性に及ぼす影響を検討した。

①化工デンプンを添加した麺の吸水と品質：化工デンプンを添加した麺を作製し、吸水時の麺内部で水が移動する挙動を検討した。化工デンプンを小麦粉に対して0（無添加）、10、20 および 30%（w/w）の割合で添加し、上記と同様にして生麺を作製したのち、所定の時間吸水させた。麺内部での水分分布は、研究代表者らの既報〔1〕に基づいて測定した。含水率が増加すると色が薄くなるという原理に基づく本測定法は、従来の核磁気共鳴画像法や中性子ラジオグラフィ法などと比べ、低い含水率（約0.1 kg-H<sub>2</sub>O/kg-d.m.）まで、極めて高い空間分解能（約3.2 μm）で測定できるという利点を有する。また、くさび形プランジャーを用いて、茹で麺の破断試験により荷重-歪み曲線を測定した。

②グルテンを添加した麺の吸水と品質：次に、グルテンを添加した麺を用いて、吸水時の平均含水率の測定に基づいて水の移動挙動を考察した。グルテンを小麦粉に対して0（無添加）、5、10、15 および 20%（w/w）の割合で添加し、上記と同様にして生麺を作製したのちに、吸水量（平均含水率）の経時変化を測定した。

#### 4. 研究成果

（1）デジタル画像の解析による表面粗さの

## 定量法の確立と調理特性との相関

①表面粗さの定量法の確立：5種のダイスを用いて作製したスパゲッティの表面は、ブロンズ製のダイスを使用したときがもっとも粗く、テフロン製のダイスがもっとも滑らかであった。これらの表面粗さの異なるスパゲッティの表面をデジタルカメラで測定し、blueの濃淡分布を測定した。また、デジタルマイクロスコープで測定したデジタルデータに基づき最大谷深さ基準の高さ分布を算出した。表面粗さの異なる5種のスパゲッティに対する濃淡分布と高さ分布は、それぞれが類似した形状を示した。そこで、これらの分布の類似性を定量的に評価するために、それぞれの分布について、Microsoft Office Excel<sup>®</sup>を用いて、コントラスト、分散、歪度、尖度などの識別指標（統計量）を算出した。デジタルカメラによる濃淡分布およびデジタルマイクロスコープによる高さ分布から算出した各種の識別指標値を比較したところ、歪度および尖度は、表面の算術平均粗さが2~12 μmの広い範囲の粗さを評価するのに有用であることが示された。また、コントラストは、算術平均粗さが2~3 μmの密な範囲の粗さを評価するのに適しており、分散、エネルギーおよびエントロピーは、算術平均粗さが11~12 μm程度の粗い範囲の粗さを評価するのに適していた。デジタルカメラを用いる提案法は、予め基準試料による粗さの較正が必要であるが、安価な装置を用いて、広範囲（約200 mm×2 mm）の測定が可能であり、従来の共焦点レーザー型のデジタルマイクロスコープに比べて測定時間を約1/10以下に短縮できるという利点がある。

②表面粗さと調理特性の相関：表面粗さの異なる5種の乾燥スパゲッティを100℃で茹でたときの吸水量の経時変化から、吸水速度を反映する量として、時間0における単位面積当たりの吸水量およびアル・デンテの状態（1.70 kg-H<sub>2</sub>O/kg-d.m.）に達するまでの時間を求め、表面粗さとの相関を検討した。その結果、算術平均粗さと時間0における単位面積当たりの吸水量は非常に強い正の相関を示し、乾燥スパゲッティの表面の粗さの制御することによりアル・デンテの状態に達するまでの時間を1分程度調節できることが示された。

（2）デジタル画像の解析によるクラックの有無とその程度の定量法の確立

透過光画像をデジタルカメラで撮影してクラックを検出するには、表面のザラツキや小麦粉に由来する斑点などを識別する必要がある。ブロンズ製のダイスで作製した乾燥スパゲッティは、表面が粗いため、クラックと表面のザラザラを識別し、クラックのみを検出する必要がある。クラックが発生するとコントラストおよび尖度が顕著に小さな値になり、クラックの有無を識別できることを明らかにした。一方、テフロン製のダイスで作製した試料では、クラックと小麦粉に由来

する斑点を識別し、クラックのみを検出する必要がある。ブロンズ製のダイスで作製した試料とは異なり、テフロン製のダイスで作製した試料に発生したクラックのみをコントラストで識別することはできなかった。そこで、歪度および尖度の双方の識別指標を組み合わせてクラックを検出する方法を開発した。これらの知見に基づき、クラックの有無を判別する範囲を順次小さくして識別能を高め、クラックがある範囲の面積からその程度を定量化した。

（3）乾燥条件が品質特性に及ぼす影響

種々の温度および湿度で乾燥したスパゲッティ（12種）の品質特性を定量的に評価したところ、例えばスパゲッティの色は、これまでは主に乾燥中の温度で決まると考えられていたが、湿度の影響が無視できないことが示された。また、検討した多くの品質項目は、温度または湿度の影響を同程度に受けることはなく、それぞれの項目に及ぼす影響が異なるため、すべての品質を最高とする乾燥条件は存在せず、乾燥工程を設計する際には、所望する品質の製品となるように各種の品質に優先順位を付けて、最適な乾燥条件を決定することが大切であることが示された。

（4）白色化に基づくデンプンの老化挙動の解析と老化がテクスチャーに及ぼす影響

①色の変化に基づくデンプンの老化の測定：糊化させた高濃度のデンプン水溶液（10~40%）を所定の温度に保持したときの分光透過率の変化を測定したところ、デンプンの老化が進行する温度領域で保存したデンプン水溶液のみで、デンプンの白色化により分光透過率が低下した。また、保存初期において、クリープメータで測定したデンプン溶液の圧縮応力と透過率との間に強い相関が認められた。老化の初期過程では、非常に弱い水素結合の再構築による構造の変化により、デンプン水溶液の白色化と圧縮応力の増大が起こり、色の変化に基づく老化挙動の計測は、従来のDSCによる測定では検出できない、デンプンの初期の老化挙動を高精度に測定できることを明らかにした。

②色の変化に基づく麺の老化の評価：内部の含水率を一様にした麺では、保存の初期段階で急速に白色化が進み、その挙動は麺の圧縮試験から得られた脆さの進行挙動と強い相関を示した。これらの現象は、上記と同様に、アミロースのゲル化に起因すると考えられる。このように実際の麺についても、色の変化（白色化）に基づいて老化の挙動を計測できることを明らかにした。

（5）デンプンおよびグルテンの添加による麺の吸水挙動と品質

①化工デンプンを添加した麺の吸水と品質：化工デンプンの添加量の異なる4種の麺について、平均含水率が1.35~1.60、1.98~2.10および2.39~2.52 kg-H<sub>2</sub>O/kg-d.m.となる時の水分分布をそれぞれ測定したところ、水分分布の概形は類似していた。麺は吸水す

ると、茹で水と接する麺の表面から中心に向かって水が移動するが、水の移動は、水の拡散のみならず、デンプンの糊化による膨潤ならびにグルテンネットワークの弛緩による吸水の抑制により、表面には含水率が一定の領域が現れ、中心付近では下に凸な放物線状の水分分布になることを既に明らかにしている [1, 10]. 化工デンプンを添加すると、表面付近の含水率が一定の領域が狭くなった。これは、化工デンプンが小麦粉由来のデンプンに比べて、糊化し易いことに起因すると考えられる。次に、くさび形プランジャーを用いた破断試験により測定した茹で麺の荷重-歪み曲線は、化工デンプンを添加することで、とくに低い歪率の領域において荷重が低下した。低い歪率での荷重は、麺の表面付近の力学的な構造を反映している。したがって、化工デンプンを添加すると喫食時のテクスチャーが変化する要因の一つとして、麺内部の水分分布の形状の変化が示唆された。

②グルテンを添加した麺の吸水と品質：グルテン添加量の異なる小麦粉麺の吸水過程を測定したところ、グルテンの添加量が増えるほど、平均含水率が低下し、吸水が抑制された。また、時間に対して吸水速度をプロットすると、2本の直線となった。これは、小麦麺の吸水が2つの過程からなることを示唆する。そこで、2つの過程が切り替わる時間を  $t_c$  とし、以下の2つの式により平均含水率  $X_t$  を記述した。

$$X_t = X_{1c} [1 - \exp(-k_1 t)] + X_0 \exp(-k_1 t) \quad (0 \leq t \leq t_c) \quad (1)$$

$$X_t = X_{2c} [1 - \exp(-k_1(t-t_c))] + X_c \exp(-k_2(t-t_c)) \quad (t_c \leq t) \quad (2)$$

ここで、 $X_{1c}$ 、 $X_{2c}$  はそれぞれ吸水初期および吸水後期の平衡含水率、 $k_1$  と  $k_2$  はそれぞれの過程の速度定数、 $X_c$  は時間  $t_c$  における含水率を示す。グルテンの添加率によらず、 $k_2$  は  $k_1$  の約 1/10 倍の値であった。一方、 $X_{1c}$  および  $X_{2c}$  の値はグルテンの添加率の増大に伴い低下した。また、 $X_c$  の値は 2~3 kg-H<sub>2</sub>O/kg-d.m. であり、最適な茹で状態における麺の表面領域の含水率とほぼ一致した。含水率の高い麺の表面付近における水の移動はグルテンネットワークの弛緩に支配されることから、平均含水率に基づく吸水量の変化が2つの過程からなることは次のように考えられる。すなわち、水の移動を支配する要因が遷移する現象は、グルテンネットワークの弛緩が律速となることに起因し、吸水の初期過程では、水の拡散や糊化を含めた、デンプンやグルテンによる水の収着により急激に吸水するが、ある時点 ( $t_c$ ) で、グルテンネットワークの弛緩がデンプンの膨潤を抑制し、水の移動が低下すると考えられる。したがって、デンプンやグルテンの添加により、水の移動挙動を制御できる可能性が示唆され、所望するテクスチャーをデザインできることが期待される。

(引用文献)

1) T. Ogawa and S. Adachi: *Food Bioprocess*

*Technol.*, **7**, 1465-1471 (2014).

- 2) T. Inazu, K. Iwasaki, and T. Furuta: *Int. J. Food Sci. Technol.*, **40**, 621-630 (2005).
- 3) T. Ogawa, T. Kobayashi, and S. Adachi: *J. Food Eng.*, **111**, 129-134 (2012).
- 4) Y. Li, S. Dhakal, and Y. Peng: *J. Food Eng.*, **109**, 127-134 (2012).
- 5) C. M. Pollini: THT technology in the modern industrial pasta drying process. In: J.E. Kruger, R.R. Matsuo, J.W. Dick, ed. *Pasta and noodle technology*. St. Paul, MN: AACC International, 1996, pp. 59-74.
- 6) D. J. Stevens and G. A. H. Elton: *Starke*, **23**, 8-11 (1971).
- 7) 貝沼圭二, 松永暁子, 板川正秀, 小林昭一: *澱粉科学*, **28**, 235-240 (1981).
- 8) J. Blazek and E. P. Gilbert: *Carbohydr. Polym.*, **85**, 281-293 (2011).
- 9) L. B. Iturriaga, B. L. Mishima, and M. C. Añon: *LWT Food Sci. Technol.*, **43**, 670-674 (2010).
- 10) T. Ogawa, A. Hasegawa, and S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **78**, 1930-1934 (2014).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- 1) 香月, 小川, 中川, 安達: 日本食品工学会 第15回 (2014年度) 年次大会, 2014年8月9日, 2P2-06.
- 2) 福澤, 小川, 中川, 安達: 日本食品工学会 第15回 (2014年度) 年次大会, 2014年8月9日, 2P5-04.
- 3) 福澤, 中川, 安達: 日本農芸化学会 2015年度大会, 2015年3月27日, 2F28a09.
- 4) 福澤, 中川, 安達: 2015年度日本農芸化学会中部・関西支部合同大会, 2015年9月20日, C-a12.

[図書] (計 1 件)

- 1) 小川剛伸, 安達修二: パスタ内での水の移動機構. *化学と生物*, **52**, 602-609 (2014).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等:

<http://www.bioeng.kais.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安達 修二 (ADACHI, Shuji)

京都大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号: 90115783

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者