◆◆◆ 原著論文 ◆◆◆

製造条件の異なるスパゲティの機械的性質の調査

酒井 孝^{1,†}, 長沼 陽介²

¹ 成蹊大学理工学部, ² 成蹊大学大学院理工学研究科

Material Properties for Spaghetti with Different Product Conditions

Takashi SAKAI^{1,†}, Yosuke NAGANUMA²

¹ Faculty of Science and Technology, Seikei University, 3-3-1 Kichijoji-Kitamachi, Musashino, Tokyo 180-8633, Japan

² Graduate School of Science and Technology, Seikei University,
3-3-1 Kichijoji-Kitamachi, Musashino, Tokyo 180-8633, Japan

The quality of spaghetti, given the same raw materials, will vary depending on the extrusion rate, pressure, and drying conditions during manufacture and at the time of opening of the package. In this study of spaghetti of several types produced with different manufacturing conditions, mechanical properties were ascertained using the compression test to identify the factors that influence spaghetti quality. Furthermore, characteristics of ordinary dry spaghetti and raw spaghetti, which is said to provide excellent taste, produced in a research laboratory are compared to assess the differences of food textures quantitatively. Identification of these factors is expected to improve the food texture of spaghetti.

Keywords: spaghetti, mechanical property, compression test, water content ratio, microstructure

1. 緒 言

スパゲティは一般的にデュラムセモリナ粉と水のみを原料として、押出し成形加工で製造されている。原料をこれらで一定としたとき、スパゲティの品質を決定する要因として、製造時における押出し速度や圧力、乾燥条件、さらには製品パッケージの開封期間などが挙げられる。茹でる前のスパゲティの品質は、茹でた後のスパゲティの食感に影響を及ぼすことが報告されているが [1], その詳細は明らかになっていない。

一方、スパゲティ麺の機械的性質を調査する方法として、引張試験や圧縮試験が考えられる。これまでに、麺の引張試験として、素麺 [2] やうどん [3] に対する報告がある。引張試験では麺の断面全体に対して均一に引張荷重が負荷される。したがって、アルデンテの特徴を有する茹で後のスパゲティに対して引張試験を行うと、外表面の粘弾性特性 [4] を示す部位と、中心部の脆性的な芯の特性とが混交した機械的性質を示すことになる。その一方で押し込みプランジャーを用いた圧

縮試験を行った場合は、外表面と芯の特性が、圧縮変位の量に対応した結果から表される。この点から、茹で後のスパゲティの機械的性質を評価する方法としては圧縮試験が適切である。

そこで本報では、製造条件の異なる数種類のスパゲティを対象として、プランジャーを用いた圧縮試験から得られた機械的性質の観点から、茹でた後の特性値の違いを実験的に調査した。また、乾燥スパゲティと生スパゲティの機械的な特性値を、含水率や電子顕微鏡による表面観察結果と総合して評価し、スパゲティの品質に影響を与える因子について明らかにした。今回のこれらの調査結果は、今後のスパゲティ麺の食感向上に設計指針として役立つと考えられる。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

開封時期の異なる2種類の市販の乾燥スパゲティ D-1, D-2, および研究室内で製造した押出し条件の異なる4種類の生スパゲティ R-1, R-2, R-3, R-4 の、計6種類を供試材とした。Table 1に各供試材の条件を示す。開封時期の異なる供試材については、日清フーズ(株)製マ・マースパゲティ 1.6 mm の乾燥スパゲティの開封時期を変化させ、開封直後のもの D-1 と開封から

(受付 2014 年 8 月 26 日, 受理 2014 年 11 月 18 日)

1 〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

2 〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

FAX: 0422-37-3712, E-mail: sakai@st.seikei.ac.jp

Table 1 Numerical list of materials condition.

	Specimen number	Opening period (month)	Extrusion die (hole)	Diameter (mm)
Dry spaghetti	D-1	0	—	1.60
	D-2	16		
Raw spaghetti	R-1	(0)	28 (All)	1.75
	R-2		21 (3/4)	
	R-3		14 (1/2)	
	R-4		7 (1/4)	

16 ヶ月経過したもの D-2 を供試材とした。乾燥スパゲティは保存環境条件によって状態が変化するため、年間を通じて約 20% の一定に湿度を保つアズワン(株)製のオートドライデシケータ内で常に保管した。このオートドライデシケータを 23℃ で温度を一定に保っている電子顕微鏡室に設置して温度管理した。研究室内での押し出し条件の異なる供試材の製造については、Fig. 1 に示す(有)mercato italiano 社製のパスタマシン (MAGICA) を用いた。日本製粉(株)社製のデュラムセモリナ粉 (ジョーカー A) 1 kg と軟水のミネラルウォーター (アサヒ飲料・六甲のおいしい水) 280 g を同機で自動混練し、同図 (b) および (c) に示した直径 1.75 mm のスパゲティダイスの孔数を変化させて押し出しを行った。ダ

(a) Overview of machine

(b) Inside of die (c) Outside of die (d) Outside of die with sensor hole

Fig. 1 Overview of the pasta machine (MAGICA).

イスの孔数を変化させて押し出しを行うことで、押し出し圧力や押し出し速度の異なる生スパゲティの供試材を作製した。

押し出し速度 v の測定はスパゲティの押し出しを通常の 28 孔 (R-1) と、孔を治具とテープで塞いだ 21 孔 (R-2)、14 孔 (R-3)、7 孔 (R-4) のダイスでそれぞれ行い、一般的なスパゲティの長さ 300 mm に達するまでのようすをデジタルカメラで撮影し、各経過時間 Δt を式 (1) に代入して求めた。これを示した後述の Fig. 2 (b) では、図の横軸はビデオ撮像の経過時間 (押し出し実験の全時間経過) とし、横軸の 0 点はダイスから生地が出た瞬間と定義している。

$$v = \frac{300}{\Delta t} \quad (1)$$

押し出し圧力の測定は、スパゲティダイスに取付け用の孔を機械加工し、日本ダイニスコ(株)社製の樹脂圧力センサ (NP463-1/2-35MPa-15/45-J) を装着することで、

(a) Extrusion force

(b) Flow velocity

Fig. 2 Extrusion properties for raw spaghetti R-1, R-2, R-3 and R-4.

ダイス内面に負荷する圧力を測定した。ダイスに取り付け用の孔を加工した様子は Fig. 1(d) に示したとおりである。なお、ダイスに取付け孔を設けたので 28 孔 (R-1) での圧力の測定は行えないため、21 孔 (R-2)、14 孔 (R-3)、7 孔 (R-4) の測定のみを行った。パスタマシンはモータの駆動により振動しているため、測定される押出し圧力も同等の周期で振動が生じてしまう。後に示す結果では、この振動の影響を考慮して 30 区間の移動平均を算出して押出し圧力とした。振動のばらつきをともなうデータの処理に関して、1 本の線に収束し、かつ元データのプロファイルをよく表していたのが 30 区間であったので、本報では 30 区間の移動平均を採用した。なお、データのサンプリング周期は 0.1s (10Hz) とした。

2.2 表面および断面の観察

表面と断面の観察は、日本電子(株)製のフィールドエミッションタイプの走査型電子顕微鏡 (JSM-7001F) を用いた。開封直後の D-1、および押出し直後の R-1 の 2 種類をともに茹でる前の状態に対して、低倍率では巨視的な表面性状の観察を行うため、スパゲティの表面と断面を観察した。D-1 と D-2、および R-1 ~ R-4 間で SEM 観察結果に大差がなかったため、素材情報として代表的な D-1 と R-1 を比較した。また高倍率では微視的なスパゲティ表面の小麦澱粉の観察を行い、乾燥スパゲティと生スパゲティの比較を行った。

2.3 含水率測定

含水率の測定は、(株)島津製作所製の水分計 (MOC63u) を用いた。130℃で 1 時間の乾燥を行い、乾燥前と乾燥後の重量の差から含水率 u を導出した。水分の重量 W_w 、乾燥後スパゲティの重量 W_s とすると、重量基準含水率 u は式 (2) で表すことができる。

$$u = \frac{W_w}{W_s + W_w} \times 100 \quad (2)$$

含水率の測定は茹で前後の両方に対して行った。茹で時間はメーカー推奨の乾燥スパゲティ 420 s、生スパゲティ 210 s とし、食塩の添加によるスパゲティ物性に与える影響を考慮して、食塩の添加は行わなかった [5]。

2.4 圧縮試験

(株)東京試験機社製の卓上型小型万能試験機に、人がスパゲティを噛み切ることを模した角度 91.04°の樹脂製の V 型プランジャーを製作して上部に装着し、下部には平面の治具を取り付けて圧縮試験を行った。この試験機の最大荷重は 10N である。試験はそれぞれメーカー推奨の時間で茹でた供試材 1 本に対して行い、クロスヘッドのストロークは 1.0 mm/min で常温大気中で行った。この供試材 1 本の圧縮試験に先立って、同条

件で数回の予備実験を行ったところ、同じ挙動を示したことを確認した。試験機に取り付けたセンサユニットを介して、PC に試験中の時々刻々の荷重とストロークのデータが保存される。なお、茹でた後の各供試材は直径にばらつきがあるので、後述の実験結果では供試材間の差異を比較しやすいよう、ストロークからひずみを算出し荷重 P とひずみ ε の関係として示した。初期状態のスパゲティ直径を D 、変形後の直径を d とし、ひずみ量 ε の導出は式 (3) を用いた。式より、スパゲティが破断して $d=0$ となるひずみ量 $\varepsilon=1.0$ では、物理的に上部プランジャーが下部治具と接触したことを示している。

$$\varepsilon = \left| \frac{d-D}{D} \right| \quad (3)$$

3. 実験結果および考察

3.1 生スパゲティ作製時の押出し速度および圧力

生スパゲティの供試材を作製したときの押出し圧力の変化を Fig. 2(a) に、押出し速度の変化の結果を同図 (b) に示す。両図における×印は 1 回分の生地を押出しが終了したことを示している。この×印が押出しの孔数が少ないほど右に位置していることから、押出し孔数が少ないほど押出しに要する時間が長いことがわかる。また、時間が経過するにつれて押出し速度、押出し圧力ともに低下しているが、これは押出しが進むにつれて混練した生地の量が減少したことが原因であると考えられる。図 (b) に示した押出し速度は、孔の数が少なくなるにつれて増加することが明らかである。これに対して、図 (a) の押出し圧力は R-2 と R-3 で同程度であり、なおかつ R-4 と 1.0 MPa 程度の圧力の差でしかなかった。R-1、R-2、R-3、R-4 ではダイスの孔数がそれぞれ 28 孔、21 孔、14 孔、7 孔と異なるので、それに応じて押出し圧力が Fig. 2(a) のように変化し、押出し速度もこれに併せて異なっている。なお、ダイス孔数が少ないと単位時間で押し出す量が少ないため、押し出しが完了するまでの時間は長くなっている。

以上のように、押出し圧力に主立った変化はないが、押出しの速度が顕著に変化した生スパゲティを、押出し条件の異なるスパゲティとして供試材に用いた。後の圧縮試験では、この押出し速度が安定した領域内から供試材を採取した。

3.2 表面および断面

乾燥スパゲティ D-1 および、生スパゲティ R-1 の断面と表面の走査型電子顕微鏡写真を Fig. 3 に示す。図 (a) の断面写真では、乾燥スパゲティ D-1 に矢印で示したき裂が観察された。これはスパゲティ製造段階での乾燥工程で生じたものか、あるいは後述するように、D-1

Fig. 3 Scanning electron microscopies for cross sectional area and longitudinal direction of dry spaghetti D-1 and raw spaghetti R-1.

は7.2%と低い含水率のため、走査型電子顕微鏡内で真空状態にした時にできたヒビかは不明である。生スパゲティ R-1 に、乾燥スパゲティ D-1 で確認されない空洞が多数確認できた。この空洞は生スパゲティの混捏時に機械が巻き込んだ空気が原因となっている可能性がある。図(b)の長手方向表面の観察結果では、D-1には押し出し方向にはっきりとした線がみられた。これは製造工場で押し出し加工された時のダイス孔内側の表面粗さ性状が転写されたものである。これに対して、R-1には線はみられなかったが、空洞が多く存在した。これはパスタマシンでデュラムセモリナ粉と軟水を自動混練した際の素材の粗密さに起因すると考えられる。これら麺全体の表面性状の違いが、食感や舌触り、さらにはソースの絡まり具合に影響を及ぼすことは明らかである。

続いて高倍率での長手方向表面の走査型電子顕微鏡写真を同図(c)に示す。D-1およびR-1の両者に、直径約15~20 μm の大粒澱粉(図中A)と約5 μm 以下の小粒澱粉(図中B)が観察された[6]。それぞれの粒径はD-1, R-1間で大差はなかった。また、D-1においては粒状を呈していない老化澱粉と考えられる澱粉(図中C)が確認された。一般に澱粉の状態は3種類に分類され、1つはきれいな粒状を保っている「澱粉」、1つは澱粉に水分と熱が加わり、いわゆる糊の状態となったやわらかい「糊化澱粉」、残る1つは糊化澱粉が常温で時間経過し硬く変質した「老化澱粉」である。したがって、乾燥スパゲティの製造段階の乾燥工程で、水分を含んだスパゲティが高温乾燥されることによって糊化澱粉となり、その後常温に戻り時間経過することで糊

化澱粉が硬い老化澱粉へ変質したと推察される[6], [7]。

3.3 含水率

茹でる前および茹でた後の各スパゲティの含水率の測定結果をFig. 4に示す。茹でる前の乾燥スパゲティについては、D-2の含水率がD-1の含水率を下回ったことから、乾燥スパゲティでは開封期間が長くなると含水率が低下する傾向が認められた。茹でる前の生スパゲティについては4種類全てにおいて、製造時に同量のミネラルウォーターを添加していることから同程度の含水率となった。また、茹でる前の乾燥スパゲティと生スパゲティを比較すると、容易に想像できるとお

Fig. 4 Changes for the water content ratio.

り、生スパゲティの含水率は乾燥スパゲティのそれを大きく上回る結果となった。以上のように、茹でる前では乾燥スパゲティと生スパゲティ間で大きな差異があったが、茹でた後のスパゲティを比較すると全てにおいて約60%の含水率であり、どちらのスパゲティでも食す際は同等の含水率を有していることが明らかになった。このことは、圧縮試験から得られた結果で食感の違いを評価するにあたって、含水率は無関係と考えることができることを意味する。

3.4 圧縮試験

圧縮試験はスパゲティを噛んだ時の変形抵抗を示すもので、ここから得られる最大荷重や変位量といった機械的特性値は、直接的にスパゲティの食感を評価する指標として信頼のある値となる。茹でた乾燥スパゲティおよび生スパゲティに対する圧縮試験の結果をFig. 5に示す。食品を対象とした圧縮試験の結果は、荷重とクロスヘッドストローク（変位）の関係でまとめられるが一般的であるが、直径の異なるスパゲティに対する試験結果を相対的に評価するために、先の式(3)で直径からひずみ量を算出し、これを図の横軸とした。乾燥スパゲティのD-1、D-2の結果に関して、著しい差異はみられなかった。言い換えれば、乾燥スパゲティは開封後16ヶ月が経過しても開封直後と同様の品質が担保されていることがわかる。同様に生スパゲティのR-2、R-3、R-4間にも差異はなかった。これらのことから、今回調査した範囲内では、乾燥スパゲティの開封期間と生スパゲティの押出し条件は、スパゲティの食感に影響を与える因子ではないということが明らかになった。

乾燥スパゲティと生スパゲティの結果を比較すると、最大荷重はいずれも $P=0.5\sim0.6$ Nで同程度の値となったが、最大荷重時のひずみ量と破断時のひずみ量に顕

著な差異が確認された。乾燥スパゲティでは最大荷重でのひずみ量が $\epsilon\approx0.6\sim0.7$ 、破断時のひずみ量が $\epsilon\approx0.8$ であったのに対し、生スパゲティの最大荷重に対応するひずみ量が $\epsilon\approx0.9$ 、破断に対応するひずみ量は $\epsilon\approx1.0$ であった。この最大荷重に達したときのひずみ量と破断時のひずみ量は食感と強い関係があると考えられる。先述のとおり、ひずみ量 $\epsilon=1.0$ で物理的に上部プランジャーと下部治具が接触したことを意味するので、圧縮試験の結果で破断点が $\epsilon=1.0$ に近いほど破断が生じにくく粘性の高い麺であることがわかる。これと逆に、 $\epsilon=1.0$ より小さいほど、麺は脆性的に破断していることが明らかである。また、最大荷重に達するまでの荷重-ひずみ線図の傾きが小さいこと、すなわち最大荷重に達するまでのひずみ量が多いことは、麺の食感を表現する「モチモチ」や「コシがある」といわれる状態が長時間続くことに対応する[7]。本実験の結果では、乾燥スパゲティD-1、D-2よりも生スパゲティR-2、R-3、R-4の方が最大荷重に達するまでのひずみ量が多いので、「モチモチ」や「コシがある」食感が長続きすることが実証されたことになる。このことは、乾燥スパゲティよりも生スパゲティの方が「モチモチ」していると、一般的に評される結果と対応している。

3.5 スパゲティの性質に影響を与える因子の検討

開封時期が異なる乾燥スパゲティ2種類、押出し条件が異なる生スパゲティ4種類に対して、走査型電子顕微鏡による表面および断面の観察、茹で前後での含水率測定、プランジャーを用いた圧縮試験、のそれぞれの試験を行った。乾燥スパゲティD-1とD-2の間において、開封から期間が経過すると乾麺の状態での含水率が低下する傾向が確認された。しかしその他の試験結果においては、開封時期が異なる乾燥スパゲティ間、押出し条件が異なる生スパゲティ間に大差はなかった。これらのことから、乾燥スパゲティの開封期間や生スパゲティの押出し条件は、スパゲティの品質や食感に影響を与える重要な因子ではないことが明らかになった。

一方、乾燥スパゲティと生スパゲティ間では含水率測定でも著しい差異はなかったことから、乾燥スパゲティ、生スパゲティともに同程度の含水率のスパゲティであるといえる。この同程度の含水率を有する乾燥スパゲティと生スパゲティ間で表面および断面の観察、そして圧縮試験において明らかな差異が確認された。これらの差異が生じた原因として2つの要因が考えられる。1つ目に高倍率での表面観察結果で示した澱粉の変質である。一般的に澱粉は一度老化澱粉になると元の糊化澱粉に戻すことは非常に難しい。スパゲティを茹でたとき、生スパゲティはその大半が糊化澱粉にな

Fig. 5 Results of compression test for the boiled spaghetti.

るのに対して、老化澱粉が多く含まれた乾燥スパゲティは茹でても全てが糊化澱粉にはならない。老化澱粉は糊化澱粉より粘度が低い性質をもつため [8], 圧縮試験では乾燥スパゲティが $\varepsilon \approx 0.8$ 程度で早期に脆性的に破断したと推測される。

2つ目として、乾燥スパゲティを茹でた際は「アルデンテ」とよばれる状態で芯が残ることが知られているが、これに関連するものである。乾燥スパゲティを茹でる際、スパゲティを茹でる前にもつ含水率とスパゲティ表面から中心部へとお湯が浸潤していく浸透率の関係から、乾燥スパゲティは芯が残り生スパゲティには芯は残らない。乾燥スパゲティに「アルデンテ」の芯が存在することが、圧縮試験において最大荷重が生スパゲティと同等程度になる要因になっていることも事実ではあるが、芯が断面中心に存在するため最大荷重に達するのが生スパゲティよりも早期であったとも考えられる。

以上のように、乾燥スパゲティの高温乾燥工程により澱粉が老化澱粉へと変質したこと、ならびに物理的に乾燥スパゲティに「アルデンテ」の芯が残存すること、の両点がスパゲティの食感に大きな影響を与えていると考えられる。芯の残存は乾燥スパゲティでは避け得ないことであるが、澱粉の変質は製造時の乾燥条件に大きく依存する。したがって、スパゲティの品質や食感に最も影響を与える因子は、本報の範囲内では乾燥条件であると考えられる。

4. 結 言

本報では、スパゲティの品質に影響を与える因子を調査するため、製造条件の異なる乾燥スパゲティおよび生スパゲティに対して、走査型電子顕微鏡による表面および断面の観察、茹で前後での含水率測定、プランジャーを用いた圧縮試験をそれぞれ実施した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 含水率測定の結果から、全ての乾燥スパゲティ、生スパゲティは茹でた後に約 60% の一定の含水率を有していることがわかった。これは、食感の違いを評価するにあたり、含水率は一定として考えることができることを意味する。

(2) 圧縮試験の結果から、今回調査した範囲内では、乾燥スパゲティの開封期間や生スパゲティの押出し条件は、スパゲティの品質に影響を与える重要な因子ではないことが明らかになった。

(3) 圧縮試験の結果から、乾燥スパゲティよりも生スパゲティの方が最大荷重に達するまでのひずみ量が多いので、一般的にいわれる「モチモチ」、「コシがある」という食感を有していることを実験により実証した。

(4) 総合的な実験結果の考察から、乾燥スパゲティの

高温乾燥工程により澱粉が老化澱粉へと変質したこと、ならびに物理的に乾燥スパゲティに「アルデンテ」の芯が残存すること、の両点がスパゲティの食感に大きな影響を与えていると考えられる。

引 用 文 献

- 1) A. Baiano, A. Conte, M. A. Del Nobile; Influence of drying temperature on the spaghetti cooking quality", J. Food Eng., **76**, 341-347 (2006).
- 2) H. Shibasaki; "The Effect of the Number of "Fukugou (Folding of Dough-sheet)" on the Quality of "Tenobesomen (Hand-extended Noodles)"", (in Japanese), Report of the Food Research Institute and the Fermentation & Food Experimental Station, Kagawa Prefectural Government, **85**, 6-12 (1993).
- 3) K. Okada, T. Ichikawa, M. Shimomura; "Effect of Starches and Active Gluten Added to Wheat Flour on the Properties and Taste of Japanese Hand-made Noodle", (in Japanese), J. Cookery Sci. Jpn., **41**, 327-336 (2008).
- 4) S. Chillo, M. Iannetti, V. Civica, N. Suriano, M. Mastromatteo, M. A. Del Nobile; A study of the Relationship between the Mechanical Properties and the Sensorial Optimal Cooking Time of Spaghetti", J. Food Eng., **94**, 222-226 (2009).
- 5) S. Tesaki, S. Tanabe, K. Ikezaki, E. Arai, M. Watanabe; "Effect of stirring and added salt during boiling on the properties of cooked noodles" (in Japanese), J. Home Econ. Jpn., **48**, 12, 1097-1101 (1997).
- 6) M. Kojima, M. Murase, S. Totani, M. Sugimoto; "Scanning electron microscopy of hand-stretched noodles (tenobesomen) and machine-made noodles (kikai-men)" (in Japanese), J. Japanese Soc. for Food Sci. and Tech., **39**, 471-476 (1992).
- 7) E. Miki; "Texture of udon" (in Japanese), J. Japanese Soc. Bio., **20**, 32-39 (2006).
- 8) A. Matsunaga, K. Kainuma; "Studies on the retrogradation of starchy food (part 1)" (in Japanese), J. Home Econ. Jpn., **32**, 653-659 (1981).

要 旨

本報では、製造条件の異なる数種類のスパゲティを対象として、機械的性質の観点から茹でた後の特性値の違いを実験的に調査した。また、乾燥スパゲティと生スパゲティの機械的な特性値を、含水率や電子顕微鏡による表面観察結果と総合して評価し、スパゲティの品質に影響を与える因子について考察した。

その結果、乾燥スパゲティの高温乾燥工程により澱

粉が老化澱粉へと変質したこと，ならびに物理的に乾燥スパゲティに「アルデンテ」の芯が残存すること，の両点がスパゲティの食感に大きな影響を与えていることがわかった．芯の残存は乾燥スパゲティでは避け得ないが，澱粉の変質は製造時の乾燥条件に大きく依

存する．したがって，スパゲティの品質や食感に最も影響を与える因子は，本報の範囲内では乾燥条件であると考えた．

今回のこれらの調査結果は，今後のスパゲティ麺の食感向上に設計指針として役立つと考えられる．