

博士論文

水分制御がピッツァ生地のリオロジー特性および  
ピッツァクラストの食感に及ぼす影響

令和5年3月

広島大学 大学院統合生命科学研究科

食品生命科学プログラム

松本茜

## 目次

第1章 背景および目的.....	1
1-1. ピッツァ.....	1
1-2. ピッツァを扱う食品産業における検討課題.....	1
1-3. 本研究の目的.....	2
1-4. 本論文の構成.....	4
第2章 材料および測定.....	5
2-1. 生地.....	5
2.2. クラスト生地.....	6
2-3. 糊化澱粉.....	7
2-4. 動的粘弾性測定.....	8
2-5. レオメーター.....	10
第3章 糊化小麦澱粉を用いた加水がピッツァ生地のレオロジー特性に及ぼす影響... 13	
3-1. 本章の目的.....	13
3-2. 実験方法.....	14
3-3. 結果および考察.....	16
3-4. 本章の総括.....	23

第4章 糊化小麦澱粉を用いた加水がピッツァクラストの食感に及ぼす影響.....	24
4-1. 本章の目的.....	24
4-2. 実験方法.....	24
4-3. 結果および考察.....	26
4-4. 本章の総括.....	31
第5章 予備焼成および再水和によるクラストの改質と本焼成クラストの食感改善...	32
5-1. 本章の目的.....	32
5-2. 実験方法.....	32
5-3. 結果および考察.....	36
5-4. 本章の総括.....	45
第6章 総括.....	47
引用文献.....	50
List of Publications .....	55
謝辞.....	56

## 第1章 背景および目的

### 1-1. ピッツァ

ピッツァは強力粉、塩、水、イーストなどを混捏し、発酵させた生地を、縁を備えた円盤状に成形し（クラスト生地）、中央に具材やソースを乗せ、焼成して作られる。生地材料や配合はフランスパンと殆ど同じだが、フランスパンでは生地を概ね 250°C で 13 分程度焼成するのに対し、ピッツァでは生地を概ね 350~450°C で 60~90 秒（高温短時間）焼成する点に特徴がある（マーシら., 2020）。ナポリはピッツァ発祥の地といわれている。ナポリピッツァ（ピッツァ・ナポレターナ）はクラストの縁（コルニチャーネ）が厚く、食感は“ふっくら”、“もっちり”している。この食感は石窯を用いた高温短時間焼成によって実現される。本論文では成型前の玉生地（ドウ）を“生地”、ピッツァの具材やソースを乗せる土台に成型した生地を“クラスト生地”、焼成したクラスト生地を“クラスト”と記載する。また、後述するクラストの物性や食感は、クラストの縁（コルニチャーネ）を対象にしたものである。

### 1-2. ピッツァを扱う食品産業における検討課題

石窯を備えた本格的な店舗（ピッツェリア）とは異なり、フードチェーンでは一般に電気式オーブンによってピッツァを焼成する。電気式オーブンは石窯と比べて焼成温度が低いため、焼成時間も必然的に長くなる。その結果、クラストは硬い食感になってしまう。電気式オーブンをを用いた焼成においても、石窯で焼成したときと同じような、ふ

っくら、もっちりしたクラストを実現することは、ピッツァを扱う食品産業における重要課題の一つである。

一方、フードチェーンでは冷凍した生地を利用することで、調理時間を短縮化することが多い。しかし、冷凍生地の製造、流通、保存にはコストがかかる。このコスト削減のため、一部のフードチェーンではクラスト生地を工場ですべて焼成した後、冷蔵で各店舗に輸送し、数日以内で使い切る方式（セントラルキッチン）が採用されている。しかし、予備焼成クラストは、積載流通・保管時にクラストの内部構造が潰れることが問題視されている。また、予備焼成クラストは、予備焼成と喫食前（本焼成）とで計2回の焼成（2段階焼成）が行われるため、クラストは非常に硬くなる。これまでに伝統的な焼成方法がピッツァの食感に及ぼす影響に関する研究は報告されているが（De Pilli, 2022）、2段階焼成のような変則的な焼成方法に関する研究報告は無い。

### 1-3. 本研究の目的

電気式オーブンによる低温長時間焼成によってクラストが硬くなる要因として、クラスト生地から過度な水分蒸発が起こることが考えられる。生地の水分を予め多めに設計しておけば、焼成後に残存する水分も増加するため、食感は改善すると期待される。しかし、生地の水分を増やすことによって、生地の混捏性や成形性が悪化するため、この改善策は採用できない。一方、先行研究において、生地にキサントガムなどの増粘多糖類や卵などの高分子成分を加えることで、クラストの食感改善が検討されている（Mandala, 2005; Baker et al., 1983）。しかし、本来のクラストは小麦粉と水を主成分とし

たシンプルな構成であり、そこに異物が加わることで、クラスト本来の味や風味への悪影響が考えられる。これらのことを踏まえて、本研究では糊化小麦澱粉を用いてクラスト生地水分含量を高める方法に着目した。クラスト生地の主材料は小麦粉であるため、小麦澱粉を使用することによる味や風味への悪影響は殆どないと考えられる。また、澱粉は糊化することで水和力が著しく向上するため、クラスト生地中の小麦澱粉を予め糊化しておくことで、レオロジー特性を維持しつつ、水分含量を高めることが可能になると考えられる。クラスト生地中の水分含量を高めることで、焼成後（クラスト）の水分含量も高くなるため、電気式オーブンをを用いた低温長時間焼成においても、ふっくら、もっちりとしたクラストを実現できると期待される。

一方、予備焼成クラストにはチルド流通・保管が許容される水分活性（water activity,  $a_w$ ）と、積載流通・保管に耐える強度（積載耐性）が求められる。これらの条件を満たすには予備焼成の段階で水分含量を一定水準にまで引き下げておく必要がある。しかし、そのままの状態では本焼成を実施すると、クラストの水分含量が更に低下した結果、最終的な食感は硬くなる。この場合、本焼成前に再水和を施すことで、食感を改善できる可能性がある。

ピッツァクラストに関する一連の課題は、それぞれの状況に合わせた最適な水分制御によって改善できると期待される。本研究の目的は、1. 糊化澱粉を用いた加水がクラスト生地のレオロジー特性およびクラストの食感に及ぼす影響、2. 予備焼成による乾燥がクラスト生地の物性に及ぼす影響と、本焼成前の再水和が2段階焼成クラストの食感に及ぼす影響を明らかにすることであった。

#### 1-4. 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成される。第 1 章（本章）では本論文の背景および目的を述べた。第 2 章では試料（ピッツァおよび澱粉）並びに測定方法（動的粘弾性およびレオメーター）について説明した。第 3 章では糊化澱粉を用いた加水が生地のレオロジー特性に及ぼす影響について検討した。小麦澱粉と水を加熱混合し、様々な水分含量の糊化澱粉を調製した。これをモデル生地およびピッツァ生地に配合し、レオロジー特性に及ぼす影響を明らかにした。第 4 章では糊化澱粉を用いた加水がクラストの食感に及ぼす影響について検討した。家庭用の電気式オーブンをを用いて焼成し、クラストの部位ごとの水分含量、見かけ密度（膨化の度合い）、食感に及ぼす影響を明らかにした。第 5 章では予備焼成によるクラストの改質と再水和による本焼成クラストの食感改善について検討した。まず、通常のクラスト生地を様々な時間で予備焼成し、水分含量、 $a_w$ 、初期弾性率、積載耐性に及ぼす影響を明らかにした。次に、予備焼成クラストへの再水和処理が本焼成クラストの水分含量および食感に及ぼす影響を明らかにした。第 6 章では上記の研究結果を総括した上で、今後の展望を述べた。

## 第2章 材料および実験手法

### 2-1. 生地

一般的なレシピにしたがい、本論文では生地材料に強力小麦粉、水、食塩、酵母、砂糖、オリーブオイルを使用した。また、研究の一部ではモデル生地（小麦粉、小麦澱粉、水）を用いた。生地の調製には市販のホームベーカリー（SD-BMS106；パナソニック株式会社）を用いた。酵母以外の材料を材料コンテナに、酵母を専用のスペースにそれぞれセットし、“ピザ生地モード”によって生地を調製した。生地製造時の材料コンテナ底部の温度変化を Fig. 2-1 に示す。開始後およそ 5 分で 25°C に到達し、10 分間保温した後、34°C まで昇温し、20 分間保温される (Fig. 2-1)。

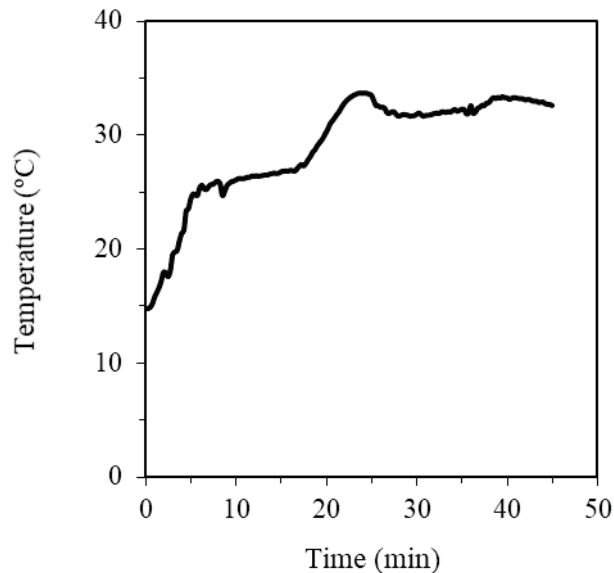


Fig. 2-1. Temperature change during dough preparation.



## 2-2. クラスト生地

正式なナポリピッツァ（ピッツァ・ナポレターナ）には次のような概要規則がある（マーシラ., 2022）。

- ピッツァ生地は円形で直径 35cm 以内であり、盛り上がった縁（コルニチャーネ）を備えて、中央部は具材やソースに覆われていること。
- 中央部の厚みは 0.4mm（±10%以下）、コルニチャーネの厚みは 1~2cm であること。
- 盛り上がったコルニチャーネは食感も口当たりも柔らかく、弾力があること。
- 485°C 程度の高温に到達できる窯を用いて、60~90 秒以内に焼成すること。

これを参考にして、本研究ではミニサイズのクラスト生地を調製した。生地 50g を円形の型に伸ばし、円形のスタンプで中央部に窪み（窪み内径  $65 \pm 2\text{mm}$ 、深さ  $10 \pm 1\text{mm}$ ）を備えたクラスト生地（直径  $99 \pm 1\text{mm}$ 、高さ  $13 \pm 1\text{mm}$ ）に成形した（Fig. 2-2）。また、焼成時の中央部の膨張を防ぐために、市販のフォークを使って窪みにランダムに穴をあけた。

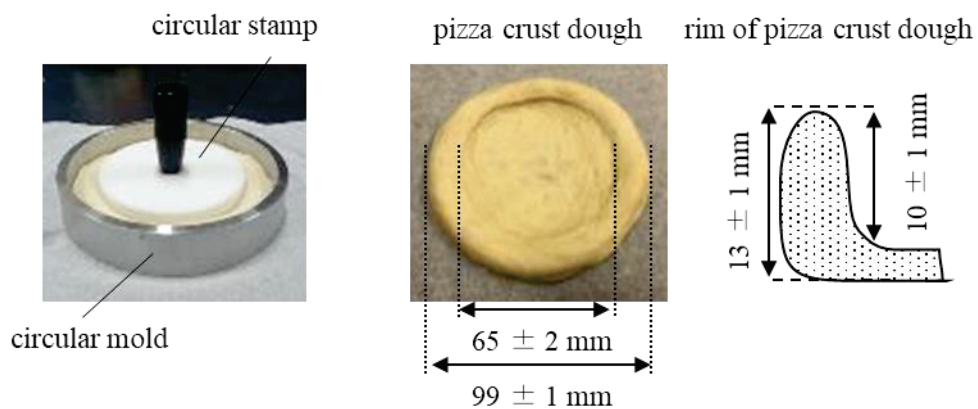


Fig. 2-2. Preparation of pizza crust dough.

### 2-3. 糊化澱粉

澱粉は主にグルコースが  $\alpha$ -1,4 結合によって直鎖状に連結したアミロースと、 $\alpha$ -1,4 結合によって直鎖状に連結した部分から  $\alpha$ -1,6 結合によって分岐したアミロペクチンから構成される。澱粉を水と共に加熱すると、アミロペクチンの結晶質（二重らせん）部分が解けて非晶質になり、周囲の水分子と水和して膨潤する（Fig. 2-3）。この過程は澱粉の糊化と呼ばれる（Tester et al., 2000; Jacobs et al., 1998）。

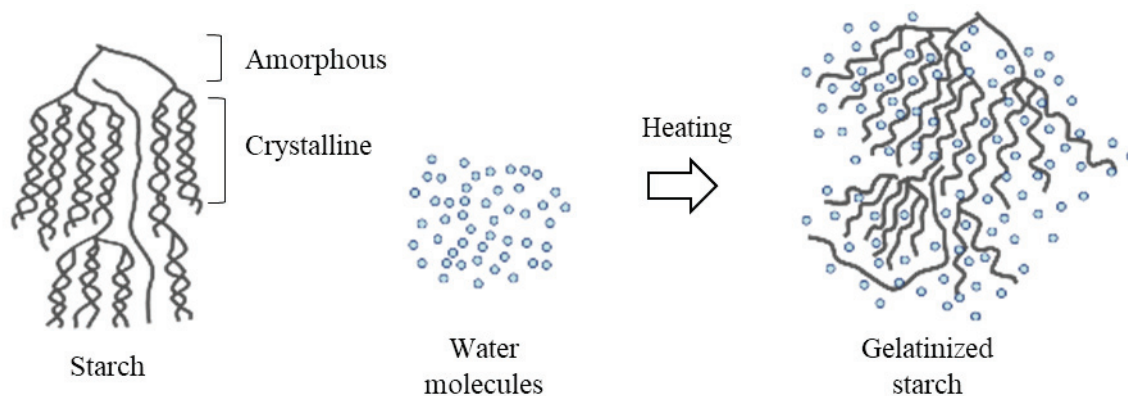


Fig. 2-3. Schematic of starch gelatinization.

澱粉の構造と組成や糊化澱粉の性質は植物種によって異なる（Table2-1）（高橋, 1996）。馬鈴薯澱粉やタピオカ澱粉はアミロース含量が比較的低い。糊化すると透明度が高く、膨潤力や粘度が高いため、タレなどのとろみ付けに利用される。一方、トウモロコシ澱粉や小麦澱粉はアミロース含量が高く、糊化しても膨潤力や粘度が低いため、高い粘性を必要としない水産練り製品のつなぎなどに利用される。

先述の通り、本研究ではピッツァ生地、クラスト生地、クラストの保水性を向上させ

るために糊化小麦澱粉を利用する。膨潤力や最高粘度の比較より、糊化小麦澱粉による保水性の向上効果は、糊化馬鈴薯澱粉や糊化タピオカ澱粉のそれには劣ると考えられるが、味や風味への悪影響を抑えることができる点に優位性がある。

Table 2-1. Structure, composition, and gelatinization properties of various types of starch.

澱粉	粒径 (μm)	アミロース含量 (%)	結晶化 (%)	糊化温度 (°C) *	最高粘度 (BU) *	膨潤力 (95°C)	透明性
トウモロコシ	2-30 (平均 13-15)	26	39	75-80	600	24	乳白色
馬鈴薯	2-80 (平均 30-40)	20	25	60-65	3000	1153	非常に鮮明
小麦	2-40 (大 15-40, 小 2-10)	24	36	80-85	300	21	乳濁
タピオカ	2-35 (平均 20)	17	38	65-70	1000	71	全く鮮明

\* 5%澱粉懸濁液のアミログラム (50~95°Cまで昇温 1.5°C/分後 60 分保持) より

The data were taken from a literature (高橋., 1996) .

#### 2-4. 動的粘弾性測定

動的粘弾性測定は、粘弾性体に正弦波（振動）歪みを与えたときの応力を捉えることで、弾性的要素と粘性的要素を定量化するために利用される。物体に正弦波歪みを与えたときの応力波形を Fig. 2-4 に示す。完全弾性体 (Fig. 2-4-a) は与えた歪みと同位相の応力を示し（位相差=0°）、完全粘性体 (Fig. 2-4-b) では位相が 90°ずれる。弾性的要素と粘性的要素を兼ね備えた粘弾性体 (Fig.2-4-c) では、位相が 0~90°の間でずれて現れる。

それぞれの応答波を数式で表すと以下ようになる (五十野, 2001)。

弾性体  $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$  (式 2-1)

粘性体  $\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t + \pi/2)$  (式 2-2)

粘弾性体  $\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t + \delta)$  ( $0 < \delta < \pi/2$ ) (式 2-3)

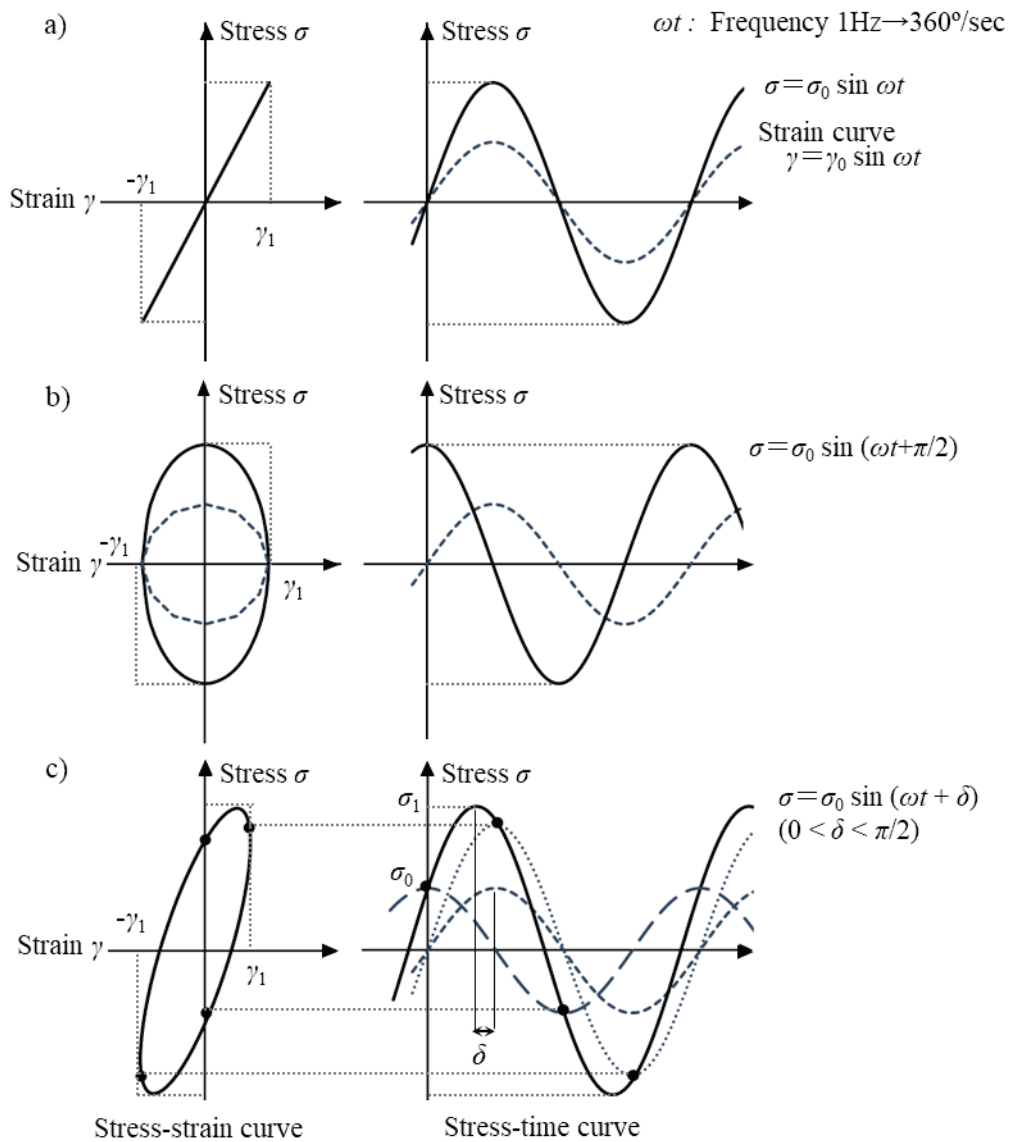


Fig. 2-4. Stress-strain curve and stress-time curve for a) elastic, b) viscous, and c) viscoelastic materials, respectively.

式 (2-3) は式 (2-4) のように表すことができる。

$$\sigma = (\sigma_0/\gamma_0 \times \cos\delta) \gamma_0 \sin \omega t + (\sigma_0/\gamma_0 \times \sin\delta) \gamma_0 \sin (\omega t + \pi/2) \quad (\sigma < \delta < \pi/2) \quad (\text{式 2-4})$$

式 2-4 の第 1 項は弾性を、第 2 項は粘性をそれぞれ表している。各項の係数を  $G'$  および  $G''$  とすると、

$$G' = \sigma_0/\gamma_0 \times \cos\delta \quad (\text{式 2-5})$$

$$G'' = \sigma_0/\gamma_0 \times \sin\delta \quad (\text{式 2-6})$$

となる。ここで  $G'$  は貯蔵弾性率 (Pa)、 $G''$  は損失弾性率 (Pa) であり、それぞれ粘弾性体の弾性的性質と粘性的性質を反映している。また、損失正接  $\tan\delta$  は弾性項を基準としたときの粘性項の割合を示す値である (式 2-7)。

$$\tan\delta = G''/G' \quad (\text{式 2-7})$$

固体 ( $G' > G''$ ) に与える歪み (或いは応力) を徐々に高くしていくと、やがて大変形が生じ、 $G''$  が  $G'$  よりも高くなる。 $G'$  と  $G''$  の値が一致する ( $\tan\delta = 1$  となる) ときの応力は降伏応力 ( $\sigma_{\text{yield}}$ ) と呼ばれる (Fernandes et al., 2021)。 $\sigma_{\text{yield}}$  は物質に大変形を与えるために必要な最低応力であり、混捏性の指標として扱われる (Moriya et al., 2020)。本研究では生地 of 線形領域における  $G'$  および  $G''$  の値と、 $\sigma_{\text{yield}}$  の値をレオロジー特性として評価した。

## 2-5. レオメーター

レオメーターは物体の歪み (或いは変位) と応力 (或いは荷重) との関係を調べる測定装置である。パンの食感 (硬さ、或いは柔らかさ) 評価においては、AACC 法 (AACC.,

2000b) にしたがって、低歪み (0.25) での圧縮応力によって評価される (Lagrain et al., 2008; Majzoobi et al., 2016)。一方、通常の食パンよりも“もちり”感の強い蒸しパン (Gao et al., 2018) や米麺 (Shen et al., 2021) では、高歪み (0.6~0.7) での圧縮応力が食感評価に利用されている。本研究では低歪み (0.25) および高歪み (0.70) における圧縮応力の低さを、それぞれ柔らかさ (ふっくら感) と付着性 (もちり感) に関連付け、考察を展開した。

一般に、パンのテクスチャー測定は常温 (20°C前後) で実施される。これは、パンは常温で喫食されることが多いこと、殆どの市販のレオメーターが雰囲気温度の制御に対応していないことなどが要因と考えられる。しかし、ピZZアは焼成直後の熱い状態で喫食されることが多く、冷めたピZZアの価値は乏しい。そこで本研究では、レオメーターに設置可能な自作の温度制御装置を設置し、60°Cの環境で上記の測定を実施した (Fig. 2-5)。この測定方法は第4章で採用した。

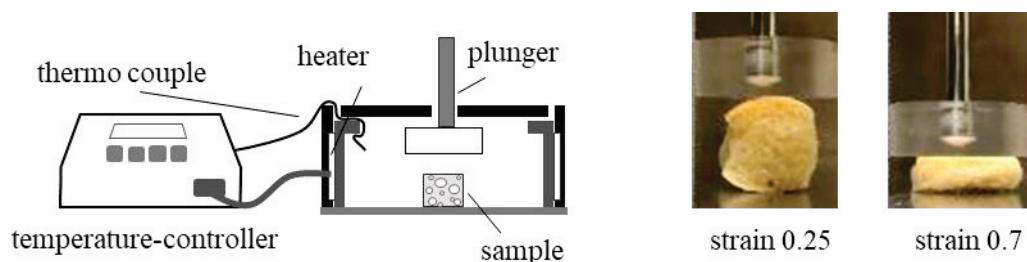


Fig. 2-5. Schematic diagram of temperature-controlled rheometer and pizza crust shape during texture measurement.

一方、予備焼成クラストの初期弾性率および変形率、2段階焼成クラストのテクスチャー測定にはデジタルフォースレコーダー（ZTA-1000N；今田製作所）とシリンダーシステム（日新精器株式会社）を備えた自作のレオメーターを用いた（Fig. 2-6）。本装置は、先述のレオメーターよりも高い荷重（最大 800N）を発生させることが可能であり、予備焼成クラストおよび2段階焼成クラストの全体を圧縮した際の荷重-変位曲線（或いは応力-歪み曲線）が得られる。試料全体を圧縮することで試料部位によるデータのバラツキが抑えられる、一定歪みを与えるために要する荷重が高くなるため、見かけ上の測定精度を高めることができる、などの優位性がある。しかし、装置の設計上、60°Cで保温しながら測定することは困難であったため、試料調製後は時間を置かずに測定を実施することにした。また、本装置はハイトゲージとして利用することも可能であり、試料の厚さの変化から変形率を求めるためにも使用した。この測定方法は第5章で採用した。



Fig. 2-6. Compression of the whole pizza crust sample using a rheometer of our own design.

### 第3章 糊化小麦澱粉を用いた加水がピッツァ生地のリオロジー特性に及ぼす影響

#### 3-1. 本章の目的

フードチェーンでは高温短時間焼成が可能な石窯ではなく、それよりも低温長時間での焼成になる電気式オーブンを用いてクラスト生地を焼成するため、クラストは硬い食感になる。水は食品に対して最も強力な可塑剤であり (Kilburn et al., 2005)、クラスト中の水分含量を高めることで、食感を柔らかくすることができると考えられる。しかし、生地水分含量を高めると、混捏性や成型性が悪化することが問題視される。キサントガムなどの親水性コロイドを配合したパン生地では、水分含量を高めても粘弾性をある程度維持できることが報告されており (Sciarini et al., 2012)、水分増加によって悪化する生地の粘弾性を最適に保つには、親水性の高分子が有効であると考えられる。同様の方法は、パン (Yamauchi et al, 2014; Parenti et al., 2019) や米粉パンの食感改善にも採用されている (Kim et al., 2017; Murakami et al., 2015; Murakami et al., 2016)。一方、ピッツァクラストは小麦粉と水を主成分としたシンプルな構成であり、そこに異物が加わることで、クラスト本来の味や風味への悪影響が考えられる。これらのことを踏まえて、本研究では糊化小麦澱粉を用いてクラスト生地の水分含量を高める方法に着目した。クラスト生地は小麦粉が主材料であるため、小麦澱粉を使用することによる味や風味への悪影響は殆どないと考えられる。クラスト生地中の小麦澱粉を予め糊化させておくことで、リオロジー特性を維持しつつ、水分含量を高めることが可能になると考えられる。本章の目的は、糊化小麦澱粉 (gelatinized wheat starch, GWS) を用いた水分含量の増加



がクラスト生地のレオロジー特性に及ぼす影響を明らかにすることである。

### 3-2. 実験方法

#### 材料

高グルテン小麦粉（日清製粉グループ本社）、ショ糖（パールエース株式会社）、食塩（伯方の塩株式会社）、オリーブオイル（日清オイリオグループ株式会社）、ドライイースト（日清製粉グループ本社）、小麦澱粉（富士フィルム和光純薬株式会社）を購入した。小麦粉および小麦澱粉の水分含量は常圧乾燥法（105℃、24時間）によって、それぞれ  $14.0 \pm 0.3$  g/100 g-DM（DM, dry matter）および  $11.9 \pm 0.2$  g/100 g-DM であることを確認した。

#### モデル生地の調製

モデル生地（小麦粉、小麦澱粉、水）の材料組成を [Table 3-1](#) に示す。小麦澱粉は [Table 3-1](#) に示す水を加え、予め糊化させたものを使用した。小麦澱粉、水、攪拌子を入れたビーカーにラップで蓋をして、加熱したウォーターバス（98~100℃）に入れ、マグネッ トスターラーを用いて攪拌しながら 10 分間加熱した。得られた糊化澱粉を室温程度まで冷却し、ホームベーカリーの容器内で他の材料と混合した。ホームベーカリーで設定された“ピザ生地モード”で生地を調製した。各試料の水分含量は常圧乾燥法（105℃、24時間乾燥）によって決定した。尚、通常のピッツァ生地を再現したモデル生地（GWS0）は加水量 60g であり、そのときの水分含量は 0.82 g/g-DM である。

Table 3-1. The recipe for model dough.

	Wheat flour	Wheat starch	Water
GWS0	100	0	50
			60
			70
			80
GWS10	90	10	60
			70
			80
GWS20	80	20	70
			80

Unit is gram.

#### ピッツァ生地調製の調製

ピッツァ生地（小麦粉、小麦澱粉、水、ショ糖、食塩、ドライイースト）の材料組成を Table 3-2 に示す。モデル生地と同じ手順で試料を調製した。各試料の水分含量は常圧乾燥法（105°C、24 時間乾燥）によって決定した。

Table 3-2. The recipe for pizza dough.

	Wheat flour	Wheat starch	Water	Oil	Sucrose	NaCl	Yeast
Conventional	100	0	60	3	2	2	2
Modified	80	20	80	3	2	2	2

Unit is gram.

## 動的粘弾性測定

各種試料の貯蔵弾性率 ( $G'$ )、損失弾性率 ( $G''$ )、降伏応力 ( $\sigma_{\text{yield}}$ ) を動的粘弾性測定装置 (Haake Mars III system; Thermo Fisher Scientific K. K., Tokyo, Japan) を用いて調べた。試料ステージに生地をセットし、円盤プランジャー (直径 20mm) を使用した (Yunos et al., 2021)。ギャップ 1.0mm、周波数 1Hz、せん断応力範囲 1Pa~10,000Pa、温度 25°C の条件において  $G'$  および  $G''$  を測定した。得られた結果より線形応力範囲における  $G'$  および  $G''$  と、 $\sigma_{\text{yield}}$  ( $G'$  と  $G''$  とが一致するときの応力) とを決定した。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

## 有意差検定

Microsoft Excel および R 4.0.2 for Windows を用い、t 検定および Tukey-Kramer 検定 ( $p < 0.05$ ) を実施した。

### 3-3. 結果および考察

#### モデル生地のレオロジー特性

動的粘弾性測定結果の一例として、通常のピッツァ生地を再現したモデル生地 (水分含量 0.82 g/g-DM の GWS0) における  $G'$  および  $G''$  とせん断応力との関係を Fig. 3-1 に示す。 $G'$  および  $G''$  は 100Pa 程度まで一定値を示した後 (線形応力領域)、1,000Pa 程度まで緩やかに低下し、その後大きく低下した (非線形応力領域)。線形応力領域において、 $G'$  は  $G''$  よりも常に高い値を示した。このことは、この材料が静止状態において固

体的な粘弾性体であることを意味する。線形応力範囲の代表値として 10Pa 付近での  $G'$  および  $G''$  の値を読み取った。せん断応力の増加によって  $G'$  と  $G''$  との差は徐々に縮まり、やがて  $G''$  は  $G'$  よりも高くなった。このことは、この材料が液体的な粘弾性体となり、流れ始めたことを意味する。 $G'$  と  $G''$  とが一致する点でのせん断応力を  $\sigma_{yield}$  として読み取った。

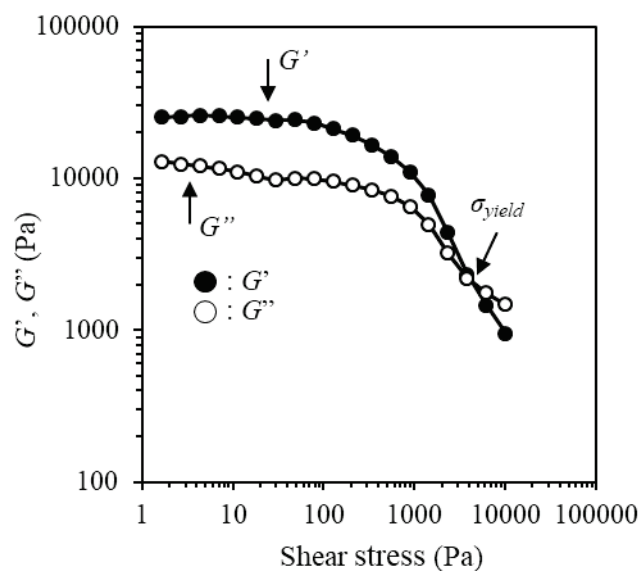


Fig. 3-1. Typical viscoelastic measurement result of model dough (GWS0).

水分含量がモデル生地 の  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{yield}$  に及ぼす影響をそれぞれ Fig. 3-2、3-3、3-4 に示す。水分含量 0.82 g/g-DM の GWS0 における  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{yield}$  は、それぞれ 21,020 Pa、8,514 Pa、4,167 Pa であった。これらの値は参考値として、図中では破線で示した。いずれの試料においても  $G'$  は  $G''$  の 1.83 倍程度の値であり、 $\tan \delta$  ( $G''/G'$ ) の値は 0.3~0.6 の範囲にあった。このことは、いずれの試料も静止状態では固体的な振る舞いを示すこと

を意味する。糊化小麦澱粉の配合によって  $\tan \delta$  は若干低下する傾向にあったが、水分含量は殆ど影響しなかった (Sumida et al., 2021)。

水分含量の増加によって、各試料の  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  は対数スケールで直線的に低下した (Sumida et al., 2021; Upadhyay et al., 2012)。これは水の可塑効果によるものである。一方、小麦粉の一部を GWS に置き換えることで、 $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  の値はシフトアップした。これは糊化澱粉の保水効果によるものであり、水分含量を高めてもレオロジー特性は維持されることを示唆する。小麦粉の 20% を GWS に置換した場合、モデル生地水分含量を 1.04 g/g-DM まで上昇させても、 $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  の値は殆ど変動しないことが明らかになった。この材料組成 (水 80g を配合した GWS20) をピッツァ生地を採用することにした。

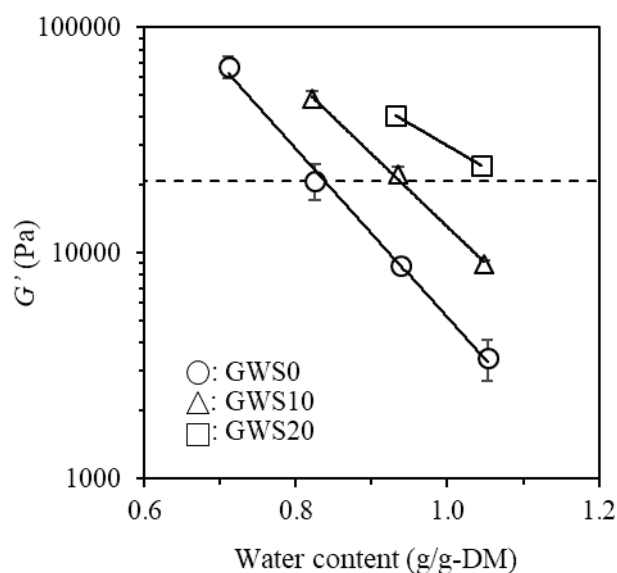


Fig. 3-2. Effect of water content on  $G'$  of model dough. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). The horizontal dashed line is the  $G'$  of the basic model dough (GWS0, Water 60g).

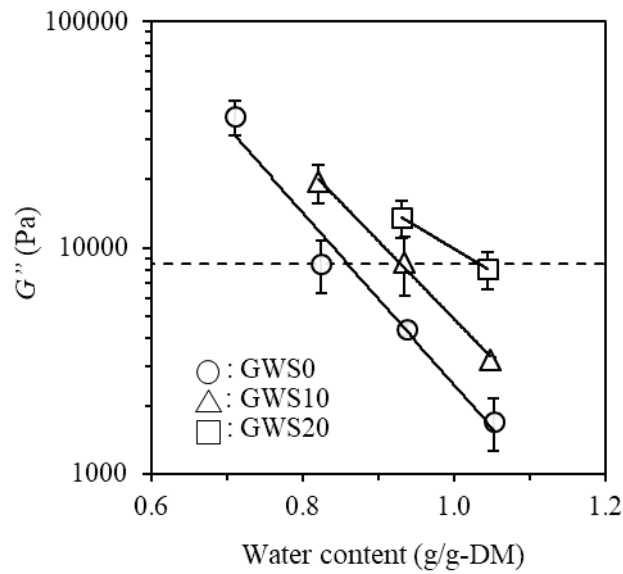


Fig. 3-3. Effect of water content on  $G''$  of model dough. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). The horizontal dashed line is the  $G''$  of the basic model dough (GWS0, Water 60g).

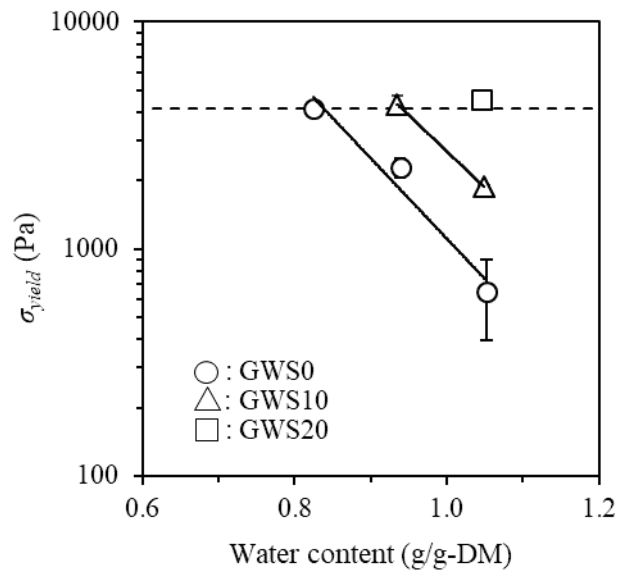


Fig. 3-4. Effect of water content on  $\sigma_{yield}$  of model dough. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). The horizontal dashed line is the  $\sigma_{yield}$  of the basic model dough (GWS0, Water 60g).

## ピッツァ生地のレオロジー特性

ピッツァ生地には小麦粉と水に加えて、副材料（砂糖、食塩、オリーブオイル、ドライイースト）が配合される。また、発酵過程においてドライイーストは炭酸ガスを発生する。これらの因子はレオロジー特性に影響を及ぼすと考えられる。ここでは通常のピッツァ生地（従来生地）と先述のモデル生地（水分含量 1.04g/g-DM の GWS20）をベースにしたピッツァ生地（改質生地）とでレオロジー特性（ $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$ ）を比較した。また、副材料や炭酸ガスの影響を検討するため、同じ小麦粉-水分組成条件にあるモデル生地（水分含量 0.82 g/g-DM の GWS0 および水分含量 1.04 g/g-DM の GWS20）の結果と比較した。

各試料の  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  を Fig. 3-5、Fig. 3-6、Fig. 3-7 にそれぞれ示す。従来ピッツァ生地と GWS0 との間に各種パラメーターの有意差は無かった。一方、改質生地は GWS20 よりも若干低い  $G'$  および  $\sigma_{\text{yield}}$  を示した。これらの結果は、糊化澱粉を配合したピッツァ生地のレオロジー特性は、副材料や炭酸ガスに対して敏感であることを示唆する。ピッツァ生地において小麦タンパク（グリアジンおよびグルテニン）はグルテンネットワークを形成し、イーストの発酵によって発生した炭酸ガスが捕捉されていると考えられる。このガスセル構造は生地の粘弾性にも影響を与えることが知られている（Upadhyay et al., 2012）。小麦粉の 20% を小麦澱粉に置き換えることで、小麦タンパク質の含有量はピッツァ生地あたり 2.2% 程度減少する。グルテンの減少によってグルテンネットワークは緩くなり、ガスセルサイズが大きくなったことが、改質生地の  $G'$  および  $\sigma_{\text{yield}}$  がモデル生地よりも低くなった要因であると推察される。

モデル生地での結果から期待される通り、従来生地と改質生地との間に各種パラメーターの有意差は無かった。ピッツァ生地中の小麦澱粉の一部を予め糊化させておくことで、水分含量を増加させても、レオロジー特性を維持可能なことが確認された。

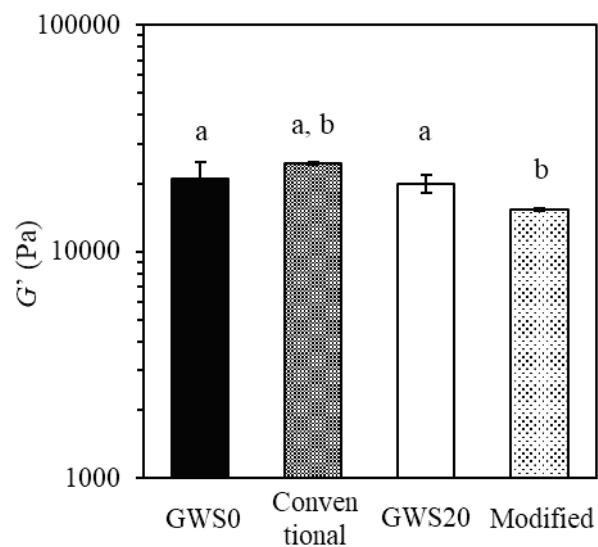


Fig. 3-5. Storage modulus ( $G'$ ) of conventional and modified pizza doughs and model doughs.

The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .



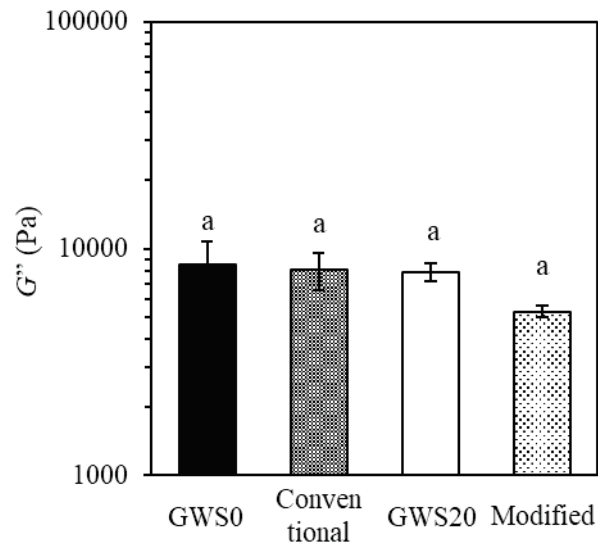


Fig. 3-6. Loss modulus ( $G''$ ) of conventional and modified pizza doughs and model doughs. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

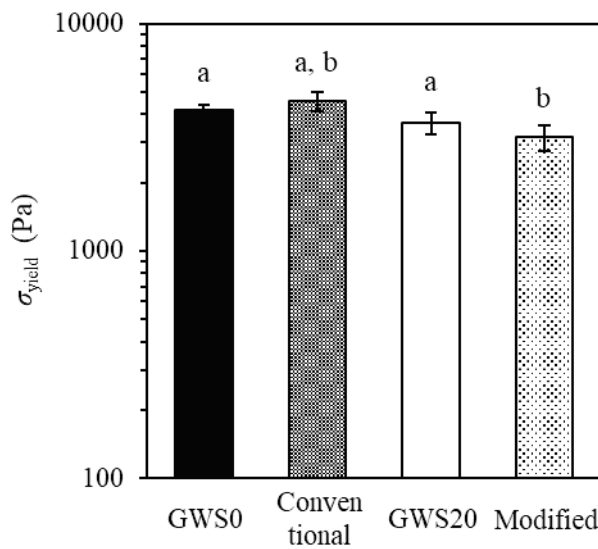


Fig. 3-7. Yield stress ( $\sigma_{\text{yield}}$ ) of conventional and modified pizza doughs and model doughs. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

### 3-4. 本章の総括

本章では糊化澱粉による加水がモデル生地（小麦粉-水）およびピッツァ生地のレオロジー特性（ $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$ ）に及ぼす影響を明らかにした。モデル生地において、各試料の  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  は、水分含量の増加と共に対数スケールで直線的に低下したが、小麦粉の一部を GWS に置き換えたことで、それらの値はシフトアップした。ピッツァ生地において、従来生地とモデル生地との間に  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  の有意差はなかったが、改質生地の  $G'$  および  $\sigma_{\text{yield}}$  はモデル生地よりも低かった。糊化澱粉を配合することで従来生地よりもグルテン含量が低下し、酵母発酵によるガスセルが大きくなったことが要因と考えられる。一方、従来生地と改質生地との間に  $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$  の有意差は認められなかった。小麦粉の一部を GWS に置換することで、配合する水分量を増加させてもレオロジー特性を維持できることが確認された。

## 第4章 糊化小麦澱粉を用いた加水がピッツァクラストの食感に及ぼす影響

### 4-1. 本章の目的

前章において、小麦粉の一部を GWS に置換することで、レオロジー特性を維持しつつ、水分含量を高めたピッツァ生地（改質生地）を調製できることが明らかになった。本章では、この改質生地を用いてクラスト生地を調製し、家庭用の電気式オーブンをを用いて焼成したときに得られるピッツァクラストの構造、水分含量、食感を調べ、従来のピッツァクラストと比較した。

### 4-2. 実験方法

#### クラスト試料の調製

前章と同様に従来および改質生地を調製した。この生地を用いて前述の手順 (2-2) にしたがって、クラスト生地を調製した。クラスト生地は、家庭用の電気式オーブン（NB-DT50；パナソニック株式会社）を用いて焼成した。クラスト生地をアルミニウム板に置き、220°Cで5分予熱したオーブンで6分間焼成した。

#### 水分含量

クラストをオーブンから取り出し、直ちにクラストの縁を円形（直径 30mm）に切り取った。更に、切り取った縁をナイフで上層、内部、下層の3つに分割した（Fig. 4-1）。試料調製中の水分蒸発を極力防ぐため、各試料採取後は直ちにジッパー付きポリ袋に入

れて密閉し、常温まで冷ました。常圧乾燥法（105℃、24 時間乾燥）により、クラストの各部位の水分含量を測定した。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

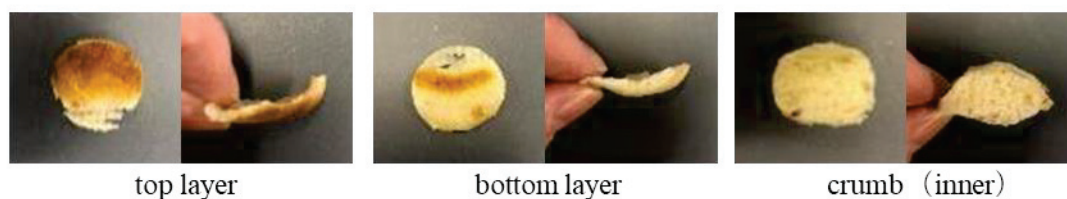


Fig. 4-1. Images of each part obtained from pizza crust.

#### 見掛けの密度

ピッツァクラストを常温まで冷却し、超音波カッターを用いて半円状に成型し、重量並びに体積を測定した。体積測定には 3D スキャナ（MFS1V2 3D SCANNER ; Matter and Form, Inc, Toronto, ON, Canada）を用いた。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### テクスチャー測定

焼成直後のピッツァクラストをインキュベーター（60℃）内で 8~11 分保持した後、テクスチャー測定に使用した。この保持過程における通常ピッツァクラストの水分含量は 8 分保持後で  $0.48 \pm 0.01$  g/g-DM、11 分保持後で  $0.48 \pm 0.02$  g/g-DM であり、保持期間内での水分変化は無いことを確認した。ピッツァクラストの縁をナイフでカットし、イ

ンキュベーター内でクラム部分を立方体（約 10~15mm 角）に成形した。サンプルの大きさはノギスを用いて測定した。保温シールドに覆われたステージに試料をセットし、デジタルフォースレコーダー（ZTA-100N；今田製作所）とシリンダーシステム（日新精器株式会社）を備えたレオメーターを用いて、平板プランジャー（直径 30mm）を用いて 60°C の環境で、速度 100mm/min で圧縮した。得られた荷重-変位曲線から、歪み 0.25 と 0.70 における見かけの圧縮応力を評価した。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 官能評価

22~29 歳（平均年齢 23.1±2.4 歳）の男性 4 名、女性 6 名による計 10 名のパネルにより、従来ピッツァクラストと改質ピッツァクラストの官能評価を行った。試料調製後 5 分以内にパネルに提供し、試料の硬さとクラムの粘着性を、-2（硬い、粘着性がない）~+2（柔らかい、粘着性がある）の尺度で評価した。評価指標はパンの官能評価に関する文献に準じた（Callejo et al., 2011）。

### 4-3. 結果および考察

#### クラストの見かけ密度と水分含量

クラストの 3D スキャン画像と見かけの密度を Fig. 4-2-a および b にそれぞれ示す。前章において、糊化澱粉添加により改質生地ではガスセルサイズが大きくなると推察した。しかし、従来クラストおよび改質クラストの見掛け密度はそれぞれ  $0.44 \pm 0.22 \text{g/cm}^3$

および  $0.43 \pm 0.02 \text{g/cm}^3$  であり、有意差は認められなかった。これは、焼成初期にクラスト表面が硬くなり、内部でのガスセル膨化による体積増加が妨げられたためと考えられる。

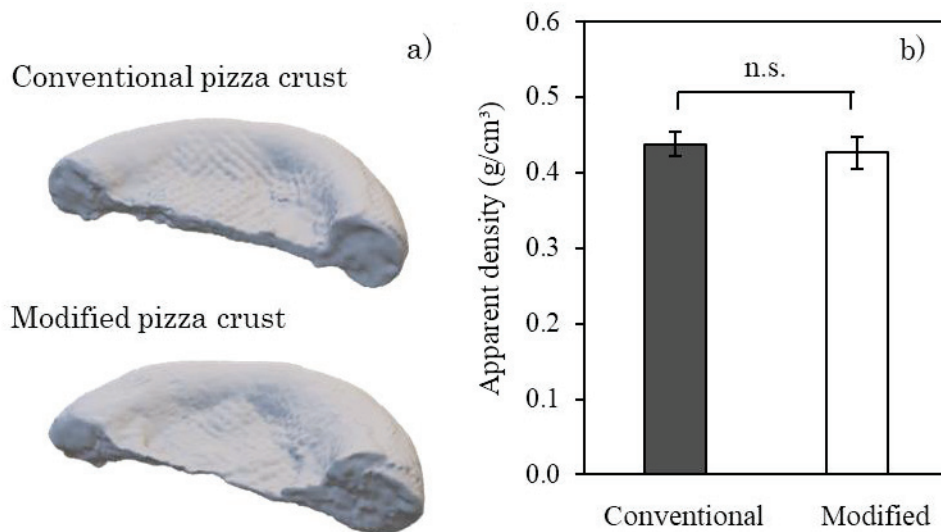


Fig. 4-2. 3D scan image and apparent density of conventional and modified pizza crust samples.

The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). n.s.: no significant difference.

各クラストの様々な部位での水分含量を Fig. 4-3 に示す。比較のため、Fig. 4-3 には生地的水分含量も示した。従来クラストと改質クラストとの間で、上層および下層の水分含量に有意差は無かった。一方、内部の水分含量は、改質クラストの方が有意に高かった。注目すべき点は、クラスト内部の水分含量は各生地水分含量と同等であったことである。焼成初期において、クラストの表面では乾燥が進行した層が形成される。この乾燥層が内部からの水分蒸発を抑制するため (Purlis et al., 2009)、クラスト内部には生

地の段階での水分含量が保持されると考えられる。以上の結果より、生地水分含量を増加させることは、クラスト内部の水分含量を増加させることに直結することが示された。

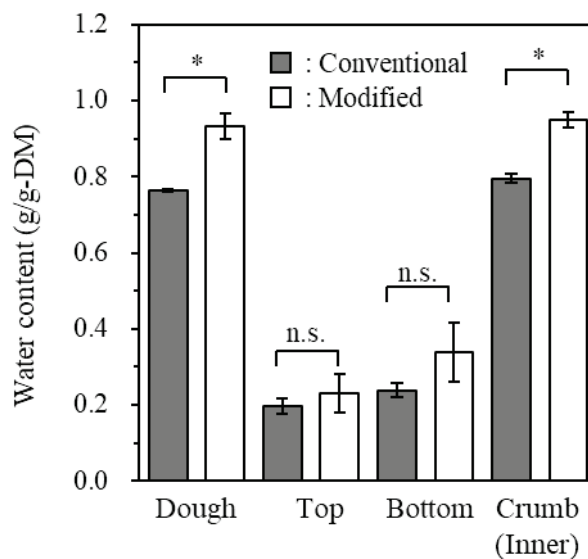


Fig. 4-3. Water content of conventional and modified pizza doughs and crust samples. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). \*: significant difference, n.s.: no significant difference.

#### クラストのテクスチャー

従来クラストの見かけ応力-歪み曲線を Fig. 4-4 に示す。低歪み領域において、見かけ応力は歪みの増加に応じて直線的に増加する挙動を示した。これは弾性変形に相当する。ピッツァクラストはパンと同様のガスセル構造を有している (Majzoobi et al., 2016)。このガスセル構造は弾性が低く、低歪み領域にて可逆的に圧縮される。歪みが高くなるにしたがい、見かけ応力は著しく増加した。これは試料の圧密化によるものと考えられる。

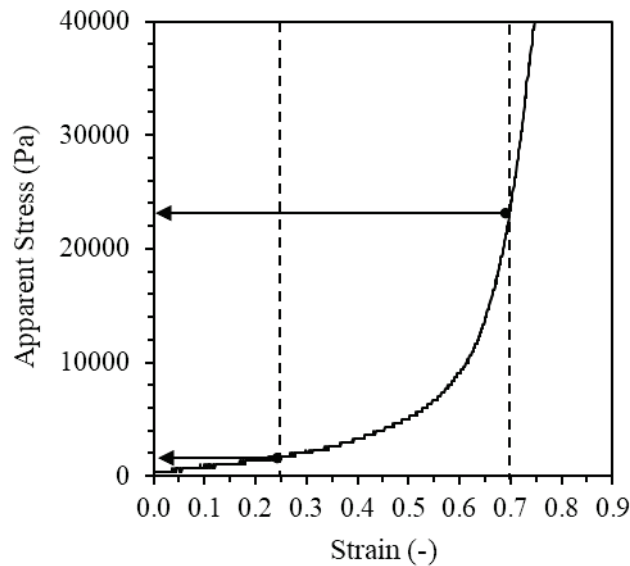


Fig. 4-4. Typical apparent stress-strain curve of conventional pizza crust sample.

パン類や麺類での食感解析にしたがい、歪み 0.25 と 0.70 での見かけ応力を評価した。第 2 章第 5 節で述べた通り、歪み 0.25 での見かけ応力が低いことは柔らかい（ふっくらしている）ことと、歪み 0.70 での見かけ応力が低いことは付着性が強い（もっちりしている）ことと関連付けられる。従来および改質クラストの各歪みでの見かけ応力を Fig. 4-5 に示す。両者の間において、歪み 0.25 での見かけ応力に有意差は認められなかった。低歪みでは内部のガスセル構造による見かけ応力が支配的に反映した結果、水分含量の増加による効果が捉えられなかったと考えられる。一方、歪み 0.70 における見かけ応力は、改質クラストの方が有意に低いことが示された。クラスト内部の水分含量が増加したことで、もっちり感が高まったと考えられる。



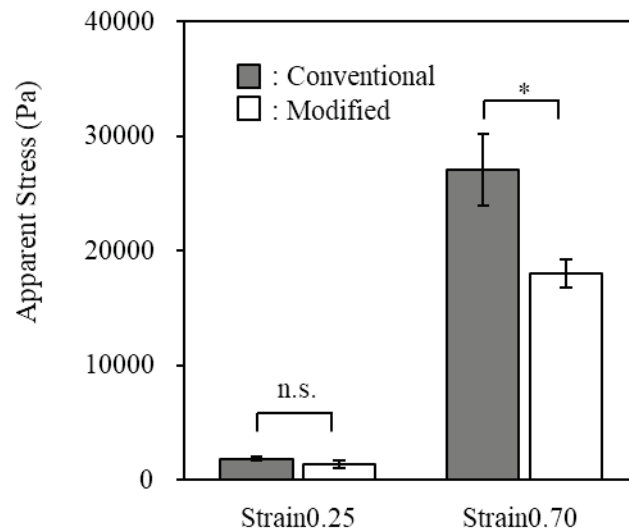


Fig. 4-5. Apparent compressive stress at constant strain of conventional and modified crust samples. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). \*: significant difference, n.s.: no significant difference.

各クラストの官能評価結果を Fig. 4-6 に示す。従来クラストと比較して、改質クラストは柔らかく、クラムの粘着性（もっちり感）も高いことが示された。低歪みでの見かけ応力に有意差は認められなかったが、官能評価では有意な差として改質クラストの方が柔らかいことが示された。低歪みでの見かけ応力はいずれの試料も値が低かったため、相違を捉えるには、圧縮面積を大きくする、感度の高いロードセルを用いる、或いはクリープ測定など他のレオロジー測定を用いるなどが有効な手立てと考えられる (Njintang et al., 2007)。

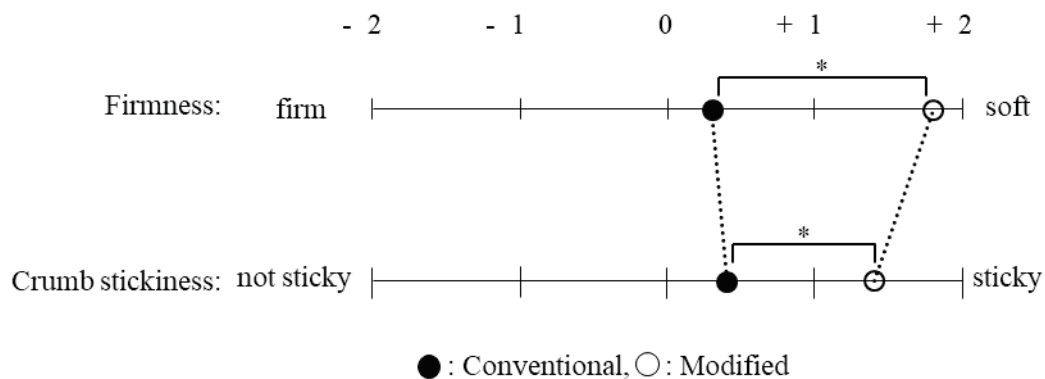


Fig. 4-6. Sensory evaluation score of conventional and modified crust samples. The values are in the range between -2 (firm or not sticky) and +2 (soft or sticky). The values are expressed as the mean ( $n = 10$ ). \*: significant difference.

#### 4-4. 本章の総括

本章では、改質生地（小麦粉の20%をGWSに置換して、レオロジー特性を維持しつつ、水分含量を高めた生地）を用いてクラスト生地を調製し、電気式オーブンによる焼成によってクラストを調製した。従来クラストと比較して、改質クラストの見かけ密度に有意差は無かった。また、上層および下層の水分含量にも有意差は無かったが、内部の水分含量は改質生地の方が有意に高いことが明らかになった。一方、レオメーターを用いたテクスチャー測定において、改質クラストは高歪みでの応力が有意に低いことが分かった。また、官能評価によって、改質クラストは従来クラストよりも有意に柔らかく、もっちりした食感にあることが示された。これは、クラスト内部の水分含量が増加したことによる効果であり、電気式オーブンをを用いた焼成においても柔らかく、もっちりした食感にクラストを仕上げるのが可能であったと結論付けられる。

## 第5章 予備焼成および再水和によるクラストの改質と本焼成クラストの食感改善

### 5-1. 本章の目的

一部のフードチェーンや家庭用の食品では、クラスト生地を予め軽く焼成することでチルド流通および保管を可能にした、予備焼成クラストが利用されている。しかし、予備焼成クラストには、積載流通・保管によってクラスト生地の構造が潰れることや、本焼成後に食感が硬くなることなどが問題視されている。これらの問題を改善するには、予備焼成の段階で水分含量を一定水準にまで引き下げておきながら、本焼成の前では再水和処理を施すことが重要と考えられる。本章では、予備焼成がクラストの水分含量、 $a_w$ 、初期弾性率、積載耐性に及ぼす影響と、予備焼成クラストへの再水和処理が本焼成クラストの水分含量および食感に及ぼす影響について検討した。

### 5-2. 実験方法

#### 材料

強力小麦粉（日清製粉グループ本社）、上白糖（三井製糖株式会社）、食塩（伯方の塩株式会社）、オリーブオイル（日清オイリオグループ株式会社）、ドライイースト（日清製粉グループ本社）を購入した。

#### 予備焼成クラストの調製

クラスト生地の調製は前章にしたがった。クラスト生地をアルミニウム板の上に置き、

強制対流式オーブン（OFW-300；株式会社アズワン）を用いて、200℃で5、15、20分間予備焼成を行った。室温で30分間冷却し、次の実験に使用した。

#### 予備焼成クラストの水分含量

予備焼成クラストの水分含量は次式（式 5-1）を用いて算出した。

$$WC_c = (W_w - W_{id} + W_c) / (W_{id} - W_w) \quad (\text{式 5-1})$$

ここで、 $WC_c$ （water content for crust dough）は予備焼成クラストの水分含量（g/g-DM）、 $W_w$ （weight of water）は生地中の水分含量（g）、 $W_{id}$ （weight of initial dough）は生地の初期重量（g）、 $W_c$ （weight of crust dough）は予備焼成後のクラスト重量（g）をそれぞれ表す。 $W_w$ は、生地の初期水分含量と $W_{id}$ から算出した。生地の初期水分含量は予め常圧乾燥法（105℃で24時間乾燥）によって $0.74 \pm 0.01$  g/g-DMと決定した。比較のために、従来クラスト（220℃、6分間焼成）の水分含量も測定した。測定は各試料3回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 予備焼成クラストの水分活性

各試料の水分活性（ $a_w$ ）を $a_w$ センサー（HP23-AW；ロトロニック社）によって決定した。予備焼成クラスト試料の縁部分から一部（約2.0g）を切り取り、試料ホルダーにセットして、25℃で $a_w$ を評価した。比較のため、市販の予備焼成ピッツァクラストの水分含量も測定した。測定は各試料3回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 予備焼成クラストの初期弾性率

予備焼成クラストの硬さを表す物性値として初期弾性率を求めた。測定には自作のレオメーターを用いた (Fig. 2-7)。予備焼成クラスト試料の上に直径 150 mm のアルミニウム板を置き、0.5mm/sec で試料全体を圧縮した。この測定ではクラストの縁部分が優先的に圧縮される。プランジャーと縁部分の接触面積は、デジタルノギスで測定した外径と内径から、クラスト試料が完全な円形であることを仮定して算出した。縁の高さは、レオメーターを用いて、1N 圧縮時のクラスト試料上部から底部までの距離とした。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 予備焼成クラストの積載耐性

予備焼成クラスト試料をジッパー付きポリ袋 (ジップロック ; 旭化成株式会社) に入れ、測定中の吸水および脱水を防いだ。5 分間予備焼成したクラスト 3 枚、7 枚、11 枚の積荷に相当する 3 段階のおもり (それぞれ 140g、330g、520g) を設定した。密閉した試料の上に直径 15cm の円形のアルミニウム板を置き、その上におもりをのせ、5°C のインキュベーターで 24 時間保存した。積載負荷前後の試料の高さを自作レオメーター (Fig. 2-7) で測定し、次式 (式 5-2) によって変形率 (%) を算出した。

$$\text{変形率} = (H_i - H_s) / (H_i - H_{\min}) \times 100 \quad (\text{式 5-2})$$

ここで  $H_i$  (initial height) は負荷前の高さ、 $H_s$  (height of sample) は負荷後の高さ、 $H_{\min}$  (minimum height) は最大圧縮時の高さをそれぞれ示す。 $H_{\min}$  は 5 分間予備焼成したクラスト試料を 800 N (使用したレオメーターの最大荷重) で圧縮したときの高さ (4.90

mm) とした。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 予備焼成クラストの再水和および本焼成

後述の実験結果を踏まえて、予備焼成クラストの焼成条件は 200°C、15 分とした。この予備焼成クラスト試料をジッパー付きのポリ袋（ジップロック；旭化成株式会社）に入れ、予備焼成の段階で失われた水分と同量の水道水（ $9.0 \pm 0.1 \text{g}$ ）を噴霧した後、密閉した状態で 60°C のインキュベーター内で 1 時間保持した。前章と同様にクラスト試料をアルミニウム板に乗せ、コンパクトオーブン（NB-DT50；パナソニック株式会社）を用いて 220°C で 6 分間、本焼成を実施した。

#### クラストのテクスチャー測定

自作レオメーター（Fig. 2-7）を用いて食感を評価した。直径 150 mm のアルミニウム板を焼成直後のクラスト試料の上に置き、100mm/min で圧縮した。荷重-変位曲線より、1N で圧縮したときの試料厚さを基準として歪み 0.25 および 0.70 での荷重を評価した。測定は各試料 3 回ずつ行い、平均値±標準偏差を求めた。

#### 本焼成クラストの官能評価

本焼成クラストに対する再水和処理の効果を官能評価した。パネリストは、男性 4 名、女性 2 名、年齢は 22~25 歳（平均年齢  $23.8 \pm 1.2$  歳）であった。試料は調製後 5 分以内に供され、試料の柔らかさについて、1（硬い）~5（柔らかい）の尺度で評価を行った。

統計解析

Microsoft Excel および R 4.0.2 for Windows を用い、t 検定および Tukey-Kramer 検定 ( $p < 0.05$ ) を実施した。

### 5-3. 結果および考察

予備焼成クラストの物性

予備焼成 (200°C、15 分) クラスト試料の応力-歪み曲線の一部を Fig. 5-1 に示す。圧縮の初期において、予備焼成クラストの応力は歪みに対して直線的に増加した。これは可逆的な弾性変形によるものであり、その傾きから初期弾性率を決定した。

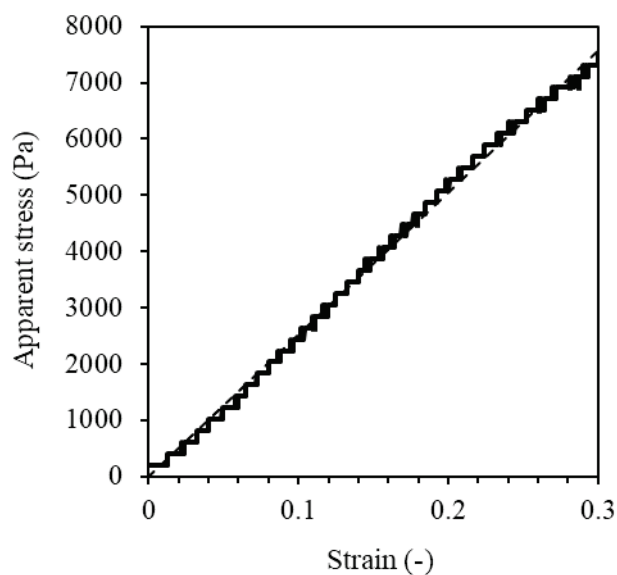


Fig. 5-1. Typical apparent stress-strain curve of pre-baked pizza crust samples (200 °C, 15min).

Dashed line is an approximate line.

予備焼成クラスト試料の初期弾性率と水分含量との関係を Fig. 5-2 に示す。予備焼成時間の増加と共に水分含量は低下し、初期弾性率は高くなった。予備焼成 5 分と 15 分との間に初期弾性率の有意な差は無かったが、予備焼成 20 分では有意に高い初期弾性率を示した。

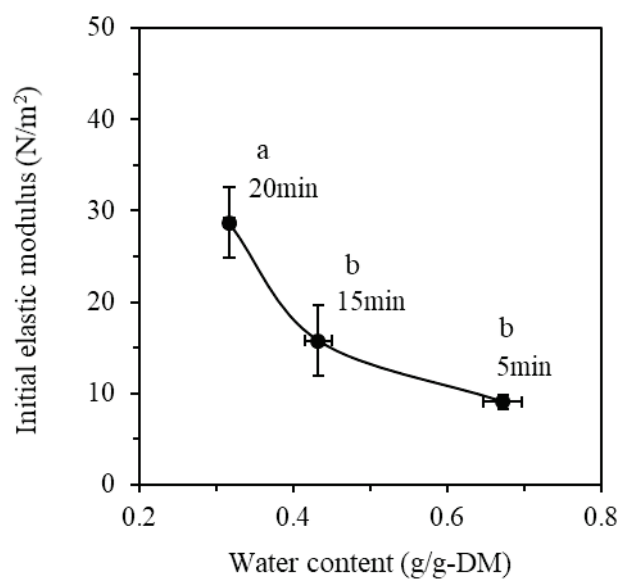


Fig. 5-2. Relationship between water content and initial elasticity for pre-baked pizza crust samples. The values are mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

負荷重量が予備焼成クラスト試料の変形率に及ぼす影響を Fig. 5-3 に示す。負荷重量の増加と共に変形率は直線的に増加した。その増加傾向（図中に示す直線の傾き）は予備焼成時間の増加によって低下した。各負荷重量において試料間の変形率に有意差は無かったが、予備焼成 15 分および 20 分は 5 分よりも変形率が低い傾向があった。本研究



で採用した負荷重量は 5 分間予備焼成したクラストの重量に基づいて設定したものであった。予備焼成を行うことで水分含量が低下することから、実際の積載重量も低下する。例えば、ピッツァクラスト 11 枚の積荷に相当する重量は、15 分の予備焼成によって、520g から 447g に減少する。このとき Fig. 5-3 から推定される変形率は 12.2% から 10.5% へと減少する。

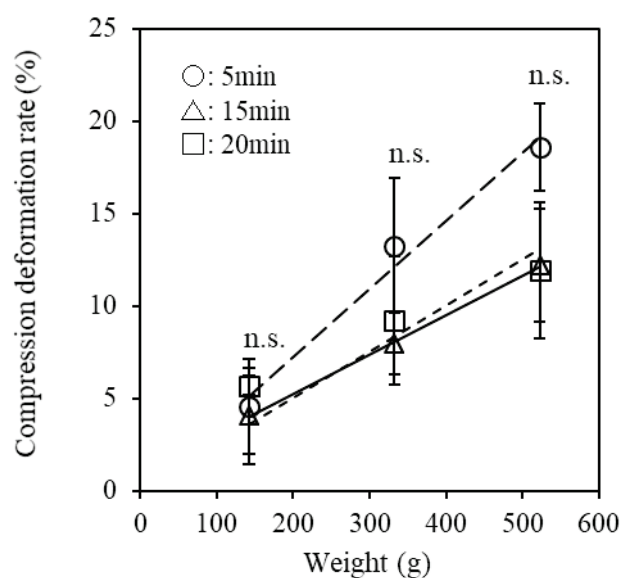


Fig. 5-3. Effect of loading weight on the deformation ratio of pre-baked pizza crust samples. The values are mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). n.s.: no significant difference.

予備焼成を 15 分間行ったクラスト試料に対して 520g の負荷を与えた前後での断面写真を Fig. 5-4 に示す。ピッツァクラストの縁は丸みを帯びているため、荷重負荷はそのトップ部分に集中する。そのため、荷重負荷後には上部が平らになったと考えられる。予備焼成ピッツァクラスト試料の変形率 (Fig. 5-3) は、この縁の平坦化によるものとい

える。一方、断面写真から判定する限り、クラスト内部の多孔質構造は荷重負荷後も十分に維持されていたと見受けられる。パン類の食感は内部の多孔質構造によって大きく影響するため (Mandala et al., 2005)、本研究で求めた変形率の増加が必ずしも食感の悪化に反映するとは限らない。

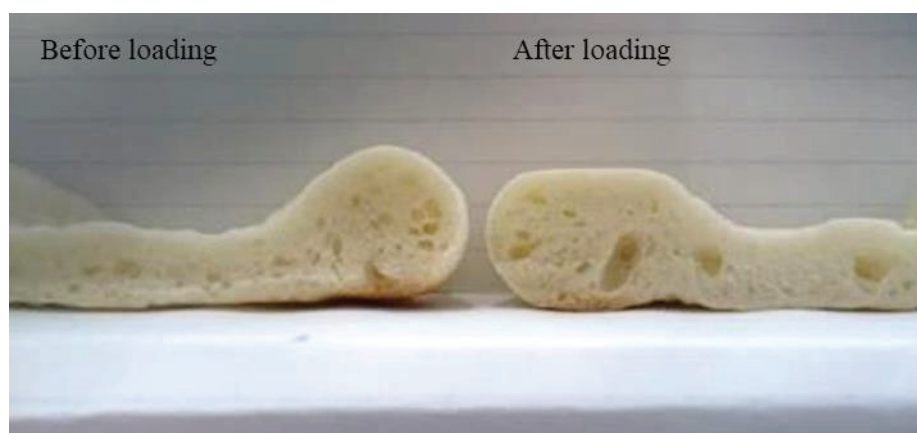


Fig. 5-4. Cross-sectional images of pre-baked pizza crust samples (200 °C, 15min) before and after loading.

予備焼成時間がクラスト試料の  $a_w$  に及ぼす影響を Fig. 5-5 に示す。図中の点線は市販ピッツァクラストの  $a_w$  を示す。予備焼成時間の増加に伴い水分含量が低下するため、 $a_w$  も低くなる。予備焼成 15 分および 20 分のクラストは予備焼成 0 分および 5 分のものより有意に  $a_w$  が低下した。食品保存における  $a_w$  概念によると (Labuza, 1977; Rahman, 2007; Rahman, 2009)、 $a_w$  0.95 以下において腐敗微生物である *Pseudomonas* や *Bacillus*、一部の酵母の生育が抑制される。この  $a_w$  近傍の食品として、生鮮食品、牛乳、パンなどがあげられている。市販の予備焼成ピッツァクラストの  $a_w$  は  $0.96 \pm 0.01$  であり、予

備焼成 5 分の結果 ( $a_w 0.96 \pm 0.01$ ) と同程度であった。Li らは、 $a_w 0.90$  の生麺を  $37^\circ\text{C}$  で貯蔵した結果、16 日後に総生菌数が初期腐敗レベルに相当する  $10^6 \text{CFU/g}$  以上となることを報告している (Li et al., 2011)。フードチェーンにおいて 16 日間という日数は、予備焼成クラストを流通・保管するのに十分な期間といえる。したがって、予備焼成 15 分以上のクラスト ( $a_w 0.88 \pm 0.01 \sim 0.91 \pm 0.00$ ) は常温での流通・保管の可能性を示しているといえる。

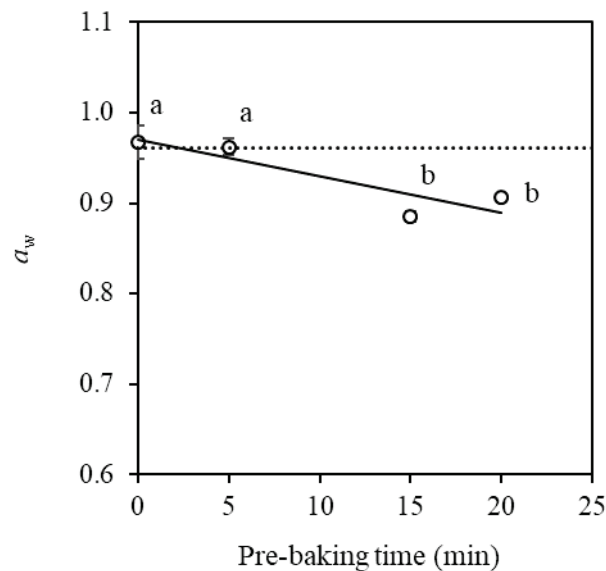


Fig. 5-5. Effect of the pre-baking time on the  $a_w$  of pizza crust samples. The values are mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

#### 再水和による本焼成クラストの水分含量変化

上述の結果から総合的に判断し、これ以後の予備焼成条件は  $200^\circ\text{C}$ 、15 分に設定した。このとき予備焼成クラストの水分含量は  $0.48 \pm 0.01 \text{g/g-DM}$  であった。この予備焼成ク

ラストに対して、再水和処理による本焼成クラストの水分含量や食感への影響について検討を続けた。本研究では再水和処理を 60°C で実施した。温度を上昇させることで予備焼成クラスト内部への水の拡散が促進されると期待されるためである (Fava et al., 1999)。また、予備焼成後やその後の保管過程において、糊化澱粉の老化 (非晶質澱粉の再結晶化) が起こる可能性は否定できない。仮に澱粉が老化した場合でも、再水和処理過程で再糊化するため、もちりとした食感を付与できると期待される (Vittadini et al., 1996; Kawai et al., 2007)。

再水和による本焼成クラスト試料の水分含量変化を Fig. 5-6 に示す。参考のため、図中には通常のクラスト (予備焼成なし) の水分含量も示した。クラスト生地水分含量は  $0.74 \pm 0.01$  g/g-DM であり、通常の焼成によって  $0.55 \pm 0.01$  g/g-DM まで低下した。これに対し、予備焼成クラストの水分含量は既に  $0.48 \pm 0.01$  g/g-DM まで低下しており、本焼成によって更に  $0.30 \pm 0.02$  g/g-DM まで低下した。これは明らかなオーバークッキングに該当する。一方、再水和処理を実施することで予備焼成クラストの水分含量は  $0.72 \pm 0.01$  g/g-DM まで増加し、本焼成によって  $0.43 \pm 0.00$  g/g-DM まで低下した。予備焼成クラストは再水和によってクラスト生地と同水準まで水分含量を戻したが、本焼成後の水分含量は通常のクラストよりも若干低かった。再水和処理によるピッツァクラストへの吸水は表面から内部に向かって徐々に起こるため (Thorvaldsson et al., 1998)、水分蒸発しやすい表面での水分含量が高い状態にあったためと考えられる。これは、再水和処理して本焼成する前に、クラスト表面に油脂を塗るなど、保水効果を高めることで、改善できる可能性がある。

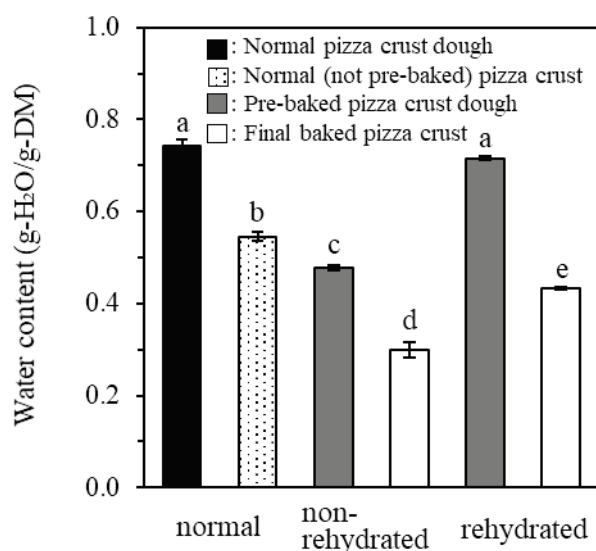


Fig. 5-6. Water content of normal and final baked pizza crust samples with and without rehydration. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). Values with different letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

#### 再水和および本焼成ピッツァクラストのテクスチャー

全体圧縮したクラスト試料（再水和処理後本焼成クラスト）の荷重-歪み曲線を Fig. 5-7 に示す。試料を全体圧縮することで部位によるデータのバラツキが抑えられること、一定歪みを与えるために必要な荷重が高くなるため、見かけ上の測定精度を高められることなどのメリットがある。先述の通り、クラストの縁は丸みを帯びており、圧縮に応じて変形するため、プランジャーと試料との接触面積を決めることは困難であった。そのため本章では応力ではなく荷重で評価することにした。

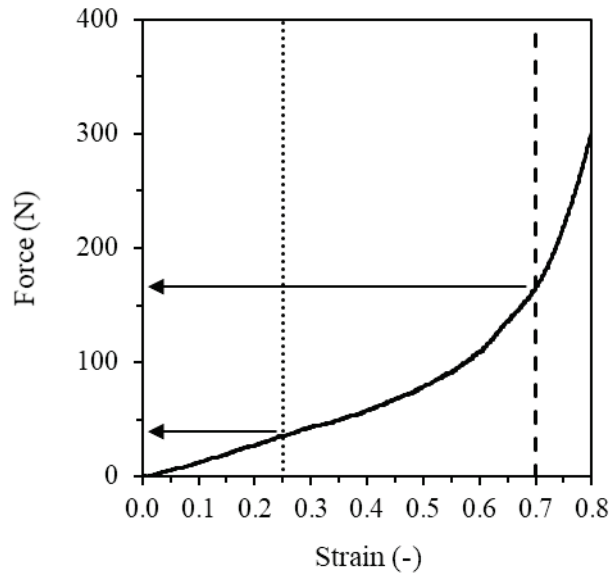


Fig. 5-7. Typical force-strain curve of whole compressed pizza crust sample (rehydrated and final baked sample).

再水和処理が本焼成クラスト試料の各歪みでの圧縮荷重に及ぼす影響を Fig. 5-8 に示す。再水和処理によって本焼成クラストの歪み 0.70 での荷重は有意に低くなることが明らかとなった。これは、再水和処理によってクラストの水分含量が増加したためと考えられる (Baik et al., 2000)。前章の結果を踏まえると、再水和処理によって“もっちり感”が向上したことを示唆する結果といえる。一方、歪み 0.25 での荷重においては両者間で有意差は認められなかった。先述の通り、クラストの縁は丸みを帯びており、低歪みでの圧縮によって平滑化するため、クラスト自体の力学的性質が反映し難かったと考えられる。

低歪みでの荷重は柔らかさに対応すると考えられるため、柔らかさに関しては官能評価を実施した。再水和処理が本焼成クラストの柔らかさに及ぼす官能評価結果を Fig. 5-9 に示す。再水和処理によって本焼成後クラストは有意に柔らかいと認知されることが確認された。

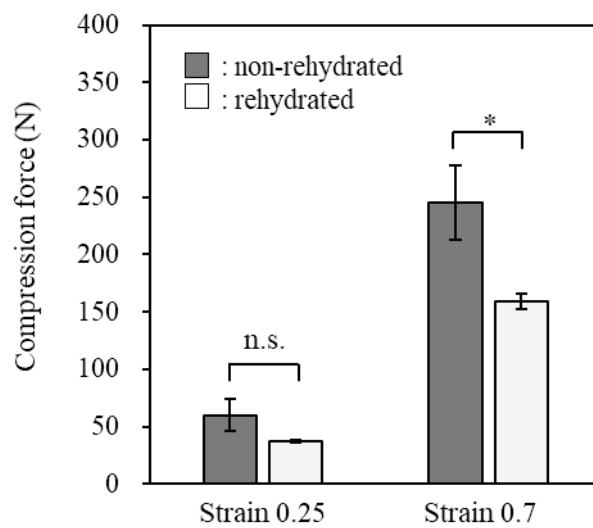


Fig. 5-8. Effect of rehydration on compression force of final baked pizza crust at each strain. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). \*: significant difference, n.s.: no significant difference.

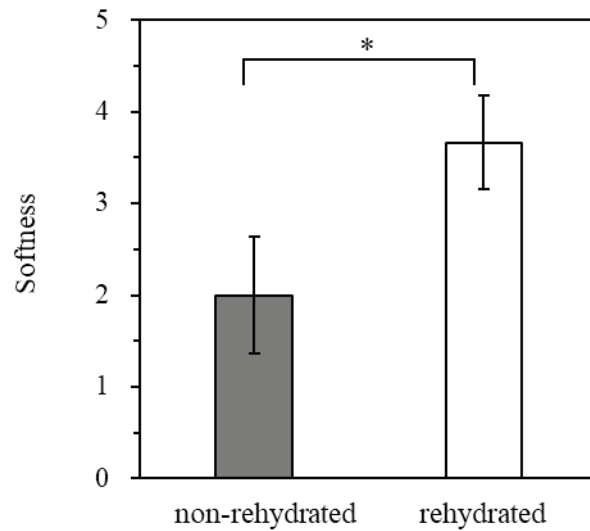


Fig. 5-9. Effect of rehydration on sensory score (softness) of final baked pizza crust sample. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD ( $n = 3$ ). \*: significant difference.

#### 5-4. 本章の総括

本章では、予備焼成がクラスト生地的水分含量、 $a_w$ 、初期弾性率、積載耐性に及ぼす影響と、予備焼成クラストへの再水和処理が本焼成クラスト的水分含量および食感に及ぼす影響について検討した。予備焼成時間の増加によって水分含量および  $a_w$  は低下し、初期弾性率および積載耐性は増加する傾向にあった。以上の結果を総合的に判定し、最適な予備焼成条件（200°C、15分）を決定した。このとき予備焼成クラスト的水分含量は  $0.48 \pm 0.01 \text{g/g-DM}$  であった。予備焼成クラストを本焼成すると、通常のクラストと比較して、水分含量が著しく低くなった。しかし、本焼成前に再水和処理を施すことで、通常のクラストに近い値まで水分含量を増加させることができた。また、レオメーター



および官能評価によって、再水和処理によって本焼成クラストの柔らかさと高歪みでの荷重（もちり感を反映）は有意に向上することが示された。これは、再水和処理によってクラストの水分含量が高くなったことに起因するものと考えられる。

## 第6章 総括

本場のピッツェリアで提供されるピッツァは、石窯を用いた高温短時間焼成によって柔らかく、もちりとした食感のピッツァクラスト(コルニチョーネ)に仕上げられる。一方、フードチェーンなどで一般に使用される電気式オーブンでは必然的に低温長時間焼成となり、本場のクラストと比べると、食感が硬くなる。また、一部のフードチェーンでは工場で作成したクラストを各店舗にチルド輸送することで、店舗での調理時間の短縮化とコストの削減を図っている。しかし、予備焼成クラストを店舗で再度焼成することで、クラストの食感は非常に硬くなる。ピッツァは世界中で食される伝統的な料理であり、学術的な研究も報告されているが、上記の様なイレギュラーな調理によって生じる課題に取り組んだ研究報告はこれまでになかった。ピッツァクラストに関する一連の課題は、それぞれの状況に合わせた最適な水分制御によって改善できると期待される。本研究の目的は、1. 糊化澱粉を用いた加水がクラスト生地のレオロジー特性およびクラストの食感に及ぼす影響、2. 予備焼成による乾燥がクラストの物性に及ぼす影響と、本焼成前の再水和が2段階焼成クラストの食感に及ぼす影響を明らかにすることであった。

第3章では糊化澱粉による加水がモデル生地(小麦粉-水)およびピッツァ生地のレオロジー特性( $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$ )に及ぼす影響を明らかにした。モデル生地において、各試料の $G'$ 、 $G''$ 、 $\sigma_{\text{yield}}$ は、水分含量の増加と共に対数スケールで直線的に低下したが、小麦粉の一部をGWSに置き換えたことで、それらの値はシフトアップした。即ち、小

麦粉の一部を GWS に置換することで、配合する水分量を増加させてもレオロジー特性を維持できることが確認された。同様の結果は、実際にピッツァを焼成する際の生地においても認められた。この研究成果をフードチェーンなどで利用する場合、糊化澱粉の調製工程を設けることは非現実的なため、一部の食品素材メーカーが取り扱う乾燥糊化澱粉を使用することが望ましい。

第 4 章では第 3 章で導いた改質生地を用いてクラスト生地を調製し、電気式オーブンによる焼成によってクラストを調製した。従来クラストと比較して、改質クラストの内部における水分含量が有意に高くなることが明らかになった。また、レオメーターを用いたテクスチャー測定において、改質クラストは従来クラストよりも高歪みでの応力が有意に低いこと、官能評価によって、改質クラストは従来クラストよりも有意に柔らかく、もっちりした食感であることが示された。これは、クラスト内部の水分含量が増加したことによる効果であり、電気式オーブンをを用いた焼成においても柔らかく、もっちりした食感にクラストを仕上げるのが可能であったと結論付けられる。本研究成果は焼成方法ではなく、材料を変更することで実現できるため、既にピッツァを販売しているフードチェーンなどでは実用化することも可能と考えられる。

第 5 章では、予備焼成がクラスト生地の水分含量、 $a_w$ 、初期弾性率、積載耐性に及ぼす影響と、予備焼成クラストへの再水和処理が本焼成クラストの水分含量および食感に及ぼす影響について検討した。予備焼成クラストの  $a_w$  から推定される保存性と積載耐性の結果から総合的に判定し、最適な予備焼成条件（200℃、15 分）を決定した。このとき予備焼成クラストの水分含量は  $0.48 \pm 0.01 \text{g/g-DM}$  であった。予備焼成クラストを

本焼成すると、通常のクラストと比較して、水分含量が著しく低下した。しかし、本焼成前に再水和処理を施すことで、通常のクラストに近い値まで水分含量を増加させることができた。また、レオメーターおよび官能評価によって、再水和処理によって本焼成クラストの柔らかさと高歪みでの荷重（もっちり感を反映）は有意に向上することが示された。これは、再水和処理によってクラストの水分含量が高くなったことに起因するものと考えられる。フードチェーンではオーダーを受けてから調理を終えるまでの時間を短縮することが求められている。したがって、店舗で予備焼成クラストに再水和処理を施すためには、予め予備焼成クラストをホットスチーマーなどで保管しておく必要がある。一方、フードチェーンでは常にコストを抑えることが求められている。したがって、ピッツァクラストの食感改善に伴う品質価値の上昇と再水和処理の導入に伴うコスト上昇とのバランスを見極める必要がある。再水和処理の効率化は本研究の次なる課題である。

以上、低温長時間焼成や2段階焼成といったイレギュラーな方法によって調理されたピッツァクラストの食感を、巧みな水分制御によって改善できることが示された。調理の基礎は温度と水の制御にある。近年の食品産業ではAI（Artificial Intelligence）やIOT（Internet of Things）を活用した先端テクノロジーの導入が注目されているが、それらと同時に、従来の調理を基礎から見直す動きもまた重要といえるだろう。

## 引用文献

- AACC. (2000b). AACC method 74-09: Bread firmness by universal testing machine. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, USA: AACC Inc.*
- Baik, M.Y., and Chinachoti, P. (2000). Moisture redistribution and phase transitions during bread staling. *Cereal Chem.*, 77(4), 484-488.
- Baker, R.C., and O'brien, S.W. (1983). The development of a precooked, frozen, egg-based pizza. *Poult. Sci.*, 62(4), 621–630.
- Callejo, M.J. (2011). Present situation on the descriptive sensory analysis of bread. *J. Sens. Stud.*, 26(4), 255-268.
- De Pilli, T. (2022). Application of fuzzy logic system for the pizza production processing optimisation. *J. Food Eng.*, 319, 110906.
- Fava, P., Piergiovanni, L., and Pagliarini, E. (1999). Design of a functional box for take-away pizza. *Packag. Technol. Sci.*, 12(2), 57-65.
- Fernandes, R.R., Suleiman, N., and Wilson, D.I. (2021). In-situ measurement of the critical stress of viscoplastic soil layers. *J. Food Eng.*, 303, 110568.
- Gao, J., Tay, S.L., Koh, A.H.S., and Zhou, W. (2018). Dough and bread making from high- and low- protein flours by vacuum mixing: Part 3. Oral processing of bread. *J. Cereal Science.*, 79, 408-417
- Jacobs, H., and Delcour, J.A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with

- retention of the granular structure: A review. *J. Agric. Food Chem.*, 46(8), 2895-2905.
- Kawai, K., Fukami, K., and Yamamoto, K. (2007). State diagram of potato starch – water mixtures treated with high hydrostatic pressure. *Carbohydr. Polym.*, 67(4), 530-535.
- Kilburn, D., Claude, J., Schweizer, T., Alam, A., and Ubbink, J. (2005). Carbohydrate polymers in amorphous states: an integrated thermodynamic and nanostructural investigation. *Biomacromolecules*, 6(2), 864-879.
- Kim, S., Kwak, H.S., and Jeong, Y. (2017). Effect of water roux starter (*tangzhong*) on texture and consumer acceptance of rice pan bread. *J. Texture Stud.*, 48(1), 39-46.
- Labuza, T.P. (1977). The properties of water in relationship to water binding in foods: a review. *J. Food Process. Preserv.*, 1(2), 167-190.
- Lagrain, B., Leman, P., Goesaert, H., and Delcour, J.A. (2008). Impact of thermostable amylases during bread making on wheat bread crumb structure and texture. *Food Res. Int.*, 41(8), 819-827.
- Li, M., Zhu, K., Guo, X., Peng, W., and Zhou, H. (2011). Effect of water activity ( $a_w$ ) and irradiation on the shelf-life of fresh noodles. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 12(4), 526-530.
- Majzoobi, M., Jalali, A.R., and Farahnaky, A. (2016). Impact of whole oat flour on dough properties and quality of fresh and stored part-baked bread. *J. Food Qual.*, 39(6), 620-626.
- Mandala, I.G. (2005). Physical properties of fresh and frozen stored, microwave-reheated breads, containing hydrocolloids. *J. Food Eng.*, 66(3), 291-300.

- Mandala, I.G., and Sotirakoglou, K. (2005). Effect of frozen storage and microwave reheating on some physical attributes of fresh bread containing hydrocolloids. *Food Hydrocoll.*, 19(4), 709-719.
- Moriya, Y., Hasome, Y., and Kawai, K. (2020). Effect of solid fat content on the viscoelasticity of margarine and impact on the rheological properties of cookie dough and fracture property of cookie at various temperature and water activity conditions. *J. Food Meas. Charact.*, 14(6), 2939-2946.
- Murakami, S., Kuramochi, M., Koda, T., Nishio, T., and Nishioka, A. (2016). Relationship between rice flour particle sizes and expansion ratio of pure rice bread. *J. Appl. Glycosci.*, 63(1), 19-22.
- Murakami, S., Ota, A., Nishio, T., Miyata, K., Koda, T., and Nishioka, A. (2015). Effect of strain hardening property on baking productivity of rice batter. *Nihon Reoroji Gakkaishi*, 43(5), 145-149.
- Njintang, Y.N., Mbofung, C.M.F., Moates, G.K., Parker, M.L., Craig, F., Smith, A.C., and Waldron, W.K. (2007). Functional properties of five varieties of taro flour, and relationship to creep recovery and sensory characteristics of achu (taro based paste). *J. Food Eng.*, 82(2), 114-120.
- Parenti, O., Guerrini, L., Canuti, V., Angeloni, G., Masella, P., and Zanoni, B. (2019). The effect of the addition of gelatinized flour on dough rheology and quality of bread made from brown wheat flour. *LWT.*, 106, 240-246.

- Purlis, E., and Salvadori, V.O. (2009). Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling. *J. Food Eng.*, 91(3), 428-433.
- Rahman, M.S. (2009). Food stability beyond water activity and glass transition: macro-micro region concept in the state diagram. *Int. J. Food Prop.*, 12(4), 726-740.
- Sciarini, L.S., Ribotta, P.D., León, A.E., and Pérez, G.T. (2012). Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *J. Food Eng.*, 111(4), 590-597.
- Shen, S., Chi, C., Zhang, Y., Li, L., Chen, L., and Li, X. (2021). New insights into how starch structure synergistically affects the starch digestibility, texture, and flavor quality of rice noodles. *Int. J. Biol. Macromol.*, 184, 731-738.
- Sumida, R., Kishishita, S., Yasuda, A., Miyata, M., Mizote, A., Yamamoto, T., Mitsuzumi, H., Aga, H., Yamamoto, K., and Kawai, K. (2021). A novel dextrin produced by the enzymatic reaction of 6- $\alpha$ -glucosyltransferase. II. Practical advantages of the novel dextrin as a food modifier. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 85(7), 1746-1752.
- Tester, R.F., Debon, S.J.J., and Sommerville, M.D. (2000). Annealing of maize starch. *Carbohydr. Polym.*, 42(3), 287-299.
- Thorvaldsson, K., and Skjöldebrand, C. (1998). Water diffusion in bread during baking. *LWT*, 31(7-8), 658-663.
- Upadhyay, R., Ghosal, D., and Mehra, A. (2012). Characterization of bread dough: rheological properties and microstructure. *J. Food Eng.*, 109(1), 104-113.



Vittadini, E., Chen, X.J., and Chinachoti, P. (1996). Thermomechanical changes during reheating pizza shells as related to heating method. *J. Food Sci.*, 61(5), 990-994.

Yamauchi, H., Yamada, D., Murayama, D., Santiago, D.M., Orikasa, Y., Koaze, H., Nakaura, Y., Inouchi, N., and Noda, T. (2014). The staling and texture of bread made using the yudane dough method. *Food Sci. Technol. Res.*, 20(5), 1071-1078.

Yunos, N.S.H.M., Omar, F.N., Hafid, H.S., Mohammed, M.A.P., Baharuddin, A.S., and Wakisaka, M. (2021). Experimental and numerical study of wheat and rice doughs. *J. Food Eng.*, 311, 110712.

Rahman. M.S. ed. Handbook of Food Preservation second edition, CRC Press, USA (2007) pp. 457-461.

パオロ・マーシ, アンナリーサ・ロマーノ, エンツォ・コッチャ 「ピッツァ・ナポレターナの美味しさの科学-伝統的な材料・職人技術を徹底詳解」 丸善出版, 東京 (2020) pp. 2-8.

パオロ・マーシ, アンナリーサ・ロマーノ, エンツォ・コッチャ 「ピッツァ・ナポレターナの美味しさの科学-伝統的な材料・職人技術を徹底詳解」 丸善出版, 東京 (2020) pp. 84-86.

五十野善信. (2001). 動的粘弾性とは何か. *日本ゴム協会誌*, 74(6), 212-217.

高橋禮治 「でん粉製品の知識」 幸書房, 東京 (1996) pp. 50, 88.

### List of Publications

Matsumoto, A., Yoshida, M., Kawai, K. (2021). Quality Improvement of Pizza Crust for Chilled Transport and Storage: Effect of Pre-baking on the Physical Strength and Texture. *Trans. Jpn. Soc. Refrig. Air Cond. Eng.*, 38(3), 187-193.  
( [https://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsrae/38/3/38\\_21-14/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsrae/38/3/38_21-14/_article/-char/ja) )

Matsumoto, A., Nakai, K., Kawai, K. (2022). Effects of Water and Gelatinized Starch on the Viscoelasticity of Pizza Dough and the Texture of Pizza Crust. *J. Appl. Glycosci.*, 69(1), 1-7.  
( [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jag/69/1/69\\_jag.JAG-2021\\_0014/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jag/69/1/69_jag.JAG-2021_0014/_article/-char/ja) )

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、終始並々ならぬご指導およびご助言を賜りました広島大学 大学院統合生命科学研究科 川井清司教授に心よりお礼申し上げます。また、本研究において多くのご助言を賜りました広島大学 大学院統合生命科学研究科 羽倉義雄教授並びに磯部直樹教授に厚くお礼申し上げます。本研究は株式会社サイゼリヤからの寄付金によって実施されたものであり、感謝の意を表します。本研究の遂行にあたりご助言・ご協力をいただきました広島大学 食品工学研究室の皆様並びに同研究室卒業生の中井愛恵様、吉田芽以様に心から感謝の意を表します。