（別紙様式第 3 号）

論文要旨

十文字学園女子大学大学院人間生活学研究科食物栄養学専攻
（学位申請者氏名）
石井　和美
（論文題目）
「雑穀粉を使用したグルテンフリーパンの創製」

【背景】 近年雑穀は、生活習慣病の増加や食物アレルギー患者の増加に伴って見直され、注目されている。タンパク質やビタミン類、特にミネラルを豊富に含み、有用な機能性成分を含むことが明らかになってきた。しかし雑穀の用途は狭く、定着していない。そこで、雑穀粉の用途開発のひとつとして、雑穀粉でパンを調製することに着目した。雑穀はグルテンを構成するタンパク質を含まないため、グルテンフリーパンとしてアレルギー対応食品への展開も期待できる。グルテンフリーパンの研究は、米粉を主材料として一部を雑穀粉で置き換えて影響を検討したもの、澱粉の割合が多いものがほとんどである。雑穀粉を主材料とした研究は少なく、成果として出来上がったパンに、グルテンフリー雑穀粉パンと呼べるものはほとんどない。

これまでに筆者は、雑穀粉を使用してパンを調製し、製パン性を検討してきた。その結果、雑穀粉パンは膨らみが悪く、クラムはべたついて硬いことが明らかになった。グルテンフリーパンの膨らみが悪いのは、小麦粉のようにグルテンを形成するタンパク質を含んでいないからである。そこで、グルテンに代替する構造を構成するために、キサンタンガムやタマリンドガム、MC や HPMC など、多くの素材が使用されている。メチルセルロース（MC）、ヒドロキシプロピルメチルセルロース（HPMC）は加熱によってゲル化し、冷却すると元の粘性のある溶液に戻る性質をもつ興味深い素材である。本研究では、雑穀粉を使用したパンに MC と HPMC を添加することにした。

本研究の目的は、雑穀粉の用途開発のために、雑穀粉を主材料として美味しいパンを調製することである。雑穀粉の食料自給率はかなり低い。雑穀が定着しない理由の１つは用途が狭いこと、もう１つは、国内生産量が少ないため価格が高いことだと考えられる。用途の開発が進めば、消費量の増加も見込まれ、生産の増加、価格の安定につながると確信している。

【方法】

1. 製パン法：ホワイトソルガム粉、キヌア粉を主材料とし、MC を１種（MC-4000）、HPMC は２種（SFE-4000、SE-50）を使用した。ホワイトソルガム粉は既報で決定した通り、増粘多糖類を 1.25%添加し、キヌア粉は段階的に添加して量を決定した。加水量はホワイトソルガム粉 130%、キヌア粉 120％とした。発酵時間：60 分、250℃のオーブンで 30 分間焼成した。第 3 章では、キヌア粉の一部をコーンスターチ、さつまいも澱粉で置換し、MCE-4000 を添加して同様にパンを調製した。
2. パンの比容積と力学的特性：パンのみかけの体積を菜種法で測定し比容積の値を求めた。クラムの中央部分のテクスチャーを測定し、かたさ、凝集性、付着性を求めた。また、25%圧縮時、40%圧縮時の応力を求めた。
3. 糊化特性：得られた粘度―時間曲線から粘度上昇開始温度(PT)、粘度最高（PV)、最低粘度(MV)、ブレークダウン(BD)、セットバック(SB)，および最終粘度（FV）を得た。
4. 動的粘弾性：調製直後の生地を試料として、動的粘弾性（温度依存性）を測定した。

測定条件：角周波数 5 rad/s 、ひずみ 0.1%、昇温速度 2℃/min、測定範囲 20～90℃。貯蔵弾性率（G'）、損失弾性率（G"）を測定し、損失正接（tan δ）を算出した。

5. ホワイトソルガムパンの保存性：調製当日を 0 日目とし、1 日経過後、3 日経過後のクラムのテクスチャーを測定した。また、X 線回折と糊化度を測定し、澱粉の老化の程度を検討した。

【結果】

第 1 章では、ホワイトソルガム粉を使用してパンを調製した。MCE-4000 を添加すると膨らみは大きく増加し、クラムの軟らかいパンを調製できた（p<0.05)。生地のかたさを示す、初期の動的粘弾性 G'_0 とパンの比容積との間に相関が認められ(r=0.93 p<0.05)、G'_0 が大きいほど膨らみのよい軟らかいパンが調製できることが明らかになった。また、糊化特性値の最低粘度が高い、つまり、澱粉粒が崩壊した後に粘度が大きく低下せず、ブレークダウンの値が小さいことが必要だと考えられた。最終粘度と製パン性との間にも関係性が認められ、回帰式を得ることができた (R^2=0.941 p<0.05)。

第 2 章で検討したキヌアパンは、使用した 3 種の増粘多糖類のうち、MCE-4000 を添加したパン以外は、ケービングを起こした。MCE-4000 は 1.00%以上添加するとケービングを起こさなかった。ホワイトソルガム粉パンとは対照的に、MCE-4000 を添加するとクラムは硬化した（p<0.05)。また、発酵終了後の生地の高さと焼成後のパンの高さを比較すると 1.5 cm 程度低下した。ホワイトソルガム粉で調製したパンのように、焼成中に生地の伸びはなかった。

第 3 章では、キヌア粉の澱粉含量が少ない点に着目した。製パンの過程で、澱粉は骨格を維持する役割をするといわれていることから、キヌア粉の一部を澱粉で置換して製パン性を検討した。コーンスターチとさつまいも澱粉で段階的に置換して製パンしたところ、比容積はそれぞれ 30%置換すると増加傾向を示した。クラムは軟らかくなる傾向を示し、さつまいも澱粉で 30%置換すると有意に軟らかくなった（p<0.05)。生地の動的粘弾性を検討したところ、キヌア粉に MCE-4000 を添加して生地を調製すると G'_0 はキヌア粉のみで調製した生地の 5 倍程度に増加した（p<0.05)。しかし、澱粉で 30%置換すると G'_0 の値は 500～600 Pa 程度に減少した（p<0.05)。糊化特性値や動的粘弾性と、製パン性の指標の間には、ホワイトソルガムパンのような関係性は認められなかった。

【結論】

良く膨らむパンを調製するには、糊化の開始温度より増粘多糖類によって生地の粘度が早く上昇し、先にパンの骨格が形成される必要がある。そして、澱粉によって固定されることで膨らみを維持できる。生地が軟らかく伸びが良いと、イーストにより発生したガスを受け止めることができ、パンを十分に膨化させることができる。雑穀粉の種類によって、調製した生地が膨化するのに丁度よいかたさには違いがあった。本研究では、ホワイトソルガム粉で調製した生地の場合、かたさを示す G'_0 は 2000 Pa 程度であり、30%を澱粉で置換したキヌアパンの場合、500～600 Pa 程度だった。

パンを調製するにあたっては、使用する粉の粉体特性のほか、アミロース含量や、アミロペクチンの構造など、複数の要因が複雑に影響を与えていると考えられる。今後は、雑穀粉を使用したパンの構造を検討するとともに、嗜好性をさらに高めていきたい。

本研究で、ホワイトソルガム粉 100%でパンを調製できたことは大きな成果である。嗜好性の向上を図れば主食用のパンとして実用が可能だと考えている。キヌア粉で調製したパンは、ドイツパンのような、どっしりとしていてかみ応えのあるパンへの展開も十二分に考えられる。また、キヌア粉は栄養価が高いため、パンの付加価値を上げることが可能である。将来、雑穀粉を主材料とした主食用のパンが、日常的に食卓に並ぶことが筆者の目指すところである。

GENERAL ABSTRACT

Graduate School of Human Life Sciences, Jumonji University
Kazumi Ishii

Production of Gluten-Free Bread Using Millet Flour

【Background】 In recent years, millet is gaining attention due to the increasing prevalence of lifestyle-related diseases and growing number of patients with food allergies. Millet has been shown to be abundant in proteins and vitamins, especially minerals, and to contain useful functional components. However, the range of uses of millet remains narrow, and it has yet to be established for common use. Therefore, I focused on the preparation of bread using millet flour as one way to expand and develop its use. Since millet does not contain the proteins that compose gluten, bread made using millet is gluten-free and can be considered as an allergy-friendly food. Most studies on gluten-free bread have used rice flour as the main ingredient and investigated the influence of replacing a portion of it with millet flour, and most bread in these studies had a high proportion of starch. Very few studies have used millet flour as the main ingredient, and the resulting bread is rarely called gluten-free millet bread.

Thus far, I have examined the bread-making qualities of millet flour by using it to prepare bread. As a result, I found that millet flour bread swells poorly and has a sticky and hard crumb. The poor swelling of gluten-free bread is due to the lack of proteins that form gluten, which wheat flour contains. Therefore, many materials, such as xanthan gum, tamarind gum, methylcellulose (MC), and hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), are used to build a structure to replace gluten. MC and HPMC are interesting materials that exhibit gelling when heated and return to their original viscous form when cooled. In this study, I added MC and HPMC to bread made using millet flour.

This study aimed to prepare delicious bread using millet flour as the main ingredient in order to expand and develop the use of millet flour. I believe that it has been difficult to establish the common use of millet because of its narrow range of use and its high price due to low levels of domestic production. I believe that expanding and developing the range of uses of millet flour will increase its consumption and production and stabilize its costs.

【Methods】

1. Bread-making method: I used white sorghum flour and quinoa flour as the main ingredients, along with one type of MC (MC-4000) and two types of HPMC (SFE-4000, SE-50). In accordance with previous reports, 1.25% of thickening polysaccharides were added to the white sorghum flour, and the quinoa flour was added stepwise to determine its optimal quantity.

Amount of water: white sorghum flour, 130%; quinoa flour, 120%. Fermented time: 60 min. The dough was baked in an oven at 250 °C for 30 min. In Chapter 3, part of the quinoa flour was replaced with cornstarch and sweet potato starch, and MCE-4000 was added to prepare bread in the same manner.

2. Specific volume and mechanical properties of bread: The apparent volume of bread was measured using the rapeseed method. I measured the texture in the middle of the crumb to determine hardness, cohesiveness, and adhesiveness. I determined the stresses at 25% and 40% compression.
3. Gelatinization properties: The pasting temperature (PT), peak viscosity (PV), minimum viscosity (MV), breakdown (BD), setback (SB), and final viscosity (FV) were measured using the resulting viscosity-time curve.
4. Dynamic viscoelasticity: I measured the dynamic viscoelasticity (temperature-dependent) of dough samples immediately after preparation. I measured the storage elastic modulus (G') and loss elastic modulus (G") and calculated the loss tangent (tan δ). Measurement conditions: Angular frequency of 5 rad/s, strain of 0.1%, rate of temperature rise 2 °C /min, range of measurement from 20 °C to 90 °C.
5. Preservability of white sorghum bread: I measured the crumb texture on days 1 and 3 by considering the day of bread preparation as day 0. In addition, I measured the X-ray diffraction and degree of gelatinization of the crumb to examine the extent of starch aging.

【Results】

In Chapter 1, I prepared bread using white sorghum flour. The addition of MCE-4000 increased the degree of swelling and the prepared bread had significantly softer crumbs (p <0.05). I identified a correlation between the initial dynamic elasticity (G'_0), indicating the height of the dough, and the specific volume of the bread (r=0.93, p <0.05); the greater the G'_0 value, the better the swelling and the softer the bread. Furthermore, I thought that a high minimum viscosity (gelatinization property) would be necessary; that is, viscosity should not decrease significantly after the breakdown of starch, and the breakdown value should be small. I also identified a correlation between the final viscosity and bread-making properties and obtained a regression equation (R^2=0.9406, p <0.05).

Of the three types of thickening polysaccharides used, only MCE-4000 showed an effect on the quinoa bread examined in Chapter 2. Caving did not occur when 1.00% or more of MCE-4000 was added. In contrast to bread prepared with white sorghum flour, the addition of MCE-4000 led to a harder crumb (p <0.05). Furthermore, the height decreased by approximately 1.5 cm after baking compared to the dough height after fermentation. Unlike bread prepared using white sorghum flour, the dough did not stretch during baking.

In Chapter 3, I focused on the fact that the starch content of quinoa flour is low. Since starch is said to play a role in maintaining the structure of bread during baking, I examined the bread-making properties by replacing part of the quinoa flour with starch. Corn starch and sweet potato starch were gradually used to replace the starch during bread preparation; the bread showed a tendency to increase the specific volume by substituting 30% of each. When replaced with starch, the crumbs tended to become soft and when replaced with sweet potato starch at 30%, they became significantly softer ($p < 0.05$). Examination of the dynamic viscoelasticity of the dough samples revealed that the G'_0 of the dough prepared by adding MCE-4000 to quinoa flour was approximately five times that of the dough without MCE-4000 ($p < 0.05$). However, when 30% of the dough ingredients were replaced with starch, the G'_0 value was reduced to approximately 500–600 Pa ($p < 0.05$). In quinoa bread, I did not observe a relationship between gelatinization properties, dynamic viscoelasticity, and indicators of bread-making properties.

【Conclusion】

To prepare bread that swells adequately, it is necessary for the thickening polysaccharide to increase the viscosity of the dough before it reaches the initial temperature of gelatinization and first forms the skeletal structure of the bread. The subsequent fixing of the bread using starch was expected to maintain its swelling. When the dough is soft and stretches well, it can trap the gas generated by yeast, allowing the bread to swell adequately. Depending on the type of millet flour used, I observed differences in hardness that were ideal for the prepared dough to swell. In this experiment, the G'_0 value, which indicates the hardness of the bread, was approximately 2000 Pa for dough prepared using white sorghum flour and approximately 500–600 Pa for quinoa bread with 30% of the flour replaced with starch.

In bread preparation, it is believed that multiple factors, such as the amylose content and structure of amylopectin, have a complicated influence on bread in addition to the powder properties of the flour used. I hope to study the structure of bread made using millet flour and further enhance its palatability.

In this study, I successfully prepared bread using 100% white sorghum flour, which is a significant achievement. I consider that this bread will be suitable as a staple food, once the palatability is improved. In addition, the bread prepared with quinoa flour can be crafted into a solid and chewy bread, similar to German bread. Further, the high nutritional content of the quinoa flour provides added value to the bread.

The author of this study aim toward a future where staple food bread prepared using millet is a part of our daily meals.