

(別紙様式第 2 号)

令和 2 年度 学位論文

(論文題目)

雑穀粉を使用したグルテンフリーパンの創製

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

18DA001

石井 和美

主査 井手 隆 教授

副査 中村 禎子 教授

副査 小林 三智子 教授

目次

序論	1
第1章　ホワイトソルガム粉を使用したパンの創製	
1. 緒言	7
2. 実験方法	9
(1) 材料	
(2) 成分分析および粉体特性	
(3) 糊化特性の解析	
(4) 生地 of 調製	
(5) 生地 of 動的粘弾性	
(6) 生地 of 発酵試験と発酵時間の検討	
(7) 食パン of 調製	
(8) 食パン of 比容積と力学的特性	
(9) 走査型電子顕微鏡によるクラムの観察	
(10) 食パン of 保存性	
(11) 統計処理	
3. 結果および考察	14
(1) 成分分析および粉体特性	
(2) 糊化特性	
(3) 動的粘弾性	
(4) 発酵試験および発酵時間の検討	
(5) 食パン of 比容積と力学的特性	
(6) 走査型電子顕微鏡による組織観察	
(7) 食パン of 保存性	
(8) 増粘多糖類の効果	
(9) 製パン性と糊化特性値の関係性	
(10) 製パン性と動的粘弾性 of 関係性	
4. 要約	31
5. 文献	32

第2章 キヌア粉を使用したパンの創製

1. 緒言	34
2. 実験方法	36
(1) 材料	
(2) 家庭用製パン機による製パン試験	
(3) 成分分析および粉体特性	
(4) 糊化特性の解析	
(5) 生地 of 調製	
(6) 生地 of 動的粘弾性	
(7) 発酵時間の検討と食パンの調製	
(8) 食パンの比容積と力学的特性	
(9) 統計処理	
3. 結果および考察	39
(1) 成分分析および粉体特性	
(2) 添加する増粘多糖類の決定	
(3) 食パンの比容積と力学的特性	
(4) 糊化特性	
(5) 動的粘弾性	
(6) 増粘多糖類の効果	
(7) 製パン性と糊化特性、動的粘弾性の関係性	
4. 要約	48
5. 文献	50

第3章 キヌア粉の一部を澱粉で置換したパンの創製

1. 緒言	52
2. 実験方法	54
(1) 材料	
(2) 澱粉の粒度測定	
(3) 食パンの調製	
(4) 糊化特性の解析	
(5) 生地 of 調製	
(6) 生地 of 動的粘弾性	

(7) 食パンの比容積と力学的特性	
(8) 統計処理	
3. 結果および考察	56
(1) キヌア粉の一部を澱粉で置換して調製したパン	
(2) 澱粉で置換したパンの比容積と力学的特性	
(3) 澱粉の粒度	
(4) キヌア粉の一部を澱粉で置換した試料の糊化特性	
(5) 動的粘弾性	
(6) 製パン性と糊化特性、動的粘弾性の関係性	
4. 要約	69
5. 文献	70
総括	72
謝辞	76
論文要旨	

序論

現在のわが国で食料自給率が100%に近い数少ない食料の1つが米である¹⁾。しかし、食の多様化によって米の消費量は年々減少してきている²⁾。これまでに、米の消費量増加を目的として、新形質米の開発や無洗米など炊飯の利便性を図った製品の開発や米粉の利用等、様々な取り組みが行われてきた³⁾。しかし、消費量の減少に歯止めはかかっていない。

米の普及以来、日本では主食といえば米が主流であった。しかし、2010年以降の一世帯当たりの年間品目別支出額は、パンが米を上回った⁴⁾。パンの消費量は年々増加し、主食として定着してきたといえる。パンの原料となる小麦は、国産は少なく、殆どを輸入に依存している⁵⁾。近年の異常気象に伴う干ばつによって小麦の価格が上昇し、市販されている小麦粉が一気に値上がりしたことは記憶に新しい。これらを背景として、米の利用促進のために、輸入に依存する小麦の代わりに米粉でパンを調製する取り組みが行われてきた。そして、米粉パンは一定の流通を確保し、学校給食で提供されるまでになった。

一方、あわ、ひえなどの雑穀は、かつては日本の主食であった。米が広く普及したために消費量も生産量も減少し、現在日本の雑穀の食料自給率は10%程度である⁶⁾。しかし、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、有用な機能性成分についても少しずつ明らかになってきた⁷⁾。健康志向の高まりにより、雑穀は、何年かの周期でブームが訪れるものの、日常食に用いられる食材としては定着していない。雑穀の利用法で一番簡便でよく用いられる方法は、米に混ぜ込んで炊飯する方法である。また、シリアルなどにも使用されているが用途は広いとはいえない。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、小麦粉と比較して現代人に不足しがちなカルシウムや鉄分、食物繊維を多く含んでいる。特に、アマランサス、キヌアの栄養価は高く、注目されている⁸⁾。また、雑穀はグルテンを構成するタンパク質を含まないため、グルテンフリー食品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というと、まずイメージされるのは米粉パンであろう。多くのグルテンフリーパンの研究は、米粉がベースとなっている。グルテンフリーパンの材料には、様々な穀粉、米粉や各種澱粉が使用され、修飾澱粉、ハイドロコロイド、酵素等を添加して製パン性に与える影響が検討されている⁹⁾。

ハイドロコロイドは、その高い水結合能力とその構造生成挙動のために、グルテンの機能と置き換えるために利用されることが多い⁹⁾。主穀である米粉を使用したパンでは、キサントタンガムやタマリンドガムを添加して調製し、生地の特長やパンの体積に与える効果が検討されている¹⁰⁾。特に、タマリンドガムを添加すると、他の増粘多糖類を添加した場合と比較してパンの外観が向上し、調製条件を最適化することによって商業的な利用が可能だと報告されている。また、澱粉はグルテンフリーパンを調製するのに原料として用いられる場合が多く、製パン性に及ぼす影響を検討した研究も多い¹¹⁻¹³⁾。セルロース誘導体やカラギーナンなどの親水コロイドが製パン性に与える影響^{14,15)}なども報告され、米粉を主材料としたグルテンフリーパンの調製は一定の成果を得たといえる。米粉パンの問題点としては、食感や保存性の悪さが挙げられているが、それらの改善についても検討されている^{16,17)}。

一方、雑穀粉においては、小麦粉の一部を代替して製パン性を検討したものや、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¹⁸⁻²⁴⁾。雑穀粉を主材料とした研究は少なく²⁵⁻²⁸⁾、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。

これまで筆者は、雑穀粉を使用してパンを調製し、その製パン性を検討してきた^{29,30)}。加水量を調整することで雑穀粉パンを調製することができたが、膨らみが悪く、クラムはべたつきがちで硬いことが明らかになった。また、小麦粉で調製したパンの一部を雑穀粉で置換したいくつかの報告では、30%程度で体積が減少し食味が劣るとされている。筆者の検討結果からも、食味にはかなり改良を加える必要があると考えられた。

パンのおいしさには、食味だけでなく、噛んだ時の食感も大きな影響を与える。その要因はパンの気泡構造である³¹⁾。既報²⁹⁾で調製したパンは膨らみが悪く、気泡を取り囲む膜は厚かった。噛んだ時の食感は硬く、それは物性値にも反映していた。クラムの食感が硬い原因の1つは、膨らみが悪いことである。グルテンフリーパンは一般に膨らみが悪いといわれている。それは、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。グルテンフリーパンを調製する場合、グルテンに代替するしくみを用意する必要がある。

グルテンに代替する構造を構成するために、先に述べたキサントタンガムやタ

マリンドガム、メチルセルロース (MC) やヒドロキシプロピルメチルセルロース (HPMC) など、多くの素材が使用されている。MC、HPMC は、加熱によってゲル化し、冷却するともとの粘性のある溶液に戻る性質をもつ興味深い物質である。本研究では、MC1 種と HPMC2 種を使用した。

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おいしいパンを調製することである。先に述べた通り、雑穀粉の食料自給率はかなり低い。雑穀が日常食の材料として定着しない理由の 1 つは用途が狭いこと、もう 1 つは、国内生産量が少なく、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ものと確信している。

筆者がこれまで検討してきた雑穀粉のうち、本研究ではホワイトソルガム粉とキヌア粉を使用することにした。ホワイトソルガム粉は、アレルギー対応素材として大手スーパーマーケットでも販売されている。小麦粉の代用として様々な調理に利用されているが、グルテンフリーパンの研究分野では、ホワイトソルガム粉を主材料としたパンの研究は少なく^{24,26,28)}、調製法は確立していない。キヌア粉は、ミネラルなどの栄養素が豊富でここ数年スーパーフードとして大きな注目を浴びている。キヌア粉を主材料として主食用のパンを調製できれば、不足しがちなミネラルなどを毎日の食事から無理なく摂取できる。たとえそれが微量であっても、長いスパンで考えたとき不足のリスクは漸減する。これら 2 種の雑穀粉でパンを調製し、その調製法を確立することで得られる成果は大きい。本研究で得られた成果を基に、最終的には雑穀粉パン調製法の標準化を図っていきたい。

文献

- 1) 農林水産省, 食料需給表自給率の推移 確報, 品目別自給率の推移,
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003282727>(閲覧年月日: 2020.3.28)
- 2) 農林水産省, 米をめぐる参考資料, 米の指針(案)に関する主なデータ,
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h24_h/trend/part1/chap3/c3_5_01.html (閲覧年月日: 2020.11.3)
- 3) 新井映子(2011), 米の消費拡大に向けた米・米粉の新たな加工技術の動向,
日本食生活学会誌, **22**, 207-211
- 4) 総務省統計局, 家計調査(家計収支編)時系列データ(総世帯・単身世帯),
1. 品目分類:支出金額・名目増減率・実質増減率(年),
<http://www.stat.go.jp/data/kakei/longtime/soutan.html#time> (閲覧年月日:
2020.3.28)
- 5) 農林水産省, 麦の需給に関する見通し, 麦の参考資料,
https://www.maff.go.jp/j/seisan/boueki/mugi_zyukyuu/attach/pdf/index-71.pdf (閲覧年月日: 2020,12,28)
- 6) 大迫早苗(2013), 雑穀の利用と今後の課題, 日本調理科学会誌, **46**, 142-143
- 7) 真鍋久(2005), 雑穀ブームの背景を探る, 日本調理科学会誌, **38**, 440-445
- 8) 小西洋太郎(2002), 擬穀物アマランス、キノアの栄養特性とアレルギー代替食品への応用, 日本栄養・食料学会誌, **55**, 299-302
- 9) Houben, A., Höchstötter, A. and Becker, T. (2012), Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview, *European Food Research & Technology*, **235**, 195-208
- 10) Jang, K., Hong, Y. E., Moon, Y., Jeon, S., Angalet, S. and Kweon, M. (2008), Exploring the applicability of tamarind gum for making gluten-free rice bread, *Food Science and Biotechnology*, **7**, 1639-1648
- 11) Sanchez, H. D., Osella, C. A. and de la Torre, M. A. (2002), Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch, *Journal of Food Science*, **67**, 416-419
- 12) Mancebo, C. M., Merino, C., Martínez, M. M. and Gómez, M. (2015), Mixture design of rice flour, maize starch and wheat starch for optimization

- of gluten free bread quality, *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 6323-6333
- 13) 小嶋幸恵, 伊藤聖子, 新井映子(2016), 米粉パンの製パン性に及ぼす新規加工タピオカ澱粉の影響, 日本調理科学会誌, **49**, 208-215
- 14) Sciarini, L. S., Ribotta, P. D., León, A. E. and Pérez, G. T. (2010), Effect of hydrocolloids on gluten-free batter properties and bread quality, *International Journal of Food Science and Technology*, **45**, 2306-2312
- 15) Pérez-Quirce, S., Collar, C. and Ronda, F. (2014), Significance of healthy viscous dietary fibers on the performance of gluten-free rice-based formulated breads, *Food Science and Technology*, **49**, 1375-1382
- 16) 伊藤聖子(2017), 米粉パンの製パン性向上と老化遅延に関する研究, 日本調理科学会誌, **50**, 47-53
- 17) 伊藤聖子, 木川梨紗, 新井映子(2013), 米粉パンの老化に及ぼすイモ類粉末の影響, 日本調理科学会誌, **46**, 254-261
- 18) Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G. and Lindhauer, M. G. (2011), Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch, *LWT Food Science and Technology*, **44**, 681-686
- 19) Elgeti, D., Nordlohne, S., D., Foeste, M., Besl, M., Linden, M. H., Heinz, V., Jekle, M. and Baker, T. (2014), Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour, *Journal of Cereal Science*, **59**, 41-47
- 20) Burešová, I., Tokár, M., Mareček, J., Hřivna, L., Faměra, O. and Šottníková, V. (2017), The comparison of the effect of added amaranth, buckwheat, chickpea, corn, millet and quinoa flour on rice dough rheological characteristics, textural and sensory quality of bread, *Journal of Cereal Science*, **75**, 158-164
- 21) Morita, N., Kang, W., Hamauzu, Z. and Sugimoto, Y. (1999), Effect of amaranth flour on some properties of wheat dough and bread, *Journal of Applied Glycoscience*, **46**, 23-30
- 22) Sanz-Penella, J. M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M. and Haros, M. (2013), Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive

- value, *LWT Food Science and Technology*, **50**, 679-685
- 23) 土屋京子(2019), ホワイトソルガム粉パンにおける米粉配合の効果について, 東京家政大学研究紀要 2 自然科学, **59**, 1-7
- 24) Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C. and Santiago, L. G. (2012), Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking, *International Journal Food Sciences and Nutrition*, 2012, **63**, 491-497
- 25) 藤井恵子, 舟木愛美, 辻美智子(2017), ハトムギ粉を主原料としたグルテンフリーパンの調理特性, 食生活研究, **37**, 1-11
- 26) 土屋京子, 池田早苗(2016), ホワイトソルガム粉の製パン性について, 東京家政大学研究紀要 2 自然科学, **56**, 33-38
- 27) Akin, P. A. and Miller, R. A. (2017), Starch-hydrocolloid interaction in chemically leavened gluten-free sorghum bread, *Cereal Chemistry*, **94**, 897-902
- 28) 土屋京子(2017), ホワイトソルガム粉のパン品質に対する添加水分の影響の違い, *New Food Industry*, **59**, 29-37
- 29) 石井和美, 早川あつ美, 藤井恵子(2018), 雑穀で調製したグルテンフリーパンの製パン性, 日本調理科学会誌, **51**, 89-96
- 30) 石井和美, 小林三智子(2018), ホワイトソルガムパンの加工性と嗜好性向上の検討, *New Food Industry*, **60**, 19-25
- 31) 井上好文(2016), パンの食感と気泡構造の関係, 日本調理科学会誌, **49**, 280-284

第 1 章

ホワイトソルガム粉を使用したパンの創製

1. 緒言

ソルガム (*Sorghum bicolor*) は、アフリカのエチオピア地域原産のイネ科モロコシ属の1年草である。日本には室町時代に中国から伝えられたといわれている¹⁾。ソルガムの品種は多様で、交配しやすいため雑種も多く¹⁾、用途も多様である。アフリカ大陸などでは主要な食料として用いられているが、日本では主に飼料として使用されている。また、シロップ用、最近ではバイオマス燃料の原料としても利用されている。食用に使用されるのはグレイソルガムと呼ばれる品種で、有色ソルガムとホワイトソルガムに分類される。

アメリカ穀物協会が運営する「米国産ソルガムきび情報サイト」によると、ソルガムの最大の産地はアメリカで、世界のソルガムの25%が生産されている²⁾。ソルガムは、干ばつに強く、救荒作物としても注目されている。日本では、「こうりゃん」、「たかきび」とも呼ばれ、戦後の食糧不足から一時的に栽培が増加したが、現在は長野県や熊本県でわずかに栽培されている程度である¹⁾。したがって、日本で手に入るほとんどのものは輸入品である。

ホワイトソルガムはグルテンを構成するタンパク質を含まないため、グルテンフリー素材として利用されている。日本では小麦アレルギー対応食材として市販されている。ソルガムはタンニンを含み、食味は良くないが、ホワイトソルガムはタンニンの含量が少なく、苦みも無く無味無臭だといわれている。しかし、粒状のまま米と混合して炊く方法ではあまり気にならないが、製粉した粉には独特の臭みとえぐみを感じられ、調理や加工には工夫が必要である。

ホワイトソルガム粉を主材料としたグルテンフリーパンの研究は少ない。主材料にするとは、少なくとも粉全量の60%以上を一種類の雑穀粉で構成していることだと筆者は考えている。しかし序論で述べた通り、雑穀粉を使用したパンの研究は、小麦パンの一部を置換したものや、米粉を主材料として一部を置換して検討したものが多し。ホワイトソルガム粉を主材料とした研究も少なく³⁻⁵⁾、Velázquezら⁶⁾の検討によると、結果的に最適な条件はホワイトソルガム粉が45%、コーンスターチが55%の割合で、HPMCを3%添加した場合であった。Akinら⁴⁾は、ホワイトソルガム粉を主材料として、その一部を各種澱粉で10%置換し、数種のヒドロコロイドを利用して製パン性を検討している。しかし、イーストの代わりにベーキングパウダーを使用している。小麦パンの

場合、イーストを使用した場合とベーキングパウダーを使用した場合とで、パンの容積や内相に大きな違いが出るのが明らかになっている⁷⁾。パンのおいしさには、イーストの独特な香りが大きく寄与していると筆者は考えているので、本研究ではドライイーストを使用した。土屋ら⁵⁾は、家庭用製パン器を使用してホワイトソルガムパンの調製法を検討し、粉の1.2倍重量の加水量が適しているとした。しかし、パンの形態やテクスチャーに改善の余地があると報告している。ホワイトソルガムパンは、形態やテクスチャー、加えて食味にも改善の余地があることはこれまでの筆者の検討⁸⁾でも明らかである。ホワイトソルガムのみで調製したパンは膨らみが悪く、クラムは硬くて食味も悪かった。

膨らみを改善する手法として、タマリンドガムやジュランガム、HPMC、MC等々、多くの素材が使用されている。既報⁹⁾で筆者は、ホワイトソルガム粉にMC、HPMCを添加して家庭用製パン機でパンを調製し、パンの膨らみとクラムのかたさを改善できたことを報告した。

そこで本研究では、ホワイトソルガム粉を主材料として食パン型で主食用の食パンを調製することにした。増粘多糖類を添加してパンを調製し、粉と生地の特徴が製パン性に与える影響を検討した。

2. 実験方法

(1) 材料

パンの原材料として、ホワイトソルガム粉（アメリカ産 中野産業（株））、グラニュー糖（三井精糖（株））、オリーブオイル（BOSCO Pure & mild 日清オイリオグループ（株））、食塩（（公財）塩事業センター）を使用した。増粘多糖類として MC 1 種（メトロース MCE-4000 信越化学工業（株））（以下 MCE-4000 と示す）、HPMC 2 種（メトロース SFE-4000、SE-50 同社製）（以下、SFE-4000、SE-50 と示す）を使用した。MC は、セルロースを構成するグルコースの水酸基の一部をメトキシ基で置換した物質で、HPMC はさらにヒドロキシプロポキシ基で置換した物質である。共に冷水に溶解し、加熱するとゲル化する性質をもつ。各増粘多糖類に付された数字は 2%水溶液の粘度グレードを示している。製パン性の検討にはドライイースト（低糖用）（フランス産 S. I. Lesaffre）を使用した。

(2) 成分分析および粉体特性

ホワイトソルガム粉のタンパク質含量、脂質含量、澱粉含量、アミロース/アミロペクチン比、澱粉損傷度について、日本食品分析センターに依頼して分析した。タンパク質含量は燃焼法、脂質含量は酸分解法、澱粉含量は酵素法によって求めた。また、アミロース・アミロペクチン比は、アミロース/アミロペクチン測定キット（Megazyme）、澱粉損傷度は澱粉損傷度測定キット（同社）を用いて試験された。

粒子径分布の測定は、レーザー回折式粒子径分布測定装置（（株）日本レーザー）を使用して測定した。

(3) 糊化特性の解析

ホワイトソルガム粉のみで測定したものをコントロールとし、MCE-4000、SFE-4000、SE-50 をそれぞれ 1.25%添加して粉試料とした。

茨城県産業技術イノベーションセンターに依頼し、ラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA-4 型 Newport Scientific 社）（以下、RVA）を使用して測定した。粉試料 3.5 g に蒸留水 25 mL を添加し測定試料とした。回転速度 160 rpm

で、50℃で1分間保持した後、7分間で95℃まで昇温して5分間保持した。その後7分間で50℃まで降温して2分間保持、計22分間の粘度-時間曲線を作成し、得られた曲線から粘度上昇開始温度(以下、糊化開始温度)(PT)、最高粘度(PV)、最低粘度(MV)、ブレイクダウン(最高粘度と最低粘度の差を示す)(BD)、セットバック(最終粘度と最低粘度の差を示す)(SB)、および最終粘度(FV)を得た。糊化開始温度は、得られた粘度-時間曲線の測定開始点から接線を引き、粘度が上昇を始めたときの温度を読み取った。

(4) 生地 of 調製

生地の基本配合は、既報⁸⁾と同様にした。すなわち Table 1 に示したとおり、ホワイトソルガム粉 100g に対してグラニュー糖 5%、オリーブオイル 5%、食塩 1%、加水量 130%を基本配合とした。増粘多糖類の添加量は、ホームベーカリーを使用して検討したホワイトソルガムパンの結果⁹⁾を基に、油脂をオリーブオイルで代替して予備実験を行い、膨らみとクラムの状態から、MCE-4000、SFE-4000、SE-50 をそれぞれ 1.25%添加することにした。

Ingredient	Weight (%)
White sorghum flour	100
Sugar	5
Salt	1
Dry yeast	2
Olive oil	5
Thickening polysaccharide	1.25
Distilled water	130
Baker's %	

メトローズは吸湿性が高くだまになりやすいため、まずグラニュー糖と混合し、ホワイトソルガム粉と混合した。食塩を混ぜ、蒸留水を加えてスパチュラで均質になるまで攪拌し、卓上ミキサー(AIKOH ケンミックス・シェフミキサーKM-800, (株)愛工舎製作所)を用いて、まず目盛1(自転256 rpm, 公

転 77 rpm) で 1 分間, その後, 目盛 3 (自転 386 rpm, 公転 116 rpm) で 4 分間攪拌し, オリーブオイルを投入してさらに 3 分間攪拌した。

(5) 生地 of 動的粘弾性

調製直後の生地を試料として、レオメータ (MCR-502 (株) アントンパール) を用いて動的粘弾性を測定した。ひずみ依存性の測定は、25°Cにおいて直径 50 mm の平行プレートを使用し、周波数 1 Hz、ギャップ 1.0 mm で、ひずみ量を 0.01~1,000%まで変化させて行った。その結果、ひずみは線形性を示した 0.1%に決定した。

温度依存性を調べるために、直径 27 mm の共軸円筒型の治具 (MEAS CYLINDER B-CC27) を用いた。生地を約 19.4 ml 入れ、角周波数 5 rad/s、ひずみ 0.1%で 20°Cから 90°Cまで速度 2°C/min で昇温し、貯蔵弾性率 (G')、損失弾性率 (G'') を測定し、損失正接 ($\tan \delta$) を算出した。なお、生地の乾燥防止のために、共軸円筒上部にキャップをして測定した。

(6) 生地 of 発酵試験と発酵時間の検討

調製した生地にドライイーストを加え、卓上ミキサーでさらに 2 分間攪拌して試料を調製した。500 mL のトールビーカーに生地を 50 g 入れ、39°C、相対湿度 80%に設定したほいろ (MBKH-5M (株) マルゼン) で発酵させ、10 分おきに状態を観察した。

発酵試験の結果を基に、一時発酵と二次発酵の時間を検討した。既報⁸⁾と同様にシリコンマフィン型 (上部直径 7.0 cm, 下部直径 5.2 cm) に生地を 50 g 分注し、段階的に時間を変えて発酵させた。生地を 2 回/s の速度で攪拌してパンチを行い、200°Cのオーブンで 30 分焼成した。一連の過程を Fig. 1 に示した。出来上がったパンの体積は菜種法¹⁰⁾で測定し、重量で除して比容積を算出した。比容積の値とクラムの状態から最も適した発酵時間を決定した。

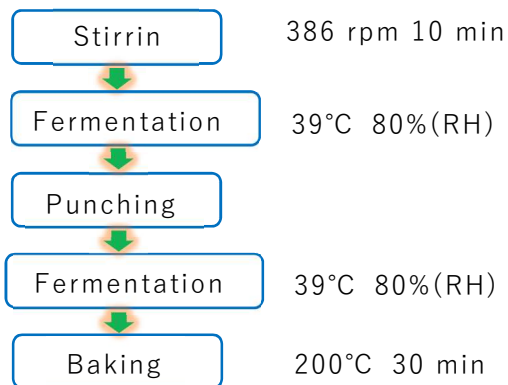


Fig. 1 Bread preparation basic method

(7) 食パンの調製

パンは、フッ素樹脂コーティングしたスチール製の食パン型（W120×D120×H100 mm）で焼成した。ホワイトソルガム粉 250 g で調製した生地を 560 g 入れ、(5)で決定した時間で発酵させ、焼成は既報⁸⁾と同様に 200°Cで 30 分間焼成した。焼成後、直ちに型から取り出し 25°Cで 1 時間放冷後に測定に供した。

(8) 食パンの比容積と力学的特性

葉種法でパンのみかけの体積を測定し、比容積を算出した。パンのクラム中央部分を 2 cm 幅で水平に切り、その中央部分を 2 cm 角の直方体に切り出して測定試料とした。測定にはクリープメーター(レオナーRE2-3305B (株)山電)を使用した。試料の高さの 75%まで直径 4 cm のアクリル樹脂製円盤型プランジャーで 2 回圧縮し、テクスチャー特性値を解析した。また 90%まで圧縮して得られた応力-ひずみ曲線から 25%圧縮時、40%圧縮時の応力を求めた。ロードセルは 20 N、200 N を用い、圧縮速度は 1 mm/s とした。

(9) 走査型電子顕微鏡によるクラムの観察

焼成したパンのクラム中央部分を 4 cm 角に切り出し、-80°Cで予備凍結後に凍結乾燥させた。サンプルの断面をトリミングナイフで切断してカーボンテープ上に貼り付け、Pt-Pd で被膜した。走査型電子顕微鏡 (JSM-7900F 日本電子) を使用し、加速電圧 2 kV、倍率 35 倍、500 倍で組織構造を観察した。

(10) 食パンの保存性

焼成して放冷した食パンをラップフィルムで二重に包み、さらにジッパー付きビニール袋で密閉して保存した。保存条件は、井川ら¹¹⁾の報告を参考にし、澱粉が老化しやすく、硬化速度が速い4°C¹²⁾で保存することにした。焼成当日、1日後、3日後に食パンクラムのテクスチャーを測定した。また、保存中のパンのクラム4分の1枚分を3倍量のエタノール(特級 純度99% 関東化学)を加えて乳鉢ですり潰しながら脱水、脱脂し、濾過した。この過程を3回繰り返し、アセトン(特級 純度99% 関東化学)で洗浄後風乾して粉末状にし、X線回折測定用試料とした。

X線回折装置は、試料にX線を照射した際、X線が原子の周りにある電子によって散乱、干渉した結果起こる回折を解析することを測定原理としている。この回折情報を用いることにより、粉末試料では、構成成分の同定や定量、結晶サイズや結晶化度を知ることが出来る¹³⁾。澱粉では老化して再結晶化した状態を観察することが可能である。澱粉の場合、老化が進むと回折角度17°のところピークがでてくることが知られている¹⁴⁾。そこで、 $2\theta = 17^\circ$ におけるX線回折強度の変化を調べた。X線回折装置(SmartLab SE リガク)を使用してCu管球を用い、 $2\theta = 4 \sim 45^\circ$ 、電圧36 kV、電流15 mA、走査速度 $2^\circ / \text{min}$ の条件でX線を照射し、回折強度より結晶性の回復状態を観察した。

また、老化の程度を数値化する方法として、糊化度測定(BAP法)がある¹⁵⁾。焼成当日、1日後、3日後のパンを -80°C で予備凍結後に凍結乾燥させ、ミルで粉末化して測定試料とした。BAP法による分析は、日本食品分析センターに依頼した。

(11) 統計処理

測定は、糊化特性は3回測定、パンの調製は4から5回行って物性値を測定し、平均値と標準偏差を求めた。統計処理ソフト(SPSS Statistics Ver.21 IBM)を使用して分散分析を実施後に一元配置分散分析を行い、Bonferroni法による多重比較によって検定した。また、相関は、ピアソンの相関係数を用いた。回帰分析には、統計処理ソフト(エクセル統計ソフト2010)を使用した。統計的有意水準は5%未満とした。

3. 結果および考察

(1) 成分分析および粉体特性

成分分析の結果を Table 2 に示す。ホワイトソルガム粉の組成はタンパク質含量、脂質含量、澱粉含量等、うるち米粉と類似している。またアミロース含量も、ホワイトソルガム粉は 27% であり、一般的にいわれている米のアミロース含量の 20% と近い値だった。アミロース含量については、米粉で含量の違いによる製パン性が検討され、グルテンフリー米粉パンでは中アミロース米が製パン性に優れると報告されている¹⁶⁾。ホワイトソルガム粉はおよそ中アミロース米と同等の分類となる。粒度は、ホワイトソルガム粉は、20 μm 前後と 135 μm 前後に 2 つのピークをもち、d10 は 19.3 μm 、d90 は 198.8 μm 、d50 (メディア径) は 108.6 μm だった。澱粉損傷度は 14.6% だった。

Table 2 Flour composition

		White sorghum flour	Wheat flour ¹⁾	Rice flour ¹⁾
Protein	[g/100g]	7.9	11.8	6.0
Fat	[g/100g]	1.7	1.5	0.7
Starch	[g/100g]	74.5	66.5	74.2
Amylose [% of starch in 100g]		27	25	20
Amylopectin [Same as above]		73	75	80

1) Wheat flour and rice flour values were obtained from the Standard Tables of Food Composition in Japan¹⁷⁾. The ratio of amylose to amylopectin in 100 g of starch was obtained from the Encyclopedia of FOOD¹⁸⁾.

(2) 糊化特性

RVA によって得られた糊化特性値を Table 3 に、粘度の代表的な軌跡を Fig. 2 に示す。糊化開始温度は、コントロールは 70.6°C だった。SFE-4000、SE-50 を添加すると糊化開始温度は上昇傾向を示したが、MCE-4000 を添加すると 67.0°C に低下し、有意差が認められた ($p < 0.05$)。最高粘度は MCE-4000 を添

加したときが最も高く、SFE-4000 を添加した場合はコントロールと同程度で、SE-50 を添加した場合にはコントロールより低下する傾向を示した。ブレイクダウンは MCE-4000 を添加すると増加傾向を示したが、SFE-4000 添加すると減少傾向を示し、SE-50 添加では有意に減少した ($p < 0.05$)。しかしセットバックの値は MCE-4000 と SFE-4000 を添加した場合には変化せず、SE-50 を添加した場合は最も値が低く、他との間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、SE-50 を添加した場合、最終粘度も最も低かった ($p < 0.05$)。MCE-4000 を添加した場合、最終粘度は最も高く、コントロールとの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。最低粘度は、MCE-4000 と SFE-4000 を添加すると増加した ($p < 0.05$)。

Sun ら¹⁹⁾は、米澱粉の糊化特性を検討した中で、HPMC を添加してもピーク粘度、最低粘度にほとんど影響を及ぼさなかったと報告している。また、HPMC 分子の主鎖にそって突出する疎水性のメトキシ基、ヒドロキシプロポキシ基は、分子内の水素結合を減少させ、その結果、ゲル強度を弱める可能性があることを指摘している。SFE-4000、SE-50 を添加した場合、Sun らの報告と同様に、ピーク粘度にはコントロールと比較して有意差が認められず、最低粘度は、SFE-4000 を添加すると増加したが ($p < 0.05$)、SE-50 を添加しても差がなかった。

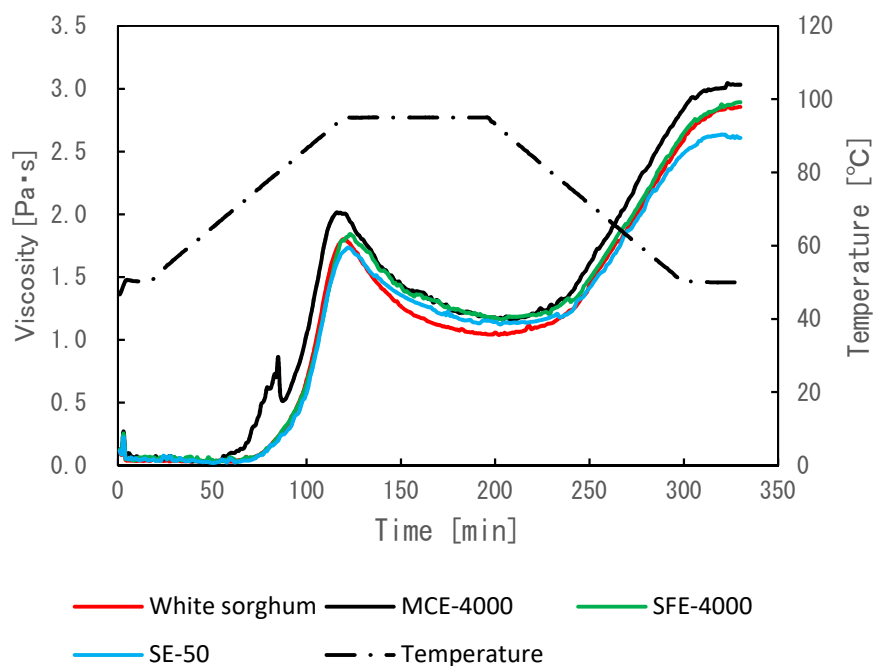


Fig. 2 Pasting curves of white sorghum flour

Table 3 Pasting properties

	PT [°C]	PV [mPa · s]	MV [mPa · s]	BD [mPa · s]	SB [mPa · s]	FV [mPa · s]
Control	70.6±0.7 a	1789±23 bc	1025±16 a	764±10 ab	1824±9 a	2849±17 b
MCE-4000	67.0±0.2 b	2055±37 a	1219±67 b	836±34 a	1816±64 a	3035±3 a
SFE-4000	71.6±0.3 a	1856±34 b	1160±42 b	696±75 bc	1775±42 a	2935±64 ab
SE-50	72.1±0.9 a	1721±16 c	1117±7 a	604±9 c	1513±29 b	2630±30 c

PT: Pasting temperature, PV: Peak viscosity, MV: Minimum viscosity, BD: Break down, SB: Set back, FV: Final viscosity. Each value represents the mean ± S.D. (n=3). ab: In the same column on the table, means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

(3) 動的粘弾性

3種の増粘多糖類を添加して調製した生地 of 温度依存性の代表的な軌跡を Fig. 3-1 に示す。貯蔵弾性率(G')のピークは、コントロールが最も高く、次いで MCE-4000、SE-50、SFE-4000 を添加した生地の順となった。 G' の図を、一部拡大した図が Fig. 3-2 である。MCE-4000 を添加すると G' の上昇が速くなり、50°C前後でコントロールを超えて増加する傾向を示した。Sarker²⁰⁾によると、MC は 55°C付近から急激に粘度が上昇すると報告されており、MCE-4000 を添加した生地の粘度軌跡はそれと合致している。一方、SFE-4000 と SE-50 を添加した生地は、初期にはコントロールを上回っていたが、40°C前後でコントロールの方が高くなり、測定 of 最後まで低い値を示した。この結果から、SFE-4000 と SE-50 は G' の増加に寄与していないと考えられた。

損失弾性率(G'')は、 G' と同様にピークの値はコントロールが最も高く、次いで MCE-4000、SE-50、SFE-4000 を添加した生地の順だった。 G'' と $\tan \delta$ の曲線にはいくつか変曲点が認められた。Fig. 4 に G'' と $\tan \delta$ を示す。増粘多糖類を添加した場合、MCE-4000 を添加した生地の $\tan \delta$ の変曲点は 54°C付近だった。SFE-4000 を添加した生地は 58°C付近、SE-50 を添加した生地は 60°C付近に変曲点が認められ、これらは、添加した各増粘多糖類のゲル化開始温度を反映していると考えられた。また、 $\tan \delta$ と G'' ともに 68°C付近に変曲点が認めら

れ、68°Cは RVA で測定したホワイトソルガム粉の糊化開始温度に近く、その影響が考えられた。

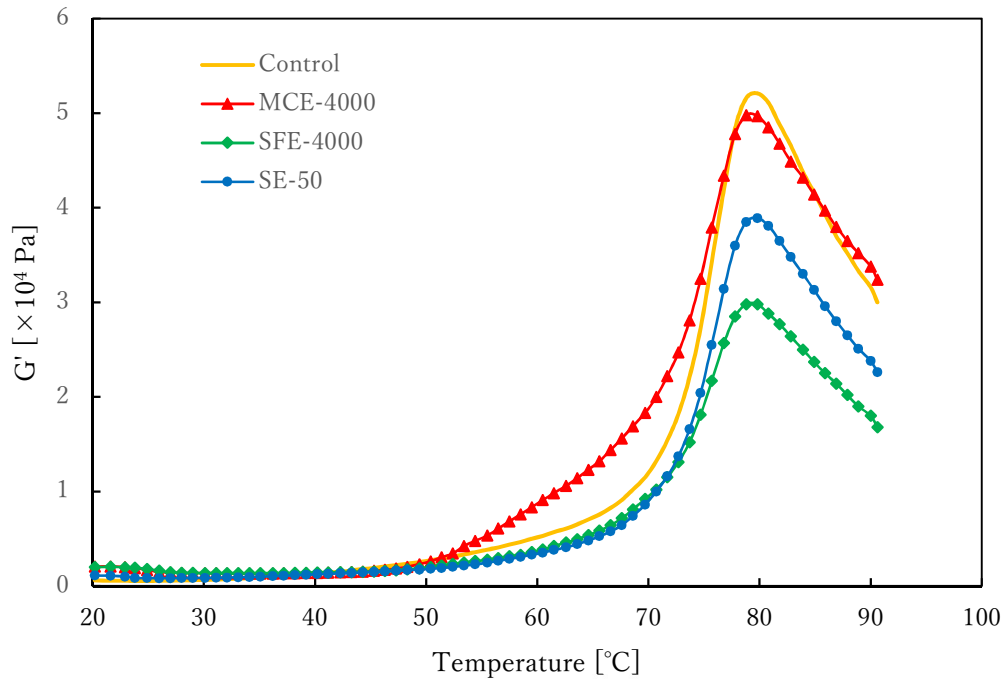


Fig. 3-1 Dynamic viscoelasticity: Temperature dependence (Storage modulus G')
 Control: White sorghum dough(—), MCE-4000 1.25% added dough(▲), SFE-4000 1.25% added dough(◆), SE-50 1.25% added dough(●).

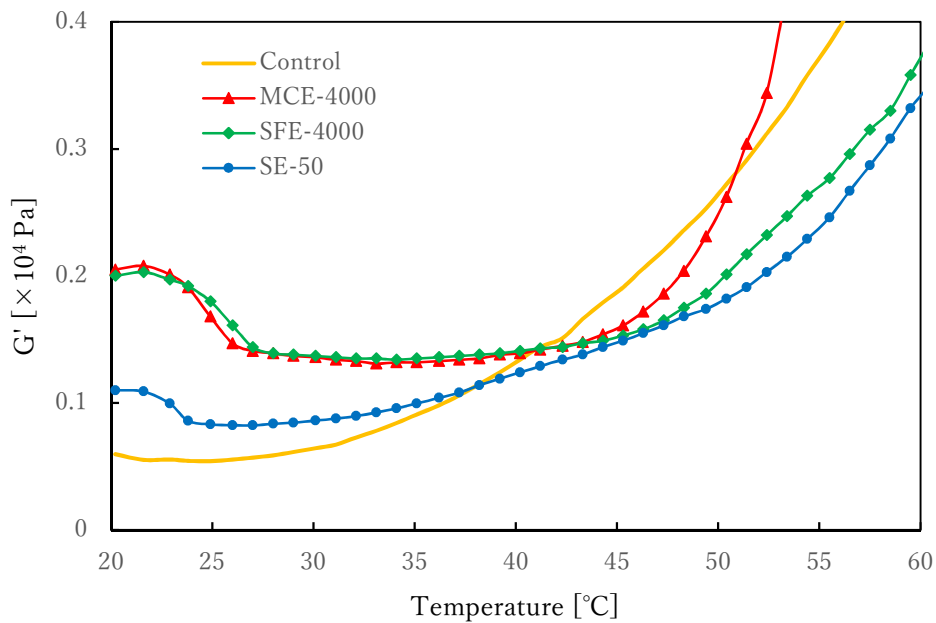


Fig. 3-2 Enlarged view of the 20-60°C range from Fig. 3-1

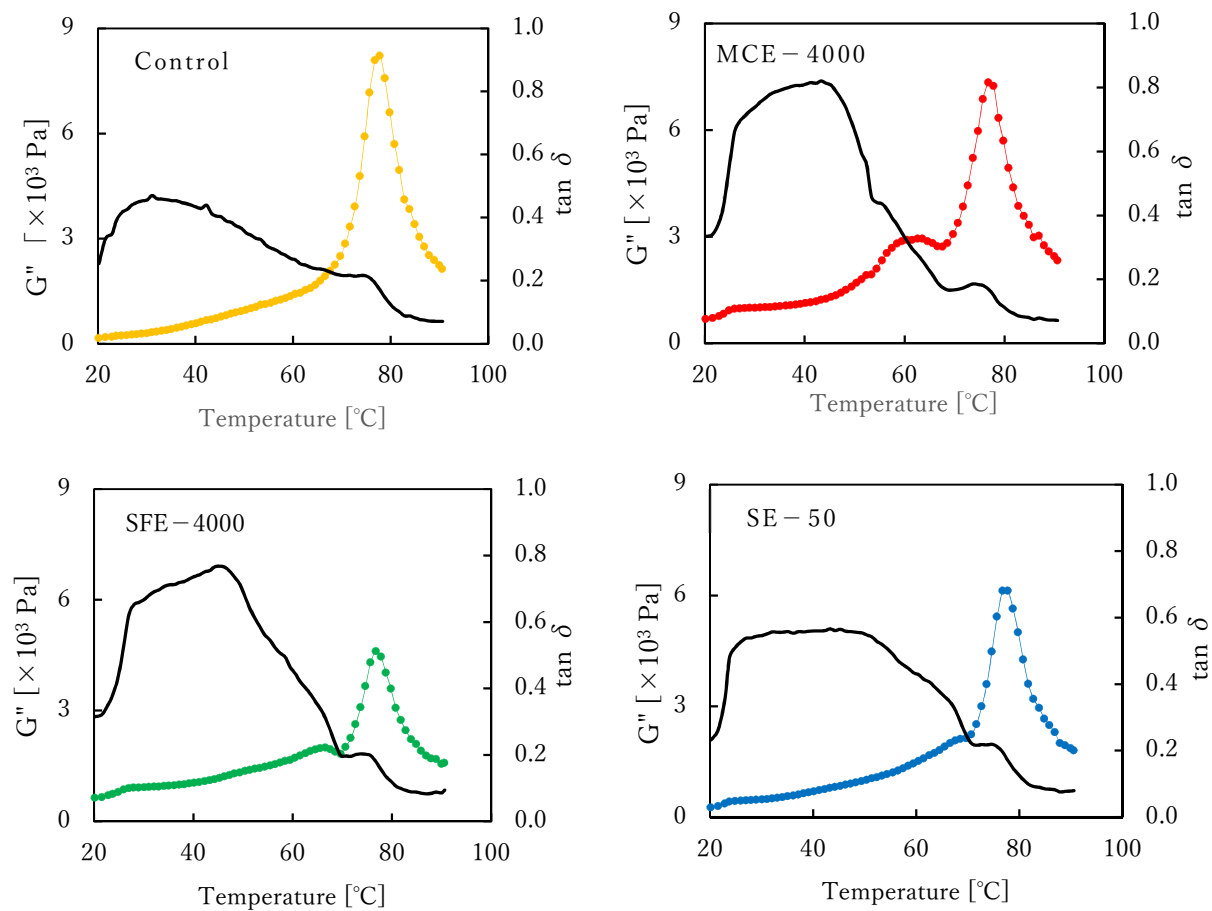


Fig. 4 Relationship between loss modulus and $\tan \delta$

Loss modulus (●—), $\tan \delta$ (—)

(4) 発酵試験および、発酵時間の検討

ホワイトソルガム粉に MCE-4000 を 1.25% 添加して調製した生地の発酵試験を行った。結果を Fig. 5 に示す。発酵開始から 70 分経過後に高さはピークに達し、その後は維持した。そこで総発酵時間を 60 分と 70 分に設定し、一次発酵と二次発酵の時間を検討した。

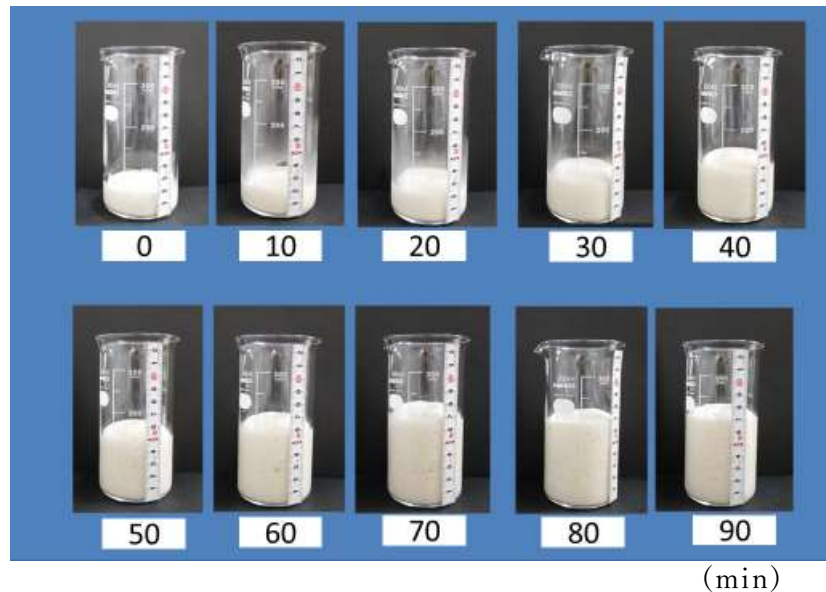


Fig. 5 Fermentation test

その結果、二次発酵の時間が長いほどパンの比容積の値は増加する傾向が認められた。総発酵時間 60 分で検討したパンの写真を Fig. 6 に示す。また、発酵時間とパンの比容積の関係性を Fig. 7 に示す。ごく簡単なパン調製は、生地の調製、一次発酵、パンチ（ガス抜き）、成型、二次発酵、焼成というプロセスで行われる。小麦パンでは、二次発酵の時間がパンの品質に影響を及ぼすことが報告されている²¹⁾。しかし、雑穀粉の場合、コントロールでは二次発酵での膨らみを維持できず、焼成中にケービングを起こした。増粘多糖類を添加した場合、二次発酵の時間が長いとパンの比容積は大きくなるものの、クラムは気泡が不均一で粗かった。そこで、一次発酵のみで製パン試験を実施した。Fig. 8 にパンの状態を示す。



Fig. 6 Effect of combination of fermentation times on bread crumb
 Fermentation time: Primary fermentation time - secondary fermentation.

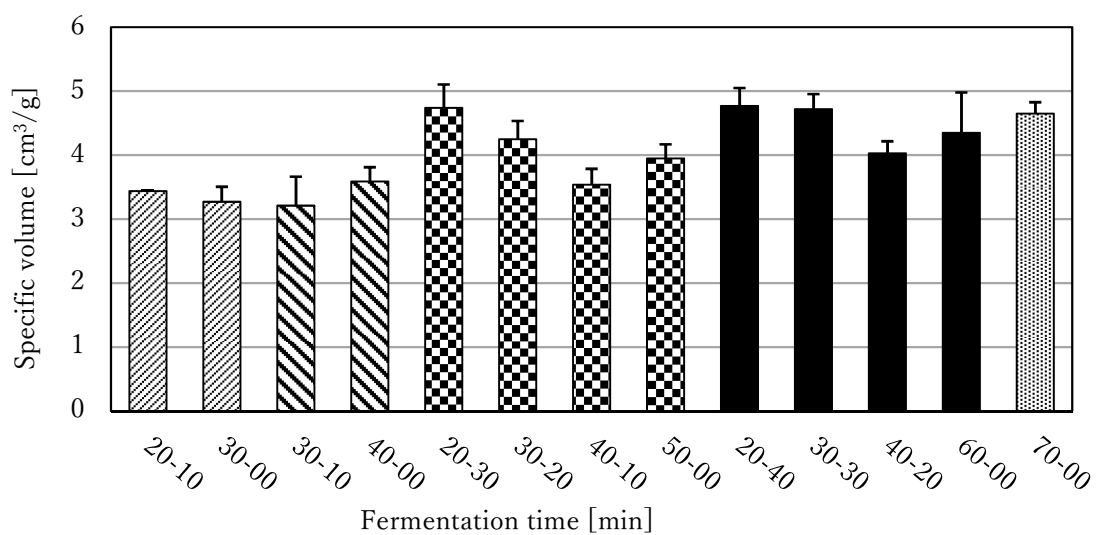


Fig. 7 Relationship between combination of fermentation time and specific volume
 Bread prepared by adding 1.25% MCE-4000 to white sorghum flour.
 Fermentation time: Primary fermentation time - secondary fermentation.
 Each value represents the mean \pm S.D. (n=5-8)

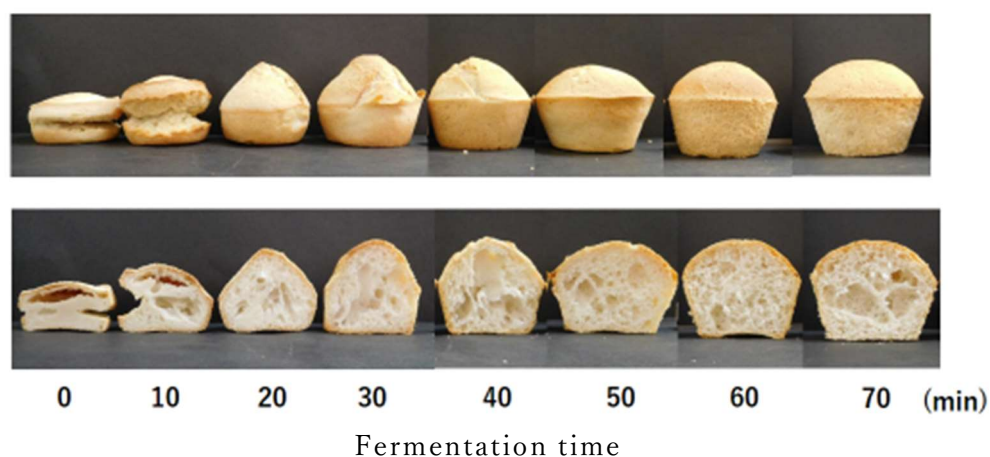


Fig. 8 Effect of fermentation time on bread crumb

70 分間発酵すると、パンの比容積は増加傾向を示したが、クラムのすだちは粗くなり、60 分間発酵した方が整っていた。そこで、パンチを実施せず、60 分間発酵することにした。

(5) 食パンの比容積と力学的特性

ホワイトソルガム粉に、3 種のメトローズを 1.25% 添加して調製したパンの断面写真を Fig. 9 に示す。コントロールのパンはケービングを起こし、焼成後のパンの高さは発酵後より減少傾向が認められた。SE-50 を添加した場合は、発酵後そのまま膨らみが増加せずに焼き上がった。MCE-4000 と SFE-4000 を添加すると焼成中も膨らみが増しパンの体積は増加した。コントロールと SE-50 を添加したパンは気泡を形成する膜が厚く、どっしりとしたパンだった。MCE-4000 と SFE-4000 を添加したパンはコントロールと比較すると気泡が多く、気泡を構成する膜は薄かった。SFE-4000 を添加したパンは MCE-4000 を添加したパンと比べて気泡が粗かった。

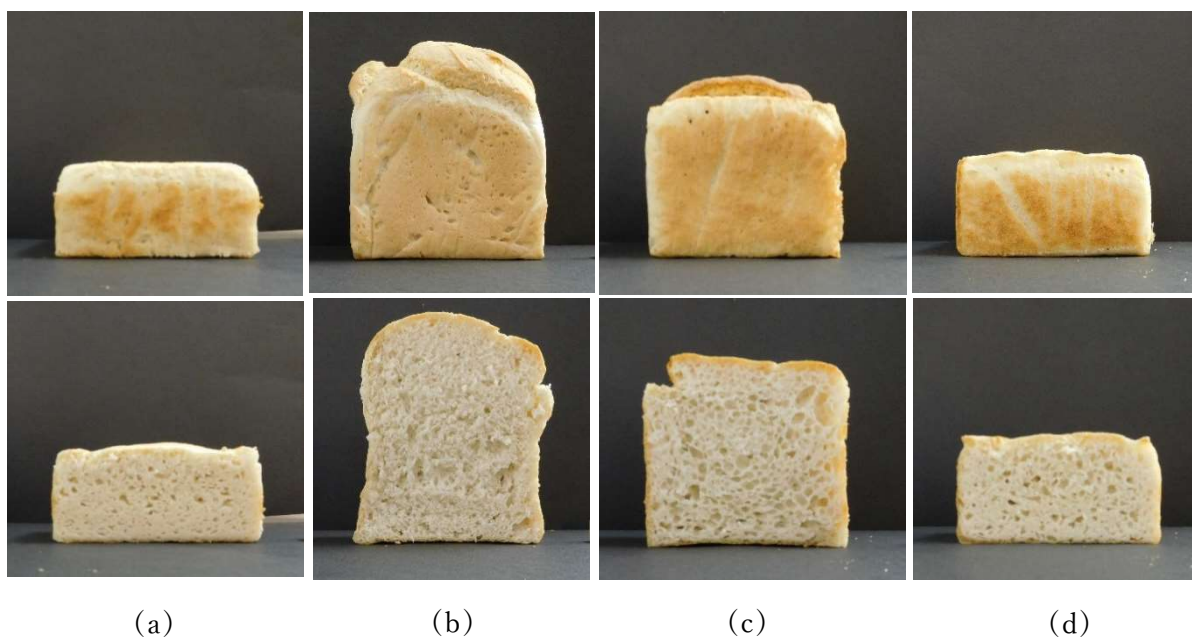


Fig. 9 Cross section images of bread prepared with white sorghum flour
Control: White sorghum bread (a), MCE-4000 added bread (b), SFE-4000
added bread (c), SE-50 added bread (d).

比容積とテクスチャー測定値から求めたかたさと凝集性、および、25%圧縮時の応力を Fig. 10 に示した。SE-50 を添加したパンの比容積は $1.68 \text{ cm}^3/\text{g}$ で、コントロールの比容積 $1.49 \text{ cm}^3/\text{g}$ と比較して有意差は認められなかった。MCE-4000、SFE-4000 を添加すると比容積の値は増加し、コントロールおよび、SE-50 を添加したパンと比較して有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、かたさは MCE-4000、SFE-4000 を添加すると減少して軟らかくなり ($p < 0.05$)、凝集性は増加した ($p < 0.05$)。25%圧縮時の応力は、テクスチャーのかたさと同様の傾向を示した。

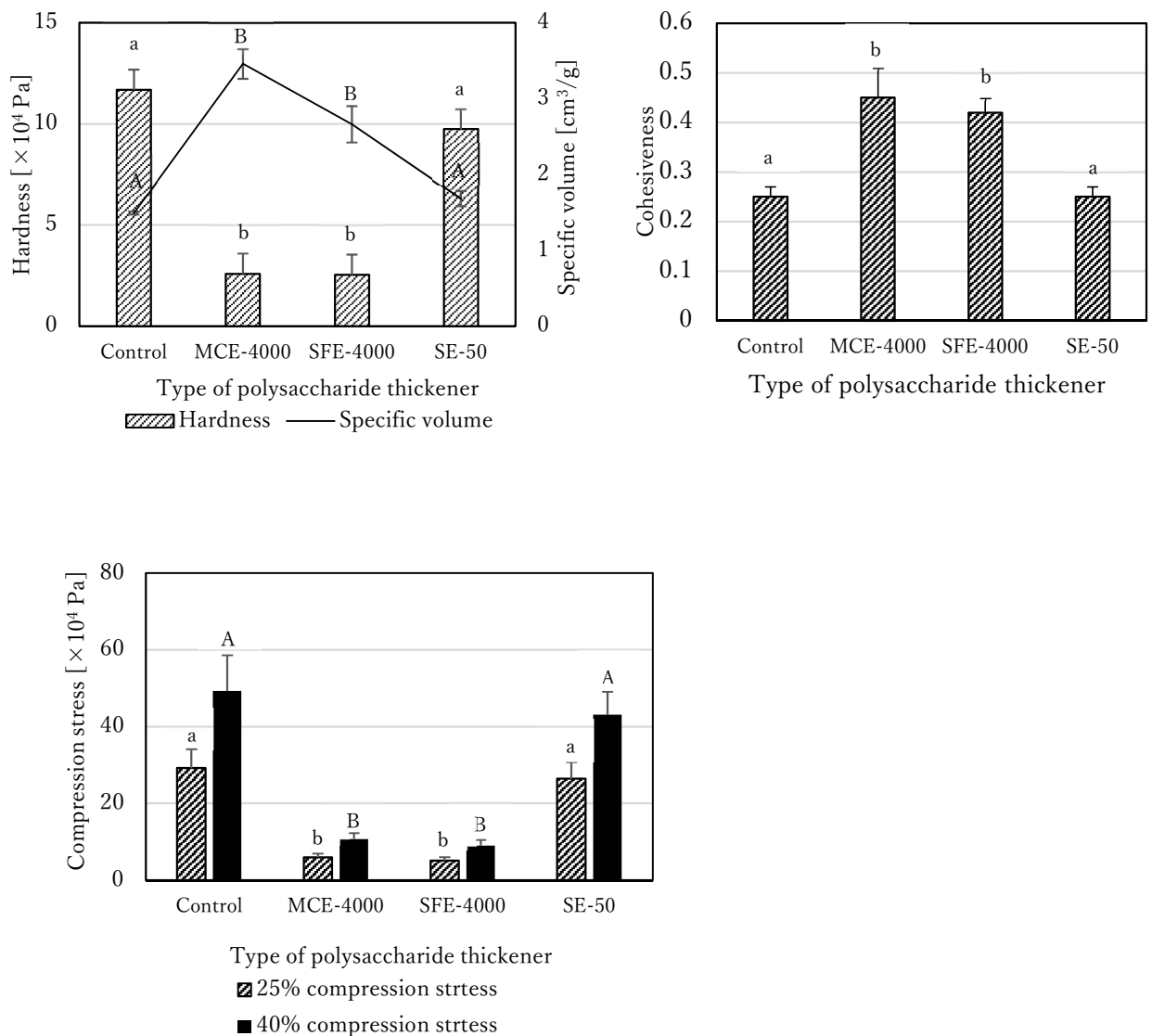
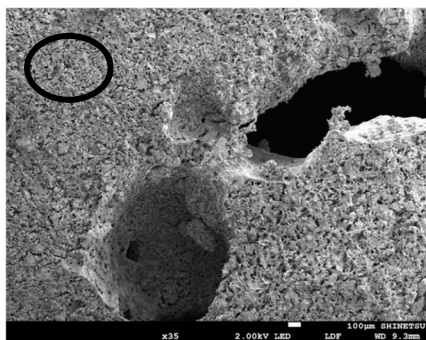


Fig. 10 Effect of thickener on texture and mechanical properties of bread
 Each value represents the mean \pm S.D. (n=13-21, specific volume: n=4-5)
 AB, ab: Means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

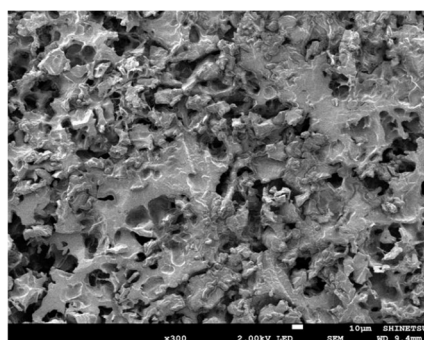
(6) 走査型顕微鏡による組織観察

コントロールと、MCE-4000を添加したパンのクラム中央部分を撮影した画像を Fig. 11 に示す。35倍で撮影した画像の丸で囲った部分を300倍で撮影した。コントロールでは、澱粉粒の露出が観察された。MCE-4000を添加したパンは、コントロールと比較すると滑らかで澱粉粒の露出が少なかった。

[Control]

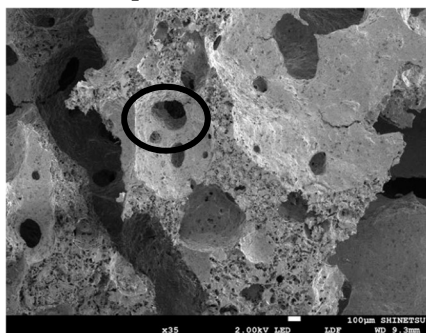


(a)

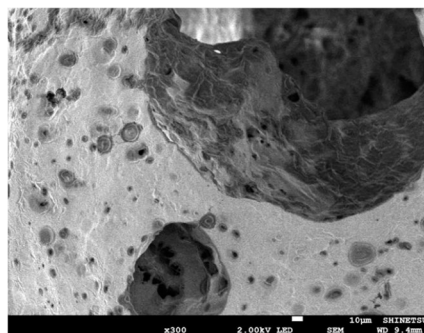


(b)

[MCE-4000]



(c)



(d)

Fig. 11 SEM photographs of bread crumb

Control: White sorghum bread (a), MCE-4000 added bread (c)

(b)(d) are enlarged the circled part of (a) and (b) ($\times 300$).

(7) 食パンの保存性

クラムのテクスチャー特性値の経時変化を Fig. 12 に示す。コントロールは1日経過するとかたくなり、焼成当日と比較して有意差が認められた ($p < 0.05$)。一方、MCE-4000 を添加したパンは1日目、3日目ともに柔らかさを維持出来た。焼成当日の凝集性は、MCE-4000 を添加したパンは、コントロールと比較して有意に高い値だったが ($p < 0.05$)、1日経過するとコントロールと同程度まで急激に低下した ($p < 0.05$)。1日経過以降は変化が認められなかった。凝集性の低下は、ふわふわした食感の低下やクラムの弾力性の低下を反映していると考えられ、1日経過した時点でクラムがかなり脆くなったと推察された。

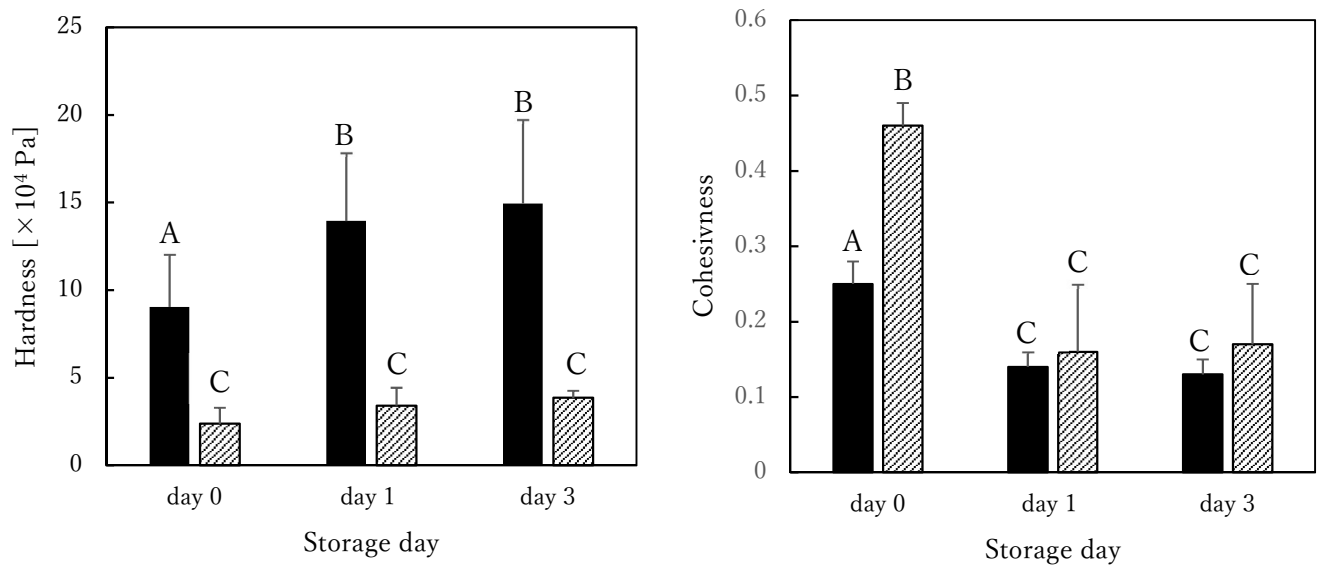


Fig. 12 Effect of storage days on bread crumb

Each value represents the mean \pm S.D. (n=16-22). ABC: Means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

Control: White sorghum bread (■), MCE-4000 added bread (▨).

クラムの X 線回折図を Fig. 13 に示す。コントロールは調製 1 日目から $2\theta = 17^\circ$ 付近に大きなピークが認められ、回折図形が変化した。しかし、MCE-4000 を添加したパンの回折図形には変化が認められなかった。クラムの硬さの変化、および X 線回折の図形の変化から、コントロールは、急速に澱粉の老化が進んだことが推察された。一方で、MCE-4000 パンは、クラムは 3 日間保存しても軟らかく X 線回折の図形も変化していないことから、MCE-4000 を添加することで澱粉の老化は抑制できたことが示唆された。

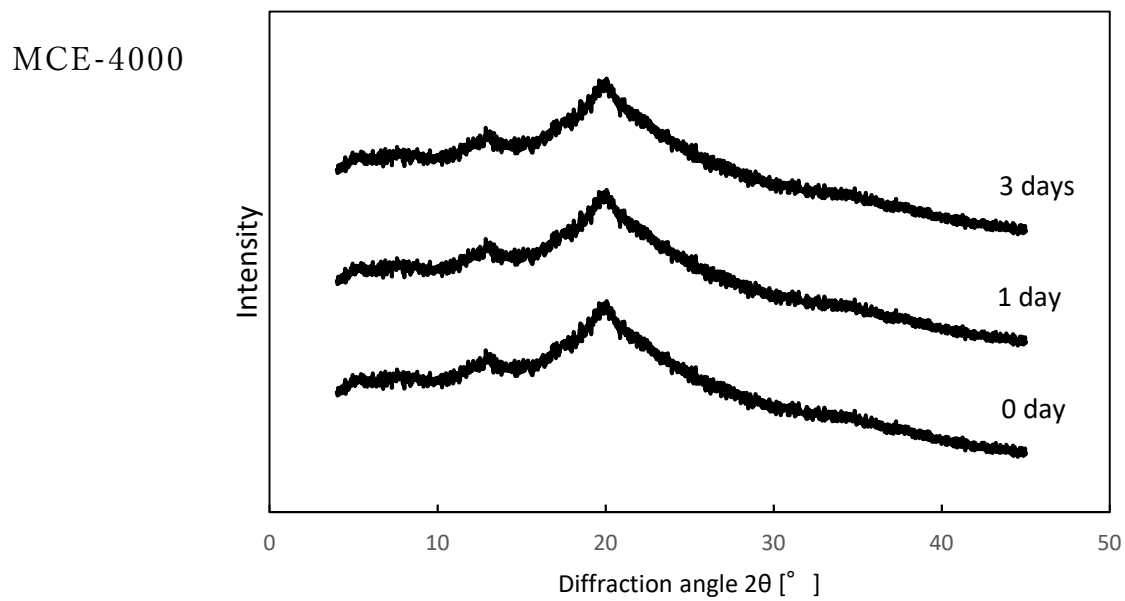
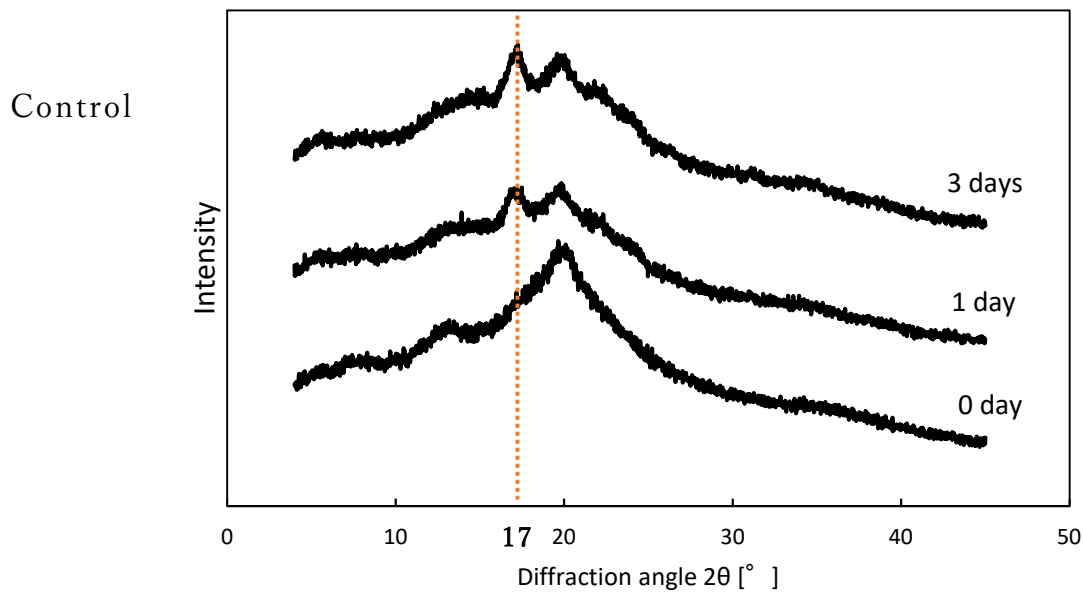


Fig. 13 X-ray diffraction pattern

パンの保存性については、界面活性剤などの老化抑制効果が知られ、利用されている²²⁾。本研究では、MCE-4000を添加して調製したパンは3日経過後も軟らかさを維持できた。添加したMCE-4000の高い保水性によりクラムの軟らかさが維持され、もう1つの性質である乳化性によって老化が抑制出来たのではないかと推察した。しかし、糊化度の測定結果は、コントロールは0日目が64.2%、1日経過後が41.9%、3日経過後が41.4%だったのに対し、MCE-4000は、0日目が87.1%、1日経過後が38.1%、3日経過後が39.0%だった。この結果から、当日の糊化度はMCE-4000が高かったものの、その後はMCE-4000の方が老化は早く進んでいたと考えられた。この矛盾については、さらに検討を進めていきたい。

澱粉の老化については、アミロース含量との関係性について多くの研究があり、アミロース含量が多いと澱粉は老化しやすいといわれている^{12,23)}。本研究で使用したホワイトソルガム粉のアミロース含量は23%である。これは米粉でいうと中程度の含量である。また、小麦粉や米粉ではアミロペクチンの分子鎖構造と澱粉の老化との関係が議論されている¹²⁾。雑穀粉についてもキヌア²⁴⁾などにアミロペクチンの構造について報告がある。本研究においてもパンの老化特性と、アミロースやアミロペクチンの構造との関連付けが必要だと考えられ、今後の検討課題の1つである。

(8) 増粘多糖類の効果

本研究では、MCE-4000を添加すると最も膨らみが良く軟らかいパンが調製できた。MCE-4000の溶解温度は用いた3種の中で最も低く、ゲル化温度も低い。MCE-4000を添加することによって、生地に適度な粘りが付与され、発酵で生じた気泡を維持することが可能になったと推察された。また、焼成中に粉の糊化開始に先立ってMCE-4000のゲル化が始まり、発酵から焼き上がりに至るまでに強いゲルを構成して、気泡を閉じ込めることができたのではないかと考えられる。ホワイトソルガム粉は澱粉の含量も十分にあるため、焼成中にも膨らみを増し、パンの骨格を維持することができた。MCは、セルロースを構成するグルコースの分子骨格に最大で3つのメチル基で置換したものであり、その部分が疎水結合をおこして強いゲルを形成する²⁵⁾。一方で、HPMCはメトキシ基とともにヒドロキシプロピル基で置換するため競合し、メトキシ基の3

置換部分が少なくなり、疎水和の部分が減る。また、ヒドロキシプロピル基は水和を維持しようとするため、置換度が増加すると軟らかいゲルを形成するといわれている。そのため、SFE-4000 を添加したパンは発酵によって生じた気泡を維持する力が弱く、MCE-4000 ほどにはパンが膨化しなかったのではないかと考えられる。

(9) 製パン性と糊化特性値の関係性

糊化特性値と製パン性の指標として比容積、テクスチャー特性値のかたさについて関係性を検討した。解析には、コントロール、MCE-4000、SFE-4000、SE-50 を添加した試料の各指標の平均値を用いた。糊化特性値とパンの比容積との関係性を Fig. 14 に示す。ピーク粘度 ($r=0.93$)、最低粘度 ($r=0.92$) ともに強い正の相関が認められ、粘度が上昇すると比容積は増加した。また、独立変数を最終粘度、従属変数を比容積として回帰分析したところ、 $y=2E-0.5X^2-0.131X+179.85$ の関係式が成り立った ($R^2=0.941$ 、 $p<0.05$)。RVA 測定では温度の上昇に伴って粘度が増加し、やがて澱粉粒が崩壊することで粘度が低下する。糊化特性の結果からは、ピーク粘度が高くてその後の粘度低下が小さく、より最終粘度が高いとパンの膨らみが良いと考えられた。粘度低下が小さいということは、ピーク粘度と最低粘度の差を示すブレイクダウン値が低いことになるが、比容積とブレイクダウンの間には相関が認められなかった。

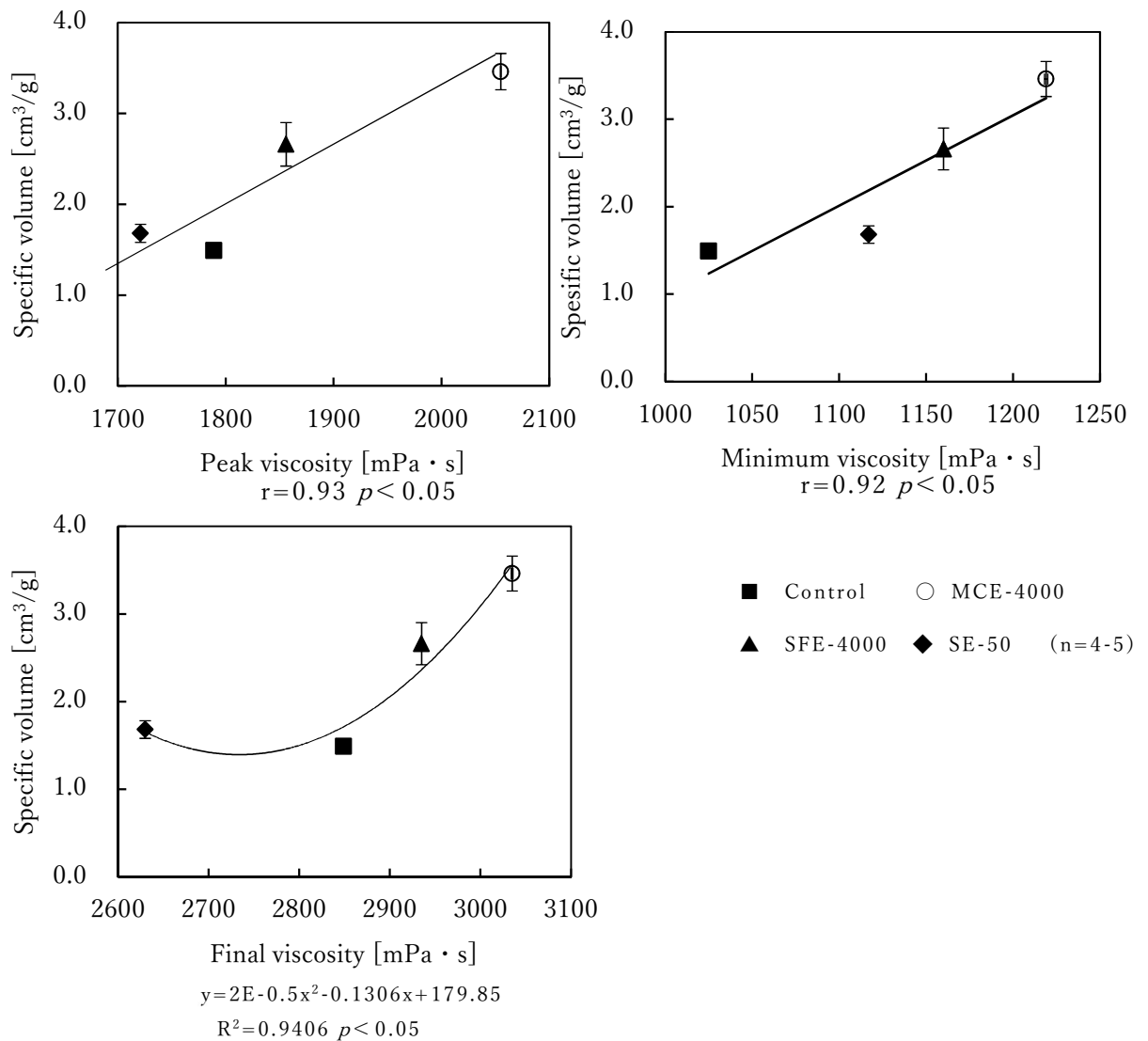


Fig. 14 Relationship between the specific volume and RVA value for white sorghum flour and bread with thickener added

(10) 製パン性と生地の動的粘弾性の関係性

香田ら²⁶⁾によると、製パン性に適した生地であるかどうかを判断する簡単な方法の1つは、昇温時の貯蔵弾性率の変化を測定することである。貯蔵弾性率の温度依存性は初期の貯蔵弾性率 G'_0 と、最大値を示す温度 T_m で特徴づけられるとし、 G'_0 は生地の硬さを示す。Murakamiら²⁷⁾は、米粉の分級によってその効果を検討し、 G'_0 には製パンに適した領域が存在するとしている。そこで、動的粘弾性の指標として、初期の貯蔵弾性率 G'_0 、 G' の最大値、 G'' の最大値と、

製パン性の指標として比容積、テクスチャー特性値のかたさの平均値について関係性を検討した。 G'_0 は、温度依存性測定 of 初期、 20°C における G' の値の平均値を用いた。結果を Fig. 15 に示す。 G'_0 と比容積の間には正の相関が認められた($r=0.93$)。また、 G'_0 とかたさには負の相関が認められた($r=-0.99$)。比容積とかたさの間にも相関が認められ($r=-0.93$)、 G'_0 が高いほど比容積が大きく軟らかいパンが調製できることが示唆された。

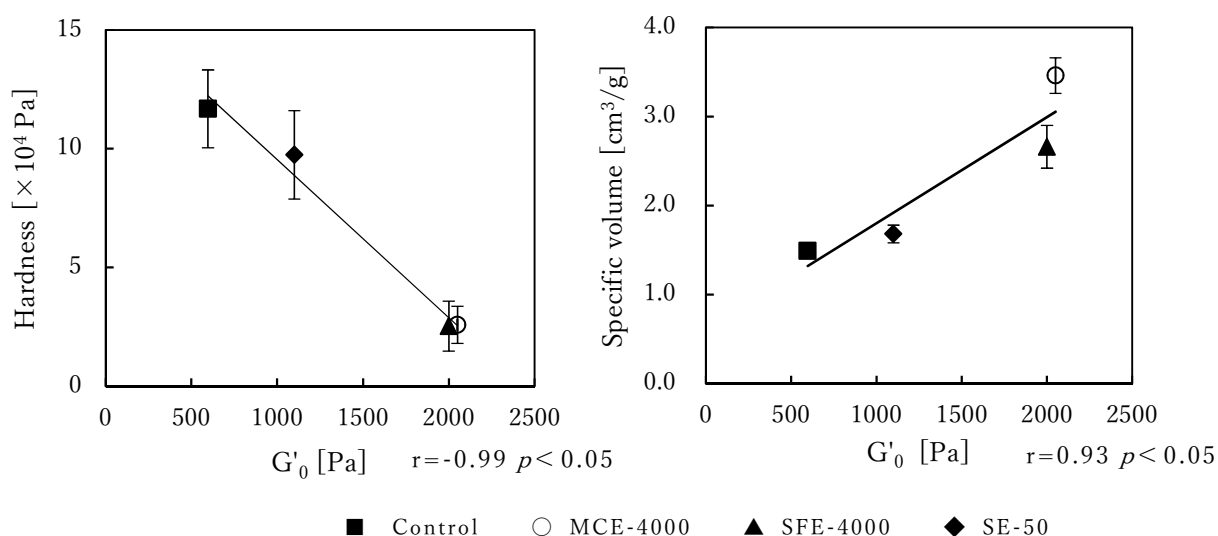


Fig. 15 Relationships between initial storage modulus (G'_0) and hardness and specific volume.

G'_0 : Storage modulus was determined at 20°C . (Hardness: $n=13-21$, Specific volume: $n=4-5$)

ホワイトソルガム粉に増粘多糖類を添加して食パンを調製し、膨らみを改善することが出来た。最も効果が高かった MCE-4000 を添加したパンについては、家庭用製パン機で調製した小麦粉パンを基準として官能評価の予備試験を実施した。方法は両極 5 段階評価法を用いた。なお、官能評価の実施にあたっては人を対象とする研究に関する本学研究倫理委員会の承認を得た（承認番号 2918-003）。その結果、改善点はぼそぼそとした食感と風味だった。食味の評価は悪くはなく、75%のパネルが主食用のパンとして食べても良いと評価した。現在、食感と風味を改善するために検討を進めている。今後は、さらに MCE-4000 を添加したパンの嗜好性向上を図っていきたい。

4. 要約

本章では、ホワイトソルガム粉を主材料としてパンを調製するために、増粘多糖類を添加して、雑穀粉の糊化特性と生地の特徴が製パン性に与える影響を検討した。雑穀粉はホワイトソルガム粉を用いた。糊化特性では、ピーク粘度、最低粘度、最終粘度とパンの比容積の間に関係性が認められた($p < 0.05$)。糊化特性の結果からは、ピーク粘度が高くてその後の粘度低下が小さく、最終粘度が高いとパンの膨らみが良いと考えられた。動的粘弾性の温度依存性では、初期の貯蔵弾性率 (G'_0) と比容積、かたさの間に関係性が認められ($p < 0.05$)、 G'_0 が高いほど比容積が大きく軟らかいパンが調製できることが示唆された。パンの保存性を検討したところ、増粘多糖類がもつ保水性の高さによってパンは硬くなりにくかった。パンの老化を調べるために X 線回折を行ったところ、MCE-4000 を添加したパンは $2\theta = 17^\circ$ 付近にピークが出現せず、MCE-4000 の添加によって澱粉の老化が抑制されたことが示唆された。しかし、澱粉の糊化度を測定した結果はそれと相反し、さらに検討が必要であった。

文献

- 1) 井上直人, 倉内伸幸(2010), 「雑穀入門」, 日本食糧新聞社, 東京, pp. 27-35
- 2) アメリカ穀物協会日本事務所, ヘルシー雑穀米国産ソルガムきび, ソルガムきびについて, <https://sorghum.jp/>(2020/3/25 閲覧)
- 3) 土屋京子, 池田早苗(2016), ホワイトソルガム粉の製パン性について, 東京家政大学研究紀要 2 自然科学, **56**, 33-38
- 4) Akin, P. A. and Miller, R. A. (2017), Starch-hydrocolloid interaction in chemically leavened gluten-free sorghum bread, *Cereal Chemistry*, **94**, 897-902
- 5) 土屋京子 (2017) , ホワイトソルガム粉のパン品質に対する添加水分の影響の違い, *New Food Industry*, **59**, 29-37
- 6) Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C. and Santiago, L. G. (2012), Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking, *International Journal of Food Science and Nutrition*, **63**, 491-497
- 7) 田中康夫, 松本博(1992), 「製パンの科学(I)製パン材料の科学」, 光琳, 東京, pp.60-61
- 8) 石井和美, 早川あつ美, 藤井恵子(2018), 雑穀で調製したグルテンフリーパンの製パン性, 日本調理科学会誌, **51**, 89-96
- 9) 石井和美, 小林三智子(2018), ホワイトソルガムパンの加工性と嗜好性向上の検討, *New Food Industry*, **60**, 19-25
- 10) 大羽和子, 川端晶子ほか(2017), 「調理科学実験」, 学建書院, 東京 pp.12-13
- 11) 井川桂子(2005), 米飯の初期老化における多面的評価, *Journal of Applied Glycoscience*, **52**, 293-298
- 12) 田中康夫, 松本博(2009), 「製パンの科学(I)製パンプロセスの科学」, 光琳, 東京, pp.249-253
- 13) JAIMA(社)日本分析機器工業会, X線回折装置の原理と応用, <https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/xray/xrd/>,(2020/2/14 閲覧)
- 14) 三好恵真子, 糸野恵子, 大久保昌子, 高橋雅江, 中浜信子(1992), X線回折およびレオロジー測定による澱粉ゲルの老化過程の比較検討, 澱粉科学, **39**,

253-260

- 15) 中村道徳, 貝沼圭二編(1998), 「生物化学実験法 19 澱粉・関連糖質実験法」, 学会出版センター, 東京, pp.188-192
- 16) 高橋誠, 本間紀之, 諸橋敬子, 中村幸一, 鈴木保宏 (2009), 米の品種特性が米粉パン品質に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **56**, 394-402
- 17) 香川明夫監修(2019), 七訂 食品成分表 2019 本表編, 女子栄養大学出版部, 東京
- 18) 杉田浩一, 平宏和, 田島眞, 安井明美(2017), 新版 日本食品大事典, 医歯薬出版, 東京, pp.292, 299
- 19) Sun, J., Zuo, X. B., Fang, S., Xu, H. N., Chen, J., Meng, Y. C. and Chen, T. (2016), Effects of cellulose derivative hydrocolloids on pasting, viscoelastic, and morphological characteristics of rice starch gel, *Journal of Texture Studies*, **48**, 241-247
- 20) Sarkar, N. (1995), Kinetics of thermal gelation of methylcellulose and hydroxypropyl methylcellulose in aqueous solutions, *Carbohydrate Polymers*, **26**, 195-203
- 21) 岩瀬祥一, 三浦靖, 小林昭一(2006), 2次発酵条件を変化させたパン生地の物性と製パン性との関連性, 日本レオロジー学会誌, **34**, 147-156
- 22) 前掲 12) pp.254-258
- 23) 井ノ内直良, 不破英次(2003), 食品における多糖類の構造と物性(2)澱粉の構造と機能特性, *Foods & Food Ingredients Journal of Japan*, **208**, 895-902
- 24) Li, G. and Zhu, F. (2017), Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch, *Carbohydrate Polymers*, **164**, 396-402
- 25) 早川和久(2014), 水溶性セルロース誘導体, 繊維学会誌, **70**, 452-457
- 26) 香田智則, 西岡昭博(2017), グルテンを含まない米粉パンの製造技術, 日本調理科学会誌, **50**, 1-5
- 27) 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, *Journal of Applied Glycoscience*, **63**, 19-22

第 2 章

キヌア粉を使用したパンの創製

1. 緒言

キヌア (*Chenopodium quinoa* アカザ科アカザ属) は南米アンデス地方原産の雑穀(擬似穀物)で、ボリビアやペルーが生産主要国である。紀元前 3000 年にはすでに栽培されていたといわれており、南米インカ帝国では重要な食料として位置付けられていた¹⁾。アメリカ航空宇宙局(NASA)が「二十一世紀の主要食になる」と発表したことはあまりにも有名である。これをきっかけとして、キヌアは広く知られるようになった。また、2013 年は、国連が「国際キヌア年」と定め、キヌアのもつ可能性が評価された。最近では、その栄養価の高さと機能性の高さ^{2,3)}から、「スーパーフード」として紹介され、ブームが起こった。

キヌアについては、多くの研究があり、1999 年に、雑誌「食の科学」で「アマランスとキノア」の特集が生まれ、小西ら⁴⁻⁷⁾によって、その成分や生理活性機能、澱粉の構造、製パンへの応用など、幅広い内容が紹介されている。

雑穀の利用法で一番簡便でよく用いられる方法は、米に混ぜ込んで炊飯する方法である。キヌア粒は市販の雑穀ミックスなどによく用いられ、シリアルなどにも使用されている。しかし、雑穀が主材料として利用されることは少ない。そこで、雑穀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。雑穀粉は、小麦粉と比較して現代人に不足しがちなカルシウムや鉄などのミネラルや、食物繊維を多く含んでいる。また、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。

しかしながら、雑穀粉を主材料としたパンの研究は少なく⁸⁻¹¹⁾、小麦粉の一部を代替して製パン性を検討したものや、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が多¹²⁻¹⁵⁾。大迫ら¹⁶⁻¹⁸⁾は、キヌア全粒粉を使用し、スポンジケーキやパン、餅の一部をキヌア粉で代替して物性や食味特性を検討しているが、キヌアを主材料として製パン性を検討したものはほとんどない。

これまでに筆者は、数種の雑穀粉を使用して製パン性を検討してきた¹⁹⁾。キヌア粉で調製したパンは、その中でもクラムが良く整い、細かい気泡を保持していた。しかし膨らみは悪く、食感はぼそぼそして食味も特有のえぐみがあり、改善点は多い。そこで、本研究では、まずキヌアパンの膨らみを改善すること

を第一の目的とした。第 1 章と同様に、3 種の増粘多糖類を添加し、生地と製パン性に与える影響を検討した。

2. 実験方法

(1) 材料

キヌア粉（ペルー産 辻安全食品（株））を使用した。パンの原材料として、グラニュー糖（三井精糖（株））、家庭用製パン機の場合には無塩バター（よつ葉乳業）、食パン型の場合にはオリーブオイル（BOSCO Pure & mild 日清オイリオグループ（株））、食塩（（公財）塩事業センター）を使用した。増粘多糖類として MC 1 種（メトロース MCE-4000 信越化学工業（株））（以下 MCE-4000 と示す）、HPMC 2 種（メトロース SFE-4000、SE-50 同社製）（以下、SFE-4000、SE-50 と示す）を使用した。製パン性の検討にはドライイースト（低糖用）（フランス産 S. I. Lesaffre）を使用した。

(2) 家庭用製パン機による製パン試験

家庭用製パン機（BK-B67-WH（株）シー・シー・ピー）を使用し、既報²⁰⁾と同様の手順で、メトロース 3 種を使用して製パン試験を行った。配分を Table 1 に示す。まず、増粘多糖類とグラニュー糖を良く混ぜてさらにキヌア粉と混合した。製パン機のケースに蒸留水 120 g を入れ、食塩、無塩バター、砂糖を投入し、混合したキヌア粉を入れて粉の中央にイーストを入れた。早焼きコース（所要約 2 時間）で製パンし、焼成後は直ちに取出して網の上で放冷した。また、既報と同様の手順で比容積とテクスチャー特性を解析し、使用する増粘多糖類と使用量を検討した。

Table 1 Composition ratio

Ingredient	Weight (%)
Quinoa flour	100
Sugar	5
Salt	1
Dry yeast	2
Olive oil	5
Thickening polysaccharide	0.50~1.50
Distilled water	120

Baker's %

(3) 成分分析および粉体特性

キヌア粉のタンパク質含量、脂質含量、澱粉含量、みかけのアミロース含量、澱粉損傷度について、日本食品分析センターに依頼して分析した。粒子径分布の測定は、第 1 章と同様にした。

(4) 糊化特性の解析

キヌア粉のみで測定したものをコントロールとし、MCE-4000、SFE-4000、SE-50 をそれぞれ 1.50% 添加して粉試料とした。

茨城県産業技術イノベーションセンターに依頼し、ラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA-4 型 Newport Scientific 社）を使用して測定した。測定条件は第 1 章と同様である。計 22 分間の粘度－時間曲線を作成し、得られた曲線から粘度上昇開始温度（以下、糊化開始温度）（PT）、最高粘度（PV）、最小粘度（MV）、ブレイクダウン（BD）、セットバック（SB）、および最終粘度（FV）を得た。

(5) 生地調製の調製

第 1 章のホワイトソルガム粉と同様の方法で行った。生地の基本配合は、既報¹⁹⁾と同様にキヌア粉 100 g に対してグラニュー糖 5%、オリーブオイル 5%、食塩 1%、加水量 120%とした。

(6) 生地の動的粘弾性

調製直後の生地を試料として、レオメータ（MCR-502 （株）アントンパール）を用いて動的粘弾性を測定した。測定条件と方法は第 1 章と同様にした。

(7) 発酵時間の検討と食パンの調製

発酵時間の検討と食パンの調製も第 1 章と同様に行った。本章では、まず家庭用製パン機で製パン実験を行ったが、食パン型へ展開するにあたって、油脂をオリーブオイルに変更した。キヌア粉の場合も、増粘多糖類を添加すると発酵のピークは 70 分だった。そこで総発酵時間を 60 分と 70 分に設定し、一次発酵と二次発酵の時間を検討した。

(8) 食パンの比容積と力学的特性

食パンの比容積の算出とテクスチャー特使も第 1 章と同様に行った。

(9) 統計処理

測定は、糊化特性は 3 回測定、パンの調製は 4 から 5 回行って物性値を測定し、平均値と標準偏差を求めた。統計処理ソフト (SPSS Statistics Ver.21 IBM) を使用して分散分析を実施後に一元配置分散分析を行い、Bonferroni 法による多重比較によって検定した。また、相関は、ピアソンの相関係数を用いた。統計的有意水準は 5%未満とした。

3. 結果および考察

(1) 成分分析および粉体特性

キヌア粉の組成は、タンパク質が 11.9 %、脂質が 4.3 %、澱粉含量は 62.3 % だった。また、みかけのアミロース含量は 8 % と少なく、もち種に近いともいえる。また、鉄分は 3.9 mg で、小麦粉の 0.9 mg²¹⁾、米粉の 0.1 mg²¹⁾ と比較するとかなり多く、カルシウム含量も 43 mg と、小麦粉の 17 mg²¹⁾、米粉の 6 mg²¹⁾ と比較して多かった。澱粉損傷度は 5.5 % だった。粒度は、キヌア粉の d10 は 11.5 μm 、d90 は 223.7 μm 、d50 (メディアン径) は 65.5 μm だった。

(2) 添加する増粘多糖類の決定

家庭用製パン機で調製した食パンの断面写真を Fig. 1 に示す。

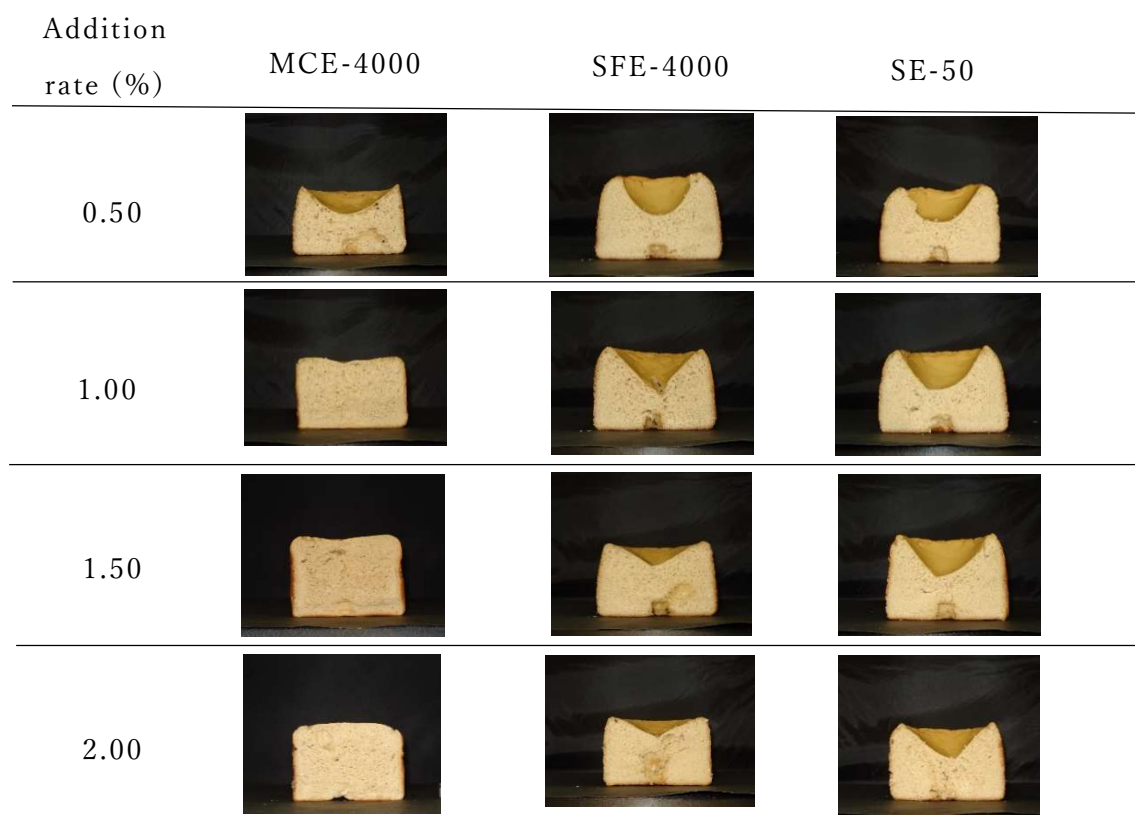


Fig. 1 Cross section images of bread prepared with quinoa flour

キヌア粉に SFE-4000 と SE-50 を添加して製パンするとケービングを起こした。添加量を増すとケービングは改善傾向を示したが、2.00%添加しても改善しなかった。MCE-4000 を添加すると、0.50%添加ではケービングを起こしたが、1.00%以上添加すると改善した。

そこで、MCE-4000 を添加したパンの体積とテクスチャーを測定した。Fig. 2 に比容積とテクスチャー特性値を示す。

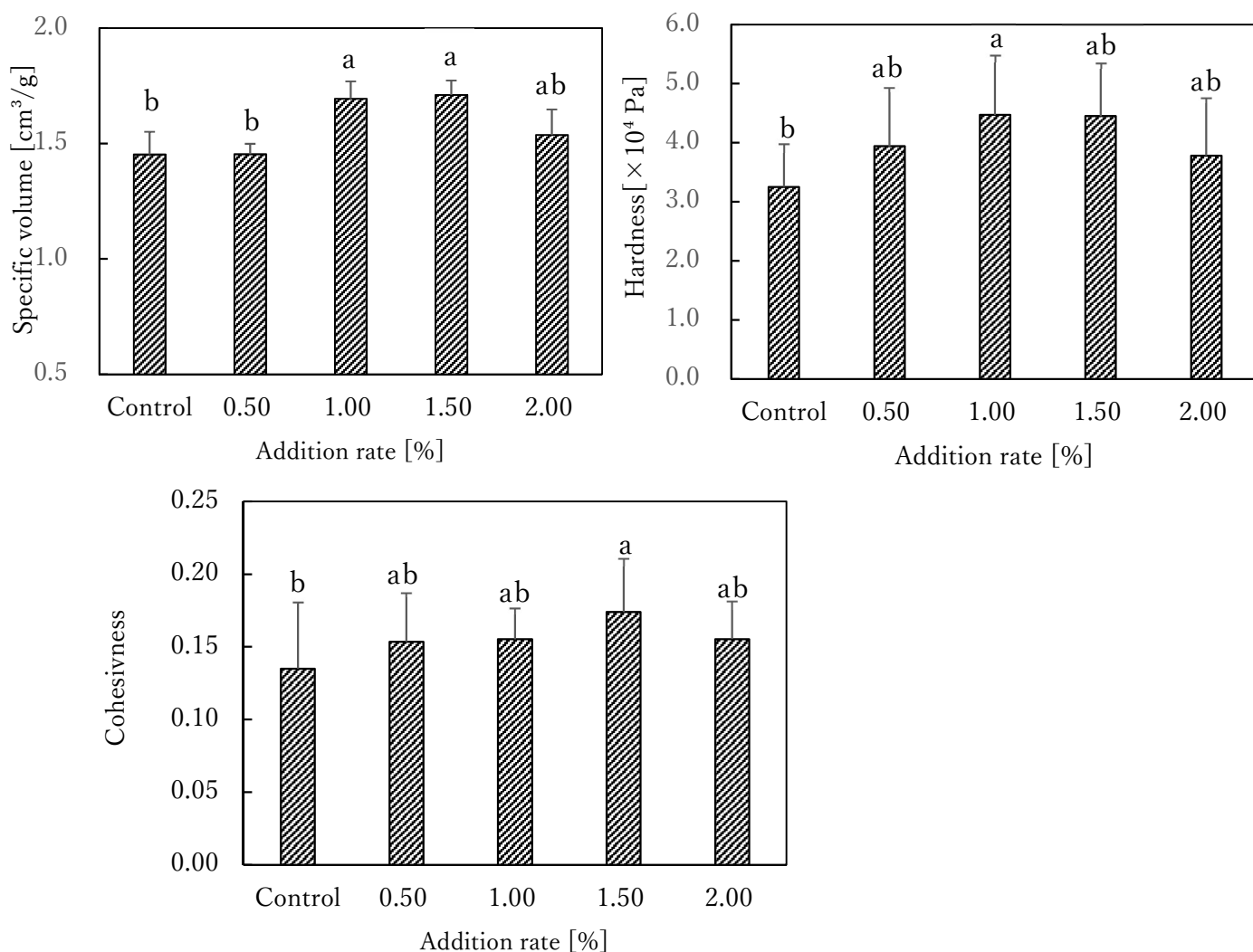


Fig. 2 Specific volume and texture of bread made by adding thickening polysaccharide

Each value represents the mean \pm S.D. (n=7-17, specific volume: n=4)

ab: Means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

MCE-4000 を 1.00%以上添加すると、比容積は増加し、コントロールと比較して有意差が認められた ($p < 0.05$)。クラムはコントロールより硬くなった。しかし、1.50%添加した場合はコントロールとの間に有意差が認められなかった。凝集性は 1.50%添加すると有意に増加した ($p < 0.05$)。MCE-4000 を 1.00%、または 1.50%添加するとクラムの状態が良く、両者を比較すると、有意差は認められなかったが 1.50%添加したほうが比容積も凝集性の値も大きい傾向を示し、クラムは軟らかい傾向を示した。確認のため添加量 1.25%、1.75%でも製パン試験を実施したが、比容積は 1.50%の方が大きい傾向を示したため、総合的に判断して、添加量は 1.50%が適していると考えられた。

(3) 食パンの比容積と力学的特性

(2)で検討した結果を基に、油脂をオリーブオイルに変更して食パン型での調製に展開するため、第 1 章と同様の方法でキヌア粉に MCE-4000 を 1.50%添加して調製した生地で発酵試験を実施し、発酵時間の検討を行った。検討結果の一部を Fig. 3 に示す。キヌア粉で調製する場合も、一次発酵のみ 60 分間行うとクラムの状態が良いパンが調製できた。

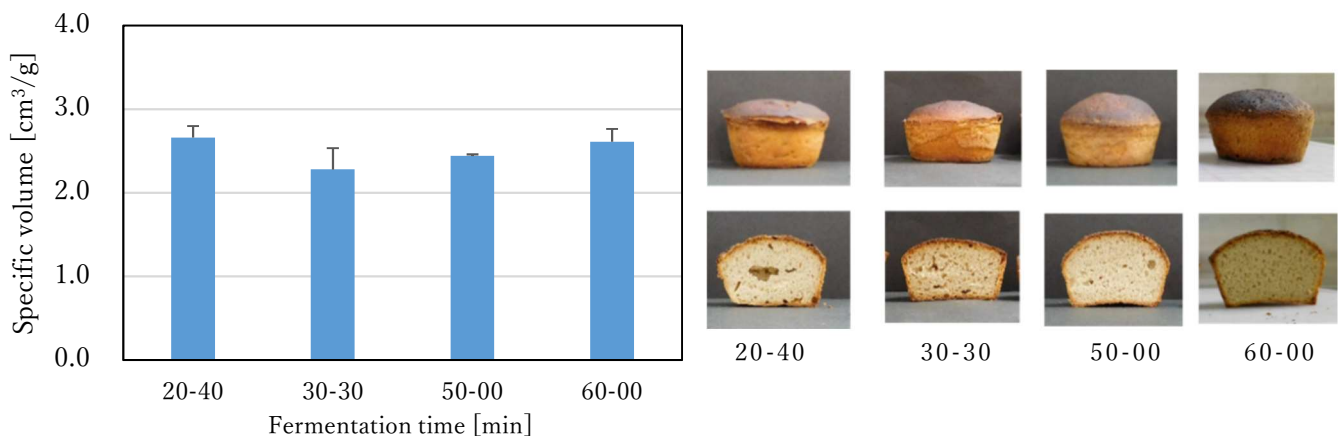


Fig. 3 Effect of fermentation time on bread

The graph shows the relationship between fermentation time and specific volume. The bread was prepared by adding 1.25% MCE-4000 to quinoa flour. Fermentation time: Primary fermentation time, secondary fermentation. Each value represents the mean \pm S.D. (n=8-10)

そこで、食パン型を使用して、油脂をオリーブオイルに変更して製パン試験を実施した。予備実験では、添加量 1.50%をベースにして 1.25%、および 1.75%を添加して製パンした。その結果、1.50%すると比容積が大きい傾向が認められた。そこで、キヌア粉に、3種のメトローズを 1.50%添加してパンを調製した。パンの断面写真を Fig. 4 に示す。

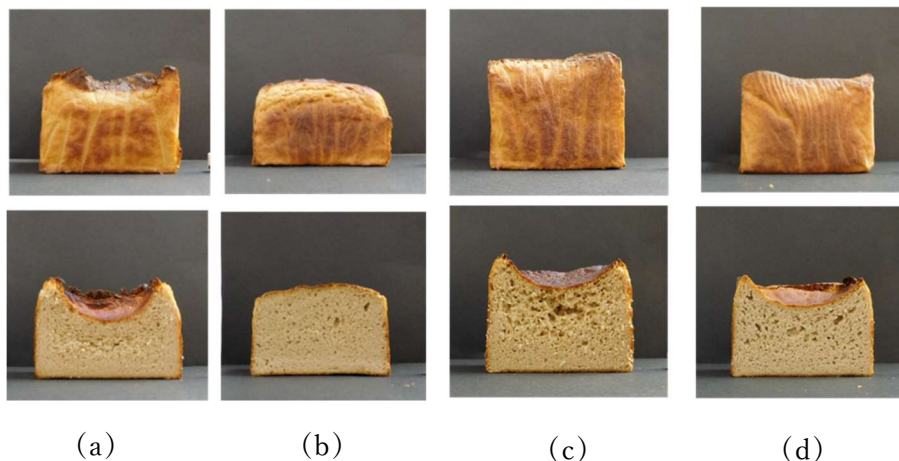


Fig. 4 Cross section images of bread prepared with Quinoa flour
Control: Quinoa bread (a), MCE-4000 added bread (b), SFE-4000 added bread (c), SE-50 added bread (d).

コントロールは焼成中にケービングを起こし、焼成後のパンの高さは発酵終了時より減少傾向を示した。SE-50 を添加した場合にもケービングを起こしたが、コントロールと比較すると中央部分の高さは変化がなかった。MCE-4000 と SFE-4000 を添加すると、ともに発酵時には食パン型のふち上部まで膨化した。しかし、SFE-4000 を添加すると中央部分は高さを維持できず、ケービングを起こした。MCE-4000 を添加すると、発酵終了時は SFE-4000 を添加した場合と同程度に膨化したが、焼成後のパンは中央部分の高さが 1.5~2.0 cm 減少した。クラムの気泡は、MCE-4000 は他と比較すると整っており密な状態だった。

比容積とテクスチャー測定値から求めたかたさと凝集性の結果を Fig. 5 に示した。増粘多糖類を添加したパンは、比容積の値はわずかに増加傾向を示した。しかし、どの増粘多糖類を添加した場合もコントロールと比べて有意差は認められなかった。MCE-4000 を添加すると硬さは増加して凝集性は低下し、コン

コントロールとの間には有意差が認められた ($p < 0.05$)。これは、パンのクラムが硬くもろくなったことを示し、製パン性は向上しなかった。

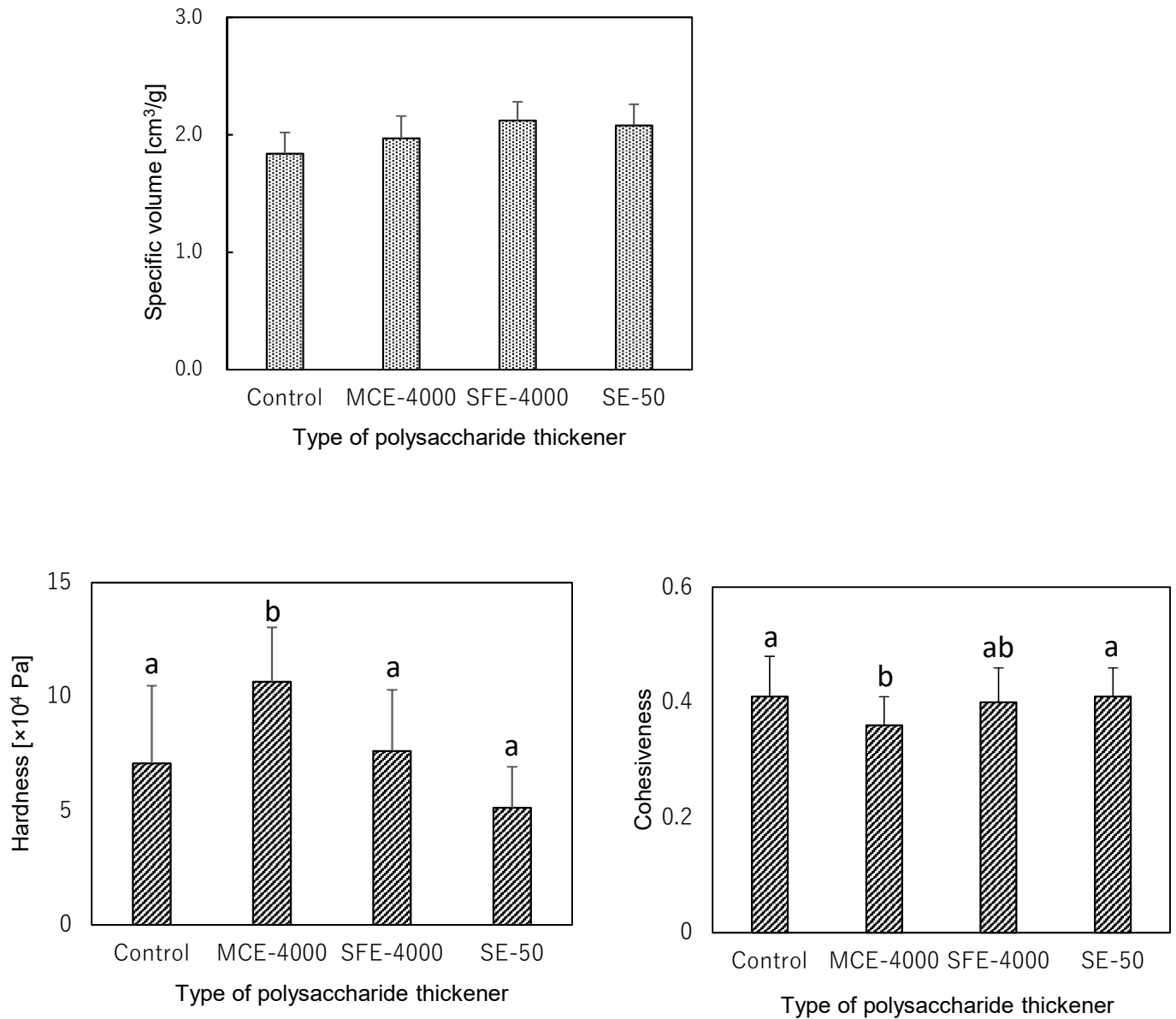


Fig. 5 Effect of thickener on texture and mechanical properties of bread
 Each value represents the mean \pm S.D. (n=15-19, specific volume: n=4-5)
 ab: Means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

(4) 糊化特性

RVAによって得られた糊化特性値を Table 2 に、粘度の代表的な軌跡を Fig. 6 に示す。既報¹⁹⁾で報告した結果と同様、コントロール（キヌア粉）はブレークダウンとセットバックの値が低いことが特徴であった。糊化開始温度は、コントロールは 62.8°C だった。MCE-4000 を添加すると糊化開始温度は低下する傾向を示した。SFE-4000、SE-50 を添加しても変化しなかった。最高粘度は MCE-4000 を添加すると増加傾向を示し、SFE-4000 を添加した場合は有意に低下した。ブレークダウンは MCE-4000、SFE-4000 を添加すると増加傾向を示し、SE-50 を添加すると減少傾向を示したが、差は認められなかった。また、セットバックの値はすべてマイナスの値となり、SFE-4000 を添加した場合はコントロールより増加した ($p < 0.05$)。最終粘度には変化が認められなかった。

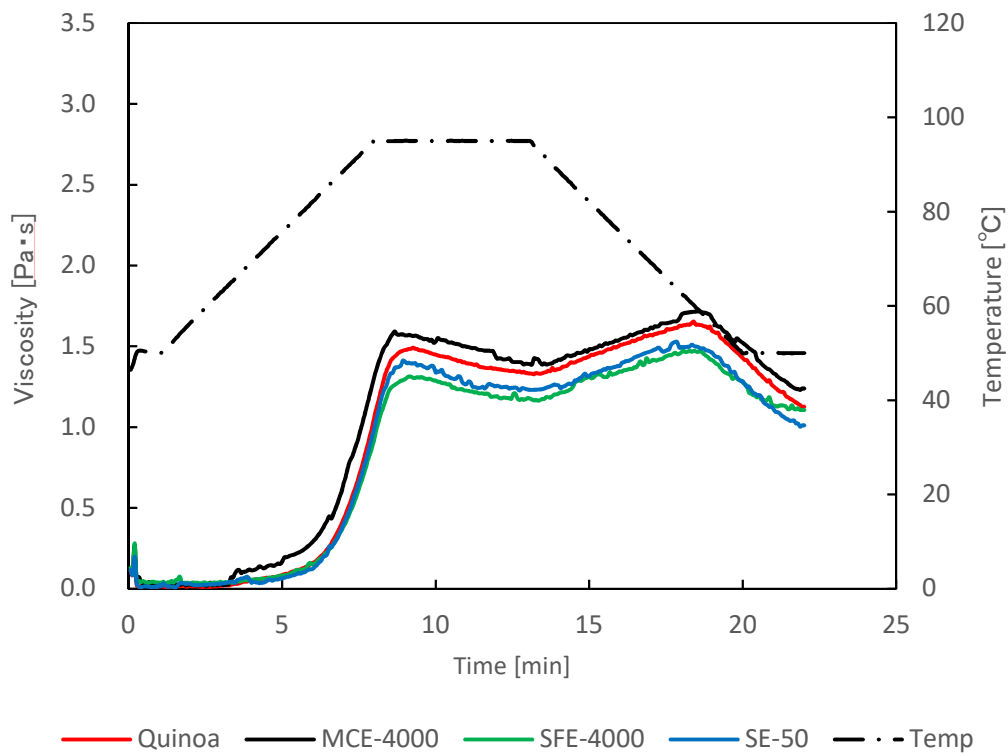


Fig. 6 Pasting curves of quinoa flour

Table 2 Pasting properties

	PT [°C]	PV [mPa · s]	MV [mPa · s]	BD [mPa · s]	SB [mPa · s]	FV [mPa · s]
Control	62.8±1.1	1496± 8 a	1315± 10	181±17	-195±16 b	1121± 17
MCE-4000	60.6±0.5	1528± 56 a	1268±113	201±37	-148±32ab	1078± 99
SFE-4000	62.9±1.8	1283±121 b	1145± 56	138±65	-66±44 a	1229±338
SE-50	63.4±1.2	1417±16 ab	1207± 20	210±23	-207±14 b	1000± 10

PT: Pasting temperature, PV: Peak viscosity, MV: Minimum viscosity, BD: Break down, SB: Set back, FV: Final viscosity.

Each value represents the mean ± S.D. (n=3) ab: In the same column on the table, means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

(5) 動的粘弾性

3種の増粘多糖類を添加して調製した生地の温度依存性の代表的な軌跡をFig. 7-1に示す。貯蔵弾性率(G')のピークは、コントロールが最も高く、次いでMCE-4000、SFE-4000、SE-50を添加した生地の順だった。 G' の図を、一部拡大した図がFig. 7-2である。MCE-4000を添加すると G' の上昇する温度が低下傾向を示し、50°C前後から急激に粘度が増加する傾向がみられた。65°C付近までは、どの増粘多糖類を添加してもコントロールを上回っていたが、SFE-4000とSE-50を添加した生地は、67°C前後でコントロールとほぼ重なりあった。また、MCE-4000を添加した生地も、70°Cを超えるとコントロールの軌跡と重なった。これらの結果から、どの増粘多糖類も貯蔵弾性率の増加に大きくは寄与していないと考えられた。

損失弾性率(G'')は、 G' と同様にピークの値はコントロールが最も高く、次いでMCE-4000、SFE-4000、SE-50を添加した生地の順だった。 G'' と $\tan \delta$ については図に示していないが、コントロール、MCE-4000、SFE-4000、SE-50を添加したすべての生地について、曲線の68°C付近に変曲点が認められた。糊化特性値測定結果における糊化開始温度とは乖離しているが、全てに共通していることから、キヌア粉の糊化特性を反映していると考えられた。SFE-4000とSE-50を添加した生地でははっきりしなかったが、MCE-4000を添加した生地はゲル化開始温度50~55°C付近に変曲点が認められた。

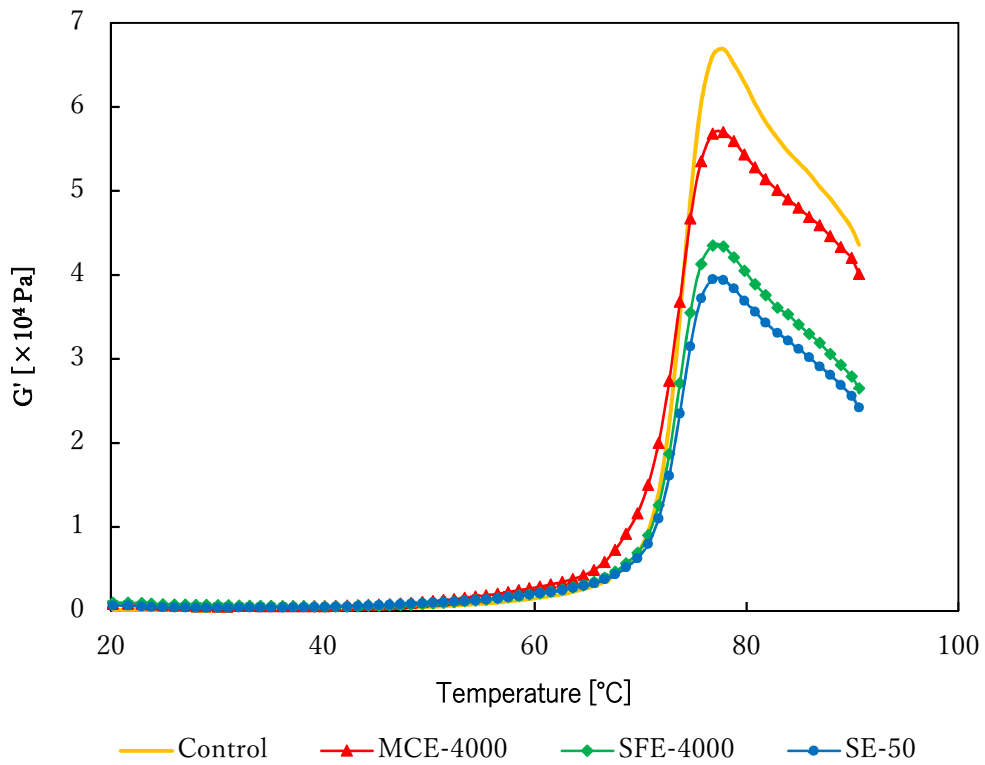


Fig. 7-1 Dynamic viscoelasticity: Temperature dependence (Storage modulus G')
 Control: Quinoa dough (■), MCE-4000 1.50% added dough (▲), SFE-4000 1.50%
 added dough (◆), SE-50 1.50% added dough (●).

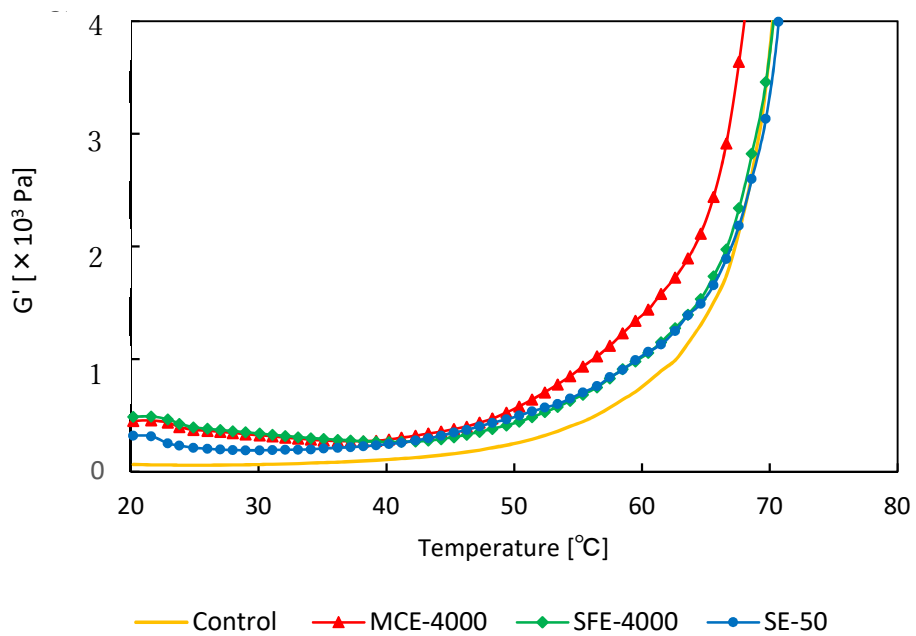


Fig. 7-2 The figure which expanded the range of 20-80 °C of Figure 7-1

(6) 増粘多糖類の効果

使用した増粘多糖類のうち、MC は、セルロースを構成するグルコースの分子骨格に最大で3つのメチル基で置換したものであり、その部分が疎水結合をおこして強いゲルを形成する²²⁾。本研究では、ケービングを起こさずパンとして成り立ったのはMCE-4000 (MC) を添加した場合のみだった。発酵終了後は高さを維持できていたが、焼成中にそれを維持できず、高さは減少した。

良く膨れたパンができる過程として、①炭酸ガスの気泡によってパン生地が良く膨れること、②そのパン生地を焼き上げた時、膨れた状態のままでパンの組織が固定されることの2つが挙げられる。①のステップはパン生地中のグルテン・タンパク質が主役であり、②のステップは澱粉が主役となる。また、澱粉粒はコンクリートにおける砂利に相当するといえる²³⁾。つまり、澱粉は膨れたパンを固定し膨らみを維持する働きを担っている。キヌア粉の澱粉含量は、小麦粉の66.5%²⁴⁾とは大きく変わらないが、グルテンフリー素材として幅広く利用される米粉の74.2%²⁴⁾と比較すると少ない。キヌアはグルテンを構成するタンパク質を含まないため、本来はグルテンが構築するパンの骨格を、増粘多糖類で構築した。しかしそのパン組織を支えるためには、澱粉が必要である。パン全体の高さが減少したのは、澱粉含量の少なさが要因の1つだと考えられた。

一方で、HPMCはメトキシ基とともにヒドロキシプロピル基で置換するため競合し、メトキシ基の3置換部分が少なくなり、疎水和の部分が減る。また、ヒドロキシプロピル基は水和を維持しようとするため、置換度が増加すると軟らかいゲルを形成するといわれている。そのため、SFE-4000を添加した生地は軟らかいため発酵時は良く伸びて膨化するものの、発酵によって生じた気泡を維持する力が弱く、最終的にはケービングを起こしたものと考えられた。

(7) 製パン性と糊化特性値、動的粘弾性の関係性

糊化特性値と製パン性の指標として比容積、テクスチャー特性値のかたさ、また、動的粘弾性と各製パン性の指標との関係性を検討したが、相関は認められなかった。

香田ら²⁵⁾によると、製パン性に適した生地であるかどうかを判断する簡単な方法の1つとして、昇温時の貯蔵弾性率の変化を測定することを挙げている。

その指標の1つである、 G'_0 は、生地の硬さを示している。そこで、初期の貯蔵弾性率 G'_0 と、 G' の最大値、 G'' の最大値と、製パン性の指標として比容積、テクスチャー特性値のかたさについて関係性を検討した。 G'_0 は、温度依存性測定の初期、20℃における G' の値を用いた。その結果、有意な相関は認められなかった。

筆者の考えるパンの成立とは、ケービングを起こさず、クラムが気泡構造を維持している状態を指す。本研究でパンとして成り立ったのは MCE-4000 を添加した場合のみであった。今後は、MCE-4000 添加パンを中心に、さらに膨らみを増加させていきたいと考えている。粉の澱粉含量に着目し、キヌア粉の一部を澱粉で置換してパンを調製し、製パン性に与える影響を検討していきたい。

4. 要約

雑穀粉を主材料として製パン性を検討した研究は少なく、キヌア粉を主材料としたパンの研究は殆どない。これまでの検討で、キヌア粉を使用してパンが調製できることは明らかになったが、膨らみが悪く、クラムはぼそぼそしていた。そこで本章では、膨らみを改善するために MC を 1 種、HPMC を 2 種使用して、生地と製パン性に与える影響を検討した。RVA を使用してキヌア粉の糊化特性を測定したところ、MCE-4000 を添加すると糊化開始温度は低下傾向を示し、SFE-4000 と SE-50 を添加してもほとんど変化がなかった。ピーク粘度は MCE-4000 を添加すると上昇傾向を示し、SFE-4000 を添加すると減少した ($p < 0.05$)。動的粘弾性の温度依存性を測定したところ、MCE-4000 を添加した生地は貯蔵弾性率の上昇する温度が低い傾向を示した。しかし、MCE-4000 を添加した生地は 70℃を超えてから、SFE-4000、SE-50 を添加した生地は 67℃前後から、コントロールの軌跡とほぼ重なり合い、どの増粘多糖類も貯蔵弾性率の増加に大きくは寄与していないと考えられた。損失弾性率と損失正接は、コントロールも増粘多糖類を添加した場合も、68℃付近に変曲点が認められ、キヌア粉の糊化特性を反映しているものと考えられた。パンの比容積は、増粘多糖類を添加すると増加傾向を示したが、差は認められなかった。また MCE-4000 を添加したパン以外はケービングを起こした。クラムのテクスチャーを解

析したところ、MCE-4000 を添加したパンはコントロールと比較してかたくなり ($p < 0.05$)、凝集性は低下した ($p < 0.05$)。パンの調製時、発酵の段階ではどの増粘多糖類を添加した生地も高さは同程度だった。焼成中に HPMC(SEE-4000、SE-50) を添加したパンがケービングを起こしたのは、HPMC が軟らかいゲルを形成したために生地の伸びは良くなったが、強度が不足して高さを維持できなかったことが原因だと考えられた。MC(MCE-4000)を添加したパンは、ケービングは起こさなかったものの、高さは発酵時より減少傾向を示した。MCE-4000 が作る強いゲルによって中央の高さは維持できたものの、パンの骨格を維持する働きをする澱粉が少ないため、高さを維持できなかったのではないかと考えられた。

文献

- 1) 井上直人, 倉内伸幸(2010), 雑穀入門, 日本食糧新聞社, 東京, pp.47-48
- 2) 小西洋太郎(2002), 擬穀物アマランス、キノアの栄養特性とアレルギー代替食品への応用, 日本栄養・食糧学会誌, **55**, 299-302
- 3) 真鍋久(2005), 雑穀ブームの背景を探る, 日本調理科学会誌, **38**, 440-445
- 4) 小西洋太郎(1999), 序説 アマランスとキノアアーシュード・シリアルの商品開発一, 食の科学, **253**, 18-24
- 5) 不破英次(1999), アマランスとキノアの澱粉の構造と性質, 食の科学, **253**, 30-36
- 6) 高尾哲也(1999), キノアの成分と生理活性, 食の科学, **253**, 52-58
- 7) 森田尚文(1999), アマランスの製パンへの応用, 食の科学, **253**, 38-45
- 8) 藤井恵子, 舟木愛美, 辻美智子(2017), ハトムギ粉を主原料としたグルテンフリーパンの調理特性, 食生活研究, **37**, 1-11
- 9) Akin, P. A. and Miller, R. A. (2017), Starch-hydrocolloid interaction in chemically leavened gluten-free sorghum bread, *Cereal Chemistry*, **94**, 897-902
- 10) 土屋京子(2017), ホワイトソルガム粉のパン品質に対する添加水分の影響の違い, *New Food Industry*, **59**, 29-37
- 11) Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C. and Santiago, L. G. (2012), Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking, *International Journal of Food Science and Nutrition*, **63**, 491-497
- 12) Burešová, I., Tokár, M., Mareček, J., Hřivna, L., Faměra, O. and Šottníková, V. (2017), The comparison of the effect of added amaranth, buckwheat, chickpea, corn, millet and quinoa flour on rice dough rheological characteristics, textural and sensory quality of bread, *Journal of Cereal Science*, **75**, 158-164
- 13) Morita, N., Kang, W., Hamauzu, Z., Sugimoto, Y. (1999), Effect of amaranth flour on some properties of wheat dough and bread, *Journal of Applied Glycoscience*, **46**, 23-30
- 14) Sanz-Penella, J. M., Wrokwoska, M., Soral-Smietana, M., Hapos, M. (2013), Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value, *LWT*

Food Science and Technology, **50**, 679-685

- 15) 土屋京子(2019), ホワイトソルガム粉パンにおける米粉配合の効果について, 東京家政大学研究紀要 2 自然科学, **59**, 1-7
- 16) 大迫早苗(2013), キヌアパンの食味特性について, 相模女子大学紀要 自然系, **76B**, 7-12
- 17) 大迫早苗(2006), キヌアの添加によるスポンジケーキの食味特性食味特性, 相模女子大学紀要 自然系, **70B**, 15-22
- 18) 大迫早苗, 永島伸浩(2007), キヌア添加が餅生地物の物性ならびに食味特性に及ぼす影響, 相模女子大学紀要 自然系, **71B**, 45-52
- 19) 石井和美, 早川あつ美, 藤井恵子(2018), 雑穀で調製したグルテンフリーパンの製パン性, 日本調理科学会誌, **51**, 89-96
- 20) 石井和美, 小林三智子(2018), ホワイトソルガムパンの加工性と嗜好性向上の検討, *New Food Industry*, **60**, 19-25
- 21) 香川明夫監修(2019), 七訂 食品成分表 2019 本表編, 女子栄養大学出版部, 東京
- 22) 早川和久(2014), 水溶性セルロース誘導体, 繊維学会誌, **70**, 452-457
- 23) 田中康夫, 松本博編(2008), 「製パンの科学 (I) 製パンプロセスの科学」, 光琳, 東京, pp.55-56
- 24) 香川明夫監修(2019), 七訂 食品成分表 2019 資料編, 女子栄養大学出版部, 東京
- 25) 香田智則, 西岡昭博(2017), グルテンを含まない米粉パンの製造技術, 日本調理科学会誌, **50**, 1-5

第3章

キヌア粉の一部を 澱粉で置換したパンの創製

1. 緒言

第2章において、キヌア粉に増粘多糖類を添加して生地の特性と製パン性を検討した。キヌアは機能性に富み、用途開発が進めば大変有用な雑穀である。しかし、増粘多糖類を添加してパンを調製しても製パン性は向上しなかった。何を制御すれば製パン性が向上するのか要因ははっきりしていない。

第1章で検討したホワイトソルガム粉と単純な比較はできないが、粉の特性に着目すると、大きな違いの1つは、澱粉含量が異なっている点である。

澱粉の働きについては、第1章で引用したとおり、澱粉粒はコンクリートにおける砂利に相当すると考えることができるといわれている¹⁾。キヌア粉でパンを調製した場合、発酵時の生地の膨化状態は良好なのにも関わらず、焼成時にパンがケービングを起こしてしまうのは、膨らみを維持できる強度が不足しているためではないかと考えられる。つまり、澱粉による補強が不足している。

そこで、キヌア粉の一部を澱粉で置換して製パンし、生地の特性と製パン性に与える影響を検討することにした。序論で述べた通り、多くのグルテンフリーパンの研究では米粉や澱粉の配合割合が大きい²⁻⁴⁾。Schoberら⁵⁾は、雑穀粉に着目して検討した場合、グルテンフリーパンとしてモロコシ粉を使用している数々の研究は、添加量が少なく完全にグルテンフリーではないと指摘している。そこで、モロコシ粉70%とじゃがいも澱粉30%を使用し、サワードウを用いて検討し、品質が改善されたと報告している。しかし、そのパンはまだ完成形ではない。また、Velázquezら⁶⁾は、ソルガム粉とコーンスターチ、HPMCを使用してパンを調製し、コーンスターチ55%、ソルガム粉45%が最適な配合だったと報告している。Velázquezらの調製したそのパンの比容積は3.24 ml/gだった。Sanchezら⁷⁾の論文を引用し、小麦粉を配合したパンの場合、比容積5.0 ml/gは優れているとしている。そして彼らの調製したパンの比容積3.24 ml/gは許容範囲内で、良好だったと評価している。しかし筆者は、雑穀粉が45%では使用量が少なすぎると考えている。本研究のテーマは、雑穀粉を主材料とするパンである。少なくとも60%以上は雑穀粉を用いたい。そこで、最大で40%までを澱粉で置換することにした。

澱粉は、塊根由来のジャガイモ澱粉やさつまいも澱粉、タピオカ澱粉（キャッサバ）、種実由来のコーンスターチ、米澱粉などが代表的なものである。また、

食品加工のために開発された加工（化工）澱粉も出回っている。加工澱粉は食品ではなく、食品添加物として扱われているが、様々な食品に利用されている。

本研究では、塊根澱粉のさつまいも澱粉、種実澱粉のコーンスターチを使用した。予備実験では、ジャガイモ澱粉（片栗粉）、タピオカ澱粉を取り扱ったが、ジャガイモ澱粉は膨らみの改善効果が認められず、タピオカ澱粉は最近のタピオカブームで入手が難しくなった。そこで、手に入れやすく、効果の認められたコーンスターチとさつまいも澱粉を使用することにした。

2. 実験方法

(1) 材料

キヌア粉（ペルー産 辻安全食品（株））を使用した。また、キヌア粉と置換するさつまいも澱粉は、九州産（火乃國商事（株））、コーンスターチは栃木県産（（株）GABAN）を使用した。第2章と同様に、パンの原材料として、グラニュー糖（三井精糖（株））、オリーブオイル（BOSCO Pure & mild 日清オリオグループ（株））、食塩（（公財）塩事業センター）を使用した。増粘多糖類は、キヌア粉の製パン試験で最も効果のあったメトローズ MCE-4000（信越化学工業（株））（以下 MCE-4000 と示す）を使用した。製パン性の検討にはドライイースト（フランス産 S. I. Lesaffre）を使用した。

(2) 澱粉の粒度測定

レーザ回折式粒度分布測定装置（Malvern MASTER SUZER3000）を使用し、第2章と同様の方法でコーンスターチとさつまいも澱粉の粒度を測定した。

(3) 食パンの調製

キヌア粉の 10～40% を、さつまいも澱粉とコーンスターチでそれぞれ置換し、第2章で検討した結果を基に、MCE-4000 を粉重量の 1.50% 添加し、加水量は 120% でパンを調製した。

(4) 糊化特性の解析

キヌア粉の 30%、および 40% をコーンスターチ、およびさつまいも澱粉で置換して混合し、MCE-4000 を 1.50% 添加して粉試料とした。澱粉で置換せず、キヌア粉に MCE-4000 を 1.50% 添加した粉を 0% 置換の粉とした。また、コーンスターチのみ、さつまいも澱粉のみの粉試料も測定した。測定条件等は第1章と同様とした。

(5) 生地 of 調製

生地の基本配合は、第1章、および第2章と同様にした。まず、キヌア粉と澱粉をよく混合し、グラニュー糖と増粘多糖類を混合したものを入れて攪拌し

た。食塩を混合し、蒸留水を加えてスパチュラで均質になるまで攪拌し、卓上ミキサー（AIKOH ケンミックス・シェフミキサーKM-800, (株) 愛工舎製作所）を用いて、目盛 1（自転 256 rpm, 公転 77 rpm）で 1 分間、その後、目盛 3（自転 386 rpm, 公転 116 rpm）で 4 分間攪拌し、オリーブオイルを投入してさらに 3 分間攪拌した。

(6) 生地の動的粘弾性

調製直後の生地を試料として、レオメータ（MCR-102 (株) アントンパール）を用いて動的粘弾性を測定した。測定条件は、第 1 章および第 2 章と同様とした。温度依存性を調べるために、直径 27 mm の共軸円筒型の治具（MEAS CYLINDER B-CC27）を用いた。生地を約 15.0 ml 入れ、角周波数 5 rad/s、ひずみ 0.1% で 20°C から 90°C まで昇温速度 2°C/min で昇温し、貯蔵弾性率 (G')、損失弾性率 (G'') を測定し、損失正接 ($\tan \delta$) を算出した。なお、生地の乾燥防止のために、共軸円筒上部にキャップをして測定した。

(7) 食パンの比容積と力学的特性

製パン試験を 5 回実施し、菜種法でパンのみかけの体積を測定して比容積を算出した。パンのクラム中央部分を 2 cm 幅で水平に切り、その中央部分を 2 cm 角の直方体に切り出して測定試料とした。測定条件は第 1 章、第 2 章と同様とした。

(8) 統計処理

測定は、糊化特性は 3 回測定、パンの調製は 5 回行って物性値を測定し、平均値と標準偏差を求めた。統計処理ソフト (SPSS Statistics Ver.21 IBM) を使用して分散分析を実施後に一元配置分散分析を行い、Bonferroni 法による多重比較によって検定した。また、相関は、ピアソンの相関係数を用いた。統計的有意水準は 5% 未満とした。

3. 結果および考察

(1) キヌア粉の一部を澱粉で置換して調製したパン

キヌア粉の一部を澱粉で置換し、MCE-4000 を 1.50% 添加したパンの断面写真を Fig. 1 に示す。コーンスターチ、さつまいも澱粉ともに、10% 置換した場合には中央部分の高さは減少傾向を示したが、体積は増加傾向が認められた。またクラムの気泡は細かくなった。焼成直後に焼き縮みを防止するために型のまま 30 cm ほどの高さから落下させる操作を行ったが、30% 以上置換すると、どちらの澱粉で置換したパンも室温で放冷している間に中央部分がへこんだ。また、澱粉で 40% を置換すると上面のクラストとクラムの間に隙間が生じることが認められた。出来上がりの状態から判断すると、30% を置換したパンが安定したできあがりだった。コーンスターチで 30% を置換したパンは中央の高さも維持できていた。



MCE-4000 1.50% added

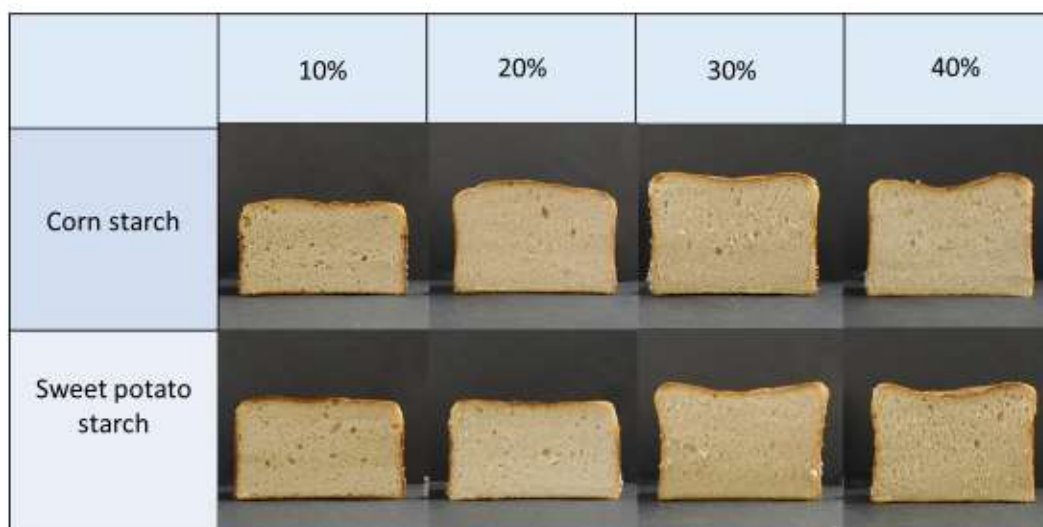


Fig. 1 Bread prepared by replacing starch with quinoa flour

(2) 澱粉で置換したパンの比容積と力学的特性

Fig. 2 に、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 1.50% 添加して調製したパンの比容積を、その検定の結果を Table 1 に示す。また、テクスチャー特性のかたさの結果を Fig. 3 と Table 2、凝集性の結果を Fig. 4 と Table 3 に示す。澱粉置換 0% で MCE-4000 を 1.50% 添加したパンは、以下置換 0% パンと表記する。

コーンスターチでキヌア粉の一部を置換すると比容積は増加傾向を示し、40% を置換すると増加した ($p < 0.05$)。また、10% 置換したパンと比較しても 40% 置換したパンの比容積は増加した ($p < 0.05$)。

第 2 章で述べた通り、キヌア粉のみで調製したパンに MCE-4000 を添加すると、比容積は増加傾向を示したが、クラムは硬くなった ($p < 0.05$)。しかし、コーンスターチで 40% 置換すると、クラムは軟らかくなった ($p < 0.05$)。10~30% 置換した場合には、0% 置換パンとクラムのかたさに差は認められなかった。凝集性はコーンスターチで置換すると値が増加した ($p < 0.05$)。付着性は、第 2 章で検討したコントロール（キヌア粉のみ、MCE-4000 無添加）では殆ど発生しなかった。これは、クラムがもろいため崩れてしまったためだと考えられた。コーンスターチの場合、30% 以上置換した場合には付着性が発生することは殆どなかった。10%、20% 置換した場合、まれに発生したがばらつきが大きかった。

さつまいも澱粉で置換すると、10% 置換した場合に比容積は低下傾向を示したが、20% 以上置換すると増加傾向が認められ、コーンスターチと同様に 40% 置換すると増加した ($p < 0.05$)。

クラムのかたさは、0% 置換パンと比較して 20% 置換すると減少傾向を示し、30%、および 40% を置換すると軟らかくなった ($p < 0.05$)。凝集性は、0% 置換パンと比較して、さつまいも澱粉で 20% 以上置換すると有意に増加した ($p < 0.05$)。30% 以上を置換すると凝集性の値は 0.60 を超え、40% を置換すると 0.70 を超えた。0% 置換パンの 0.35 と比較して倍近くまで増加し、凝集性はかなり改善したといえる。

比容積は、全てのパンの中で、コーンスターチで 40% 置換したパンが最大値を示した。さつまいも澱粉で置換したパンと比較すると、比容積の値に有意差が認められたのは 10% 置換したパンのみだった ($p < 0.05$)。クラムは、さつ

いも澱粉で 40%置換すると最も軟らかくなり、どのタイプのパンとの間にも有意差が認められた($p < 0.05$)。パンのクラムは、どちらの澱粉で置換した場合も、置換量が増加すると軟らかくなる傾向を示した。各澱粉で 40%置換した場合を比較すると、クラムはさつまいも澱粉で置換した方が軟らかくなった($p < 0.05$)。比容積の値はコーンスターチで 40%置換した方が大きい傾向が認められ、膨らみが増せば、クラムに含まれる気泡が増加していると考えられるため、クラムはコーンスターチで 40%置換したパンの方が軟らかくなると予想された。しかし、さつまいも澱粉で 40%置換したパンの方が軟らかかった($p < 0.05$)。この原因は、澱粉のアミロペクチン含量の違いによるものではないかと考えられる。文献によると、さつまいも澱粉のアミロース含量は 16~18%程度⁸⁾、コーンスターチは 21%程度⁹⁾である。アミロペクチンは分岐鎖構造であり、構造上、抱え込む水分が多くなると考えられている。さつまいも澱粉はアミロペクチンの割合が高く、MCE-4000 の効果のひとつでもある保水性も作用し、焼成後のパンのクラムが、コーンスターチより軟らかかったのではないかと推察された。一方、凝集性は、さつまいも澱粉で 40%置換すると大きく増加した($p < 0.05$)。

澱粉で置換したパンの中で、さつまいも澱粉で 30%置換したパンは、0%置換パンと比較して比容積は増加傾向を示し、凝集性が高く、クラムが軟らかいことから、ふわふわしていて、今回検討したなかでは最も良い状態だと考えられた。40%置換すると比容積は増加し($p < 0.05$)、凝集性は増加してクラムは軟らかくなったが($p < 0.05$)、先に記載した通り、上面に空間ができる場合がみられ、安定性の面から 30%置換したパンが最も良い状態だと判断した。一方で、コーンスターチで 30%置換したパンは、0%置換パンと比較して差が認められたのは凝集性のみだったが($p < 0.05$)、クラムの状態は良く、比容積はさつまいも澱粉で 30%置換したパンと差がなかったため、糊化特性、生地の動的粘弾性を検討するにあたって、コーンスターチとさつまいも澱粉で、それぞれキヌア粉の 30%を置換して検討を進めていくことにした。

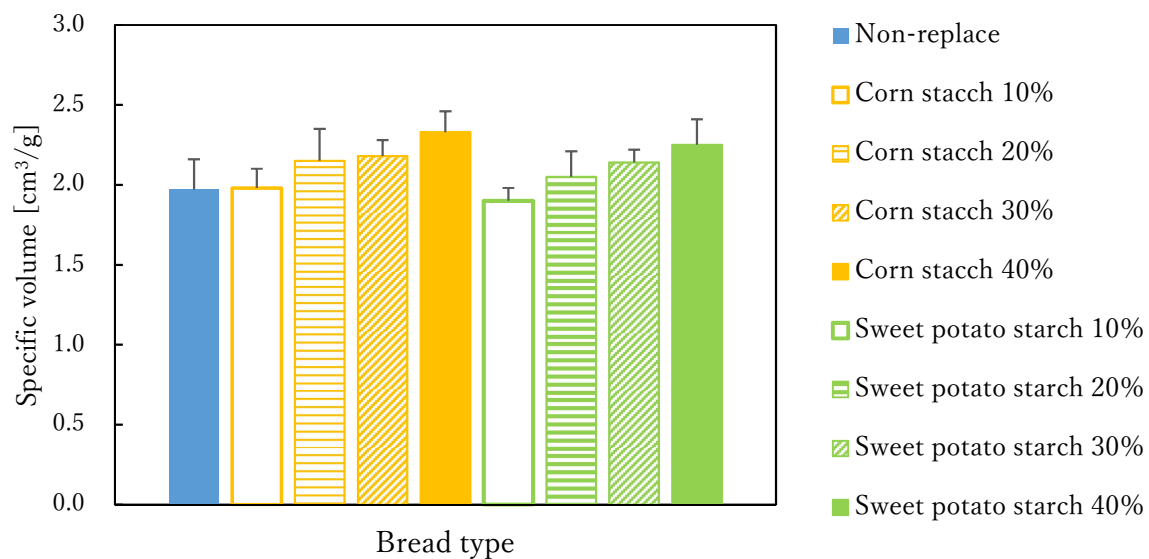


Fig. 2 Specific volume of bread replaced with corn starch and sweet potato starch

All breads had 1.50% MCE-4000 added. Each value represents the mean \pm S.D. (n=5)

Table 1 Results of the significance test

	Replacement rate [%]	Corn starch					Sweet potato starch			
		0	10	20	30	40	10	20	30	40
	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corn starch	10	ns	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	ns	ns	—	—	—	—	—	—	—
	30	ns	ns	ns	—	—	—	—	—	—
	40	*	*	ns	ns	—	—	—	—	—
Sweet potato starch	10	ns	ns	ns	ns	*	—	—	—	—
	20	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—	—	—
	30	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—	—
	40	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	—

(* $p < 0.05$)

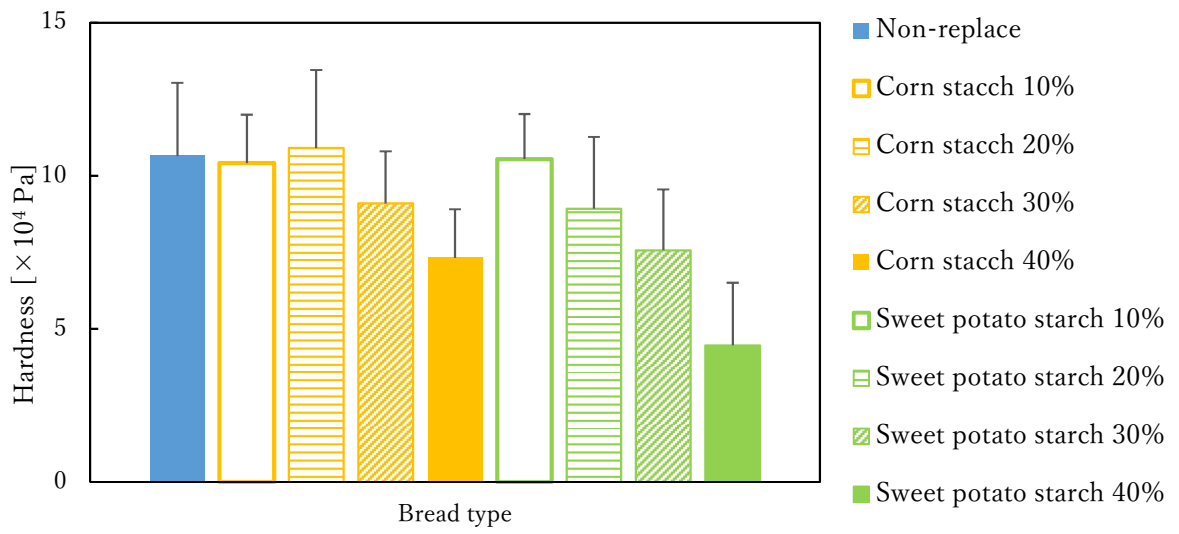


Fig. 3 Hardness of bread replaced with cornstarch and sweet potato starch
 All breads had 1.50% MCE-4000 added. Each value represents the mean \pm S.D. (n=18-32)

Table 2 Results of the significance test

	Replacement rate	Corn starch					Sweet potato starch			
		0	10	20	30	40	10	20	30	40
	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corn starch	10	ns	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	ns	ns	—	—	—	—	—	—	—
	30	ns	ns	ns	—	—	—	—	—	—
	40	*	*	*	ns	—	—	—	—	—
Sweet potato starch	10	ns	ns	ns	ns	*	—	—	—	—
	20	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—	—	—
	30	*	*	*	ns	ns	*	ns	—	—
	40	*	*	*	*	*	*	*	*	—

(* : $p < 0.05$)

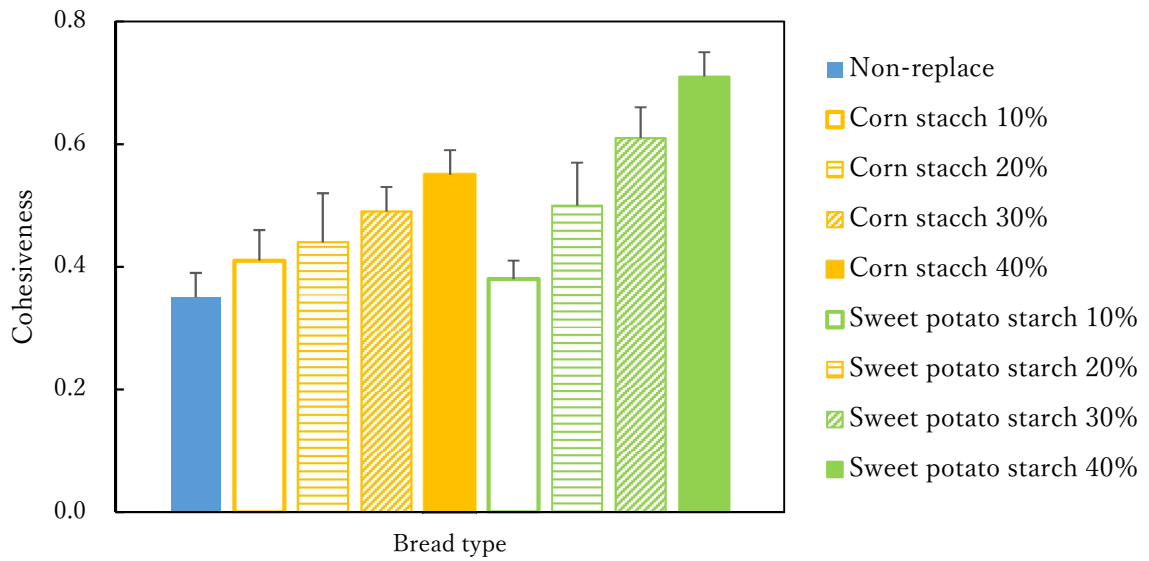


Fig. 4 Cohesiveness of bread replaced with cornstarch and sweet potato starch

All breads had 1.50% MCE-4000 added. Each value represents the mean \pm S.D. (n=18-32)

Table 3 Results of the significance test

	Replacement rate	Corn starch					Sweet potato starch			
		0	10	20	30	40	10	20	30	40
	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corn starch	10	*	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	*	ns	—	—	—	—	—	—	—
	30	*	*	ns	—	—	—	—	—	—
	40	*	*	*	*	—	—	—	—	—
Sweet potato starch	10	ns	ns	*	*	*	—	—	—	—
	20	*	*	*	ns	ns	*	—	—	—
	30	*	*	*	*	*	*	*	—	—
	40	*	*	*	*	*	*	*	*	—

(* $p < 0.05$)

(3) 澱粉の粒度

使用したコーンスターチとさつまいも澱粉の粒度を Table 1 に示す。キヌア粉の粒度は、d10 は 11.5 μm 、d90 は 223.7 μm 、d50 (メディアン径) は 65.5 μm だった。また、コーンスターチとさつまいも澱粉の粒度はかなり小さく、d50 はコーンスターチが 15.1 μm 、さつまいも澱粉は 13.6 μm だった。

Table 4 Particle size of quinoa and starch

		Quinoa	Corn	Sweet potato
		flour	starch	starch
d 10	[μm]	11.5	8.75	6.76
d 50	[μm]	65.5	15.1	13.6
d 90	[μm]	223.7	24.9	24.7

(4) キヌア粉の一部を澱粉で置換した試料の糊化特性

コーンスターチ、およびさつまいも澱粉、キヌア粉の 30% をコーンスターチ、さつまいも澱粉で置換し、MCE-4000 を 1.50% 添加した粉の糊化特性の結果を Table 2 に示す。また、代表的な粘度の軌跡を Fig. 7 に示す。

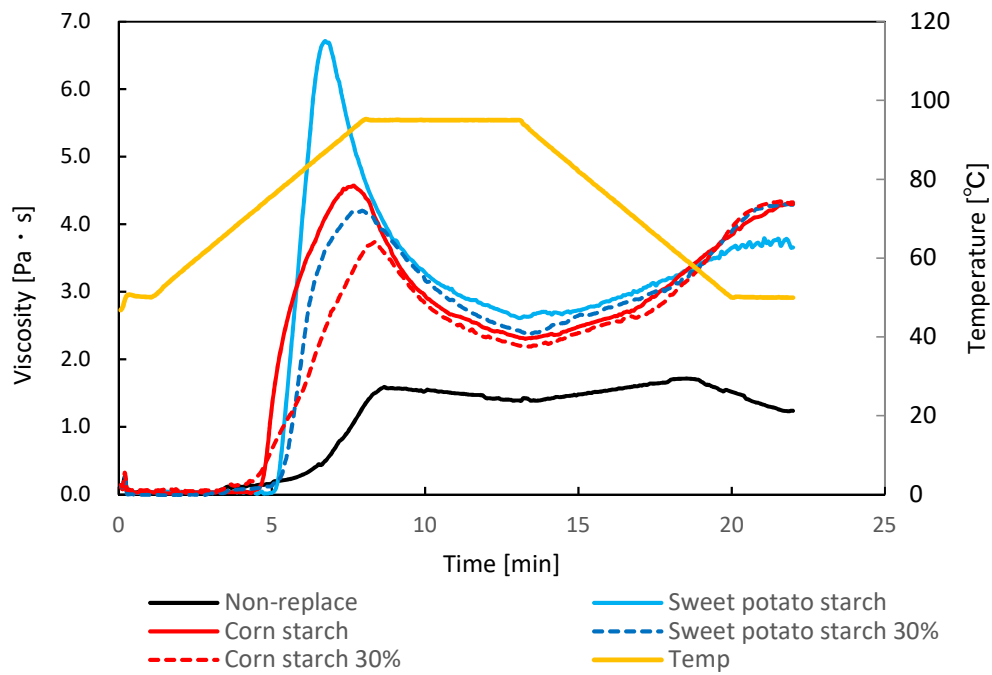


Fig. 7 Pasting curves of quinoa flour replaced with starch

All samples had 1.50% MCE-4000 added. Non-replace: Quinoa + MCE-4000 1.5% added. Corn starch 30% : 30% replaced with cornstarch, Sweet potato starch 30% : 30% replaced with sweet potato starch.

Table 2 の無置換（MCE-4000 を添加した粉）の結果は、第 2 章の結果を転載している。

Table 2 Pasting properties

	PT	PV	MV	BD	SB	FV
	[°C]	[mPa · s]	[mPa · s]	[mPa · s]	[mPa · s]	[mPa · s]
Non-replace ¹⁾	60.6±0.5 cd	1528± 56 a	1268±113 d	201±37 a	-148±32 d	1078± 99 c
Corn starch (CS)	70.1±1.2 b	4576± 13 b	2300± 7 b	2276± 8 b	2031±16 ab	4398±109 a
Substituted by 30% CS ²⁾	58.5±1.1 d	3706± 32 c	2195± 7 c	1511±38 c	2143±91 a	4338± 89 a
Sweet potato starch (SPS)	75.0±0.9 a	6687± 28 d	2627± 30 a	4060±58 d	1022±21 c	3649± 26 b
Substituted by 30% SPS ³⁾	63.8±1.7 c	4284±101 e	2445± 55 b	1839±56 e	1925±44 b	4370± 91 a

PT: Pasting temperature, PV: Peak viscosity, MV: Minimum viscosity, BD: Break down, SB: Set back,

FV: Final viscosity. ¹⁾Non-replace: Quinoa flour with 1.50% MCE-4000 added. ^{2,3)}: MCE-4000 (1.50%) was added.

Each value represents the mean ± S.D. (n=3) abcd : In the same column on the table, means without a common letter are significantly different ($p < 0.05$).

使用したコーンスターチとさつまいも澱粉の糊化開始温度は、キヌア粉に MCE-4000 を添加した粉（以下、0%置換の粉と表記）と比較して高く、有意差が認められた ($p < 0.05$)。さつまいも澱粉は、糊化開始温度が最も高く ($p < 0.05$)、ピーク粘度も最も高かった ($p < 0.05$)。またピーク粘度に達する時間は速い傾向が認められ、ピーク粘度に達した時の温度は 87°C 前後だった。コーンスターチも糊化開始温度は高く ($p < 0.05$)、ピーク粘度に達した温度はさつまいも澱粉より高い傾向を示し、93°C 前後だった。0%置換の粉の場合、糊化開始してからピーク粘度に達するまでの時間は他より遅い傾向を示し、95°C を維持している間にピーク粘度となった。

コーンスターチで 30%置換した粉は、0%置換の粉と比較して糊化開始温度は低下傾向を示し、さつまいも澱粉で 30%置換した粉は上昇傾向を示したが、どちらも有意差は認められなかった。しかし、どちらの澱粉で置換した場合もピーク粘度は増加し ($p < 0.05$)、ブレイクダウンセットバックも増加した ($p < 0.05$)。また、ピーク粘度に達する時間は、0%置換の粉と比較して速くなる傾向を示した。最終粘度は、澱粉で置換することによって増加した ($p < 0.05$)。澱粉で置換した場合、糊化開始温度の上昇やピーク粘度の増加など、澱粉本来の糊化特性が大きく影響を与えていることが明らかになった。

(5) 動的粘弾性

コントロール（キヌア粉のみで調製した生地）、MCE-4000 を添加した生地（MCE-4000）、コーンスターチ、およびさつまいも澱粉でキヌア粉の 30%を置換して MCE-4000 を添加した生地の動的粘弾性の結果を示す。Fig. 8-1 は、代表的な軌跡のグラフである。

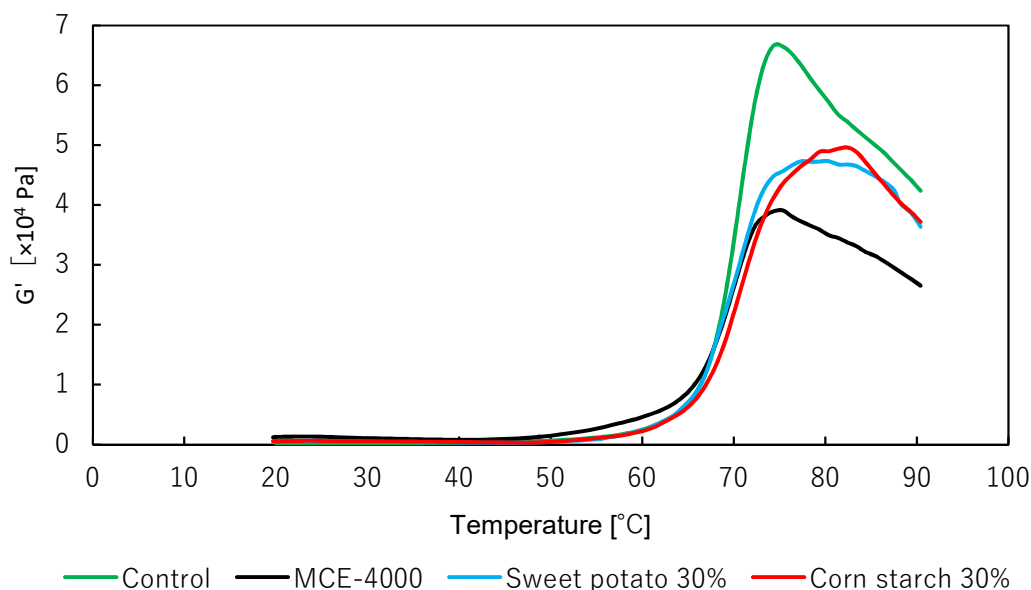


Fig. 8-1 Dynamic viscoelasticity: Temperature dependence (Storage modulus G')
MCE-4000: MCE-4000 1.50% added. Corn starch 30%: Dough with 30% quinoa flour replaced with corn starch and 1.50% MCE-4000. Sweet potato starch 30%: Dough with 30% quinoa flour replaced with sweet potato starch and 1.50% MCE-4000.

キヌア粉に MCE-4000 を添加した生地（以下、0%置換生地）と比較すると、コーンスターチとさつまいも澱粉で 30%置換した生地は、貯蔵弾性率(G')が上昇する温度が高い傾向を示し、 G' のピークも高い傾向を示した。またピークに達した時の温度も高い傾向を示した。澱粉で置換した生地の、ピーク前後のカーブは緩やかな軌跡を示した。Fig. 8-2 のグラフは、Fig. 8-1 のグラフを一部切り出して拡大したものである。置換 0%の生地は、測定当初から貯蔵弾性率が高い傾向を示し、70 $^{\circ}\text{C}$ 前後まではコントロールより高い値の軌跡を示した。一方、澱粉で置換した生地の G' は、50 $^{\circ}\text{C}$ 前後から急激に増加する傾向を示し、

58℃前後でコントロールの値を超えた。第1章、第2章でも検討した初期の貯蔵弾性率 G'_0 (20℃の時の貯蔵弾性率) は、コントロールは 191 ± 27 Pa ($n=5$) だったが、MCE-4000 を添加すると 1100 ± 61 Pa ($n=7$) に増加した ($p < 0.05$)。また、キヌア粉の 30% を澱粉で置換すると、さつまいも澱粉で置換した場合、 580 ± 58 Pa ($n=4$)、コーンスターチで置換した場合 540 ± 20 Pa ($n=4$) となり、0% 置換の生地(キヌアに MCE-4000 を添加した生地)より減少した ($p < 0.05$)。これは、生地が軟らかくなったことを示している。

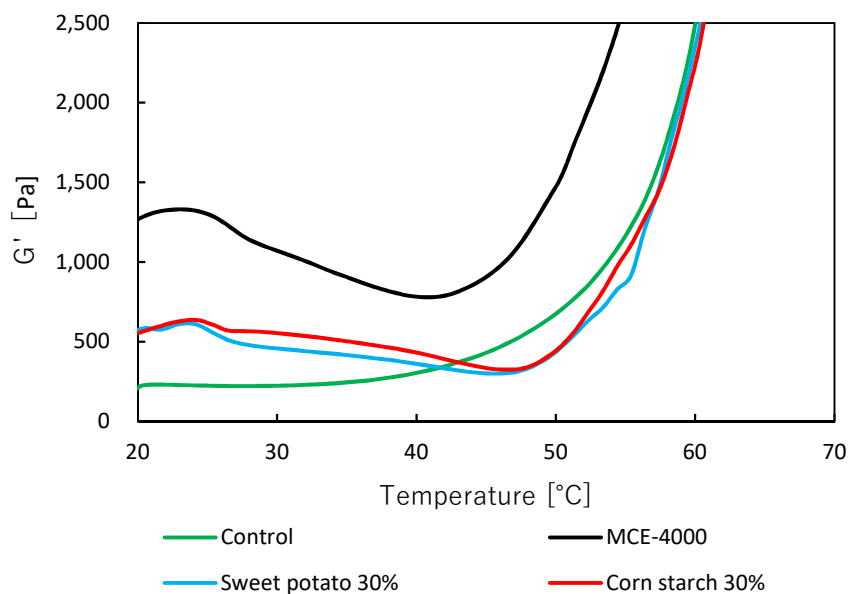


Fig. 8-2 Enlarged view of the 20-60℃ range from Fig. 8-1

損失弾性率(G'')と損失正接($\tan \delta$)との関係性については、コントロールと MCE-4000 を添加した生地については前章で述べたが、澱粉で置換した試料を測定する際に、参考として測定した。コントロールは、 $\tan \delta$ の軌跡の 61~62℃ 付近に変曲点が認められ、60℃以降から急激に G'' が増加傾向を示した。これは、キヌア粉の糊化開始温度 (62.8℃) に近い値だった。また、MCE-4000 を添加した生地はゲル化開始温度に近い 55~58℃で G'' と $\tan \delta$ に変曲点が認められた。

図には示していないが、さつまいも澱粉で 30% 置換した生地と、コーンスターチで 30% 置換した生地の場合、 G'' は 58~60℃に変曲点が認められ、60℃から急激に値が増加傾向を示した。また $\tan \delta$ は、52℃付近に変曲点が認められ、

その後は複雑な軌跡を示し、さつまいも澱粉 30%は 62~65°C、コーンスターチ 30%は 60~62°C付近に変曲点が認められた。

(6) 製パン性と糊化特性、動的粘弾性の関係性

第 1 章、第 2 章と同様に、糊化特性の各特性値、動的粘弾性の特性値と、パンの比容積、テクスチャー特性値との関係性を検討したところ、どの指標の間にも相関は認められなかった。

しかし、MCE-4000 のゲル化開始温度と、キヌア粉の糊化開始温度、置換した澱粉の糊化開始温度との関係は重要だと考えられる。Kusunose ら¹¹⁾は、各種澱粉と小麦のグルテンを使用して製パンについて検討した中で、製パンの過程における粉の糊化について、じゃがいも澱粉のように、焼成の初期に糊化すべきでなく、小麦澱粉のように焼成の後期に糊化することが必要で、それによって早期の生地硬化を防ぎ、膨張が促進されると述べている。本研究の糊化特性測定の結果、および、動的粘弾性の測定結果からは、まず、MCE-4000 のゲル化が先行してパンの骨格を形成し、その後、置換した澱粉の糊化開始の影響を受けて粉の糊化が開始されたと考えられた。その結果、生地がのび、体積が増加した。予備実験の結果、じゃがいも澱粉で置換するとあまり効果がなかったのは、じゃがいも澱粉の糊化開始温度が低く、MCE-4000 のゲル化より前に糊化を開始したからだと考えられた。

動的粘弾性の温度依存性を測定したところ、コントロールの G'_0 は、200 Pa 程度だった。MCE-4000 を添加すると G'_0 の値は 5 倍近くまで増加した ($p < 0.05$)。つまり、生地は硬くなったということである。そのため、発酵終了から焼成に至った場合に生地が伸びず、発酵時より高さが減少したと考えられる。澱粉で置換して調製した生地は、攪拌中に流動性が付与されて軟らかくなる感覚があった。しかし、キヌア粉に MCE-4000 を添加したパンと違い、焼成中にケービングを起こさずに高さを維持することが出来た。まず、MCE-4000 のゲル化によって構造が作られ、生地に適度な軟らかさが付与されて生地が良く伸び、澱粉がクラムを固定し、結果的に体積が増加して維持されたと考えられる。澱粉で置換した時の G'_0 の値は、500~600 Pa 程度だった。グルテンフリーパンにおいて、澱粉で置換してその含量を増加させると、生地が軟らかい生地から流動性のあるバターに変化し、パンが軟らかくなって凝集性が増したとい

う報告がある¹²⁾。本研究においても澱粉で置換した場合の結果は一致している。

MCE-4000 を添加したことによる期待効果は、グルテンに替えて強力な構造を作ることだった。製パン試験により、その効果は確かめられた。しかし、糊化特性の結果をみると、置換 0% の粉は、澱粉で置換した場合と比較して、ピーク粘度が低く ($p < 0.05$)、粘りが足りなかったと考えられる。また、動的粘弾性の測定結果からも貯蔵弾性率(弾性要素)が不足していたことが予測できた。

キヌア粉の場合、生地をある程度のかたさにする、すなわち最初の硬さ (G'_0) を 500 ~ 600 Pa 程度に調製することが必要だと考えられた。そして、ゲル化開始温度が粉の糊化開始温度より低い増粘多糖類を添加して構造を作ったうえで、澱粉によって補強されれば、膨らみの良いパンが調製できると推察された。

4. 要約

キヌア粉でパンを調製する場合、増粘多糖類を添加しても、パンの膨らみはほとんど改善せず、クラムはかたくなった ($p < 0.05$)。そこで、コーンスターチとさつまいも澱粉で、キヌア粉の一部を置換して製パン性を検討した。

キヌア粉の場合、一部を澱粉で置換して調製した結果、パンの骨格を補強する効果が認められた。また、置換した澱粉の糊化特性も大きな影響を及ぼしていると考えられ、置換した澱粉の種類によって糊化開始温度は変化し、ピーク粘度は増加した ($p < 0.05$)。どんな種類の澱粉を使用するのが適しているかは、さらに検討していく必要がある。本章では、さつまいも澱粉で置換して調製したパンの方が軟らかい傾向が認められた。その要因の 1 つとして、アミロペクチン含量の違いが考えられる。アミロペクチンは分岐鎖構造であり、抱え込む水分が多いと考えられている。さつまいも澱粉はアミロペクチンの割合が高く、MCE-4000 の効果のひとつでもある保水性も作用し、焼成後のパンのクラムが、コーンスターチより軟らかかったのではないかと推察された。

動的粘弾性の結果からは、生地調製直後の貯蔵弾性率(硬さ)を 500~600 Pa 程度に調製し、ゲル化開始温度がキヌア粉の糊化開始温度より低いものを使用すると、パンの骨格が先に構成され、パンがうまく膨化すると考えられた。

今後は、アミロペクチンの構造を含めて検討し、澱粉の効果をさらに検討していきたい。

文献

- 1) 田中康夫, 松本博(2009), 「製パンの科学 (I) 製パンプロセスの科学」, 光琳, 東京, pp.55-56
- 2) Sanchez, H. D., Osella, C. A. and de la Torre, M. A. (2002), Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava Starch, *Journal of Food Science*, **67**, 416-419
- 3) Mancebo, C. M., Merino, C., Martínez, M. M. and Gómez, M. (2015), Mixture design of rice flour, maize starch and wheat starch for optimization of gluten free bread quality, *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 6323-6333
- 4) Burešová, I., Tokár, M., Mareček, J., Hřivna, L., Faměra, O. and Šottníková, V. (2017), The comparison of the effect of added amaranth, buckwheat, chickpea, corn, millet and quinoa flour on rice dough rheological characteristics, textural and sensory quality of bread, *Journal of Cereal Science*, **75**, 158-164
- 5) Schober, T. J., Bean, S. R. and Boyle, D. L. (2007), Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: biochemical, rheological, and microstructural background, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **55**, 5137-5146
- 6) Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C. and Santiago, L. G. (2012), Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking, *International Journal of Food Science and Nutrition*, **63**, 491-497
- 7) Sanchez, H. D., Mancuello, J. C., and Fabre, H. C. (1983), Essai de panification pour le pain francais, *Industries des Cereales*, **25**, 29-32
- 8) 時村金愛, 下園英俊, 池田健一郎, 田之上隼雄(2002), 品種の異なるサツマイモ澱粉の澱粉ゲルの老化と澱粉の特性, *Journal of Applied Glycoscience*, **49**, 305-312
- 9) 平島円, 高橋亮, 西成勝好(2019), コーンスターチゲルの力学特性に及ぼすシヨ糖添加の影響, *日本調理科学会誌*, **52**, 231-239
- 10) 石井和美, 早川あつ美, 藤井恵子(2018), 雑穀で調製したグルテンフリーパンの製パン性, *日本調理科学会誌*, **51**, 89-96

- 11) Kusunose, C., Fujii, T. and Matsumoto, H. (1999), Role of starch granules in controlling expansion of dough during baking, *Cereal Chemistry*, **76**, 920-924
- 12) Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G. and Lindhauer, M.G. (2011), Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch, *LWT Food Science and Technology*, **44**, 681-686

総括

グルテンフリーパンという言葉からイメージされるのは、おそらく米粉パンであろう。小麦パンが主食の欧米では、小麦グルテン不耐症、セリアック病の罹患者向けに、古くから主食のグルテンフリー化の研究が進められてきた。その主材料は、米粉や澱粉である。

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、特にカルシウムや鉄を豊富に含み、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、日常食に用いられる食材として定着していない。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は、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。

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、キサントガムやタマリンドガム、メチルセルロース(MC)やヒドロキシプロピルメチルセルロース(HPMC)など、多くの素材が使用されている。本研究では、MC1種とHPMC2種を雑穀粉パンに添加した。

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たおいしいパンを調製することであった。どういったパンがおいしいかを評価するには、多くの基準が存在すると考えられる。パンの種類は数多く、テクスチャーや味、風味もそれぞれである。筆者の目指すおいしい雑穀粉パンは、日常生活で抵抗なく食べられるパンである。それが実現すれば、雑穀の消費量増加が見込まれ、生産の増加、価格の安定につながると確信している。

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増加し($p < 0.05$)、クラムの軟らかいパンを調製できた($p < 0.05$)。糊化特性値のピーク粘度($r = 0.93$ $p < 0.05$)と最低粘度($r = 0.93$ $p < 0.05$)とパンの比容積の間には相関が認められ、最終粘度と製パン性との間にも関係性が認められ、回帰式を得た($R^2 = 0.941$ $p < 0.05$)。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も相関が認められ($r = 0.93$ $p < 0.05$)、

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。

一方で、第 2 章で検討したキヌアパンは、いずれの増粘多糖類を添加しても、比容積の値に差はなかった。MCE-4000 を 1.00% 以上添加するとケービングは改善された。しかし、ホワイトソルガムパンとは対照的に、MCE-4000 を添加するとクラムはかたくなる傾向が認められた。また、ホワイトソルガム粉で調製したパンのように、焼成中の生地伸びはなく、発酵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。そこで、第 3 章ではキヌア粉の一部を澱粉で置換し、MCE-4000 を添加してパンを調製し、澱粉の置換が製パン性に与える効果を検討した。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、それぞれ 30% 置換すると状態の良いパンが調製できた。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より増加した ($p < 0.05$)。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、製パン性の指標の関係性を検討したところ、関係性は認められなかった。

ホワイトソルガム粉とキヌア粉では、粉体特性もパン調製時の加水量も異なるため、単純に比較は出来ないが、糊化特性は測定条件が同様なため比較可能である。Fig. 1 に、ホワイトソルガム粉に MCE-4000 を添加した粉と、第 3 章で使用したコーンスターチ、さつまいも澱粉、キヌア粉の一部を澱粉で置換した粉に MCE-4000 を添加した粉の糊化特性の粘度軌跡を示す。さつまいも澱粉、コーンスターチのピーク粘度はかなり高く、その影響で、澱粉で 30% 置換した粉のピーク粘度は増加した ($p < 0.05$)。ピーク粘度に達した温度は、製パン性が良くなかったキヌア粉に MCE-4000 を添加した場合と比較して低下傾向が認められた。ホワイトソルガム粉に MCE-4000 を添加した場合、キヌア粉に MCE-4000 を添加した場合よりピーク粘度は高く ($p < 0.05$)、ピークに達した温度は低い傾向を示した。そして、ホワイトソルガム粉に MCE-4000 を添加した粉、キヌア粉に MCE-4000 を添加してさらに澱粉で 30% 置換した粉の最終粘度は、キヌア粉に MCE-4000 を添加した粉と比較して大きく増加した ($p < 0.05$)。つまり、ピーク粘度とそこに達する温度、最終粘度を調整できれば膨らみは増加すると推察された。

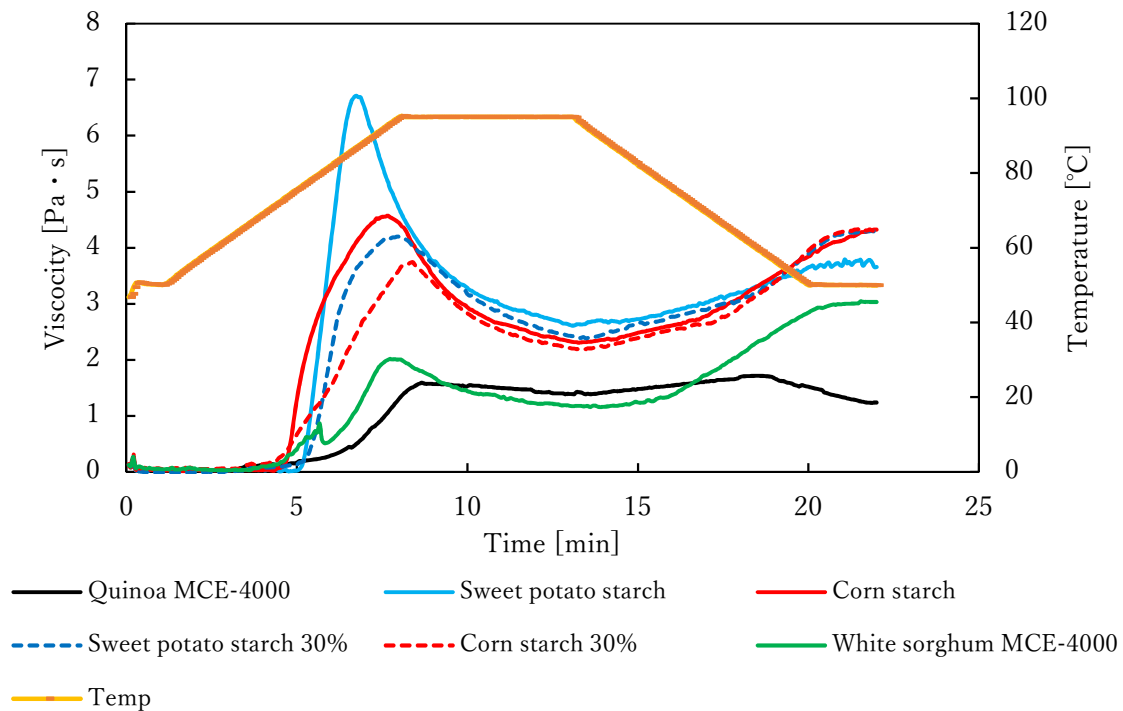


Fig.1 Pasting curves of millet flour

本研究では、ホワイトソルガム粉を使用して良く膨化した軟らかいパンを創製できた。キヌア粉に増粘多糖類を添加して調製したパンは、MCE-4000を添加したパンが唯一ケービングを起こさなかった。しかし、比容積の値は増加せず、クラムは硬化する傾向が認められた。キヌア粉の30%を澱粉で置換すると膨らみは増加傾向を示し、さつまいも澱粉で30%置換した場合、クラムは軟らかくなった ($p < 0.05$)。

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パンは良く膨化する。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ると考えられた。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。

ホワイトソルガム粉に MCE-4000 を添加して調製したパンは、予備の官能評価では、75%のパネルから主食用のパンとして食べても良いという回答を得ている。一方で、ぼそぼそした食感と風味が問題点として挙げられた。しかし、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。この2点を改善すれば、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、さらに改良を検討する必要がある。一番の問題点は、独特なえぐみと味である。しかし、膨らみを改善して軟らかい食感を得ることも重要だが、視点を変えてドイツパンのような、どっしりとしていて噛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。

パンの調製に影響を与える要因は、調製条件や粉体特性、生地の特性のほか、アミロース、アミロペクチンの構造など多岐にわたり、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するとともに、嗜好性をさらに高めていきたい。

そして、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。

謝辞

本研究を進め学位論文をまとめるにあたり、始終ご懇切なるご指導、ご助言を賜りました小林三智子教授に深く感謝申し上げます。

また、研究の遂行にあたり、試料のご提供や実験の実施に多大なご協力を賜りました、信越化学工業株式会社様、同・合成技術研究所新延信吾様に厚く御礼申し上げます。

また、ご助言下さった十文字学園女子大学、森高初恵先生に感謝申し上げます。

さらに、懇切なご指導をいただき、有益なご助言を賜りました、井手隆教授、ならびに中村禎子教授に深く御礼申し上げます。

最後に、夫石井健二の陰ながらの応援に感謝します。