

グルテン不使用米粉パンの品質評価研究

早川文代¹, 風見由香利¹, 関山恭代^{2,3}, 矢野裕之^{1*}

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
食品研究部門 食品加工流通研究領域¹, 食品分析研究領域², 高度解析センター³

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

電話 029-838-7499 FAX 029-838-7996

Quality evaluation study on the gluten-free rice breads

Fumiyo HAYAKAWA, Yukari KAZAMI, Yasuyo SEKIYAMA and Hiroyuki YANO*

Food Research Institute, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-8642 Japan

*Corresponding author, hyano@affrc.go.jp

Summary

Three types of gluten-free rice bread (A, B and C) were compared by microstructure analyses, sensory evaluations, nutrient component analyses, and magnetic resonance imaging. Bread A was made of rice flour, water, yeast, sugar, salt and oil. B contained trehalose and polysaccharide, additionally. C contained egg, milk and trehalose in addition to A's ingredients. Sensory evaluations of "tactile impression of bread" were conducted by "Check-All-That-Apply" test using the Japanese texture lexicon, and following correspondence analyses. The results suggested that the 10 panelists evaluated "bread-ness" by two important axes: "hard and dry vs. soft and moist" as well as "coarse vs. fine crumb". Magnetic resonance imaging of the bread crumb suggested that the bubble wall structure and the water distribution therein confer important effects to the sensory evaluations. In conclusion, comprehensive deliberation on the results obtained by varied analyses was shown to be critical to quality evaluation of foods.

Key words: Gluten-free bread, Magnetic resonance imaging, Sensory evaluation,

連絡先 (Corresponding author)

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

矢野裕之

電話 029-838-7499 FAX 029-838-7996

E-mail hyano@affrc.go.jp

グルテンを使用しない米粉パンの需要は内外で高まりつつある¹⁾。一般的なパンの原料となる小麦粉の生地はグルテンを含有し、これが発酵ガスを閉じこめるため生地が膨らむ。これに対し、米粉生地はグルテンを含まないため、増粘剤²⁾や酵素³⁾⁴⁾を添加したり、米ゲル⁵⁾を利用した作製法が検討されている。著者らは最近、増粘剤などの添加物を要せず、米粉・水・イースト・砂糖・食塩・油脂(バターや菜種油)だけで米粉100%パンを製造する技術を開発し、広島大学と共同で、この生地が「微粒子型フォーム」のメカニズムで膨らむことを明らかにした⁶⁾。また、このメカニズム情報を参考にしながら、タイガー魔法瓶株式会社と共同で上記パンを家庭で簡単に作製できるIH型ホームベーカリーを開発し、同社より製品化された。今後も様々なグルテン不使用の米粉パンが実用化され、米粉の消費拡大に寄与することが期待される。一方、小麦粉パンに慣れ親しんだ消費者の需要に応えるには、品質の高さが求められるが、これまでグルテン不使用パンについては、品質に関連した研究が十分になされていない。そこで本研究では、「食パンらしさ」の評価法を探る試みとして、実用化された3種の米粉食パンA, B, Cについて官能評価試験、磁気共鳴画像法(MRI)解析、電子顕微鏡による微細構造観察、成分分析を実施し、比較検討したので報告する。

実験材料および方法

1. グルテン不使用米粉パンの作製

グルテン不使用パンAは、IHホームベーカリー(KBD-X100, タイガー魔法瓶株式会社)を使用し、同機の取扱説明書「無添加グルテンフリー食パン」メニューに従って作製した。米粉と水はマニュアルに従い、あらかじめ冷蔵庫で冷やしたものを使用した。付属のパンケースに米粉(リ・ファリーヌ, 群馬製粉株式会社)を250g, 水220gを添加し、スタートキーを押してパン羽根による攪拌を開始した。21分後、攪拌が自動停止した後、砂糖24g, 塩4g, ドライイースト(スーパーカメラ, 日清フーズ株式会社)4.5g, および菜種油4gを添加した。スタートキーを押して攪拌を再開し、その後の発酵・

焼成はプログラムに従って自動的に実施された。

2. 市販のグルテン不使用パンの調達

市販の2種の米粉パンB, Cを購入した。表示される原材料は、Bが米粉, なたね油, 砂糖, 食塩, ドライイースト, トレハロース, 増粘多糖類, Cが米粉, たまご, バター, 乳類, グラニュー糖, イースト, 塩, トレハロースであった。本研究の目的はパン品質の優劣を比較することではなく、品質を評価するための手法の検討であるため、製品を特定する情報は記載しない。

3. パンの比容積測定

A, B, Cの各パンを重量計測, および, レーザー体積計(SELNAC - WinVM2100A, 株式会社アステックス)による形状計測に供試した。得られた測定値に基づき, パンの膨張性の指標となる比容積を, パン1g当たりのパンの容積(mL/g)として算出した。

4. パンの微細構造観察

パンの微細構造観察は株式会社東海電子顕微鏡解析に委託して実施した。各パンを液体窒素で冷凍し, -20℃で真空乾燥した。オスミウム・プラズマコーター(日本レーザー電子株式会社製, NL-OPC80NS)を使用して, 乾燥したパンを厚さ50nmのオスミウム膜でコーティングし, 観察用サンプルを作製した。走査型電子顕微鏡JSM-6340F(日本電子株式会社)を使用し, 加速電圧5.0kVで観察した。

5. 官能評価試験

1) パネル

農業・食品産業技術総合研究機構食品研究部門(以下, 農研機構食品研究部門)の近隣住民から募集し, ISO8586⁷⁾を参考にして選抜, 訓練し, 4~14年の官能評価経験をもつ10名をパネルとした。パネルリストにはインフォームドコンセントを行い, 評価参加の承諾を得た。なお, すべての評価は手で触って行われた。

2) 試料

Aは厚さ18mmにスライスし, BおよびCは製

品の厚さ（16 mm および 15 mm）とし、縦 50 mm × 横 55 mm にカットして試料とした。試料は、ラップで包み、-20℃で冷凍後、試験当日に自然解凍したものを3桁のランダムコードを付した白色の皿に試料を乗せ、テクスチャーの質の評価は単独提示し、食パンらしさの評価は1枚のトレイに3試料を三角形に配置して提示した。提示順および並

べ方は、パネリストごとにランダム化した。

3) テクスチャーの質の評価

多肢選択法（Check-All-that-Apply; CATA と呼ばれる⁸⁾）を用いた。これは、あらかじめ作成した候補用語リストを選択肢としてパネリストに提示し、試料の特徴として該当するものをすべて選択させ、頻度集計したデータから試料の特徴を把握する

表1 選択肢として用いたテクスチャー用語リスト

粗い	こちっ*	しなびた*	ふかふか	ぼろり
重い	こちんこちん*	しなやか*	ふっくら	ほわっ
かさかさ	ごつごつ*	しまりがある	ふっくり	ほわほわ
がさがさ	細かい	湿った	ぷっくり*	水が多い
かすかす	ゴムのような	じゅくじゅく*	ふにゃっ*	水っぽい*
かたい	こわい(強い)*	しんなり*	ふにゃふにゃ*	密な
硬い	ごわごわ	すかすか	ふにゃり*	むちむち
堅い*	ごわっ*	すかっ*	ふによふによ*	むっちり
固い	こわれやすい	ずっしり	ふわっ	むにゅっ
かちかち*	サクサク*	スポンジ状の	ふわふわ	むにゅむにゅ
がちがち*	ザクザク*	弾力がある	ふわふわ*	もさもさ
かちんかちん*	サクッ*	ちぎれやすい	ふわり	もそっ
かちんこちん*	ザクッ*	つぶれやすい	ふんわか	もそもそ
がっしり	裂けやすい	つまった	ふんわり	もちっ
からから*	さっくり*	どっしり	ぺたっ	もちもち
からっ*	ざっくり*	なめらか*	ぺたぺた	もっさり
からり*	ざらざら	ねたっ*	ぺちゅっ*	もっちり
軽い	ざらっ	ねたねた*	ぺちゅり*	もろい
乾いた	ざらつく	ねちっ	ぺったり*	もろっ
ぎっしり	ざらり	ねちねち*	ぺっとり*	もろもろ*
きめ細かい	しけた*	ねっちり*	ぺとっ	やわらかい
吸湿性がある	しけたっ*	のびる*	ぺとぺと*	軟らかい
吸水性がある	しこしこ*	ばさっ*	へなっ*	柔らかい
強靱な*	しこっ*	ばさっ	へなへな*	わた状の*
均一な	しっかり	ばさつく	ぼそっ	
ぐずぐず*	しっけた*	ばさばさ*	ぼそっ	
くずれやすい	しっとり	ばさばさ	ぼそぼそ	
くたたく*	じっとり*	パフ状の	ぼそぼそ	
くだけやすい*	じとじと*	ばらっ*	ほろっ	
くたっ*	しとっ	ばらばら*	ほろっ	
くつつく	じとっ*	ばらり*	ほろほろ	
こしがある	しなしな*	ひからびた*	ぼろぼろ	
こちこち*	しなっ*	ふかっ	ほろり	

* 選択された頻度が低かったため、最終的な解析から外した用語。

方法である。日本語テクスチャー用語体系⁹⁾¹⁾から、予備実験によって試料のテクスチャーを表現する候補用語を抽出し、156語を選択肢とした(表1)。これらを50音順に評価用紙に列挙した。

評価は、パネリストがラップをはずして試料に触って行った。評価にあたっては、試料のクラムを指で触ったり、軽く押ししたりした後、縦と横2方向に裂いて、感じられたテクスチャー用語に全てチェックを入れるよう指示した。

試料とテクスチャー用語についてクロス集計を行い、コレスポネンス分析を適用した。コレスポネンス分析にはSPSS Statistics 22(日本IBM)を用いた。

4) 食パンらしさの評価

各試料の食パンらしさについて、最適化記述プロフィール(Optimized Descriptive Profile; ODP)法¹⁰⁾の尺度とプロトコルの一部を用いて評価した。尺度は120mmの目盛りのない線尺度(visual analog scale; VAS)の左端に「食パンらしくない」、右端に「食パンらしい」とラベルをつけたものを用いた。パネリストに、3試料を比較しながら各試料の「食パンらしさ」に応じて尺度上の該当する位置にしるしをつけるよう指示した。評価用紙には、「食パン」にはイギリスパンやソフトタイプ等、小麦粉の食パンを広く含むことを明記した。3試料同時に提示し、一つずつ左端から時計回りに評価し、3試料の全ての評価が終わった後は、必要であれば、再度、戻って評価してもよいこととした。

尺度の左端からしるしまでの距離をその試料の評定値とし、得られた値には、有意差を $p < 0.05$ として、多重比較のTukeyのHSD法を行った。多重比較にはSPSS Statistics 22(日本IBM)を用いた。

さらに、官能評価から1週間後に、パネリストに質問紙調査を行い、表1の用語リストを50音順に提示して、「食パンらしいテクスチャー」に必要なと考えられる特性全てにチェックするよう指示した。得られた回答を頻度集計した。

6. 栄養成分分析

パンの栄養成分分析は一般財団法人日本食品分析センターに委託した。水分は常圧加熱乾燥法、蛋白質はケルダール法、脂質は酸分解法、灰分は直接灰

化法、ナトリウムは原子吸光光度法による。

7. MRIによるパンの解析

パン中央部から縦15mm×横15mm×高さ18mmの試料を切り出してプラスチックホルダにセットし、ポリエチレンフィルムで覆って試料の乾燥を防いだ。これを外径25mmのガラス管に挿入後、内径25mmのプロトン用RFコイルに挿入し、MRI計測に供した。イメージング用アクセサリを装備した7TのNMRスペクトロメーターを用いてマルチスライス・マルチエコー法によりパン横断面を撮像した。撮像条件は、繰り返し時間5秒、エコー時間3.5ミリ秒、エコー数32、撮像視野20×20mm²、撮像マトリックス128×128(面分解能156×156μm²)、スライス厚1mm、積算回数1回、スライス数3枚であり、撮像時間は10分40秒である。各ボクセルの T_2 緩和時間は画像解析ソフトウェアParavision(ver 3.0.2, Bruker)を用いて以下の式により算出し、 T_2 分布画像を得た。

$$M(t) = M_0 \exp(-tE/T_2)$$

ここで、 $M(t)$ はエコー時間 t における信号強度、 $M_0=M(t=0)$ である。

また、エコー時間3.5ミリ秒の画像をプロトン密度強調画像とした。

結果および考察

1. パンの内相構造と比容積

パンの断面(図1)を目視で比較すると、Aはきめが細かく膜厚が薄く、Bはきめが粗く膜厚が厚く、Cはきめがやや細かいものの膜厚が厚かった。図2は、凍結乾燥したパンをオスミウム膜でコーティングし、走査型電子顕微鏡で観察したものである。50倍、250倍の観察では目視の場合と矛盾しない結果が得られた。また、高倍率の観察(×1000, ×5000)では、凹凸や多孔性など、3種のパンで表面構造にそれぞれ特徴がみられた。Cは、A、Bと比較して表面に凹凸が多く、小さな穴が多

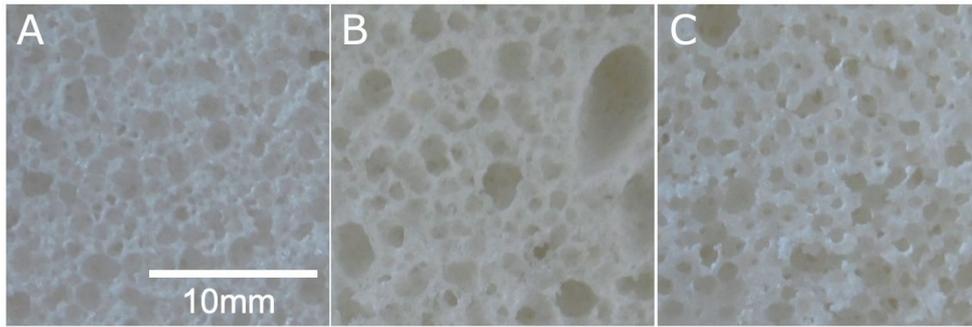


図1 パン A, B, C の断面図

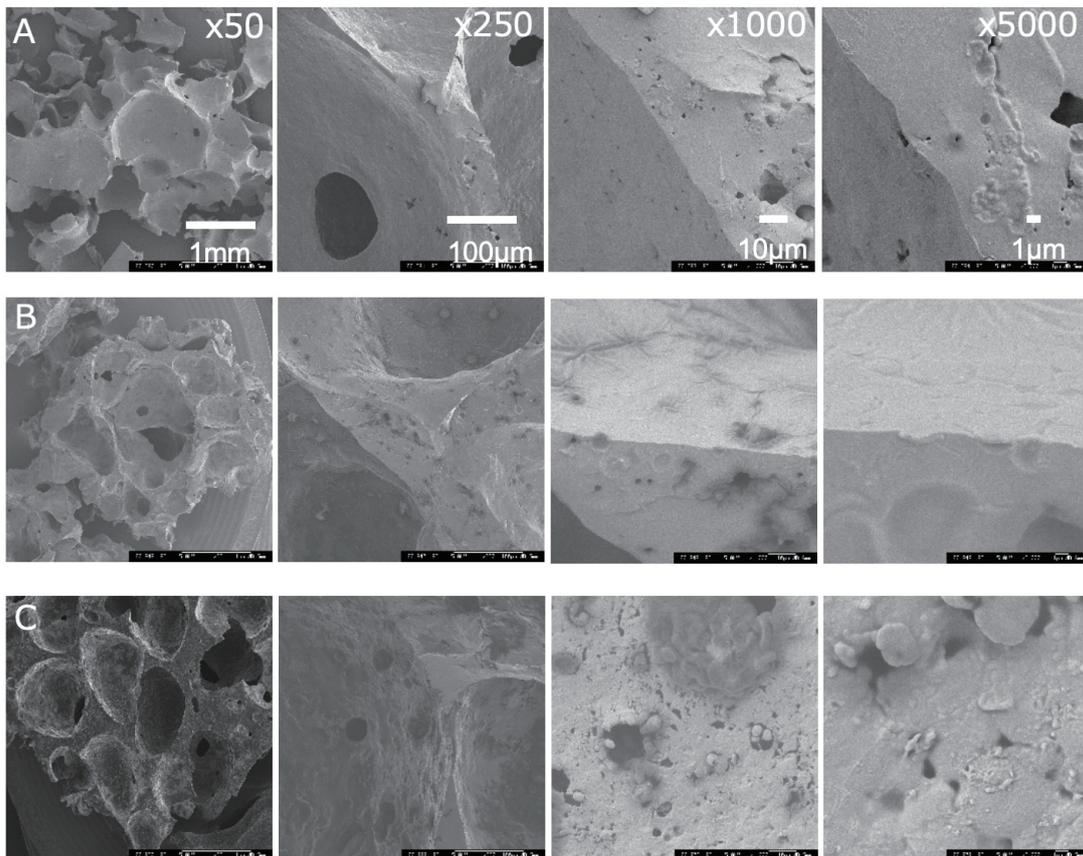


図2 米粉パン A, B, C の電子顕微鏡観察

* A のみ, 引用文献 12 より転載した

くみられた。また、A は、表面の凹凸は C ほど顕著ではなかったが、細かい穴が散見された。A, B は原料に増粘剤の有無の違いがあるにも関わらず、目視した表面のなめらかさに大きな差はなかった。パン 1g あたりの体積 (mL) を示し、膨らみの指標となる比容積はそれぞれ、A 4.0, B 2.5, C 2.1 であった。

2. 官能評価試験結果

官能特性はパンをさわった感触で評価した。テク

スチャー用語と 3 種の試料に関して、10 人のパネリストの反応をクロス集計した。既報¹¹⁾と同様に出現頻度の低い用語を解析から除外し、最終的に、試料 3 種、用語 88 語の 3 行 88 列のデータ行列を用いてコレスポネンス分析を行った。コレスポネンス分析の結果から作成したテクスチャーマップ (図 3) では、第 1 軸は、硬くて乾燥 vs 柔らかくてしっとり、第 2 軸は、粗い vs きめ細かい、と解釈できた。第 1 軸について、A および B は負の方向、すなわち柔らかくてしっとりした特徴を示す方向に配置

推測される。

上記以外にも、「裂けやすい」、「むにゅっ」(A)、「ざらざら」、「こしがある」(B)、「こわれやすい」、「ぼろっ」(C)など、さまざまなテクスチャー要素の表現が各試料の周囲に配置されており、複数の品質が複合的に知覚されたことが示唆された。食パンとしての重要な評価因子に加えて、こうしたさまざまな表現も併せて品質を評価することは、消費者の商品に対する多様な嗜好性を判断する上で重要なポイントとなる可能性も考えられる。著者らはグルテン不使用パンの高付加価値化研究を進めている¹²⁾が、テクスチャー用語体系を利用した多肢選択法とコレスポンデンス分析による解析やODP法の応用による簡易プロファイリングは、パンに限らず、今後、様々な商品開発において有効に機能する手段となることが期待される。

3. 成分分析結果

各パンの成分分析結果を表2に示す。水分含量は $A > B \approx C$ であったにもかかわらず、Aが「軽い」と評価された(図3)ことは、Aの比容積が高く、体積あたりの重さが少ないこと、また、きめが細かく(図1, 2)「ふわふわ」した印象を与えた(図3)ことが要因であろう。Bの食物繊維量がA, Cと比較して高かったのは、Bが原料に増粘多糖類を含むことが原因と考えられる。また、Cは原料にたまご、乳類を含むため、他者より蛋白質含量が高い。

表2 3種米粉パンの成分比較

成分項目	単位	A	B	C
水分	g/100g	47.6	39.7	40.8
蛋白質	g/100g	3.9	3.6	4.5
脂質	g/100g	1.5	5.6	4.9
灰分	g/100g	0.9	1.3	1.0
炭水化物	g/100g	46.1	49.8	48.8
糖質	g/100g	45.2	48.0	48.0
食物繊維	g/100g	0.9	1.8	0.8
エネルギー	kcal/100g	212	260	256
ナトリウム	mg/100g	338	471	332
食塩相当量	g/100g	0.859	1.20	0.843

4. MRI 試験結果

プロトン密度強調画像：パンのプロトン密度強調

画像では、ボクセル(156 $\mu\text{m} \times 156 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$)あたりの水プロトンの数の違いが信号強度の違いに最も反映されると考えられる。B, CのパンはAと比較して単位重量あたりの水分はやや少ない(表2)が、B, CはAよりきめが粗く比容積が小さい(図1, 2)。パン内相の体積あたりの水分含量の比は $A:B:C=1:1.34:1.63$ である。B, Cでは水分が厚い気泡膜に局在するため試料密度および水プロトン密度が高いボクセルが多くなり、Aよりも信号強度が高くなった(図5P)可能性が考えられる。 T_2 分布画像：A, BはCと比較して T_2 緩和時間が短い傾向がみられた(図5T)。AはB, Cと比較して気泡膜が薄く(図1, 2)比容積が大きい。水分がパン内相で分散し、水の運動性が低いため T_2 緩和時間が短くなった可能性が考えられる。また、Bは原料に増粘多糖類を含むことから、これが結合して水分子の運動性を低下させたと推測できる。

以上のように、パン気泡膜の構造や成分がパン内相における水分の分散性に重要な影響を与えることが示唆され、官能評価で示されたワード表現(図3)、特に「ふんわか」、「むにゅっ」(A)、「ざらざら」、「弾力がある」(B)、「かさかさ」、「ぼそぼそ」(C)などの手ざわりの感覚にも寄与したであろう。一方、脂質の量は $A < B \approx C$ (表2)であった。プロトン密度、 T_2 分布ともに水以外に脂質の影響も受けるため、MRI試験結果の解釈は議論の余地があり、今後の検証を要する。

本研究で使用した3種の米粉パンはいずれも小麦粉やグルテン成分を含まないため、小麦粉パンに特徴的な香りや弾力には欠ける傾向にあった。今後は、小麦粉パンを含めた官能評価試験を実施し、消費者がより好ましいと感じるように、品質向上を目指したい。

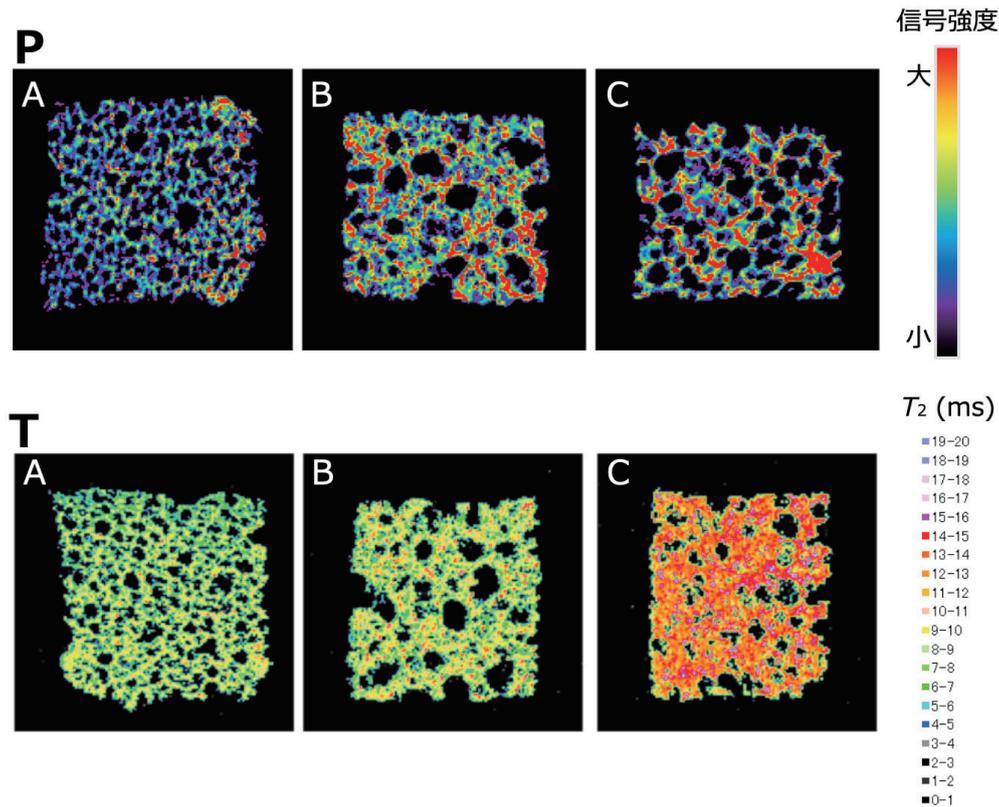


図5 プロトン密度強調画像 (P) と T_2 分布画像 (T) について
3種の米粉パンで比較したもの

要約

微細構造解析, 官能評価, 成分分析, MRI 解析により3種のグルテン不使用米粉パン A, B, Cを比較した。Aは米粉, 水, イースト, 砂糖, 食塩, 油脂を原料とし, Bはさらに増粘多糖類とトレハロースを含む。またCは, 増粘多糖類を含まないが, たまご, 乳類, トレハロースを含む。テクスチャー用語体系を利用した多肢選択法とコレスポネンス分析による, 「パンをさわった感じ」の官能評価 (N=10) から, 「食パンらしさ」には, 「硬くて乾燥 vs 柔らかくてしっとり」と, 「粗さ vs きめ細かさ」の2つが重要な評価指標となることが示唆された。また, MRI 解析により, パンの気泡膜構造と水分分布が官能評価に重要な影響を与えることが示唆された。官能評価, MRI, 微細構造観察, 成分分析など, 原理の異なる解析結果を総合的に検討することが, 食品の品質評価に有効であることが示唆された。

文献

- 1) Naqash, F., Gani, A., Gani, A., and Masoodi, F.A. (2017). Gluten-free baking: Combating the challenges - A review. *Trends Food Sci. Technol.*, **66**, 98-107.
- 2) Kittisuban, P., Ritthiruangdej, P., and Suphantharika, M. (2014). Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast β -glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology. *LWT- Food Sci. Technol.*, **57**, 738-748.
- 3) Hamada, S., Suzuki, K., Aoki, N., and Suzuki, Y. (2013). Improvements in the qualities of gluten-free bread after using a protease obtained from *Aspergillus oryzae*. *J. Cereal Sci.*, **57**, 91-97.

- 4) Kawamura-Konishi, Y., Shoda, K., Koga, H., and Honda, Y. (2013). Improvement in gluten free rice bread quality by protease treatment. *J. Cereal Sci.*, **58**, 45-50.
- 5) Nakano, A., Kokawa, M., and Kitamura, Y. (2018). Development and characterization of gluten-free bread using rice gel and rice flour. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi)*, **65**, 124-129 (中野明日香, 粉川美踏, 北村豊. 米ゲルと米粉によるグルテンフリーパンの開発および特性の検討. 日本食品科学工学会誌).
- 6) Yano, H., Fukui, A., Kajiwara, K., Kobayashi, I., Yoza, K., Satake, A., and Villeneuve, M. (2017). Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism. *LWT-Food Sci. Technol.*, **79**, 632-639.
- 7) International Organization for Standardization. (2011). Sensory analysis – General guidance for the selection, training and monitoring of selected and expert assessors. ISO/DIS 8586.
- 8) Valentin, D., Chollet, S., Lelievre, M., and Abdi, H. (2012). Quick and dirty but still pretty good: a review of new descriptive methods in food science. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **47**, 1563-1578.
- 9) Hayakawa, F., Kazami, Y., Nishinari, K., Ioku, K., Akuzawa, S., Yamano, Y., Baba, Y., Kohyama, K. (2013). Classification of Japanese texture terms. *J. Texture Stud.*, **44**, 140-159.
- 10) Silva, R.C.S.N., Minim, V.P.R., Simiqueli, A.A., Moraes, L.E.S., Gomide, A.I., and Minim, L.A. (2012). Optimized descriptive profile: a rapid methodology for sensory description. *Food Qual. Prefer.*, **24**, 190-200.
- 11) Hayakawa, F., Fukui, A., Matsuki, J., and Yano, H. (2017). Effect of glutathione on the physical properties of soy dough. *Bull. NARO Food Res. (Noukenkikou Kenkyuu Houkoku Syokuhin kenkyuu Bumon)*, **1**, 1-7 (早川文代, 福井明子, 松木順子, 矢野裕之. 大豆粉生地物性に対するグルタチオンの効果. 農研機構研究報告 食品研究部門).
- 12) Yano, H. (2019). Development of isoflavone-containing gluten free rice bread. *Bull. NARO Food Res. (Noukenkikou Kenkyuu Houkoku Syokuhin kenkyuu Bumon)*, **2**, in press (矢野裕之. 大豆イソフラボンを配合したグルテン不使用米粉パンの開発. 農研機構研究報告 食品研究部門).

引用 URL

- i) 早川文代, 日本語テクスチャー用語体系
http://www.naro.affrc.go.jp/nfri-neo/introduction/files/nfri_0304_0726-6.pdf (2018.7.27)

