

氏名	廣瀬 理恵子
学位（専攻分野の名称）	博士（農学）
学位記番号	乙 第 963 号
学位授与の日付	令和 5 年 7 月 20 日
学位論文題目	米粉および麵用小麦粉を原料とするパンの品質向上ならびに機械化製パン技術の開発
論文審査委員	主査 教授・博士（農芸化学） 辻 井 良 政 教授・農学博士 村 田 容 常 教授・博士（農芸化学） 野 口 智 弘 教授・博士（農芸化学） 野 口 治 子 名誉教授・農学博士 高 野 克 己

論文内容の要旨

わが国の食料自給率は長期的に低く推移し、2021年にはカロリーベースで38%、生産額ベースで63%と先進国の中で最も低い。この背景には食生活の変化があり、畜産物や油脂類の消費が増大する一方で、自給率の高い米の消費が減少してきた。炊飯による米の消費は限界に達しており、主食としても米飯に比べてパン食が定着し、安定した需要がある。しかし、小麦の自給率は17%（2021年）と低く、パン用小麦に限ってはほぼ輸入に頼っている。輸入小麦粉については世界的な異常気象による不作、輸送費用の高騰などに加えて、ウクライナ情勢による供給懸念等も影響し、小麦の国際価格の高騰は問題になっている。このような状況下で小麦に代わり、パンの原料になる国産穀物の利用が期待されている。とりわけ自給率の高い米、国内で生産される小麦があげられるが、米は製粉性、タンパク質の種類、デンプンの性状などの相違から製パン適性は低い。日本で生産される小麦の多くは気候風土に合う麵用であり、製パンには不向きとされており、これらをパンへ利用するには技術的な課題が多い。昨今、米は製粉技術や新規用途米粉の開発が進み、国産小麦についてはパン加工適性に優れた優良な新品種の導入・普及により、商品開発などの取組は増加しつつある。しかし、このような取り組みに対応できるのは、手作りによる製造で小規模生産のリテールベーカーリーなどに限られ、特徴的な商品の開発も望めるが、パン生産の85%を占める大規模工場における機械化製パンでは十分な対応はできず、大量生産には至らない。米粉あるいは麵用小麦を用いた大量製パン技術の開発が進むと、自給性の高い米や麵用小麦粉の需要が増す。麵用小麦の場合は国産に切り替える余地もあり、食料自給率向上へ貢献する可能性が高い。

本研究においては米粉や国産麵用小麦粉を用いて、製パン利用への加工性を高めるため、原料粉の性状（平均粒子径、デンプン損傷度など）を分析するとともに、パン生地の粘弾性の改良を検討し、機械化製パンに対応する技術の開発を目的とした。

米粉パンの種類は原料小麦粉の 40%を米粉に置換添加する米粉混合パンとした。原料に使用した米粉は従来和菓子などに用いられているものとは異なり、平均粒子径、デンプン損傷度の低い製パン用の新規用途米粉とした。デンプン損傷度が高いとパンの膨らみの程度を示す比容積が低下するという報告が多く、パン用米粉のデンプン損傷度は低い傾向にある。しかし、低い損傷度の米粉を多く使用すると生地にはべたつきが生じ、機械化製パンにおいては作業性を低下させる大きな要因となる。そこで原料に使用した米粉のデンプン損傷度に着目し、機械化製パンの工程およびパンの品質が向上する適度なデンプンの損傷度を見出した。また、国産麺用小麦は製パンに重要なグルテンが乏しいが、小麦粉から抽出したグルテンを補うと生地弾性が強くなりすぎ、実用化の障害となっていた。本研究では、グルテンから酸性水溶液で調製したグリアジンを主成分とする酸可溶性小麦タンパク質（以下 ASP）を用いて生地の伸展性を高めることで生地物性を改良し、また発酵前（中種生地）に食塩を加えるなど、中種生地弾性を高めることでパン用小麦粉を用いた対照のパンに匹敵する品質のパンが得られた。さらにこれら技術を踏まえ、米粉と国産麺用小麦粉を用いた機械化大量製パンを学校給食パンとして試み、良好な膨らみと食感を併せ持つ、国産穀物粉を主体とするパンの生産技術を見出した。

以下に本研究の概要を述べる。

I. 米粉を用いた機械化製パン技術の開発

1. 米粉粒子の形態並びに性状比較

米粉（和菓子用、パン用）の粒子の形状を走査型電子顕微鏡（以下 SEM）で観察すると、米粉は、製パンに適さない和菓子用である上新粉の粒子は角張った形状を示したが、パン用米粉は丸みを帯び、小麦粉と同様の楕円柱状の粒子が観察された。また、和菓子用米粉の平均粒子径は小麦粉より大きく、パン用米粉は低かった。デンプン損傷度は上新粉が 10.7%であるのに対し、パン用米粉で 3.1%と小麦粉の 8.1%よりも低い値を示した。パン用米粉は、粒度およびデンプン損傷度が低いことで比容積が向上すると報告されており、近年パン用に流通している米粉の多くはデンプン損傷度を低く抑え生産されている。

2. 40%米粉混合パンの製パン試験

2-1. デンプン損傷度の低い米粉を用いた製パン試験

現在流通しているパン用米粉を用いた米粉パンは、10%程度の米粉の配合であれば問題なく生産されている。しかし、米粉の利用量増加を目指し、本研究では米粉 40%添加にて検討を行った。製パン方法は機械化製パンで一般的に採用されている中種法とした。中種法はその工程に混捏（生地を捏ねること）と発酵が 2 回入る。1 回目の混捏で原料粉の 7 割を用いてパン酵母、水を加えて中種生地を作り、第 1 発酵を行い、次に発酵後の中種生地（中種発酵生地）に残りの原材料を加えて混捏（本捏）を行い、これを分割、成形後、再度発酵さ

せ焼成した。米粉の置換により減少する小麦タンパク質の補填として、グルテンおよび ASP を 7 : 3 の割合で対粉 10% 添加した。また中種発酵中のガス生成量を増加させるため、中種配合にマルトース 2% を加えた。さらに焼成時、米デンプンの糊化粘度を抑制するために至適温度の異なる 2 種類の α -アミラーゼを添加した。この試作により、米粉混合パンの品質は比容積、物性などの向上効果がみられたが、生地表面にわずかな水が浮き、機械化製パンの場合、パン生地の機械への付着などの問題が生じる懸念があった。そこで機械化製パンの作業性をさらに向上する必要があると考え、生地の吸水性に影響を及ぼすデンプン損傷度の検討をすることとした。

2-2. 米粉混合パンにおけるデンプンの損傷度がパンの品質に与える影響

パン用米粉の研究はたいへん広く検討されており、上述したような粒度、デンプン損傷度の低いパン用の米粉が開発された。しかし、大量に米粉パンを製造する機械化製パンの実施には生地の吸水性やべたつきに対する詳細な検討が必要と考えた。特に製パンではある程度のデンプン損傷度が必要になるが、パン用の米粉はデンプン損傷度が 3% 前後のものが多く、8% 程度有するパン用小麦粉に比べてかなり低い。手作業の工程で、小規模生産のリテールベーカリーなどでは対応が可能であるが、生地の混捏、発酵後の分割、成形などの工程が機械で連続的に行われる機械化製パンではその機器類への生地の付着などが問題になる。そこで、米粉混合パンについてはデンプン損傷度の差異に関する検討を加えた。

米粉は用途別に区分された 2 種類、C1 と C3 を用いた。両者の平均粒子径はいずれも 50 μm 前後で、C1 はデンプン損傷度 2.7%、水分保持力 77.0% で一般的な米粉パン用の性状である。C3 はデンプン損傷度 13.7%、水分保持力 125.2% となった。それぞれの形態を観察すると C1 は胚乳単細胞の形状を保ち、表面が細胞壁で覆われている粒子が比較的多く存在した。C3 は表面が剥がれているような部分が多くみられた。両者の粉砕方法は気流粉砕法によるものだが、C1 は粉砕前に水に浸漬させた湿式法で、C3 は乾式法によることから、その相違がそれぞれの性状および形態に影響したと推察した。

3. デンプン損傷度の異なる米粉混合パンの機械化製パン技術の検討

通常パン用粉として用いられる C1 に C3 を加えてパン生地の吸水性や粘り（べたつき）の軽減を検討した。C1 : C3 を 100 : 0, 75 : 25, 50 : 50 の割合で実験室規模の製パン試験を行った結果、C3 を加えると製パン作業性改善、並びにパンの経時的変化が抑制された。そこで、米粉のデンプン損傷度が少ない試験区 L (C1 : C3, 100 : 0, 損傷度 2.7%) とデンプン損傷度を高くした試験区 M (C1 : C3, 50 : 50, 損傷度 8.2%) について機械化製パンに対応する実験工場での製パン試験を行った。その結果、デンプン損傷度の増加で保水力が向上し、生地が硬くなったことにより、中種発酵 4 時間後の生地容積（膨倍比）の変化は試験区 M が 3.1 で L の 3.4 より低いがいずれも 3 倍以上の容積膨張が見られ、中種の発酵としては十分な状態であった。また、本捏時の試験区 M は L に比べて混捏時の生地のまとまりが

早く、パンの焼減率、物性（硬さ、凝集性）の経時的変化が抑制された。パン焼成時の水分蒸発の指標である焼減率は試験区 L で 9.6%、M は 8.3%と C3 米粉の水分保持力の高さが影響していることを推察した。また、デンプン損傷度が高くなることで本捏時に添加した α -アミラーゼが効果的に作用し、パン内相物性の経時的変化の抑制に寄与したと考えられた。米粉混合パンの機械化製パンではデンプン損傷度を適度に調整することが生地を保水性を高め、製パン作業性並びにパンの品質向上を可能にすることを明らかにした。

II. 麵用小麦を原料とする製パン技術の開発

国産小麦はうどんなど麵用途の加工適性に優れているが、そのタンパク質の量と質の点から製パンには不向きとされてきた。近年、遺伝子解析が進み、小麦は加工用途に適した品種の改良が進められているが、地域や収穫年度によりタンパク質含有量の振れが大きい等パン用小麦の生産には課題がある。日本で生産しやすい麵用小麦の製パン利用は小麦の需要増加にもつながることから、その製パン性について検討した。

パン用小麦と比べてタンパク質含量が低い麵用小麦粉を用いて中種法で製パンを行うと中種発酵後の生地は切れやすくガス保持性が低下する。中種生地が弱いと混捏耐性、発酵中に生じるガスの保持性、機械成形性などが劣り、焼成したパンはその膨らみ、食感、保存性が劣り、品質的に高い評価が得られない。そこで機械化製パンに対応できるような生地のグルテン形成性を改善するため、ファリノグラフにより生地物性の測定を行った。不足するタンパク質をグルテン 3% で補うと生地の安定度はやや向上するが、生地形成時の微細構造を SEM で観察すると不均一なグルテン形成が観察された。パンをよく膨らませるためには生地内に均一で細かな気泡とこれを包む膜として伸展性のある連続したグルテンが必要である。そこで ASP を 3% 添加したところ、均質なグルテン形成を観察したが、生地の弱性は改善されなかった。グルテンの粘弾性を高めるために、パンの基本的な材料で、通常は中種生地発酵後に添加する食塩を中種生地に添加した。その結果生地の安定性が向上し、グルテンが緻密に形成されることを認めた。製パンにおいて、食塩はグルテンの物理的性質を変化させ、弾力性を高める役割があるが、酵母の発酵力を低下させる。そこで、中種に食塩を加える場合、酵母の量を増し、アスコルビン酸も増量し、粘弾性の高い中種生地进行を調製する「中種改良法」を開発し、製パン試験を行った。外国産小麦粉を用いた標準的な中種法を対照とし、タンパク質無添加および 3% ASP 添加の標準的な中種法も加え、この 4 試験区で製パン試験を実施し比較検討した。3% ASP のみ添加しても比容積は増加したが、中種改良法に比べて釜伸びが劣る外観を呈した。釜伸びの良いパンは粘弾性の高い生地に埋めこまれたデンプン粒が正常に糊化して得られる。3% ASP のみ添加した場合は焼成時、デンプンが十分に包埋されない状態でグルテンが伸展したため、比容積は高くなったがその物性の経時変化は異なり、3 日後は特に凝集性が著しく低下した。中種改良法は対照のパン用小麦粉を

用いたパンに近い値が得られ、経日変化も抑制された。そこで内相気泡の微細構造を観察すると相違がみられた。国産麵用小麦粉を用いて 3% ASP 添加あるいは無添加で標準中種法を行った場合、不均一な形状の気泡が見られ、気泡膜表面は剥離している部分が目立ち、表面には露出している扁平なデンプン粒子が多く存在した。このような糊化デンプンは水分が蒸発しやすく老化しやすい要因の一つと推察した。中種改良法ではグルテンの弾性が高く、焼成によって気泡は縦長に伸びた形状を維持して膨らみ、パン用小麦粉に近い保存性を示し、パンの品質が向上したと考えた。

Ⅲ. 米粉と麵用小麦粉を原料とするパンの製造

1. 国産米粉と麵用小麦粉を用いた 50%米粉混合パンの製造

米粉と麵用小麦粉を用いて、機械化製パンに適應できる技術を検討し、それぞれに有効な技術を開発した。その成果を応用し、埼玉県産米粉と麵用小麦粉を用いて、小麦粉の 50% を米粉で置換した 50%米粉混合パンを試作した。米は C1 と C3 タイプに製粉した。なお本試験に用いた米粉と麵用粉はタンパク質、デンプン損傷度が I, II 章で検討した原料とは異なるため、中種生地 of 調製は試行錯誤を繰り返し、加水量、食塩の添加量、時期も検討し、機械化製パンに対応する実験工場において食パンを試作した。その条件は中種生地を麵用小麦粉のみで調製し、本捏段階で米粉を添加し、食塩の添加は中種、本捏に 1% ずつ加え、小麦タンパク質はグルテン:ASP を 10:5 と増加した。米粉のデンプン損傷度が低い C1 (2.4%) のみの Test L と C3 (11.4%) を加えてデンプン損傷度を 6.8% に高めた Test M の 2 試験区で比較検討した。その結果、Test M で製パン工程における生地状態が改善された。パンの比容積 (mL/g) は Test L で 5.28 mL/g, Test M は 5.00 mL/g となり、デンプン損傷度が高いと若干下がったが、それ以上にパン内相は柔らかく、保存性が向上することを示した。埼玉県産米粉と麵用小麦粉を用いた 50%米粉混合パンの機械化製パンにおいても、米粉のデンプン損傷度の増加で、製パン作業性、パンの品質向上に寄与することを認めた。

2. 国産米粉と麵用小麦粉を用いた 50% 米粉混合パンの嗜好調査

上記技術を応用し、埼玉県産麵用小麦粉に米粉を 50% 置換添加し、学校給食に供するロールパンを試作し、東京農業大学第一高等学校中等部の生徒 459 名をパネリストとして、C1 のみを使用した A と C1, C3 を各 50% とした B の 2 種類のロールパンを機械化製パンし、嗜好調査を行った。その結果パネリストの 59% が B をおいしいと評価し、評価基準は柔らかさやもちもち感など物性的評価が 78% を占め、いずれも米粉の水分保持力向上の効果が起因していることが示唆された。

総 括

本研究の成果を以下に要約した。

米粉の大量消費を目指し、米粉 40% 置換にて機械化製パン工場での生産可能な技術開発を検討した。近年米粉用として流通している平均粒子径が小さく、デンプン損傷度の低い米粉では、米粉置換率が高いと生地中の水分を保持しきれず、生地は柔らかくべたつくものとなった。機械化製パンでは、このべたつきは大きな問題点であり、改善が求められる。本研究では、デンプン損傷度の低い米粉 C1 に高い米粉 C3 を添加し損傷度を小麦粉と同程度まで高めることで、生地内の遊離水が減少し、べたつきの軽減に寄与することを明らかにした。また、焼成時には損傷度が低いデンプンに比べ、焼減率が低下した。さらに内相物性（硬さ、凝集性）の経時的変化の抑制に、 α -アミラーゼの作用が関与するが、デンプンの損傷度が高いことでその作用性も増加し、より高い効果を示したものと推察された。

麵用小麦粉を用いた製パンは ASP を加えてタンパク質を補足し、食塩を中種生地に加えるとその作用により、グルテン内で粘性のあるグリアジンの凝集性が促され、グルテニンとの相互作用を強めることで生地の粘弾性が強くなり、ガス保持力が向上し、パン用小麦粉と近似したパン内相の気泡構造を形成することを認めた。

最後に上述 2 つの技術を合わせ、埼玉県産の米粉と麵用小麦粉を用い、機械化製パンを試みたところ、それぞれを 50% 配合した 50% 米粉混合麵用小麦パンの製造が可能となった。さらに本製品を従来のデンプン損傷度の低い米粉を用いたものと比較のため、学校給食で嗜好調査を行った結果、本製品が柔らかかさやしっとり感に優れ、美味しいパンとしての評価を得た。

以上、製パン性の劣る米粉、麵用小麦粉についてはそれぞれのグルテン、デンプンの性状・相互作用を把握し、粘弾性、保水性のあるパン生地を調製することにより、機械化製パンを可能にする技術を開発した。

審査報告概要

本研究は、国内産の米粉および麵用小麦粉を用いた大規模機械製パンへの利用技術を開発しその機構を明らかにした。近年パンへの米粉の利用が拡大しているが、これらの米粉は製粉時に生じるデンプンの損傷度を大幅に抑えることで生地の粘性を下げ、生地の膨張を阻害させない特徴をもつ。しかし、損傷度の低下は生地の吸水性を低下させ、べたつく生地となる欠点を有しており、大規模機械製パンに用いることが困難であった。本研究では、デンプンの損傷度を従来のパン用米粉に比べ若干高めることで生地のべた付きを抑え、機械製パンに利用が可能となる技術を見出した。また、損傷度を上げることで、酵素の作用性が上昇し焼成後のパンの品質が向上することが可能となった。また、通常はパンに用いられない麵用小麦粉のパンへの応用を検討した。パンの製造にはグルテンが重要であり、麵用小麦粉には

グルテン製剤で補うのが一般的である。しかし、グルテン製剤は弾性が高くネットワーク構造が不均一となる。このため、酸可用性小麦タンパク質（ASP）を用い、生地ネットワーク構造の改善を図るとともに生地への弾性付与で用いられている塩化ナトリウムの添加タイミングを最適化することで、パン用小麦粉に匹敵するパンの製造を可能とする技術を見出した。これらの研究成果等を詳細に検討した結果、審査員一同は博士（農学）の学位を授与する価値があると判断した。