

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

2023 年

廣瀬 理恵子

目次

緒言	1
I. 米粉の性状の相違が製パン性に及ぼす影響	3
1. 試料および実験方法	5
1.1. 供試材料	5
1.2. 小麦粉および米粉のデンプン分離抽出法	5
1.3. 供試材料の成分および性状分析	6
1.4. 走査型電子顕微鏡による小麦粉および米粉の観察	6
1.5. 粘度特性の分析	6
1.6. 米粉を配合したパン生地の発酵中のガス量測定	6
1.7. 製パン試験	7
1.8. 米粉デンプン損傷度の異なる製パン工程	10
1.9. 中種発酵中の生地容積および生地温度の変化	11
1.10. 本捏工程中の生地物性の特性値の測定	11
1.11. 成形時の生地物性の測定	11
1.12. パンの体積および比容積の測定	13
1.13. 米粉混合パンにおける α -アミラーゼ添加の影響	13
1.14. 米粉混合パンにおけるリパーゼ添加の影響	13
1.15. 統計解析	13
2. 結果および考察	15
2.1. 小麦粉および米粉の理化学的性状	15
2.2. 小麦粉および米粉粒子の形態観察	15
2.3. 小麦粉、米粉およびその分離デンプンの粘度特性	15
2.4. 米粉配合生地の発酵に及ぼす糖添加の影響	19
2.5. マルトースを添加した米粉混合パンの製パン試験	21
2.6. 米粉混合パンにおける α -アミラーゼ添加の影響	23
2.7. リパーゼ製剤がパンの品質に及ぼす影響	26
2.8. デンプン損傷度が異なる米粉の性状および形状	31
2.9. 走査型電子顕微鏡による米粉の観察	33
2.10. 中種発酵中の生地容積とその温度変化	33
2.11. 食パンの内相物性の経時的变化	34
2.12. 中種発酵中の生地容積の変化	38
2.13. 本捏中の生地物性に及ぼす米粉デンプン損傷度の影響	38

2.14.	成形時の生地物性に及ぼす米粉デンプン損傷度の影響	38
2.15.	パンの形状と焼減率	43
2.16.	パン内相物性の経時的変化	43
3.	要約	47
II.	麵用小麦粉を原料とする製パン技術の開発	48
1.	試料および実験方法	49
1.1.	供試材料	49
1.2.	麵用小麦生地の物性測定	49
1.3.	製パン方法	49
1.4.	パンの体積と比容積の測定	49
1.5.	走査型電子顕微鏡による微細構造の観察	50
1.6.	酵素法による糊化度測定	50
1.7.	パン内相の物性とその経時変化の測定	51
1.8.	統計解析	51
2.	結果および考察	52
2.1.	タンパク質による麵用小麦粉生地物性の改良	52
2.2.	ASP添加麵用小麦粉生地へ及ぼす食塩添加の影響	52
2.3.	中種改良による製パン配合および工程	55
2.4.	中種改良生地の発酵時の膨倍および生地の微細構造	58
2.5.	山型パンの外観、体積および比容積	61
2.6.	パン内相の微細構造観察	62
2.7.	パン内相のデンプン糊化度の経時的変化	67
2.8.	パン内相の硬さと凝集性およびその保存中の変化	67
3.	要約	70
III.	米粉と麵用小麦粉を原料とするパンの製造	71
1.	試料および実験方法	72
1.1.	供試材料	72
1.2.	分析方法	72
1.3.	機械化製パン工程	72
1.4.	パンの体積および比容積	74
1.5.	パン内相の物性とその経時変化の測定	74
1.6.	米粉混合パンの嗜好調査方法	74
2.	結果および考察	75
2.1.	米粉および麵用小麦粉の性状分析	75

2.2. 機械化製パン工程	75
2.3. パンの体積および比容積	75
2.4. パンの物性およびその経時的変化	79
2.5. 米粉混合パンの嗜好調査	79
3. 要約	82
総括	83
参考文献	93
関係論文	99
謝辞	100

緒言

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。この背景には輸入に依存する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食生活の変化がある。炊飯米による米の消費は限界に達しており、米飯ではない食品への応用が求められている。一方、主食として定着してきたパン食は安定した需要はあるが、原料となる小麦の自給率は17%と低い。小麦は製粉して、パンや麺類、菓子など様々な食品に加工利用されるが、パン用小麦はほぼ輸入に頼る現状である（農林水産省資料, 2022）。輸入小麦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、パンの原料である小麦に代わる国産穀物の利用が期待されている。とりわけその代替穀物としては自給率の高い米、国内で生産される小麦があげられる。しかし、米は製粉性、タンパク質の種類、デンプンの性状などが小麦とは大きく異なり、製パン適性は低い。また、日本で生産される小麦の多くはうどんなどの日本麺に加工適性がある麺用であるため、製パン性には劣り、これらをパンへ利用するためには技術的な課題が多い。

小麦粉中には粘りのあるグリアジンと弾力のあるグルテニンというタンパク質があり、水を加えて捏ねると両者が絡み合い、粘弾性のあるグルテンが形成される。パンはこのグルテンの作用で、よく膨らみ、その形を維持できる（長尾, 1989）。そこでパンを製造するためには、グルテンを形成するタンパク質含量が高く、質の良い小麦粉（強力粉）が使われる。

代替穀類として期待される米はグルテンを形成するタンパク質を持たず、デンプンの性状も小麦粉とは異なる。また、日本で生産される小麦は気候風土に合う麺用に用いる中力粉向けの品種が多く、粘弾性のあるグルテンを形成するタンパク質含量が不足し、製パンには不向きとされている（福田ら, 1974; 五島ら, 1986）。

米粉は和菓子や米菓の原料として古くから使われてきたが、パンやケーキ、麺類などへの利用のため、これらに適する品種の育成や製粉技術の開発が進み、新規用途の米粉が製造されている（農林水

産省資料, 2023a)。また、国産小麦についてはパン加工適性に優れた新品種の導入・普及 (池田, 2017) により、商品開発などの取組が増加しつつある。

このように製パンに不向きとされていた国産穀物の米や麵用小麦を用いた製パン利用については多方面で研究が進められているが、現状では手作りによる製造、いわゆる小規模生産のリテールベーカリーなどでの対応に限られる。パン生産の 85%を占める大規模工場における連続的な大量生産形式 (以下、機械化製パンとする) では、生地調製および発酵はバッチ式で行われ、その後の工程 (分割・丸め・中間発酵・成形・最終発酵・焼成) は連続して自動的に進むため、これに対応する適度な粘弾性のあるパン生地が必要である。米粉や麵用小麦粉のような国産穀物を用いた機械化製パンへの技術については、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 とする) の利用に関する報告 (廣瀬, 2004; 新井, 2018; Arai et al., 2020) はある。しかし、小麦成分の 7 割程度を占め、吸水性などの点から生地物性へ及ぼす影響を持つデンプンについての詳細な関与には至っていない。

米粉あるいは麵用小麦粉を用いた大量製パン技術の開発が進むと、これらのパン用途としての需要が増し、自給率が高い米はその消費拡大につながり、麵用小麦についても稲の裏作での栽培など、増産する余地があるので、食料自給率向上へ貢献する可能性が高い。

本研究においては国内産の米粉や麵用小麦粉を用いて、製パン利用への加工性を高める原料粉の性状 (平均粒子径、デンプン損傷度など) を分析するとともに、パン生地の水分保持力、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。

I. 米粉の性状の相違が製パン性に及ぼす影響

米粉は古くから和菓子、米菓などの原料として用いられ、菓子類の豊富な種類に適した様々な製粉方法による製品が伝承されてきた。さらに、最近では小麦粉を原料としているパンや麺、洋菓子などに利用する米粉が新規用途向けとして注目されている（神田，2009）。しかし、主食としての需要が増えているパンは原料小麦粉の成分、特性を利用し、発酵を含む複雑な工程を経て得られるため、小麦粉と米粉を単に置き換えただけでは製パン適性や良好なパンの品質を得ることは難しい。そこで米粉を用いる製パンについては原料米の品種から製粉方法、製造に至るまで多くの研究が行われてきた（高野ら，1986；高橋ら，2009；青木ら，2010；與座ら，2010；高橋ら，2011；小河ら，2011；本間ら，2016；樋口，2015；市川，2010）。

米粉は小麦粉と異なり、パンの骨格となる「グルテン」をもたない。そのため米粉を用いるパンを製造するには①米粉に小麦粉から取り出したグルテンを2割程度添加する「グルテン添加米粉パン」、②小麦粉に米粉を1-5割程度混合する「米粉混合パン」、③グルテンや小麦粉を加えず米粉だけ、ないしは米粉に増粘多糖等の粘質物を添加する「グルテンフリー100%米粉パン」のいずれかの方法が必要である（鈴木保宏，2014）。

「グルテン添加米粉パン」について、高橋らは米の品種特性、特にアミロース含量とファリノグラフの吸水率の間に高い相関性を見出し、タンパク質の添加量が一定である場合、デンプンの吸水特性が米粉の吸水性に大きく影響し、パンの物性にはタンパク質の組成等の影響も示唆し、米粉パン製造には中アミロース米（アミロース含量15-25%）に適性があるとの見解を示した（高橋ら，2009）。

「米粉混合パン」について、新井らは小麦粉の40%を米粉に置き換え、加える小麦タンパク質を10%に設定し、グルテンおよびグルテンの20-40%をグルテンから酸性水溶液で抽出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（矢嶋ら，2014，以下ASPとする）に置換することによる製パン試験を行い、機械化製パンで大量製造が可能となり、その品質が向上することを報告した（新井ら，2018）。

一方、製パンに用いる米粉は、粒子径およびデンプン損傷度が低い方がパンの比容積が高くなるという報告（Araki et al., 2009;

Matsuki et al., 2015; 本間ら, 2016) が多い。実際、米粉パン用の米粉は新規用途米粉として粒子径、デンプン損傷度を低く抑える湿式気流製粉の米粉 (宋戸ら, 1992) が利用されている場合が多い。與座らは米粉混合パンについて、市販のパンやケーキ用の新規用途米粉と和菓子用米粉で小麦粉の30%を置き換え、製パン試験を行った。その結果、新規用途米粉 (平均粒子径100 μ m以下, デンプン損傷度2.87–5.49%) に比べて、デンプン損傷度が高い (20%以上) 和菓子用米粉のパンの比容積は低下したが、デンプン損傷度が4.85%の上用粉や7.71%の牛皮粉では新規用途米粉と同程度の比容積であることを示した (與座ら, 2014)。高野らは米粉を30–40%配合した米粉混合パンでは粒度が小麦粉より低く、デンプン損傷度が10–15%の米粉が適しているとしている (高野ら, 1986)。損傷したデンプンは吸水性が高くなるため、生地 の物性や製パン性に影響を及ぼす (松木, 2012)。デンプン損傷度の低い米粉を用いて米粉混合パンを製造する場合は米粉の比率が高くなると、小麦粉のみの原料よりデンプン損傷度の比率が低くなり、生地にべたつきが生じ、機械化製パン性においては作業性を低下させる大きな要因となる。

本章では、米粉の消費量を拡大するために、機械化製パンによる大量製造を念頭に置き、小麦粉のみのパンと風味的に近い食味を有する米粉混合パンの製造技術の開発が必要であると考えた。機械化製パンを想定すると現状は小麦粉に米粉を30%程度が限界であり、米粉のさらなる利用拡大には米粉配合比率を増加させる必要がある。上述したように新井らは米粉比率を40%まで引き上げ、生地改良のために加えるグルテンの20–40%をASPで置換え、既存の設備で機械化製パンを可能にしている (新井ら, 2018)。この知見を含め、既知の報告を踏まえ、さらにデンプン損傷度にも言及し、製パン性ならびにパンの品質向上について検討した。

1. 試料および実験方法

1.1. 供試材料

小麦粉は市販パン用強力粉（ミリオン，日清製粉社製）以下は小麦粉とする）を用い、使用時までポリエチレン製袋（厚さ 0.08mm）に封入後、冷凍保存した。

米粉は一般的に入手しやすい国産の中アミロース米（ジャポニカ種：新潟県産コシイブキ）を原料とした湿式気流粉碎品（以下は製パン用米粉とする）、パンの形状でケーシングが少ないといわれるアミロース含量の高い米（青木ら，2010）を比較としたが、国内生産品が入手できなかったため外国産米（インディカ種）の湿式気流粉碎品（以下は高アミロース米粉とする）を用いた。

さらに、デンプン損傷度の差異が製パン性におよぼす影響を検討する目的で、国産ウルチ米を原料とし、日の本穀粉社製で粒度が細かい C タイプの米粉を用いて、湿式気流粉碎によりデンプン損傷度が低い「ウルチ粉 C1」（以下は C1 とする）、乾式気流粉碎によりデンプン損傷度が高い「ウルチ粉 C3」（以下は C3 とする）で比較検討した。

小麦タンパク質は、グルテン（Whetpro 80, ADM 社製）およびグルテンより抽出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（グリア A, アサマ化成社製，以下は ASP とする）を用いた。

1.2. 小麦粉および米粉のデンプン分離抽出法

原料の小麦粉、米粉から常法（福場，1989）に準拠し、以下のよう
にデンプンを分離した。

小麦分離デンプンは小麦粉でドウをつくり、水で洗い、デンプンを流出させ、遠心分離（3000rpm, 10 分間）により得られた沈殿物に 0.2% (w/v) 水酸化ナトリウムを加えて室温下で攪拌（40 分間）し、タンパク質を除去した。次いでアルカリ反応がなくなるまで水洗を繰り返した後、エタノール、アセトンを用いて脱水、乾燥した。
米分離デンプンは米粉に 0.2%水酸化ナトリウム (w/v) を加えて攪拌（1 時間）し、遠心分離（3000rpm, 10 分間）後、アルカリ反応を示さなくなるまで水洗を繰り返し、エタノール、アセトンを用いて脱水乾燥した。

1.3. 供試材料の成分および性状分析

供試材料の一般成分分析は常法（堤,安井, 1996）に準拠し、水分は常圧加熱乾燥法（135℃）、灰分は酸化マグネシウム添加灰化法（600℃）、タンパク質はケルダール法（小麦粉：N×5.70, 米粉：N×5.95）によりそれぞれ測定した。デンプン損傷度については損傷デンプン定量キット（Starch damage assay kit, Megazyme 社製）を用いて定量した。アミロース含量はヨード呈色法（Juliano, 1971）により、デンプンあたりのアミロース含量として示した。また、レーザ回折式粒子径分布測定装置（SALD-2000, 島津製作所製）を用いて、乾式測定法により小麦粉と米粉の平均粒子径を求めた。なお、C1/C3の米粉についてはイソプロピルアルコールを用い、レーザ回折・散乱法（LMS2000, セイシン企業社製）で測定し、平均粒子径を示した。さらに水分保持力の測定はイオン交換水を用いた SRC（Solvent Retention Capacity with water）AACC 法 56-11（AACC International, 2000）により、製品重量当たりの%で示した。

1.4. 走査型電子顕微鏡による小麦粉および米粉の観察

小麦粉および米粉は固定・脱水処理せず、導電テープを貼った試料台に分散させて、走査型電子顕微鏡（Miniscope TM3000, 日立ハイテクノロジーズ社製）によりそれぞれの形態を観察した。

1.5. 粘度特性の分析

豊島の方法（豊島ら, 1997）に準拠し、ラピッド・ビスコ・アナライザー（3D Plus, Newport scientific 社製, 以下は RVA とする）により供試小麦粉、米粉並びにそれぞれから分離したデンプンの粘度特性を測定した。各試料量は 3.5g（水分値 14%換算）採取し、水 25mL を添加して粘度特性試験を行った。

1.6. 米粉を配合したパン生地の発酵中のガス量測定

小麦粉に米粉を 40%置換添加したパン生地の発酵中のガス発生量をガス発生量自動計測装置ファーモグラフ II（AF-1101-10W, アトー社製）で測定した。発酵条件を 27℃、75%RH とし、300 分間までのガス発生量を 5 分間隔で測定した。その際、デンプン損傷度の低い米粉にはマルトースを添加し、発酵への影響をみた。

1.7. 製パン試験

機械化製パン技術の開発を最終的な目的としたため、製パン試験は70%中種法（以下は中種法とする）で行い、配合をTable 1、工程をFig.1に示した。小麦粉重量に対して、米粉を40% (w/w) 置換し、小麦タンパク質は中種と本捏時に分けて、小麦粉/米粉の重量に対して10% (w/w) を上乗せ添加し、ASPとグルテンの比率は2:8あるいは3:7とした。ミキシングは縦型ミキサ (VM-3, オシキリ社製) を使用し、4kg仕込みで行った（実験室規模製パン試験、以下は実験室規模とする）。中種混捏後は27°C、RH 75%で4時間発酵した。中種発酵生地と残りの配合原料を加えて本捏を行い、20分間のフロアタイムの後、分割、丸めを行い、次いでベンチタイムを経た生地はモルダ（センサモルダシステム Model WFS, オシキリ社製）を使用して、ローラ（第1ローラ間隙を8.0mm, 第2ローラ間隙を3.5mmとした）で伸展したものをロール状に成形した。山型食パン（ワンローフ）については450gの棒状生地を一斤（容積1700mL）に入れ、角型食パン（プルマン）については220gの棒状生地をU字に曲げ、U字の向きが互い違いになるように合計6本を角型食パン用パン型（3斤用容積5880 mL）に詰めた。38°C、RH85%の恒温恒湿器（ドウコンディショナ Model OBS-D5, オシキリ社製）で山型パンについては型上部から10mm生地が出た時、角型食パンについては型の上部から35-32mmの位置に生地が達するまで最終発酵を行い、オーブン（デッキオーブン Model DOV-T43, オシキリ社製）で山型食パン（240°C, 28分間）、角型食パン（230°C, 40分間）を焼成した。焼成後のパンは山型パンについては60分間、角型食パンについては90分間室温で冷却後重量を測定してポリプロピレン製袋（厚さ0.03mm）に一本ずつ封入した。

Table 1 Material formula of bread-making

Material	Baker's % ^{*1}	
	Wheat flour = 100	Wheat flour/Rice flour = 60/40
Sponge		
Wheat flour	70	42
Rice flour	—	28
Wheat protein ^{*2}	—	7
Maltose ^{*3}	—	2
Compressed yeast	2	2
L-Ascorbic acid	0.001	0.001
Water	40	47 ^{*4}
Dough		
Wheat flour	30	18
Rice flour	—	12
Wheat protein	—	3
Granulated sugar	6	6
Salt	2	2
Skim milk powder	2	2
Shortening	6	6
α -Amylase ^{*5}	—	0.010
Lipase ^{*6}	—	0.015
Monoglyceride ^{*7}	—	0.5
Water	26	29 ^{*4}

^{*1} The formula used was based on total flour (wheat and rice) weight.

^{*2} Wheat protein used ASP and gluten at a ratio of 2:8 or 3:7.

^{*3} Maltose was added by the result of gas production power examination during dough fermentation.

^{*4} The same amount of water as the wheat protein was added.

^{*5} GRINDAMYL A1000/GRINDAMYL MAX-LIFE E50 (Danisco) 0.005/0.005.

^{*6} GRINDAMYL EXEL 640 (Danisco). The addition of enzymes, such as amylase and lipase, are the optimum amount by pretest.

^{*7} MM-100 (RIKEN VITAMIN). No enzymes were added to bread with added monoglyceride.

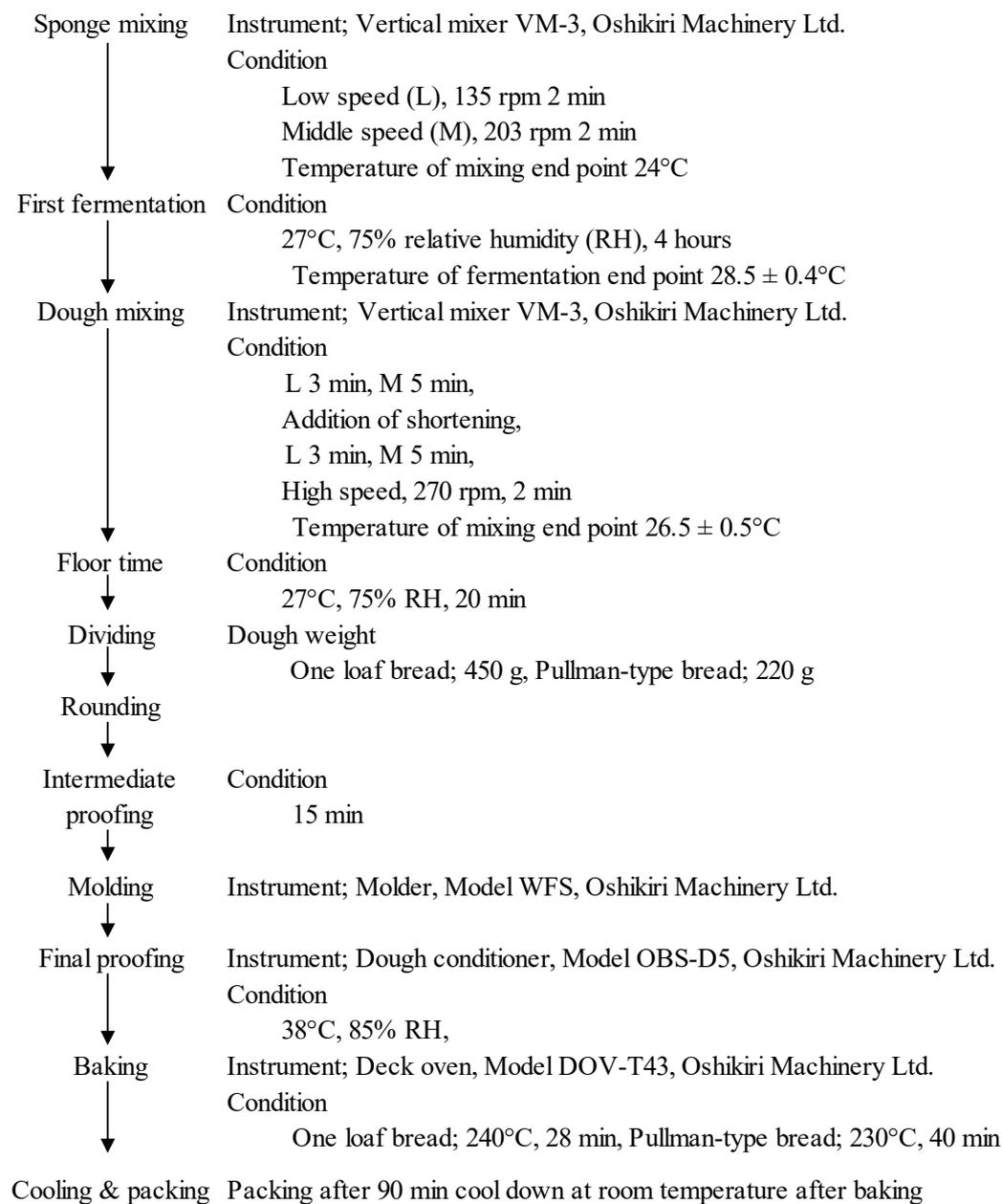


Fig.1 Bread-making process by the sponge and dough method

1.8. 米粉デンプン損傷度の異なる製パン工程

デンプン損傷度の異なる米粉を用いて製パン試験を行い、機械化製パンによる製パン性を検討した。1.7と同様、中種法により以下の方法で製パン試験を行った。まず、実験室規模（原料粉 3kg）でデンプン損傷度の異なる 3 試験区を比較し、その結果を受け、2 試験区に絞り、大量生産への対応を考慮し、機械化製パンの工程を想定した実験工場での製パン試験（原料粉 12.5kg，以下実験工場規模）を行った。Table 2 に配合を示したが、原料粉の米粉混合比率は小麦粉重量に対して 40% (w/w) を米粉で置換した。原材料はパン酵母（レギュラーイースト，オリエンタル酵母工業社製）、マルトース（サンマルト（ミドリ），林原商事社製）、イーストフード（C オリエンタルフード，オリエンタル酵母工業社製）、乳化剤（パンマック 200V，理研ビタミン社製）、食塩（精製塩，日本たばこ産業社製）、砂糖（グラニュー糖，三井製糖社製）、脱脂粉乳（H，雪印メグミルク社製）、ショートニング（カナリヤエイト，日油社製）を用いた。実験室規模ではデンプン損傷度の異なる米粉を用い、試験区 1 (C1/C3, 100/0, デンプン損傷度 2.7%)、試験区 2 (C1/C3, 75/25, デンプン損傷度 5.4%)、試験区 3 (C1/C3, 50/50, デンプン損傷度 8.2%) とし、デンプン損傷度の異なる米粉による製パン性を検討した。いずれにおいても、小麦タンパク質（グルテン: ASP, 7:3）は中種と本捏時に分け、小麦粉/米粉の重量に対して 10% (w/w) を上乗せで添加した。生地調製時の加水は米粉のデンプン損傷度が異なる試験区の場合にも同じ加水条件としたが、既報（新井ら, 2018）とは異なり、イーストフード・乳化剤を使用したため、加水を 68%とした。なお、実験工場規模で予備試験を行なった結果、試験区 1 のマルトース添加量は 1%、試験区 3 ではマルトース無添加で十分な中種の発酵状態（容積と温度変化）となることが分かり、同添加量で製パン試験を行なうこととした。実験室規模では縦型ミキサー（VM-3，オシキリ社製）、実験工場規模では横型ミキサー（製パン実験用ミキサー/デベロップモニタシステム Model HM50，オシキリ社製）を使用し、中種生地进行混捏した。中種生地は、27℃、RH75%の恒温恒湿器（ドウコンディショナ Model OBS-D5，オシキリ社製）で 4 時間の発酵を行った。次いで残りの配合原料を加えて本捏し、20 分間のフロアタイムの後、分割、丸め、ベンチタイムを経た生地はモルダ（ワイドファインモルダ Model WFS，オシキリ社製）を使用して、

ローラ（第 1 ローラ間隙を 8.0mm、第 2 ローラ 間隙を 3.5mm とした）で伸展したものをロール状に成形した。250g の棒状生地を U 字に曲げ、U 字の向きが互い違いになるように合計 6 本を角型食パン用パン型（3 斤用容積 5880 mL）に詰めた。38℃、RH85%の恒温恒湿器でパン型の上部から 30mm の位置に生地が達するまで最終発酵を行い、230℃、40 分間オーブン（デッキオーブン Model DOV-T43, オシキリ社製）に入れ、角型食パンを焼成した。焼成後のパンは 90 分間室温で冷却後重量を測定してポリプロピレン製袋（厚さ 0.03mm）に一本ずつ封入した。

1.9. 中種発酵中の生地容積および生地温度の変化

製パン試験を実施した際、中種生地进行をメスシリンダーに入れ（実験室規模では 200g、実験工場規模では 400g）、27℃、RH75%の恒温恒湿器中で、発酵中の生地の容積変化を測定し、30 分間ごとの膨倍比で示した。実験室規模では発酵中の中種生地の温度変化も測定した。

1.10. 本捏工程中の生地物性の特性値の測定

実験工場規模では、パン生地の物性変化（混捏特性）を連続的に測定表示できるセンサを装備した横型ミキサ（製パン実験用ミキサ/デベロップモニタシステム Model HM50, オシキリ社製）を使用し、回転速度は低速（L）55rpm、高速（H）110rpm で行い、混捏時間 50ms 毎に電力データをサンプリングすることで、ミキサのモータ負荷を捉え、2 試験区の本捏中の生地状態を測定表示した。

1.11. 成形時の生地物性の測定

実験工場規模では、生地が与える応力を測定することができるセンサを装備したモルダ（センサモルダシステム Model WFS, オシキリ社製）を使用し、生地がローラを通過する時間 1ms 毎にかかる圧力負荷をサンプリングし、米粉混合パン成形時の生地物性を測定した（Fig. 2）。

Material	Baker's %* ¹		
	Test 1 (C1/C3 100/0)	Test 2 (C1/C3 75/25)	Test 3 (C1/C3 50/50)
Sponge			
Wheat flour	42	42	42
Rice flour (C1)	28	21	14
Rice flour (C3)	—	7	14
Wheat protein (gluten)	4.9	4.9	4.9
Wheat protein (ASP)	2.1	2.1	2.1
Maltose* ²	2	2	2
	1	—	0
Yeast food	0.1	0.1	0.1
Emulsifier	0.25	0.25	0.25
Compressed yeast	2	2	2
Water	47	47	47
Dough			
Wheat flour	18	18	18
Rice flour (C1)	12	9	6
Rice flour (C3)	—	3	6
Wheat protein (gluten)	2.1	2.1	2.1
Wheat protein (ASP)	0.9	0.9	0.9
Granulated sugar	2	2	2
Salt	2	2	2
Skim milk powder	2	2	2
Shortening	6	6	6
α -Amylase* ³	0.010	0.010	0.010
Lipase* ⁴	0.015	0.015	0.015
Water	34	34	34

*¹ The formula used was based on total flour (wheat and rice) weight.

*² Maltose was added based on results of gas production power examination during sponge dough fermentation (the scale of the laboratory). Top showed the scale of the laboratory, bottom showed the scale of the experimental factory.

*³ GRINDAMYL A 1000/GRINDAMYL MAX-LIFE E50 (Danisco) 0.005/0.005

*⁴ GRINDAMYL EXEL 640 (Danisco)

Optimal amount of enzymes, such as amylase and lipase, were found in pretests.

1.12. パンの体積および比容積の測定

山型食パンは 3D レーザ体積計 (Selnac-Win VM, ケイ・アクシス社製) により翌日に体積を測定し、パンの比容積を求めた。

食パン内相の力学的特性の測定は角型食パンの内相を 25mm 角に切断し、クリープメータ (RE2-33005S, 山電社製) により、直径 40mm のプランジャーを 1mm/s のスピードで 70% 圧縮した際の 50% 圧縮時の応力を内相の硬さとして評価した。

1.13. 米粉混合パンにおける α -アミラーゼ添加の影響

製パン用に市販されている α -アミラーゼは至適温度の異なる 2 種類、即ち GRINDAMYL A1000 (至適温度 50°C, Danisco 社製, 以下は α -アミラーゼ A1000 とする) および GRINDAMYL MAX-LIFE E50 (至適温度 70°C, Danisco 社製, 以下は α -アミラーゼ E50 とする) を使用し、それぞれの酵素を原料粉に対して単独で 50ppm または 100ppm、あるいは両酵素を 50ppm ずつ混合したものを添加し、製パン試験を行った (小麦タンパク質 ASP とグルテンの比率は 2:8 とした)。得られたパンは比容積、内相物性並びにその経時的変化を測定し、適切な添加量について検討した。

1.14. 米粉混合パンにおけるリパーゼ添加の影響

製パン用リパーゼ製剤 (GRINDAMYL EXEL 640, Danisco 社製) を用いて 50、100、150、200ppm を添加し、製パン試験を行った (添加する小麦タンパク質 ASP とグルテンの比率は 3:7 とした)。なお、通常大規模製パン時に使われている製パン用モノグリセリド製剤 (MM-100, 理研ビタミン社製) を 0.5% 加えた製パン試験を行い、比較した。

1.15. 統計解析

統計解析は一元配置分散分析後、Tukey の HSD による多重比較検定 (SPSS Statistics Ver.25, 日本 IBM 社製) を行い、有意水準 5% 未満とした。デンプン損傷度の差異について、実験室規模の食パンの内相物性の結果は (SPSS Statistics Ver.25, 日本 IBM 社製) を用い、一元配置分散分析後、Tukey (b) による範囲検定、実験工場規模における 2 試験区データの解析は t 検定を行い、いずれも有意水準を 5% 未満とした。

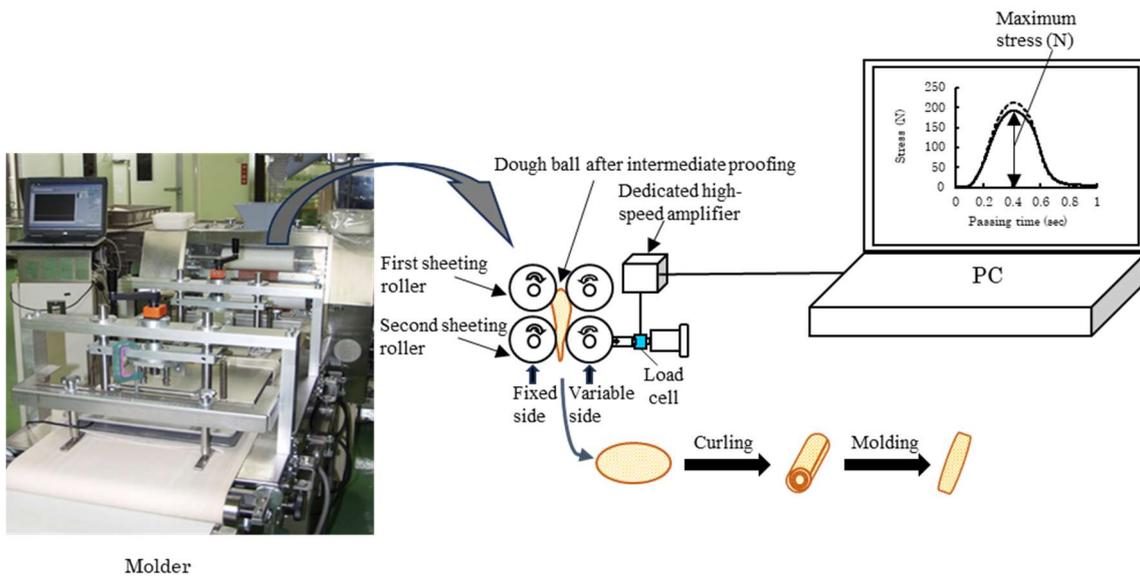


Fig.2 Method of sheeting roller stress curves during the dough molding

2. 結果および考察

2.1. 小麦粉および米粉の理化学的性状

アミロース含量の相違による米粉混合パンの製パン性を検討するため、原料の異なる2種類、製パン用途として用いられている国産の中アミロース米（ジャポニカ種）および外国産高アミロース米（インディカ種）の米粉とパン用小麦粉について比較した（Table 3）。小麦粉に比べて米粉はいずれもタンパク質含量、デンプン損傷度が低く、平均粒子径は小麦粉でやや高かった。和菓子などに用いられる市販上新粉のデンプン損傷度は7.1–17.8%（Araki et al., 2009）と比べても製パン用米粉3.1%と低い値を示した。

2種類の米粉を比較すると、高アミロース米粉は製パン用米粉に比べると、アミロース含量、タンパク質含量が高く、デンプン損傷度が低かった。平均粒子径は高アミロース米粉でやや低いことを認めた。

2.2. 小麦粉および米粉粒子の形態観察

走査型電子顕微鏡により、上記小麦粉、米粉の形態を観察した（Fig.3）。小麦粉と米粉では粉碎方法も異なるが、平均粒子径がやや高い小麦粉は、多角柱状で、やや大きい粒子が観察された。米粉は上新粉のような角張った断片（荒木, 2010）は見られなかった。また、平均粒子径が低く示された高アミロース米粉は細かい粒子が多く観察された。

2.3. 小麦粉、米粉およびその分離デンプンの粘度特性

小麦粉に対し、米粉を30および40%置換添加した時の糊化特性に及ぼす影響については、ブラベンダー・アミログラフで測定し、小麦粉のみの最高粘度に対し、米粉の置換率増大に伴って最高粘度も上昇するという報告がある（高野ら, 1986）。そこで米粉が小麦粉と異なる粘度特性を有することを確認するため、小麦粉、米粉およびそれぞれのデンプンの粘度特性をRVAで測定した。米粉は小麦粉に比べて糊化開始温度、最高粘度が高く、それぞれから分離したデンプンも同様の傾向を示した（Table 4）。

Table 3 Chemical composition, amylose content, mean particle size and damaged starch content of rice flour and wheat flour

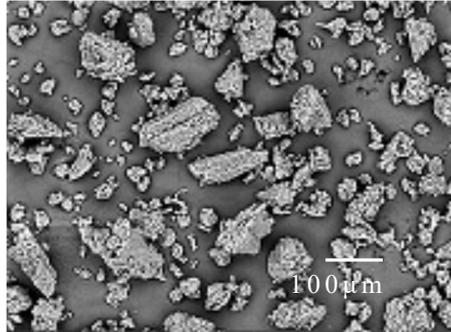
Sample	Moisture (%)	Protein (%)	Ash (%)	Amylose content (w%)	Particle size (µm)	Damaged starch content (w%)
Wheat flour	13.9	12.5 ^{*1}	0.4	—	73.5	8.1
Rice (<i>japonica</i>) flour	12.1	5.9 ^{*2}	0.4	12.6 ^{*3}	50.8	3.1
Rice (<i>indica</i>) flour	10.8	7.7 ^{*2}	0.4	24.9 ^{*3}	40.3	2.0

^{*1}Nitrogen to protein conversion factor: 5.70.

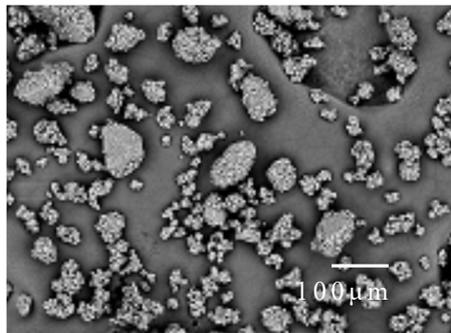
^{*2}Nitrogen to protein conversion factor: 5.95.

^{*3}The amylose content per starch.

A



B



C

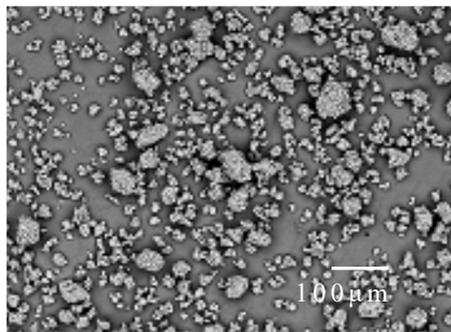


Fig.3 Scanning electron microscopy images of wheat flour and rice flour
A, Wheat flour; B, Rice (*japonica*) flour; C, Rice (*indica*) flour.

Table 4 Viscosity properties of rice flour, wheat flour and starch separated from each other

Sample	Peak viscosity (Pa·s)	Trough viscosity (Pa·s)	Final viscosity (Pa·s)	Break down* ¹ (Pa·s)	Set back* ² (Pa·s)	Pasting temperature (°C)
Wheat						
flour	2.60 ± 0.01	1.47 ± 0.01	2.75 ± 0.02	1.14 ± 0.02	1.29 ± 0.03	64.3 ± 1.4
starch	4.35 ± 0.01	3.86 ± 0.08	5.71 ± 0.08	0.46 ± 0.05	1.86 ± 0.02	61.8 ± 0.5
Rice (<i>japonica</i>)						
flour	5.42 ± 0.04	2.67 ± 0.06	4.04 ± 0.04	2.71 ± 0.01	1.37 ± 0.10	70.5 ± 0.3
starch	6.20 ± 0.08	2.39 ± 0.04	3.96 ± 0.04	3.81 ± 0.05	1.57 ± 0.01	69.9 ± 0.6
Rice (<i>indica</i>)						
flour	5.00 ± 0.03	3.49 ± 0.04	6.57 ± 0.04	1.51 ± 0.02	3.08 ± 0.02	78.3 ± 0.4
starch	4.82 ± 0.05	3.11 ± 0.03	5.48 ± 0.02	1.71 ± 0.03	2.37 ± 0.02	71.7 ± 0.5

*¹Break down: Peak viscosity – Trough viscosity.

*²Set back : Final viscosity – Trough viscosity.
Results showed average value ± SD ($n = 3$).

2.4. 米粉配合生地の発酵に及ぼす糖添加の影響

供試原料粉に含まれるデンプン損傷度は小麦粉に比べて米粉が低いことを認めた (Table 3)。小麦粉の製パン時には、小麦粉に含まれる損傷デンプンが生地発酵中に β -アミラーゼの基質となり、多量のマルトースを生成する (高野ら, 1980)。製パン原料に米粉が高い比率で配合されると生地中のデンプン損傷度が低下するため、酵母が資化する糖が不足することが推察された。そこでこれを補うため、小麦粉に米粉を 40%置換添加したパン生地に糖としてマルトースを添加し、発酵中のガス生産量をファーモグラフで分析した。中種生地発酵中のガス発生量の測定は 5 分間隔で行い、単位時間ごとの推移によるガス発生パターンを示した (Fig.4)。

小麦粉に米粉を 40%置換添加した生地は小麦粉のみの生地と比べ、初期 (30-70 分間) のガス発生量が多く、高アミロース米粉を用いた生地で顕著だった。小麦粉に米粉を置換添加したパン生地は小麦粉のみを用いた場合と比較して初期段階の発酵が増大したという結果 (高野ら, 1986; 高野ら, 1980) と傾向が一致した。その後、小麦粉のみの生地は 3 時間までガスの発生量が 5 分間に 4-5mL を維持しているが、高アミロース米粉を 40%置換添加した生地は 2 時間経過後、製パン用米粉を用いた生地でも 2-3 時間の間に徐々にガス発生量は低下し、小麦粉のみの生地と異なる挙動を示した。4 時間経過後の総ガス発生量は小麦粉のみの生地では 173mL となったが、米粉を 40%置換添加したものでは製パン用米粉で 160mL、高アミロース米粉で 147mL となり、小麦粉のみの生地と比べて低くなった。前述したように、デンプン損傷度の低い米粉には発酵中に生じる糖が不足していると推測し、米粉を 40%置換添加した生地にマルトースを 2% 加えると 4 時間経過後の総ガス発生量は製パン用米粉で 181mL、高アミロース米粉で 183mL となり、小麦粉に匹敵するガス発生量が得られた。

以上、米粉の成分、形態的な性状あるいは粘度特性、デンプン損傷度、発酵性などを考慮して、以下の製パン試験を試みた。

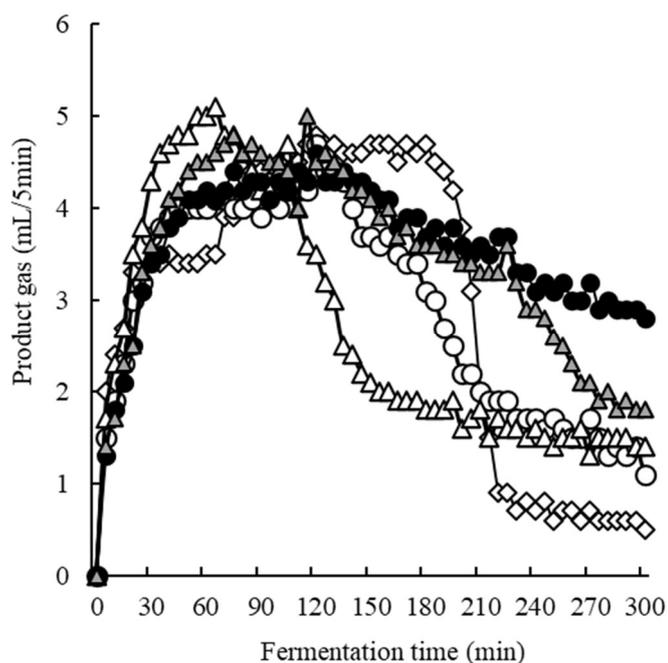


Fig.4 Effect of maltose addition on gas production of wheat flour and rice flour blended*-yeast dough fermentation
 *Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 2:8. ◇, Wheat flour ; ○, Wheat/rice (*japonica*) flour; △, Wheat/rice (*indica*) flour; ●, Wheat/rice (*japonica*) flour+2% maltose; ▲, Wheat/rice (*indica*) flour+2% maltose.

2.5. マルトースを添加した米粉混合パンの製パン試験

米粉を40%置換添加する米粉混合パンでは、減少する小麦タンパク質を補う必要がある。小麦タンパク質は通常小麦由来のグルテンを用いるが、新井らはグルテンの20-40%をASPに置換することにより、製パン中の生地伸展性が向上し、米粉(40%)混合パンの製造工程の安定化および品質向上を認めた(新井ら,2018)。本報告では中種発酵中のガス発生量の増加に糖添加が必要であることを認め、小麦タンパク質(ASPとグルテンの比率2:8)配合中にマルトースを2%添加して製パン試験を行った。中種発酵中に小麦粉生地と同程度に生じたガスはASP添加で伸展性のある生地に十分保持され、発酵4時間の生地容積は3.5倍以上となった(データ未掲載)。焼成して得られた角型食パンの形状をFig.5に示した。製パン用米粉を用いたパンの形状は高アミロース米粉と比べて上部の凹み、ケービングが観察された。山型食パンで測定した比容積も製パン用米粉は4.66となり、高アミロース米粉を使用した4.88より低くなった。米粉とグルテンのミックス粉を用いた場合でも高アミロース米ではケービングは起こらないもののパンの硬化程度が高く、硬化速度も速いことを確認し、中アミロース米が米粉パン製造適性に優れると思われる(高橋ら,2009)との報告がある。そこで、以降は中アミロース米を原料としている製パン用米粉を用いた米粉混合パンの比容積、ケービングに対する改善が必要と考え、小麦粉のみの製パンにも改良剤として用いられている酵素類に着目し、米粉混合パンへの効果的利用について検討した。

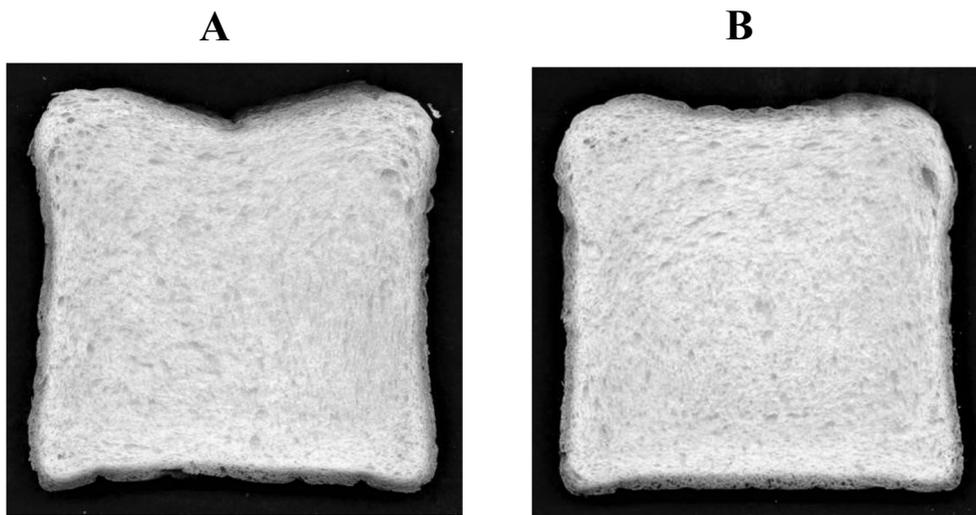


Fig.5 Appearance of wheat flour and rice flour blended bread* made with different rice flour types

*Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 2:8. Wheat flour and rice flour blended bread A was made with domestic rice (*japonica*) flour and B was made with foreign rice (*indica*) flour. Specific volume (mL/g) of one loaf; A, 4.66; B, 4.88.

2.6. 米粉混合パンにおける α -アミラーゼ添加の影響

米粉を配合したパンは小麦タンパク質を配合しても膨化し難く、比容積が低下することが課題の一つである。小麦粉に米粉 30 および 40%置換添加し、カビ由来の α -アミラーゼを加えて糊化特性、特に最高粘度への影響を検討した結果、米粉の置換添加により、上昇した最高粘度を効果的に下げたことが報告されている（高野ら、1986）。本研究においても、前述した RVA による粘度特性の結果では、小麦デンプンに比べて、米デンプンの最高粘度は高くなったことから、パン生地内の米粉比率が高くなると焼成中に米の糊化デンプンによる粘性が増し、パンの膨化が妨げられるのではないかと推察した。そこで小麦粉の 40% を米粉に置換添加し、小麦タンパク質 (ASP とグルテンの比率 2:8) を添加した中種法で食パンを製造する際、本捏時に至適温度の異なる 2 種類の α -アミラーゼを添加し、その体積、比容積並びに硬さの経時的変化に及ぼす影響を検討した。

山型食パンを焼成、冷却後、レーザ体積計で体積、比容積を測定した結果、 α -アミラーゼ A1000 を 50ppm、E50 を 100ppm 加えたものは無添加に比べて体積、比容積が有意に増加した。 α -アミラーゼ A1000 を 100ppm、E50 を 50ppm 加えた場合は無添加との有意差が無く、それぞれの酵素は添加に適量があることが考えられた。また、この 2 種類の α -アミラーゼを 50ppm ずつ混合して添加した結果、それぞれを適量添加した場合より、体積、比容積共に有意に増加することを認めた (Table 5)。

内相物性の経時的変化は角型食パンを 20°C で 3 日間保存した経過について、圧縮応力値を硬さとして測定した。

α -アミラーゼ A1000、E50 のいずれも添加することにより無添加に比べて硬さの経時的な上昇が有意に抑制された。2 種類の α -アミラーゼを 50ppm ずつ混合した場合、それぞれの α -アミラーゼ 100ppm 添加との有意差は見られなかったが、3 日間で低く推移し、硬さの経時的変化が抑制されることを認めた (Fig.6)。

至適温度が異なる 2 種の α -アミラーゼは単独よりも等量混合して添加することがパンの体積および比容積の増加に効果があった。これは α -アミラーゼの至適温度の差異が焼成中にその作用の持続性を高め、単独使用より効果的になったのではないかと推察した。

Table 5 Effect of α -amylase addition on the volume and specific volume of wheat flour and rice flour blended bread*¹

Material flour of bread	α -Amylase		Volume (mL)	Specific volume (mL/g)
	Type	Amount (ppm)		
Wheat / Rice (60 / 40)	A1000* ²	50	1890 \pm 20 ^b	4.80 \pm 0.07 ^b
		100	1885 \pm 20 ^{bc}	4.76 \pm 0.06 ^{bc}
	E50* ³	50	1868 \pm 18 ^{bc}	4.72 \pm 0.04 ^{bc}
		100	1892 \pm 16 ^b	4.80 \pm 0.05 ^b
	A1000/E50	50/50	2028 \pm 23 ^a	5.13 \pm 0.07 ^a
Non-added			1844 \pm 22 ^c	4.66 \pm 0.06 ^c

*¹Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 2:8.

*²GRINDAMYL A1000 (Danisco).

*³GRINDAMYL MAX-LIFE E50 (Danisco). Results showed average value \pm SD ($n = 6$). Values followed by the same letter within the column are not significantly different ($p < 0.05$). Analysis of variance between the data was evaluated by using IBM SPSS Statistics Ver.25.

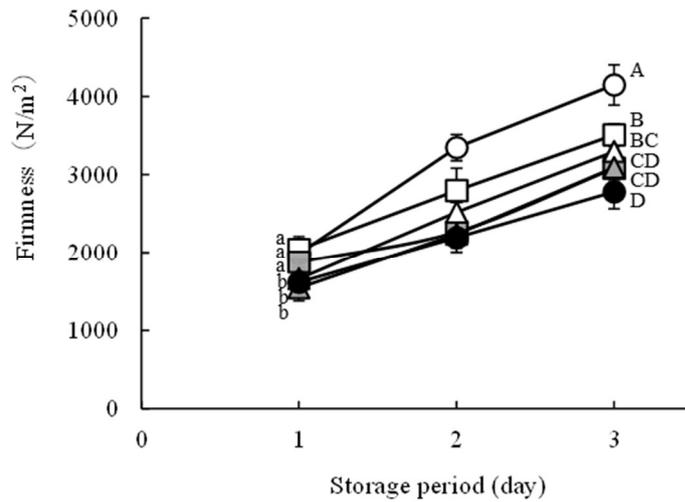


Fig. 6 Effect of the α -amylase on shelf stability of wheat flour and rice flour blended bread*

*Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 2:8. Changes in crumb firmness of wheat flour and rice flour blended bread during storage at 20°C. Vertical bars show the SD of each value ($n = 9$). Bars labelled with different letters are significantly different at $p < 0.05$.
 ○, Non-added; □, Added α -amylase A1000 (50 ppm); ■, Added α -amylase A1000 (100 ppm); △, Added α -amylase E50 (50 ppm); ▲, Added α -amylase E50 (100 ppm); ●, Added α -amylase A1000/E50 (50 ppm/50 ppm).

2.7. リパーゼ製剤がパンの品質に及ぼす影響

一般的に米粉を高含量配合したパンでは焼成後にケービングが生じやすく、経時的に内相が硬くなりやすいという品質的な課題が指摘される。 α -アミラーゼを適量添加することにより、パンの体積・比容積が向上し、経時的な硬化の抑制がみられたが、ケービングは抑制されなかった。そこでケービングの抑制効果を認められている(山下, 2013) 製パン用リパーゼ製剤を利用し、2種類の α -アミラーゼを50ppm等量混合した配合の本捏時に加え、その効果について検討した。なおこの製パン試験の配合では小麦タンパク質としてASPとグルテンの比率を3:7としたが、製パン工程での生地安定性、パン内相の空洞化の抑制(新井ら, 2018)を考慮した。また製パン改良剤として、一般的に使用されているモノグリセリド製剤との比較も試みた。

米粉混合パンにリパーゼ製剤を添加(50-200ppm)して製造した山型食パンの体積および比容積を測定した結果、リパーゼ製剤無添加に比べて150ppm添加のものは体積、比容積ともに有意な増加が認められた。200ppm添加すると体積は低下し、無添加との有意差はなくなった。この結果から、リパーゼ製剤は150ppmの添加が適量であると認めた(Table 6)。

リパーゼ製剤を150ppm添加した角型食パンの形状を無添加並びにモノグリセリド製剤0.5%添加のものと比較した。リパーゼ製剤無添加はパン上部の凹みが著しいが、リパーゼ製剤を添加すると、モノグリセリド製剤添加と同様にパン上部の凹みとケービングが抑えられていることを認めた(Fig.7)。

リパーゼ分解生成物である炭素数14-18の直鎖脂肪酸、これらの直鎖脂肪酸で構成されるジグリセリド、モノグリセリドにはケービングの抑制効果があることが分かっており(山下, 2013)、その効果によるものと推定した。

さらにリパーゼ製剤を添加した米粉混合パンの硬さの経時的変化を検討した結果、 α -アミラーゼの添加試験に比べて全体的に硬さが増したが、リパーゼ製剤100ppm、150ppmを添加した場合、経時的な変化は小麦粉のみのパンに近い傾斜をたどり、保存3日目の硬さはリパーゼ無添加、50ppm添加に比べて有意に低く、経時的な硬化抑制の効果が示された(Fig.8)。そこで、パンの形状、体積・比容積増加、経時的硬化抑制の点から米粉混合パンにはリパーゼ製剤

150ppm を添加することが有効であり、パンの品質が向上することが示された。

米粉混合パンのケービング抑制を目的として、リパーゼ製剤を利用したが、経時的変化の抑制にも効果がみられた。パンの硬化はデンプンの状態変化が引金になって起こるので、その要因となるデンプンの再結晶化を防止することがパンの硬化抑制に繋がると考えられる。飽和脂肪酸モノグリセリドは主にデンプンに作用し、アミロース、アミロペクチンと複合体を形成する結果、可溶性デンプンの溶出を抑え、デンプン粒間の結着を防ぐ (高野, 1991)。井上らは異なるモノグリセリドを添加したパンの保存性 (20°C) について、X線回折による β -デンプン特有の 5.1 Å の回折ピークの出現状況、並びにクラム中の可溶性デンプン量の減少の点から検討し、モノグリセリドがデンプンの老化を遅延していることを認めている (井上ら, 1995)。

一方、小麦粉にキノア粉を一部置換添加した場合の製パン性の改良にリパーゼを用いて、パンの比容積の増加、硬さの減少などを認めた報告 (Park et al., 2005)、あるいは不飽和脂肪酸モノグリセリドが混捏時にグリアジン成分に特異的に作用し、同分子の表面疎水性を低下させ、グルテンネットワークを緻密にし、パン生地の物性が改善される (井上, 1997) と考察されている。

リパーゼ製剤の米粉混合パンへの品質向上効果はショートニングの分解生成物がデンプンやグルテンへ寄与するためと推察される。

以上、添加する小麦タンパク質の一部を ASP にして米粉混合パンの製造をした場合、糖や酵素類の適正な添加がパンの品質向上に寄与することが示された。

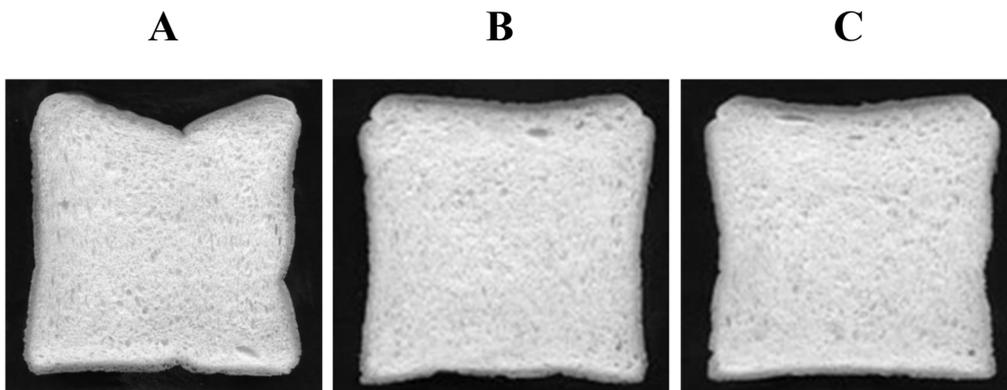


Fig.7 Effect of monoglyceride addition and lipase on caving of wheat flour and rice flour blended bread*

*Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 3:7, and added α -amylase A1000/E50 (50 ppm/50 ppm).

A, non-added; B, added monoglyceride (0.5%); C, added lipase (150 ppm).

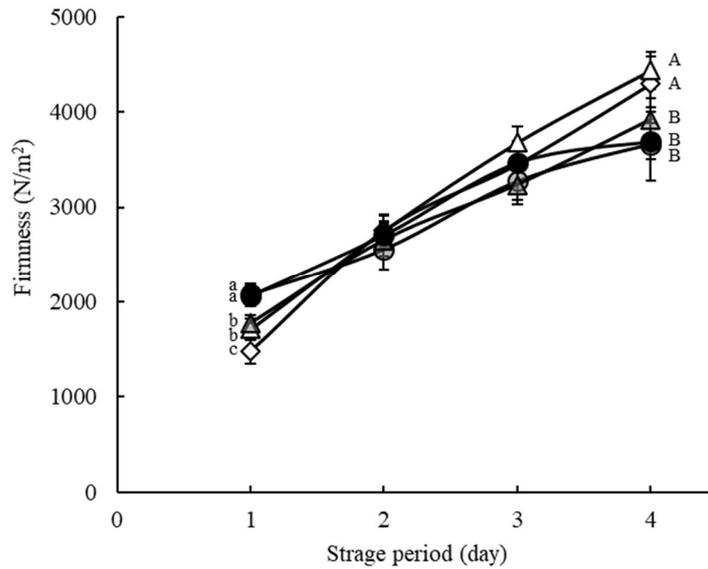


Fig.8 Effect of lipase addition on shelf stability of wheat flour and rice flour blended bread*
 *Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (gluten and ASP) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten were 3:7, and added α -amylase A1000/E50 (50 ppm/50 ppm). Changes in crumb firmness of bread during storage at 20°C. Vertical bars show the SD of each value ($n = 9$). Bars labelled with different letters are significantly different at $p < 0.05$. ○, Wheat flour (100) without added lipase; ◇, Wheat/rice (60/40) flour without added lipase; △, Wheat/rice (60/40) flour with added lipase 50 ppm; ▲, Wheat/rice (60/40) flour with added lipase 100 ppm; ●, Wheat/rice (60/40) flour with added lipase 150 ppm.

Table 6 Effect of lipase addition on the volume and specific volume of wheat flour and rice flour blended bread^{*1}

Material flour of bread	Lipase ^{*2} addition (ppm)	Volume (mL)	Specific volume (mL/g)
Wheat	0	2025 ± 27 ^a	5.17 ± 0.07 ^{ab}
	0	1922 ± 12 ^b	4.98 ± 0.04 ^b
Wheat / Rice 60 / 40	50	1972 ± 28 ^{ab}	5.16 ± 0.07 ^{ab}
	100	1978 ± 7 ^{ab}	5.18 ± 0.04 ^{ab}
	150	1999 ± 46 ^a	5.23 ± 0.13 ^a

^{*1}Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 3:7, and added α -amylase A1000/E50 (50 ppm/50 ppm).

^{*2}GRINDAMYL EXEL 640 (Danisco). Results showed average value ± SD ($n = 3$). Values followed by the same letter within the column are not significantly different ($p < 0.05$). Analysis of variance between the data was evaluated by IBM SPSS Statistics Ver.25.

2.8. デンプン損傷度が異なる米粉の性状および形状

製パン用米粉を用いて、デンプン損傷度の低い米粉では中種発酵時の糖添加、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 -アミラーゼの添加、ケービング抑制のためのリパーゼ添加を実施し、パンの比容積、物性の経時変化などの品質向上効果を得た。しかし、製パン工程中の生地表面にわずかな水が浮き、機械化製パンを行う場合、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米粉のデンプン損傷度の検討をすることにした。

一般的な製パンにおいては、ある程度のデンプン損傷度が必要になるが、米粉を用いたパンでは損傷デンプンと比容積の間に逆相関を示す報告 (Araki et al., 2009, Matsuki et al., 2015, 本間ら, 2016) が多く、実際には製パン用米粉のデンプン損傷度は3%前後のものが流通している。デンプン損傷度を8%程度有するパン用小麦粉に比べてかなり低い。そこで、粒度とデンプン損傷度により用途別に区分された (神田, 2013) 2種類の米粉 C1 と C3 を用いることにより、デンプン損傷度を調整し、その差異が製パン性に及ぼす影響について検討した。

製パン試験に供した米粉のデンプン損傷度並びに水分保持力、平均粒子径を Table 7 に示した。平均粒子径は 50 μ m 前後で大差はなかった。湿式気流製粉による C1 は乾式気流製粉の C3 に比べてデンプン損傷度が低く、水分保持力も低かった。米粒は硬く、乾式気流製粉では粉碎時の摩擦熱によりデンプン損傷度が増加し、製パン性が低くなることが報告されている (荒木ら, 2009; 諸橋ら, 1998)。湿式気流製粉では製粉過程で粉碎に伴う熱エネルギーが乾燥 (水分の蒸発) に消費され、品温上昇を抑えることができるために米粉が熱損傷を受けにくい特徴がある (吉井ら, 2011)。また、デンプンの損傷は米粉の吸水に関係し、損傷度が高くなると米粉の吸水量が高まると考えられている (有坂ら, 1992; 長沼, 2003)。以上のことから、供試した米粉の製粉方法の相違からデンプン損傷度、水分保持力の相違が生じたものと考えられた。

Table 7 Properties of rice flours

Rice flour	Starch damaged degree (%)	SRC* (%)	Mean particle size (μm)
C1	2.7	77.0	46.9
C3	13.7	125.2	50.8

*Solvent Retention Capacity with water

2.9. 走査型電子顕微鏡による米粉の観察

平均粒子径に大差なく、デンプン損傷度と水分保持力に相違がみられた米粉粒子の形状と表面の微細構造を SEM で観察した (Fig.9)。C1 は胚乳単細胞の形状を保つ粒子が比較的多く存在した。C1 は湿式気流粉碎製粉のため、粉碎前に原料米を浸漬することにより硬い米粒が軟化し、胚乳細胞間が緩み、分離しやすくなっていると考えられた (有坂ら, 1992; Saio et al., 1983)。単細胞の形状を保っている一部を拡大してみると表面の大部分は細胞壁で覆われ、内部の貯蔵デンプン粒子が透けて見えるような状態であった。一方、C3 は比較的丸みを帯びた粒子が多く存在し、その表面は剥がれた部分が多く、デンプン粒が露出された状態が観察された。

供試した 2 種類の米粉は平均粒子径に大差はないが、その形状は異なり、表面の微細構造には相違がみられた。このように観察された粒子の構造的な相違は両者のデンプン損傷度や水分保持力の差異に関係していることが推察された。

前述したように米粉のデンプン損傷度は米粉パンの比容積に影響を及ぼすといわれている (與座ら, 2010; Araki, et al., 2009; 宍戸ら, 1992; 與座ら, 2014; 高野ら, 1986)。そこで米粉混合パンを製造するために用いる米粉に適したデンプン損傷度を検討するため、米粉 C1/C3 の比率を変え、試験区 1 (C1/C3, 100/0, デンプン損傷度として 2.7%)、試験区 2 (C1/C3, 75/25, デンプン損傷度として 5.4%)、試験区 3 (C1/C3, 50/50, デンプン損傷度として 8.2%) を設け、実験室規模で製パン試験を行った。

2.10. 中種発酵中の生地容積とその温度変化

実験室規模の米粉混合パンの製パン試験における中種発酵時の生地容積 (膨倍比) および温度の変化を Fig.10 に示した。デンプン損傷度の比率を高くしたもののほど中種発酵中の膨倍比の増加の立ち上がりは早く、発酵が早く進むことが示された。発酵終点までの間、デンプン損傷度の比率を高くした試験区 2 (C1/C3, 75/25)、試験区 3 (C1/C3, 50/50) は、デンプン損傷度の低い C1 のみ使用した試験区 1 (C1/C3, 100/0) に比べて、膨倍比はやや低い傾向がみられた。3 試験区は同一加水条件で行っているため、水分保持力が高い米粉の比率が増えた試験区 2、3 は、生地中の損傷デンプンへの吸水が増し、生地の流動性が低下し (神田, 2013)、やや硬くなり、発酵による膨

張が抑制されたものと推察した。しかし、いずれも発酵 4 時間で 3 倍以上の生地容積の膨張がみられ、十分な発酵状態であったことが示された。発酵中の生地温度の変化については、デンプン損傷度の比率を高くしたもののほどわずかではあるが生地温度が高いことが示され、生地容積の増加と同様にデンプン損傷度が高い試験区ほど、発酵が早く進むことが示された。

2.11. 食パンの内相物性の経時的変化

各試験区の角型食パンを焼成し、20°Cで 3 日間保存し、その内相の圧縮応力（硬さ）、凝集性を測定し、経時的変化を比較した (Fig.11)。1 日経過後の圧縮応力値は 3 試験区間で差異はなかったが、2 日経過後は C1 の米粉のみを配合した試験区 1 に比べて、デンプン損傷度が多い試験区 2、3 では圧縮応力値が低かった。3 日経過後は 5%未満の水準では有意差は示されなかったが、試験区 3 は試験区 1 に比べ、10%未満の水準では有意に圧縮応力値が低かったことから、試験区 3 は硬さの経時的変化が減少される傾向にあると推察した。また、パン内部の結合力の強さを示す凝集性（藤田ら, 2015）の値が大きいことは復元力が高いことを示すが、3 日経過後に試験区 2、3 は有意に高く、経時的な減少の程度は低かった。

以上デンプン損傷度の異なる米粉を用いて、実験室規模で製パン試験を行った結果、小麦粉 60%に対して米粉 C1 を 40%配合した試験区 1 に比べて、デンプン損傷度の高い米粉 C3 を米粉全体量の 25%あるいは 50%の比率で配合した試験区 2、3 はデンプン損傷度を増やすことにより、水分保持力の高い米粉の比率が増えて、生地がやや硬くなった。これは中種発酵工程で生地の膨倍比が低下したことにより推察された。パン内相物性の経時的変化については硬さを表す圧縮応力値は試験区 1 に比べ、試験区 2、3 は低く、経時的変化が抑制される傾向にあると推察した。また、凝集性は試験区 2、3 で有意に経時的な減少が低かった。

実験室規模で行った製パン試験の結果を受け、実験工場規模での試作は 2 試験区に絞り、米粉のデンプン損傷度が少ない試験区 1 (C1/C3, 100/0, 以下 Test L とする) とデンプン損傷度の比率を高くした試験区 3 (C1/C3, 50/50, 以下 Test M とする) の配合を採用し比較検討した。

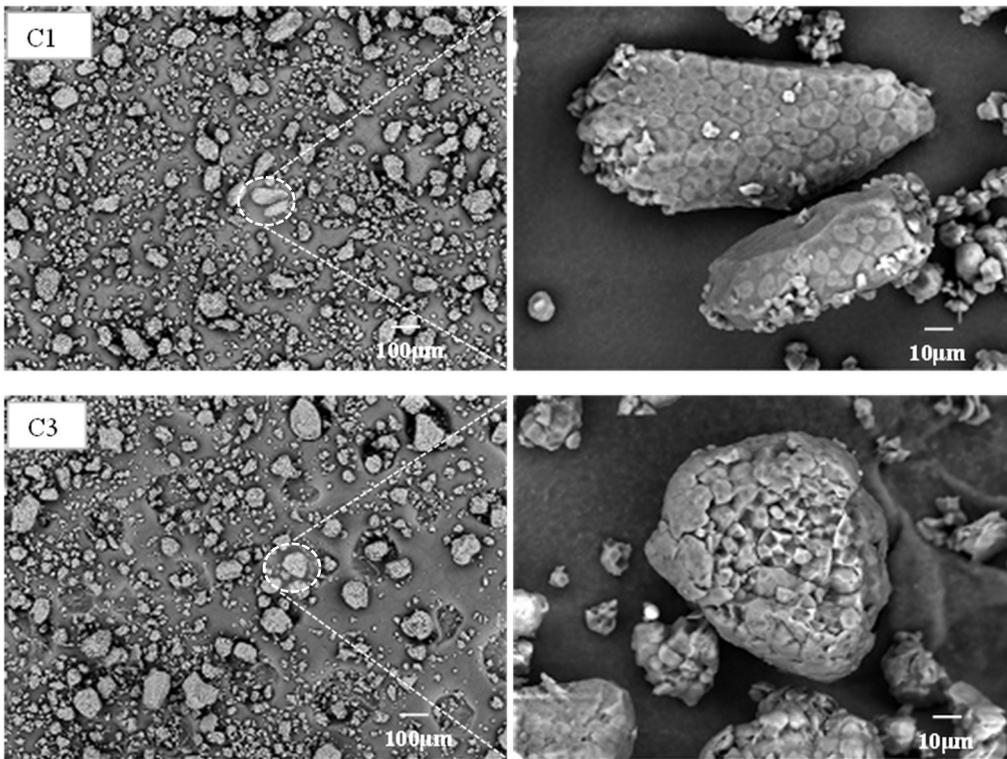


Fig.9 Scanning electron micrographs of rice flour particle structures
Right photo shows enlargement of circled part in left photo.

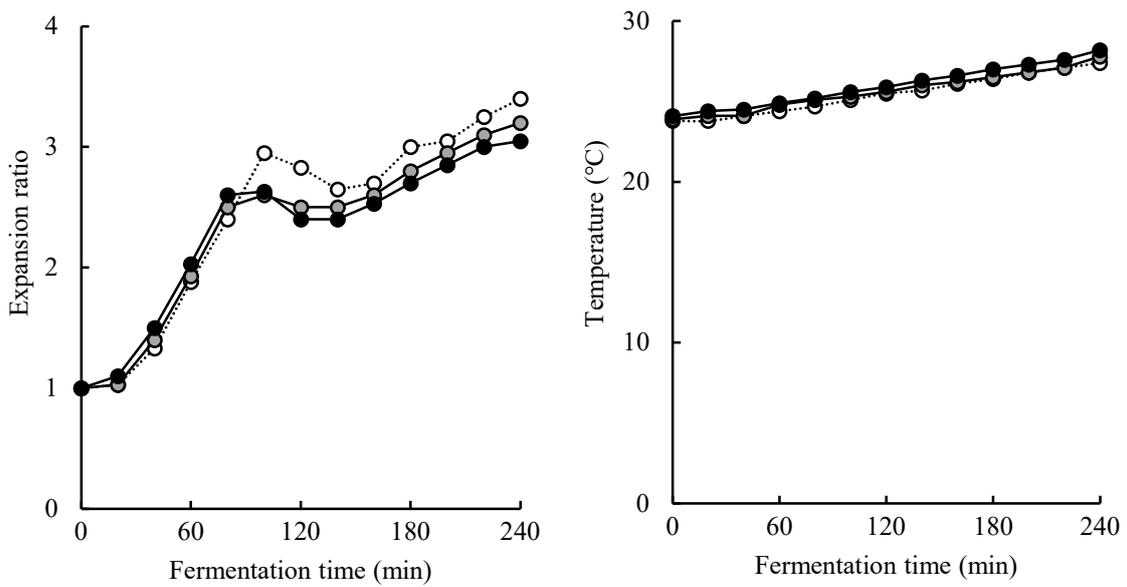


Fig.10 Expansion rate and temperature changes in sponge dough during fermentation in the scale of the laboratory

Figure on the left shows expansion rate changes in sponge dough during fermentation.

Figure on the right shows in temperature changes in sponge dough during fermentation.

○—○, Test 1; —○—, Test 2; —●—, Test 3.

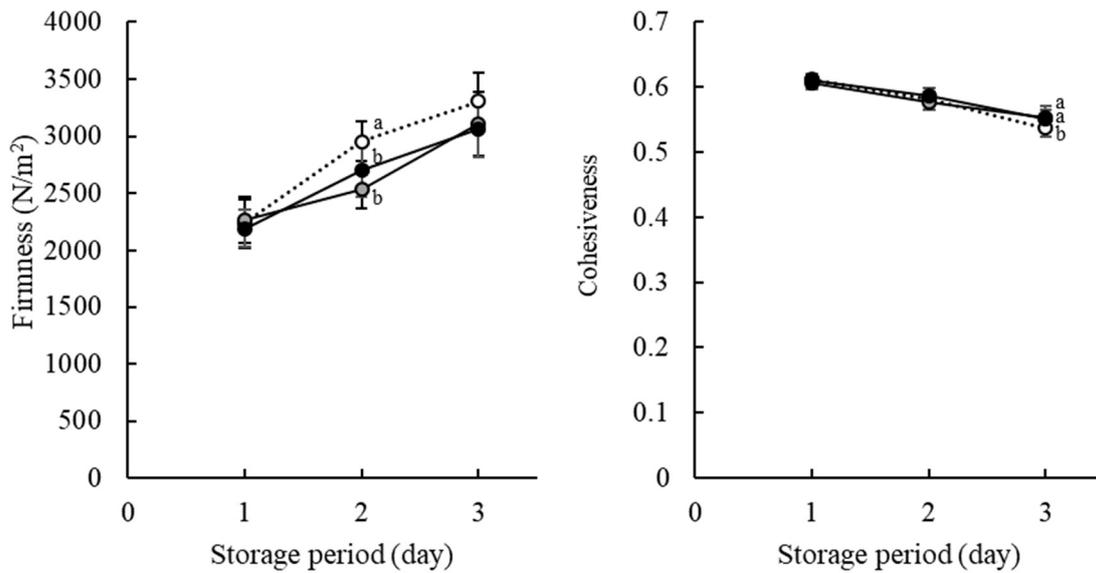


Fig. 11 Effect of rice flour starch damage degree on change in crumb firmness and cohesiveness of wheat flour and rice flour blend bread during storage at 20°C

Vertical bars show the SD of each value ($n=12$). Bars labelled with different letters are significantly different ($p < 0.05$) according to Tukey b after one way ANOVA. Figure on the left show changes firmness of crumb during storage at 20 °C. Figure on the right show changes cohesiveness of crumb in the during storage at 20°C.

··○··, Test 1; —○—, Test 2; —●—, Test 3.

2.12. 中種発酵中の生地容積の変化

実験工場規模では実験室規模の試験区 1 に相当する Test L、試験区 3 に相当する Test M の配合で製パン試験を行った。マルトースの添加量は実験室規模の 2%とは異なり、Test L では 1%、Test M では加えず行った。中種発酵中の生地容積（膨倍比）の変化は実験室規模で行った場合と同様に Test L に比べて Test M は増加の立ち上がりが早い、発酵 4 時間まではやや抑えられた。しかし、いずれも 3 倍以上の生地容積の膨張がみられ、中種の発酵としては十分な状態となった (Fig.12)。なお、発酵終点温度は Test L で 29.1°C、Test M で 29.6°Cとなった。

2.13. 本捏中の生地物性に及ぼす米粉デンプン損傷度の影響

デンプン損傷度を変えた米粉混合パンの本捏中の生地物性の変化を測定した。その結果は横軸にミキシング時間（分）、縦軸に混捏抵抗を示した (Fig.13)。Test L に比べて Test M は油脂投入までの低速から高速の混捏の間の抵抗値の立ち上がりが早く、高いことから、生地のまとまりが早く硬いことを示した。これは Test M の米粉の 50%にデンプン損傷度高い C3 が用いられ、その高い水分保持力が影響していることが考えられた。油脂投入後の生地は両試験区で同程度の混捏抵抗値で推移し、本捏終了時点では Test M がわずかに高い値であった。

2.14. 成形時の生地物性に及ぼす米粉デンプン損傷度の影響

センサモルダにより生地の圧延時の応力変化を測定した (Fig.14)。生地がローラを通過する時間に大きな差異はなかったことより、生地の伸展性に大きな違いは見られなかったが、Test M は Test L に比べて、最大応力が低い値を示した。Test M の本捏生地は前述したようにデンプン損傷度が Test L より高く、水分保持力が増加したため硬くなったが、本配合では本捏時に α -アミラーゼ製剤を加えており、本捏後の工程（フロアタイム-分割）中に、損傷デンプンに作用し、部分的に分解が進み、生地の水分保持力が下がり、生地物性が軟化したと推察した。フロアタイム以降、モルダによる成形までの工程で生地物性が大きく変化し、硬さが増し、伸展性が低下すると機械成形性に影響し、パンの内相に悪影響がでる。ミキシ

ング終了時点でやや硬くなった Test M の本捏後の生地は Test L と比べても硬くならず、成形性に影響を及ぼすことはなかった。

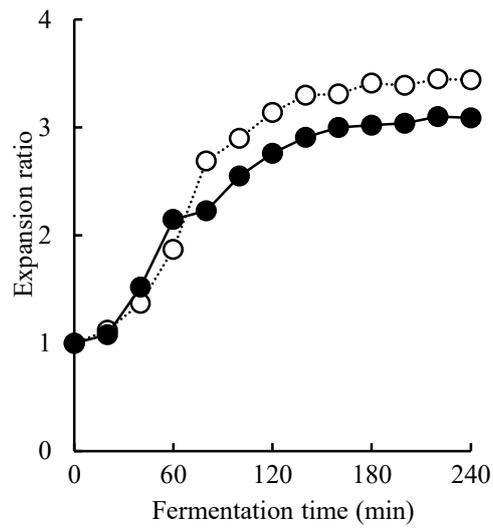


Fig.12 Expansion rate changes in sponge dough during fermentation in an experimental factory scale
○····, Test L; ●—, Test M.

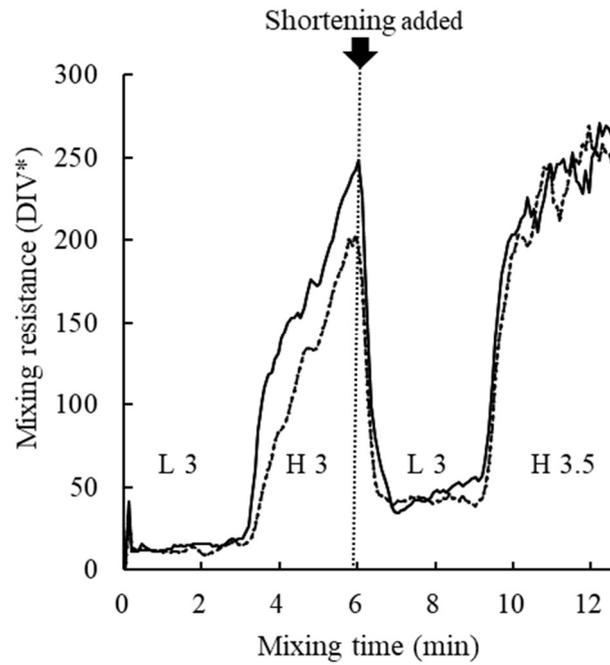


Fig.13 Effect starch damage degree in rice flour has on mixing resistance during dough mixing stage of wheat flour and rice flour blend bread
 Mixing resistance curves were calculated from the electrical power consumption. Each test was performed twice and results were confirmed to be the same. *The unit of this system, i.e., division (vertical axis in the figure). L 3, low speed (55 rpm) 3 min; H 3, high speed (110 rpm) 3 min; H 3.5, high speed (110 rpm) 3.5 min.
 , Test L; —, Test M

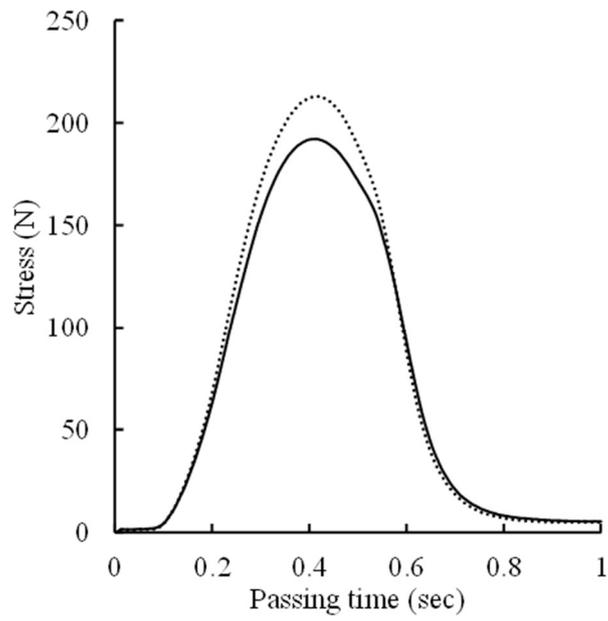


Fig. 14 Effect starch damage degree in rice flour has on sheeting roller stress curves during the dough molding process of wheat flour and rice flour blend bread

....., Test L; —, Test M

2.15. パンの形状と焼減率

Test L, M の焼成後の角型食パンの形状は大差なかった (Fig.15). しかし、焼減率は Test L が 9.3% に比べて Test M は 8.6% とやや低くなり、C3 米粉の水分保持力の高さが影響していることと推察した。またそれぞれの標準偏差 (SD) から、Test M は Test L に比べてパンのバラつきが少ないことが示された (Table 8)。

2.16. パン内相物性の経時的変化

焼成後のパンの物性の経時的変化をパン内相の硬さと凝集性の測定結果から検討した。Test L と比較をすると、Test M は計測をはじめた 1 日目から硬さが有意に低く、経時的にも低く推移していることが認められた。Test M の 4 日目は Test L の約 90% の硬さであった (Fig.16)。凝集性の経時的な変化の結果においても、Test L と比べ、Test M で凝集性の低下が少なかった。本章の米粉混合パンは小麦タンパク質の一部に ASP を加えているが、本捏時に α -アミラーゼも添加している。Test M における内相物性の経時的変化の減少はパン中の糊化デンプンの部分分解性が主要因と考えられる。 α -アミラーゼはパン生地中の損傷デンプンや焼成時に糊化デンプンに作用し、デンプンを部分分解してデキストリンや各種低分子量の糖類を生成し、パン中の糊化デンプン内のアミロペクチンの再結晶化を抑制する (松下ら, 2019; Hug-Iten et al., 2003)。デンプン損傷度を高めた Test M では、 α -アミラーゼの作用が本捏工程以降の製パン工程で生じる生地物性の変化や焼成後のパンの内相物性の経時的変化の減少に寄与したと推察した。

実際の工場生産の場合、生地量が多いために分割、丸め、成形時に時間差が生じ、生地物性の変化が起こるため、これに対応し得るパン生地が求められる。既報では C1 のようにデンプン損傷度の低い米粉を用いたが、加える小麦タンパク質の 3 割を ASP にすることで中種のガス保持性が向上した。また、大量生産の際、分割工程中にフロアタイムの時間差で生じる生地の物性変化を抑制するため、モルダによる成形性が向上し、焼成後のパンは内相の気泡の不均一性が改善され、硬さの経時的変化 (20°C, 24-96 時間) が減少した (新井ら, 2018)。この知見に加えて、本章では小麦粉に置き換える米粉のデンプン損傷度を高めることにより、その水分保持力の適度な向上が機械化製パンに適應する生地の形成に關与することを示した。

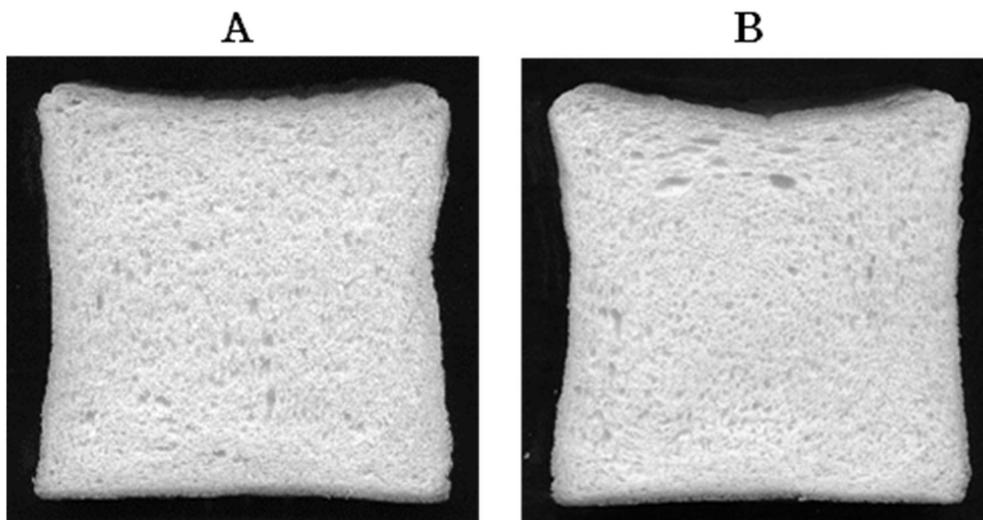


Fig. 15 Appearance of wheat flour and rice flour blended bread* made with different damaged starch amount of rice flour

*Rice flour was used to replace 40% of wheat flour, and 10% wheat protein (ASP and gluten) was added to the wheat flour and rice flour. The ratio of ASP and gluten was 3:7.

A, Test L (C1/C3 100/0); B, Test M (C1/C3 50/50).

Table 8 Rate of baking loss of wheat flour and rice flour blended bread, using rice flour with different degree of starch damage

	Test L	Test M
Baking loss (%)	9.3 ± 1.11	8.6 ± 0.47

Baking loss (%) = (weight of dough – weight of after baked bread) / weight of dough ×100
Results showed average value ± SD (*n* = 12).

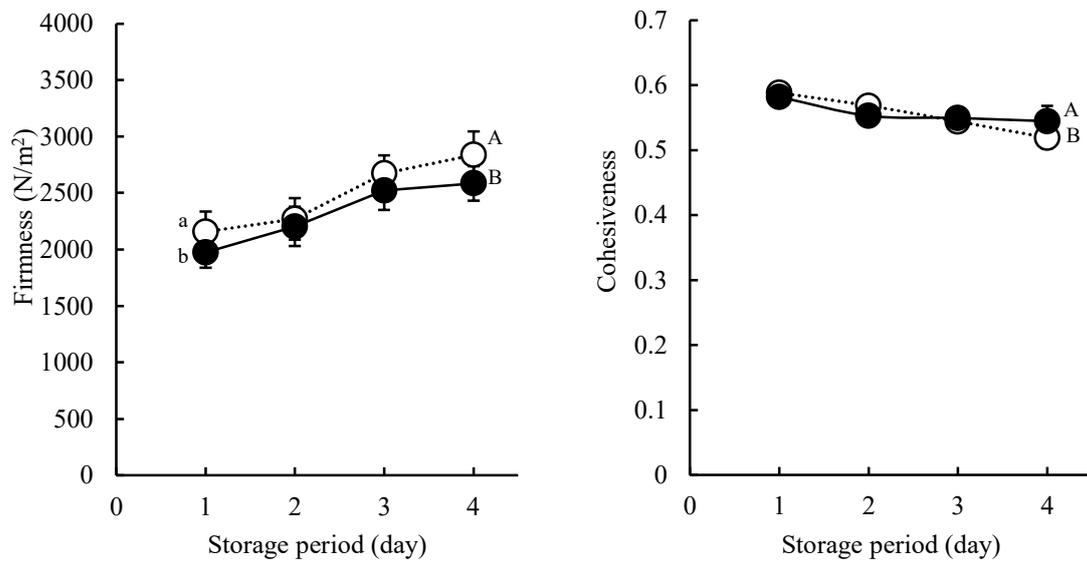


Fig.16 Effect of rice flour starch damage degree on changes in crumb firmness and cohesiveness of wheat flour and rice flour blend bread during storage at 20°C

Vertical bars show the SD of each value ($n = 14$). Bars labelled with different letters are significantly different ($p < 0.05$) according to t-test. Figure on the left shows changes firmness of crumb during storage at 20°C. Figure on the right shows changes cohesiveness of crumb in the during storage at 20°C.

—○—, Test L; —●—, Test M.

3. 要約

本章では酸可溶性小麦タンパク質 (ASP) を添加した米粉混合パンの製造に使用される小麦粉と米粉の性状を分析し、米粉混合パンの品質向上に寄与する糖や酵素類の適切な添加条件を検討するとともに、機械化製パンに対応可能な生地形成に米粉デンプン損傷度の差異を検討することを目的とした。中種法の製パンでは、小麦粉の40%を米粉に置き換え、10%の小麦たんぱく質 (グルテンと ASP) を加えた。米粉混合パンでは、損傷デンプン含量の低い米粉を小麦粉に置換添加する場合は、中種生地発酵中に発生するガス量が減少することを認め、マルトース 2%を添加すると、発酵工程でガス発生量が増加した。高アミロース米粉は、製パン用米粉より比容積が高く、ケービングは生じなかった。国内で生産される製パン用米粉を用いて、至適温度が異なる 2 種類の α -アミラーゼ製剤 (それぞれ 50ppm ずつ使用) を添加すると、パンの比容積向上ならびに経時的硬化を抑制した。さらに、リパーゼ製剤を 150ppm 添加すると、ケービングの抑制がみられ、これら酵素の適量添加は米粉混合パンの品質向上に有効であることが示された。

また、小麦粉の 40%を米粉に置き換えた米粉混合パンの機械化製パンについて、米粉のデンプン損傷度の差異を検討した。デンプン損傷度が高い米粉は、水分保持力も高く、米粉粒子の形状、表面の微細構造に相違があった。実験室規模で製パンを行うと、デンプン損傷度が低い米粉 C1 (デンプン損傷度 2.7%) のみを用いた場合より、これにデンプン損傷度の高い米粉 C3 を 25%、50%配合した方がパン内相物性の経時的変化が減少した。大量生産を想定し、実験工場規模で、それぞれの米粉を 50%ずつ配合 (デンプン損傷度 8.2%) し、製パンした結果、デンプン損傷度が高くなることで、生地の保水性の向上により、本捏時の生地のとまりが早く、パンの焼減率、物性の経時変化が抑制された。さらに、本捏時に加えた 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の保水性を高め、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. 麵用小麦粉を原料とする製パン技術の開発

日本で生産される小麦の多くはうどんなど麵用途の加工性に優れている。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(福田ら, 1974; 五島ら, 1986)。しかし、2000年以降、超強力粉や外国産小麦粉とのブレンド(Yamauchi et al., 2003; 堀ら, 2006; 吉野, 2006)、あるいは生地に必要なSS結合形成を触媒するプロテイン・ジスルフィド・イソメラーゼ(PDI)の利用による製パン改良効果(Noguchi et al., 2015)など製パン性を改善する研究報告が増え、国産麵用小麦の製パン利用への期待が窺える。

近年、国内で生産される小麦も遺伝子解析が進み、各加工用途に適した品種の改良が進められている(池田, 2017)。パン用の小麦としては2000年に北海道で「春よ恋」が導入され、2008年には超強力小麦の特性を持つ「ゆめちから」が北海道の優良品種として採用された(田引ら, 2011)。これは日本麵用粉とブレンドすることでパン用に利用することができる。パン・中華麵用小麦の作付面積は5%以下だった2000年に比べて、2021年においてはその割合は26%に伸びている(農林水産省資料, 2023b)。しかし、国産小麦の総生産量の8割以上を麵用小麦が占めている現状である。

そこで、国内で生産割合の高い麵用小麦粉を用いた製パン技術の開発が必要と考え、本章では麵用小麦粉のパンの製造における課題とその改善について検討し、機械化製パンに対応しうる技術の開発を目的とした。

1. 試料および実験方法

1.1. 供試材料

本研究で使用した小麦粉は国産麺用小麦粉（タンパク質 9.8%, 灰分 0.39%, 赤星（ホクシン）, 日本製粉社製）、対照としたパン用小麦粉（タンパク質 12.2%, 灰分 0.38%, イーグル, 日本製粉社製）としては輸入小麦粉を用いた。グリアジンを主成分とする酸可溶性小麦タンパク質は、工業製品（グリア A; アサマ化成社製, 以下 ASP とする）を用いた。ASP は硬質小麦粒から作られたグルテンより抽出された。

1.2. 麺用小麦生地 の物性測定

パン用小麦粉に比べて麺用小麦粉の生地は弱く切れやすい。不足するタンパク質の添加、生地 の粘弾性増加を検討する目的で、ファリノグラフ（Model 8101, Brabender 社製）を用いて、生地 の形成性及びその安定度を測定した。

1.3. 製パン方法

麺用小麦粉を用いて、機械化製パン技術の開発を目指し、70%中種法（以下中種法とする）による製パン試験を以下の 4 試験区で実施した。麺用小麦粉を用いて中種法で製パンした試験区を Test 1、不足するタンパク質を補い、同方法で製パンした試験区を Test 2 とした。さらに上記ファリノグラフによる生地物性測定結果から、生地形成性、安定度を検討し、中種生地 の配合に改良を加えた試験区を Test 3 とし、対照としてはパン用小麦粉を用いた標準的な中種法で行い、CT とした。

すべての原材料は小麦粉の総重量に基づくベーカーズ%とし、圧縮酵母（ヨンゴー社製）、アスコルビン酸（昭和化学社製）、塩、グラニュー糖、脱脂粉乳（メグミルクスノーBRAND 社製）、ショートニング（日油社製）を用い、Table 9 に各試験区 の配合を示した。

1.4. パンの体積と比容積の測定

焼成後のパンは、室温で 30 分間冷却した後、レーザ体積測定ユニット（Selnac-Win VM; ケイ・アクシス社製）を使用してパンの体積

(mL) を測定した。比容積 (mL/g) は、体積と重量を測定することによって求めた。

1.5. 走査型電子顕微鏡による微細構造の観察

ファリノグラフによる生地形成時 (Development time;DT) の生地、製パン工程における中種発酵後の生地、および各試験群で焼成したパン内相の微細構造観察は、以下の方法を用いて行い、走査型電子顕微鏡 (S-2340N、日立製作所製、以下 SEM とする) で観察した。ファリノグラフによる DT の生地はその一部を切り取り、中種発酵後の生地については内部の網目状組織の一部を急冷用噴霧凍結剤 (EM フリーザー、日新 EM 社製) で凍結させて切り取った。また各試験区で得られたパンを垂直方向にスライス (厚さ 15mm) し、その一枚の表皮に近い部分を切り取った。それぞれ採取した試料は SEM 観察のため、以下のように処理した。各試料は 2.5% グルタルアルデヒドで固定し、100 mM リン酸緩衝液で洗浄後、1% 四酸化オスミウムで固定し、100mM リン酸緩衝液で洗浄した。次に、エタノール 50、60、70、80、90、95% (v/v) で順次脱水し、エタノールを 2-メチル-2-プロパノール (T-ブチルアルコール) で置換した。次いで、凍結乾燥器 (ID-2、エイコー社製) で乾燥させた後、イオンコーター (IB-2、エイコー社製) で金をコーティングした。走査型電子顕微鏡により、加速電圧 15kv で観察した。

1.6. 酵素法による糊化度測定

パンの糊化度は、貝沼による β -アミラーゼ/プルラナーゼ (以下 BAP とする) 法により測定した。この方法は糊化デンプンと老化デンプンの間の分解度に識別性が高い特徴を持つ (貝沼ら, 1981)。20°C で 1、3 日間保存したパン内相にエタノールを加え、脱水操作を 3 回繰り返した。最後に、脱水と脱アルコールのためにアセトンで処理して、粉末サンプルを調製した。乾燥した試料はガラスホモジナイザーで水と分散させ、酵素反応を行った。酵素は大豆 β -アミラーゼ (粗酵素標準 5 IU/mg、ナガセケムテックス社製) とプルラナーゼ (粗酵素 2 IU/mg、林原社製) を使用した。この反応により生成された還元糖はソモギネルソン法で測定し、全糖はフェノール硫酸法で測定した。反応液中の全糖に対する還元糖量の割合を分解率とした。糊化度は以下のようにした；

分散試料の分解率/アルカリ糊化試料の分解率×100

1.7. パン内相の物性とその経時変化の測定

パンを焼いた後、室温で 90 分間冷却し、ポリプロピレンバッグ (0.03mm) に包装し、さらに、保存日ごとに 4 つの試験サンプルをポリエチレンバッグ (0.08mm) に包装した。保存期間は 1-3 日とした。プルマンタイプのパンを 25mm の厚さにスライスし、超音波カッター (モデル USC-3305; 山電社製) を使用して、スライスの中央部分からパン内相の正方形 (25mm×25mm) を切り取った。パン内相の硬さ・凝集性の測定は、クリープメータ (RE2-33005S、山電社製) を用いて行った。以下のように硬さを測定した。プランジャーは円形 (φ40mm)、測定ひずみ率 70%、圧縮速度は 1mm/s.すべての測定サンプルは同じ方向に圧縮した。ここでは、50%ひずみ率での値を硬さとした。凝集性は直径 16mm のプランジャーを使用して 1mm /s.の速度で 70%の圧縮を 2 回行ったときの応力によって示される 1 番目と 2 番目の波形の面積比で示した。

1.8. 統計解析

製パン試験を 2 回実施し、各試験群の結果が同じ傾向を示していることを確認した。一元配置分散分析の後、Tukey の HSD 多重比較検定を行い、有意水準 5%未満とした。

2. 結果および考察

2.1. タンパク質による麺用小麦粉生地物性の改良

パン用小麦粉に比べ、麺用小麦粉はタンパク質含量が少ないため、パン生地としては混捏耐性、発酵中のガス保持力、機械成形性が劣り、発酵が遅い等の問題がある。そこで、麺用小麦粉の生地状態を把握したうえで、生地物性を改良するために、不足するタンパク質はグルテンおよび ASP をそれぞれ 3% 添加し、ファリノグラフで生地形成性、その安定度などの物性を測定した (Fig.17)。

麺用小麦粉のファリノグラム (Fig.17-B) はパン用強力粉のファリノグラム (Fig.17-A) に比べて生地の形成時間は早いですが、安定度は低い。ここにグルテンを 3% 加えると安定度がやや上昇した (Fig.17-C)。ただし、生地形成時の微細構造を SEM で観察すると、グルテンネットワークが不均一な状態が観察された (Fig.18-C)。ASP を 3% 添加すると、生地形成時間は変化し、均一なグルテンネットワークの形成が観察された (Fig.18-D) が、生地の弱化的向上は見られなかった。

2.2. ASP 添加麺用小麦粉生地へ及ぼす食塩添加の影響

パン生地の弱化的抑制のために、パンの基本材料の一つである食塩を用いて、ファリノグラフで生地物性を測定した。麺用小麦粉に ASP を 3% 加え、食塩を 2% 添加した結果、Fig.17-E に示したように生地の安定度が向上し、ファリノグラムの波形が、パン用小麦粉に近似することを認めた。小麦生地形成において、食塩は粘性のあるグリアジンを凝集させ、グルテニンとの相互作用を強めて生地の安定性が向上するという報告 (裏出, 2008) がある。麺用小麦粉を用いた場合、中種生地に食塩を加えることで、発酵前の生地の混捏耐性、発酵中のガス保持力が向上することが推察された。

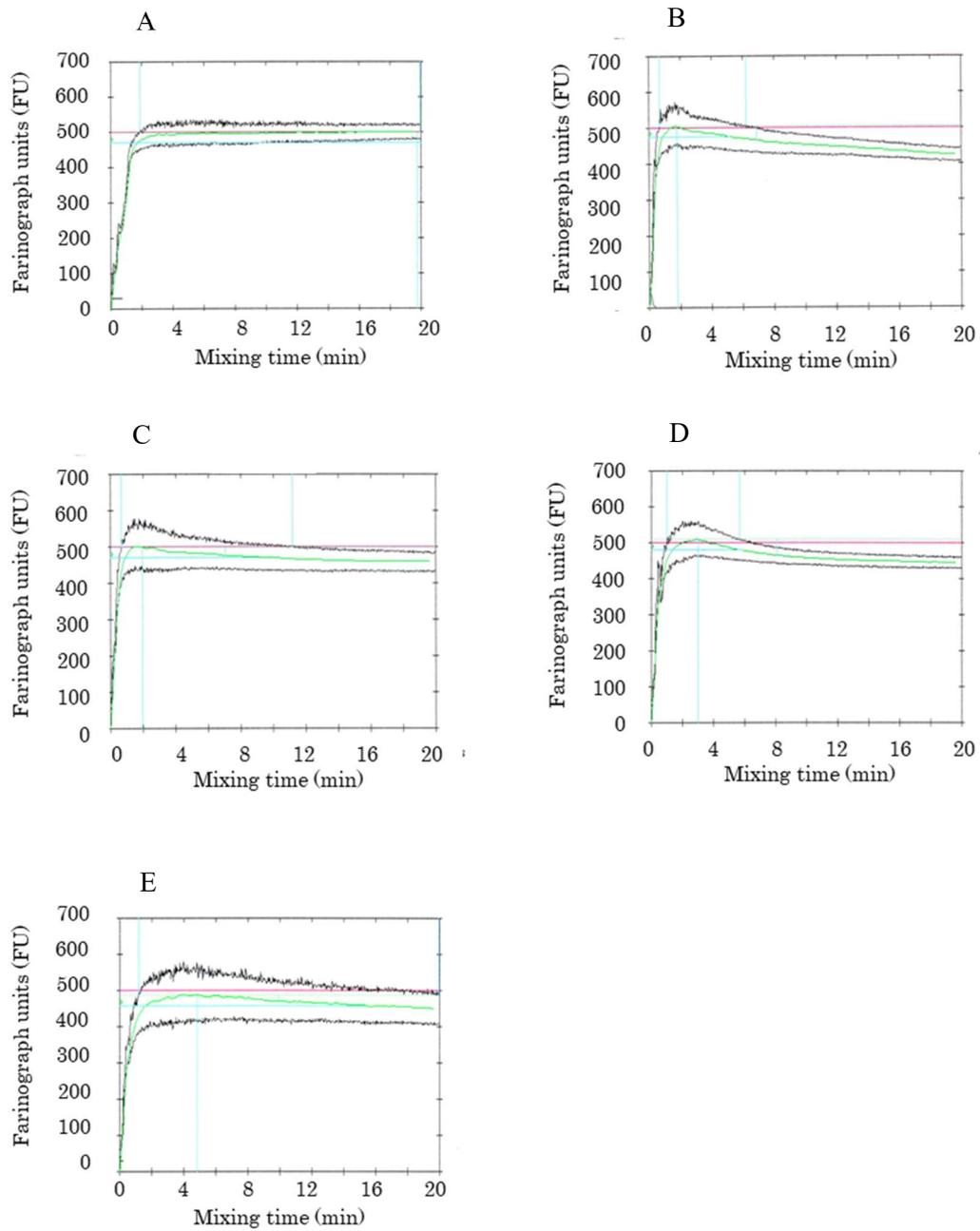


Fig.17 Farinogram showing the effect of wheat protein and salt addition on dough properties using for domestic noodle wheat flour

A, Bread flour; B, Domestic noodle flour; C, Domestic noodle flour +3% gluten; D, Domestic noodle flour +3% ASP; E, Domestic noodle flour +3% ASP +2% salt

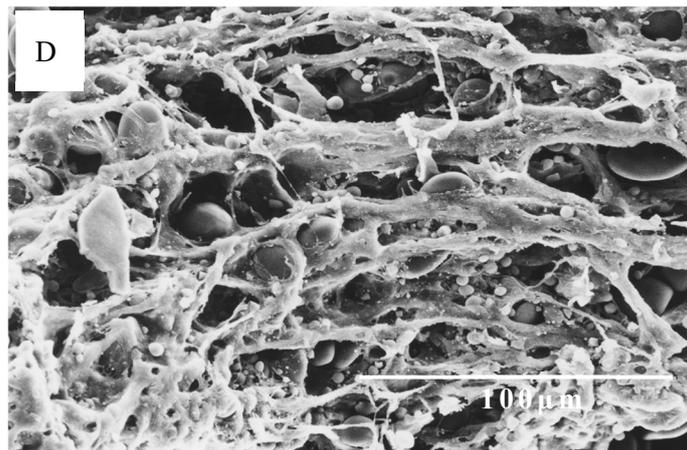
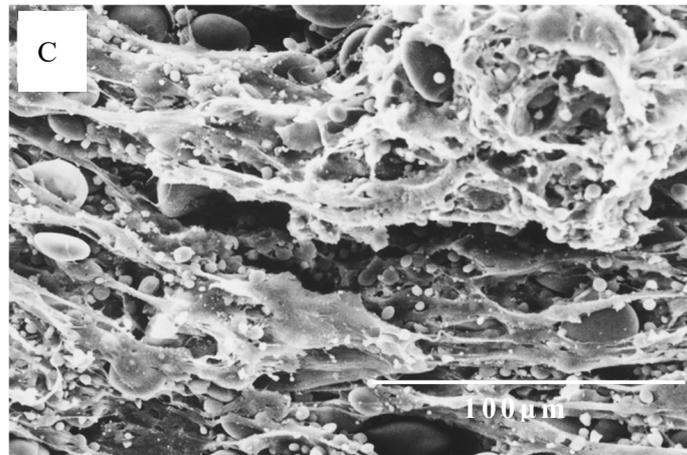
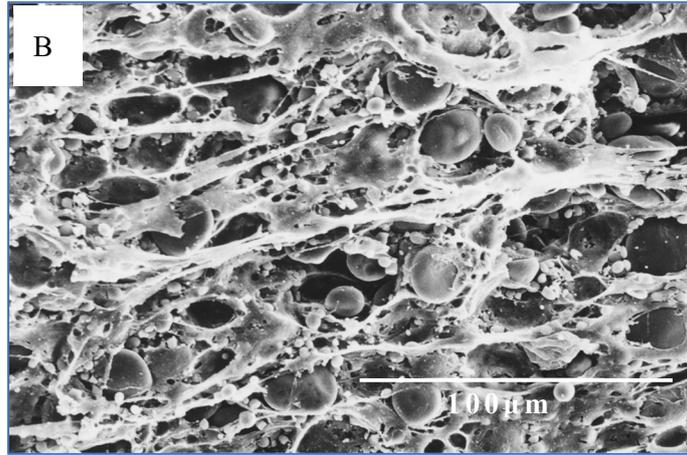


Fig.18 Scanning electron micrographs of dough microstructure made from domestic noodle wheat flour. The dough was observed by sampling a part of the farinogram development time (highest viscosity). B, Domestic noodle flour dough; C, Domestic noodle flour dough +3% gluten; D, Domestic noodle flour dough +3% ASP.

2.3. 中種改良による製パン配合および工程

国産麵用小麦粉を用いた製パンは、不足するタンパク質やグルテンの質により、製パンには不向きとされている。上記、ファリノグラフで小麦タンパク質グルテンおよびグルテンから酸性水溶液で抽出した ASP の添加、さらに生地粘弾性向上に効果のある食塩添加を検討した結果、ASP を 3%、食塩を 2% 添加することで、パン用小麦粉のファリノグラムに近似した生地物性を得ることができた。そこで、中種法の製パン試験において、生地混捏時の機械耐性を付与し、粘弾性のある生地を形成し、中種発酵中のガス保持力を向上させるため、不足するタンパク質には ASP を 3% 加え、通常本捏混捏時に加える食塩を中種生地に配合することとした。酸化剤としてのアスコルビン酸を 100ppm に増やし、生地の粘弾性を高めることとした。また、食塩は酵母の発酵を抑制するため、圧縮酵母の添加量を 2% から 2.5% に増やし、捏ね上げ温度を 27℃ に上げ、発酵を促進し、中種生地を改良した。これを中種改良法として、Table 9、並びに Fig.19 に Test 3 として示した。麵用小麦粉を使用した Test 1、麵用小麦粉に ASP を 3% 添加した Test 2、対照としてパン用小麦粉を用いた CT の 3 試験区は標準的な中種法による製パン試験を行った。

Table 9 Material formula of baking Baker's %

Material	CT	Test 1	Test 2	Test 3
Sponge				
Noodle wheat flour ^{*1}	—	70	70	70
Bread wheat flour ^{*2}	70	—	—	—
ASP ^{*3}	—	—	2.1	2.1
Salt	—	—	—	2
Compressed yeast	2	2	2	2.5
Ascorbic acid	0.001	0.001	0.001	0.01
Water	40	37.9	40 ^{*4}	42 ^{*4}
Dough				
Noodle wheat flour ^{*1}	—	30	30	30
Bread wheat flour ^{*2}	30	—	—	—
ASP ^{*3}	—	—	0.9	0.9
Sugar	6	6	6	6
Salt	2	2	2	—
Skim milk	2	2	2	2
Shortening	6	6	6	6
Water	24	16.1	17 ^{*4}	15 ^{*4}

^{*1} Domestic wheat cultivar (Hokushin)

^{*2} Imported wheat

^{*3} Acid-soluble wheat protein

^{*4} Depending on the amount of protein (ASP) and salt added, the amount of water added to the sponge and dough was changed. The total amount of water added was the same for tests 2 and 3.

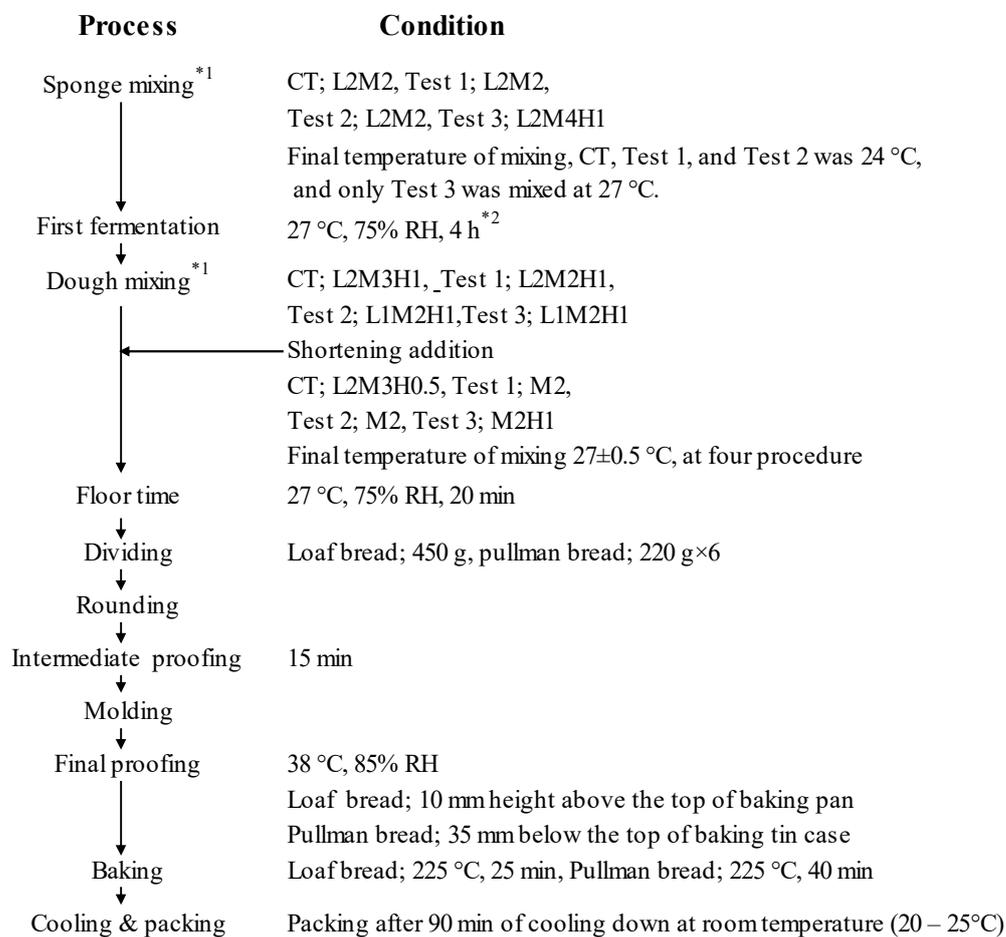


Fig. 19 Baking process via the sponge and dough method^{*3}

^{*1}Mixing Condition; L, M, H indicated the rotation speed of the mixer, i.e.L is Low (135 rpm), M is Middle (203 rpm), and H is High (235 rpm). The number after acronym indicated time (min). ^{*2}Final temperature of fermentation, CT; 28.5 °C, Test 1; 27.8 °C, Test2; 27.9 °C, Test3; 28.0 °C. ^{*3}Two types of bread were prepared, i.e., loaf bread and pullman bread. The instruments used in the baking test are listed below. Mixing; Vertical Mixer VM-3, Fermentation; Model OBS-D5, Molding; Model WFS, Baking; Deck Oven, Model DOV-T43, (All equipments and machinery listed above are manufactured by Oshikiri Machinery Ltd.)

2.4. 中種改良生地の発酵時の膨倍および生地の微細構造

麵用小麦粉を用いて ASP を添加し、中種生地を改良した Test 3 の発酵中の生地容積の変化を小麦タンパク質無添加で従来の中種法で行った Test 1 と比較して Fig.20 に示した。Test 1 では発酵後 2 時間経過すると生地容積の増加は停滞したが、中種改良法による Test 3 の生地容積は 4 時間で 3 倍以上に増加することを認めた。

そこで、それぞれの発酵直後の生地内部を見ると、目視で網目状組織の差異が観察されたため、その一部を切り取り、SEM で微細構造を観察した (Fig.21)。Test 1 の生地は網目構造の形成が粗く、発酵中のガス保持力が弱いことを示した。ASP を添加し、中種改良した Test 3 は良く伸びたグルテンが緻密に形成されていることを認めた。中種発酵中の生地膨倍の結果と考え合わせ、麵用小麦粉を用いた製パンには ASP を添加し、通常の中種法を改良することにより、発酵時、産生される炭酸ガスの保持力が向上する生地を形成することを認めた。

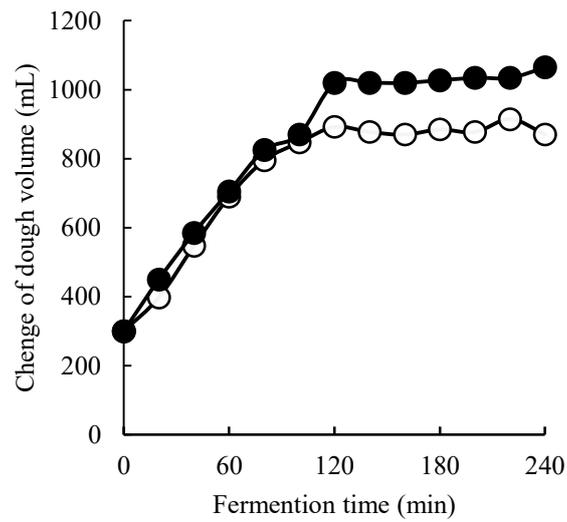
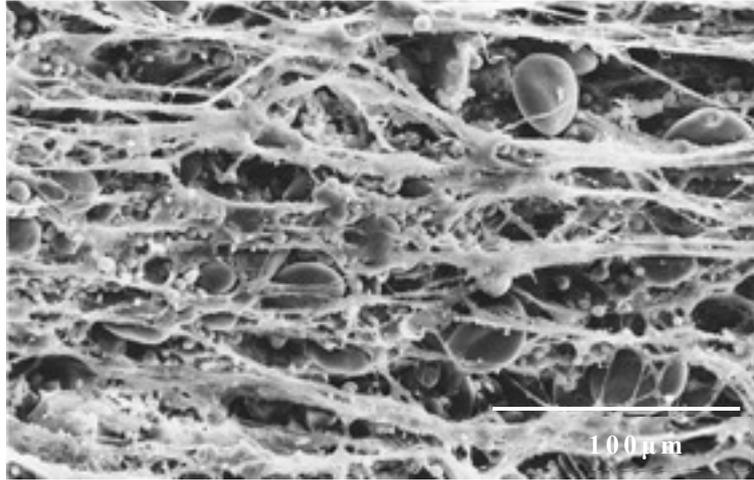


Fig.20 Change of dough volume during fermentation by the sponge and dough method
 ○, Test 1, Domestic noodle wheat flour by standard sponge and dough method; ●, Test 3,
 Domestic noodle wheat flour by improved sponge and dough method.

Test 1



Test 3

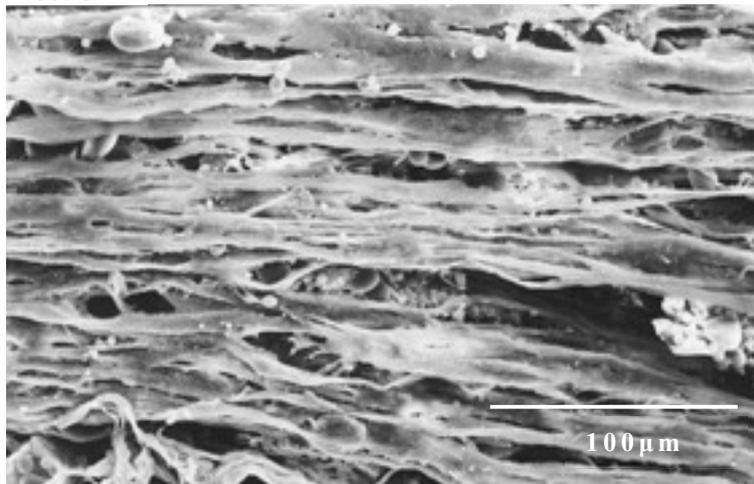


Fig.21 Scanning electron micrographs of dough microstructure after fermentation by sponge and dough method using domestic noodle wheat flour
Test 1, Domestic noodle wheat flour; by standard sponge and dough method; Test 3, Domestic noodle wheat flour; by improved sponge and dough method.

2.5. 山型パンの外観、体積および比容積

各製パン条件で製造した山型パンの外観を比較した (Fig.22)。Test 1 は麵用小麦粉を用いて、ASP を添加せず標準的な中種法で製パンした結果、4 試験区の中で最も膨化が劣っていた。麵用小麦粉に ASP を 3% 添加してタンパク質を補充した Test 2 は CT と同程度に膨化した。ただし、Test 2 は、CT の外観とは異なり、側面のひび割れ状態が少なく、焼成時の釜伸びが劣ることを示した。Test 3 は CT よりも膨化し、側面のひび割れが大きくなった。一般に、山型パンの場合、焼き上げ時に生地が急激に膨張すると、側面にひび割れが生じ、その部分が大きいほど製パン性が良いと言われる (山田ら, 2017)。また、ASP の主要成分であるグリアジンは小麦粉生地に添加すると生地形成時間を短くし、生地からのガス漏洩率は低下するが、TaPDI および TaERO1 による SS 結合を増加させることにより、ガスの漏洩率が大きく減少し、パンの比容積が有意に増加することが報告されている (Noguchi et al., 2016)。したがって、これらのパンの外観の違いは、各試験区における生地のグルテン形成性ならびに 4 時間発酵中のガス保持力が焼成時のパン膨張の差異に影響したと考えられた。既報より、Test 3 は、発酵プロセス中に生成された CO₂ ガスを、対照 (CT) のパン用小麦粉と同じかそれ以上の状態で保持していた。しかし、Test 1 と Test 2 はどちらも、生地の膨張率が発酵開始後 2-3 時間でピークに達し、その後平衡状態になるか、徐々に減少することを示した (廣瀬ら, 2004)。つまり、Test 1 はタンパク質が不足しているため生地が弱く、ガス保持力が乏しいのでパンは膨らまず、Test 2 は補充するタンパク質として、生地に伸展性を付与するグリアジンを主成分とする ASP (丹下, 2006) を用いたため、生地の伸展性は向上した。しかし、この段階では生地の弱化は十分には改善されなかった。中種法では、発酵時に高いガス保持力を有する粘弾性がある中種生地を必要とする。そこで、中種生地に適度な粘弾性を付与するため、基本的な製パン材料で生地の粘弾性向上効果を有する食塩に着目した。通常の中種法では、本捏工程で生地に食塩が加えられるが、小麦粉に対して 0.5 または 1% の食塩を中種に添加すると、食塩無添加あるいは 0.15% の食塩添加量で製造されたものと比較して優れたパンが製造されたことが報告されている (Kilborn et al., 1981)。また、食塩には、グリアジンの存在状態を変化させる水溶性作用と、グリアジンを凝集させて分子間作用

を強化する作用があり、グルテン形成に関与していると考えられている (裏出, 2008; Urai et al., 2008)。これらの知見を踏まえて、Test 3 は国産麺用小麦粉に ASP を加え、中種生地に食塩を 2% 添加した。さらに、酸化剤であるアスコルビン酸の量も増やし、十分に混捏して、ガス保持力の高い生地を形成した。その結果、パン用小麦粉を使用した CT に匹敵する生地の粘弾性が得られ、焼成したパンは釜伸びがよく、側面に大きなひび割れが生じる望ましいパンの形状が得られたものと考えた。パンの膨化を客観的に評価するために、山型パンの体積と比容積を測定した (Table 10)。ASP を添加して中種生地を改良した Test 3 は、他の 3 試験区よりも体積、比容積が有意に高く、麺用小麦粉を用いて ASP を添加せず従来の中種法で製パンした Test 1 は有意に低い値を示した。ASP を添加し、従来法で製パンした Test 2 はパン用小麦粉を使用した CT と同程度の値を示し、外観 (Fig.22) で観察された形状を反映する結果となった。

2.6. パン内相の微細構造観察

各試験区のパン内相の微細構造を SEM で観察した (Fig.23)。左の列にスライスした山型パンの観察部分を□で示した。パン用小麦粉を用いた CT と比較すると、麺用小麦粉を用いた Test 1 と Test 2 では不均一な気泡が観察された。しかし、Test 3 では、CT と同様に垂直に伸びる比較的均一な気泡が観察された。さらに、それぞれの気泡膜表面の一部を拡大し、右の列に示した。Test 1、Test 2 では、表面が部分的に剥がれ、扁平なデンプン粒子が露出していた。CT および Test 3 では、表面の剥離が少なく、露出したデンプン粒子がわずかに伸びている状態が観察された。パン生地の気泡膜の骨格を形成するグルテンタンパク質は、60-70°C で熱変性を開始し、水和能力が低下し、放出された水分がデンプン粒子の糊化と膨潤に使われる。気泡が大きくなり、特定の方向に配向したデンプン粒が伸長して変形し、グルテンシートが薄く伸長する (松本, 1997)。グルテンマトリックスに埋め込まれたデンプンの糊化は焼成中の膨化に重要な役割を果たし、パンの内相を決める (He et al., 1991. Naito et al., 2005)。また、気泡形成にはその骨格であるグルテンの粘弾性が関与する (井上, 2016)。パン内相の微細構造の観察と考え合わせると、ASP を添加した Test 2 は Test 1 よりも伸展性は高いが弾力が劣り、CT

に近似した気泡形状が観察された Test 3 は、CT に近い粘弾性を有する生地が得られたことと推察した。この観察結果から、先に述べた焼成時の釜伸びの相違にもそれぞれの試験区の生地の粘弾性が影響したことと考えられた。

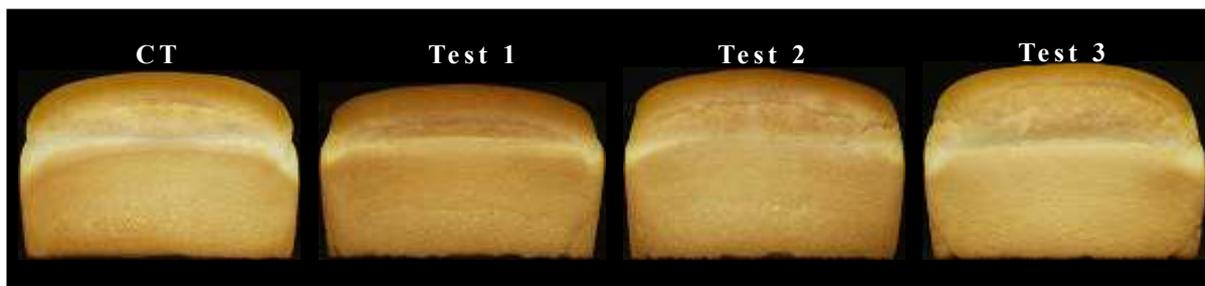


Fig. 22 External appearance of bread loaves

CT, Bread flour; Test 1, Domestic noodle wheat flour; Test 2, Domestic noodle wheat flour+3% ASP; Test 3, Domestic noodle wheat flour+3% ASP. CT, Test 1; Test 2, Standard sponge and dough method; Test 3, Improved sponge and dough method; ASP, acid-soluble wheat protein

Table 10 Effect of addition of acid-soluble wheat protein (ASP) and improvement of the sponge and dough method on the volume and specific volume of bread prepared from domestic noodle wheat flour

	Type of wheat flour	Method	Addition of ASP (%)	Volume (mL)	Specific Volume (mL/g)
CT	Imported bread wheat flour	Standard sponge and dough	—	2074±10 ^b	5.21±0.05 ^b
Test 1	Domestic noodle wheat flour	Standard sponge and dough	—	1983±39 ^c	4.99±0.09 ^c
Test 2	Domestic noodle wheat flour	Standard sponge and dough	3	2071±42 ^b	5.16±0.11 ^{cb}
Test 3	Domestic noodle wheat flour	Improved sponge and dough	3	2187±15 ^a	5.51±0.06 ^a

The results showed the average value ± standard deviation ($n = 3$). The values followed by the same letter with the column are not significantly different ($p < 0.05$). The analysis of variance between the data was evaluated using IBM SPSS Statistics Ver.25.

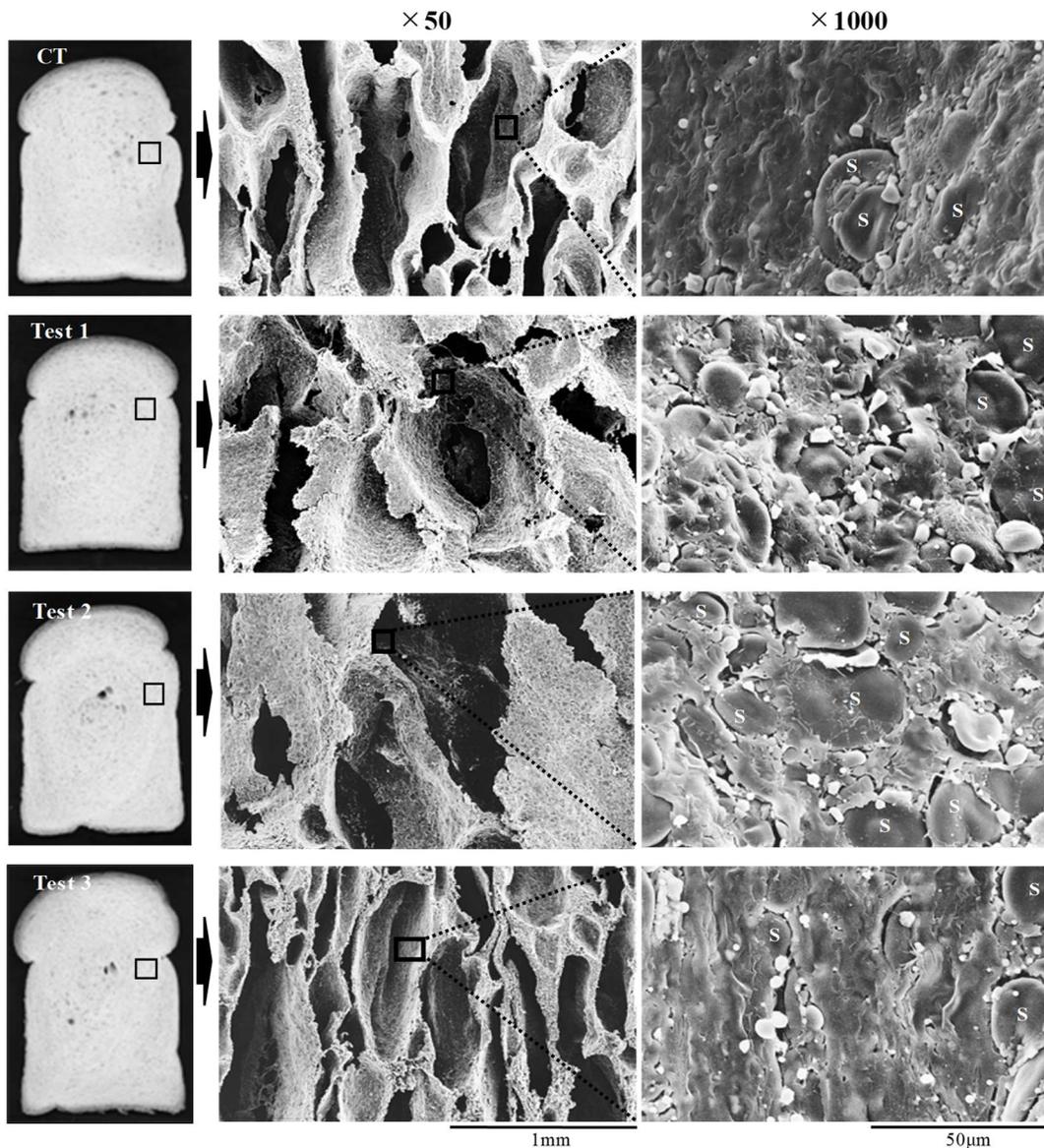


Fig. 23 Scanning electron micrographs of crumb microstructure of bread prepared from domestic noodlewheat flour using the sponge and dough method
 Enlargement of the part shown in the bread pictures on the left column are shown in center column and right column. Center column: Structure of gas cell wall in crumbs (low-magnification, $\times 50$). Right column: Magnification of the surface of gas cell wall of the part in 1 (High-magnification, $\times 1000$). S indicates starch granuls.
 CT, Control (bread flour); Test 1, Domestic noodle wheat flour; Test 2, Domestic noodle wheat flour +3% ASP; Test 3, Domestic noodle wheat flour +3% ASP. CT, Test 1, Test 2, Standard sponge and dough method; Test 3, Improved sponge and dough method; ASP, acid-soluble wheat protein.

2.7. パン内相のデンプン糊化度の経時的変化

パン内相の気泡の微細構造の観察から、各試験区でデンプン粒の存在に違いがあると考えられた。パン内相の気泡の微細構造の観察は、各試験群におけるデンプン粒の存在状態の違いを示した。初期のパンの老化は、デンプンの老化によって大きく影響を受けると考えられている (Mord et al., 1998)。パン保存中のデンプンの糊化度の変化を調べるために、20°Cで1日または3日間保存したパンの内相からデンプンを分離した。糊化度の変化はBAP法(貝沼ら, 1981; 松永ら, 1983)で測定した。この酵素システムは、糊化デンプンと老化デンプンとの間の分解度に識別性が高い特徴を持っている(Table 11)。麵用小麦粉を用いた中種法によるTest 1の糊化度は1日後で41%と有意に低く、3%ASPを添加して実施したTest 2は51%、Test 3は55%、対照のパン用小麦粉を用いたCTは57%となり、3日保存後はすべてが30%未満に減少した。ただし、Test 1と比較して、ASPを添加したTest 2およびTest 3は、糊化度の低下が減少した。すなわち、老化の進行がわずかに抑制され、麵用小麦粉を用いた製パンにおいて、ASPの添加はデンプンの糊化および老化に影響を与える可能性があると考えられた。

2.8. パン内相の硬さと凝集性およびその保存中の変化

20°Cで3日間保存した各試験区のパン内相の硬さと凝集性の経時変化を測定した。20°Cで1日経過後の硬さはTest 1が有意に高く、Test 2とTest 3の硬さはCTと同程度だった。3日経過後には、各試験区で有意差があったが、Test 3はCTに次いで低い値となった。凝集性は1経過後で各試験区に相違があり、Test 1、Test 2、Test 3、CTの順に高くなった。Test 1の変化は経時的に顕著であり、Test 2がそれに続いた。Test 3とCTには有意差はあったが、Test 1やTest 2と比べると経時的な低下は抑制されていた(Fig.24)。凝集性は値が高いほど、パン内部の結合力が強いことが示されている。時間の経過に伴う変化は、グルテン結合力の低下(藤田ら, 2015)およびデンプンの糊化の低下と関係があると言われている。上記したSEM観察の結果からパン内相の気泡の構造的相違、特にTest 1、Test 2では表面に露出している扁平なデンプン粒が多く存在した。このような糊化デンプンで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。

Table 11 Changes in the degree of gelatinization of bread prepared from domestic noodle wheat flour using the sponge and dough method during storage at 20 °C

	Type of wheat flour	Method	Addition of ASP(%)	Degree of gelatinization (%)	
				Storage period (day)	
				1	3
CT	Imported bread wheat flour	Standard sponge and dough	—	57.4 ± 5.4 ^a	28.6 ± 3.7
Test 1	Domestic noodle wheat flour	Standard sponge and dough	—	40.9 ± 2.9 ^b	20.3 ± 2.2
Test 2	Domestic noodle wheat flour	Standard sponge and dough	3	51.7 ± 2.6 ^a	25.7 ± 4.8
Test 3	Domestic noodle wheat flour	Improved sponge and dough	3	54.7 ± 0.9 ^a	26.8 ± 1.1

The results showed the average value ± standard deviation ($n = 3$). The values followed by the same letter with the column are not significantly different ($p < 0.05$). The analysis of variance between the data was evaluated using IBM SPSS Statistics Ver.25.

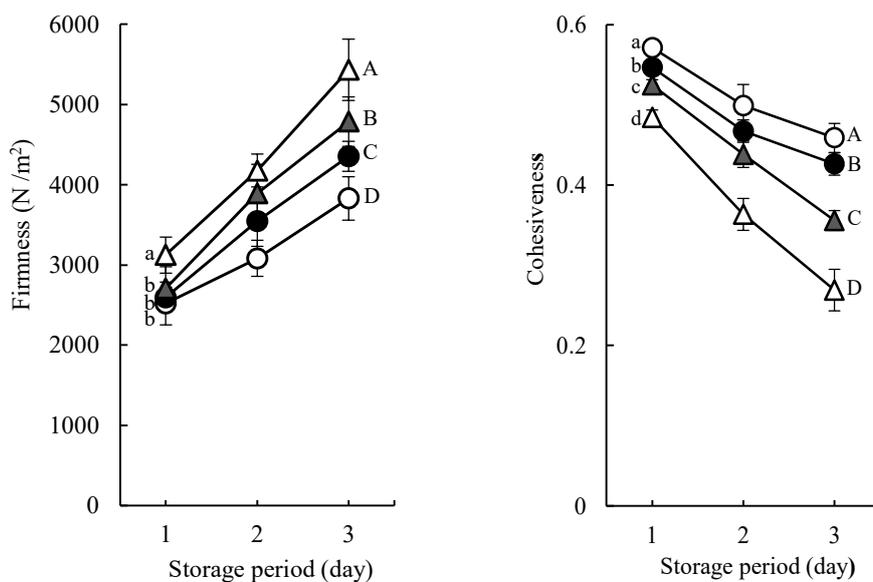


Fig.24 Changes in crumb firmness and cohesiveness of bread during storage at 20°C, for bread prepared from domestic noodle wheat flour using the sponge and dough method CT, Control (Bread flour); Test 1, Domestic noodle wheat flour; Test 2, Domestic noodle wheat flour+3%ASP; Test 3, Domestic noodle wheat flour+3%ASP. CT, Test 1, Test 2, Standard sponge and dough method; Test 3, Improved sponge and dough method. Vertical bars show the SD of each value ($n = 8$). Bars labelled with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in between the test groups. The analysis of variance between the data was evaluated using IBM SPSS Statistics Ver.25. ASP, acid-soluble wheat protein; SD, standard deviation.

△, Test 1; ▲, Test 2; ●, Test 3; ○, CT.

3. 要約

本研究では、製パンに適さないといわれる国産麵用小麦粉を用いて品質の良いパンの大量製造（機械化製パン）を可能にするため、酸可溶性小麦タンパク質（ASP）を加え、中種法を改良し、製パン試験を行い、パンの体積、比容積、内相の気泡膜の微細構造の観察、デンプン糊化度、内相の物性の経時変化を調べた。その結果、麵用小麦粉に ASP を加えるとパンの体積、比容積はやや増加したが、さらに中種生地に食塩を加え、酸化剤としてのアスコルビン酸、パン用酵母の添加量を増やし、生地が発酵条件、ガス保持力を改善して焼成すると、パンの体積、比容積が有意に増加した。パン内相の微細構造の観察では気泡の形状がパン用小麦粉を用いたパンに近似し、パン内相の硬化、凝集性の経時変化が抑制された。

国産麵用小麦粉を用いた製パンにおいて ASP の添加と中種生地を改良することにより、生地の粘弾性が改善され、発酵時のガス保持力など製パン性が向上し、機械化製パンに適応する可能性が示唆された。

Ⅲ． 米粉と麵用小麦粉を原料とするパンの製造

日本の各地域で生産される米粉および麵用小麦粉を用いて、機械化製パンに適用する技術を開発することが本課題の大きな目的である。Ⅰ章においては小麦粉の40%を米粉に置換える米粉混合パンの機械化製パンについて、米粉に含まれる適度なデンプン損傷度が作業性向上に寄与することを明らかにしたが、ここで用いた小麦粉は外国産パン用小麦粉を用いた。さらにⅡ章では日本で栽培される小麦で生産比率は高いが製パン適性に欠ける麵用小麦粉を用いて、機械化製パンに適応できる技術を開発した。

そこで本章では、それぞれの技術を応用し、日本で生産される米粉と麵用小麦粉を用いた米粉混合パンの機械化製パンについて検討した。原料としては米、小麦ともに代表的な産地である埼玉県産の米と小麦を用い、米粉置換比率を小麦粉の50%まであげた50%米粉混合パンを機械化製パンにより試作し、その嗜好調査を行った。

1. 試料および実験方法

1.1. 供試材料

米粉は、埼玉県産「彩のかがやき」を用い、I章で得られた結果に基づき、C1 および C3 に区分される粉碎方法（日の本穀粉社製）としたものを用いた。

小麦粉は、埼玉県産「さとのそら」（日東製粉社製）を用いた。

小麦タンパク質はI章で用いた、グルテン並びに酸可溶性小麦タンパク質（ASP）を用いた。

1.2. 分析方法

タンパク質、デンプン損傷度、水分保持力はI章に準じて測定した。

1.3. 機械化製パン工程

製パン試験は70%中種法を用いて、横型センサーミキサーおよび大型機械生産機（ホームライン、オシキリ社製）を使用して、麵用小麦粉の50%を米粉で置換した50%米粉混合パンにより食パンを製造した。配合はTable 12に示したが、原料の性状は前章で用いたものとは異なるため、予備試験を繰り返し、加水量、小麦タンパク質のグルテン、ASPの配合比率、食塩の添加量ならびに加える工程段階を検討した。その結果、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%ずつ加えた。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。

なお、嗜好調査に用いるロールパン（“さきたまライスボール”）の試作も行った。

Table 12 Material formula of bread-making

Material	Baker's % ^{*1}	
	Test L	Test M
Sponge		
Wheat flour	50	50
Gluten	10	10
ASP	5	5
Salt	1	1
Ascorbic acid	0.001	0.001
Compressed yeast	2.5	2.5
Water	40	40
Dough		
Rice flour (C1)	50	25
Rice flour (C3)	—	25
Granulated sugar	6	6
Salt	1	1
Skim milk powder	2	2
Shortening	6	6
α -Amylase	0.010	0.010
Lipase	0.0015	0.0015
Water	50	50

^{*1}The formula used was based on total flour (wheat and rice) weight.

^{*2}Wheat protein used ASP and gluten at a ratio of 5:10

1.4. パンの体積および比容積

前章に準じて、レーザ体積測定ユニット (Selnac-Win VM; ケイ・アクシス社製) を使用してパンの体積 (mL) を測定した。比容積 (mL/g) は、体積と重量の測定値から求めた。

1.5. パン内相の物性とその経時変化の測定

パンを焼いた後、室温で 90 分間冷却し、ポリプロピレンバッグ (0.03mm) に包装し、さらに、保存日ごとに 4 つの試験サンプルをポリエチレンバッグ (0.08mm) に包装した。保存期間は 1-4 日とした。プルマンタイプのパンを 25mm の厚さにスライスし、物性測定装置 (5564 型, Instron 社製) を用いて硬さを測定した。プランジャーは円柱形 ($\phi 23\text{mm}$)、50%圧縮した際の圧縮荷重(N)を硬さとした。

1.6. 米粉混合パンの嗜好調査方法

異なる性状の米粉を用いた米粉混合パンの食味評価を以下のよう
に実施した。

食味評価の対象としたパンはロールパンで、埼玉県学校給食会のパンアイテムの一つである“さきたまライスボール”とした。その原料として、米粉は、埼玉県産「彩のかがやき」を用い、C1,C3 に区分される粉碎方法とした。小麦粉は埼玉県産「さとのそら」を用いた。小麦粉と米粉の比率を 50%ずつとし、50%米粉混合パン (“さきたまライスボール”; ロールパン) を調製した。さらにデンプン損傷度の差異による食味の影響を検討するために、米粉を C1 のみ用いた従来の製品 A、C1 の 50%を C3 に置換えてデンプン損傷度を若干高めた製品 B の 2 製品を比較検討した。

パネリストは東京農業大学第一高等学校中等部の生徒 459 名として、2 種類のパンの好みおよびそれを選択した理由について、設問方式でアンケート調査を行った。

2. 結果および考察

2.1. 米粉および麵用小麦粉の性状分析

各試料のタンパク質、デンプン損傷度、水分保持力の分析値を Table 13 に示した。Ⅱ章で用いた麵用小麦粉よりタンパク質含量はさらに低く 8.7%であった。また、用いた麵用小麦粉のデンプン損傷度は 1.8%と低いことが示された。麵用小麦粉は軟質小麦や中間質小麦粉から製粉されるが、麵用小麦粉の原料は軟質小麦で、硬質小麦に比べて胚乳細胞が柔らかく壊れやすいので、組織からのデンプンが遊離しやすい。そのため、今回用いた「さとのそら」もデンプン損傷度が低くなると報告されている（佐竹ら，2000；大澤ら，2018）。

2.2. 機械化製パン工程

国産麵用小麦粉と米粉を用い製パン試験を行った。今回用いた埼玉県産麵用小麦粉「さとのそら」はⅡ章で用いたものより、タンパク質含量が低く、デンプン損傷度も低かったので、不足しているタンパク質は生地混捏時の生地強度を測定したところ、C1 単独区では加水量が増加するに従い、生地が著しく弱化した。C1,C3 混合区では、生地の弱化が大幅に低減され、混捏時における機械への付着性も抑制された。次いで、モルダでの成形時において、C1 単独区では水の離水が観察され、硬さが増加するが、混合区では離水が見られず生地強度は柔らかくなった。

2.3. パンの体積および比容積

それぞれのパンの体積および比容積の結果を Table 14 に示した。体積、比容積ともにデンプン損傷度が低い Test Lの方が高くなったがいずれもパン用小麦粉で調製したものに比べて遜色がなく、Test Mでも比容積は 5.00 となった。それぞれの山型パンの外観は Fig.25 に示した。

Table 13 Properties of wheat flour and rice flour produced in Saitama Prefecture

	Protein (%)	Damaged starch content (%)	Solvent retention capacity (%)
Wheat flour	8.7	1.8	—
Rice flour (C1)	5.5	2.4	72.2
Rice flour (C3)	5.7	11.4	103.1

Table 14 Volume and specific volume of wheat flour and rice flour blended bread

	Volume (mL)	Specific Volume (mL/g)
Teat L	1992.2 ± 73.8	5.28 ± 0.19
Test M	1940.4 ± 59.0	5.00 ± 0.15

Results showed average value ± SD ($n=7$).



Test L



Test M

Fig.25 External appearance of bread loaves

2.4. パンの物性およびその経時的変化

それぞれのパンの物性は Test M が柔らかく、経時的にも低く推移し、物性改善並びに老化抑制効果が認められた (Fig. 26)。

2.5. 米粉混合パンの嗜好調査

米粉パンを製造する際に用いる米粉は、これまで損傷デンプン量が少ないものが適しているとされていたが、I 章で、損傷デンプンの量が多少高い方が、機械化製パン性やパンの経時的変化の抑制がみられるといった知見が得られた。そこで、本章でもデンプンの損傷度量を変化させた米粉を用いて製造したパンの試食アンケートを実施した。

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 のみの米粉を使用した従来品の A と C3 を加えて、デンプン損傷度を多少増加させた B を比較した結果、従来品の A を美味しいと評価したのは 29%、B を美味しいと評価したのは 59% となり、デンプン損傷度がやや高い米粉を用いたパンを美味しいと選択した生徒が約 2 倍であった。また、その評価基準は食感などの物性を基準にしており、柔らかさやもちもち感など米粉の特徴が生かされたことが示され、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 (Fig.27)。

以上より、米粉を高配合した米粉混合パンの機械化製パンを行う場合、米粉のデンプン損傷度は若干高くすることにより、生地のだたつき抑制が促され、製パン性、パンの品質、食味が向上することが明らかとなった。

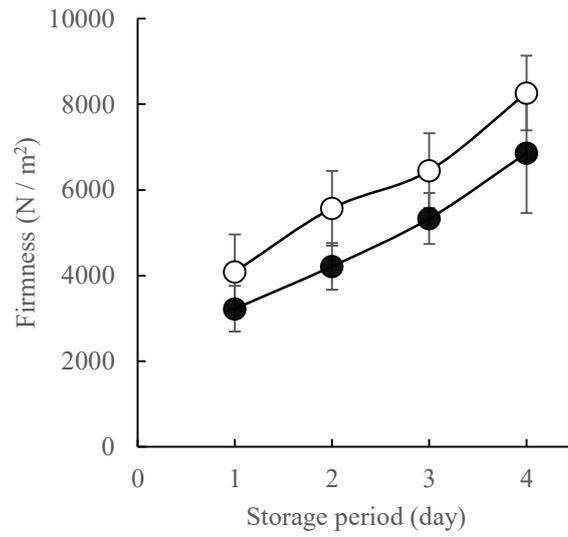
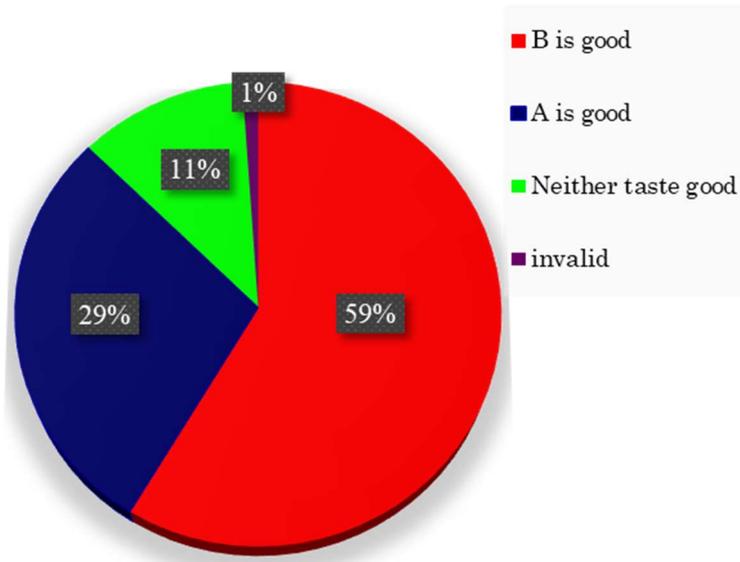


Fig.26 Effect of rice flour starch damage degree on changes in firmness of crumb of wheat flour and rice flour blend bread during storage at 20°C
—○—, Test L —●—, Test M

Which bread do you prefer?



What is your reason for choosing B?

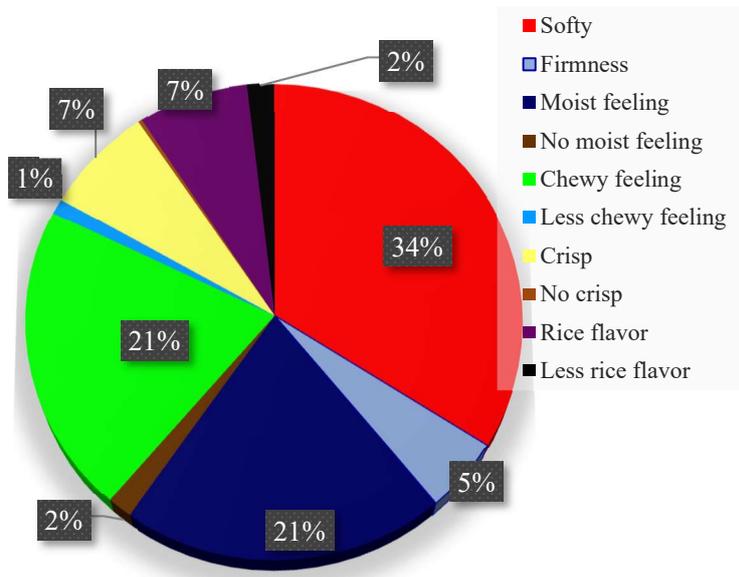


Fig.27 Preference survey of wheat flour and rice flour blended bread with different degree of starch damage in school lunch

3. 要約

埼玉県産米の「彩のかがやき」および同県産小麦「さとのそら」を用いて、米粉混合パンの機械化製パンについて検討し、得られたパンの嗜好調査を実施した。

その結果、小麦粉、米粉とともに配合するグルテンに加えて、グリアジンを主成分とする ASP の添加量の適性化並びに米粉のデンプン損傷度を適度に調整することで、タンパク質含量等異なる小麦粉を用いても同様の製パン性を示す米粉混合パンの製造が可能であることを認めた。

また、機械化製パン性向上に寄与した米粉のデンプン損傷度の増加は、中学生をパネリストとした嗜好調査において、従来のデンプン損傷度が低い米粉を用いたパンより高い評価となった。この評価基準は柔らかさ、もちもち感など、パンの食感に基づくことが示された。

総括

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%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麺用であり、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。米粉あるいは麺用小麦を用いた大量製パン技術の開発が進むと、自給性の高い米や麺用小麦粉の需要が増す。麺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麺用小麦粉を用いて、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、国産麵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、米粉と国産麵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. 米粉の性状の相違が製パン性に及ぼす影響

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 μ m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。両者の粉碎方法は気流粉碎法によるものだが、C1 は粉碎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 9.3%、M は 8.6%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の保水性を高め、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. 麵用小麦粉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、生地の弱化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も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小麦粉はタンパク質、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、中種生地調製の試行錯誤を繰り返して、加水量、食塩の添加量、時期も検討し、機械化製パンに對應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。

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、新規用途米粉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し、より高い効果を示したものと推察された。

麺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、埼玉県産の米粉と麺用小麦粉を用い、機械化製パンを試みたところ、それぞれを 50% 配合した 50% 米粉混合麺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するため、中学生に嗜好調査を行った結果、本製品が柔ら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、麺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。

Improvement of bread quality and development of mechanized bread-making technology using rice and noodle flours.

Japan has a low food self-sufficiency rate. One of the main reasons for this is the decline in consumption of rice due to changes in dietary habits. Japan has a high self-sufficiency rate for rice, but wheat, the raw material for bread, which is in stable demand as a staple food in modern Japan, is almost entirely imported. The supply of imported wheat for bread is in a state of instability due to global conditions such as climate change, rising transportation costs, and the Ukraine situation, all of which are causing wheat prices to hike.

Therefore, the use of domestic grains, such as rice, which has a high self-sufficiency ratio, and domestically produced wheat, which is predominantly used for noodles, is required as a replacement for wheat for bread. However, rice and noodle flours are deemed unsuitable for bread-making, especially in the case of mechanized bread-making techniques, and in terms of overall bread quality.

Therefore, in this research, the development of mechanized bread-making techniques and improvement of bread quality were examined, using rice flour and noodle wheat flour. It was hoped this could reduce dependence on imported wheat in the future.

First, the research on the use of rice flour was conducted by replacing 40% of wheat flour with rice flour and developing production techniques that can be applied to mechanized bread-making, leading to the mass consumption of rice flour.

Recently, rice flour for bread has been developed to have a small average grain size and low starch damage. If the rice flour for wheat flour replacement ratio is high, it leads to a reduction in moisture retention in the dough, causing the dough to become soft and sticky. This stickiness is a major problem in mechanized bread-making and requires improvement.

In this study, it was found that combining rice flour C1, which had low starch damage, with rice flour C3, which had high starch damage, created an overall damage level that was the same as that of wheat flour,

thus a higher proportion of the moisture in the dough was transferred to the starch, contributing to a reduction in stickiness.

Also, bread baked using rice flour with a high starch damage degree had a lower rate of baking loss (%) than bread using rice flour with a low starch damage degree. Furthermore, when starch damage degree increased, suppression of the temporal rheology changes (firmness and cohesiveness) to the bread crumb, due to the effect of α -amylase, was apparent.

Next, when making bread with noodle flour, ASP was added to compensate for the lack of protein, and salt, which is usually added at the mixing stage, was added to the sponge dough. Salt promotes the aggregation of gliadin in the gluten and enhances its interaction with glutenin, resulting in a highly viscoelastic dough. As a result, the gas retention of the dough was improved and a gas cell structure of the crumb of the bread was formed, which was similar to that of bread with bread flour. Furthermore, microstructure observation showed that the gas cell shape in the noodle wheat was similar to that of bread with bread flour.

It was realized that, by combining the above two technologies, it was possible to produce bread with a 50% blend of noodle flour and rice flour via mechanized bread-making, using noodle flour and rice flour that was produced in Saitama Prefecture. With the aim of comparing this product with conventional rice flour that has less starch damage, a preference survey was conducted among junior high school students. In the survey, the product was evaluated very favorably, and was deemed to have excellent softness and moistness.

As described above, both rice flour and noodle flour are said to have poor bread-making properties. However, if the properties and interactions of their glutes and starches were properly understood, and a bread dough with suitable viscoelasticity and water retention was prepared, then technologies that enable their usage in mechanized bread-making could be developed.

参考文献

- AACC International (2000). *Approved Methods of Analysis*, 11th ed. Methods 56-11.02. *Solvent Retention Capacity*. AACC International, St. Paul, MN.
- Arai, C., Hirose, R., Tozaki, M., Nakamura, S., Yamaguchi, S., Suzuki, M., Miyamori, K., Noguchi, T., & Takano, K. (2021). Effect of acid-soluble wheat protein addition on the quality of bread prepared from molded frozen dough. *Cereal Chemistry*, 98, 701–715.
- Araki, E., Ikeda, T., Ashida, M., Takata, K., Yanaka, M., and Iida, S. (2009). Effect of rice flour properties on specific loaf volume of one-loaf bread made from rice flour with wheat vital gluten. *Food Sci. Technol. Res.*, 15, 439–448.
- He, H. and Heney, R. C. (1991). Gas retention in bread dough during baking. *Cereal Chem.*, 68, 521–525.
- Hug-Iten, S., Escher, F., and Conde-Petit, B. (2003). Staling of bread: Role of amylose and amylopectin and influence of starch-degrading enzyme. *Cereal Chem.*, 80, 654–661.
- Juliano, B.O. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Sci. Today*, 16, 334–340.
- Kilborn, R.H., Nomura, S. and Preston, K.R (1981). Sponge and dough bread. I. Reduction of fermentation time and bromate requirement by the incorporation of salt in the sponge. *Cereal Chem.*, 58, 508–512.
- Matsuki, J., Okunishi, T., Okadome, H., Suzuki, K., Yoza, K., and Tokuyasu, K. (2015) Development of a simple method for evaluation of water absorption rate and capacity of rice flour samples. *Cereal Chem.*, 92, 487–490.
- Morad, M. M., and D’applonia, B. L (1980). Effect of surfactants and baking procedure on total water-solubles and soluble starch in bread crumb. *Cereal Chem.*, 57, 141–144.
- Naito, S., Fukami, S., Mizokami, Y., Hirose, R., Kawashima, K., Takano, H., Ishida, N., Koizumi, M. and Kano, H. (2005). The effect of gelatinized starch on baking bread. *Food Sci. Technol. Res.*, 11, 194–201.

- Noguchi, T., Nishibori, F., Shiono, K., Oka, D., Noguchi, H. and Takano, K. (2015). Influence of disulfide bond formation via recombinant PDI-ERO 1 processing of proteins and baking quality. *Food Preser. Sci.*, **41**, 267–272.
- Noguchi, T., Shiono, K., Oka, D., Noguchi, H. and Takano, K. (2016). The action of the SS bond formation due to the PDI-ERO 1 to wheat gliadin (Glia. A) on the dough formation and baking quality. *Food Preser. Sci.*, **42**, 9–14.
- Park, H. S, Maeda, T. and Morita, N. (2005). Effect of whole quinoa flours and lipase on the chemical, rheological and breadmaking characteristics of wheat flour. *Journal of Applied Glycoscience*, **52**,337–343.
- Saio, K., and Noguchi, A. (1983). The Microstructure of polished, milled and air classified rice and rice bran. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi)*, **30**. 331–338.
- Urai, T., Matsumura, Y., and Urade, R. (2008). Disaggregation and reaggregation of gluten proteins by sodium chloride. *J. Agric. Food Chem.*, **56**, 1122–1130
- Yamauchi, H., Noda, T., Matsuura-Endo, C., Nishio, Z., Takata, K., Tabiki, T., Saito, K., Oda, Y., Funatsuki, W. and Iriki, N. (2003). Improving domestic flour for bread making by blending extra strong (ES) flour. *Food Preser. Sci.*, **29**, 211–220.
- 青木法明, 梅本貴之, 鈴木保宏 (2010). グルテン添加米粉パンにおける多収性稲品種の製パン特性. 日本食品科学工学会誌, 57, 107-113.
- 新井 千秋, 廣瀬 理恵子, 柴田 朋子, 丹下幹子 (2003). 小麦タンパク質「グリアジン画分」による国産小麦粉を用いたパンの大量生産技術の開発. ブレインテクノニュース, 98,30-34.
- 新井千秋, 廣瀬理恵子, 戸崎幹子, 山口 聡, 鈴木 実, 宮森清勝, 野口智弘, 菊池修平, 高野克己 (2018). 酸可溶性小麦タンパク質の添加が米粉混合パンの品質安定化に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌, 65, 518-528.
- 荒木悦子 (2010). 米粉利用の現状と米粉研究, 作物研究, 55, 59–64.

- 有坂将美, 中村幸一, 吉井洋一 (1992). 製粉方法を異にした米粉の性質, 澱粉科学会誌, **39**, 155-163.
- 池田達哉 (2017). 小麦品質関連遺伝子の解析による国内品種と輸入小麦銘柄の特徴付け. 日本食品科学工学会, **64**, 171-176.
- 市川和昭 (2010). 油脂および乳化剤による米粉パンの物性改善. 日本食品科学工学会誌, **57**, 420-426.
- 井上茂孝, 次田和正, 小池誠治, 丸銭詔司, 鴨居郁三 (1995). 脂肪酸の異なるモノグリセリドの製パン特性に与える影響. 日本食品科学工学会誌, **42**, 634-642.
- 井上茂孝 (1997). 製パンにおけるモノグリセリドの作用機構に関する研究. 日本食品科学工学会誌, **44**, 841-847.
- 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.
- 裏出令子 (2008). 食品と技術, 12, 1-9.
- 大澤実, 石原智, 神谷未紀 (2018). 小麦「さとのそら」における穀粒の硬さと強度の測定. 群馬県農業技術センター研究報告, **15**, 1-7.
- 小河拓也, 永井耕介 (2011). 製粉方法が米粉の特性および製パン性に及ぼす影響. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告農業編, **59**, 19-23.
- 貝沼圭二, 松永暁子, 板川正秀, 小林昭一 (1981). B-アミラーゼ-プルラーゼ (BAP) 系を用いた澱粉の糊化度, 老化度の新測定法. 澱粉科学会誌, **28**, 235-240.
- 神田哲也 (2009). 米粉食品と米粉利用技術の開発, 米粉の特徴と今後の展望, 食品工業, **52**, 12, 42-46.
- 神田哲也 (2013). 米粉・コメ粉の多様性と応用例, 日本家政学会誌, **64**, 599-604.
- 五島義昭, 渡辺義久, 新宮穂高, 磯崎洋彦, 柘植治人, 大橋一二 (1986). 国内産小麦の製パン適性について. 日本食品工業学会, **33**, 102-107.
- 佐竹覺, 福森武, 目崎孝昌, 宗貞健, 柴田恒彦, 池田義郎 (2000). 小麦粒の組織と硬さおよび強度に関する研究. 農業機械学会誌, **62**, 37-49.

- 宋戸功一，江川和徳 (1992).ペクチナーゼ処理による米粉の製造法及びその製パン適性 (第 1 報). 米の粉食化に関する研究. 新潟県食品研究所研究報告, **27**, 21-28.
- 渋谷直人 (1990). 米の細胞壁の化学構造と品質. 日本食品工業学会誌, **37**, 740-748.
- 庄子真樹，羽生幸弘，毛利哲，畑中咲子，池田正明，富樫千之，藤井智幸 (2012). 製粉方法の異なる米粉の粉体特性と吸水特性の評価. 日本食品科学工学会誌, **59**, 192-198.
- 鈴木保宏 (2014). 米粉パンなどの米粉利用に適する品質特性の解明と好適品種の開発-米粉の利用により食料の自給力を高めることを目指して. 化学と生物, **52**, 796-798.
- 高野克己 (1991). パンの貯蔵. 製パンの科学 I , パンプロセスの科学, 第 2 版, 田中康夫, 松本博, 光琳, 東京, pp.249-285.
- 高野博幸，豊島英親，渡辺敦夫，小柳 妙，田中康夫 (1986). 生米粉の性状がレオロジー 特性および製パン性に及ぼす影響. 食品総合研究所研究報告, **48**, 43-51.
- 高野博幸，小柳 妙，田中康夫 (1980). パン生地発酵中の糖の消長に及ぼす各種米粉添加の影響. 日本食品工業学会誌, **27**, 522-528.
- 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.
- 高橋克嘉，奥西智哉，鈴木啓太郎，柚木崎千鶴子 (2011). 米粉パンの加工適性と宮崎県産米粉間の比較. 日本食品科学工学会, **58**, 55-61.
- 田引正，西尾善太，伊藤美環子，山内宏昭，高田兼則，桑原達雄，入来則雄，谷尾昌彦，池田達哉，船附昌子 (2011). 超強力秋まき小麦新品種「ゆめちから」の育成. 北海道農研研報, **195**, 1-12.
- 丹下幹子 (2006). 小麦たん白「グリアジン」の製パンへの応用. 月刊フードケミカル, **9**, 29-36.
- 堤忠一，安井明美 (1996). 一般成分および関連成分. 「新・食品分析法」日本食品科学工学会・新・食品分析法編集委員会編，光琳，東京, pp.1-105.
- 豊島英親，岡留博司，大坪研一，須藤充，堀末登，稲津脩，成塚彰久，相崎万裕美，大川俊彦，井ノ内直良，不破英次 (1997). ラピッ

- ド・ビスコ・アナライザーによる米粉粘度特性の微量迅速測定法に関する共同試験. 日本食品科学工学会誌, **44**, 579-584.
- 長尾精一 (1989). 小麦粉の知識(1)-グルテンが小麦の命-. 調理学会誌, **22**, 125-129.
- 長沼誠子(2003). 米粉の理化学的性質および調理特性に及ぼす微粉化の影響. 秋田大学教育文化学部研究紀要, **58**, 29-35.
- 樋口才二, 鈴木太士, 小山清人 (2015). 米と米粉の配合食パンの製造方法および力学特性, 味覚特性, 官能評価. 日本食育学会誌, **9**, 551-560.
- 福田明彦, 八木谷順子, 北脇永典, 井上吉之, 伊藤達郎, 平野茂博, 森島伊佐夫 (1974). 小麦粉成分の製パン性に及ぼす影響. 日本食品工業学会誌, **21**, 377-383.
- 福場博保 (1989). 澱粉の調製と精製. 「澱粉科学ハンドブック」, 二国二郎監修, 朝倉書店, 東京 p.167.
- 藤田沙南, 村上陽子 (2015). 油脂の添加が米飯パンの物理特性に及ぼす影響. 日本家政学会誌, **66**, 329-341.
- 廣瀬理恵子, 佐藤健, 新井 千秋, 柴田 朋子, 丹下 幹子 (2004). 国産小麦粉を原料とする製パン技術の開発. 東京都立食品技術センター研究報告, **13**, 1-7.
- 堀光代, 長野宏子 (2005). 岐阜県内産小麦粉の製パン性について. 岐阜市立短期大学研究紀要, **54**, 113-117.
- 本間紀之, 高橋 誠, 吉井洋一 (2016). 米の特性が製粉性に与える影響および米粉性状と製パン性の関係. 日本食品科学工学会誌, **63**, 551-560.
- 松木順子 (2012). 米粉利用のための特性評価の現状と課題. 日本応用糖質科学会誌, **2**, 7-11.
- 松下耕基, 寺山采花, 五嶋大介, 高田兼則, 山内宏昭 (2019). 角型食パンの品質特性に対する全粒粉使用と酵素添加の影響. 日本食品科学工学会誌, **66**, 201-209.
- 松永暁子, 貝沼圭二 (1983). 澱粉質食品の老化に関する研究 (第2報), 加工食品の糊化度について. 家政学雑誌, **29**, 73-78.
- 松本博 (1997). パンの焼成. 「製パンの科学 I 製パンプロセスの科学」, 田中康夫, 松本 博編, 光琳, 東京, pp. 192-212.

- 諸橋敬子，鍋谷隆史，吉井洋一，江川和徳（1998）. 小麦粉の代替品となる米粉の製造方法及び当該米粉を使用した加工食品. 特許 3076552 号, 12 月 16 日.
- 矢嶋瑞夫，新井千秋，丹下幹子，匂阪兼造（2014）. 酸性水可溶性タンパク質の製造方法及び酸性水可溶性タンパク質. 特許第 5614645 号, 9 月 19 日.
- 山下英一郎（2013）. ケービング抑制剤. 特許第 5270489 号, 8 月 21 日.
- 與座宏一，岡部繭子，島純（2008）. 米粉利用の現状と課題-米粉パンについて-. 日本食品科学工学会誌, **55**, 444-454.
- 與座宏一，松木順子，岡留博司，岡部繭子，鈴木啓太郎，奥西智哉，北村義明，堀金彰，山田純代，松倉潮（2010）. 製粉方法の異なる米粉の特性と製パン性の関係. 食品総合研究所研究報告, **74**, 37-44.
- 與座宏一，松木順子（2014）. 市販米粉の製パン性について. 食品総合研究所研究報告, **78**, 43-46.
- 吉井洋一，本間紀之，赤石隆一郎（2011）. 新潟県における米粉・米粉麺への取り組み. 日本食品科学工学会誌, **58**, 187-195.
- 吉野世美子（2006）. 国産小麦粉を使用したパンの特性および外国産小麦粉ブレンドによる製パン性の改善. 京都女子大学紀要, **61**, 37-43.
- 山田大樹，井上俊逸，吉野信次，坪井一将，小疇浩，山内宏昭（2017）. 湯種中の加熱グルテンが生地の製パン性に与える影響. 日本食品科学工学会誌, **64**, 90-97.

資料

農林水産省（2022）. 日本の食料自給率

https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panful1-12.pdf

農林水産省（2023a） 米粉をめぐる状況

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/komeko/>

農林水産省（2003b） 麦をめぐる最近の動向

https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/mugi_kanren-55.pdf

関係論文

廣瀬理恵子，新井千秋，戸崎幹子，山口聡，鈴木実，宮森清勝，野口智弘，菊池修平，高野克己(2021). 酸可溶性小麦タンパク質を加えた米粉混合パンの品質向上に関する検討. 日本食品科学工学会誌, **68**, 171-180.

廣瀬理恵子，新井千秋，戸崎幹子，山口聡，鈴木実，高橋良佳，神田哲也，宮森清勝，野口智弘，高野克己 (2021). 米粉混合パンにおける米粉デンプン損傷度の差異が製パン性およびパンの経時的変化に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌, **68**, 297-305.

Hirose, R., Arai, C., Tozaki, M., Yamaguchi, S., Suzuki, M., Miyamori, K., Noguchi, T., and Takano, K. (2022). Effect of acid-soluble wheat protein and improvement of the sponge and dough method on bread quality using domestic noodle flour. *Food Preser. Sci.*, **48**, 165-174.

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり懇切丁寧なる御指導ご鞭撻を賜りました東京農業大学 高野克己名誉教授、東京農業大学応用生物科学部食品加工技術センター 野口智弘教授、同学部農芸化学科 辻井良政教授、村田容常教授、農学部デザイン農学科野口治子教授に深く感謝申し上げます。また多くのご助言、ご厚情を賜りました応用生物科学部農芸化学科岡 大貴准教授、同学部食品加工技術センター菊池修平非常勤講師、小野航助教に心より御礼申し上げます。本研究は、アサマ化成株式会社、株式会社オシキリ、日の本穀粉株式会社ならびに東京都立食品技術センター（現東京都立産業技術研究センター）との共同研究で実施されたものであり、共同研究者のアサマ化成株式会社 矢嶋瑞夫社長、新井千秋氏、戸崎幹子氏、株式会社オシキリ 鈴木 実氏、山口 聡氏、研究課の皆様、日の本穀粉株式会社 高橋良佳氏、神田哲也氏、東京都立産業技術研究センター宮森清勝氏（現東京都農林総合研究センター）、佐藤 健氏はじめ研究員の皆様に多くのご尽力を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、元東京都立食品技術センター沼田邦雄氏、宮尾茂雄氏（現東京家政大学大学院客員教授）、若林素子氏（現日本大学生物資源科学部教授）には多くのご便宜、ご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

米粉パンの嗜好調査にご協力いただきました埼玉県学校給食会の皆様、東京農業大学第一高等学校中等部の生徒の皆様はじめご父兄・教員の皆様々に厚く御礼申し上げます。

最後に浅学菲才な私に食品探求への礎を築いて下さいました故渡辺篤二博士、共立女子大学高橋節子名誉教授、つくばサイエンスアカデミー貝沼圭二博士、愛国学園短期大学齋尾恭子特任教授、同学平尾和子学長のご指導とご厚情に深く感謝申し上げます。

2023年8月10日