

称号及び氏名	博士（農学）金 智 賢
学位授与の日付	平成 17 年 9 月 30 日
論 文 名	「Study on Utilization of Hard-Type Polished-Graded Wheat Flours in Breadmaking」（硬質分級小麦粉の製パンへの利用に関する研究）
論文審査委員	主査 森田 尚文 副査 中野 長久 副査 八木 孝司

論文要旨

緒論

現在使用されている小麦の製粉方法は、消費者の嗜好を主に満足させるために発展したものであり、小麦の胚乳だけを使用するため、莫大な時間とコストが浪費され、さらに元来小麦の胚芽と外皮に存在している豊富な栄養成分が損失されてしまう。一方、酒米用搗精機により調製される分級小麦粉は、小麦の外皮と胚芽を除去せず、穀粒の表層部から中心部まで段階的に削り取る搗精方法で得られたものである。その調製方法は簡易で、低コストで製粉されるだけでなく、市販の小麦粉に比べてビタミン、ミネラル、食物繊維、脂質などを多量に含有していることが明らかにされている。また、この分級粉は高い酵素活性を示し、かつ多量の損傷澱粉を含むため、優れた醗酵特性を示し各種加工食品の機能性を高める新しい食品素材として期待されている。しかし、小麦粉加工食品の代表とされるパンへの利用については、外皮や胚芽成分が生地の物性を低下させ、更にこれらの成分由来とされる好ましくない香り成分などがパンの品質を低下させると考えられ、分級粉単独でのパンへの実用化には障害となっている。

本論文では、豊富な栄養成分や優れた醗酵特性を持つ分級粉を製パンに利用するため、分級粉と酵素の併用及び各種製パン方法が生地の物性や製パン性に及ぼす影響について検討した。また、分級粉の優れた醗酵特性を生かし、天然のパン改良剤として利用することを目的とし、サワードウの特性及びその製パン性に及ぼす影響を検討した。更に、分級粉パンの香り成分の改善を目的とし、分級粉やその焼成パン中の香り成分を調べ、その特徴について通常に製粉された小麦粉との比較検討を行なった。

第 1 章 分級小麦粉の調製

分級小麦粉はカナダ産硬質小麦 1CW を用い、ドラフト分級製粉精粒法により穀粒の外層部から中心部まで 10% ずつ段階的に搗精し、8 画分の分級粉を調製した。本論文では最

外層部の C-1 (100-90%)、内層部の C-5 (60-50%)、中心部の C-8 (30-0%)を試料として使用した。なお、コントロールには 1CW を通常に製粉した CW を使用した。

第 2 章 分級粉代替粉への α -アミラーゼの効果

市販小麦粉 (CW) への分級粉の代替 (10%) では、分級粉の高い酵素活性や多量の損傷澱粉により醗酵中における多量の CO₂ ガスの発生やビスコグラフによる最高粘度とセットバックの減少傾向が認められた。しかし、分級粉に存在する小麦の外皮成分による生地安定性の減少やグルテン構造の破壊は、分級粉代替パンの比容積を減少させ、さらに保存中パンクラムの硬さを増加させた。そこで、 α -アミラーゼ (500 U/100g flour、*Aspergillus oryzae* 由来) を添加した分級代替粉の製パン性の改良を検討した。 α -アミラーゼの添加は、いずれの試料でも時間経過に伴う生地の熟成度を高め、更に生地物性を大きく変化させた。混捏直後の生地の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真では、 α -アミラーゼを添加した場合に多量の小澱粉粒を包み込む良好なグルテン構造が見られた。また、醗酵中の CO₂ ガス発生量は α -アミラーゼの添加により顕著に増加し、特にグルテン構造内に存在するガスの増加が顕著であった。この α -アミラーゼの添加効果は、CW への分級粉の代替により最も明確となった。このことは分級粉の添加により増加した酵素活性や損傷澱粉が α -アミラーゼの活性を高めた結果と考えられる。一方、 α -アミラーゼの添加によるパンの品質は、CW 単独に比べ分級粉の代替によりパンの比容積やクラムの保存性を増加させた。

以上の結果より、分級粉代替粉への α -アミラーゼの添加は、多量の CO₂ ガスの発生及び良好なグルテン構造を形成もたらし、パンの比容積やクラムの状態を改善することがわかった。

第 3 章 分級小麦粉の各種製パン方法への検討

C-5 は、CW に比べ高い生地安定性と低い生地弱化度を示し、その結果生地の総合評価を示すバリロメーター値が全ての試料の中で最高であった。更に時間経過に伴う生地の熟成度も C-5 と C-8 で CW より明らかに増加したことから、分級粉の醗酵改善効果を利用した製パンへの応用が期待された。そこで、4 種類の異なる醗酵工程を含む製パン方法を用い (OSM; optimized-straight method, LFM; long-fermentation method, SDM; sponge-dough method, NTM; no-time method)、分級粉の醗酵前後の生地物性及び焼成後の製パン性を検討した。製パン方法の違いにより混捏直後の生地物性は CW と分級粉で顕著な差が見られ、さらにその傾向は 1 次醗酵直後で明確となった。醗酵前後の生地を SEM で観察した結果、いずれの試料でも長時間醗酵を含む SDM と LFM は他の製パン方法に比べ良好なグルテン構造を示し、その傾向は CW より分級粉で顕著であった。特に SDM で調製された C-5 生地では粘性増加が認められた。この粘性増加は C-5 に多量に存在している水溶性ペントサンに由来し、1 次醗酵中の生地物性やグルテン形成の改善に関与したと考えられる。一方、CW による焼成後のパンの比容積は各種製パン方法では顕著な差を示さなかったが、すべての分級粉パンよりも高い値を示した。長時間醗酵の SDM ではすべての分級粉の比容積を増加させ、特に C-5 と C-8 では他の製パン法に比べ有意に増加した。また、C-5 と C-8 の保存中のパンクラムの硬さは SDM で明らかに軟らかくなり老化抑制効果が認められた。

以上の結果より、分級粉は長時間醗酵により生地の物性が改善され、その結果パンの比容積やクラムの保存性も良好となることがわかった。

第 4 章 分級小麦粉のサワードウ及び製パン特性への検討

サワードウとは培養酵母種の代わりに、野生酵母と微生物が共存する種生地を添加して、生地を発酵させる方法である。本章では、代表的な乳酸菌（ヘテロ醗酵型；*Lactobacillus brevis* とホモ醗酵型；*L. plantarum*）と酵母（*Saccharomyces cerevisiae*）を用いて分級粉（C-1、C-5、C-8）サワーブレッドを調製した。

第1節 分級粉サワードウの特性

分級粉に乳酸菌（ 10^9 CFU/1ml）と酵母（ 10^7 CFU/1ml）をそれぞれ 2%ずつ添加してサワードウを調製し、醗酵時間（0, 12, 24, 36, 48）に伴うサワードウの醗酵特性を検討した。サワードウの pH は乳酸菌の種類に関わらず、いずれの試料でも醗酵時間の増加に伴い減少し、醗酵 48 時間後の最終 pH は 3.7 から 4.0 となった。CW では、醗酵 12 時間後に pH4.0 以下まで急激に減少し、その後は緩やかな減少傾向を示したが、最外層部の C-1 の場合は、他の試料と異なり 36 時間後までゆるやかに減少した。分級粉の総滴定酸度は、すべての醗酵時間で CW よりかなり高い値を示した。特に最外層部の C-1 はすべての試料の中でもっとも高い酸度を示し、他の分級粉よりも 2 倍、CW よりは約 4 倍高い値を示した。一方、初期の乳酸菌の数はいずれの試料でも 10^7 - $10^{7.5}$ の値であり、醗酵時間の経過に従い、 10^9 - $10^{9.5}$ まで増加した後、減少する傾向が認められた。分級粉では乳酸菌の種類によって結果に差が見られ、醗酵 24 時間後までは急激に増加し、CW より高い値を示した。サワードウの酵母の数は、CW では $10^{3.8}$ の初期値を、分級粉では $10^{4.6}$ - $10^{5.2}$ の初期値を示し、醗酵前から大きな差が見られた。また、分級粉は醗酵時間の経過に伴い CW よりも 100 から 500 倍高い菌数を示した。一方、サワードウのガス発生量については、乳酸菌の種類に関わらず、CW、C-1、C-5、C-8 の順で多量の CO₂ ガスを発生した。醗酵生地中の、スクロースは C-1 以外のすべての試料で検出されず、フルクトースとグルコース、マルトースは醗酵時間の経過に伴い減少した。また、遊離アミノ酸は CW に比べ分級粉では醗酵時間の経過に伴い急激に増加し、醗酵 48 時間の分級粉サワードウの遊離アミノ酸量は CW より 1.4 から 5.2 倍高い値を示した。

第2節 分級粉サワードウの添加による生地の物性及び製パン性の検討

24 時間醗酵させた各種分級粉サワードウを、それぞれ 10、20、30% 添加した生地の最適生地形成時間は、いずれの試料でもサワードウの添加により短くなり、且つ最適生地形成時間後のファノグラムも狭くなった。サワードウの添加量の増加に伴いその傾向は顕著となり、特に C-5 と C-8 のサワードウを 30% 添加した場合は、サワードウ無添加のものとは比べて最も大きな変化が見られた。エキステンソグラフによる生地の伸長抵抗と伸長度の比率（R/E）は、いずれの試料でもサワードウの添加量に伴い増加した。更に、分級粉サワードウの添加は CW サワードウの添加に比べ、添加量に関わらず最も高い R/E 値を示すことが認められた。この傾向は *L. plantarum* を用いた場合に最も顕著であった。分級粉サワードウを添加した生地の粘弾性（応力、弾性率、粘性係数）は、乳酸菌の種類に関わらず、サワードウの添加量の増加と共に減少した。しかし、CW サワードウを添加した場合は乳酸菌の種類により異なる結果を示し、*L. plantarum* を用いた CW サワードウではサワードウの添加量の増加に伴い生地の粘弾性が逆に増加した。また、焼成後のパンの品質については、*L. brevis* を用いて調製した C-5 と C-8 のサワードウではその添加量に関わらず、CW サワードウよりもパンの比容積を 21-26% 増加させ、且つパンクラムを軟らかくし、保存性の改善が認められた。

以上の結果より、分級粉はサワードウとして適当な pH を持ち、活発な酵素分解により低分子糖類を豊富に利用することで、通常粉である CW のサワードウに比べ醗酵中に乳酸菌と酵母の生育を促進し、多量の有機酸や遊離アミノ酸を生成することが認められた。更に、このような分級粉サワードウの高い醗酵特性は、小麦粉生地の物性や製パン性を改善した。特に、分級粉のサワードウ

ウではホモ型 *L. plantarum* よりもヘテロ醗酵型の *L. brevis* と酵母の併用が製パン性の改善にはより効果的であり、分級粉は通常粉よりもサワードウブレッドへの利用に最適であることがわかった。

第5章 分級小麦粉とその焼成パンの香気成分

分級粉及びその焼成パン中の香気成分を Headspace sorptive extraction (HSSE)分析法により調べ、CW と比較検討を行なった。分級粉ではアルコール 8 種、アルデヒド 6 種、ケトン・エステル 13 種、メトキシベンゼン 3 種、塩基 5 種、炭化水素 7 種、その他 6 種で総 48 種の香気成分が同定された。CW のみでは、37 種の香気成分が同定され、すべてが小麦粉の香りとして一般的なものであった。C-1 では、メトキシベンゼン類 (約 68%) と炭化水素類 (約 21%) が主成分であり、1,4-dimethoxybenzene、1,2,4-trimethoxybenzene、1,2-dimethoxybenzene、1,4-dichlorobenzene が主に (約 70%) 検出されたことから、これらが C-1 の特有な香気成分であることが考えられる。C-5 と C-8 では CW と類似した香気成分が検出されたが、CW では検出されなかったエステル種と dimethyl sulfoxide が含まれていることが特徴であった。更に C-5 と C-8 では微生物の代謝産物として知られているアルコール、不飽和脂肪酸の酸化物質であるアルデヒドとケトンが CW より多量に検出された。

分級粉代替パン (30%) の香気成分は、OSM 又はサワードウ (SD) 製パン法を用いて焼成したパンのクラストとクラムを分析し、総 90 種を同定した。焼成パンでは粉体試料に比べアルコール種がいずれの試料でも主に検出され (約 71-85%)、特にエタノールは全香気成分の 52-60% であった。試料の種類や製パン方法に関わらず、クラストではアルデヒド種、フラン種、ピラジン種、ピロール種が、クラムではアルコール種が多く含まれていることが認められた。更に SD の場合は OSM よりクラストとクラムでフラン種、ピラジン種、ピロール種、アシッド種が高い比率で検出された。特に、C-1 の主な香気成分であったメトキシベンゼン種が、OSM に比べ SD で低い比率で検出された。

以上の結果より、製パン方法はパンの香気成分に大きな影響を与え、特に SD 製パン方法は OSM よりも分級粉の香気成分を改善することがわかった。

総括

本論文では、 α -アミラーゼ及び各種製パン方法が分級粉の製パン性に及ぼす影響を明らかにした。更に、分級粉の代替によるサワードウの物理化学的諸性質を明らかにすると共に製パン特性を検討し、分級粉サワードウの優れた諸性質と分級粉に起因する香気成分の特徴を明らかにした。以上の結果は、豊富な栄養成分と優れた醗酵特性を示す分級粉が、製パンへ積極的に利用される可能性を示唆するものとする。

審査結果の要旨

酒米用搗精機により調製される分級小麦粉は、小麦の外皮と胚芽を除去せず、穀粒の表層部から中心部まで段階的に削り取る搗精方法で得られたもので、豊富な栄養成分や優れた醗酵特性を持つ。この分級粉を製パンに利用するためには分級粉と酵素の併用及び各種

製パン方法が生地の物性や製パン性に及ぼす影響について検討することが必要である。更に、分級粉の優れた醗酵特性を生かし、天然のパン改良剤として利用する目的のためには、分級粉をサワードウに適用させ、分級粉サワードウの特性及びその製パン性に及ぼす影響を検討しなければならない。また分級粉パンの実際応用のために、分級粉やその焼成パン中の香気成分を明らかにし、その特徴について通常に製粉された小麦粉と比較検討を行なった。以下にその成果の概要を要約する。

小麦穀粒はカナダ産硬質小麦 1CW を用い、ドラフト分級製粉精粒法により穀粒の外層部から中心部まで10%ずつ段階的に搗精し、最外層部のC-1 (100-90%)、内層部のC-5 (60-50%)、中心部のC-8 (30-0%)を試料として使用した。コントロールは1CWを通常に製粉したCWを使用した。

まず α -アミラーゼの分級代替粉への添加効果を検討した結果、時間経過に伴う生地の熟成度を高めること、生地物性を大きく改善させること、醗酵中のCO₂ガス発生量を顕著に増加させること、良好なグルテン構造を形成しパンの比容積やクラムの状態を改善することを明らかにした。

ついで分級小麦粉を各種製パン方法に検討した。C-5は、試料の中で最も高い生地安定性と低い生地弱化度を示し、生地の総合評価を示すバリリメーター値が全ての試料の中で最高であり、時間経過に伴う生地の熟成度もC-5とC-8でCWより明らかに増加したことから、分級粉の醗酵改善効果を利用した製パンへの応用が期待された。4種類の製パン方法を用い(OSM; optimized- straight method, LFM; long-fermentation method, SDM; sponge-dough method, NTM; no-time method)、分級粉の醗酵前後の生地物性及び焼成後の製パン性を検討した。いずれの試料でも長時間醗酵を含むSDMとLFMは他の製パン方法に比べ良好なグルテン構造を示し、その傾向はCWより分級粉で顕著であった。特にSDMで調製されたC-5生地では粘性増加が認められたが、これは多量に存在している水溶性ペントサンに由来し、1次醗酵中の生地物性やグルテン形成の改善に関与し、その結果パンの比容積やクラムの保存性も良好となることがわかった。

分級小麦粉のサワードウ及び製パン特性への検討にはヘテロ型及びホモ型乳酸菌を用いておこなった。分級粉はサワードウとして適当なpHを持ち、活発な酵素分解により低分子糖類を豊富に利用することで、通常粉CWのサワードウに比べ醗酵中に乳酸菌と酵母の生育を促進し、多量の有機酸や遊離アミノ酸を生成することが認められた。更に、このような分級粉サワードウの高い醗酵特性は、小麦粉生地の物性や製パン性を改善した。特に、分級粉のサワードウではホモ型*L. plantarum*よりもヘテロ醗酵型の*L. brevis*と酵母の併用が製パン性の改善にはより効果的であり、分級粉は通常粉よりもサワードウブレッドへの利用に最適であることを明らかにした。

分級小麦粉とその焼成パン中の香気成分をHeadspace sorptive extraction (HSSE)分析法により調べ、CWと比較検討を行なった。分級粉ではアルコール、アルデヒド、ケトン・エステル、メトキシベンゼン、塩基、炭化水素、その他の総48種の香気成分を同定した。

CWのみでは、37種の香気成分が同定され、すべてが小麦粉の香りとして一般的なものであった。C-1では、メトキシベンゼン類（約68%）と炭化水素類（約21%）が主成分であり、1,4-dimethoxybenzene、1,2,4-trimethoxybenzene、1,2-dimethoxybenzene、1,4-dichlorobenzeneが主に（約70%）検出されたことから、これらがC-1の特有な香気成分であることを明らかにした。C-5とC-8ではCWと類似した香気成分が検出されたが、エステル種とdimethyl sulfoxideが含まれていることが特徴であった。更にC-5とC-8では微生物の代謝産物として知られているアルコール、不飽和脂肪酸の酸化物質であるアルデヒドとケトンがCWより多量に検出された。

分級粉代替（30%）パンの香気成分については、OSM又はサワードウ（SD）製パン法を用いて焼成したパンのクラストとクラムを分析し、総90種を同定した。焼成パンでは粉体試料に比べアルコール種がいずれの試料でも主に検出され（約71-85%）、特にエタノールは全香気成分の52-60%であった。試料の種類や製パン方法に関わらず、クラストではアルデヒド種、フラン種、ピラジン種、ピロール種が、クラムではアルコール種が多く含まれていることが認められた。更にSDの場合はOSMよりクラストとクラムでフラン種、ピラジン種、ピロール種、アシッド種が高い比率で検出された。特に、C-1の主な香気成分であったメトキシベンゼン種が、OSMに比べSDで低い比率で検出されることより、製パン方法はパンの香気成分に大きな影響を与え、特にSD製パン方法はOSMよりも分級粉の香気成分を改善することを明らかにした。

以上のように本論文では、 α -アミラーゼ及び各種製パン方法が分級粉の製パン性に及ぼす影響を明らかにした。更に、分級粉の代替によるサワードウの物理化学的諸性質を明らかにすると共にその製パン特性、香気成分の特徴を明らかにしたことは、優れた醗酵特性を示す分級粉の製パンへの利用を示唆するものである。これらの成果は、食品化学、食品製造学、食品物理学、分析化学の分野に大きく貢献するものであり、本論文の審査並びに、最終試験の結果と併せて、博士（農学）の学位を授与することを適当と認める。