

| | |
|--------------|--|
| 氏 名 | 新 井 千 秋 |
| 学位 (専攻分野の名称) | 博 士 (農学) |
| 学位記番号 | 乙 第 958 号 |
| 学位授与の日付 | 令和 4 年 7 月 20 日 |
| 学位論文題目 | 酸可溶性小麦タンパク質によるパン品質安定化に関する研究 |
| 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 名誉教授・農 学 博 士 高 野 克 己 |

論文内容の要旨

我が国では年間 126 万トンの小麦粉を使用したパンが生産され、その 85%は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) で製造されている。小麦粉は加水と混捏によって粘弾性に富む生地を生じ、これは小麦粉中の主要タンパク質である粘性に關与するグリアジンと弾性に關与するグルテニンが会合して、凝集物のグルテンが形成されるためである。生地の性状は、製パン工程中の作業性やパンの品質に大きく關与する。機械化製パンでは生地の調製および発酵はバッチ式で行われ、その後の熟成 (以下、フロアタイム) 以降の工程 (分割・丸め・中間発酵・成形・最終発酵・焼成) は連続的に行われている。このため、生地の分割開始時と最終時までには 20 分程度の時間差が生じる。この間に生地は凝集が進み、生地の物性が硬く伸展性が低下するため、分割工程の開始時と後半では成形した生地の形状が不均一となる。このため成形時の圧力を高くするなどの対応を行っているが、成形生地の表面および内相が損傷を受け、焼成品の形状への影響や内相の粗雑化など品質が低下し、均一な製品の提供を求められる機械化製パンにとって大きな問題となっている。

また近年、冷凍生地を使用した製パンが普及している。冷凍耐性酵母の普及した今日では、冷凍によるグルテンの損傷に伴うガス保持力の低下が課題となっている。現在この対策として、生地改良剤であるアスコルビン酸の添加量を増加させる他、タンパク質含量の高い小麦粉の使用、あるいはグルテンを添加するといった対応を取るが、これらの改善効果は不十分で、硬く伸展性が低い生地となり気泡数が少なく気泡構造が不均一な内相になるなど最終製品の品質に新たな問題を招いている。

これらの大規模工場での機械化製パン並びに冷凍パン生地の問題は、いずれも生地、グルテンの強い弾性力によって惹起される。そこで本研究ではグルテン構成タンパク質の内、粘性に富むグリアジンの機能に着目し、同タンパク質の利用によって生地の伸展性が改善するとの推論のもと、これら課題の解決について検討を進めた。その結果、グルテンから酸性水

溶液にて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）の添加による生地品質改善機序を明らかにすると共に、ASP の添加により機械化製パン並びに冷凍パン生地での製パン工程中の変化に対応する生地調製が可能となり、従来困難であったこれらの製パン工程の安定化および品質の均一性を向上させることが出来た。また、ASP が米粉混合パンの製造およびその品質を大きく改善することを見出した。

以下、本研究の概要を述べる。

I. 機械化製パンにおける製品の品質安定化に及ぼす ASP 添加の影響

1. パンの外観と内相に及ぼすフロアタイムの影響と ASP 添加の効果

中種法により調製した同一バッチの生地に対して標準フロアタイムを 20 分に、分割最終時を想定したフロアタイムを 40 分と設定し、生地を分割することとした。その他の条件を一定にしてコッペ型のロールパン（以下ロールパン）を焼成して、フロアタイムに対する ASP 添加の影響を検討した。無添加（対照区）では、フロアタイム 40 分後の生地は同 20 分と比較してロールパンの長さは有意に短く横幅は有意に広がり、分割時間差が明らかに製品形状に影響した。一方、ASP 0.5%（対小麦粉、以下省略）および 0.75%添加区は、フロアタイムによるパンの長さや横幅に有意な差はなく形状の均一性が向上した。パン内相は目視で内相が粗いと認識される 1mm^2 以上の気泡数が対照区でフロアタイム 20 分に対し 40 分で大きく増加したが、ASP 0.5%および 0.75%添加区の内相の状態はフロアタイムの差異による影響はあまりみられなかった。これらの結果より、ASP の添加によって機械化製パンにおいても形状および内相などが良好で均質なパンを調製することができた。この要因は、ASP 添加によってフロアタイム中におけるパン生地の収縮が抑制されたものと推察した。

2. 成形時の生地物性におけるフロアタイムの影響と ASP の効果

生地成形時における圧延ローラに加えられた応力を測定した結果、対照区の花アタイム 40 分は、20 分と比較して最大応力が約 1.5 倍に増加した。ASP 添加では花アタイム 20 分、40 分共に最大応力は対照区より有意に低くなり、ASP 0.75%添加区の花アタイム 40 分の最大応力は、対照区の花アタイム 20 分の値に近づき、成形工程における適切な生地物性に改善された。

また、圧延した生地はカーリング後、転がしながら圧力をかける展圧操作によってロール型に成形（以下、成形生地）されるが、硬い物性を示す生地は展圧操作後に生地の収縮が大きく、その影響は焼成品の外観の違いとして現れる。画像解析により成形直後の成形生地の長さを測定した。対照区の花アタイム 20 分に対し、各試験区の花アタイム 40 分を比較した結果、ASP 0.75%添加区は有意差がなく、生地の収縮が抑制されていた。さらに、標準偏差が小さく、個体差が少なくなる傾向が認められた。これらは、グルテンの粘弾性に対する ASP の効果であり、グリアジンの作用であると考えられた。

3. 生地組織構造への ASP 添加の影響

圧延生地の内部の微細構造を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果、対照区は、フロアタイムに関係なく、グルテンネットワークに圧延操作による方向性は観察されなかった。ASP 0.75%添加区では、フロアタイムに関係なく圧延方向に伸びたグルテンネットワークおよびこの方向に沿って配向したデンプン粒が観察され、グルテンネットワークの伸展性が高いことが推察された。結果として、ASP は展圧操作に対して生地を伸ばしやすくし、さらには伸ばされた成形生地の収縮を弱めることに寄与した。

4. ASP の表面疎水性度が生地物性に及ぼす影響

グルテンは疎水性が高く、分子間での疎水性相互作用が生地形成および性状に大きく関与する。先述の試験において、ASP を添加すると生地の伸展性が向上した。このような変化は、ASP を添加したことによる疎水性相互作用への影響であることが推察された。そこで、ASP のタンパク質表面疎水性度 (F.I. /mg protein) を測定し、ASP の構成成分であるグリアジン (アルコール可溶性画分) およびグルテニン (アルコール不溶性画分) と比較した。ASP の表面疎水性度は 155 ± 2.0 (\pm SD) と、グリアジンの 139 ± 3.6 に近い値を示し、グルテニンの 200 ± 1.0 に比べて著しく低かった。以上のことから、ASP 添加による生地の伸展性を向上および過度な生地の凝集抑制は、ASP によってグルテンにおける疎水性相互作用が低下したことによって惹起するものと推察した。

II. 冷凍生地製パンの品質に及ぼす ASP 添加の影響

1. 成形冷凍生地から調製したロールパンの外観と内相に対する ASP の効果

冷凍生地製パンでは通常の製パンとは異なり、生地混捏直後の発酵を取らず成形し、急速冷凍した成形冷凍生地を調製後、冷凍貯蔵・流通し、解凍、発酵、焼成される。I 章と同様、分割工程の時間差を想定し、フロアタイム 20 分を設定した。また、冷凍生地の評価は、冷凍後 5 および 27 日の生地にて実施した。焼成したパンの比容積は、対照区および ASP 0.5% 添加区ともに冷凍 27 日間は同 5 日間より有意に低下したが、パンの内相の気泡は冷凍 5 および 27 日間共に対照区に比べて ASP 添加区は 1mm^2 以上の気泡数が少なかった。ASP を添加した成形冷凍生地は、生地の伸展性が向上することで気泡構造が細かく均一になったものと推察した。

2. 成形冷凍生地の成形工程および最終発酵後の生地構造に及ぼす ASP の影響

成形直後の生地表面の微細構造観察 (SEM) では、デンプン粒が均一に分布していたが対照区では亀裂が観察された。ASP 0.5% 添加区には対照区のような大きさの亀裂はみられず、成形中に生地に過度の負荷がかからなかったためと推察した。

冷凍保存 7 日間の成形冷凍生地の最終発酵生地の SEM 画像では、対照区で生地表面、すなわち焼成後に表皮になる部分に亀裂が観察された。これは生地の伸展性が小さいことで成

形時の圧延力や氷結晶により損傷したためと考えられた。ASP 0.5%添加区では大きな亀裂は観察されず、ASP の添加により冷凍後も生地 of 伸展性が維持されたことが示唆された。

3. 成形冷凍生地の長期冷凍保存によるパン品質への影響と ASP の効果

冷凍 60 日間の成形冷凍生地のパンの比容積は、対照区、ASP 添加区共に同 27 日間と比較して減少しなかった。しかし、冷凍 60 日間の成形冷凍生地のパンは両試験区とも同 27 日間と比較して内相の気泡構造が粗く不均一であった。さらに、対照区はいくつかの気泡が表皮層まで達し、表皮に大きな火膨れが観察された。冷凍保存によるグルテンマトリックスの損傷により生地 of ガス保持力が低下したことが原因と考えられた。これに対して、ASP 0.5%添加区は表皮層に達する大きな気泡は無く、火膨れは観察されなかった。ASP の添加で冷凍保存時の同マトリックスの損傷が抑制されることが示唆された。

4. 生地 of 冷凍変性に対する ASP の抑制効果 of 解析

ASP の添加は、冷凍保存によるパン of 気泡構造 of 変化を抑制した。その機作を検証するため、油脂や脱脂粉乳を除いた単純低糖生地を調製し、未冷凍および冷凍保存後の生地を成形して、発酵後の生地 of 引張り物性を測定した。冷凍保存時には冷凍解凍反復処理（ -20°C で 1 週間保存する間、 10°C で 1 時間解凍 4 回）を施し、加速度試験とした。

生地 of 引張り物性は、エクステンシグラフにて測定し $\text{Energy (cm}^3\text{)} = \text{「生地 of 力」}$ 、 $\text{Resistance (BU)} = \text{「伸長抵抗」}$ 、 $\text{Extensibility (mm)} = \text{「伸長度」}$ の各測定値を求めた。無添加生地では、冷凍により伸長抵抗が大きく低下し生地 of 力も大きく減少した。これに対し、アスコルビン酸を添加すると、未冷凍、冷凍ともに伸張抵抗が大きく増加し生地 of 力も増加したが、伸長度 of 低下が大きく、硬く伸び of 低い生地となった。一方、グルテンおよび ASP 添加で伸長抵抗は増加したもののアスコルビン酸添加に比べ小さく、無添加とほぼ同等 of 伸長度を維持していた。また、生地 of 力には冷凍後のグルテンおよび ASP 添加の間に差異がみられ、ASP を添加することで無添加 of 未冷凍生地に最も近い値となった。従来、冷凍によって生じる生地 of 弱化を抑制するためにアスコルビン酸が添加されているが、添加による生地 of 伸長度 of 低下が成形時における圧延でのグルテン of 断裂を招き、パン内相 of 粗雑化を引き起こすことを本研究で明らかにした。また、グルテン添加では伸長度 of 改善は十分でなく、ASP 添加によって伸長抵抗を保ちつつ、伸長度を向上させることでグルテンマトリックス of 損傷を抑制することができた。

5. グルテンおよび ASP の水分挙動と微細構造 of 比較

冷凍による生地物性 of 変化は、生地からの離水によって増長されると考えられている。生地からの離水は、グルテン of 疎水性相互作用を高め伸展性を低下させる。そこで、グルテンおよび ASP と水分との相互作用について検討するため、水を加え水 and させた両試料 of 水分活性値を測定した。グルテンでは $0.978 \pm 0.001 (\pm\text{SD})$ を示したのに対し、ASP では 0.960 ± 0.003 と水分活性値は有意に低くなり、ASP はグルテンに比べ結合水が多く、保水力が高

いことが明らかになった。また、これらの水和物を凍結乾燥し SEM にて観察した結果、グルテンに比べて ASP のネットワーク構造は非常に緻密であった。ASP はこの構造と高い保水力によって、冷凍によるグルテンからの離水を抑制することで、その伸展性の低下を阻害したと考えられた。これにより成形冷凍生地中のグルテンマトリックスの損傷が抑制され、均一なグルテンシートが生地中のガス保持力を維持することで内相の均一性に寄与したものと推察した。また、冷凍生地中の大きな気泡は、小さい気泡に比べて冷凍保存中に気泡内に氷結晶が生成しやすいことが報告されている。ASP を添加した成形冷凍生地では気泡構造が細かく均一であることから、氷結晶の生成が抑制され、グルテンマトリックスの損傷が少なくなった可能性が考えられた。

Ⅲ. 米粉混合パンへの ASP 利用による品質安定化の検討

近年、米粉に注目が集まりパンへの利用が伸びている。しかし、小麦粉の一部を米粉に代替すると生地物性が弱体化して製パン性が低下する。このため、小麦より分離されたグルテンの添加が行われているが、これにより生地の弾性が強くなりすぎてしまい、パンの品質低下を招く。ⅠおよびⅡの結果から、ASP の添加はこれらに対する改良効果が期待された。そこで小麦粉の 40% を米粉に置き換え、小麦タンパク質（グルテンおよび ASP）の添加を 10% に設定し、グルテンの一部を ASP に置換して、中種法によって製パン試験を行なった。グルテンのみの添加に比べて、ASP 30% 置換により、生地の圧延応力が有意に低下した。その結果、グルテンマトリックスの損傷を抑制し、焼成後の内相は気泡構造の不均一性（空洞化）が改善された。

総 括

機械化製パンにおいて、単に生地物性を硬くすることは製品の品質の安定化に寄与するものではなく、適度な伸展性を持つ生地の調製が重要である。また、分割工程で生じるフロアタイムの時間差による生地物性の変化を最小限に抑えることも重要である。本研究にて酸可溶性小麦タンパク質（ASP）を用い、これら問題に対し検討を行ったところ、ASP はグルテン構成タンパク質であるグルテニンに比べ、タンパク質表面疎水性度が低く、ASP を添加することでグルテンの疎水性相互作用が弱まり、生地に伸展性を付与することが明らかとなった。また、生地に伸展性が付与されることで、生地圧延後の収縮が抑えられ、製品形状の安定化が図られるとともに、生地圧延時および発酵時におけるグルテンマトリックスの破断を抑制し、ガス保持力が維持されることでパン内相の粗雑化を抑制した。

冷凍生地においては、グルテンの伸長抵抗が冷凍変性により低下することでガス保持力の弱いパンとなる。これらの現象は、冷凍によるグルテンからの離水が生地の伸展性を低下させ、グルテンマトリックスを弱体化させると考えられるが、保水力が高い ASP の働きによっ

てグルテンからの離水が抑制され、グルテンマトリックスの損傷を防ぎ生地的气体保持力を維持することで、焼成後のパン内相の気泡構造を均一化し、良好な表皮の状態となることが明らかとなった。

さらに、本研究結果から近年注目されている米粉混合パンへの応用を試みた。米粉混合パンはグルテン含量が少ないことから、グルテンを添加しその生地物性を強化する。しかし、グルテン添加のみではグルテンの強すぎる弾性によって内相の粗雑化など、弊害が生じる。グルテンの一部を ASP に置換することにより、伸展性が付与され、グルテンマトリックスの破断などが防止されることで、緻密な内相をもつ米粉混合パンの製造が可能となった。

以上、大規模工場の大量生産や普及が拡大している冷凍生地の課題に対して、酸可溶性小麦タンパク質 (ASP) は、機械化製パンの製造工程の安定化とパン品質の均一性向上に寄与することが明らかとなった。

審査報告概要

本研究では、小麦タンパク質であるグリアジンを中心とする酸可溶性小麦タンパク質 (ASP) を用いた大規模製パン工場での連続大量生産におけるパン生地物性の安定化技術の開発とその機構を明らかにした。大規模製パンでは、生地の混捏・発酵後の分割工程において、分割開始時から終了時までには 20 分ほどの時間差が生じる。この間に生地物性が変化し伸展性が低下することで、焼成後のパンの形状変化やクラムのキメに粗雑化が生じる。これらの要因はグルテンの強い弾性力によるものであるが、ASP を添加することでグルテンの弾性力を低下させ、パン生地物性の安定化技術を開発した。また、この作用は ASP の主体をなすグリアジンがグルテニンに比べ親水性が高く、両タンパク質の凝集力を低下させることに起因することを明らかとした。さらに、グリアジンの親水性はグルテンの保水力を向上させ、冷凍パン生地において冷凍中の離水を抑制することで、生地の伸展性低下および氷結晶の生成を抑え、冷凍パン生地に冷凍耐性が付与できることを明らかにした。これらの研究成果等を詳細に検討した結果、審査委員一同は博士 (農学) の学位を授与する価値があると判断した。