

氏名	高橋 敦子
学位の種類	博士 (学術)
学位記の番号	甲第233号
学位授与年月日	2021 (令和3) 年3月20日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
学位論文題目	パフ食品の力学特性の評価とそれに基づいた雑穀非常食の開発
論文審査委員	主査 藤井恵子 (生活環境学専攻 教授) 副査 川澄俊之 (生活環境学専攻 教授) 新藤一敏 (生活環境学専攻 教授) 高橋智子 (神奈川工科大学 教授)

論文の内容の要旨

雑穀は日本人に不足しがちな食物繊維やミネラルを豊富に含み、その栄養学的価値が見直されてきている。かつては地域特産品として販売されていた雑穀も、最近では一般に見かけるようになり、炊飯用や、サラダのトッピングなど、日常的に取り入れられるようになった。しかし、雑穀は小麦と比べてタンパク質の特性や、澱粉の糊化温度など、食品素材としての加工適性に問題があることや、米と比べて食味が劣るため、それほど消費されていないのが現状である。

一方、東日本大震災後、保存食・非常食の重要性に関心が寄せられるようになり、アルファ化米や缶詰パン、レスキューフーズなどの需要が高まった^{1~3)}。しかし、非常食はエネルギー源の補給にとどまるものが多く、栄養バランスまで考慮されたものは少なく、さらにアレルギー患者向けの非常食が少ないことが課題である。一般にパフ食品 (膨化食品) は水分含量が低いため保存食に適していると考えられ、最近では米やトウモロコシ、麦の他、大豆粉などを膨化した商品も見かけるようになった。そこで、雑穀を膨化させて保存食、非常食として利用することを考えた。

スナック菓子やパフ状の食品は、サクサクとした食感が特徴であり、膨化食品の食感に関する先行研究においては、エクストルーダーを用いてスナック菓子を開発し食品テクスチャー評価を行ったもの⁴⁾、シリアル食品テクスチャーを評価したもの^{5, 6)}があるが、これらの物性評価はいずれも一軸圧縮での評価である^{7, 8)}。また、クラッカー、ポテトチップス、ウェハースなどサクサク、パリパリとした食品を、音響装置を用いて音の大きさにより硬さを評価した研究⁹⁾や、破断の際の荷重-変形曲線における荷重の大きさと破断ピーク数よりテクスチャー特性を評価した研究¹⁰⁾などがある。また、スナック菓子の微細構造と破断の関係を示した研究では、物性のみではサクサクとしたスナックの食品テクスチャーを評価するのは難しい¹¹⁾と報告している。このようにスナック菓子類を一軸圧縮法によ

り食品テクスチャー特性を調べた研究は多々あるが、雑穀の粒を膨化させた、パフの測定条件を詳細に検討した報告はない。そこで、本研究では食物繊維やミネラルを豊富に含む雑穀を膨化させ、保存性の高い非常食として利用することを企図し、パフ食品の物性評価法を検討し、その特徴を明らかにすることを目的とした。

また、食品は輸送・保存中に微生物による腐敗や反応による劣化が起こる。故に食品が劣化しないように保存する試みは、さまざまな方法で行われてきた。食品工学的には温度と含水率を低下させる方法が重要であり、乾燥・脱水操作がある。特に水分活性を低くすると、微生物の繁殖抑制はもとより酵素反応や褐変反応などの媒体にもなりにくくなり、食品の劣化反応の多くを抑制することが可能となる。水分収着等温線を用いた先行研究にはビスケットの水分収着特性を調べた研究¹²⁾や、様々な焼成菓子の水分収着特性とテクスチャー特性を調べた研究^{13~15)}など数々の研究がなされている。また、多くの乾燥食品がガラス状態であることが明らかとなっており、ガラス転移を考慮した乾燥食品の品質制御が検討されてきた^{16, 17)}。ガラス転移が着目される理由は、食品の劣化や保存性に関わる現象や物性の挙動がガラス転移の概念により説明できるためである。成分および物性変化に関する例としては、非酵素的褐変速度がガラス転移温度以上で急激に増大するという報告があり、保存中の粉体の固結もガラス転移温度以上で起こりやすい。

そこで本研究では、水分収着させた雑穀パフの破断挙動、水分収着特性から得られた単分子吸着量およびガラス転移温度より、膨化・乾燥食品の特性である、吸湿の影響による物性の変化を捉え、雑穀パフのレオロジー特性を明らかにすることを目的とした。さらに、非常食としての利用を鑑みこれらの雑穀パフと結着剤を用いて、雑穀パフ食品を開発し、その特性についても明らかにすることを目的とした。

なお、本論文は、以下の5章により構成されている。

第1章 雑穀パフの特性と客観的評価法の検討

第2章 調湿した雑穀パフの水分収着特性とレオロジー特性

第3章 結着剤に利用する液卵の食味特性

第4章 結着成型させた雑穀パフ食品の物性と嗜好性

第5章 雑穀パフ食品の保存性と非常食への応用

第1章 雑穀パフの特性と客観的評価法の検討

食物繊維やミネラルを豊富に含む雑穀は、パフ化（膨化）させることにより物性を制御し、非常食や保存食にも応用することができる。しかしパフの物性評価に関する先行研究は貫入法によるものが多く、全体を圧縮して破断挙動を調べる方法での測定はほとんど見られない。そこで第1章では雑穀パフの特徴を明らかにし、実際にパフを咀嚼する際のモデルとなる客観的評価法を組織構造と併せて検討した。

雑穀パフの試料として、特徴的な栄養機能を持ち、粒径が異なる発芽玄米、大麦、はと麦、アマランサスの4種類の雑穀を選び、240℃に予熱した穀類膨張機を用いて、処理圧力を0.1~1.1MPaとし、一気に減圧し雑穀パフを調製した。各種雑穀パフの破断特性は、試料

1粒を、直径40mmのプランジャーを用い、試料高さの99%圧縮させた。圧縮速度は0.05、0.1、1、10 mm/secの4段階とした。得られた荷重-変形曲線より破断ひずみ、破断荷重、みかけの弾性率を算出した。測定温度は25℃とした。

その結果、雑穀パフを4水準の圧力を変えて膨化させた際、最も膨化したものはと麦パフで、最も膨化しなかったのはアマランサスパフであった。試料および処理圧力によって、みかけの膨化率は0.65~21.1と大きく異なることが明らかとなり、雑穀の脂質量及び外皮と胚乳の割合が膨化率に影響を及ぼすことが示唆された。

パフの断面の組織構造より、発芽玄米、と麦、アマランサスの膨化圧力は0.9MPa、大麦では1.1MPaが適していると考えられた。

4種の雑穀パフの荷重-変形曲線より、圧縮速度が速くなるに従い破断ひずみは大きくなり、みかけの弾性率の値は小さくなった。

雑穀パフに適応しうる客観的評価法を検討したところ、4種の雑穀パフの破断特性に関しては、一粒法で40mmφプランジャーを用いて圧縮速度0.1もしくは1.0mm/secで測定するのが適していると考えられた。

第2章 調湿した雑穀パフの水分収着特性とレオロジー特性

膨化・乾燥食品である雑穀パフの水分収着特性およびレオロジー特性を明らかにすることを目的とし、第1章で調製した雑穀パフを温度、湿度を変化させて保存し、雑穀パフのガラス転移温度を実測し、吸湿に伴う物性の変化についてガラス転移の観点から検討を加えた。

発芽玄米、大麦、と麦、アマランサスの4種類の雑穀パフを、相対湿度6~94%の8段階に調湿し、試料の水分収着量がほぼ平衡状態になるまで5~12日間保存した。調湿温度は15、25、35℃の3段階とした。水分収着させた雑穀パフの破断挙動を求め、また水分収着特性から得られた単分子吸着量およびガラス転移温度を測定した。さらに、走査型電子顕微鏡を用いて雑穀パフの内部構造を観察した。

各種雑穀パフを調湿し、試料の平衡含水率を求め、横軸に相対湿度、縦軸に平衡含水率をプロットした結果、雑穀パフの水分収着等温線は一部のものを除いてほとんどが逆S字型となった。各水分収着等温線の相対湿度5~35%の範囲の値をBET式にあてはめて算出したところ、25℃の試料では単分子吸着量の値はアマランサスを0.1MPaで処理した試料が34.2g/100g-dry solidと特に高い数値となったが、それ以外は9.72~17.9g/100g-dry solidの範囲となった。これは、棒寒天や、かんぴょうに近い値であった。全体的に含水率は15℃>25℃>35℃と、温度が高くなるに従って平衡含水率は低くなった。

水分収着させた雑穀パフの破断挙動は、いずれのパフにおいても破断ひずみ、破断荷重、みかけの弾性率とも、相対湿度が上がるにつれて低くなっていく傾向が見られた。

雑穀パフの内部組織構造と圧縮時の破断曲線を見ると、相対湿度6.7%で調湿した際にはセルを構成する細孔壁は薄く、荷重-変形曲線も脆性破断を示したが、相対湿度93.6%調湿時には細孔は小さくなり、細孔壁はかなり厚くなっている様子が観察された。荷重-変形曲線も水分を含んだ試料は圧縮時に圧密になり、応力が高くなる現象が見られた。25℃調

湿時発芽玄米パフの荷重－変形曲線を見ると、膨化前の試料はいずれの相対湿度においてもいくつもの上に凸の破断点が見られ、脆性破断を示した。これに対し0.1MPa処理時は相対湿度93.6%から、0.7MPaおよび0.9MPa膨化時は相対湿度57.6%から、1.1MPa膨化時は相対湿度32.8%から延性破断を示すようになった。これを水分収着等温線で見ると膨化した0.7～1.1MPaの試料においては、いずれも含水率が約8%以上になると延性破断を示すようになることが明らかとなった。

25℃で調湿した各種雑穀パフのガラス転移温度は-16.6℃～80.2℃の範囲となり、平衡含水率が高くなるほどガラス転移温度は低下した。先に破断特性において脆性破断から延性破断に変化する境界域が含水率8%^{18, 19)}のところであることが示されたが、この条件は室温15℃～35℃の範囲においてはガラス転移線に近いところであった。

膨化した雑穀パフは水分収着後、含水率が約8%以上になると脆性破断から延性破断を示すことが明らかとなった。この条件は温度40℃付近においてはガラス転移線に近い領域であり、ガラスからラバーに変化することで脆性破断から延性破断を示すようになることが示唆された。以上の結果から保存条件としては含水率を約8%以下に保持することが大切で、保存する温度のみならず湿度の制御が重要であることが明らかとなった。

第3章 結着剤に利用する液卵の食味特性

現在、ビタミンD、E、DHA、 α -リノレン酸、葉酸など、ビタミンや各種栄養素を添加して機能性を付与した栄養強化卵が開発され、市場には1,400種類を超える卵が販売されている。卵は日常的に食する機会が多い食材であるため、栄養成分が強化された機能性卵の社会的意義は大きいと考える。

そこで第3章では、結着剤に利用する液卵について特徴の異なる2種の栄養成分VDおよびDHA強化卵を選び、コントロールの通常卵と比較して、食味特性を官能評価で明らかにしたうえで、物理的特性として動的粘弾性と色度、化学的特性としてアミノ酸分析と味認識装置による味覚特性を評価し、これらの関連性を検討することを目的とした。

いずれの試料においても貯蔵弾性率よりも損失弾性率の方が値は大きくなり、両者ともに周波数が高くなるに従い、増加する傾向を示した。損失正接はいずれの卵黄試料においても1以上であったことから、粘性要素が大きく、また、20～40 rad/sをピークに低下し弾性要素が大きくなる傾向が認められた。貯蔵弾性率、損失弾性率ともに3種の卵黄試料間において有意差は認められなかった。一方で、損失正接についてはDHAを強化した卵は通常卵と比べ有意に値が大きいことが示された。この結果より、VDの強化は卵黄の動的粘弾性に影響を及ぼさないが、DHAの強化は、卵黄の弾性要素に対する粘性要素の比率を高めることが示された。また、動的粘性率の結果は試料間には有意差はなく、VDやDHAの強化は卵黄試料の粘性率に影響を及ぼさないことが示された。

また、味認識装置による液卵の食味特性評価の有効性を検討するため、官能評価結果との比較を行った結果、装置での‘塩味’、‘苦味雑味’は全卵、卵黄、卵白いずれも、3種試料間で有意に差が認められたのに対し、官能評価における「塩味」、「苦味」はすべての試料間において識別不能であった。一方、装置での‘うま味コク’は3種の試料間において有意

差は認められなかったが、官能評価では全卵と卵黄の「コク」を識別できた。以上の結果より、今回の試料（液卵）においては、味質によって、味認識装置の結果と官能評価との結果が必ずしも一致しておらず、食味の識別に関して味認識装置で官能評価を代替するには、限界があることが示された。しかし、「塩味」、「苦味」については、ヒトが識別できない僅かな違いを、味認識装置を使うことにより違いを明確にすることが可能であることが示唆された。評価項目によっては、適切なセンサーを選択することで、液卵の食味特性の評価に味認識装置が有効となる可能性が示された。

第4章 結着成型させた雑穀パフ食品の物性と嗜好性

非常食としての利用を念頭に雑穀パフ食品の開発を試みた。雑穀パフは、第1章で用いた4種の中で予備実験の結果、大麦は焼成後他の雑穀と比べ顕著に硬くなるため、大麦を除いた、発芽玄米、はと麦、アマランサスの3種を重量比2:2:1の割合で混合して用いた。雑穀パフの結着剤には、ハンバーグの結着剤にも使用される液卵を使用し、さらにアレルギー対応食としてプルラン製剤を結着剤として用いたものも調製した。プルランは、水溶性多糖類で、食品分野では増粘剤、安定剤、糊料として広く利用されている。液卵は泡立てて使用し、プルランは水溶液にして用いた。プルラン水溶液は低粘度でpH変化や熱に対して安定しており、接着強度が強いことより、雑穀パフを結着させる材料に適していると考えた。液卵およびプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフを直径20mmのセルで型抜きし、110°Cのオーブンで30~50分間焼成し、25°Cで30分間放冷したものを試料とした。2種類の雑穀パフ食品について、破断特性、含水率、水分活性を測定し、嗜好性を検討するために官能評価を行った。測定温度は25°Cとした。雑穀パフ食品の破断特性の評価では直径40mmのプランジャーを用い、圧縮速度は0.1mm/secとし、試料の高さの80%圧縮させた。得られた応力-ひずみ曲線より破断ひずみ、破断応力、破断エネルギー、みかけの弾性率を算出した。また、雑穀パフ食品のサクサクとした食感を数値化できないかと考え、負の応力微分値の合計を破断回数で除したクリスプネスエネルギーを算出し、官能評価のサクサク感との対応を検討した。さらに、応力-ひずみ曲線より破断に要する総エネルギー量を破断回数で除して、噛み応えを数値化することを試みた。

焼成時間の異なる雑穀パフ食品の破断特性を測定したところ、30分焼成時においてはプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品の方が液卵で結着成型させた雑穀パフ食品よりも顕著に硬かったが、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品は焼成時間が長くなるに従い破断応力が低下したのに対し、液卵で結着成型させた雑穀パフ食品は焼成時間の影響をほとんど受けずほぼ等しい値となった。その結果、50分焼成時においては、両者はほぼ同程度の硬さとなった。応力-ひずみ曲線より、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品に比べ液卵で結着成型させた雑穀パフ食品は、結着が弱いことが推測された。

液卵、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品の含水率は、30分焼成時においていずれも約4%となり、焼成時間とともに低下した。一方、水分活性値は、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品は焼成温度による違いがほとんどないのに対し、液卵で結着成型させた雑穀パフ食品は焼成温度が高くなると低下する傾向を示した。また、官能評価の

結果より、雑穀パフ食品においてはつなぎに用いる液卵の食味については、あまり影響を受けないことが推察された。

第5章 雑穀パフ食品の保存性と非常食への応用

雑穀パフ食品の保存性について検討するために、液卵およびプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品を相対湿度6~94%までの8段階に調湿し、25℃で保存して、破断特性、水分収着特性を調べた。またX線回折測定により老化特性を調べた。

雑穀パフ食品の破断特性については、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品のみかけの弾性率は、経時的に減少していくのに対し、液卵で結着成型させた雑穀パフ食品は焼成直後から2日目にかけて顕著に減少するが、その後は経時的に増大し、7日間保存したものはほぼ等しい値となった。雑穀パフ食品の破断応力、破断エネルギーは、プルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品は、経時的に低下するのに対し、液卵で結着成型させたパフ食品は経時的に増大する傾向を示した。

また、応力-ひずみ曲線より算出される破断に要する総エネルギー量を破断回数で除した値は、焼成当日は液卵で結着成型させた雑穀パフ食品よりもプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品のほうが高値を示したが、2日後には逆の結果となり、液卵で結着成型させた雑穀パフ食品のほうが高値となり、噛みごたえがあると考えられた。

食品の状態を示すガラス転移温度は含水率の低下に伴い、高温になることが示され、焼成当日における水分含量約4%の試料においては、50~60℃のあたりでガラスからラバーに転移することが推察された。

X線回折測定による雑穀パフ食品の老化特性は、いずれの試料においても約1か月後に於いて老化の指標となる $2\theta=17^\circ$ 付近のピークは認められなかったことより、雑穀パフ食品は1か月の保存では老化は進行していないことが確認された。

以上、本研究の結果より、雑穀パフの膨化圧力は、パフの断面の組織構造より、発芽玄米、はと麦、アマランサスは0.9MPa、大麦は1.1MPaが適していると考えられた。

雑穀パフに適応しうる客観的評価法を組織構造と併せて検討したところ、雑穀パフの破断特性に関しては、一粒法で40mmφプランジャーを用いて圧縮速度0.1もしくは1mm/secで測定するのが適していることが明らかとなった。

また雑穀パフの保存性に関しては、吸湿に伴う物性の変化についてガラス転移の観点から検討したところ、保存中に含水率が約8%以上になるとガラスからラバーに転移して脆性破断から延性破断を示すようになった。故に含水率を約8%以下に保持することが大切で、保存する温度のみならず湿度の制御が重要であることが明らかとなった。

非常食としての利用を鑑み、液卵およびプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品を開発することができた。その物性および保存性について検討した結果、結着剤の種類により、破断特性の経時変化に違いが見られることが明らかとなった。食品の状態としては、焼成当日における含水率約4%の試料においては、50~60℃のあたりでガラスからラバーに転移することが推察された。またX線回折測定による老化特性を評価したところ、雑穀

パフ食品は1か月間保存しても老化は進んでいないことが確認できた。

以上、博士論文における科学的知見が、今後雑穀パフを用いた非常食への社会実装に向けて貢献できれば幸甚である。

文献

- 1) 別府茂, 中越地震からの提言 被災地の食事 前編, 食の科学, 326, 52-57 (2005)
- 2) 奥田和子, 阪神大震災の教訓から生まれた新開発 レスキューフーズの評価, 食の科学, 305, 39-47 (2003)
- 3) 門脇基二, 井上誠, 新潟大学地域連携フードサイエンス・センター編, これからの非常食・災害食に求められるもの2, 光琳, 東京, pp.1-17, pp.19-35, pp.75-89 (2008)
- 4) Paraman, I., Wagner, E.M. and Rizvi, S.H.S., Micronutrient and protein-fortified whole grain puffed rice made by supercritical fluid extrusion, *J. Agric. Food Chem.*, 60 (44) , 11188-11194 (2012)
- 5) Heidenreich, S., Jaros, D., Rohm, H. and Ziems, A., Relationship between water activity and crispness of extruded rice crisps, *J. Texture Studies*, 35 (6) , 621-633 (2004)
- 6) Farroni, E.A., Matiacevich, B.S., Guerrero, S., Alzamora, S. and Buera, M.D.P., Multi-level approach for the analysis of water effects in corn flakes, *J. Agric. Food Chem*, 56 (15) , 6447-6453 (2008)
- 7) Moiny, V., Meullenet, J.F. and Xiong, R., Uniaxial compression of cheddar cheese at various loading rates and its correlation to sensory texture profiles, *J. Texture Studies*, 33 (3) , 237-254 (2002)
- 8) Thybo, K.A., Nielsen, M. and Martens, M., Influence of uniaxial compression rate on rheological parameters and sensory prediction of cooked potatoes, *J. Texture Studies*, 31 (1) , 25-40 (2007)
- 9) Vickers, Z. and Bourne, C.M., A psychoacoustical theory of crispness, *J. Food Sci.*, 41 (5) , 1158-1164 (1976)
- 10) Ravi, R., Roopa, S.B. and Bhattacharya, S., Texture evaluation by uniaxial compression of some snack foods, *J. Texture Studies*, 38 (1) , 135-152 (2007)
- 11) Guraya, S.H. and Toledo, T.R., Microstructural characteristics and compression resistance as indices of sensory texture in a crunchy snack product, *J. Texture Studies*, 27 (6) , 687-701 (1996)
- 12) Sampaio, R.M., Marcos, S.K., Moraes, I.C.F. and Perez, H.V., Moisture adsorption behavior of biscuits formulated using wheat , oatmeal and passion fruit flour, *J Food Process Preserv*, 33 (1) , 105-113 (2009)
- 13) 和田淑子, 肥後温子, 市販焼菓子の破断物性におよぼす水分及び温度の影響, 日本食品科学工学会誌, 54 (6) , 253-260 (2007)
- 14) 肥後温子, 和田淑子, 佐藤之紀, 小麦粉焼成菓子の吸湿時の硬化と多重層収着水分との関係, 日本食品科学工学会誌, 59 (11) , 562-571 (2012)
- 15) Nuria, M.N., Gemma, M., Pau, T. and Amparo C., Water sorption and the plasticization effect

- in wafers, *Int. J. Food Sci. Technol.*, 39 (5) , 555-562 (2004)
- 16) 鈴木徹, 食品のガラス状態とその利用, 食品と技術, 12, 1-9 (2006)
- 17) 川井清司, 黒崎香介, 鈴木徹, 製造過程によるガラス状食品の非平衡状態の相違に関する解析手法, 低温生物工学会誌, 54 (2) , 71-77 (2008)
- 18) Sauvageot, F. and Blond, G., Effect of water activity on crispness of breakfast cereals, *J. Texture Studies*, 22 (4) , 423-442 (1991)
- 19) Chang, Y.P., Cheah, P.B. and Seow, C.C., Variations in flexural and compressive fracture behavior of a brittle cellular food (dried bread) in response to moisture sorption, *J. Texture Studies*, 31 (5) , 525-540 (2000)

論文審査結果の要旨

雑穀は日本人に不足しがちな食物繊維やミネラルを豊富に含み、その栄養学的価値が見直されてきている。しかし、雑穀は小麦と比べてタンパク質の特性や、澱粉の糊化温度など、食品素材としての加工適性に問題があることや、米と比べて食味が劣るため、それほど消費されていないのが現状である。

一方、東日本大震災後、保存食・非常食の重要性に関心が寄せられるようになり、アルファ化米や缶詰パン、レスキューフーズなどの需要が高まった。しかし、非常食はエネルギー源の補給にとどまるものが多く、栄養バランスまで考慮されたものは少なく、さらにアレルギー患者向けの非常食が少ないことが課題である。

そこで、本研究では食物繊維やミネラルを豊富に含む雑穀を膨化させ、保存性の高い非常食として応用することを企図し、パフ食品の物性評価法を検討し、その特徴を明らかにしたうえで、膨化・乾燥食品の特徴的な品質変化である、吸湿の影響による物性の変化を捉え、雑穀パフのレオロジー特性を明らかにすることを目的とした。さらに、これらの雑穀パフと結着剤を用いて、非常食として利用できる雑穀パフ食品を開発し、その特性についても明らかにすることを目的とした。

博士論文は、5章により構成されており、以下に各章の結果の概略を記す。

第1章では、雑穀パフの試料として、発芽玄米、大麦、はと麦、アマランサスの4種類の雑穀を選んで膨化させ、得られた雑穀パフの特徴を明らかにし、実際にパフを咀嚼する際のモデルとなる客観的評価法を用いて膨化条件を組織構造と併せて検討した。その結果、雑穀パフの膨化圧力は、発芽玄米、はと麦、アマランサスは0.9MPa、大麦は1.1MPaが適していることを示した。雑穀パフに適応しうる客観的評価法を検討したところ、雑穀パフの破断特性に関しては、一粒法で40mm Φ プランジャーを用いて圧縮速度0.1もしくは1mm/secで測定するのが適していることを明らかにした。

第2章では、パフ食品の特徴を明らかにするために、水分収着させた雑穀パフを調製した。その破断挙動、水分収着特性から得られた単分子吸着量およびガラス転移温度より、膨化・乾燥食品の特性である吸湿の影響による物性の変化を捉え、雑穀パフのレオロジー特性を明らかにした。その結果、雑穀パフの保存性に関しては、保存中に含水率が約8%以上にな

るとガラスからラバーに転移して脆性破断から延性破断になることを示した。故に含水率を約8%以下に保持することが大切で、保存する場合、温度のみならず湿度の制御が重要であることが明らかとなった。

第3章では、これらの雑穀パフの結着剤に利用する液卵の食味特性について検討を行った。今回の試料においては、味質によって、味認識装置の結果と官能評価との結果が必ずしも一致しておらず、食味の識別に関して味認識装置で官能評価を代替するには、限界があることを示した。しかし、「塩味」、「苦味」については、ヒトが識別できない僅かな違いを、味認識装置を使うことにより違いを明確にすることが可能であることを示した。

第4章では、結着剤を用いて非常食として利用できる雑穀パフ食品を開発した。そしてアレルギー対応食品として、卵を使用しないプルラン製剤で結着成型させた雑穀パフ食品について、物性及び嗜好性を検討した。焼成時間30分においてはプルラン製剤で結着させた雑穀パフ食品の方が液卵で結着させた雑穀パフ食品よりも顕著に硬かったが、焼成時間50分においては、両者はほぼ同程度の硬さとなった。プルラン製剤で結着させた雑穀パフ食品に比べ液卵で結着させた雑穀パフ食品は、結着が弱いことが明らかとなった。

第5章では、非常食としての利用を鑑み、その物性および保存性について検討した。その結果、結着剤の違いにより、破断特性の経時変化に違いが見られることを明らかにした。食品の状態としては、焼成当日における含水率約4%の試料においては、50~60℃のあたりでガラスからラバーに転移することが示唆された。またX線回折測定によって老化特性を評価したところ、雑穀パフ食品は1か月間保存しても老化は進んでいないことが確認された。

本論文の成果より、雑穀パフの最適膨化圧力が明らかとなり、さらに、雑穀パフに適応しうる客観的評価法が確立された。また雑穀パフの保存性に関しては、含水率を約8%以下に保持することが大切で、保存する温度のみならず湿度の制御が重要であることを明らかにした。得られた知見は、今後パフ食品を保存する際の重要な指標となりうると期待される。

そして、非常食としての利用を鑑み、泡立てた液卵およびプルラン製剤で結着成型させたユニークな雑穀パフ食品を開発することができた。保存性の高い雑穀パフ食品の非常食への社会実装に向けて必要となる科学的知見が整理され、得られた成果は生活環境学における貢献が大きいと考える。

以上を総合すると、本研究は研究目的の独創性と重要性、研究方法の新規性と妥当性、研究結果の信頼性、研究内容の意義から、博士課程論文として十分な内容に到達していると審査員全員一致で判断したことを、ここに報告する。

以上