

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00827

研究課題名（和文）被災生活のQOL向上に資するアレルギー対応食品の開発

研究課題名（英文）Development of allergen-free food for the purpose of improvement of the quality of life under disasters

研究代表者

藤井 恵子 (FUJII, Keiko)

日本女子大学・家政学部・教授

研究者番号：20186480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：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、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。さらに水分吸着させた雑穀パフの破断挙動、水分吸着特性やガラス転移温度より、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。

4種の雑穀パフの物性評価は圧縮速度1mm/secが適していることが示された。また、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された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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、吸湿の影響による雑穀パフのレオロジー特性を明らかにした。この成果により、雑穀パフの最適膨化圧力が明らかとなり、雑穀パフに適応す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、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、雑穀パフ食品の非常食への応用に向けて必要となる科学的知見が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）： The objective of this study was to elucidate the mechanical properties of puffed millets and establish a measurement method. Puffed millets were compared with brown rice, adlay, barley, and amaranth. To study the rupture properties, the millets were subjected at four different compression speeds. It was shown that a single compression, a plunger with a diameter of 40 mm, and a compression speed of 1.0 mm/s were suitable conditions for effectively measuring the mechanical properties of puffed millets.

The water sorption and rheological properties of puffed millets, such as brown rice, barley, adlay, and amaranth were investigated along with their glass transition properties. The puffed millets were stored in the desiccators until the water content was constant in equilibrium. The rupture properties of puffed millets showed ductile fracture and >8% moisture content.

研究分野：調理科学

キーワード：雑穀 パフ アレルギー対応食品 破断特性 組織構造 水分吸着 ガラス転移

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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、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が異なり、食品素材としての加工適性に問題があることに加えて、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ている¹⁻³⁾。しかし、非常食はエネルギー源の補給を目的としたものが多く、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。

2. 研究の目的

スナック菓子類のテクスチャー特性を一軸圧縮法により測定した研究を除けば、雑穀の粒を膨化させた、パフの物性について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たうえで、その特徴を明らかにすることを目的とした。

さらに、非常食として利用することを考えた際、保存性を高めることが大切である。劣化を防ぐため、食品工学的には含水率を低下させ、乾燥・脱水操作が重要である。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。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^{4,5)}。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に着目し、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。

3. 研究の方法

(1) 雑穀パフの調製方法

雑穀パフの原料として、発芽玄米(国産)、大麦(アメリカ産)、はと麦(岩手県産)、アマランサス(岩手県産)の4種類の雑穀を選んだ。240℃に予熱した穀類膨張機(有限会社光陽機械製作所)の圧力窯に生の雑穀を入れ、密閉し、窯ごと回転させながら加熱した。0.1、0.7、0.9、1.1 MPaまで加圧し、一気に減圧して膨化試料を調製した。

(2) 測定方法

① みかけの膨化率

膨化試料の体積を膨化前の生の試料の体積で除して、みかけの膨化率を求めた。

② 吸着水分量の測定

調湿した雑穀パフについて水分含量を測定した。測定には、水分測定器(ハロゲン水分計 MB45 メトラートレド株式会社)を用いた。試料を105℃で加熱し、重量変化率が1mg/120secになるまで継続し、恒量を得た。含水率は下記のように算出した。

含水率(%D.B.) = 最終重量 × 最終水分含量 / {最終重量 × (1 - 水分収着前の水分含量)}

③ 水分収着等温線、単分子吸着量

各種雑穀パフの水分収着等温線から、BET式に基づき、単分子吸着量を算出した。

④ 色度

ハンディ色差計(NR-3000: 日本電色工業株式会社)を用いて、各種雑穀パフの明度(L*)、赤色度(a*)、黄色度(b*)を測定した。

⑤ 破断特性

各種雑穀パフの破断特性を、レオメーター(RE-3305, 株式会社山電)を用いて測定した。測定温度は25℃とした。試料1粒を、直径40mmのプランジャーを用い、試料高さの99%まで圧縮させた。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。

⑥ 組織構造

走査型電子顕微鏡 (S-800, 株式会社日立製作所) を用いてパフの内部構造を観察した。パフ試料を約 1 mm の厚さに剃刀でスライスし、イオンスプッターを用いて 180 秒間白金蒸着を行った後、100 倍、500 倍で観察した。

⑦ ガラス転移温度

示差走査熱量測定装置 (Perkin Elmer Japan 社: Diamond DSC) を用いて、雑穀パフのガラス転移温度を測定した。測定温度は -50°C ~ 100°C とし、スキャンスピードは $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。

4. 研究成果

(1) 雑穀パフの膨化率

各種雑穀パフの膨化率を Fig. 1 に示す。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で、最も膨化しなかったのはアマランサスであった。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。

(2) 水分含量

1.1 MPa で膨化させたパフの水分含量は、最も高い試料が発芽玄米の 6.7% で、最も低い試料がアマランサスの 5.4% であった。また、いずれの試料も 0.1 MPa の水分含量が最も低い値となった。

(3) 色度

膨化前及び 1.1 MPa で膨化させた試料の L 値 (明度) は、大麦では膨化により L 値が低下したが、と麦では膨化により高くなった。大麦は白かった外皮が加熱により褐色に色づき、と麦は外皮が褐色だったものが膨化後に外皮がはじけて白くなったためと考えられた。

(4) 雑穀パフの組織構造

パフの断面の組織構造の写真を Fig. 2 に示す。発芽玄米パフは、外皮近くは気孔が小さく内側に向かうほど気孔が大きくなる傾向が見られた。大麦パフは中心部に向かって繊維状に気孔が組織されており、気孔が均一に分布する他の試料とは様子が違っていた。また、大麦パフは繊維状の気孔の壁が厚くなっていた。アマランサスパフの 0.7 MPa では気孔が少なく、十分膨化できていないことが確認できた。パフの断面の組織構造より、発芽玄米、と麦、アマランサスに関しては膨化圧力は 0.9 MPa、大麦では 1.1 MPa が適していると考えられた。

(5) 雑穀パフの破断特性

各種雑穀パフの荷重-変形曲線を Fig. 3 に、と麦パフとアマランサスパフの代表的な荷重-ひずみ曲線を Fig. 4 に、また得られた破断特性値

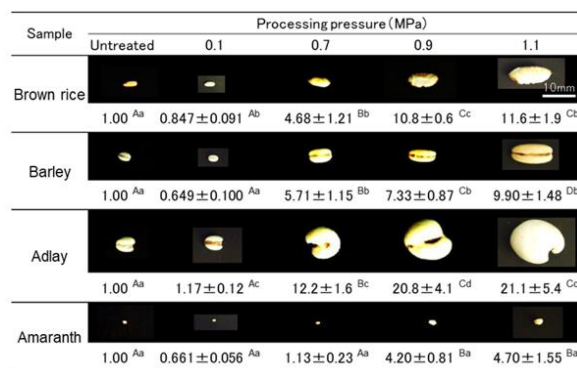


Fig.1 4種雑穀パフの膨化率に及ぼす膨化圧力の影響

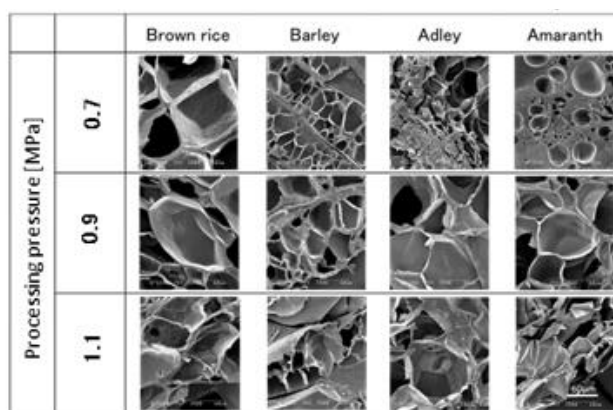


Fig2. 4種雑穀パフの断面の組織構造(×500).

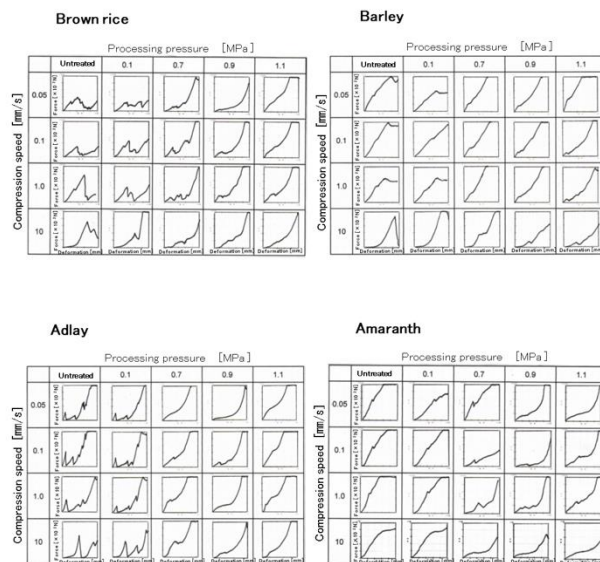


Fig.3 各種雑穀パフの荷重-変形曲線

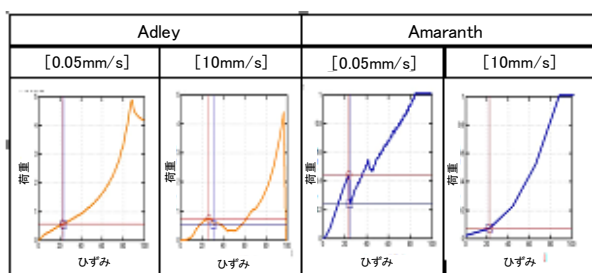


Fig.4 雑穀パフの荷重-ひずみ曲線

を Fig. 5 に示す。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る事が示された。

最も粒径が大きいのはと麦パフと最も粒径が小さいアマランサスパフの代表的な荷重-ひずみ曲線を比較すると、圧縮速度が 0.05 mm/sec では、と麦パフは破断点が明確でない延性破断を示したのに対し、最も粒径の小さいアマランサスパフは、脆性破断を示した。一方、10 mm/sec の圧縮速度では、と麦は脆性破断を示したのに対し、アマランサスパフは延性破断を示した。

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

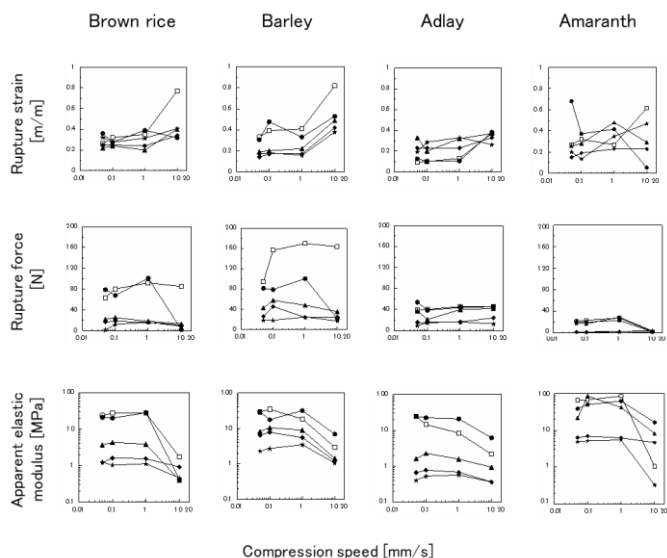


Fig.5 各種雑穀パフの破断特性値に及ぼす圧縮速度の影響
未処理(□),0.1MPa(●),0.7MPa(▲),0.9MPa(◆),1.1MPa(★)

(6) 雑穀パフの水分収着特性

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て得られた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 式にあてはめて単分子吸着量を算出したところ、25 °C の試料では単分子吸着量の値はアマランサスを 0.1 MPa で処理した試料が 34.2 g/100 g-dry solid と特に高い数値となったが、それ以外は 9.72~17.9 g/100 g-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 15°C、25°C、35°C と、温度が高くなるに従って平衡含水率は低くなった。膨化前の試料の荷重-変形曲線は、いずれの相対湿度で保存した試料においても、脆性破断が認められた。25°C 調湿時の発芽玄米の水分収着等温線を Fig. 6 に示す。膨化圧力 0.7~1.1MPa の試料は、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。発芽玄米パフのサクサク感を表現するのに荷重-変形曲線における脆性・延性破断で判断することは有効であり、含水率が 8%より高いとき延性破断となりサクサク感が失われることが示唆された。

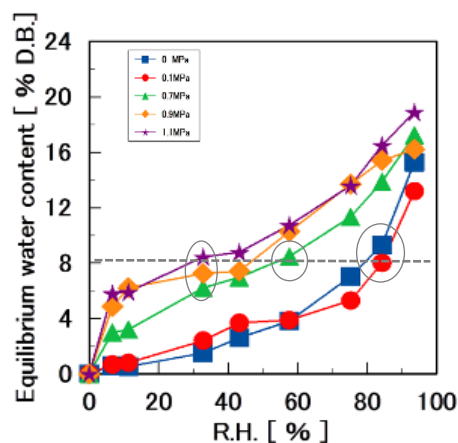


Fig.6 発芽玄米の水分収着等温線に及ぼす膨化圧力の影響(25°C)

水分収着させた雑穀パフの破断挙動は、いずれのパフについても破断ひずみ、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。

0.9MPa で膨化させた発芽玄米パフを 25°C で調湿した際の内部組織構造と圧縮時の荷重-変形曲線の結果を Fig. 7 に示す。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し、応力が高くなる現象が見られた。25 °C 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

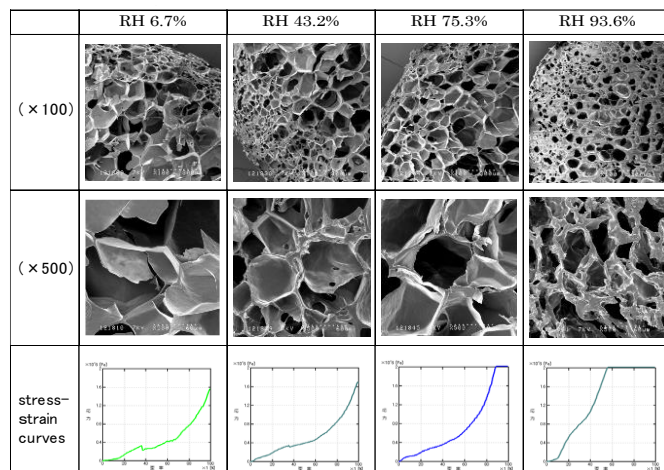


Fig.7 25°Cで調湿した発芽玄米パフの組織構造と圧縮時の荷重-変形曲線

に対し 0.1 MPa 処理試料は相対湿度 93.6 %から、0.7 MPa および 0.9 MPa 処理試料は相対湿度 57.6 %から、1.1 MPa 処理試料は相対湿度 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 0.7~1.1 MPa 処理試料においては、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。

(7) 雑穀パフのガラス転移温度

25 °Cで調湿した各種雑穀パフのガラス転移温度の結果を Fig. 8 に示す。ガラス転移温度は -16.6 °C~80.2 °C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 %のところであることが示されたが、この条件は室温 15 °C~35 °Cの範囲においてはガラス転移線に近いところであった^{6, 7)}。

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に変化することが明らかとなった。この条件は温度 40 °C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、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。

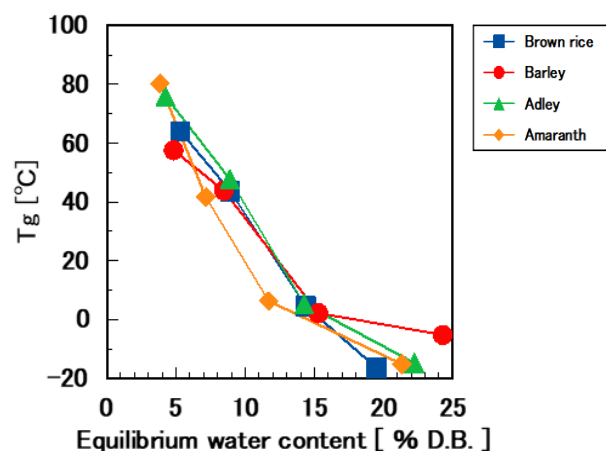


Fig.8 25°Cで調湿した各種雑穀パフのガラス転移温度

(8) 総括

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 0.9 MPa、大麦は 1.1 MPa が適していると考えられた。

雑穀パフの破断特性においては、測定条件としては、圧縮速度が速くなるにつれて硬さ、およびみかけの弾性率が減少する傾向が見られた。明確な破断点をとらえるためには、パフの粒径が小さいアマランサスパフは圧縮速度が遅い方がよく、粒径の大きいはと麦パフは速い方がよいということが示された。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 40 mmφ プランジャーを用いて圧縮速度 0.1 もしくは 1 mm/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、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。

これらの雑穀パフは、ミネラルや食物繊維を豊富に含み、保存性の高いアレルギー対応食品として応用できる可能性が示された。

<引用文献>

- 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) 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)
- 5) 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)
- 6) Sauvageot, F. and Blond, G., Effect of water activity on crispness of breakfast cereals, J. Texture Studies, 22 (4), 423-442 (1991)
- 7) 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)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高橋敦子, 藤井恵子	4. 巻 54(1)
2. 論文標題 雑穀パフに適應しうる客觀的評價法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本調理科学会誌	6. 最初と最後の頁 14-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 敦子, 河内 いずみ, 藤井 恵子
2. 発表標題 雑穀パフを用いた粒子結着型食品のレオロジー特性と嗜好性
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋敦子, 藤井恵子
2. 発表標題 調湿した雑穀パフの内部構造とレオロジー特性
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋敦子, 藤井恵子
2. 発表標題 雑穀パフの破断特性
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	海老澤 元宏 (EBISAWA Motohiro) (30338876)	独立行政法人国立病院機構（相模原病院臨床研究センター）・アレルギー性疾患研究部・部長 (82710)	
研究分担者	林 典子 (HAYASHI Noriko) (30775870)	十文字学園女子大学・人間生活学部・准教授 (32415)	
研究分担者	藤井 智幸 (FUJII Tomoyuki) (40228953)	東北大学・農学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------