

ナノファイバー化技術を利用した大豆食物繊維素材の開発

長野 隆男*

石川県立大学生物資源環境学部食品科学科

Development of Soybean Dietary Fibers Using Nanofiber Technology

Takao NAGANO*

Department of Food Science, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, Ishikawa 921-8836

ABSTRACT

Okara, a by-product of tofu or soymilk production, is rich in dietary fiber, most of which is insoluble. Thus, improving the physicochemical properties of *okara* for various applications in foods is of great importance. Wet type grinder (WG) systems are used to produce nanocellulose, which has highly viscous and gel-like forms. Here, *okara* was ground using a WG system and the effect on soy protein isolate (SPI) gels was investigated. We treated 2% *okara* with the WG system using different numbers of passes (1–5 times). The particle size distribution of the WG-treated *okara* decreased and the viscosity increased with the number of passes. The WG-treated *okara* also dispersed in water homogeneously after 24 h, whereas untreated *okara* did not. The SPI gels only formed with NaCl and the breaking stress and strain increased with NaCl concentrations up to 0.2%, and then decreased. The addition of 1% WG-treated *okara* increased the breaking stress and strain of SPI gels as the number of WG passes increased at NaCl concentrations of 1.0% or 1.5%. The breaking stress and strain of SPI gels at 1.0% NaCl also increased with increasing WG-treated *okara* concentrations up to 1.0%. These results indicate that nanocellulose technologies might improve the physicochemical properties of *okara* and may be useful for developing protein gel-based foods. *Soy Protein Research, Japan* **24**, 28-32, 2021.

Key words : *okara*, gel, nanocellulose, soy protein isolate, wet-type grinder

*〒921-8836 石川県野々市市末松1-308

この10年間に、ナノセルロースを中心としたナノファイバー (NF) の研究開発が進展したことから、微粒子化技術が大きく進歩した。これまでに、木材、麦わら、カニヤエビの殻など様々な農作物や海産物から調製したNFについて報告されている。また、NFの特性として分散性と粘性が高いことが知られている¹⁾。NFの調製には、水に分散させて微粒子化する湿式装置が利用される。湿式微粒子化装置として、ウオータージェット (WJ) 方式と湿式グラインダー (WG) 方式の装置が挙げられる。WJ装置は、最高240 MPaの水圧で試料を衝突させて微粒子化する装置である。しかしながら、試料が詰まりやすいことから食品への利用には難点がある。一方、WG装置はWJ装置と比べて微粒子化能力は劣るが、石臼形式のため試料が詰まりにくい。また、WG装置は食品の製造・加工会社でも実際に利用されている²⁾。

おからは、豆腐や豆乳の製造による副産物であり、セルロースを主体として食物繊維が豊富に含まれているが、食品としての利用は少ない。そのため、おからの物理化学的特性を改善する様々な研究が行われてきた²⁾。しかしながら、現在のところ解決には至っていない。

大豆分離たん白質 (SPI) は、ゲル形成性、乳化性などの機能性に優れている理由から、様々な加工食品に利用されている³⁾。一方、微粒子化したおからをSPIと置き換えてゲルの特性を調べた研究が報告された⁴⁾。しかしながら、微粒子化おからの大豆加工製品への利用にはさらに詳細な検討が必要である。本研究では、1) WG装置によるおからの微粒子化、2) WG処理おからを加えたSPIのゲル物性について検討を行った。

材料と方法

材料

脱脂おからは、ニュープロプラス1000 (不二製油) を、SPIはフジプロF (不二製油) を用いた。塩化マグネシウム ($MgCl_2$) と塩化ナトリウム ($NaCl$) は、富士フィルム和光純薬の製品を使用した。

微粒子化方法

WG装置は、スーパーマスコロイダー (MKCA6-2, 増幸産業) を使用した。微粒子化は、2 wt% おからを蒸留水に分散させた後、WG処理 (ギャップ: -0.15 mm, 回転数: 1,540 rpm) を行った。

粘度測定

B型粘度測定装置 (東洋計器) を使用した。粘度は、試料を300 mLトルビーカーに入れ、ローターはNo. 1もしくはNo. 3を使用して回転数 0.5 s^{-1} で測定を行ない、1試料に対して3回行った。

粒子径分布測定

粒子径分布測定は、レーザ回折/散乱式粒子径分布測定装置 (LA-920, 堀場製作所) を使用し、1試料に対して2回行った。

加熱ゲルの作製

SPIを蒸留水またはWG処理おからスラリーに分散し、陰圧下でスターラーを用いて30分間溶解した。得られた分散液 (SPI濃度: 6%) に、 $NaCl$ と 0.25% $MgCl_2$ を加えて、モールド (内径20 mm×高さ20 mm) に充填した。加熱ゲルは、恒温槽 (サーモフィッシャー) で 85°C 、30分間で加熱を行って作製した。

力学物性測定

5 kgロードセルを装着したテクスチャーアナライザー (TA.XT plus, Stable Micro Systems) を用いて、圧縮試験を行った。プランジャーは、直径50 mmで円柱状のものを使用し、圧縮速度は10 mm/sで行った。測定から得られた応力-歪曲線から、破断応力と破断歪を求めた。一つの試料について、少なくとも6回の測定を行った。

統計処理

測定値は、平均値±標準偏差で示した。有意差は、ANOVA (one-way analysis of variance) とTukeyを用いて評価した。統計ソフトは、Origin 2020b (Origin Lab) を使用した。

結 果

おからの微粒子化

WG処理の回数を1回、3回、5回と変えて、おから (2 wt%) の微粒子化を行った。粒子径分布を測定したところ、中央値は未処理、1回、3回、5回処理で、 $68.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $13.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $9.9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8.9\text{ }\mu\text{m}$ であった。粒子径分布の中央値は、処理回数が3回まで低下し、それ以上の処理回数における差はほとんど見られなかった。一方、おからスラリーの粘度は、未処理、1回、3回、5回処理で10 mPa·s、40 mPa·s、70 mPa·s、120 mPa·sであった。粘度は、WGの処理回数が増えるに従って高くなった。

次に、WG処理おからを24時間静置して分散性を調べた。その結果、未処理おからでは沈殿が見られたが、WG処理回数が増えるに従っておからの沈殿は観察されなくなった (Fig. 1)。

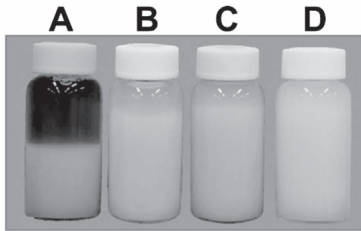


Fig. 1. Wet-type grinder (WG)-treated okara in water after 24 h. Okara (2 wt%) was treated with the WG for different passages. (A) untreated; (B) one passage; (C) three passages; (D) five passages.

おからのWG処理回数がSPIゲルの力学物性に与える影響

NaCl濃度1%と1.5%の条件で、WG処理を0回、1回、

3回、5回行ったおからを1%加えたSPIゲルの力学物性について検討した。

1%NaClでは、ゲルの破断応力はWG未処理おから添加で 398 ± 21 Pa、1回WG処理おから添加で 360 ± 32 Pa、3回WG処理おから添加で 470 ± 22 Pa、5回WG処理おから添加で 561 ± 46 Paであった。破断歪は、WG未処理おから添加で $41.2 \pm 0.9\%$ 、1回WG処理おから添加で $40.9 \pm 0.7\%$ 、3回WG処理おから添加で $43.6 \pm 1.9\%$ 、5回WG処理おから添加で $44.2 \pm 0.6\%$ であった (Fig. 2)。

1.5%NaClでは、ゲルの破断応力はWG未処理おから添加で 185 ± 8 Pa、1回WG処理おから添加で 200 ± 11 Pa、3回WG処理おから添加で 270 ± 9 Pa、5回WG処理おから添加で 352 ± 36 Paであった。破断歪は、WG未処理おから添加で $34.2 \pm 1.1\%$ 、1回WG処理おから添加で $33.5 \pm 0.7\%$ 、3回WG処理おから添加で $37.1 \pm 0.7\%$ 、5回WG処理おから添加で $37.6 \pm 2.2\%$ であった (Fig. 3)。

以上の結果から、未処理おから添加SPIゲルと比べて、1回WG処理おから添加で違いは見られなかったが、3回と5回WG処理おから添加で破断応力と歪に有意な増加が観察された。

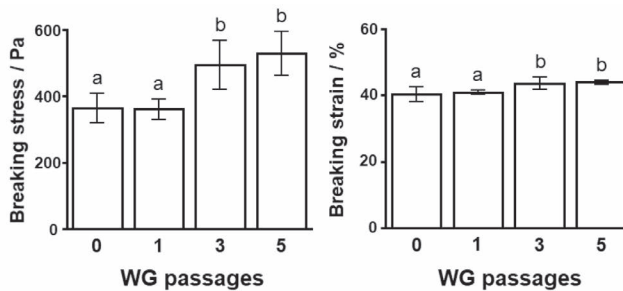


Fig. 2. The breaking stress and strain of 6% soybean protein isolate (SPI) gels to which 1% wet-type grinder (WG)-treated okara was added after different passages at 1.0% sodium chloride concentration. Different letters indicate significant differences ($p < 0.01$).

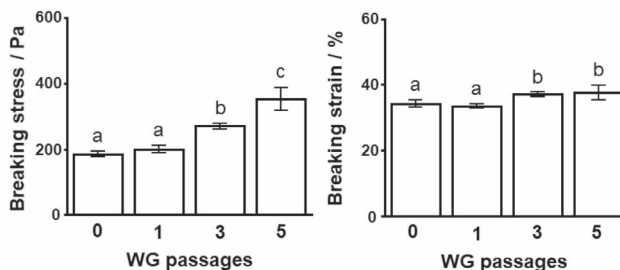


Fig. 3. The breaking stress and strain of 6% soybean protein isolate (SPI) gels to which 1% wet-type grinder (WG)-treated okara was added after different passages at 1.5% sodium chloride concentration. Different letters indicate significant differences ($p < 0.01$).

WG処理おからの濃度がSPIゲルの物性に与える影響

WG処理を5回行ったおからを用いて、WG処理おからを添加した濃度がSPIゲルの力学物性に与える影響について調べた。ゲルの破断応力は、WG処理おからの濃度が0%で 367 ± 32 Pa、0.5%で 589 ± 21 Pa、0.75%で 732 ± 48 Pa、1%で 792 ± 88 Paであった。破断歪は、WG処理おからの濃度が0%で $40.1 \pm 1.0\%$ 、0.5%で $43.4 \pm 0.40\%$ 、0.75%で $45.3 \pm 0.9\%$ 、1%で $45.2 \pm 1.6\%$ であった (Fig. 4)。

以上の結果から、WG処理おからの添加濃度が高くなるに従い、ゲルの破断応力と歪の有意な増加が観察された。

考 察

WG装置を使用して、処理回数がおからの微粒子化に与える影響を検討した。その結果、粒子径分布の中央値は、WG処理回数が3回まで小さくなり、それ以上の処理回数で差はほとんど観察されなかった。粘度は、SM処理回数を増やすに従って高くなった。分散性を調べたところ、WG処理によりおからの分散は改善した。Iwamotoらは、高圧ホモゲナイザーとWG装置を用いてパルプファイバーの微粒子化について検討を行った。微粒子化したパルプファイバーの形態を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果、SM処理に

より均一なナノファイバー (50–100 nm幅) を観察した。一方、高圧ホモゲナイザーでは、ナノファイバーは見られなかった⁵⁾。さらに、研究グループはWGの処理回数について検討を行った。SEM観察から、WG処理1回でマイクロサイズのファイバーとなり、さらに処理回数を増やすことでほとんどがナノファイバーとなった。さらに、WG処理を5回以上行っても、ナノファイバーの形態に変化は観察されなかった⁶⁾。今回のおからでの結果は、Iwamotoらの報告と同様な結果が得られたと考えられた。

WG処理回数を変えて調製した微粒子化おからを加えて、SPIゲルの力学物性を調べた。その結果、処理回数が増えるに従ってSPIゲルの破断応力と破断歪は高くなった。また、WG処理おからの濃度がSPIゲルの力学物性に与える影響を調べた。その結果、WG処理おからの濃度を上げると、SPIゲルの破断応力と破断歪は高くなった。以上の結果から、おからを微粒子化することにより、SPIのゲル形成性を高くできることが示された。

今回の研究により、WG装置を利用しておからを微粒子化することにより、粘度が高くなり分散性が改善されること、SPIのゲル形成性を向上させることが明らかとなった。今後、これらのメカニズムについて研究を行う必要がある。

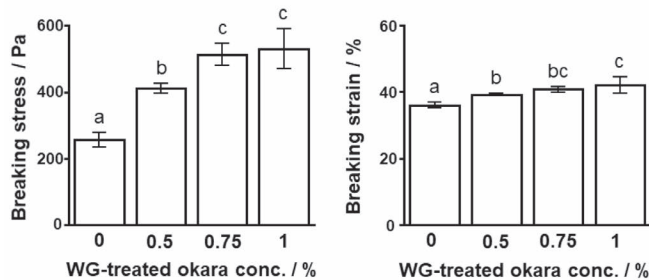


Fig. 4. The breaking stress (a) and strain (b) of 6% soybean protein isolate (SPI) gels at 1.0% NaCl with adding five-time wet-type grinder-treated okara at different concentrations. Different letters indicate significant differences ($p < 0.01$).

要 約

おからを様々な加工食品に利用するには、その物理化学的特性を改善する必要がある。本研究では、ナノセルロースの製造に利用される湿式グラインダー（WG）装置を用いて、微粒子化によるおからの物性改善とその分離大豆たん白質（SPI）ゲルの物性に与える効果を検討した。まず、WGの処理回数がおからの微粒子化に与える影響を検討した。その結果、粒子径分布の中央値は、WG処理回数が3回まで小さくなり、それ以上で差はほとんど観察されなかった。また、WG処理回数を増やすに従って、おからの粘度は高くなり、分散性は改善された。次に、WG処理回数を変えて調製した微粒子おからを加えたSPIゲルの力学物性を調べた。その結果、WG処理回数を増やすに従って、ゲルの破断応力と破断歪は高くなることが示された。さらに、WG処理おからの濃度がSPIゲルの力学物性に与える影響を調べた。その結果、WG処理おからの濃度を高くすると、ゲルの破断応力と破断歪は高くなることが示された。以上の結果から、WG装置を用いて微粒子化することにより、おからの物性改善ができること、その特性を利用してSPIのゲル形成性を向上できることが明らかとなった。

文 献

- 1) Rajinipriya M, Nagalakshmaiah M, Robert M and Elkoun S (2018): Importance of agricultural and industrial waste in the field of nanocellulose and recent industrial developments of wood based nanocellulose: A review. *ACS Sust Chem Eng*, **6**, 2807-2828.
- 2) Nagano T, Arai Y, Yano H, Aoki T, Kurihara S, Hirano R and Nishinari K (2020): Improved physicochemical and functional properties of okara, a soybean residue, by nanocellulose technologies for food development – A review. *Food Hydrocoll*, **109**, 105964.
- 3) Nishinari K, Fang Y, Nagano T, Guo S and Wang R (2018): 6 – Soy as a food ingredient. In: Proteins in food processing (Second edition). Yada RY, eds, Woodhead Publishing, pp. 149-186.
- 4) Ullah I, Hu Y, You J, Yin T, Xiong S, Din Z, Huang Q and Liu R (2019): Influence of okara dietary fiber with varying particle sizes on gelling properties, water state and microstructure of tofu gel. *Food Hydrocoll*, **89**, 512-522.
- 5) Iwamoto S, Nakagaito AN and Yano H (2007): Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites. *Appl Phys A*, **89**, 461-466.
- 6) Iwamoto S, Nakagaito AN, Yano H and Nogi M (2005): Optically transparent composites reinforced with plant fiber-based nanofibers. *Appl Phys A*, **81**, 1109-1112.