

物理処理により改質したキビ粉を用いた 加工食品の開発

Development of prepared foods with improved
proso millet flour by physical treatments

三 浦 靖
岩手大学農学部

〔研究目的〕

雑穀とは、アワ、キビ、ヒエ、モロコシなどの総称であり、主に夏雨型の半乾燥気候、熱帯または亜熱帯のサバナ気候や温帯モンスーン気候の地域で夏作物として栽培される一群のイネ科穀類である¹⁾。雑穀は劣悪な気候条件下でもよく生育し、しかも耐病性が高く、虫害も受けにくく、穀粒は主要穀物に比べて小さいが安定した収穫が得られる場合が多い²⁾。近年では健康志向の高まりから雑穀類の栄養機能性を見直す動きがあり、抗アレルギー食品素材のような特殊用途のみならず、一般消費向けへ需要が拡大する可能性を秘めている³⁾。

キビは、ビタミンB群や食物繊維、微量元素などの含量が高く、マウスにキビタンパク質を含む食餌を与えると、血中の高密度リポタンパク質-コレステロール濃度が上昇する⁴⁾という報告もあり、栄養機能性の観点から期待されている。また、キビは作期が比較的短いので輪作体系に組み込んだり、稲の育苗跡地で栽培することが可能であるので生産性の高い転作作物としても期待されている。しかし、食品素材としての加工適性に問題があるため従来はあまり用いられなかった。そこで、本研究ではキビ穀粒に物理処理を施して主にデンプンの糊化特性を改変し、小麦粉代替機能を持たせた改質キビ粉を調製してパンやエクストルージョン加工食品などの膨化食品を開発することを目的にした。

〔研究方法〕

1. 試 料

2000年岩手県産のキビ (*Panicum miliaceum* L.) を用いた。粒子径測定分散媒にはエタノール (1級, 純正化学株) を用い、他の試薬には特級品を使用した。

2. 成分分析

常圧加熱乾燥法 (135°C, 24時間)⁵⁾により水分含量, マクロ改良ケルダール法⁶⁾ (タンパク質換算係数6.25) によりタンパク質含量, Erdahl らの方法⁷⁾ により脂質含量, 直接灰化法⁸⁾ により灰分含量, AACC 公定法76-30A⁹⁾ により損傷デンプン含量を測定した。

3. キビ穀粒の物理処理

(1) 乾熱処理

キビ穀粒100gをガラス製シャーレ(φ120mm×H20mm)に入れ、送風定温乾燥器(WFO-450D, 東京理化工機(株))を用いて140~160°Cで60分間の乾熱処理した。

(2) 誘電加熱処理

キビ穀粒100gをガラス製シャーレに入れ、電子レンジ(ER-GX5(H), 出力980W, 東芝(株))を使用して強度:強で3~7分間の誘電加熱処理を行った。

(3) 湿熱処理

オートクレーブ(HA-24, (株)平山製作所)を使用して、ガラスクロス(綾織り, 300mm×300mm×0.25mm)に包んだキビ穀粒100gを絶対圧100kPa(=100°C), 200kPa(=120°C)および250kPa(=127°C)で30分間の湿熱処理を行った。その後、25°Cの恒温室でキビ穀粒を紙ワイパー(キムタオル, (株)クレシア)上に広げて4時間だけ自然乾燥させた。

4. キビ穀粒の粉碎

物理処理したキビ穀粒をサイクロンサンプルミル(スクリーンφ0.25mm, 処理量 $2.5 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, UDY Corp. 社, USA)を用いて粉碎した。粉碎した試料は化学変化を抑制するため、ハイバリヤー性フィルム製袋(LDPE/APO/EVOH/APO/LDPEの3種5層, 四国化工(株))に充填し、脱酸素剤(D-1000, (株)ニッテツ・ファイン・プロダクツ)とともに密封して冷蔵庫(4°C)に保存した。

5. キビ粉の特性

(1) 粒子径と粒子形状

小容量モジュール(125mL)を装着したレーザー光散乱・回折型粒度分布測定装置(LS 230, 測定粒子径範囲0.04~2000μm, Beckman Coulter 社)を用いてキビ粒子の体積・個数重み付けの平均径, 中位径ならびに最頻径を測定した。また, 体積平均粒子径を個数平均粒子径で除したものを多分散度と定義した。なお, 分散媒にはエタノールを用いた。デジタルマイクロスコープ(VH-6300, (株)キーエンス)を用いて倍率450倍でキビ粒子の原画像を取得し, パーソナル画像処理・解析装置(DA-5000 S, 王子計測機器(株))を用いてキビ粒子の水平フェレ径および垂直フェレ径, 楕円率(外接円の半径/内接円の半径), ラフネス(周囲長/包絡周囲長)を測定した。

(2) 色特性

試料を粉体セルに充填し, 分光測色計(CM-3500 d, ミノルタ(株))を用いてCIE表色系のL*, a*, b*および白度を測定した。

(3) 熱分析

モデュレイテッド示差走査熱量測定装置(TA-5200型熱分析システム, 2910型MDSCセルベース, DSCセル, TA Instrument, Inc. 社)を用いた。試料2mg(乾物重量)と脱塩

水 6 mg を簡易密封試料容器に充填して試料重量を精秤した。脱塩水 6 mg を充填・密封した試料容器を対照にして、試料を25℃で5分間保持した後、加熱速度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ で25℃から120℃まで加熱して DSC 曲線を取得し、糊化開始温度 (T_0)、糊化ピーク温度 (T_p)、糊化終了温度 (T_c)、糊化に伴うエンタルピー変化 (ΔH) を測定した。

(4) X 線回折

X線回折装置 (RINT 2200V, 理学電機㈱) を用い、X線管電圧40kV, X線管電流30mA, 走査軸 $2\theta/\theta$, 走査角度5.00~50.00deg, 走査間隔0.02deg, 走査速度 $2.00\text{deg}\cdot\text{min}^{-1}$ に設定してX線回折図を取得した。試料を常圧で25℃の飽和水蒸気下で調湿した。

(5) 粘 度

キビ粉中のデンプンの糊化特性を攪拌型粘度測定装置 (Rapid Visco Analyser Model RVA-4, Newport Scientific Pty. Ltd. 社) を用いて測定した。試料3.00 g (乾物重量) をアルミニウム製円筒型試料容器 ($\phi 38\text{mm}\times H78\text{mm}$) に入れ、これに40℃の脱塩水25.0 g を加え、パドルにて1分間だけ手攪拌し、2分間静置して試料の吸水状態を揃えた後に測定を開始した。RVA の測定温度プログラムは、試料を50℃で3分間保持した後に加熱速度 $6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ で95℃まで加熱して95℃で7分間保持し、そして冷却速度 $6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ で30℃まで冷却し、最後に30℃で7分間保持するというものである。得られた粘度曲線から粘度上昇開始温度、最高粘度、最低粘度、ブレイクダウン、セットバックを求めた。

6. 統計処理

得られたデータの基本統計量の計算ならびに平均値の差の検定には表計算ソフトウェア (マイクロソフトエクセル2000, マイクロソフト㈱) を用いた。

【結果と考察】

1. キビ粉の成分

水分、タンパク質、脂質、灰分、損傷デンプン含量は、それぞれ10.6, 11.7, 2.8, 0.9, 9.1 [%, w/w] であった。

2. キビ粉の特性

(1) 粒子径と粒子形状

対照 (無処理) および物理処理したキビ粉のフェレ径 (水平および垂直) の平均値は $14\text{ }\mu\text{m}\sim 27\text{ }\mu\text{m}$ であり、物理処理の種類ならびに処理温度、処理時間、処理圧力とは相関が見られなかった。楕円率も対照試料および物理処理試料とも1.4であり、フェレ径と同様に物理処理の効果は見られなかった。また、ラフネスにおいても対照試料および物理処理試料とも1.2~1.3であり、物理処理の効果は見られなかった。対照キビ粉粒子の多分散度は27であり、乾熱処理キビ粉粒子では29~33と増加したが、湿熱処理キビ粉粒子では23~27と減少する傾向にあった。このことは、乾熱処理によりせん断に対するキビ穀粒の脆さが部分的に増加すると考えられ、穀粒が不均一に粉砕されることを示唆している。

(2) 色 特 性

対照キビ粉では a^* が-4.5, b^* が20.1, そして白度が-18.0であり, かなり黄色みを帯びている。しかし, 乾熱処理を施すとキビ粉の白度が同処理系内において最高で41.6, 湿熱処理を施すとキビ粉の白度が同処理系内において最高で43.4まで上昇する。一方, 誘電加熱処理したキビ粉の白度は20前後であるが, 対照試料よりも上昇した。このように物理処理したいずれのキビ粉も白度が増加し, 食品加工において着色の自由度が高くなる。

(3) 損傷デンプン含量

対照キビ粉の損傷デンプン含量は9.1%であるのに対し, 乾熱処理または誘電加熱処理を施したキビ粉では処理温度が高く, 処理時間が長くなるほど損傷デンプン含量が7.4~5.5%へと低下した。一方, 湿熱処理キビ粉では処理圧力が高くなるほど損傷デンプン含量は9.3~12.3%へと増加した。これらの結果は, 乾熱処理よりキビ粒子の植物組織としての内部結合力が増加するために粉碎工程でデンプン粒は損傷を受けにくくなり, 湿熱処理によりこの内部結合力が減少するために粉碎工程でのデンプン損傷度が増加したと考えられる。

(4) X 線 回 折

キビ粉のX線回折図は対照試料および物理処理試料のいずれでもA型を示し, 物理処理の種類と条件によるデンプンの結晶構造の違いは見られなかった (Fig. 1)。A型図形はデンプン

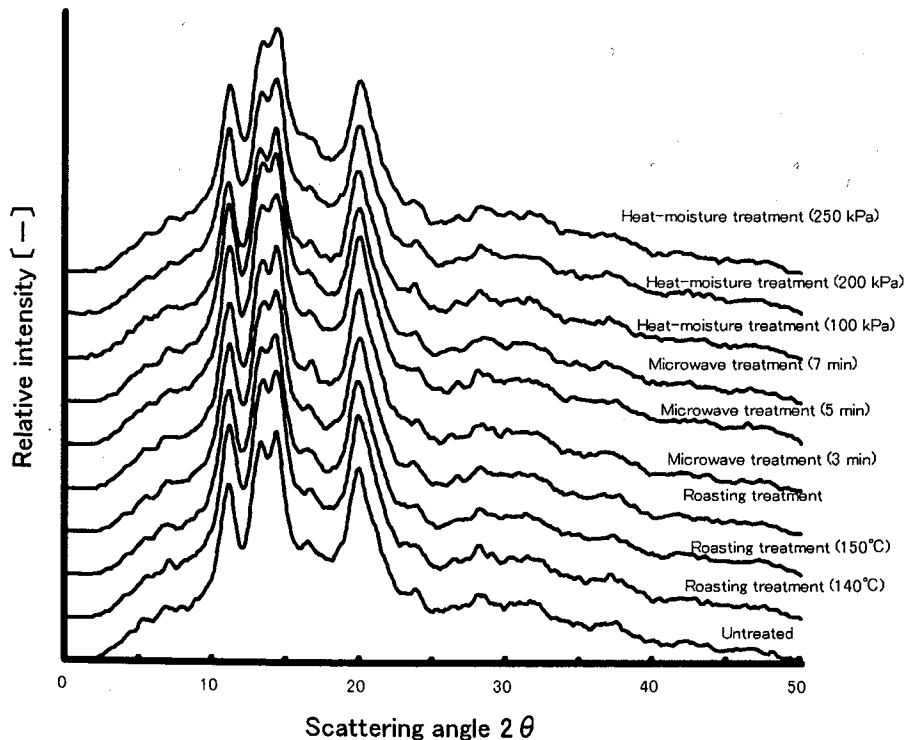


Fig. 1 X-ray diffractogram of modified proso millet flours

プンの高温安定型の結晶に対応した図形であって変化を受けにくい¹⁰⁾、湿熱処理試料では、 2θ が20付近に見られる肩ピークは処理圧力が高くなるにつれて消失する傾向にあった。

(5) 熱分析

いずれのキビ粉も糊化開始温度は73~75°Cの範囲内にあり、物理処理の種類ならびに条件による違いは見られなかった (Table 1)。しかし、糊化終了温度は対照キビ粉では83.9°C、乾熱処理や誘電加熱処理を施したキビ粉でも82~83°Cであるのに対し、湿熱処理キビ粉においては処理圧力が100kPa, 200kPa, 250kPaの場合にそれぞれ85.3°C, 87.6°C, 89.2°Cというように処理圧力が高いほど高温になった。このように、湿熱処理は処理圧力が高いほどキビ粉中のデンプンの糊化終了温度と糊化に伴うエンタルピー変化を増加させることから、デンプン粒内に糊化しにくいガラス状領域などが形成されていることが考えられる。Fig. 1 に示したX線回折図において、 $2\theta/\theta = 20$ 付近に見られる肩ピークは処理圧力が高くなるにつれて消失する傾向にあることはこのことを支持していると考えられる。

Table 1 Thermal characteristics of proso millet flour determined by differential scanning calorimetry

Physical treatment	T_o^* [°C]	T_p^* [°C]	T_c^* [°C]	ΔH^* [kJ·kg ⁻¹]
Untreated	74.9	78.6	83.9	2.99
Roasting treatment				
140°C	74.0	77.8	83.0	2.82
150°C	73.5	77.2	83.4	2.91
160°C	74.0	77.6	83.6	2.92
Microwave treatment				
3 min	73.9	77.9	83.1	3.00
5 min	73.1	77.2	83.3	3.05
7 min	73.2	77.5	82.9	3.04
Heat-moisture treatment				
100 kPa	75.6	80.2	85.3	2.73
200 kPa	74.2	79.7	87.6	3.94
250 kPa	74.7	81.2	89.2	4.28

* T_o , onset temperature of endothermic curve; T_p , temperature of endothermic peak maximum; T_c , completion temperature of endothermic curve; ΔH , enthalpy change of starch gelatinization

(6) 粘 度

乾熱処理キビ粉分散液の最高粘度は、処理温度の上昇に伴って高くなった (Table 2)。最低粘度、最終粘度、ブレイクダウン、セットバックも最高粘度と同様な傾向を示した。物理処理条件とキビ粉の粒子径ならびに粒子形状との間に相関が見られないことから、分散粒子の大きさや形状がキビ粉分散液の粘度に直接に影響を与えているとは考えにくい。また、キビ粉中に存在するデンプンの結晶型およびピーク強度に大きな変化は見られないことから、デンプンの結晶構造がこの粘度に及ぼす影響は大きくないと考えられる。対照キビ粉分散液

Table 2 Pasting characteristics of proso millet flour on RVA-viscogram

Physical treatment	Viscosity [RVU]					Pasting temperature
	Peak	Trough	Final	Break	Setback	
Untreated	36.1±0.6 ^a	10.0±0.3 ^a	33.9±0.5 ^a	26.0±0.3 ^a	23.8±0.4 ^a	74.6±0.3 ^a
Roasting treatment						
140°C	104.8±3.0 ^b	27.5±2.0 ^b	60.8±2.3 ^b	77.4±1.0 ^b	33.4±0.8 ^b	73.9±0.6 ^{ab}
150°C	173.0±5.5 ^c	73.8±1.8 ^c	132.7±1.8 ^c	99.2±4.7 ^c	58.9±2.1 ^c	74.7±0.2 ^a
160°C	267.5±7.1 ^d	128.6±2.2 ^d	204.3±3.9 ^d	138.9±4.9 ^d	75.7±1.9 ^d	74.3±0.1 ^a
Microwave treatment						
3 min	73.3±2.9 ^e	17.3±1.0 ^e	50.2±2.1 ^e	56.0±2.4 ^e	33.0±0.9 ^b	74.3±0.3 ^a
5 min	81.4±1.1 ^f	18.9±1.0 ^e	53.6±0.5 ^e	62.5±1.2 ^f	34.8±1.0 ^b	73.3±0.6 ^b
7 min	160.2±2.8 ^g	59.6±1.3 ^f	117.4±1.8 ^f	100.6±1.6 ^g	57.8±0.8 ^c	74.4±0.1 ^a
Heat-moisture treatment						
100 kPa	242.3±0.8 ^h	94.8±1.7 ^g	181.3±0.4 ^g	147.4±0.9 ^h	86.5±1.3 ^e	74.1±0.4 ^{ab}
200 kPa	246.7±0.4 ⁱ	91.1±0.5 ^h	174.7±0.8 ^h	155.6±0.3 ⁱ	83.6±0.4 ^f	73.4±0.4 ^b
250 kPa	240.7±0.3 ^j	100.4±0.5 ⁱ	186.3±0.9 ⁱ	140.2±0.2 ^j	85.8±0.5 ^e	75.7±0.3 ^c

Mean±standard deviation (n=3)

Values followed by the same letter in the same column are not significantly different (p<0.05)

の粘度が低いのは、 α -アミラーゼなどが作用してデンプン鎖が低分子化しているのでデンプンの糊化過程において粘度上昇が抑制されると思われる。乾熱処理はこの α -アミラーゼを失活させるので粘度を低下させない。しかも、加熱処理の温度が高くなるほど α -アミラーゼの活性が低下するので粘度低下が抑制されると考えられる。誘電加熱処理キビ粉分散液の最高粘度は、処理時間が長くなるほど上昇した。この理由としてマイクロ波照射によりアミラーゼ活性が低下していることが考えられる。湿熱処理キビ粉においては、処理圧力が100kPa, 200kPa, 250kPaの場合に分散液の最高粘度が対照キビ粉の場合の約7倍であった。これは圧力と熱の作用によるアミラーゼ活性の低下に起因していると思われる。

物理処理キビ粉を用いて食パンならびにエクストルージョン加工による膨化食品を試作し、物理処理キビ粉が適用可能であることを確認した。本結果は栄養機能性が高いコンボジットフラワー食品製造への道を開くものである。

〔要 約〕

キビ穀粒に乾熱処理, 誘電加熱処理, 湿熱処理などを施して主にデンプンの糊化特性を改変し, 小麦粉代替機能を持たせた改質キビ粉を調製してパンやエクストルージョン加工食品などの膨化食品を開発することを目的にした。乾熱処理を施すとキビ粉粒子の多分散度は増加し, 湿熱処理を施すと減少する傾向にあった。物理処理を施すとキビ粉の白度が増加した。乾熱処理および誘電加熱処理は処理温度が高く, 処理時間が長くなるほど損傷デンプン含量を減少させたが, 湿熱処理は逆に増加させた。いずれのキビ粉もA型のX線回折図を示し, 湿熱処理はピーク強度を若干減少させた。無処理キビ粉も物理処理キビ粉も糊化開始温度は73~75°Cの範囲内であったが, 湿熱処理はデンプンの糊化終了温度と糊化に伴うエンタルピー変化を増加させた。いずれの物理処理もキビ粉分散液の加熱時の最高粘度, 最低粘度, 最終粘度, ブレークダウン, セットバックを増加させた。乾熱処理および誘電加熱処理

は処理温度の高さ、処理時間の長さに比例してキビ粉分散液の加熱時での最高粘度を増加させた。これらはキビ穀粒の内在アミラーゼが物理処理により失活することに帰因すると考えられた。また、物理処理キビ粉が膨化食品用途に改質されていることを確認した。

文 献

- 1) 阪本寧男：雑穀のきた道, p.23, 日本放送出版協会, 1988
- 2) 小原哲二郎：雑穀, p.152, 樹村房, 1981
- 3) Johnson, G. H. : *Cereal Food World*, **46**, 200, 2001
- 4) Nishizawa, N. and Fudamoto, Y. : *Biosci. Biotech. Biochem.*, **59**, 333, 1995
- 5) 堤 忠一 (新・食品分析法編集委員会編) : 新・食品分析法, p. 6, 光琳, 1996
- 6) 菅原 潔・副島正美 (瓜谷郁三・志村憲助・中村道徳・船津勝編) : 生物化学実験法 7 蛋白質の定量法, 第2版, p. 25, 学会出版センター, 1997
- 7) Erdahl, W. L., Stolywa, A. and Privett, O.S. : *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **5**, 513, 1973
- 8) 科学技術庁資源調査会食品成分部会 : 五訂日本食品標準成分表分析マニュアル, p. 42, 資源協会, 1997
- 9) American Association of Cereal Chemists : Approved Methods of the AACC, 9th ed., Method 76-30 A, Am. Assoc. Cereal Chem., 1995
- 10) 久下 喬・北村進一 : 澱粉科学, **32**, 65, 1985