

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05892

研究課題名（和文）サツマイモ低温糊化澱粉粒の分級澱粉特性と用途開発に関する研究

研究課題名（英文）Studies on properties and utilization of granular size-classified starches of the sweetpotato low temperature gelatinizing starch

研究代表者

北原 兼文（Kitahara, Kanefumi）

鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・教授

研究者番号：30240922

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：サツマイモ低温糊化澱粉から分級澱粉を調製し、それらの物理化学特性と利用特性を調べた。分級澱粉は、小粒子ほど糊化最高粘度と糊化熱の低下、アミロース含量の増大、アミロペクチンの超長鎖の減少と短鎖の増大などの変化が認められた。一方、主画分の中粒子の澱粉ゲルは、分級前より低い初期弾性率と高い破断前弾性率を示し、モチモチ感と歯切れの良いコシ感が高まることを見出した。また、低温糊化澱粉のうどん様茹で麺は、一般のサツマイモ澱粉の麺に比べて独特のコシ感のある食感を有し、さらに中粒子澱粉の麺は分級前より更にコシ感が増し、低温糊化澱粉の特徴が際立った高付加価値麺となることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、サツマイモ低温糊化澱粉の粒径の不均一性に着目し、粒子サイズにより分級した澱粉の構造特性と利用特性を明らかにした。その結果、粒径と分子構造との間に関連性を明らかにする一方、約300倍の体積比となる粒子間に澱粉固有の構造特性が保持されていることも見出し、澱粉粒の成長過程に関する澱粉科学の基礎知見を得ることができた。また、食品産業利用においては、大粒子と小粒子が除かれた主画分の中粒子澱粉とすると、分級前より低温糊化澱粉の特有の物性が際立つことを明らかにし、高付加価値澱粉素材としての用途を提案することができた。

研究成果の概要（英文）：Starch fractions classified by granular size were prepared from the sweetpotato starch with low gelatinization temperature (LGT-SPST), and their physicochemical and utilization properties were studied. It was found that the starch of the small-granule fraction had lower maximum viscosity and gelatinization enthalpy, higher amylose content, and fewer extra-long chains and more short chains of amylopectin. The starch gel of medium-granule fraction exhibited a lower initial elastic modulus and a higher pre-break elastic modulus than those of the original starch, indicating that the chewiness and crispness of the gel were improved after classification. In addition, boiled udon-like noodles made with LGT-SPST had a unique chewy texture compared to noodles made with ordinary sweetpotato starch. In particular, the noodles made with the medium-granule starch were even more chewy than before classification and had more distinctive texture, suggesting that they would be high value-added noodles.

研究分野：農学

キーワード：サツマイモ澱粉 低温糊化澱粉 分級澱粉 分子構造 物理化学特性 澱粉利用 不均一性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

南九州の地域糖質資源作物であるサツマイモは、主に焼酎や澱粉原料として利用されているが、従来のサツマイモ澱粉は澱粉特性に特徴がなく、食品としての用途が伸び悩んでいた。そこで、サツマイモ澱粉の利用を拡大するために、産学官連携プロジェクトによりユニークなサツマイモ澱粉の検索が開始され、糊化温度が従来のサツマイモ澱粉より約 20℃低い澱粉を有するサツマイモ品種「こなみずき」が育成された(片山ら, 九州沖縄農業研究センター報告, 58, 15-36, 2012)。この低温糊化澱粉は分子構造に特徴があり、アミロペクチンに極短鎖が多いため糊化澱粉が老化しにくく、またアミロペクチンに超長鎖も多いため複雑なネットワーク構造が形成されて優れたゲル形成能と特有の食感を有するなど(Kitahara et al., *J. Appl. Glycosci.*, 61, 81-88, 2014; Tokimura et al., *J. Appl. Glycosci.*, 64, 1-8, 2017)。これらの特性を生かしたパンや麺、菓子類などの食品が販売されるようになった。

上述のように、サツマイモ低温糊化澱粉は社会実装に至ったが、その澱粉粒子を顕微鏡観察すると、澱粉粒子のサイズや形状にバラツキが認められ、澱粉粒子間の不均一性に関して更なる興味を持たれた。実際に、昇降温制御可能なマイクロヒートプレート付顕微鏡で低温糊化澱粉の糊化の様子を観察すると、個々の粒子の糊化開始温度に不均一性が認められた。サツマイモ澱粉は、含まれる塊根の生長期間が約半年と長く、加えて粒度分布に特徴のある低温糊化澱粉を研究対象にすることは、澱粉粒の不均一性や生長過程に関する澱粉科学の新知見が大いに期待された。一方、低温糊化澱粉の更なる用途開発として、少数画分の大粒子や小粒子を除いた中粒子澱粉にすると、澱粉特性の品質が画一化されて優れた特性が際立つ可能性がある。これは、新たな高品質澱粉素材としての提供を示唆し、サツマイモ澱粉の需要拡大につながると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究は、サツマイモ品種「こなみずき」が産する特殊な低温糊化澱粉の更なる応用展開を目指す。そのために、サツマイモ低温糊化澱粉の不均一性に着目し、粒径により分級した澱粉の物理化学特性と利用特性を明らかにし、澱粉科学の基礎知見を得るとともに、低温糊化澱粉の新規用途開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1)実験材料

サツマイモ品種「こなみずき」の低温糊化澱粉は、株式会社サナス(鹿児島市)の市販品及び令和2年度に鹿児島県農業開発総合センター大隅支場(鹿屋市)でマルチシート栽培された塊根から調製した澱粉を用いた。また、サツマイモ普通澱粉は、澱粉原料用品種「こないしん」の調製品を用いた。

市販低温糊化澱粉の分級澱粉は、400メッシュ篩の不通過物を大粒子澱粉とし、その後、通過物の5リットル懸濁液を2時間放置し、沈殿画分と上澄み画分をそれぞれ中粒子澱粉と小粒子澱粉とした。さらに小粒子澱粉は、5リットルの懸濁液を5時間放置し、沈殿画分と上澄み画分をそれぞれ小粒子澱粉と微粒子澱粉とした。沈降速度による分画は5回繰り返した。

栽培塊根からの澱粉は、組織を摩砕後、ミラクロス(メルク社製)と200メッシュ篩で細胞残渣を除去後、沈殿と上澄み除去を繰り返して調製した。塊根澱粉の分級澱粉は、5リットル澱粉懸濁液を2時間放置し、沈殿画分と上澄み画分をそれぞれ大粒子澱粉と小粒子澱粉の2画分とした。

脱脂澱粉は澱粉粒のジメチルスルホキシド溶解とエタノール沈殿により調製し、アミロペクチンは脱脂澱粉からブタノール沈殿法によりアミロースを除去して調製した(Kitahara et al., 2014, 同上)。

### (2)澱粉の特性

澱粉粒の観察はライカ光学顕微鏡を用い、粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置(島津社製またはセイシン企業社製)で測定した。澱粉の粘度特性は7%澱粉濃度でラピッドビスコアナライザー(RVA TecMaster)により測定し、糊化特性は25%濃度で示差走査熱量計(日立ハイテク DSC 6100)により測定した。構造特性は、ヨウ素呈色法によるアミロース含量、脱脂澱粉の湿式灰化-無機リン酸測定による結合リン酸含量、また脱脂澱粉及びアミロペクチンをイソアミラーゼで枝切り処理後に構成単位鎖分布を高速液体クロマトグラフによるゲルろ過クロマト法(GPC-RID)と陰イオン交換クロマト法(HPAEC-PAD)により調べた。澱粉の老化性は2%澱粉糊液の低温白濁変化で評価した(Kitahara et al., 2014, 同上)。6%澱粉糊液の付着性は丸平型プランジャー付きクリープメータ(山電社製)で測定し、動的粘弾性はレオメータ(HAKKE社製)で測定した(時村ら, 応用糖質科学, 7, 29-34, 2017)。また、9%澱粉濃度の糊液をガラス容器(山電社製)に注ぎ4、24時間放置してゲルを形成後、ゲルの粘弾性をくさび型プランジャー付きクリープメータ(山電社製)で測定した。さらに、市販中力小麦粉(ニッポン社製)と澱粉を1:1の割合で混合してヌードルメーカー(フィリップス社製)によりうどん様麺を作成

した。この時、澱粉の 10% 分は糊液にして結着剤として使用し、全体の水分含量は 40% となるように調整した。6 分間の茹で麺 10 本について 3 か所ずつの粘弾性を同様にクリープメータで測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 市販サツマイモ低温糊化澱粉の分級澱粉の物理化学特性

市販低温糊化澱粉から大、中、小、微粒子の分級澱粉を調製した。図 1 は分級澱粉の顕微鏡写真を示す。澱粉粒のメジアン径は、分級前の  $21.4\ \mu\text{m}$  に対し、大粒子が  $45.6\ \mu\text{m}$ 、中粒子が  $29.3\ \mu\text{m}$ 、小粒子が  $9.5\ \mu\text{m}$ 、微粒子が  $6.8\ \mu\text{m}$  であり、また収量から求められる存在割合は、それぞれ 7.2%、73.5%、17.0%、2.3% であった。大粒子と中粒子は中央に黒い部分が観察されているが、この部分には亀裂による空隙が存在し (Kitahara *et al.*, 2014, 同上)、光の屈折により黒く見えているものと思われる。

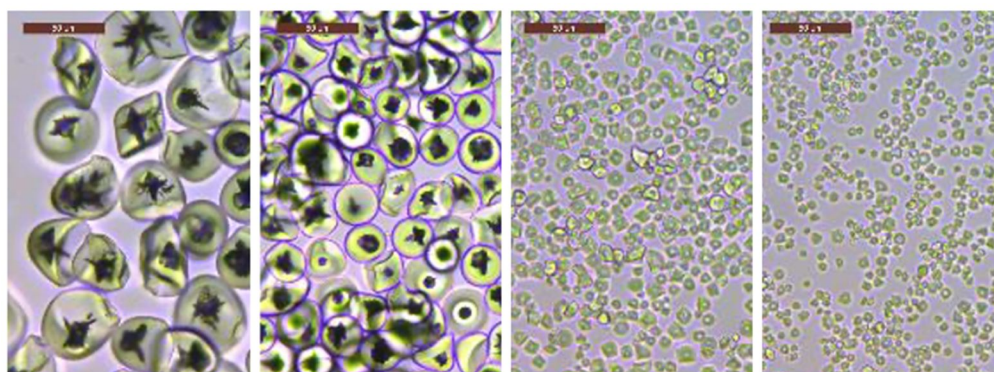


図 1 澱粉粒の顕微鏡写真  
(左から順に、大粒子、中粒子、小粒子、微粒子、左上のスケールバーは  $50\ \mu\text{m}$ )

RVA による粘度特性において、粘度上昇温度はいずれの分級澱粉も  $58.1\sim 58.6$  の範囲でほとんど変化がなかった。最高粘度は、分級前の 223 RVU に対し、大粒子が 258 RVU、中粒子が 250 RVU、小粒子が 191 RVU と小粒子ほど小さくなった。冷却後の最終粘度は、大粒子と中粒子が 210 RVU であるのに対し、小粒子は 274 RVU と高く老化しやすいことが示唆された。なお、微粒子は回収量が少なかったため RVA 測定ができなかった。

図 2 は DSC 糊化曲線を示す。純水中の DSC 測定では、小粒子と微粒子の糊化熱ピークが低温側にブロード化し、糊化熱が低下した。0.6 M KCl 水溶液中の DSC 測定では、水分子が澱粉の糊化と塩化物イオンの水和との間で競合し、この影響の受け方は澱粉粒の結晶構造の相違により異なり、直方晶系の A 型結晶は融解ピークのシフトが大きく、六方晶系の B 型結晶は融解ピークのシフトが小さいことが知られている (Lii and Lee, *Cereal Chem.*, 70, 188–192, 1993; Bogracheva *et al.*, *Biopolymers*, 45, 323–332, 1998; Fan *et al.*, *Food Hydrocolloids*, 66, 334–342, 2017)。大粒子と中粒子は、KCl 水溶液中で糊化ピークが高温側にシフトしていることから B 型結晶に加えて A 型結晶が混在することが示唆された。また、小粒子と微粒子は糊化ピークの変化が小さいことから主に B 型結晶構造を有し、それらの糊化熱は小さいことから結晶化度が低いことも示唆された。

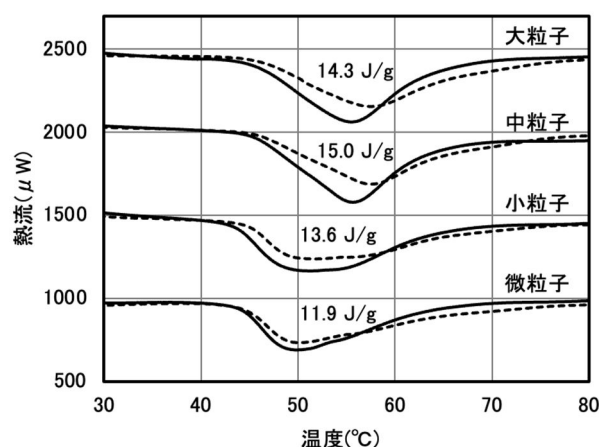


図 2 分級澱粉の DSC 糊化曲線  
(実線は純水中の測定、点線は 0.6 M KCl 水溶液中の測定、数値は純水中の糊化熱)

表 1 は分級澱粉の分子構造特性値を示す。澱粉のアミロース含量は、ヨウ素呈色法及びゲルろ過クロマト法 (GPC-RID) のいずれの方法でも粒径が小さくなるにつれ増大したが、小粒子と微粒子は同程度であった。本研究で見出された粒径とアミロース含量との負の関連性は、既報の一般的な糊化温度を有するサツマイモ澱粉とは異なっており (Ye *et al.*, *Food Hydrocolloids*, 108, 106023, 2020)、低温糊化澱粉の特性として興味深く思われた。一方、澱粉の結合リン酸含量は粒径との関連性が認められなかった。低温糊化澱粉のアミロペクチンの構造は、重合度 6~10 の短い構成単位鎖が多く、また重合度 150 以上のアミロース様の超長鎖が多いことも特徴で

表1. 分級澱粉の分子構造特性

分級澱粉	ヨウ素呈色法による	GPC-RID法による	結合リン酸含量 ( $\mu\text{mol/g}$ )	アミロペクチンの構成単位鎖	
	アミロース含量 (%)	アミロース含量 (%) <sup>*</sup>		> DP150 (%) <sup>**</sup>	DP6~10/DP6~30 (%) <sup>***</sup>
大粒子	17.2	14.5	1.41	4.4	26.1
中粒子	19.0	15.0	1.66	4.0	26.8
小粒子	19.6	16.9	1.64	3.8	28.1
微粒子	19.4	17.1	1.94	3.6	28.8

<sup>\*</sup> GPC-RID法による脱脂澱粉の重合度(DP) > 150の構成単位鎖の割合からアミロペクチンのDP > 150の構成単位鎖(超長鎖)の割合を引いた値、<sup>\*\*</sup> GPC-RID法によるアミロペクチンのDP > 150の構成単位鎖(超長鎖)の割合、<sup>\*\*\*</sup> HPAEC-PAD法によるDP6~30の構成単位鎖のピーク総面積に対するDP6~10の構成単位鎖のピーク面積の割合

ある(Kitahara *et al.*, 2014, 同上; Tokimura *et al.*, 2017, 同上)。分級澱粉のアミロペクチンの構成単位鎖分布はいずれの粒子画分も低温糊化澱粉の特徴を有していたが、粒径が小さくなるにつれ、アミロペクチンの超長鎖は減少し、DP6~10の短鎖は増大した。これらの結果は、粒径の増大が粒子の成長過程を反映しているとする、粒子の成長に伴う分子構造変化を示す一方、微粒子と大粒子とは体積比が概ね300倍あるにもかかわらず、低温糊化澱粉の固有の構造特性は微粒子の時点ではほぼ完成していることを示しており、澱粉科学における興味深い基礎知見を得ることができた。

## (2) 分級低温糊化澱粉の利用特性

低温糊化澱粉は分子構造の特殊性により耐老化性を有している。分級澱粉の老化性を調べた結果、小粒子の2%糊液は老化速度が速く、アミロース含量が高いことを反映していると思われた(データ省略)。そこで本研究では、少数画分の大粒子や小粒子を除いて主画分(73.5%)の中粒子澱粉にすると、澱粉特性の品質が画一化されて優れた特性が際立つ可能性があると考え、分画前澱粉と中粒子澱粉の物性や利用特性を調べた。

RVA 粘度特性と DSC 糊化特性では、中粒子澱粉の RVA 最高粘度がやや高いことを除くと、その他の粘度及び糊化特性はほとんど変わらなかった(データ省略)。6%澱粉糊液の付着性は、分級前(403 J/m<sup>3</sup>)に比べ中粒子澱粉(482 J/m<sup>3</sup>)で高く、また同糊液の貯蔵弾性率は中粒子澱粉で低いことから(図3)、中粒子澱粉の糊液は粘りのあるソフトなゲルを形成することが分かった。

表2は9%澱粉ゲル及びうどん様茹で麺の物性を示す。澱粉ゲルの初期弾性率と破断前弾性率の比として求めたコシ感は、分級前に比べて中粒子澱粉が高かった。元来、「こなみずき」澱粉はコシ感のあるゲルを形成することが特徴であったが(Tokimura *et al.*, 2017, 同上)、中粒子澱粉とするとソフトなモチモチ感と歯切れの良いコシ感のある独特のゲル食感になることが明らかとなった。さらに、小麦粉と澱粉を用いたうどん様麺をヌードルメーカーで作成し、茹で麺の物性をクリープメータで調べた。分級前の低温糊化澱粉のうどん様茹で麺は、一般サツマイモ澱粉の茹で麺に比べて、明らかにコシ感のある食感を有していた。また、中粒子澱粉の茹で麺は分級前の茹で麺より更にコシ感が増し、低温糊化澱粉の特徴が際立った高付加価値麺となることが示唆された。

表2. 9%澱粉ゲル及びうどん様茹で麺の物性

	9%澱粉ゲル <sup>*</sup>				うどん様茹で麺 <sup>**</sup>			
	初期弾性率 (kPa)	破断前弾性率 (kPa)	コシ感 /	破断荷重 (N)	初期弾性率 (kPa)	破断前弾性率 (kPa)	コシ感 /	破断荷重 (N)
低温糊化澱粉(こなみずき)								
分級前	19.2 ± 0.4	183.3 ± 15.2	9.5 ± 0.7	1.27 ± 0.08	17.9 ± 1.7	529.6 ± 105.8	29.7 ± 6.1	2.08 ± 0.26
中粒子	15.7 ± 0.5	188.5 ± 10.8	12.0 ± 0.8	1.33 ± 0.03	17.3 ± 1.7	582.6 ± 75.2	33.9 ± 5.0	2.04 ± 0.17
一般澱粉(こないしん)								
—	—	—	—	—	27.3 ± 5.5	307.7 ± 99.7	11.9 ± 4.7	2.26 ± 0.44

<sup>\*</sup>  $\eta=4$ , <sup>\*\*</sup> 各試料の10本について3か所ずつ測定( $n=30$ )

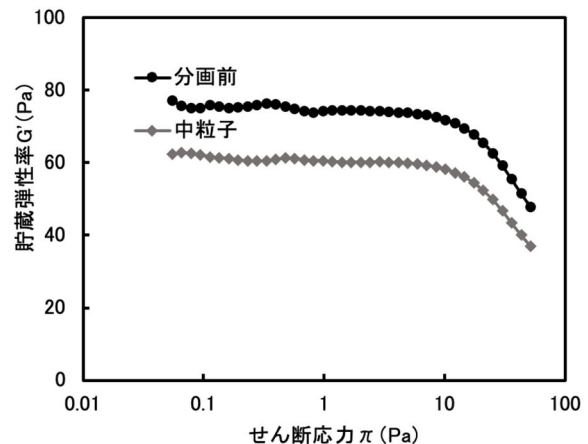


図3 澱粉糊液(6%澱粉)の貯蔵弾性率

### (3) 生育期間の異なる塊根の低温糊化澱粉の特性

「こなみずき」塊根について、生育期間 120 日の小塊根（平均塊根重 118.6 g）及び 180 日の成熟塊根（同 358.5 g）から澱粉を調製した。前述の市販低温糊化澱粉を用いた研究において、大粒子と中粒子は物理化学特性が類似したことから、大粒子澱粉（大粒子と中粒子）と小粒子澱粉（小粒子と微粒子）の 2 画分を研究対象とした。

澱粉粒のメジアン系は、小塊根の分級前が 18.1  $\mu\text{m}$ 、小塊根の大粒子が 19.7  $\mu\text{m}$ 、小粒子が 8.6  $\mu\text{m}$  であり、成熟塊根の分級前が 19.7  $\mu\text{m}$ 、大粒子が 21.3  $\mu\text{m}$ 、小粒子が 8.2  $\mu\text{m}$  であった。成熟塊根の分級前澱粉と大粒子澱粉の粒径は小塊根のものより大きく、塊根の生長に伴う澱粉粒の増大が認められた。しかし、両塊根から得られた大粒子澱粉の粒径は、前述の市販澱粉から得られた中粒子澱粉よりも小さく、原因は不明であるが、本研究で調製した塊根澱粉の粒度分布は小さく偏っていた。

RVA 粘度特性では小塊根と成熟塊根の小粒子澱粉がいずれも低い最高粘度と高い最終粘度を示し、DSC 糊化曲線ではいずれの小粒子澱粉も糊化吸熱ピークがブロード化することが認められ、これらは市販澱粉の結果と一致した（データ省略）。澱粉のアミロース含量は、小塊根の大粒子澱粉が 18.8%、小粒子澱粉が 20.4% で、成熟塊根の大粒子澱粉が 19.1%、小粒子澱粉が 21.2% であり、小塊根より成熟塊根の方が高かった。また、両塊根由来の小粒子澱粉は大粒子澱粉より高く、このことは市販澱粉の結果と一致した。一方、アミロペクチンを構成する極短鎖や超長鎖などの鎖長分布は類似しており、市販澱粉の粒子間で見出された分子構造の相違は認められなかった。

以上のように、生育期間の異なる塊根から調製した澱粉において、塊根間では澱粉の粒径やアミロース含量に相違が認められ、また両塊根の小粒子澱粉はアミロース含量が高かった。一方、小塊根と成熟塊根は生育期間が 2 ヶ月異なるにもかかわらず、いずれの分級澱粉のアミロペクチン構造は比較的類似していた。当初、生育期間の異なる塊根から得られる澱粉は、それらの分級澱粉に生育段階や環境の相違による影響が現れると考えていたが、市販澱粉の分級澱粉に見出された微粒子からアミロペクチンの固有構造が整っていることに加え、マルチシート被覆による栽培条件が整った圃場では澱粉特性がより安定化したため相違が現れにくかったのではないかと考えた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 北原兼文、前田三季、藤田清貴
2. 発表標題 分級サツマイモ低温糊化澱粉の物理化学特性について
3. 学会等名 日本応用糖質科学会2021年度大会（第70回）
4. 発表年 2021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
研究協力者	時村 金愛  (Tokimura Kanae)		

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
---------	---------