

【研究ノート】

尼崎地域で栽培されてきた サツマイモの「尼いも」に関する研究

——成分特性と澱粉の糊化・糖化反応について——

中 野 博 文

要旨

尼崎地域で栽培されてきたサツマイモである「尼いも」に含まれる成分および澱粉の糊化・糖化特性などを「鳴門金時」、「紅優甘」など他品種と比較した。尼いもの可食部 100g 当たりの水分は約 68.4g で他品種と大差なかった。澱粉量は約 19.2g/100g で他品種 (25~27g/100g) よりかなり低含量であった。加熱時に糊化澱粉をマルトース (Mal) に分解する酵素である β -アミラーゼ (β AM) 活性は、尼いもでは約 530 単位/g で他品種 (約 350~800 単位/g) と比べ中程度であった。尼いもの難消化性成分は約 3.8g/100g で他品種 (約 2.5~2.7g/100g) の約 1.5 倍多かった。摩砕物の糖化の開始温度は紅優甘と鳴門金時が 70℃ 以下、尼いもはより高温の 75℃ であった。そこで澱粉を抽出・精製し、それらを用いて β AM 分解性により糊化開始温度を調べた。その結果、紅優甘澱粉が約 61℃、鳴門金時澱粉が約 65℃、尼いも澱粉が約 72℃ であった。次に酵素が作用可能な上限温度である熱安定域を調べた。可食部から抽出した溶液状態の β AM はいずれの品種でも約 65~70℃ まで安定であったが、基質や生成物などが共存する磨砕物中では約 15~20℃ 安定化された。したがって組織中での糖化が十分に進行する澱粉糊化開始から酵素熱失活までの温度域は、紅優甘で約 61~85℃ (温度幅 24℃)、鳴門金時で約 65~80℃ (同 15℃) であるのに対し、尼いもは約 72~80℃ (同 8℃) と狭く、これが加熱した場合に尼いもが甘くなりにくい主な原因と考えられた。次に尼いも澱粉が高温糊化性となる原因について検討した。顕微鏡観察すると低温糊化性の紅優甘の澱粉粒には亀裂があり、この部分から糊化・膨潤がみられた。一方、高温糊化性の尼いもでは亀裂は観察されず、澱粉粒形状も糊化温度の相違の一因と考えられた。尼いも澱粉中のアミロース含量には他品種と大差なかったが、限界デキストリンの比率や分岐頻度がやや低く、尼いも澱粉では結晶構造を作りやすいアミロペクチンの長い側鎖割合が大きいことも高温糊化性の一因と推察した。

1. はじめに

サツマイモは、わが国で年間約 80~90 万トン生産されている重要な畑作物である。近年は高甘味、ネットリ感・シットリ感、色素含有など多様な特長をもつ品種が、加工食品用、焼きいも用、糖化原料などとして栽培されている。サツマイモの熱量は可食部 100g 当たり 126kcal である^{1,2)}。サツマイモの澱粉は塊根のアミロプラスト中に澱粉粒と呼ばれる形で貯蔵されている。澱粉粒は生澱粉とも呼ばれ、結晶性が高く水不溶性であり、組織中に共存している澱粉分解酵素

の β -アミラーゼ (β AM) は全く作用しない。しかしサツマイモが一定温度以上に加熱されると、澱粉鎖の結晶構造がゆるみ、水分子が侵入 (加水) して澱粉は糊化状態となる。糊化澱粉は β AM により速やかに加水分解されてマルトース (Mal) が生成する³⁻⁵⁾。Mal の甘味度はスクロースの 0.35 倍と高くないが、通常、サツマイモでは多量に生成するため、焼きいもなどに甘味、シットリ感・ネットリ感など独特の食味を付与する。またサツマイモは炭水化物、タンパク質 (約 1.2g)、脂質 (約 0.2g) などの消化性成分に加えて食物繊維 (約 2.2g) を比較的少量に含む^{1,2)}。食物繊維はヒトに消化・吸収されない栄養素で、食後血糖値の上昇抑制、コレステロール低下、整腸・プレバイオティックス効果など様々な健康の維持・増進機能も報告されている^{6,7)}。

本研究の対象である「尼いも (アマイモ)」は、兵庫県尼崎市の南部で江戸時代後期から栽培されてきたサツマイモである。昭和期の台風被害により一旦は絶滅したが、近年、市民運動などにより復活し、地場野菜・地域資源としての活用も期待されている⁸⁾。しかし従来、尼いもの栄養や成分面の特徴、おいしさ・甘味などに大きく関わる澱粉や β AM の含有量あるいは澱粉の酵素糖化反応の温度依存性など、学術面の解明は十分とは言い難かった。そこで本研究では、尼いものこれらの特性を中心に数種の市販品種と比較した。

2. 材料と方法

2-1 澱粉、酵素、化学試薬など

β AM 活性測定用基質の可溶性澱粉はナカライテスク社製、サツマイモ澱粉 (品種不明) は和光純薬社製を用いた。澱粉および難消化性成分の測定などに用いた耐熱性 α -アミラーゼ (TAM)、アミログルコシダーゼ (AG)、プロテアーゼ (PR) などは、富士フィルム・和光純薬社製の食物繊維測定 (Prosky 法、酵素・重量法)^{9,10)}用キットの酵素をそのまま用いた。サツマイモ由来 β AM はナカライテスク社の結晶標品 (比活性 1,004U/mg-タンパク質、5,150U/mL)、パチルス属由来プルラーゼ (PUL) はシグマ・アルドリッチ社製の精製標品 (比活性、1,000 NPUN 以上/g) を使用した。グルコース (Glc) の特異的定量に用いるグルコースオキシダーゼ (GOD) 試薬¹¹⁾は、グルコース・テスト Wako (和光純薬社製) を用いた。その他の薬品は化学試薬グレードのものを使用した。

2-2 サツマイモ試料

尼いもは兵庫県西宮市内で収穫され、冷暗所に保存したものを 3 月以内に使用した。「鳴門金時 (ナルトキントキ、徳島県産)」、「紅優甘 (ベニユウカ、茨城県産)」、「安納芋 (アンノウイモ、鹿児島県産)」、「シルクスイート (宮崎県産)」、「マロンゴールド (鹿児島県産)」、「紅あずま (ベニアズマ、茨城県産)」、「紅こがね (ベニコガネ、茨城県産)」、「五郎島金時 (ゴロウジマキントキ、石川県産)」などはいずれも中サイズで、品種・産地が明示されている市販品を近畿

圏の店舗で購入した。使用時まで約 15℃ の暗所に新聞紙に包み保存した。実験には両端及び皮部を除去し、中央の可食部を使用した。

2-3 還元糖と全糖量の測定

還元糖はジニトロサルチル酸 (DNS) 法¹²⁾で定量した。標準物質には β AM 活性測定では Mal、その他の還元糖として定量する場合には Glc を用いた。540nm における吸光度測定は HITACHI 分光光度計 U-5100 型を用いた。全糖量はフェノール・硫酸法¹³⁾で Glc を標準として 490nm で測定した。GOD 法¹¹⁾は 505nm で測定した。

2-4 水分の測定

水分は常圧乾燥減量法¹⁴⁾で測定した。可食部磨砕物 (約 20g) を秤量用アルミ皿に精秤し、105℃ で 3 時間乾燥後、減少重量を測定した。

2-5 澱粉の測定

磨砕物中の澱粉の定量は、齋藤らの報告¹⁵⁾を参考として以下のステップで行った。なおこの方法は試薬として購入したサツマイモ由来澱粉を用いて検証し定量性に問題がないことを確認した (データ未記載)。

(1) 澱粉糊化：磨砕試料 (湿重量 0.5g、試薬澱粉 10~70mg) を 50mL 容蓋つきバイアル瓶に精秤し、0.05M NaOH 溶液 5.0mL を添加後、100℃ で 5 分間以上かく拌しながら澱粉を糊化させると共に含まれる β AM を失活させた。冷却後、0.05M 酢酸溶液 5.0mL で中和し、0.1M 酢酸緩衝液 (pH5.0) 5.0mL を添加して所定 pH に調整した。

(2) AG 分解：AG 液 10 μ L を添加して 40℃ で 20 時間反応させ澱粉を Glc に分解した。

(3) Glc 定量：生成 Glc を GOD 法で定量した。なお澱粉は Glc が脱水縮合した構造として、澱粉量は Glc 量に 162/180 (0.90) を乗じてアンヒドログルコース量として算出した。

2-6 澱粉の抽出・精製

サツマイモ澱粉は齋藤らの方法¹⁶⁾を参考として次の手順で抽出・精製した。

(1) 可食部 300~700g を手動の市販おろし器で磨砕した。磨砕物は冷水 (約 5℃) 約 300mL に分散、懸濁させた。これを 3 重のガーゼでろ過し、白濁した抽出液 (澱粉乳) を回収した。残渣を冷水に再度分散させ、同様にガーゼろ過した。この操作をさらに 2 回繰り返す、得られた澱粉乳を合した。

(2) 澱粉乳を冷所 (5℃) で 2 時間静置して澱粉を沈でんさせ、上清をデカンテーションで除去した。沈でんを冷水約 2L に懸濁させ、再度 2 時間静置後、デカンテーションで沈でんした澱粉を集めた。沈でんを冷水に懸濁させ、ろ紙 No.2 を置いたプフナーロート上に吸引ろ過により白色の澱粉沈でんを集めた。

(3) 澱粉をバットに広げ、時々粉碎しながら乾燥シリカゲル・ブルーを入れたデシケータ中で十分に減圧乾燥した。可食部湿重量に対する澱粉粉末の収率（水分を測定して補正）は、尼いもで約 10.7%、鳴門金時で約 12.5%、紅優甘で約 15.2% であった。

2-7 難消化性成分量の測定

本研究では Prosky 法^{9, 10)}に準じて可食部磨砕物を酵素分解し、低分子化されない有機溶媒不溶性の残渣重量を「難消化性成分」として、以下のステップで測定した。

(1) 酵素消化：消化酵素（TAM、AG、PR）は食物繊維測定キットのものを用いた。磨砕物（湿重約 2g）を 50mL 容 Falcon コニカルチューブ（コーニング社製）に精秤し、Tris-Mes 緩衝液（pH6.3, 所定量の NaCl, CaCl₂ を含む）10mL を加え、90℃ で 10 分間以上加熱して、澱粉を十分に糊化させた後、TAM 溶液 50μL を加えて 90℃ で 30 分間作用させた。冷却後、AG 溶液 50μL を添加して 60℃ で 60 分間、さらに PR 溶液 50μL を追加して 60℃ で 20 時間反応させた。

(2) 残渣ろ別と有機溶媒洗浄：酵素消化液に 99.5% エタノール 25mL（終濃度：約 70%, v/v）を加えて室温で 3 時間放置後、自然ろ過で No.2 ろ紙上に沈でんを集めた。ろ紙上の沈でんを 70% エタノール溶液 10mL で 3 回、99.5% エタノール 10mL、アセトン 10mL で順次洗浄した。

(3) 乾燥・秤量：残渣を秤量用アルミ皿に移し、105℃ で 3 時間乾燥させた。乾燥デシケータ中で冷却後に精秤し、風袋アルミ皿重量を差し引いた乾燥固形物の重量を難消化性成分量とした。

2-8 βAM 酵素液（液状酵素）の調製と活性測定

磨砕物 1.0~5.0g を 50mL 容コニカルチューブに精秤し、蒸留水 15mL を加えて十分にタッチミキサーでかく拌・分散させた。この試料を HITACH himac CF15R を用いて、3,500rpm で 15 分間、5℃ で遠心分離して上清をとり、これを同条件で再度遠心分離して不溶物を完全に除去したものを酵素液とした。

活性測定には 1.0mM エチレンジアミン四酢酸（EDTA）Na を含む 50mM リン酸緩衝液（pH 5.6）で適宜希釈した酵素液を用いた。糊化させた 1.0%（w/v）可溶性澱粉溶液 0.1mL に酵素液 0.1mL を添加し、40℃ で 10 分間反応させた。強アルカリ性である DNS 試薬 0.8mL を添加して酵素反応を停止させ、生成した Mal を DNS 法で比色定量した。酵素活性 1 単位（U）は、上記条件下で 1 分間に反応液 1.0mL 当たり 1μmol の Mal を生成させる酵素量と定義した。

2-9 磨砕物加熱による Mal 生成量測定

可食部磨砕物 1.0g（湿重量）を 18mmφ 試験管に秤取し、蒸留水 1.0mL を加えた。この試料を 40℃ で 5 分間予温後、70~80℃ としたブロックヒーター（ヤマト科学社製 HF-41）で 15 分間加熱した。加熱後、氷温に冷却した 70%（v/v）エタノール溶液 3.0mL を加えて激しくかく拌して反応を停止させた。さらに蒸留水 5.0mL を添加してかく拌後に静置し、上清の Mal を DNS 法で定量した。

2-10 β AM 分解性に基づく糊化開始温度の測定

水分補正した澱粉として終濃度 10mg/mL の水懸濁液 1.0mL を 50℃ で 5 分間予温した。これらをかき拌しながら 60℃～100℃ で 10 分間加熱した。加熱後は流水中で速やかに冷却した。これらに 1mM EDTA を含む 50mM 酢酸緩衝液 (pH5.6) で希釈したサツマイモ由来の試薬 β AM 溶液 1.0mL (1.03U/mL) を加えて 40℃ で反応させた。10 分間あるいは 20 時間反応後、反応液 (沈殿がある場合は上清) 0.2mL をサンプリングし、DNS 法で Mal 量を測定した。

2-11 液状酵素の熱安定性測定

試験管中で 60～75℃ の各温度に予温した緩衝液 1.8mL に、液状酵素液 0.2mL を加え 10 分間加熱した後、氷水中で急冷し、緩衝液で適宜希釈後に残存活性を測定した。室温 (20℃) で保存した試料の活性を 100% として相対活性を算出した。

2-12 磨砕物中の酵素 (磨砕物酵素) の熱安定性測定

コニカルチューブに磨砕物 1.0g を取り、45℃ で 5 分間予温後、70～90℃ で 10 分間加熱した。緩衝液 9.0mL を加え、4,000rpm で 10 分間、5℃ で遠心分離して上清を得た。これらを適宜希釈して活性測定した。20℃ 保存の試料から同様に上清を調製し、その活性を 100% として熱処理した磨砕物酵素の残存活性を算出した。なお加熱処理中に、磨砕物中の澱粉も酵素分解されるため、加熱後に酵素液に含まれる還元糖を別途測定し、ブランクとして差し引いて活性値を補正した。

2-13 澱粉粒の糊化状態の顕微鏡観察

澱粉粉末の水懸濁液 (約 0.5g/5.0mL) の 1 滴をスライドガラス上に滴下し、カバーガラスをつけて糊化開始温度 (紅優甘澱粉、61℃; 尼いも澱粉、72℃) にセットしたブロックヒーター上に密着させて 2 分間加熱した。加熱後速やかに、オリンパス BX51 位相差顕微鏡を用いて 300 倍で検鏡した。加熱していない試料と澱粉粒の形状を比較した。

2-14 ブルー・バリュウ測定

ブルー・バリュウ (青色価、BV) は井ノ内らの論文¹⁷⁾を参考にして測定した。沸騰水中で予め十分糊化させた 1.0% (w/v) 澱粉溶液 0.1mL を、蒸留水 3.8mL、250mM リン酸緩衝液 (pH 5.6) 1.0mL で希釈した。この試料液に 0.05N I₂-KI 溶液 0.1mL (使用時 0.1N 溶液から調製、終濃度 0.001N) を加え、25℃ で 15 分後に 620nm における吸光度を測定した値を BV とした。また澱粉濃度はフェノール・硫酸法で Glc を標準として定量し、澱粉 (Glc μ mol/mL) 当たりの BV 値の比率を算出して各澱粉の比較を行った。

2-15 限界デキストリン測定

沸騰水中で予め十分糊化させた 1.0% (w/v) 澱粉溶液 5.0mL に 50mM リン酸緩衝液 (pH5.6) 4.0mL を加えた基質溶液に同緩衝液で希釈したサツマイモ由来試薬 β AM 溶液 (5.2U/mL) 1.0 mL を加えて 40°C で 20 時間反応させた。生成した還元糖は Mal を標準として DNS 法で定量した。澱粉濃度はフェノール・硫酸法で全糖量を定量して、2 モルの Glc を Mal1 モルとして換算した。この Mal 換算澱粉量に対して酵素分解で生成 Mal の割合を β AM 分解率 (%) とし、残余を限界デキストリン (LD, %) とした。

2-16 アミロペクチン分岐頻度の測定

沸騰水中で十分に糊化させた 1.0% (w/v) 各澱粉溶液 5.0mL に 50mM リン酸緩衝液 (pH5.6) 4.0mL、PUL 溶液 (10U/mL) 1.0mL を加え、40°C で 20 時間反応させた。生成した還元糖は Mal を標準として DNS 法で定量した。一方、澱粉濃度をフェノール・硫酸法で Glc を標準として定量した。澱粉の Glc 残基数 (Glc μ mol/mL) に対する還元糖生成量 (Mal μ mol/mL) の比率を分岐頻度とした。

3. 結果と考察

3-1 水分量

尼いもなど数品種のサツマイモの可食部について水分量を測定した。尼いも 100g 当たりの水分量の平均値は 68.4g で、これは鳴門金時 (65.1g)、紅優甘 (59.3g)、安納芋 (64.1g)、シルクスweet (63.2g) あるいは日本食品標準成分表 (以下、食品成分表)²⁾記載値 (塊根皮なし・生; 65.6g) などよりやや高い値であった。しかし水分は産地、栽培時の気象、収穫時期、貯蔵状態や期間など様々な条件が影響していると考えられ、品種の相違に帰するまでには至らなかった。

3-2 β AM 活性

尼いもなどの可食部湿重量 1g 当たりの β AM 活性を表 1 に示す。活性の平均値を比較すると、紅優甘 (752U/g)、マロンゴールド (792U U/g)、安納芋 (740U/g) などは比較的高く、鳴門金時 (353U/g)、宮崎紅 (427U/g) などはやや低活性であった。尼いもの活性は約 530U/g であり、紅あずま (510U/g)、シルクスweet (471U/g) などと同程度で、調べた品種の中では中程度の活性であった。

磨砕物から酵素液を抽出し、可溶性澱粉に作用させた反応液を薄層クロマトグラフィーで分析した。いずれの品種でも Mal 以外の Glc やオリゴ糖などは検出されなかった (データ未記載)。サツマイモ塊根にはグルコアミラーゼ、 α -アミラーゼなどの β AM 以外の澱粉分解酵素の活性はほとんど示さないことが知られているが^{3,4)}、尼いもも β AM の活性しか示さないことが確認さ

れた。

表1 尼いもおよびサツマイモ数品種のβAM活性
 摩砕物は1.0gを精秤し、2-8に記載した方法で活性測定した。

品 種	試料数	βAM 活性 (U/g-湿重量)	
		平均値	標準偏差
尼いも	3	531	6.6
鳴門金時	11	353	115
宮崎紅	16	427	177
紅優甘	6	752	212
紅あずま	6	510	188
シルクスweet	3	471	224
マロンゴールド	4	792	100
安納芋	3	740	73

3-3 澱粉量

サツマイモ澱粉は、加熱調理した場合の甘味だけでなく、独特のホクホク感、ネっとり感、シっとり感などの食味^{3, 18)}、あるいは熱量など多岐の特性に関連している成分である。そこで尼いもおよび数品種の澱粉量を2-5に記載した方法で測定した(図1)。食品成分表に記載されている可食部湿重量100g当たりの澱粉量は24.5gである²⁾。この値と比べて尼いも以外の品種は、ほぼ同程度かあるいはやや高い値(約25~27g)を示した。一方、尼いもの平均値は19.2gで、他品種より約20%以上低いことが判明した。水分などと同様に澱粉量も産地、気象、収穫時期・期間、貯蔵など様々な条件に影響されると推察されるが、尼いも澱粉量は顕著に低いことが

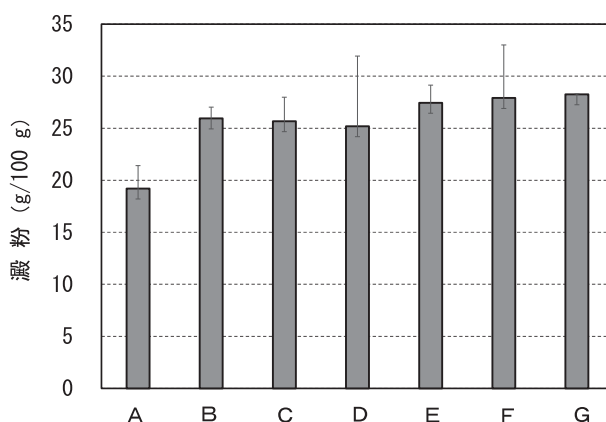


図1 尼いもおよびサツマイモ数品種の澱粉量

縦軸は可食部湿重量100g当たりの澱粉量(g)。バーは標準偏差を表す。A, 尼いも(試料数n=8); B, 鳴門金時(n=6); C, 紅優甘(n=6); D, シルクsweet(n=7); E, 安納芋(n=3); F, 宮崎紅(n=2); G, 五郎島金時(n=2)

わかった。

3-4 難消化性成分

サツマイモには非消化性の成分として灰分（1.0%）や Prosky 法^{9, 10}で測定した食物繊維（2.2%）などが含まれている²。本研究では 2-7 で記載したように、Prosky 法に準じて可食部中の澱粉やタンパク質などを酵素消化し、低分子化されない残渣重量を食物繊維にほぼ相当する量として簡易的に「難消化性成分」とした。図 2 に示すように、鳴門金時、紅優甘、安納芋の難消化性成分は約 2.5~2.7g であり、これらの実験値は食品成分表の食物繊維量（可食部 100g 当たり 2.2g）² よりやや高い値となった。これは本研究では補正していない灰分量などの影響ではないかと考えている。尼いもの難消化性成分量は約 3.8g であった。これは同じ条件で定量した他品種の約 1.5 倍、食品成分表記載の食物繊維量の約 1.7 倍となり、サツマイモの中でもかなり高い含有量であると考えられた。

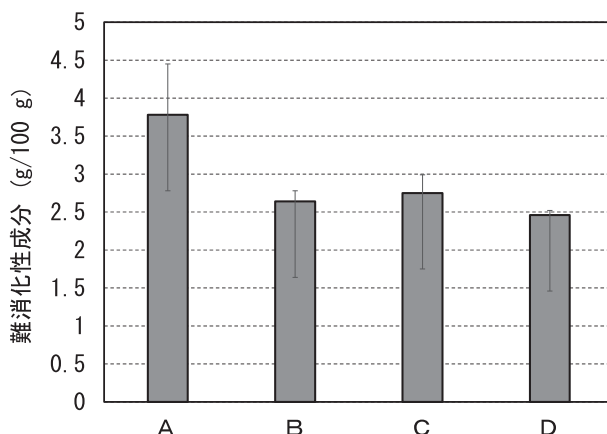


図 2 尼いもおよびサツマイモ数品種の難消化性成分量

縦軸は可食部湿重量 100g 当たりの難消化性成分量。バーは標準偏差を表す。A, 尼いも (試料数 n=7)；B, 鳴門金時 (n=6)；C, 紅優甘 (n=9)；D, 安納芋 (n=4)

3-5 磨碎物の糖化に対する温度の影響

尼いもおよび数品種の磨碎物を 2-9 に記載した方法で、70℃、75℃、80℃ の各温度、15 分間加熱し Mal 生成量を測定した (図 3)。紅優甘の磨碎物の分解開始は 70℃ 以下で最も低く、70℃ では既に多量の Mal が生成した。鳴門金時、シルクスweet、安納芋では 70℃ では糖化が開始しており、温度上昇とともに Mal 量はさらに増加した。一方、尼いもは 75℃ でもわずかしかな分解はみられず、80℃ における Mal 生成量は他品種より低かった。尼いもの β AM 活性 (約 540U/g) は他品種 (約 340~830U/g) と遜色ない活性が存在している。また 75~80℃ でも反応が進行しているため、75℃ で酵素が熱失活しているとは考えにくい。はじめに述べたように β AM は糊化した澱粉にのみ作用する³⁻⁵。そこでこの様な糖化の温度依存性は主に澱粉の糊化状

態すなわち糊化開始温度の相違に依存していると考えられた。そこで澱粉と酵素をそれぞれ単離・抽出し、それらを用いて糊化温度と酵素の熱安定性について以下の検討を行った。

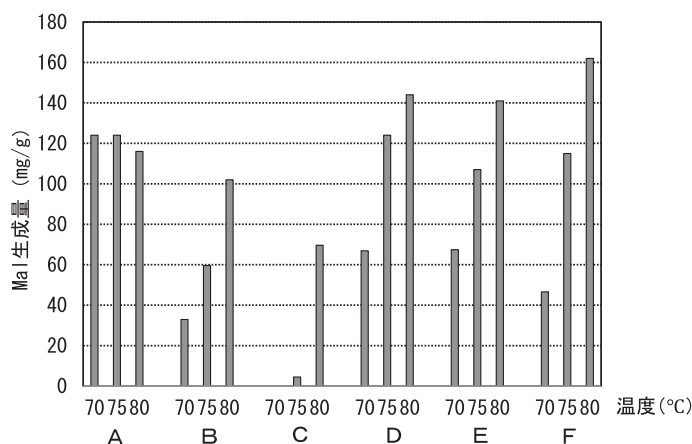


図3 尼いもおよびサツマイモ数品種の摩砕物の糖化に対する加熱温度の影響

2-9に記載した方法で摩砕物を70℃、75℃、80℃で15分間加熱した。縦軸は湿重量1g当たりのMal生成量である。A, 紅優甘* (摩砕物中のβAM活性, 597U/g) ; B, 紅こがね (343U/g) ; C, 尼いも (538U/g) ; D, 鳴門金時 (536U/g) ; E, シルクスイート (597U/g) ; F, 安納芋 (830U/g)。*紅優甘 (75~80℃) の試料では糊化澱粉などがゲル化して抽出が不完全となり Mal 量が見かけ上少なくなっている可能性がある。

3-6 澱粉の抽出・精製

尼いも、鳴門金時、紅優甘に含まれる澱粉を2-6に記載した方法で抽出・精製した。磨砕物100g当たりの澱粉の収率(水分補正後)は、鳴門金時が約12.4g、紅優甘が約15.0g、尼いもが約10.7gであった。磨砕物からの澱粉粒の抽出あるいはガーゼろ過やデカンテーションなどの操作において澱粉は完全に回収されないため、これらの値は直接測定した澱粉量(図1)の約50~60%に相当した。

3-7 糊化開始温度の測定

一般に澱粉の糊化など熱による状態変化や相転移などの物性変化の解析には示差走査熱量計(DSC)などが用いられる場合が多いが、本研究ではβAMによる反応性に基づいて糊化開始温度を測定した。すなわち抽出・精製した澱粉の懸濁液を糊化が開始すると考えられる温度(60~100℃)で10分間加熱した。これら未糊化/糊化状態の基質液に試薬βAM(サツマイモ由来の精製酵素)を添加して40℃で反応させ、反応初期である10分間後および20時間反応後のMal生成量を測定した。βAMは未糊化澱粉には作用しない³⁻⁵⁾ためMalが検出され始める温度が糊化温度となる。図4に示すように10分間反応では紅優甘澱粉は60℃~65℃の間で分解が始まり、65℃では分解がかなり進行した。なお3-9で後述するように61℃、2分間で澱粉粒の膨潤・糊化が観察されるため、紅優甘の糊化開始温度は約61℃と推定した。鳴門金時澱粉は65℃で分解

の開始がみられた。一方、尼いも澱粉は70℃までは分解はみられず、72℃で分解が確認できた。また各澱粉は長時間（20h）の反応でもほぼ同様の傾向がみられた。これらの結果から糊化開始温度は、紅優甘澱粉が約61℃、鳴門金時澱粉が約65℃、尼いも澱粉が約72℃と結論した。なおいずれの澱粉も75℃以上では、初期および長時間後のMal生成量（分解度）はそれぞれほぼ同程度となった。すなわち、いったん完全に糊化した尼いも澱粉は他品種の糊化澱粉と分解性にほとんど差はみられなかった。

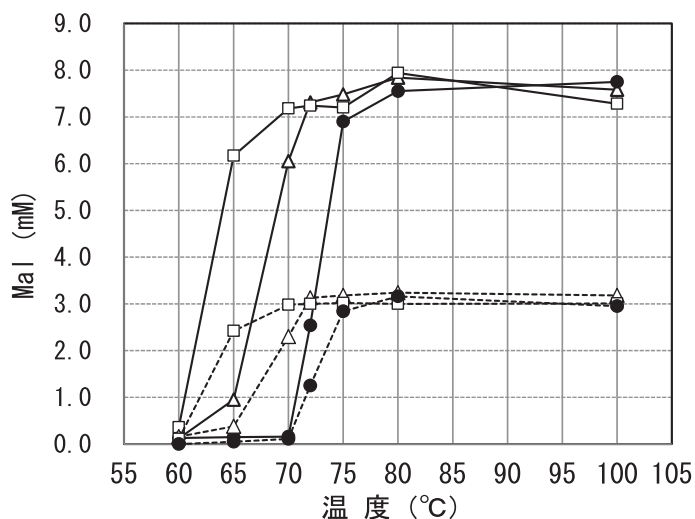


図4 βAM 分解性に基づく糊化開始温度の測定

2-10に記載した方法で1.0%澱粉懸濁液を横軸の各温度（60～100℃）で10分間加熱処理した。これに試薬βAMを40℃で10分間あるいは20時間反応させMal生成量（縦軸）を測定した。（●）尼いも；（△）鳴門金時；（□）紅優甘。（破線）反応10分後；（実線）反応20時間後。

3-8 酵素の熱安定性

サツマイモを加熱すると、澱粉糊化と同時にβAMによる分解が始まり、さらに品温が上昇して酵素が熱失活すると分解は停止する。そこで次に分解の上限温度となるβAMの熱安定域について調べた。

まず2-11に記載した方法で、磨砕物から抽出した酵素溶液（以下、液状酵素と呼ぶ）を一定温度で10分間加熱後に残存活性を測定した（図5、破線）。残存活性は室温（20℃）で保存した試料に対する相対活性（%）で示した。尼いもおよび鳴門金時由来の液状酵素は60℃まではほぼ安定であったが、65℃から活性が徐々に低下し70℃では約10%にまで失活した。紅優甘の液状酵素はやや安定で、70℃でも約50%の活性が残存したが75℃ではほぼ失活した。この実験結果によれば例えば尼いも澱粉の糊化温度である72℃ではβAMがほぼ失活しているため分解はほとんど起こらないことになる。しかし図3で示したように尼いもの磨砕物中では、より高温域（70～80℃）でも低いながら分解が一定程度は進行している。また他品種の磨砕物でも液状酵素が熱失活するよりも高い温度域（75～80℃）で十分に分解がみられた。

そこで次に液状酵素よりも実際のサツマイモ組織に近い存在状態と考えられる磨砕物中で酵素（以下、磨砕物酵素と呼ぶ）の熱安定性を測定した。すなわち 2-12 に記載した方法で磨砕物の状態で 10 分間加熱処理後に緩衝液を添加して酵素を抽出し、残存活性を測定した。その結果、図 5（実線）に示すように尼いもと鳴門金時の磨砕物酵素は 80℃ まで安定で 85℃ でも約 20～30% の活性が残存した。また紅優甘の磨砕物酵素は 85℃ でも約 70% の活性が残存していた。すなわち磨砕物酵素は、液状酵素よりも約 20℃ 安定化されており、液状酵素の失活が進むような糊化開始温度以上の温度で分解が一定程度進むという結果（図 3）に矛盾しないことがわかった。一般に酵素は基質や生成物で安定化されることが知られている。したがってこれは磨砕物中に共存する澱粉や Mal が β AM を安定化させることが主な原因と考えられた。また磨砕物中には、酵素に対する一般的な保護・安定化効果が知られているタンパク質、塩類、還元性物質などの共存も想定され、これらも安定化に寄与している可能性があると考えられた。

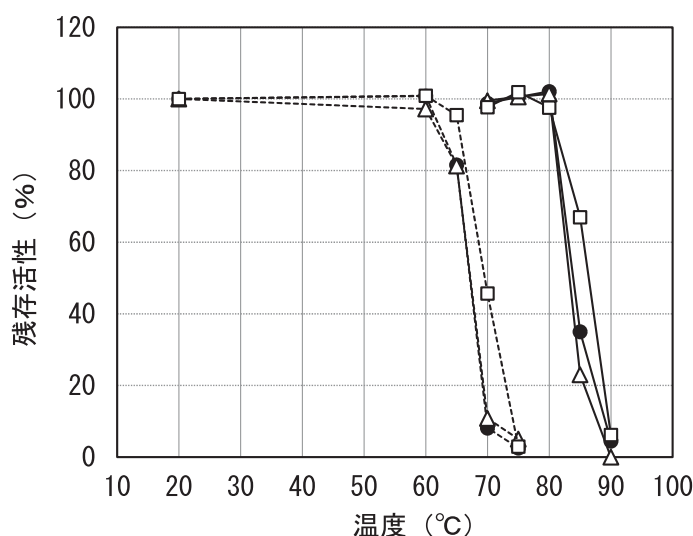


図 5 液状酵素と磨砕物酵素の熱安定性

横軸は各酵素液の熱処理温度。縦軸は室温（約 20℃）で保存した場合の活性を 100% とした場合の残存活性。（●）尼いも、（△）鳴門金時、（□）紅優甘。破線、液状酵素；実線、磨砕物酵素。

3-9 澱粉粒の糊化による変化の顕微鏡観察

高温糊化性の尼いも澱粉粒と低温糊化性の紅優甘澱粉粒の形状およびそれらの糊化初期の形状変化を顕微鏡で調べた。室温（約 20℃）における未糊化澱粉粒の懸濁液および各糊化開始温度（尼いも澱粉 72℃；紅優甘澱粉 61℃）付近で短時間（2 分間）加熱した場合の顕微鏡像を図 6 に示す。未糊化時（A、B）は、いずれも釣鐘状の大粒子と角張った小粒子が観察された。特に紅優甘の澱粉粒（B）には亀裂のような構造がみられた。一方、尼いも澱粉粒（A）や鳴門金時の澱粉粒（データ未掲載）には、明確な亀裂構造は確認されなかった。次にこれらを各糊化温度付近まで加熱すると、全体的に元の形状が崩れて透明化が進んだ（C、D）。特に紅優甘の釣鐘状の

澱粉粒では亀裂構造のある内部から膨潤・透明化が進んでいるものもみられた (D)。紅優甘澱粉と同じく低温糊化性であるサツマイモ (「コナミズキ」) の澱粉粒でも同様の亀裂構造が観察されており¹⁹⁾、亀裂が澱粉粒に生じる機構などは明らかとされていないものの、水分子や β AM が亀裂内部の澱粉に侵入しやすくなるため糊化や酵素分解が始まりやすいと考えられている。このような低温糊化性澱粉とは逆に、尼いも澱粉粒は亀裂がないため高温糊化性を示すのではないかと考えられた。

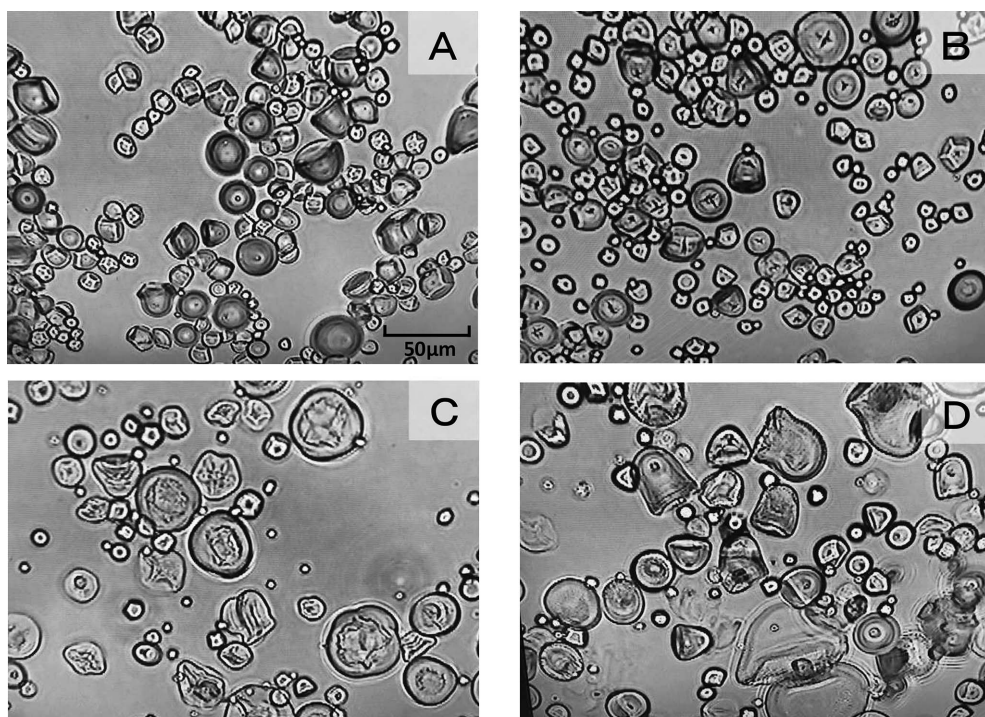


図 6 尼いもおよび紅優甘の澱粉粒と糊化開始初期の形状変化

A, 尼いもの未糊化澱粉 (室温); B, 紅優甘未糊化澱粉 (室温); C, 尼いも糊化開始時の澱粉 (72°C, 2分間加熱); D, 紅優甘糊化開始時の澱粉 (61°C, 2分間加熱)。図 A 中のバーは大きさ 50 μ m を示す。

3-10 澱粉分子の構造

尼いも澱粉と他の澱粉についてアミロース含量や澱粉分子の構造の相違について検討した。

3-10-1 ブルー・バリュエー (BV) 測定

サツマイモ澱粉は、 α -1, 4 結合した直鎖のアミロースを 17.8~19.0%、 α -1, 6 結合の分岐構造をもつアミロペクチンを 82.8~81.0% 含むことが報告されている²⁰⁾。アミロースの比率あるいはアミロペクチン中の長い側鎖比率などが高い澱粉では、それらが結晶構造 (水素結合) を作り熱運動が妨げられるため一般に糊化しにくくなる (高温糊化性になる) と考えられている。

アミロースなど一定鎖長以上の α -1, 4 グルカン鎖は常温ではらせん構造をつくりヨウ素分子を包摂して呈色する。このヨウ素・澱粉呈色を定量的に測定するのが BV であり¹⁷⁾、アミロー

スの比率あるいはアミロペクチン中の長い側鎖比率などが多いほど BV も高くなると考えられる。本研究では、原報¹⁷⁾のようにアミロース標準品を使用せず、2-14に記載した方法で簡易的に澱粉濃度 ($\mu\text{mole Glc/mL}$) に対する BV 測定値の比率を比較した。その結果、尼いも、紅優甘、鳴門金時の BV 値はいずれも約 0.20 でほとんど差はみられなかった (データ未記載)。したがって 3 品種の澱粉中のヨウ素呈色を示すような直鎖構造部分の含有量に大きな相違はないと考えられた。

3-10-2 β AM 分解限度と限界デキストリン量

β AM をアミロペクチンに作用させると、側鎖など α -1, 4 糖鎖部分を非還元末端から Mal 単位で順次分解するが、この分解は α -1, 6 分岐の数残基手前で停止するため限界デキストリン (Limit Dextrin, LD) と呼ばれる多分岐グルカンが生成する。本研究では 2-15 に記載した方法で、各糊化澱粉に β AM を十分作用させ、Mal 生成量を測定して分解限度とし、残量を LD 量として算出した (図 7)。尼いも澱粉では Mal 生成割合が多く (約 71.2%)、その結果、LD 比率が紅優甘および鳴門金時の澱粉と比べてやや小さい値 (約 28.8%) となった。これは β AM が分解可能なアミロペクチン中で結晶構造をつくりやすい側鎖の直鎖部分の比率がやや高い (分岐のない側鎖がやや長い) ことを示し、尼いも澱粉の高温糊化性と矛盾しない実験結果であると考えられた。

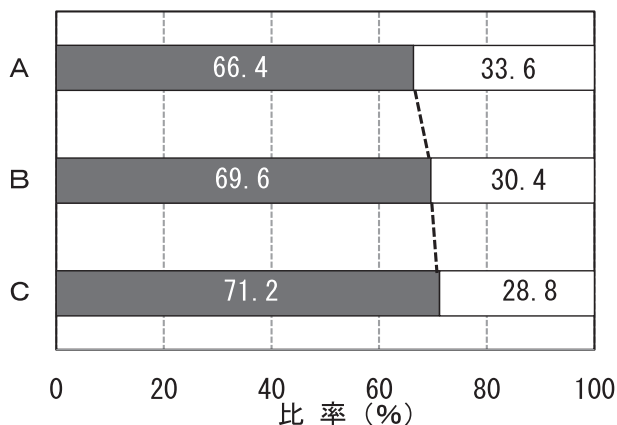


図 7 澱粉の β AM 分解で測定した Mal 生成量と限界デキストリン量の比率

A, 紅優甘澱粉; B, 鳴門金時澱粉; C, 尼いも澱粉。() β AM 分解率 (Mal 生成量の割合、%)、(□) LD 量 (Mal 換算した全澱粉から Mal 生成量を減じた残余量割合、%)

3-10-3 分岐頻度

2-16 で記載した方法でアミロペクチンやプルランの α -1, 6 分岐結合のみを特異的に加水分解する PUL を澱粉に作用させ、生成する還元糖量から分岐頻度を調べた (表 2)。尼いも澱粉では平均約 4.7 個の Glc 残基あたり 1 分岐と算出され、紅優甘澱粉 (約 5.3) や鳴門金時澱粉 (約 5.1) の分岐頻度よりやや小さい値が得られた。この結果は、尼いも澱粉のアミロペクチンには分岐が少ない分だけ結晶構造を作りやすい長い側鎖が多いとも考えられるため、高温糊化性と矛盾しない分析結果であると考えられた。

表2 PUL 分解による分岐頻度の測定

(A) 澱粉量*¹: フェノール硫酸法で測定した Glc 量で表した澱粉量。(B) PL 分解後の還元糖生成量*²: PL 分解後の DNS 法で測定した還元糖増加量。澱粉溶液中の α -1,6 結合数を示す。(B/A) 分岐頻度*³: 澱粉に含まれる Glc 残基 (A) のうち分岐結合 (B) の割合。

品 種	澱粉量* ¹ ($\mu\text{mol Glc/mL}$) (A)	PL 分解で増加した 還元糖量* ² ($\mu\text{mol Mal/mL}$) (B)	分岐頻度* ³ (B/A)
紅優甘	53.0	10.0	5.30
鳴門金時	55.1	10.9	5.06
尼いも	51.3	10.9	4.71

4. おわりに

尼いもは加熱しても Mal が十分に生成せず甘くなりにくいこと、またそれは澱粉の高温糊化性が主な原因であることが判明した。 β AM は未糊化澱粉には作用せず³⁻⁵⁾、しかも一定温度以上では不可逆的に熱失活する。尼いもには他品種と遜色ない β AM 活性が含まれている (表 1)。しかし上記の理由で糖化反応は澱粉の糊化開始温度から酵素活性が安定な温度までしか進まない。澱粉の糊化開始温度は紅優甘澱粉が約 61℃、鳴門金時澱粉が約 65℃ であったのに対して、尼いも澱粉は約 72℃ で他より 5~10℃ 程度高い (図 4)。また分解の上限温度である酵素の安定域は、基質 (澱粉) 共存などの影響で尼いもと鳴門金時では約 80℃ まで、紅優甘は約 85℃ でも 50% 以上の活性を保持していた (図 5)。これらの結果から糖化反応が十分進むと考えられる温度域は、紅優甘で約 61~85℃ (温度幅 24℃)、鳴門金時で約 65~80℃ (同 15℃) であるのに対して、尼いもでは他品種よりかなり狭い約 72~80℃ (同 8℃) であった。このために尼いもは徐々に品温が上昇する加熱調理時などでは甘くなりにくいと考えられた。

本研究では、糊化温度という澱粉特性の違いに加え尼いもの澱粉含有量が他品種より低い (図 1) ことも明らかとなった。尼いも澱粉の分解割合 (Mal 生成割合) はやや高い (図 7) が、含量が他品種より約 20% 以上低いため、もし完全に糖化されたとしても可食部 100g 当たりの最大の Mal 生成量は紅優甘約 17.3g、鳴門金時約 17.3g に対して、尼いもは約 13.9g になると見積もられた。焼きいもなど加熱調理した場合のサツマイモの食味 (甘みと肉質) には、ホクホク感で表現される「粉質系」と柔らかさ、ネットリ感、シットリ感などをもつ「粘着系」に大別できるといわれている^{16, 18)}。例えば本研究で使用した鳴門金時は粉質系に近く紅優甘は粘着系に近いと考えられる。尼いもは、甘味が高くなり、Mal や澱粉分解に伴う粘着系の食味も、澱粉による粉質系の食味も示し難いため、最近の消費者が持つ嗜好性には残念ながら合致しにくいと考えられた。

食物繊維は、「ヒトの消化酵素で分解されない難消化性成分」と定義され、植物の細胞壁を構成するセルロースやペクチンなどの多糖類や高分子のフェノール化合物リグニンなどを主成分と

している^{9,10)}。また食物繊維は栄養学的に多様な健康維持・増進機能を示すことが知られており^{6,7)}、食餌摂取量の増加が望まれている。本研究で測定した難消化性成分は食物繊維とほぼ同一の物質群と考えられるが、尼いもは本成分を他品種より約 1.5 倍多く含んでいることが明らかとなった(図2)。換言すると尼いもは甘味やカロリーなどが低く、食味を特長とするには難しいが、一方で健康機能性という他品種にない性質を訴求することは可能ではないかと考えられた。今後、尼いものこのような成分特性や地場野菜としてのブランドなどを生かしながら、さらにおいしさを引き出すための調理加工法の工夫や魅力発信などによって地域資源として一層の利用・活用が進むことに期待したい。

参考文献

- 1) 市丸哲造：「最新食品学 総論・各論」B いも類 (2021)。
- 2) 文部科学省「日本食品標準成分表 2020 年版(八訂) 準拠 食品成分表 2022」：香川明夫監修，女子栄養大学出版部 (2022)。
- 3) 中村善行：サツマイモの甘さに関わる糖質成分，*Nippon Shokuhin Kogaku Kaishi*, 67, 306-314 (2020)。
- 4) 中村善行：蒸したサツマイモのマルトース生成に及ぼす β -アミラーゼ活性と澱粉糊化温度の影響，いも類新興情報，125, 44-48 (2015)。
- 5) 貝沼圭二，松永暁子，板川正秀，小林昭一： β -アミラーゼ-プルラナーゼ (BAP) 系を用いた澱粉の糊化度，老化度の新測定法，*澱粉科学*, 28, 235-240 (1981)。
- 6) 桐山修八：食物センイの栄養学的効果，*化学と生物*, 18, 95-105 (1980)。
- 7) 海老原清：食物繊維の栄養・生理機能に関する研究，*日本栄養・食糧学会誌*, 61, 3-9 (2008)。
- 8) 渡辺敏郎：尼崎の伝統野菜「尼いも」の製麴とその特性，*園田学園女子大学論文集*, 53, 33-40 (2019)。
- 9) 吉田幹彦，奥村雅人，淵上賢一，中里孝史，五十嵐友二，安井明美：日本食品標準成分表のための新しい食物繊維測定法の検証，*Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 66, 187-194 (2019)。
- 10) 中埜拓，前崎祐二，青江誠一郎，太田富貴雄，綾野雄幸：食物繊維定量法の検討 酵素-重量法と Neutral Detergent 法の比較ならびに，*Prosky* 法における使用酵素剤について，*日本栄養・食糧学会誌*, 42, 267-272 (1989)。
- 11) 奥田潤，三輪一智，前田和男：D-グルコースの α -および β -アノマーの微量定量法，*臨床化学*, 2, 289-296 (1973)。
- 12) G. L. Miller: Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, *Anal. Chem.*, 31, 426-428 (1959)。
- 13) M. Dubois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith: Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *Anal. Chem.*, 28, 350-356 (1956)。
- 14) 堤忠一：食品成分分析法の開発と基準化について-栄養成分を中心として-, *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 36, 339-346 (1989)。
- 15) 齋藤公夫，中鉢富夫，長谷川栄一：ササニシキの生産性と炭水化物 -第3報 アミログルコシダーゼを利用した水稲風乾試料中のデンプン含量の分析-, *東北農業研究*, 39, 51-52 (1986)。
- 16) 齋藤康弘，本多裕司：焼きいもの味質が異なるサツマイモのキュアリングによる澱粉の性質変化，*応用糖質科学*, 11, 87-93 (2021)。
- 17) 井ノ内直良，池内南美，高美正，朝岡正子，不破英次：米のアミロース含量簡易測定法の検討，*応用糖質科学*, 43, 1~5 (1996)。
- 18) 安藤利夫，家壽多正樹，日坂弘行：焼きいもの食味が異なるサツマイモ 6 品種の遊離糖およびデンプ

- ン含量に対する貯蔵期間の影響ならびにこれら成分値による数値化, 園芸学研究, 17, 449-457 (2014).
- 19) K. Kitahara S. Fukunaga, K. Katayama, Y. Takahata, Y. Nakazawa, M. Yoshinaga, and T. Suganuma: Physicochemical properties of sweet potato starches with different gelatinization temperatures, *Starch//Stärke*, 57, 473-479 (2005).
- 20) Y. Takeda, N. Tokunaga, C. Takeda, S. Hizukuri: Physicochemical properties of sweet potato starches, *Starch /Stärke*, 38, 345-350 (1986).

謝辞

尼いもをご提供いただいた園田学園大学社会連携推進センターに感謝いたします。また本研究全般において有益なご意見・ご助言いただいた園田学園大学 副学長 渡辺敏郎 博士に深謝いたします。最後に本研究に卒論として関わっていただいたゼミ所属の学生の皆様に敬意を表するとともに厚く感謝します。

[なかの ひろふみ 農学博士 (九州大学)、応用酵素学、応用微生物学、食品衛生学]