

サツマイモ品種「こなみずき」澱粉の高品質化
及び物理化学特性と食品利用に関する研究

時村 金愛

2017

目 次

目 次	1
緒 論	4
第一章 栽培条件の異なるサツマイモ品種「こなみずき」塊根の	
澱粉品質	8
第一節 序 章	8
第二節 実験材料および実験方法	9
2-1 供試材料	9
2-2 サツマイモ塊根の水分と澱粉含量	9
2-3 澱粉の調製	10
2-4 澱粉の特性	11
2-5 澱粉のアルカリ着色度とポリフェノール吸着量	11
2-6 サツマイモ塊根のポリフェノール含量とポリフェノール	
オキシダーゼ活性	13
第三節 実験結果	14
3-1 栽培条件が異なる「こなみずき」塊根の収量と澱粉含量	14
3-2 澱粉の粒径およびRVA粘度特性とDSC糊化特性	16
3-3 澱粉白度	21
3-4 澱粉のアルカリ着色度とポリフェノール吸着量	21

3-5	塊根のポリフェノール含量とポリフェノール	
	オキシダーゼ活性	23
4	第四節 考察	25
5	第五節 小括	31
2	第二章 サツマイモ品種「こなみずき」澱粉製造における pH 調整が	
	澱粉品質に与える影響	33
1	第一節 序章	33
2	第二節 実験材料および実験方法	34
2-1	供試材料	34
2-2	澱粉の特性	37
2-3	澱粉ゲルおよび澱粉糊液の物性	37
3	第三節 実験結果	39
3-1	モデル実験における「こなみずき」塊根磨砕後の pH	
	調整と澱粉特性	39
3-2	澱粉製造工場における pH 調整と澱粉特性	47
4	第四節 考察	51
5	第五節 小括	53
3	第三章 サツマイモ品種「こなみずき」の澱粉特性と食品利用	55
1	第一節 序章	55
2	第二節 実験材料および実験方法	56

2-1	澱粉	56
2-2	澱粉の粘度特性と一般特性	57
2-3	澱粉ゲル及び澱粉糊液の物性	58
2-4	澱粉の分子構造	59
2-5	タピオカパールや澱粉麺への「こなみずき」澱粉の利用	60
第三節	実験結果	62
3-1	サツマイモ澱粉の RVA 粘度特性	62
3-2	澱粉ゲルの物性	64
3-3	澱粉糊液の動的粘弾性と流動特性	67
3-4	澱粉の分子構造	72
3-5	「こなみずき」澱粉を利用した加工食品の特性	78
第四節	考察	82
第五節	小括	84
総括		86
参考文献		89
謝辞		97

緒 論

サツマイモは国内で約 89 万トンが生産され¹⁾、青果用や焼酎原料用や澱粉原料用として利用される重要な糖質資源作物である。サツマイモは南九州で生産が盛んであり、特に鹿児島県では温暖な気候を活かし、年間約 34 万トンのサツマイモが生産され、全国生産量の約 40%を占めており、全国第一位となっている²⁾。サツマイモは、シラス土壌で、かつ台風の常襲地帯である南九州畑作地帯の基幹作物として重要な役割を担っている。鹿児島県のサツマイモ生産量のうち、約 5 割は焼酎原料用、約 4 割が澱粉原料用、残りの約 1 割が青果用および加工原料用となっている³⁾。このように鹿児島県のサツマイモ生産は、焼酎用および澱粉原料用のサツマイモが主体となっており、焼酎産業とともに澱粉関連産業は、地域経済の振興・畑作農業の安定化に重要な役割を果たしている。

サツマイモ澱粉は、鹿児島県で約 4 万トン生産され、約 7~8 割が液糖や水飴などの糖化用原料として使用されている。一方、わらびもちや麺類などの食品に利用される割合は約 2~3 割と限られている⁴⁾。同じ国内産のイモ類澱粉であるバレイショ澱粉の食品利用が水産練り製品や麺類、菓子類など 6 割以上であるのに対して、サツマイモ澱粉の食品利用は非常に少ない。糖化用の澱粉は、澱粉の種類を選ぶ必要がないため、キャッサバ澱粉などの安価な輸入澱粉や、外国産のトウモロコシを原料としたコーンスターチと競合することから、現在は国の交付金制度によって糖化用原料に国産澱粉を使用するよう保護されている⁵⁾。もし澱粉の輸入が自由化されると、安価な輸入澱粉の流通によってサツ

マイモ澱粉の需要は激減し、サツマイモ農家や澱粉工場は壊滅的な打撃を受けることが予想される。

サツマイモ澱粉産業は南九州の畑作物地帯を支える基幹産業であり、サツマイモ生産農家を守るためには澱粉原料用サツマイモの生産維持に努める必要がある。しかし、コーンスターチやキャッサバ澱粉など安価な輸入澱粉と競合しないためには、糖化用からサツマイモ澱粉の特性を活かした食品用途への利用転換が必須の課題となっている。そのためには、サツマイモ澱粉の特性を把握し、その特性を活かした用途開発が必要となる。これまで、サツマイモ澱粉の特性については、市販のサツマイモ澱粉の性質についての報告⁶⁾や栽培条件による澱粉の特性変化についての報告⁷⁾などがみられるが、澱粉原料用として利用されている品種の食品利用特性については報告例が少ない。また、サツマイモ澱粉は澱粉糊の粘度や透明度などの特徴が他澱粉と比較して中間的であり、特徴が少ない澱粉とされており、食品利用が伸び悩む要因となっている。

このような背景の中、著者らは、澱粉原料用として利用されている品種について、澱粉ゲルの老化と澱粉特性について報告し、その中で澱粉ゲルの老化が遅い品種と早い品種があり、老化の遅い品種の澱粉は、粘度上昇温度が低い、リン含量が少ない、アミロペクチンに重合度 6-10 の短鎖が多いといった共通の特徴があることを明らかにした⁸⁾。また、近年、低温糊化性澱粉を有し、比較的収量性の良い品種「こなみずき」が育成された⁹⁾。「こなみずき」は、青果用品種「クイックスイート」に見出された低温糊化性澱粉^{10, 11)}を有し、澱粉用原料

として収量性を高め、皮色を白色に改良した品種である⁹⁾。「こなみずき」澱粉は、ゲル状に加工した際の保水性が良く、冷蔵した澱粉ゲルが硬くなりにくい耐老化性を示すなど、低温糊化性澱粉の特徴を有することから⁹⁾、食品利用への転換が図れる品種として期待されている。

一方、「こなみずき」については、更に収量を上げるための栽培特性の把握や澱粉を製造する際の澱粉白度の向上に課題が残されている。サツマイモ澱粉を食品用として普及させるためには、生産コストの削減を図るとともに、澱粉白度の向上や糊液の粘度安定性といった澱粉の高品質化が必須である。特に澱粉白度は、使用した食品の外観に影響することから澱粉白度の高い製品が市場的に有利である。

また、「こなみずき」澱粉は従来のサツマイモ品種の澱粉よりも約 20℃低温で糊化し、低い糊化エネルギー、遅い老化速度、酸や酵素に対する高い分解性などの特徴を有している^{12, 13)}。このような特徴的で画期的なサツマイモ澱粉は、食品原料として利用すると高い機能性を付与することが期待される。これまでに、菊田ら¹⁴⁾は低温糊化性澱粉を有する「クイックスイート」について、落花生豆腐への利用特性について報告している。しかし、「こなみずき」澱粉については、菓子類や麺類など様々な食品への利用適性がほとんど明らかにされていない。

そこで、本研究では「こなみずき」澱粉の高品質化と用途拡大を目的とし、第一章では、栽培条件の異なるサツマイモ品種「こなみずき」塊根の澱粉品質

について、植付け時期や収穫時期が澱粉の粘度や白度に与える影響を調査するとともに、澱粉白度とサツマイモ塊根中のポリフェノール含量との関係を明らかにした。第二章では、「こなみずき」澱粉製造における pH 調整が澱粉品質に与える影響について、サツマイモ塊根の磨砕後に磨砕液の pH を調整することで澱粉白度を向上させる技術について検討した。第三章では、「こなみずき」の澱粉特性と食品利用について、「こなみずき」澱粉の澱粉ゲルや澱粉糊液の物理化学性および「こなみずき」澱粉を利用した加工食品の物性や食感を調査するとともに、これらの澱粉特性と澱粉の分子構造との関係性を考察した。

本研究成果は、新たなサツマイモ澱粉素材として高品質な「こなみずき」澱粉を提供するとともに、その用途開発に係わる利用特性を明らかにしたものであり、鹿児島県の基幹産業である農業とその関連産業の安定的な成長発展を図り、地域経済の活性化を図るといった戦略目標に大いに貢献するものである。

第一章 栽培条件の異なるサツマイモ品種「こなみずき」塊根の澱粉品質

第一節 序 章

「こなみずき」澱粉は、ゲル状に加工した際の保水性が良く、耐老化性を示すなど、青果用品種「クイックスweet」に見出された低温糊化性澱粉の特徴を有することから^{12, 13)}、食品用途などへの転換を図ることのできる品種として期待されている。しかし、更に収量を上げるための栽培特性の把握や澱粉を製造する際の澱粉白度の向上に課題が残されている。サツマイモ澱粉を食品用として普及させるためには、生産コストの削減を図るとともに、澱粉白度の向上や糊液の粘度安定性といった澱粉の高品質化が必須である。特に澱粉白度は、使用した食品の外観に影響することから澱粉白度の高い製品が市場的に有利である。これまでに、栽培条件がサツマイモ澱粉の糊化や老化の特性に与える影響やサツマイモ澱粉のポリフェノール吸着特性についての報告はあるが¹⁵⁻¹⁸⁾、栽培条件がサツマイモ塊根中の着色成分と考えられるポリフェノール含量やサツマイモ澱粉の白度に与える影響についての知見は極めて少なく、新しい品種については全く調べられていない。

そこで、本研究では低温糊化特性を有する新規サツマイモ澱粉の高品質化を図るために、栽培条件と澱粉特性との関連性を明らかにすることを目的とした。すなわち、植え付け時期と収穫時期および栽培期間が異なる「こなみずき」塊根について、澱粉の粒度や粘度特性、糊化特性、澱粉白度、澱粉のポリフェノ

ール吸着量および塊根中のポリフェノール含量やポリフェノールオキシダーゼ活性との関係性を調査した。

第二節 実験材料および実験方法

2-1 供試材料

サツマイモ品種「こなみずき」は、2012年に鹿児島県農業開発総合センター大隅支場の試験ほ場内（鹿児島県鹿屋市）で栽培されたものを用いた。植え付け時期は4月上旬（4月4日）、4月中旬（4月17日）、5月中旬（5月10日）、5月下旬（5月30日）とし、収穫時期は9月下旬から12月中旬までとした。それぞれの試験区の植え付け時期と収穫時期および栽培期間は表1-1に示した。なお、実験に供したサツマイモは、収穫後3～7日の塊根を試験に供した。

2-2 サツマイモ塊根の水分と澱粉含量

各試験区から300～350gの塊根5個を選び、それぞれ20gの切片を採取し細断して混合した。細断した試料10gを迅速水分測定装置（MT-E, Brabender GmbH & Co., ドイツ）を用い、105℃で150分間乾燥し、乾燥前後の重量減少率より求めた値を水分とした。

同様に細断した試料10gに20mLの80%エタノールを加え、ポリトロンホモジナイザー（PT 10-35, KINEMATICAAG社, スイス）で磨砕した。磨砕物を80%エタノールで洗浄し、ろ過（No.6ろ紙, アドバンテック東洋㈱, 東京）して磨

碎物残さとろ液に分別した。残さ中の糖分を 80 %エタノールで洗浄後、50 mL の蒸留水で耐熱性の試薬瓶に移し入れ、さらに 50 mL の 2 N 水酸化ナトリウムを加えてホモジナイザーで磨砕した。磨砕液に 0.1 mL のイソアミルアルコールを加えた後、蒸留水で 250 mL に定容し、沸騰湯浴中で 30 分間加熱した。冷却後、20 mL を分取し、1.5 N 酢酸で pH 4.5 に中和後、蒸留水で 50 mL に定容し、ろ過 (No.2 ろ紙) したろ液を試料液とした。試料液 0.25 mL に 0.25 mL のグルコアミラーゼ溶液 (15 U/mL, ナガセ生化学工業(株), 京都) を加え、40 °C で 1 時間分解した後、試料液中のグルコース含量を DNS 法¹⁹⁾で定量し、得られたグルコース含量に 0.9 を乗じた値から澱粉含量を換算した。

2-3 澱粉の調製

各試験区から 10 個の塊根を選び、水洗後、試験用のロール磨砕機 (有)小中産業, 鹿児島) ですり潰した。磨砕物から 1 kg を採取し、加水しながら目開き 355 μ m の篩いを通し、さらに目開き 90 μ m の篩いを通して澱粉粕を取り除いた後、1 晩静置した。上澄み液を取り除き、沈降した澱粉を加水しながら目開き 45 μ m の篩いを通し、微粕を取り除いた。沈降した澱粉は、上澄み液が透明になるまで水洗と沈降を繰り返した。得られた澱粉は吸引ろ過後、自然乾燥して目開き 355 μ m の篩いを通し、澱粉試料とした。

2-4 澱粉の特性

澱粉の平均粒径は、レーザー回折式粒度分布装置 (HELOS & RODOS, Sympatec GmbH, ドイツ) を使用して水中湿式で測定し、粒度分布とメディアン径を求めた。

澱粉の粘度特性は、ラピッドビスコアナライザー (RVA-3D, フォスジャパン (株), 東京) を使用し、澱粉濃度は7% (w/w) とした。温度条件は、35 °Cから5 °C/分で95 °Cまで加熱し、5 分間95 °Cで保持後、5 °C/分で35 °Cまで冷却した。パドルの回転数は160 rpmとした。

澱粉の糊化特性は、示差走査熱量計 (DSC 6100, SII-Nano Technology, 千葉) を使用して測定した。澱粉 10 mg (乾物重) と脱気した水 40 mL をシルバー容器に入れ、サンプルシーラー (SII Nano Technology) で密封した。1 時間静置後、昇温速度 2 °C/分で 20 °C から 150 °C まで加熱した。DSC 曲線の解析には、DSC に付属の解析ソフトウェアを使用し、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)、吸熱エンタルピー (または糊化熱) (ΔH) を求めた。

澱粉の白度は白度計 (C-100, (株) ケット科学研究所, 東京) で測定した。各試料につき測定は3回行い、平均値を示した。

2-5 澱粉のアルカリ着色度とポリフェノール吸着量

澱粉 1.5 g (無水物換算) に 3 mL の 0.1 N 水酸化ナトリウム溶液を加えて攪

拌し、15分ごとに攪拌しながら1時間静置した。遠心分離（ $2,460 \times g$ 、10分間）後、得られた上澄み溶液の430 nmの吸光度を分光光度計で測定し、アルカリ着色度として示した。

また、澱粉粒に吸着しているポリフェノールを定量した。澱粉1 g（無水物換算）に2 mLの0.1 N水酸化ナトリウム溶液を加えて攪拌し、15分ごとに攪拌しながら30分間静置した。遠心分離（ $2,460 \times g$ 、10分間）後、1 mLの上澄み溶液 A を得た。残った水酸化ナトリウム溶液を含む沈殿部には更に2 mLの0.1 N水酸化ナトリウム溶液を加えて同様に30分間静置し、遠心分離後に1 mLの上澄み溶液 B を得た。上澄み溶液 A, B それぞれについて、33 μ Lの1 N酢酸溶液を加えて中和し、純水を加えて全量を2 mLとした。この2 mLの検液に2 mLのヘキサンを加えて振とう後、遠心分離（ $2,460 \times g$ 、10分間）してヘキサン層を廃棄し、1 mLの水層を回収して試料溶液とした。ポリフェノール含量はFolin-Ciocalteu法²⁰⁾を一部改変して測定した。すなわち、適宜希釈した0.5 mLの試料溶液に2.5 mLの10倍希釈したFolin-Ciocalteu試薬（ナカライテスク株、京都）を加え、3分後に2.5 mLの炭酸ナトリウム水溶液[10% (w/w)]を添加した。1時間室温で放置した後、分光光度計（U-1100、株日立ハイテクノロジーズ、東京）で765 nmの吸光度を測定し、クロロゲン酸（ナカライテスク株）を標準物質としてポリフェノール含量を算出した。

2-6 サツマイモ塊根のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性

ポリフェノールの抽出試料には、ポリフェノールオキシダーゼを失活させた蒸し芋を使用した。すなわち、各試験区のサツマイモ塊根 5 個を使用し、洗浄した塊根を半割して、片方を蒸し器に入れ沸騰した蒸気で 40 分間蒸した。粗熱をとった蒸し芋からそれぞれ 40 g の切片を採取し、表層から約 10 mm の表皮部とそれ以外の中心部に分け、それぞれ細断して混合し、10 g の試料を採取した。採取した試料は、30 mL の 80 %エタノールを加えて、ホモジナイザーで 1 分間摩砕してポリフェノールを抽出した。摩砕した試料は 80 %エタノールを加えてろ過 (No. 6 ろ紙) し、250 mL に定容して抽出液とした。抽出液 100 mL をエバポレーターで減圧濃縮 (40 °C) してエタノールを除去し、最終的に蒸留水で 25 mL に定容して測定用の試料溶液とした。試料溶液のポリフェノール含量は先に述べた改変 Folin-Ciocalteu 法で測定した。

ポリフェノールオキシダーゼ活性の測定には、半割した残りの生芋を使用した。各塊根から 7 mm の厚さで切片を採取し、7 mm 角状に調製した。素早く 10 g を容器に計り入れ、1 g のポリビニルピロリドン (東京化成工業株, 東京) と 50 mL の氷冷したリン酸緩衝液 (pH 6.4) を加えて、3 分間氷冷しながらホモジナイザー (HM-1CA, 日本理化学器械株, 東京) で摩砕した。磨砕液をガーゼでろ過し、遠心分離 (9,840 × g, 10 分間, 5 °C) した上清液を粗酵素液とした。

マツキルベイン緩衝液で pH 6.4 に調整した基質溶液(クロロゲン酸 0.1 mg/mL) 3 mL に 1 mL の粗酵素液を加えて、40 °C で 20 分間反応させた。反応は 0.1 mL の 10 %硫酸を加えて停止し、分光光度計 (U-1100, (株)日立ハイテクノロジーズ, 東京) で 420 nm の吸光度を測定した。なお、酵素活性の 1 U は 1 分間当りに吸光度の値を 1 変化させる量とし、生鮮塊根重当りで表した。

第三節 実験結果

3-1 栽培条件が異なる「こなみずき」塊根の収量と澱粉含量

各試験区の「こなみずき」塊根の収量ならびに水分と澱粉含量を表 1-1 に示した。塊根の収量は、いずれの植え付け時期でも栽培期間が長くなると増大した。最も収量が高かった栽培条件は、4 月上旬植えの 11 月下旬 (11/30) 収穫 (栽培期間 240 日) であった。「こなみずき」は従来の澱粉原料用品種 (「シロユタカ」など) より低収量であり、350 kg/100 m² の収量目標を上回るには 200 日以上栽培期間が必要 (従来の原料用品種では 180 日程度) とされている。今回の試験では、栽培期間が 200 日以上であると概ね 350 kg/100 m² を上回ったが、植え付け時期が 5 月下旬と遅くなると 350 kg/100 m² を下回った。澱粉含量は、9 月下旬 (9/24) から 11 月中旬 (11/12) に収穫された試験区では、植え付け時期に関係なく栽培期間が 160~200 日で 23.7~26.6 % と高かった。11 月下旬 (11/22, 11/26, 11/30) に収穫された塊根では澱粉含量が約 21~23 % とやや低下する傾向がみられ、12 月中旬 (12/17) に収穫された塊根では澱粉

含量が 13.3 および 15.1 %と著しく低下した。

表 1-1 供試「こなみずき」の栽培条件と塊根特性

植え付け時期 (植え付け日)	収穫日	栽培期間 (日)	塊根特性	
			収量 (kg/100m ²)	水分含量(%) 澱粉含量 (%)
	10/ 1	180	361	66.6 24.1
4月上旬	10/22	200	423	66.3 23.7
(4月4日)	11/12	220	463	65.1 25.5
	11/30	240	543	66.9 21.4
	9/24	160	306	66.2 23.8
4月中旬	10/15	180	368	64.0 25.3
(4月17日)	11/ 2	200	448	63.3 26.6
	11/22	220	517	67.9 21.2
	10/16	160	315	66.3 24.8
5月中旬	11/ 5	180	330	65.1 25.1
(5月10日)	11/26	200	366	67.4 23.0
	12/17	220	377	70.0 13.3
5月下旬	12/17	200	343	69.7 15.1
(5月30日)				

3-2 澱粉の粒径および RVA 粘度特性と DSC 糊化特性

各試験区の塊根から調製した澱粉のメディアン粒径と RVA 粘度特性を表 1-2 に示した。澱粉の粒径は概ね $18 \mu\text{m}$ であったが、12 月中旬 (12/17) に収穫された塊根の澱粉の粒径は 16.3 および $16.7 \mu\text{m}$ と小さかった。各澱粉の粒度分布を図 1-1 に示した。植え付け時期ごとに比較すると、収穫時期が遅くなると粒径が $10 \mu\text{m}$ 以下の小粒子が増加する傾向がみられ、5 月下旬植えで 12 月中旬 (12/17) に収穫された塊根では小粒子化の傾向が特に顕著であった。

RVA による粘度上昇温度は $56.0 \sim 58.6 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲で低温糊化性を示したが、各植え付け時期の試験区においては収穫時期が遅くなるほど粘度上昇温度が低下する傾向がみられた。

最高粘度は、9 月下旬 (9/24) から 11 月上旬 (11/2, 11/5) までに収穫された塊根では $197 \sim 228 \text{ RVU}$ であったのに対して、11 月中旬 (11/12) から 12 月中旬 (12/17) に収穫された塊根では $240 \sim 271 \text{ RVU}$ と、植え付け時期に関わらず収穫時期が遅くなると上昇する傾向がみられた。また、最高粘度の上昇 ($240 \sim 271 \text{ RVU}$) に伴いブレークダウンも上昇 ($106 \sim 132 \text{ RVU}$) したが、セットバックの値は $103 \sim 126 \text{ RVU}$ と比較的安定していた。

表 1-2 「こなみずき」澱粉の粒径と RVA (7 %, w/w) 粘度特性

植付け時期 (植付け日)	収穫 日	栽培 期間 (日)	澱粉 粒径 (μm)	RVA 粘度特性			
				粘度上昇 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最高 粘度 (RVU)	ブレイク ダウン (RVU)	セット バック (RVU)
4月上旬 (4月4日)	10/ 1	180	18.2	58.6	197	63	103
	10/22	200	18.7	57.6	206	74	100
	11/12	220	18.0	56.7	240	106	110
	11/30	240	17.5	57.0	255	111	119
4月中旬 (4月17日)	9/24	160	18.2	58.5	201	70	104
	10/15	180	18.2	57.9	207	63	103
	11/ 2	200	18.4	58.2	215	80	111
	11/22	220	18.2	56.9	254	122	121
5月中旬 (5月10日)	10/16	160	18.8	57.9	219	82	126
	11/ 5	180	18.2	56.7	228	93	107
	11/26	200	17.8	56.0	266	132	108
	12/17	220	16.3	57.3	250	116	106
5月下旬 (5月30日)	12/17	200	16.7	56.6	271	131	115

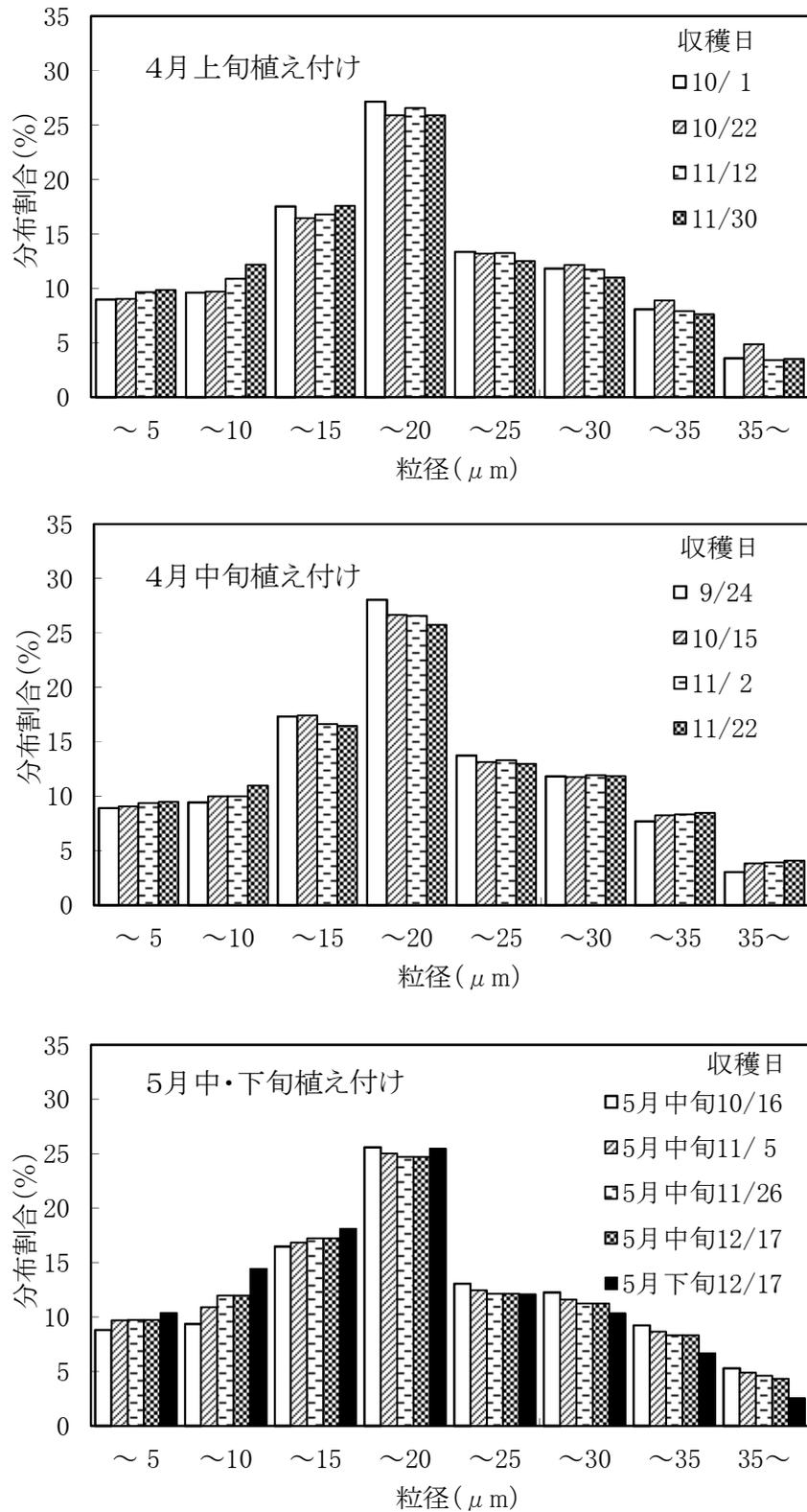


図 1-1 栽培条件が異なる「こなみずき」澱粉の粒度分布

各試験区の澱粉のDSCによる糊化特性を表1-3に示した。糊化ピーク温度(T_p)は、50.6~53.8 °Cの範囲にあり、収穫時期が遅くなるほど糊化開始温度が低下しており、RVAの結果と一致した。糊化終了温度(T_c)から糊化開始温度(T_o)を差し引いた値は、短期栽培(160, 180日間)では21.1~24.4 °C、長期栽培(200, 220, 240日間)では22.9~29.0 °Cを示し、短期栽培よりも長期栽培で糊化吸熱ピークの糊化開始温度から糊化終了温度までの温度範囲(T_c-T_o)が幅広くなっていた。また、糊化エンタルピー(ΔH)は12.4~13.8 J/gの範囲にあり、収穫時期が遅くなると値が低下する傾向が認められた。

表 1-3 「こなみずき」澱粉の DSC 糊化特性 (10 mg/40 μ L)

植付け時期 (植付け日)	収穫 日	栽培期間 (日)	To ($^{\circ}$ C)	Tp ($^{\circ}$ C)	Tc ($^{\circ}$ C)	Tc-To ($^{\circ}$ C)	Δ H (J/g)
	10/ 1	180	47.9	53.5	69.1	21.2	12.9
4月上旬	10/22	200	45.9	52.6	68.8	22.9	13.4
(4月4日)	11/12	220	44.2	52.2	69.5	25.3	13.4
	11/30	240	44.4	52.7	69.1	24.6	12.4
	9/24	160	48.4	53.8	69.9	21.5	13.3
4月中旬	10/15	180	45.5	53.7	69.9	24.4	13.3
(4月17日)	11/ 2	200	42.6	51.2	68.5	25.9	13.4
	11/22	220	43.7	52.6	69.4	25.8	12.6
	10/16	160	46.7	53.0	68.8	22.1	13.8
5月中旬	11/ 5	180	45.3	53.0	68.3	23.0	12.8
(5月10日)	11/26	200	42.2	50.6	68.1	25.9	12.7
	12/17	220	43.2	52.4	70.2	27.0	12.6
5月下旬	12/17	200	42.1	51.8	71.1	29.0	12.5
(5月30日)							

3-3 澱粉白度

各試験区の澱粉白度を表1-4に示した。澱粉白度は81.6~90.0の範囲にあり、栽培条件によって異なっていた。4月上旬および4月中旬植えの試験区では、澱粉白度は栽培期間に関係なく概ね87~90の値を示した。5月中旬植えの試験区において、10月中旬(10/16)から11月下旬(11/26)までに収穫された塊根では澱粉白度が87以上と高い値を示したが、12月中旬(12/17)に収穫された塊根では、澱粉白度が81.6と大きく低下した。5月下旬植えの12月中旬(12/17)収穫でも同様に澱粉白度は82.3と顕著に低かった。

3-4 澱粉のアルカリ着色度とポリフェノール吸着量

各試験区の澱粉のアルカリ着色度とポリフェノール吸着量を表1-4に示した。アルカリ着色度は、澱粉にアルカリ溶液を加えて攪拌することにより、澱粉に吸着したタンパク質やポリフェノール類を溶出させ、その着色度によって澱粉品質を判断することができる方法として澱粉製造工場などで使用されている簡易的な方法である²¹⁾。澱粉白度が大きく低下した12月中旬(12/17)に収穫された塊根の澱粉では、アルカリ着色度も0.321および0.262と他の試験区よりも大幅に高かった。さらに、澱粉にアルカリ溶液を加えて得られた上澄み溶液についてFolin-Ciocalteu法で比色定量し、澱粉へのポリフェノール吸着量を定量した。ポリフェノール吸着量についても、12月中旬(12/17)に収穫され

た塊根の澱粉では 55.5 および 43.6 $\mu\text{g/g}$ と高い値を示し、アルカリ着色度と同様の傾向を示した。

表 1-4 「こなみずき」澱粉の白度とアルカリ着色度，ポリフェノール吸着量

植付け時期 (植付け日)	収穫 日	栽培 期間 (日)	澱粉 白度	アルカリ 着色度 (430 nm 吸光度)	ポリフェノール 吸着量 ($\mu\text{g/g}$)
	10/ 1	180	89.6	0.158	36.7
4月上旬	10/22	200	87.6	0.126	32.4
(4月4日)	11/12	220	90.0	0.150	30.0
	11/30	240	86.5	0.198	33.9
	9/24	160	88.4	0.123	35.1
4月中旬	10/15	180	88.5	0.136	28.8
(4月17日)	11/ 2	200	87.4	0.221	52.8
	11/22	220	88.7	0.163	27.7
	10/16	160	87.3	0.158	37.0
5月中旬	11/ 5	180	88.5	0.200	37.6
(5月10日)	11/26	200	88.7	0.198	25.8
	12/17	220	81.6	0.321	55.5
5月下旬	12/17	200	82.3	0.262	43.6
(5月30日)					

3-5 塊根のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性

各試験区の塊根中のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性を測定した結果を表 1-5 に示した。サツマイモのポリフェノールは中心部よりも表皮部に多く存在することから^{22, 23)}, 塊根を表皮部と中心部に分けてポリフェノール含量を比較した。4 月上旬および 4 月中旬植えの試験区では, ポリフェノール含量は表皮部で 113.2~166.5 mg/100 g, 中心部で 63.5~119.3 mg/100 g の値を示した。5 月中旬および 5 月下旬植えでは, 11 月下旬 (11/26) までの収穫時期では表皮部が 144.5~183.9 mg/100 g, 中心部は 78.5~95.4 mg/100 g の値を示したが, 12 月中旬 (12/17) の収穫時期では表皮部が 251.2 および 339.6 mg/100 g, 中心部が 163.7 および 225.3 mg/100 g と高いポリフェノール含量を示した。

ポリフェノールオキシダーゼ活性については, 収穫日が 11/26 以降の塊根で高くなり (1×10^{-3} U/g 以上), 特に 5 月下旬植えの 12 月中旬 (12/17) 収穫の塊根では 3.07×10^{-3} U/g と高かった。

表 1-5 「こなみずき」塊根のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性

植付け時期 (植付け日)	収穫 日	栽培 期間	ポリフェノール含量 (mg/100 g)		ポリフェノール オキシダーゼ活性 ($\times 10^{-3}$ U/g)
			表皮部	中心部	
4月上旬 (4月4日)	10/ 1	180	113.2	71.1	0.68
	10/22	200	130.0	73.9	0.62
	11/12	220	164.3	91.6	0.09
	11/30	240	166.5	119.3	1.29
4月中旬 (4月17日)	9/24	160	120.9	63.5	0.75
	10/15	180	163.3	75.1	0.55
	11/ 2	200	141.5	92.1	0.18
	11/22	220	137.0	88.1	0.62
5月中旬 (5月10日)	10/16	160	183.9	95.4	0.18
	11/ 5	180	144.7	93.6	0.50
	11/26	200	144.5	78.5	1.12
	12/17	220	251.2	163.7	1.11
5月下旬 (5月30日)	12/17	200	339.6	225.3	3.07

第四節 考 察

澱粉を食品用途として用いる場合、粘度特性などの物性規格が安定し、澱粉白度の高い高品質製品が求められる。本研究では、食品用途に期待されている「こなみずき」澱粉の高品質化を図るため、栽培条件と澱粉特性の関連性を調べた。

澱粉の物性については、野田ら^{7, 16)}が従来品種のサツマイモ澱粉において粘度特性は栽培条件によって変動することを報告している。「こなみずき」澱粉のような低温糊化特性を示す澱粉は、従来品種の澱粉と比べて、アミロペクチンにグルコースの重合度6~10の短鎖が多く、澱粉粒の中心部に亀裂を持つ特徴があり⁹⁾、このような特殊な構造要因により澱粉の粒構造が不完全なために糊化温度が低いと推察されている²⁴⁾。本研究では「こなみずき」澱粉に特徴的な低温糊化特性については、いずれの栽培条件においても確認できた。しかし、RVAによる最高粘度は11月上旬(11/5)までに収穫された塊根よりも11月中旬(11/12)以降に収穫された塊根で上昇した。また、RVAによる粘度上昇温度やDSCによる糊化開始温度は収穫時期が遅くなると低下する傾向がみられ、片山ら⁹⁾の報告と一致した。特に、12月中旬(12/17)収穫の塊根では、DSCにおいて糊化吸熱ピークの幅($T_c - T_o$)が大きくなることや、糊化エンタルピーの低下などの性質変化が認められた。野田ら¹⁵⁾は、植え付け時期や収穫時期が遅くなると糊化開始温度が低くなり、これは地温の低下によってアミロペクチンに短鎖が多くなることに起因すると考察している。本研究ではアミロペクチ

ンの単位鎖分析は実施していないが、「こなみずき」澱粉でも同様の構造変化が生じたことが推測される。さらに、収穫時期が遅くなると小粒子の割合が増加することが明らかになった。澱粉の性質は粒径によって異なることが報告されており^{25, 26)}、物性の変化には、先に述べた構造変化に加えて、粒度分布の変化も影響していることが示唆された。このように、「こなみずき」は栽培条件により澱粉の粘度特性などの物性が変化することの知見を得ることができたが、環境条件によるアミロペクチンの構造変化と澱粉の粒径との関連性については今後解明すべき課題である。

一方、澱粉白度については、5月中旬植えと5月下旬植えの12月中旬(12/17)に収穫したサツマイモ塊根から調製した澱粉は白度が82前後と低く、これらの塊根ではポリフェノール含量が顕著に高かった。すなわち、収穫時期が12月中旬以降と遅くなると「こなみずき」澱粉の白度が顕著に低下し、この澱粉白度の低下にはポリフェノール含量の増加が大きく影響していると考えられた。澱粉白度は11月中旬までに収穫された塊根では植え付け時期や栽培期間に影響されず87以上の比較的高い値を示し、ポリフェノール含量も表皮部で183.9 mg/100 g以下と大幅な増加はみられなかった。このことは、澱粉白度と塊根中のポリフェノール含量には、植え付け時期や栽培期間よりも収穫時期が大きく影響することが示唆される。サツマイモ塊根のポリフェノール含量と栽培環境の関係について鄭ら²⁷⁾は、塊根肥大期の低温によってポリフェノール含量が増大すると報告している。11月下旬から12月中旬は平均気温が10℃を下回る日

が多くなることや、12月中旬に収穫した塊根の一部には塊根内部にまで低温障害とみられる症状が観察されたことから、塊根中のポリフェノール含量の増加は低温によるストレスが要因と考えられた。これらのことから気温や地温の低下といった環境要因が塊根中のポリフェノール含量を増加させ、澱粉白度を低下させる要因になると推察された。

図 1-2 に「こなみずき」塊根の澱粉白度とポリフェノール含量およびポリフェノールオキシダーゼ活性との関係性を示した。「こなみずき」塊根の澱粉白度とポリフェノール含量には中心部で相関係数 $R = -0.887$ 、表皮部で $R = -0.862$ と高い負の相関が認められ、「こなみずき」から調製した澱粉の白度は、塊根中のポリフェノール含量が大きく影響することを裏付けている。また、図 1-3 に塊根中のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性の関連性を示した。塊根中のポリフェノール含量とポリフェノールオキシダーゼ活性には高い正の相関（中心部 $R = 0.817$ 、皮部 $R = 0.778$ ）が認められ、ポリフェノールの生成とポリフェノールオキシダーゼの発現の関連性が示唆された。

サツマイモのポリフェノールは、クロロゲン酸類が主体であることが報告されている^{28, 29)}。山村らの報告^{30, 31)}において、澱粉白度の低下は、サツマイモの磨砕時にクロロゲン酸類が澱粉に吸着し、この吸着したクロロゲン酸類が酸化酵素であるポリフェノールオキシダーゼによって酸化褐変することが大きな要因であると推察している。

今回の試験結果でも澱粉白度が大きく低下した 12 月中旬（12/17）収穫の塊

根から調製した澱粉では、澱粉のアルカリ着色度やポリフェノール吸着量が高いことを実証し、塊根中のポリフェノール含量と澱粉白度には関連性があることが示された。これらのことから、ポリフェノール含量が増加した塊根では、より多くのポリフェノールが澱粉に吸着して酸化着色し、澱粉白度を低下させると考えられる。

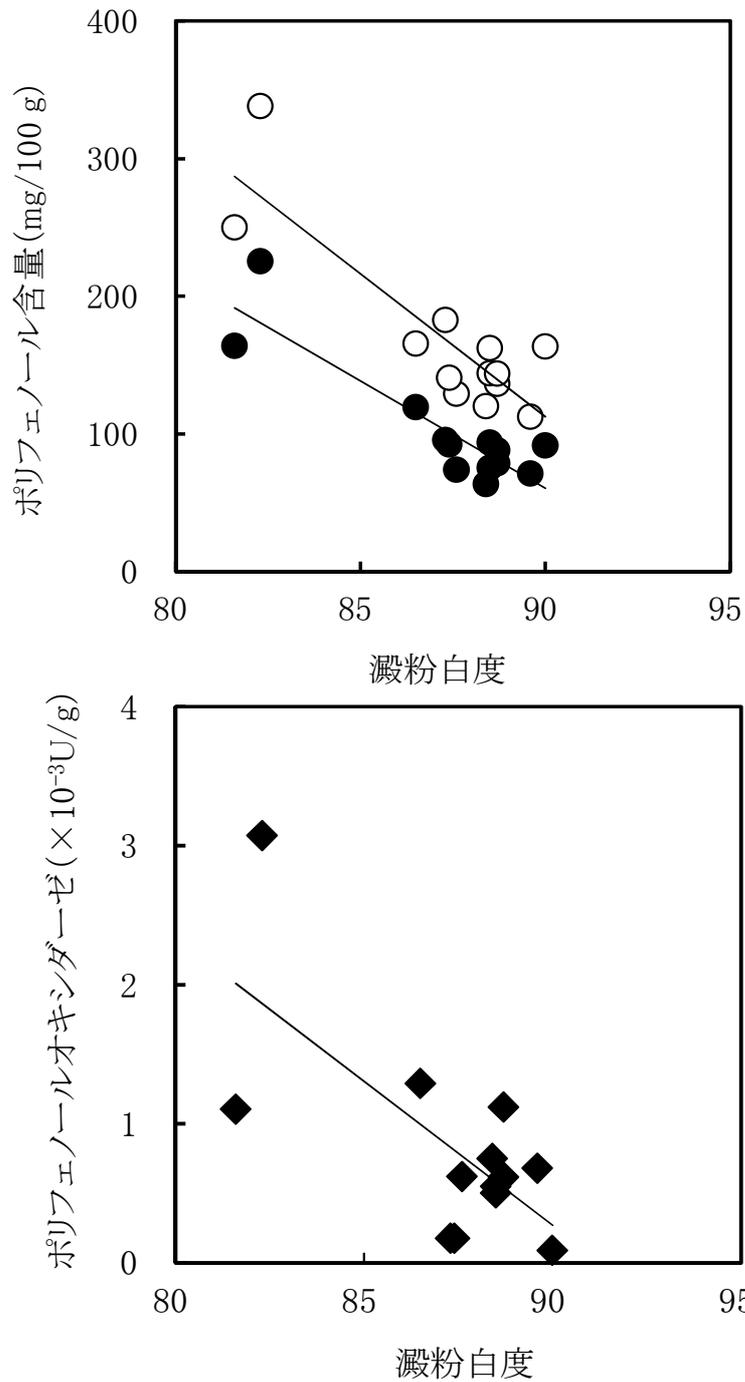


図 1-2 澱粉白度と「こなみずき」塊根のポリフェノール含量と

ポリフェノールオキシダーゼ活性との関係性

- 中心部のポリフェノール含量； ○ 表皮部のポリフェノール含量；
- ◆ 塊根のポリフェノールオキシダーゼ活性

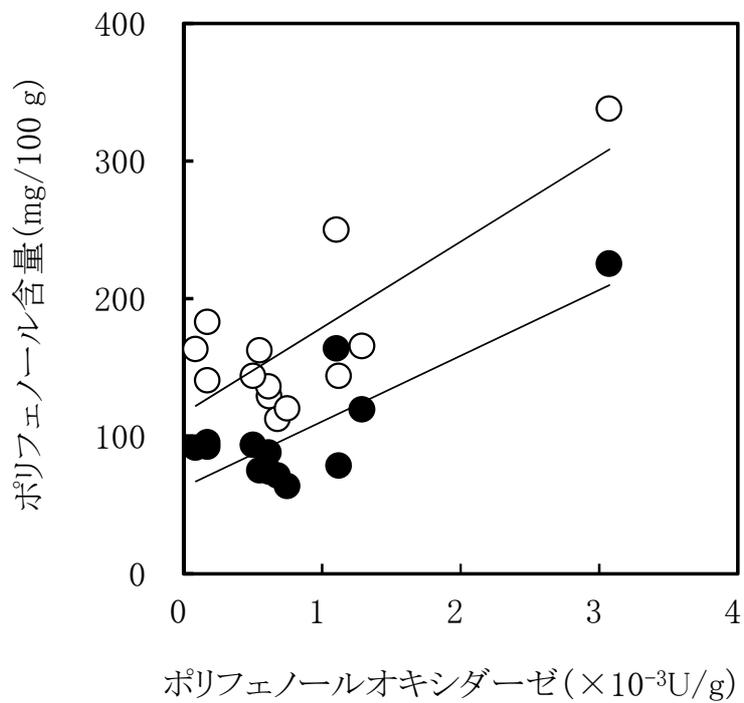


図 1-3 「こなみずき」 塊根のポリフェノール含量とポリフェノール
オキシダーゼ活性との関係性

● 中心部のポリフェノール含量； ○ 表皮部のポリフェノール含量

以上のことから、サツマイモ新品種「こなみずき」から調製される澱粉の物性と白度は、栽培条件によって変化することが明らかになった。特に12月に収穫した塊根から調製した澱粉は白度が低かった。澱粉を食品に使用する場合は、澱粉白度が製品の見た目に影響することから、澱粉白度の向上が重要視されることが多い。また、塊根中のポリフェノール含量の増加は澱粉工場の製造工程で澱粉を精製するにあたって多大な負荷が生じ、製造コストが増大する要因にもなる。これまでに、栽培条件が澱粉白度に与える影響についての知見は少なく、今回の結果は澱粉品質の向上および澱粉製造の低コスト化に向けた原料確保のための貴重な判断材料となり得る。塊根中のポリフェノール含量は植え付け時期や栽培期間よりも収穫時期に影響され、気温や地温が低下する収穫後期（11月下旬～12月中旬）は澱粉白度が低下するとともに、物性の変化も大きくなることから、「こなみずき」塊根は11月中の時期に収穫することが望ましいと考えられる。また澱粉白度を低下させないためには、サツマイモを磨砕する際になるべく澱粉にポリフェノールを吸着させない澱粉製造技術の導入も必要であると考ええる。

第五節 小 活

低温糊化性澱粉を有するサツマイモ新品種「こなみずき」について、植え付け時期と収穫時期および栽培期間が異なる塊根から澱粉を調製し、澱粉の粒径、粘度特性、糊化特性、澱粉白度、澱粉のポリフェノール吸着量および塊根中の

ポリフェノール含量やポリフェノールオキシダーゼ活性を測定し、栽培条件が澱粉品質に与える影響を調査した。

いずれの栽培条件の澱粉でも低温糊化性を示し、RVA による粘度上昇温度は 56.0~58.6 °Cの範囲に、DSC による糊化ピーク温度は 50.6~53.8 °Cの範囲にあった。粘度上昇温度は収穫時期が早いと高い傾向を示し、DSC による糊化ピーク温度の結果も一致した。最高粘度は、植え付け時期が4月よりも5月で高くなり、短期栽培（160, 180 日間）よりも長期栽培（200, 220, 240 日間）で高かった。澱粉白度は塊根の収穫時期が12月以降になると顕著に低下した。澱粉白度が低下した栽培条件では、塊根中のポリフェノール含量が増加しており、収穫時期の低温によって塊根中のポリフェノール含量が増加すると考えられた。澱粉白度と塊根中のポリフェノール含量には高い負の相関が認められ、ポリフェノール含量の増加が澱粉白度を低下させる要因であることが示唆された。

第二章 サツマイモ品種「こなみずき」澱粉製造における pH 調整が澱粉品質 に与える影響

第一節 序 章

前章において、栽培条件が異なる「こなみずき」塊根の澱粉品質について調査した結果、気温が低下する 11 月下旬以降に収穫した「こなみずき」塊根から調製した澱粉は、白度が低下することを明らかにし、その要因は低温ストレスにより塊根中のポリフェノール含量が増加して澱粉へのポリフェノール吸着量が増加するためと報告した³²⁾。澱粉白度の低下は、澱粉ゲルや澱粉麺などの加工食品の着色（褐変）要因となることがあり、食品用澱粉としての普及を妨げる可能性がある。新たに開発された「こなみずき」澱粉を食品用として普及させるためには、収穫時期に係わらず澱粉品質を一定の基準以上に保つ技術が必要である。

本研究では、サツマイモ品種「こなみずき」澱粉の白度向上技術の確立を図ることを目的とし、まず、モデル実験で塊根磨砕物の pH 調整を行い、澱粉白度や澱粉品質に与える影響について調査した。その結果、pH 調整による澱粉白度の向上が認められたことから、澱粉製造工場において塊根の磨砕後に pH 調整を行い、ポリフェノールの澱粉への吸着抑制および澱粉白度に与える影響について調査した。

第二節 実験材料および実験方法

2-1 供試材料

本研究では、モデル実験および澱粉製造工場で塊根摩砕液の pH 調整を行った澱粉を調製して供試試料とした。

モデル実験で用いた「こなみずき」塊根は、2013 年 11 月 13 日に鹿児島県農業開発総合センター大隅支場(鹿児島県鹿屋市)で収穫されたものを使用した。収穫後の塊根を水洗後、小型のロール磨砕機 ((有)小中産業, 鹿児島) ですり潰して磨砕した。この塊根磨砕物を 1 kg ずつ採取し、3 倍量の水を加えた後、食品添加物として利用可能な水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ (関東化学(株), 東京) 飽和水溶液の添加量を変えて、それぞれ pH 7.0, 7.5, 7.8, 8.5, 9.0 に調整した。なお、水酸化カルシウム飽和水溶液を添加しない pH 未調整の塊根磨砕液の pH は 6.4 であった。pH 調整後は塊根磨砕物を 10 分間攪拌し、静置後に上澄み液を除去した。固形物は加水しながら目開き 355 μm の篩を通して澱粉粕を取り除き 1 晩静置して澱粉を沈降させた。上澄みを捨て、沈降した澱粉は加水しながら目開き 90 μm の篩, 目開き 63 μm の篩を通して微粕を取り除き、上澄み液が透明になるまで水洗と沈降を繰り返して澱粉を精製した。精製澱粉は吸引ろ過 (No.2 ろ紙, アドバンテック東洋(株), 東京) で回収後、自然乾燥して目開き 355 μm の篩を通し、澱粉試料とした。

澱粉工場の試料は JA 南薩拠点霜出澱粉工場 (鹿児島県南九州市) で製造された澱粉で、澱粉原料である「こなみずき」塊根は、2013 年 11 月下旬から 12 月

初旬にかけて収穫され、澱粉は 12 月 12 日に採取された。

サツマイモ澱粉の製造工程フローの概略³³⁾を図 2-1 に示した。すなわち、本実験での製造工程は以下の通りである。塊根を洗浄後、高速磨砕機 (SR-630, (株) 瀬野鉄工所, 北海道) で加水しながら磨砕し、デカンター遠心分離機 (STNX438S, アルファ・ラバル (株), 東京) で固形分 (繊維や澱粉) と脱汁液 (廃液) に分離した。脱汁された固形物を遠心篩い機 (GRL-850, (株) 瀬野鉄工所, 北海道) で水洗しながら目開き 106 μm の篩を通して澱粉粕と澱粉乳に分離し、更に澱粉乳をノズルセパレーター (SSC-655EW, 斉藤遠心機工業 (株), 東京) やハイドロサイクロン (N62-350-11, (株) 瀬野鉄工所, 北海道) で澱粉乳を濃縮・精製し、微細な繊維や不純物を取り除いた。精製された澱粉乳を遠心脱水機 (HZ160Si, 三菱化工機 (株), 神奈川) で脱水し、水分を 35 % 前後に調整後、気流乾燥機 (北斗工機 (株), 北海道) で乾燥した。これらの工程で、磨砕工程後に水酸化カルシウム飽和水溶液を添加して pH を弱アルカリとし、結果として塊根磨砕液の pH は pH 8.8 となった。各製造工程から磨砕物または澱粉乳を採取して、加水しながら目開き 63 μm の篩を通して澱粉粕を取り除いた後、静置して澱粉を沈降させた。沈降した澱粉は、モデル実験と同様に精製および乾燥した。各製造工程の pH については、磨砕工程では磨砕液、濃縮および精製工程では澱粉乳、脱水および乾燥工程では澱粉を高純水に懸濁して測定した。

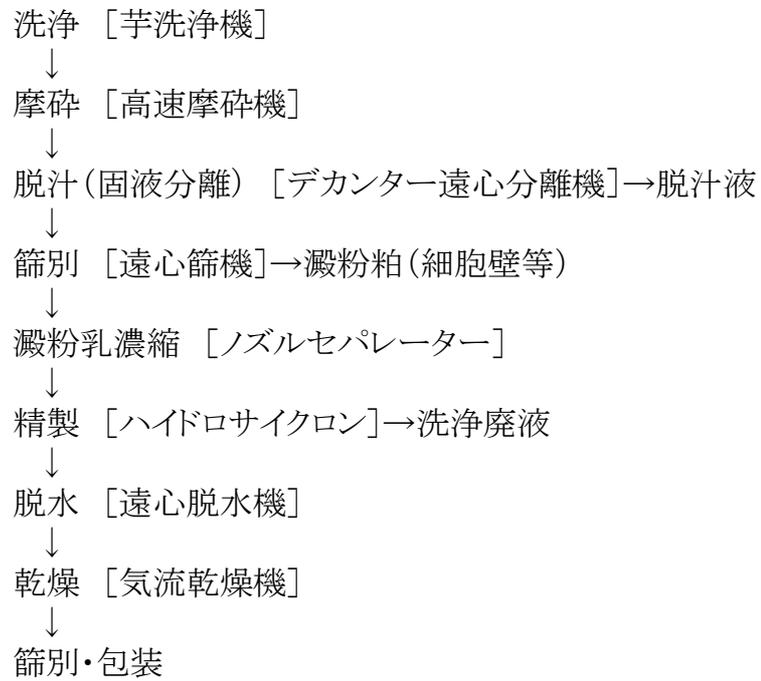


図 2-1 サツマイモ澱粉の製造工程フロー

[] 内は製造装置名

2-2 澱粉の特性

澱粉の白度は白度計 (C-100, (株)ケット科学研究所, 東京) で測定した。各試料につき測定は3回行い, 平均値を示した。

澱粉の粘度特性は, ラピッドビスコアナライザー (RVA-3D, フォスジャパン (株), 東京) で測定し, 澱粉濃度は7% (w/w) とした³⁴⁾。

澱粉の平均粒径は, レーザー回折式粒度分布装置 (HELOS & RODOS, Sympatec GmbH, ドイツ) を使用して水中湿式で測定し, メディアン径を求めた。

澱粉のアルカリ着色度は, 鈴木らの方法に準じて測定した²¹⁾。澱粉 1.5 g (無水物) に 3 mL の 0.1 N 水酸化ナトリウム水溶液を加えて攪拌し, 15 分ごとに攪拌しながら 1 時間静置した。遠心分離 (2,460 × g, 10 分間) 後, 得られた上澄み溶液の 420 nm の吸光度を分光光度計 (V-550, 日本分光(株), 東京) で測定し, アルカリ着色度とした。

これらの実験において, 測定は各試料につき 2 回行い, 測定値がほぼ一致したので, 平均値を示した。

2-3 澱粉ゲルおよび澱粉糊液の物性

澱粉ゲル (わらびもち) を次の方法で調製し, 物性を評価した³⁴⁾。澱粉

(40 g), グラニュー糖 (50 g), 水 210 mL をセパラブルフラスコ (500 mL 容) に入れ, 混合して懸濁液を調製した。懸濁液をパドルで攪拌しながら,

3 °C/分で 25 °C から 95 °C まで加熱後, 95 °C で 5 分間保持し, 15 分間は 100

rpm, その後の 5 分間は 70 rpm で連続的に攪拌した。加熱終了後, 一定量 (17 g) を底が平らな円筒状のプラスチックチューブ (30 mm 径) に入れ, 気泡を除くために蒸気で 5 分間加熱後, 直ちにピストンで押さえて成形した。高さ 20 mm に成型されたゲル試料は数時間 20 °C で静置した後, 5 °C で 3 日間冷蔵した。澱粉ゲルの破断特性の測定にはレオメータ (RE-33005, (株)山電, 東京) を使用した。冷蔵したゲル試料を測定前に 20 °C で数時間置き, 半円状 (厚さ 10 mm) にカットし, くさび型 (1 mm 幅) のプランジャー (No. 49) で圧縮 (1 mm/sec, 圧縮率 98 %) した。破断曲線における歪率 5~15 % の間の弾性率をゲルの見かけの弾性率としてかたさの指標とした。また, ゲルが破断されるまでの距離を試料の厚さで割った値を破断歪率 (%) とした。測定は 6 回行い, 平均値を示した。

澱粉糊液 (6 %, w/w) のかたさと付着性は, レオメータ (RE-33005, (株)山電, 東京) で測定した。澱粉糊液の調製は, 先述と同様に RVA を使用し, 加熱冷却後の最終温度は 50 °C とした。ステンレスシャーレ (40 mm 径, 高さ 15 mm) に入れた澱粉糊液を, 丸平型プランジャー (20 mm 径) で 2 回圧縮 (10 mm/sec, 圧縮率 30 %) した。1 回目圧縮時のピーク荷重をかたさとし, 1 回目にプランジャーを引き上げた際の負荷面積を付着性とした。測定は 3 回行い, 平均値を示した。

澱粉ゲル (8 %, w/w) の冷凍解凍による離水率の測定には, 同様に RVA を用いて調製した澱粉糊液を用いた。澱粉糊液を 5 g ずつコニカルチューブ (50 mL

容)に取り分け,遠心分離(1,700 × *g*, 15 分間)により脱気後,冷凍保管(-20 °C, 2 週間)した。凍結した澱粉ゲルを 30 °Cで1時間の解凍処理後,遠心分離(1,700 × *g*, 15 分間)により生じた離水量を測定し,離水率とした。離水率の測定は4回行い,平均値を示した。

動的粘弾性はレオメータ(Rheostress RS1, HAKKE, ドイツ)で測定した。RVAを用いて調製した澱粉糊液(6 %, w/w)について,コーンプレート(35 mm φ, ギャップ 0.05 mm)を使用し,20 °Cで貯蔵弾性率(G')の応力依存性(周波数 1 Hz)を測定した。

第三節 実験結果

3-1 モデル実験における「こなみずき」塊根磨砕液の pH 調整と澱粉特性

表 2-1 には水酸化カルシウム飽和水溶液により調整した「こなみずき」塊根磨砕液の pH と澱粉調製後の白度とアルカリ着色度を示した。水酸化カルシウム飽和水溶液を添加しない pH 未調整(pH 6.4)の澱粉白度が 84.9 に対して,pH 7.0 以上に調整すると澱粉白度は 86.6 以上に上昇した。最も高い澱粉白度の値は pH 7.8 の 88.3 であった。アルカリ着色度は,澱粉に吸着したポリフェノール量の目安となる。pH 未調整(pH 6.4)の澱粉のアルカリ着色度が 0.145 であるのに対して,pH 調整を行った澱粉ではアルカリ着色度が低下し,最も澱粉白度が高い pH 7.8 の澱粉ではアルカリ着色度も 0.109 と最も低くなった。

表 2-2 には pH 調整を行った澱粉試料の RVA 粘度特性(7 %, w/w)を示した。

最高粘度は pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉が 222.3 を示したのに対して, pH 調整 (pH 7.0~9.0) を行った澱粉は 202.5~222.0 を示した。ブレイクダウンは pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉が 85.1 を示したのに対して, pH 調整 (pH 7.0~9.0) を行った澱粉は 67.0~81.3 を示した。また, 粘度上昇温度は pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉が 58.5 °C を示したのに対して, pH 調整 (pH 7.0~9.0) を行った澱粉は 58.4~59.9 °C を示した。これらの結果から, 最高粘度や粘度上昇温度については pH 調整の有無による大きな影響は認められなかった。

表 2-1 pH 調整を行った「こなみずき」塊根磨砕液から調製した澱粉の白度と

アルカリ着色度

pH	澱粉 白度	アルカリ 着色度 (420nm 吸光度)
6.4	84.9	0.145
7.0	86.6	0.117
7.5	86.7	0.112
7.8	88.3	0.109
8.5	87.3	0.133
9.0	87.5	0.111

pH 6.4 以外の試験区は，水酸化カルシウム飽和水溶液を使用し，塊根磨砕液の pH を調整した。

表 2-2 pH 調整を行った「こなみずき」塊根磨砕液から調製した澱粉の

RVA 粘度特性 (7 %, w/w)

pH	最高 粘度 (RVU)	ブレイク ダウン (RVU)	セット バック (RVU)	粘度 上昇 温度 (°C)
6.4	222.3	85.1	132.8	58.5
7.0	210.4	72.5	123.2	59.4
7.5	205.9	72.0	123.6	58.7
7.8	213.0	78.5	126.0	58.4
8.5	202.5	67.0	128.7	59.9
9.0	220.0	81.3	116.4	58.9

pH 6.4 以外の試験区は、水酸化カルシウム飽和水溶液を使用し、塊根磨砕液の

pH を調整した。

pH 未調整 (pH 6.4) から pH 調整 (pH 9.0) までの澱粉試料において RVA 粘度特性値に大差が認められなかったため、以後の実験は pH 未調整 (pH 6.4) と pH 調整 (pH 7.8, 9.0) の 3 点に絞って実験した。まず、澱粉ゲル (わらびもち) を作製し、冷蔵保存中の見かけの弾性率と破断歪率の変化を調べた。一般的なサツマイモ澱粉に比べて「こなみずき」澱粉はゲルを冷蔵しても硬くならず、物性変化が小さいことが特徴である³⁴⁾。図 2-2 に示すように、pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉と pH 調整 (pH 7.8, 9.0) を行った澱粉のいずれにおいても、見かけの弾性率や破断歪率の変化は小さく、pH 調整が澱粉ゲルの物性に与える影響は認められなかった。

表 2-3 に 6%澱粉糊液の物性および 8%澱粉ゲルの冷凍解凍処理後の離水率を示した。澱粉糊液のかたさは変化がなく、付着性は pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉が 442.5 J/m^3 であるのに対して、pH 調整 (pH 7.8, 9.0) を行った澱粉がそれぞれ 449.9 J/m^3 と 479.3 J/m^3 であった。冷凍解凍処理後の離水率は、pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉が 0.6% であるのに対して、pH 調整 (pH 7.8, 9.0) を行った澱粉は 0.2% と 0.6% であり、澱粉糊液のかたさと付着性や澱粉ゲルの冷凍解凍処理後の離水率においても pH 調整が与える影響は認められなかった。

図 2-3 に 6%澱粉糊液の貯蔵弾性率 (G') の応力依存性を示した。pH 未調整 (pH 6.4) の澱粉糊液に対して、pH 調整 (pH 7.8, 9.0) を行った澱粉糊液の貯蔵弾性率 (G') はやや低下する傾向が見られたが、大きな影響は認められなかった。

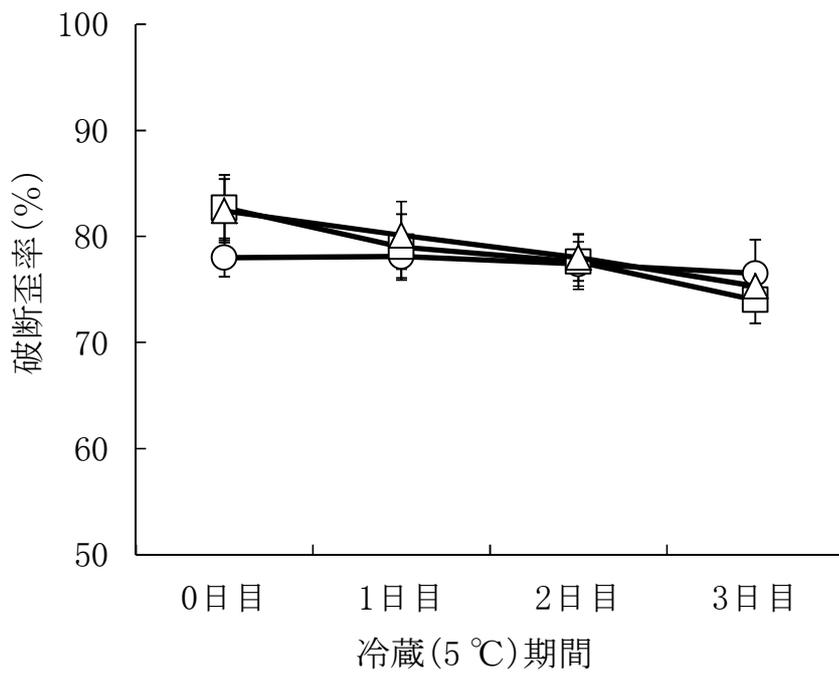
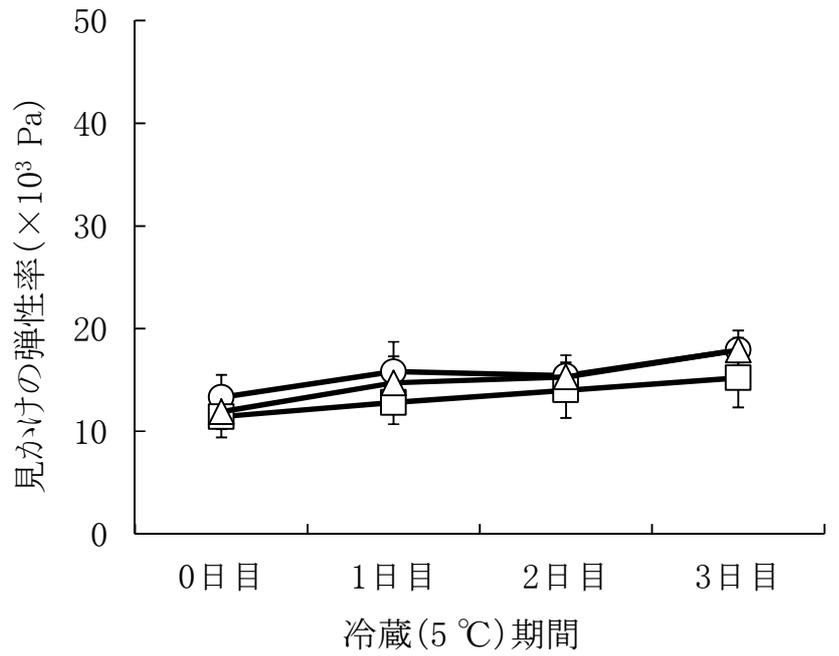


図 2-2 pH 調整を行った「こなみずき」塊根磨砕液から調製した澱粉のゲル
(わらびもち) の物性変化

○, pH 6.4 □, pH 7.8 △, pH 9.0

表 2-3 pH調整を行った「こなみずき」塊根磨砕液から調製した澱粉の糊液(6 %, w/w) の物性および澱粉ゲル (8 %, w/w) の冷凍解凍処理後の離水率

pH	6 %澱粉糊液の物性		8 %澱粉ゲルの 冷凍解凍後の 離水率 (%)
	かたさ (<i>N</i>)	付着性 (J/m^3)	
pH 6.4	0.14±0.01	442.5±26.6	0.6±0.5
pH 7.8	0.13±0.00	449.9±19.1	0.2±0.1
pH 9.0	0.14±0.00	479.3±11.8	0.6±0.4

pH 6.4 以外の試験区は、水酸化カルシウム飽和水溶液を使用し、塊根磨砕液の pH を調整した。

数値は平均値±標準偏差を示した。

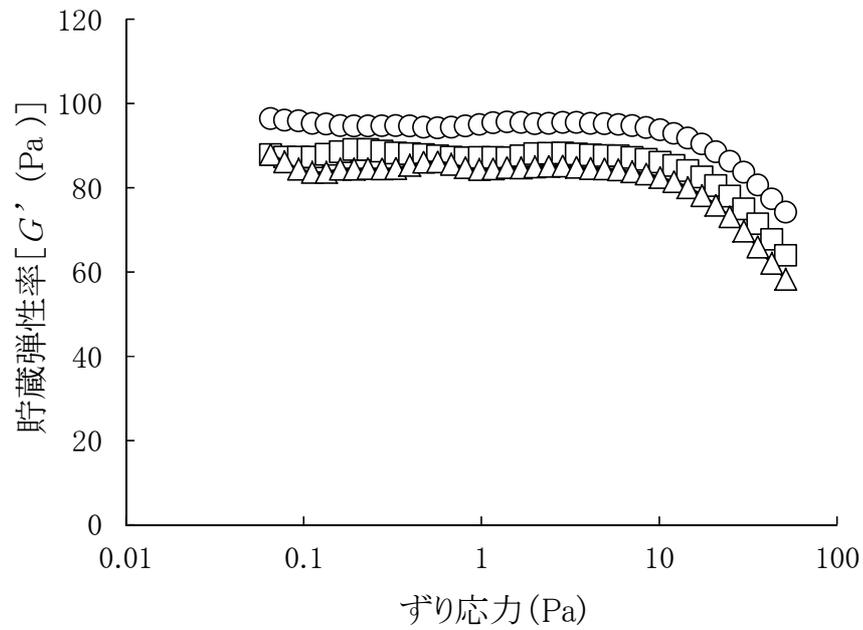


図 2-3 pH 調整を行った「こなみずき」塊根磨砕液から調製した澱粉の糊液

(6 %, w/w) の貯蔵弾性率 (G') の応力依存性

○, pH 6.4 □, pH 7.8 △, pH 9.0

3-2 澱粉製造工場における塊根磨砕液の pH 調整と澱粉特性

表 2-4 には pH 調整を行った各製造工程で採取した澱粉の pH, 白度ならびにアルカリ着色度を示した。澱粉白度は磨砕工程後の澱粉が 81.1, 澱粉乳濃縮工程後の澱粉が 85.7, 精製工程後の澱粉では 88.4 に上昇した。脱水工程と乾燥工程を経た最終的な澱粉白度は 91.7 となった。アルカリ着色度は磨砕工程後の澱粉は 0.217 であったが, 精製工程後の澱粉では 0.113, 乾燥工程後の澱粉では 0.097 に低下した。

表 2-5 に pH 調整を行った各製造工程から採取した澱粉の RVA 粘度特性 (7%, w/w) と平均粒径を示した。磨砕工程後の澱粉では最高粘度が 220.3 RVU, 粘度上昇温度が 59.3 °C, 平均粒径が 18.8 μm であった。乾燥工程後の澱粉では最高粘度が 258.2 RVU, 粘度上昇温度が 57.9 °C, 平均粒径が 18.9 μm を示し, 製造工程後半 (脱水工程, 乾燥工程) では製造工程前半 (磨砕工程, 濃縮工程) よりも最高粘度が上昇した。図 2-4 には pH 調整を行った各製造工程で採取した澱粉の粒度分布を示した。今回の製造実験では, 粒径 25 μm 以上の大粒子が製造工程前半 (磨砕工程, 濃縮工程) よりも製造工程後半 (脱水工程, 乾燥工程) でやや多い特徴がみられた。

表 2-4 「こなみずき」澱粉製造工場で pH 調整を行った各製造工程の pH と

各製造工程から調製した澱粉の白度とアルカリ着色度

製造工程	pH	澱粉 白度	アルカリ 着色度 (420nm 吸光度)
磨碎	8.8	81.1	0.217
濃縮	6.4	85.7	0.313
精製	6.3	88.4	0.113
脱水	6.2	91.5	0.080
乾燥	6.2	91.7	0.097

製造工程フローは図 2-1 に示す通りで、「こなみずき」塊根磨碎液に水酸化カルシウム飽和水溶液を加えて pH を弱アルカリ (pH 8.8) に調整した。

表 2-5 「こなみずき」澱粉製造工場で pH 調整を行った各製造工程から

調製した澱粉の RVA 粘度特性 (7 %, w/w) と粒径

製造工程	最高 粘度 (RVU)	ブレーク ダウン (RVU)	セット バック (RVU)	粘度 上昇 温度 (°C)	澱粉 粒径 (μm)
磨砕	220.3	88.6	119.8	59.3	18.8
濃縮	223.5	98.4	117.1	58.3	15.7
精製	254.2	124.0	115.6	58.1	17.9
脱水	251.3	112.6	115.8	58.2	19.6
乾燥	258.2	120.2	123.5	57.9	18.9

製造工程フローは図 2-1 に示す通りで、「こなみずき」塊根磨砕液に水酸化

カルシウム飽和水溶液を加えて pH を弱アルカリ (pH 8.8) に調整した。

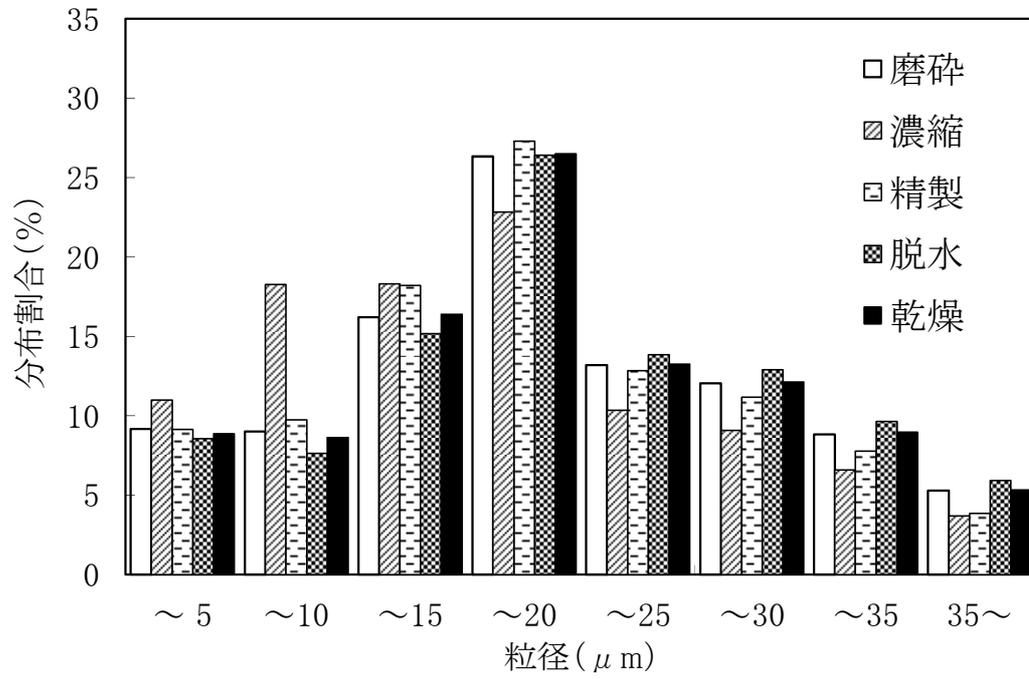


図 2-4 「こなみずき」澱粉製造工場で pH 調整を行った各製造工程から調製した澱粉の粒度分布

第四節 考 察

モデル実験では、表 2-1 の結果から「こなみずき」塊根磨砕物の pH を 7.0 以上に調整することで、調製澱粉の白度が向上することが明らかになった。また、pH を 7.0 以上に調整することによって澱粉のアルカリ着色度は低下した。アルカリ着色度は澱粉に吸着したポリフェノール量の目安となることから、アルカリ着色度の低下は、澱粉へのポリフェノールの吸着量が低下したことを示唆する³²⁾。このことは、pH がアルカリ側に変化することによってポリフェノールの水酸基や澱粉表層のグルコースの水酸基および結合リン酸基が部分的に解離することにより両者の吸着力が弱まることが要因ではないかと推察される。また、サツマイモのポリフェノールはクロロゲン酸を主体としている^{35, 36)}が、リン酸基の多いジャガイモ澱粉にはクロロゲン酸がほとんど吸着されなかった結果も報告されている¹⁸⁾。

モデル試験で最も澱粉白度が高かったのは、pH 7.8 (澱粉白度は 88.3) となっており、pH 未調整 (pH 6.4) と比較すると澱粉白度が 3.3 上昇した。しかし、pH が更に高くなると pH 7.8 の条件よりも若干低下した。山村ら^{30, 31)}は澱粉に吸着したクロロゲン酸が酸化着色することで澱粉白度が低下することを報告している。また、クロロゲン酸はアルカリ側での酸化によって緑変することが報告されている^{37, 38)}。山村ら³⁹⁾は pH 8.0 以上に調製した澱粉は、澱粉へのクロロゲン酸の吸着は抑制できるが、緑変した色素によって澱粉白度が低下することを報告している。本実験においても pH 8.5 と 9.0 の条件では磨砕液から固液

分離した上澄み液は緑変しており、この色素によって澱粉白度がやや低下したと考えられた。一方、pH 調整を行った澱粉の粘度特性や物性を比較した結果、それらの特性値に塊根摩砕液の pH 調整が与える影響は少ないと判断された。

「こなみずき」澱粉の製造工場において、塊根磨砕液の pH 調整を行った澱粉は、脱汁工程や澱粉乳の濃縮工程でポリフェノールが脱汁液や廃液に移行して取り除かれ、さらに精製・脱水工程で微粕が取り除かれることにより澱粉白度は 91.7 と大幅に向上した。また、アルカリ着色度も乾燥後は 0.097 と低下した（表 2-4）。塊根磨砕液の pH 調整後に工場ではデカンターで速やかに固液分離を行うことから澱粉へのポリフェノール吸着抑制効果がさらに高まったと考えられた。濃縮工程で一時的にアルカリ着色度が上昇するが、このことには精製工程で漏れた微粕を含む小粒子の澱粉を再精製するために濃縮工程に再投入することが影響していると考えられた。また、精製工程以降の澱粉は RVA による最高粘度が上昇したが（表 2-5）、これらの澱粉では粒度分布において 25 μm 以上の粒子がやや多くなっていることから（図 2-4）、最高粘度の上昇は pH 調整によるものではなく製造方法に起因するものと推察された。

以上の結果から、「こなみずき」澱粉の白度向上対策には、水酸化カルシウム飽和水溶液による塊根磨砕液の pH 調整が有効であることが示された。第一章において、「こなみずき」澱粉の白度は収穫後期（11 月下旬以降）になると塊根中のポリフェノールが増加し、澱粉白度が低下することを報告した³²⁾。pH 調整の技術導入によって、収穫後期の「こなみずき」から調製される澱粉の白度も

向上させることができ、澱粉品質の安定化に寄与することができる。本報告ではサツマイモ品種は「こなみずき」で試験を行ったが、「シロユタカ」など他の澱粉原料用品種についても本技術を適用することによって澱粉白度の向上が可能となり、サツマイモ澱粉のさらなる品質向上が図られ、需要拡大に寄与することを期待する。

第五節 小 活

サツマイモ品種「こなみずき」の澱粉製造において、塊根磨砕物の pH を変えて調製した澱粉の白度や粘度特性等を測定し、pH 調整が澱粉の品質に与える影響を調査した。

モデル実験では、「こなみずき」塊根を磨砕した磨砕物に水酸化カルシウム $[Ca(OH)_2]$ 飽和水溶液を添加して pH を 6.4~9.0 の範囲で調整してから澱粉を調製した。無添加の pH 6.4 で調製した澱粉は白度が 84.9 であるのに対して、弱アルカリ (pH 7.8~9.0) で調製した澱粉は白度が 87.3~88.3 と向上した。一方、RVA による粘度上昇温度は 58.4~59.9 °C の範囲にあり、また澱粉ゲル(わらびもち)や澱粉糊液の付着性や粘弾性においても大きな変化はなく、pH 調整が澱粉の粘度特性や物性に与える影響は認められなかった。

次に、澱粉製造工場における磨砕工程に pH 調整を適用した結果、塊根磨砕後の pH を 8.8 に調整して製造した澱粉は 91.7 と高い白度の値を示した。また、磨砕工程での pH 調整が澱粉の粘度特性に与える影響は小さく、澱粉白度が向上

した澱粉はポリフェノール吸着量の目安となるアルカリ着色度の値も低かった。

これらのことから、栽培環境のストレスによりポリフェノール含量が高まった「こなみずき」塊根であっても、磨砕工程の pH 調整によって澱粉へのポリフェノール吸着が抑制され澱粉白度を向上できることが明らかになった。

第三章 サツマイモ品種「こなみずき」の澱粉特性と食品利用

第一節 序 章

新規サツマイモ「こなみずき」の澱粉について、第一章においては、「こなみずき」塊根から調製される澱粉の物性と白度は、栽培条件によって変化することを明らかにした。第二章においては、12月以降の低温によってポリフェノール含量が高まった塊根であっても、塊根磨砕後の pH を調整することによって澱粉へのポリフェノールの吸着が抑制され、澱粉白度が向上できることを明らかにした。このように、「こなみずき」澱粉の栽培条件が澱粉特性に及ぼす影響や澱粉白度といった品質を向上させる技術について明らかにしたが、菓子類や麺類など様々な食品に利用する澱粉としてどのような適性があるのかはこれまでに報告例がない。

「こなみずき」澱粉の糊化温度は通常の品種よりも約 20 °C 低く、澱粉ゲルの老化速度が遅い特徴を有しており、また、少ない添加量でゲルが成型できる優れたゲル成型性を有している⁹⁾。従って、食品利用の拡大が期待されるが、この画期的な澱粉について食品に利用すると物性や食感にどのような影響を及ぼすのかは明らかになっていない。

石黒ら⁴⁰⁾は、10 品種のサツマイモについて澱粉ゲルの老化特性を調査し、ゲルのかたさと離水率から判断したゲルの老化と重合度 10 以下の短鎖に負の相関があり、アミロース含量と正の相関があることを報告している。「こなみず

き」澱粉についても、アミロペクチンに重合度 6–10 の短鎖が多いことが明らかになっているが^{9, 13)}、澱粉ゲルの成型性と澱粉の分子構造の関係については明らかになっていない。

本研究では、食品素材としての「こなみずき」澱粉を評価するために、「こなみずき」澱粉を使用していくつかの加工食品を試作し、それらの食品の物性を分析した。また、「こなみずき」澱粉の物性とアミロペクチンの構造との関係性について調査した。

第二節 実験材料および実験方法

2-1 澱粉

試験には、2012 年と 2013 年に鹿児島県農業開発総合センター大隅支場（鹿児島県鹿屋市）で 4 月中旬に植付けて 10 月中旬に収穫された 4 品種のサツマイモ、「シロユタカ」、「コガネセンガン」、「ダイチノユメ」、「こなみずき」を使用した。「シロユタカ」と「ダイチノユメ」は主に澱粉製造に、「コガネセンガン」は主に焼酎製造に使用される品種である。

澱粉はいずれの品種も 10 塊根から以下のように調製した。サツマイモ塊根（500～1000 g/個）はロール磨砕機を用いて（有）小中産業、鹿児島）で磨砕し、磨砕物（約 2 kg）は水洗しながら目開き 355 μm と 90 μm の篩を通して細胞壁残さを取り除いた。不要固形物を取り除いた澱粉乳は一晩静置した後、上澄みを取り除いた。沈殿した澱粉は水洗しながら目開き 45 μm の篩を通して

微粕を取り除き，上澄みが透明になるまで沈殿と水洗を繰り返した。回収された澱粉はろ過（No.2 ろ紙，アドバンテック東洋(株)，東京）して脱水し，自然乾燥した後に目開き 355 μm の篩いを通して各試験に用いた。脱脂澱粉とアミロペクチンは従来の方法¹⁸⁾に従って調製した。

市販の従来サツマイモ澱粉（主な品種は「シロユタカ」）は，南さつま農業協同組合（鹿児島県南九州市），キャッサバ澱粉は，日本澱粉工業株式会社（鹿児島県鹿児島市），市販のバレイショ澱粉は清里農業協同組合（北海道斜里町）の製品を使用した。小麦粉は日本製粉株式会社（東京）の製品を使用した。

2-2 澱粉の粘度特性と一般特性

澱粉の粘度特性はラピッドビスコアナライザー（RVA-3D, Newport Scientific Pty. Ltd., オーストラリア）を使用して測定した。7% (w/w) の澱粉懸濁液（全量 25 mL）を 35 $^{\circ}\text{C}$ から 95 $^{\circ}\text{C}$ まで 5 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の昇温速度で加熱し，95 $^{\circ}\text{C}$ で 5 分間保持後，35 $^{\circ}\text{C}$ まで 5 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の降温速度で冷却した。パドルの回転数は最初の 10 秒までは 960 rpm，その後は 160 rpm とした。

澱粉の見かけのアミロース含量⁴¹⁾と結合リン含量は従来の方法¹⁸⁾で測定した。澱粉粒子の粒度分布はレーザー回折式測定装置（HELOS & RODOS, Sympatec GmbH, ドイツ）を使用し，1 分間の超音波処理を行った後に測定し，メディア径を平均粒径として示した。測定は 2 回行い，測定結果はほぼ一致したので，平均値を示した。

2-3 澱粉ゲル及び澱粉糊液の物性

澱粉ゲル（わらびもち）は、既報の方法⁷⁾で調製した。すなわち、澱粉（乾物換算、40 g）、グラニュー糖（50 g）、水 210 mL を混合して懸濁液にし、セパラルフラスコに入れ、攪拌機で攪拌しながら 3 °C/分の昇温速度で 95 °C まで加熱し、95 °C で 5 分間保持した。ただし、ゲル強度を同程度とするためにバレイシヨ澱粉は 30 g、キャッサバ澱粉は 60 g とした。その際のパドルの回転数は 15 分まで 100 rpm、その後の 5 分間は 70 rpm とした。加熱攪拌で得られた試料の 17 g を平らなプラスチックチューブ（30 mm 径）に入れ、脱気するために蒸気で 5 分間蒸煮後、直ちに上からピストンで押さえて成形した。澱粉ゲル（厚さ 20 mm）は、2 時間 20 °C で静置して成形し、 $^{\circ}\text{C}$ で 3 日間冷蔵した。澱粉ゲルの破断試験はレオナー（RE33005、(株)山電、東京）を使用して 3 日間行った。澱粉ゲルは 20 °C で数時間室温に置いた後、10 mm の厚さの半円形に調整して測定に用いた。測定には 1 mm 幅のくさび型プランジャーを用い、1 mm/sec の速度でゲルを圧縮した。圧縮率はゲルの厚さの 98 % とし、破断曲線における歪率 5~15 % の間の初期弾性率を見かけの弾性率として示し、ゲルのかたさの指標とした。測定は各試料で 6 回行い、平均値を示した。

澱粉ゲルの冷凍解凍処理による離水率は、澱粉濃度 8 % (w/w) の懸濁液（全量 28 g）を RVA 粘度測定で使用した方法（ただし、最終温度は 50 °C）を用いて澱粉糊液を調整した。澱粉糊液の一部（5 g）をコニカルチューブ（50 mL 容）

に入れ、遠心分離 ($1,700 \times g$, 15 分間) により脱気後、冷凍 ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 週間) した。冷凍した澱粉ゲルは、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ で 1 時間の解凍処理を行った後、遠心分離 ($1,700 \times g$, 15 分間) し、離水量を測定して離水率 (%) とした。測定は各試料で 3 回行い、平均値を示した。

澱粉糊液の動的粘弾性はレオメータ (Rheostress RS1, Hakke GmbH, ドイツ) を使用し、測定温度は $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、パラレルプレートセンサー (35 mm 径, ギャップは 0.5 mm) を使用して測定した。澱粉糊液 [7% もしくは 6% (w/w), 25 g] は RVA で先述した方法で調製した。貯蔵弾性率 (G') の時間依存性は 7% (w/w) の澱粉糊液について周波数 1 Hz で 2 時間測定した。澱粉糊液は、調整後に直ちにレオメータに移し、測定中の水分蒸発を防ぐために試料表面をシリコンオイルで薄く覆った。測定は各試料で 2 回行い、結果はほとんど一致したので 1 回目の測定値を示した。6% (w/w) の澱粉糊液の流動特性は、せん断速度を $1 \sim 80 \text{ s}^{-1}$ まで上昇させた後、 $80 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ まで下降させて測定した。澱粉糊液は、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ で 15, 30, 60, 90 分間静置し、それぞれレオメータに移して測定した。測定は、各試料で 2 回行い、平均値を示した。

2-4 澱粉の分子構造

澱粉及びアミロペクチンはイソアミラーゼ (Megazyme, 日本バイオコン, 愛知) で $\alpha 1-4$ 結合を加水分解して直鎖グルカンとし、クロマトグラフィーに供した¹⁸⁾。鎖長分布の測定は、既報^{18, 41)}に従って行い、連結された 2 種のカラム

(Superose 6 10/300 GL および Superdex Peptide 10/300 GL, 日本 GE ヘルスケア, 日本) を用いたゲルろ過クロマトグラフィーにより分析した。また, アミロースを測定するために別のカラム (TSKgel GMPWXL および TSKgel guard column PW_{XL}, 東ソー(株), 東京) を使用した。両方のカラムとも, 0.02 %のアジ化ナトリウムを含む 100 mM リン酸ナトリウム緩衝液 (pH 6.2) を用い 0.5 mL/分の流速で溶出させた。校正には, 市販のプルラン標準品 (Shodex STANDARD P-82, P-2, 昭光通商(株), 東京) および重合度 (DP) = 1953, 722, 438, 215 の 4 種のアミロース標準品 [Amylose AS-320, AS-110, AS-70, AS-30, Ajinoki Co. 愛知 (販売中止)] を用いた。

2-5 タピオカパールや澱粉麺への「こなみずき」澱粉の利用

市販の「こなみずき」澱粉を使用してパール (球) 状加工品と澱粉麺 (韓国冷麺) を調製し, 茹でた製品の品質について, 市販の従来サツマイモ澱粉やキャッサバ澱粉, バレイショ澱粉を使用した製品と比較した。これらの加工食品の作製には多くの澱粉を必要とすることから, 加工食品の作製における澱粉試料は, 市販品の澱粉を使用した。

パール状加工品は, 小型のパン型造粒機 (DPZ-01R, アズワン, 大阪) を使用して, 澱粉と水を少量ずつ交互に加えて次のように造粒して調製した。まず, 澱粉の水分を約 40 %に調整し, 目開き 1 mm の篩いを通過させることによってパール核を調製した。パン型造粒機にパール核を入れ, 45° の傾斜角で造粒機

を回転させながら球状に造粒した。造粒は4~5 mmの大きさになるまで行い、パールの表面を蒸気で40~60秒間加熱して糊化した後、自然乾燥させた。作製したパール状加工品は、沸騰水中で15分間煮沸した後、そのまま5時間静置した。茹でたパール状加工品を水切りした後、再度沸騰水中で15分間加熱し、テクスチャー測定に供した。テクスチャー測定には、レオメータ（RE33005, 株式会社山電, 東京）を使用し、円形平型（20 mm 径）のプランジャーを用い、1 mm/secの速度で2回圧縮した。圧縮距離は、試料の厚さの50%とした。かたさは、1回目圧縮時のピーク荷重とし、凝集性は2回目圧縮時の荷重面積を1回目圧縮時の荷重面積に対する割合の値で示した。各試料の測定回数は10回とし、平均値を算出した。

澱粉麺は、澱粉（1.5 kg）と小麦粉（1.5 kg）を使用して作製した。原料粉を混合し、水を加えて水分を約37%に調整した。加水した原料粉に蒸気を加えながら弾力感が生じるまで混合し、麺生地を調製し、エクストルーダー（（有）富士鉄工所, 鹿児島）で押し出して麺を製造した。作製した麺は、高気密性のフィルムに入れて5℃で冷蔵し、テクスチャー測定および官能評価を行った。すなわち、澱粉麺を沸騰水中で2分間加熱した後、直ちに水洗して冷却し、レオメータ（RE33005, 株式会社山電, 東京）を使用して澱粉麺のテクスチャーを測定した。澱粉麺の圧縮試験は、3 mm 幅のくさび型プランジャーを用い、1 mm/secの速度で2回圧縮した。圧縮距離は、試料の厚さの80%とした。澱粉麺のかたさと凝集性の値の求め方はパール状加工品と同じ方法を用いた。各試料の測定

回数は15回とし、平均値を算出した。澱粉麺の官能評価は、19人(男性13人、女性6人、年齢30～63歳)の鹿児島県農業開発総合センター職員で、従来のサツマイモ澱粉の麺を基準点(3.0)とし、弾力感とかたさ(1-5, 弱い-強い)、のどごしと総合評価(1-5, 悪い-よい)について5段階評価で行った。

第三節 実験結果

3-1 サツマイモ澱粉のRVA粘度特性

本研究では、サツマイモ澱粉の普遍的な特性を確認するために、2012年と2013年に栽培したサツマイモから澱粉サンプルを調製して特性を調べた。表3-1に4品種のサツマイモ澱粉のRVA粘度特性を示した。2012年および2013年の原料から調製した「こなみずき」澱粉では、粘度上昇温度がそれぞれ59.2℃及び60.1℃と他の品種の澱粉より低くなっており、これまでの報告⁹⁾の結果と一致した。最高粘度はすべての品種の澱粉で2か年とも同様の値を示した。「こなみずき」澱粉は、両方の栽培年において最もブレイクダウンが小さく、最終粘度が高い値を示した。

表 3-1 サツマイモ澱粉の RVA 粘度特性 (7 %, w/w)

品 種	2012				
	最高粘度 (RVU)	ブレーク ダウン (RVU)	最終粘度 (RVU)	セット バック (RVU)	粘度上昇 温度 (°C)
シロユタカ	214	88	217	91	74.4
コガネセンガン	185	64	203	82	73.8
ダイチノユメ	216	100	202	87	71.7
こなみずき	199	62	227	90	59.2

品 種	2013				
	最高粘度 (RVU)	ブレーク ダウン (RVU)	最終粘度 (RVU)	セット バック (RVU)	粘度上昇 温度 (°C)
シロユタカ	221	97	213	88	75.5
コガネセンガン	196	79	203	85	75.7
ダイチノユメ	212	97	199	84	73.4
こなみずき	197	58	244	105	60.1

3-2 澱粉ゲルの物性

澱粉ゲル（わらびもち，澱粉濃度 13%）を 5 °C で 3 日間冷蔵した場合の見かけの弾性率の変化を示した（図 3-1）。澱粉ゲルは，2012 年および 2013 年の 4 品種のサツマイモ澱粉および市販のキャッサバ澱粉とバレイショ澱粉を使用して調製した。見かけの弾性率は，澱粉ゲルを圧縮した際の破断曲線の傾きを示しており，見かけの弾性率が低い値を示すほど，澱粉ゲルは軟らかく，澱粉ゲルの老化が遅いことを示す。「こなみずき」澱粉のみかけ弾性率はキャッサバ澱粉と同様に，5 °C で 3 日間の冷蔵ではほぼ変化が見られず，「シロユタカ」澱粉の見かけの弾性率は冷蔵中に増加した。また，「コガネセンガン」澱粉と「ダイチノユメ」澱粉も，程度はゆっくりではあるが「シロユタカ」よりも見かけの弾性率は増加した。また，冷蔵中のそれぞれの変動が 2012 年と 2013 年とで少し異なっているが，これらの類似点は「こなみずき」澱粉の特性が普遍的であることを示した。

図 3-2 には，8% (w/w) 濃度の澱粉ゲルの冷凍解凍処理後の離水率を示した。「こなみずき」澱粉の離水率は，両年とも他のサツマイモ澱粉よりも低い値を示した。従来のサツマイモ澱粉は，バレイショ澱粉と近い値の離水率を示し，「こなみずき」澱粉はキャッサバ澱粉と近い値の離水率を示した。

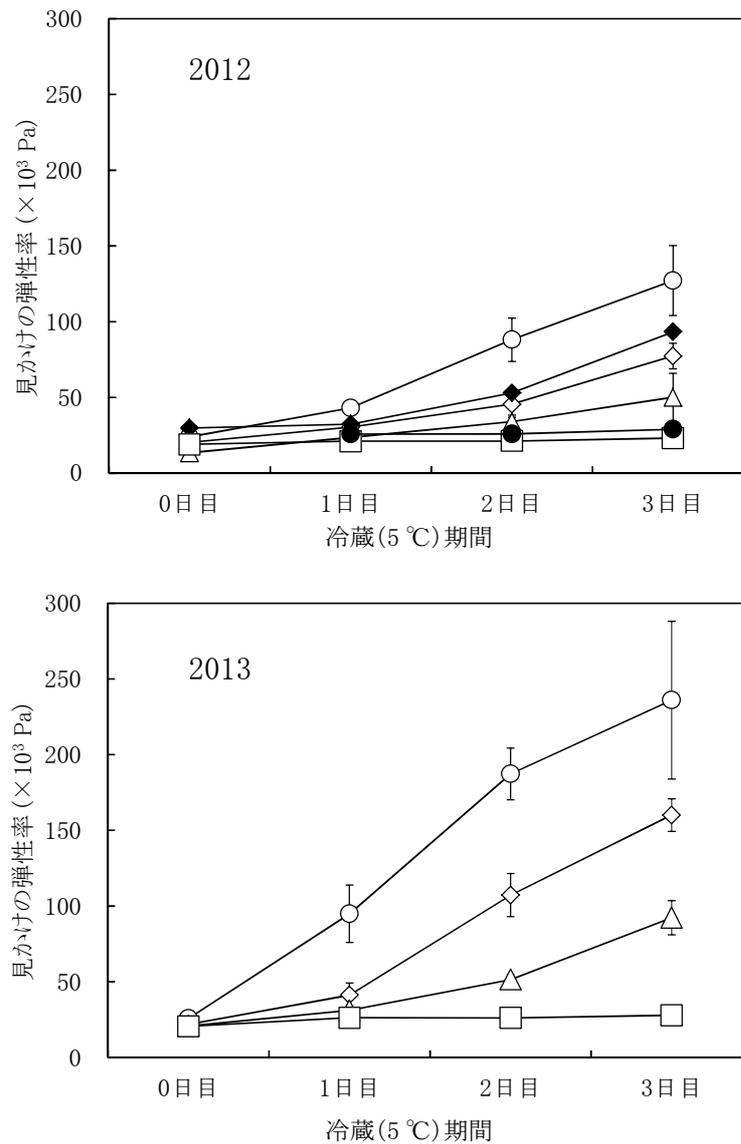


図 3-1 澱粉ゲルの見かけの弾性率の変化 (冷蔵 5℃)

サツマイモは 2012 と 2013 年に栽培された原料を使用し、市販のバレイショ澱粉とキャッサバ澱粉と比較した。エラーバーは標準偏差 (n=6) を示す。

澱粉濃度は、サツマイモ澱粉 13 % (w/w)、バレイショ澱粉は 10 % (w/w)、キャッサバ澱粉は 20 % (w/w) とした。

○ シロユタカ, ◇コガネセンガン, △タイチノユメ, □こなみずき,

◆バレイショ, ● キャッサバ

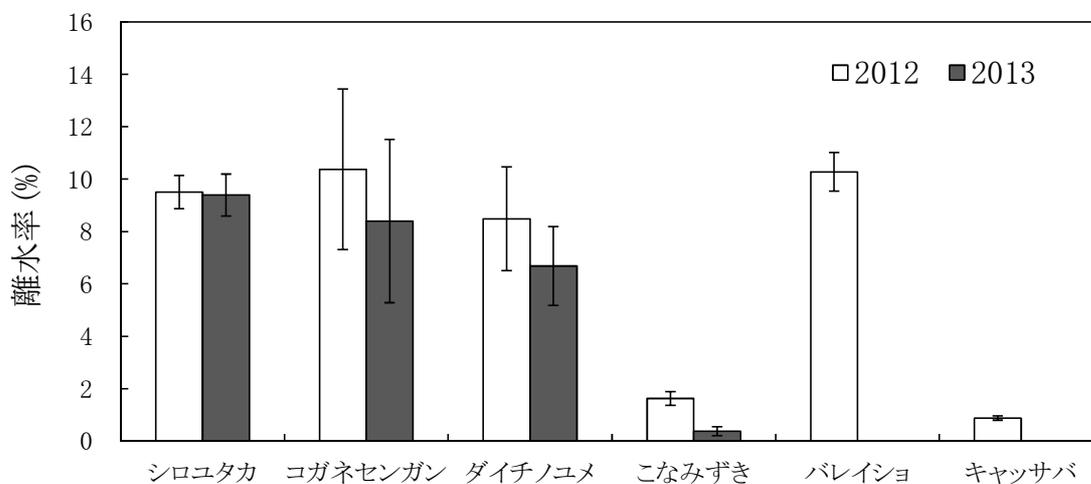


図 3-2 澱粉ゲル (8 %, w/w) の凍結解凍処理後の離水率

サツマイモ澱粉は 2012 年および 2013 年の試料の値を示した (市販のバレイシヨ澱粉とキャッサバ澱粉を除く)。エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。

3-3 澱粉糊液の動的粘弾性と流動特性

図 3-3 は「こなみずき」澱粉，従来のサツマイモ澱粉，ジャガイモ澱粉，キャッサバ澱粉について澱粉濃度 7 % (w/w) の澱粉糊液の貯蔵弾性率 (G') の変化を示した。サツマイモ澱粉の澱粉糊液の貯蔵弾性率 (G') は，4 品種ともキャッサバ澱粉とジャガイモ澱粉よりも高い値を有した。特に，「こなみずき」澱粉の貯蔵弾性率 (G') は測定直後から高い値を示し，「コガネセンガン」澱粉以外の他の澱粉よりも 120 分間高い値で推移した。

図 3-4 は澱粉濃度 6 % (w/w) の澱粉糊液について，せん断速度に対するせん断応力を示した流動曲線の変化を示した。ここでは，2012 年および 2013 年の澱粉試料について調整した澱粉糊液の 15 分後と 90 分後の流動曲線を示した。一般的に澱粉糊液は非ニュートン溶液であり，チキソトロピーもしくはレオペクシー特性を有している⁴²⁾。これらの特性は，いくつかの異なる方法を使用して調べることができるが，一般的には，ヒステリシスループの試験が用いられる⁴³⁻⁴⁶⁾。本試験では，4 品種のサツマイモ澱粉とキャッサバ澱粉の澱粉糊液は，ヒステリシスループの値がせん断速度上昇時の方が下降時よりも大きい値を示したことからチキソトロピー性を示した (図 3-4)。すべての澱粉糊液についてヒステリシスループから得られる面積値を表 3-2 に示した。ジャガイモ澱粉は，澱粉糊液のヒステリシスループの面積値は負の値となっており，レオペクシー特性を示した。「こなみずき」澱粉の澱粉糊液のヒステリシスループの面積値は 2012 と 2013 年において他の澱粉よりも大きい値を示した。

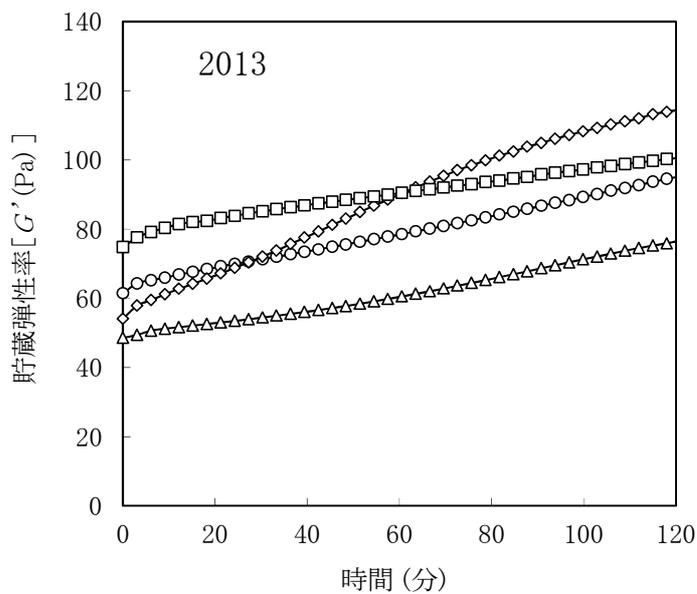
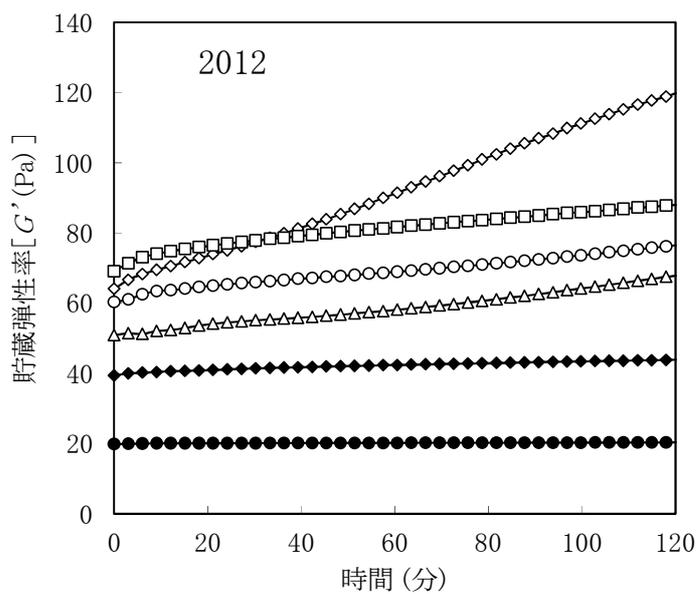


図 3-3 澱粉糊液 (7 %, w/w) の貯蔵弾性率 (G') の時間依存性

澱粉は 2012 年および 2013 年の試料を使用し、市販のバレイショ澱粉およびキャッサバ澱粉と比較した。測定温度は 20 °C で実施した。

○シロユタカ, ◇コガネセンガン, △ダイチノユメ, □こなみずき,

◆バレイショ, ●キャッサバ

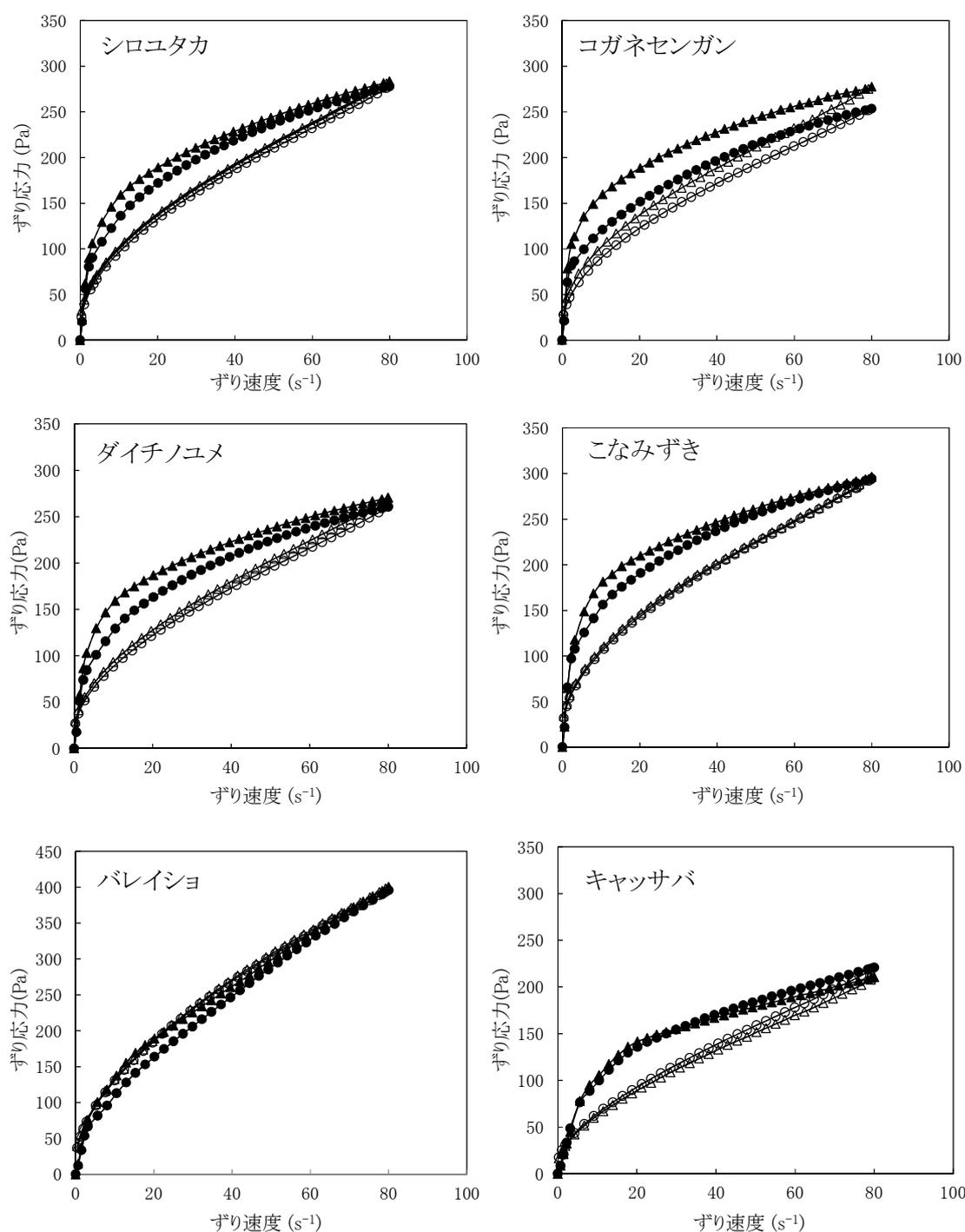


図 3-4 調製後 15 分および 90 分の澱粉糊液 (6 %, w/w) の流動曲線 (その 1)

図は 2012 年の測定結果を示した。黒抜きはずり速度増加時の流動曲線を示し、白抜きはずり速度減少時の流動曲線を示す。

● 15 分 - 増加, ○ 15 分 - 減少, ▲ 90 分 - 増加, △ 90 分 - 減少

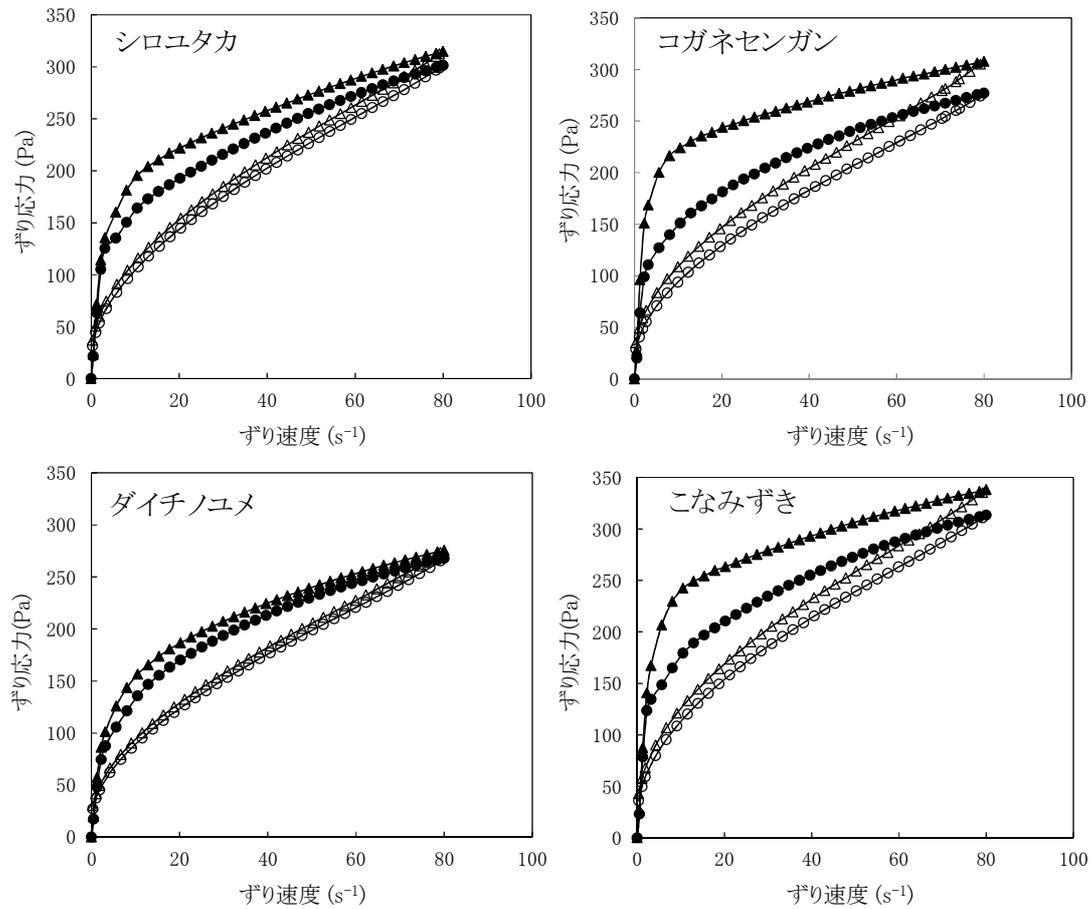


図 3-4 調製後 15 分および 90 分の澱粉糊液 (6 %, w/w) の流動曲線 (その 2)

図は 2013 年の測定結果を示した。黒抜きはずり速度増加時の流動曲線を示し、白抜きはずり速度減少時の流動曲線を示す。

● 15 分 - 増加, ○ 15 分 - 減少, ▲ 90 分 - 増加, △ 90 分 - 減少

表 3-2 澱粉糊液 (6 %, w/w) のヒステリシスループ (流動履歴曲線)

の面積値 (Pa/s)

供試澱粉	2012			
	15 分	30 分	60 分	90 分
サツマイモ				
シロユタカ	2,120	2,170	2,450	2,770
コガネセンガン	1,580	1,750	2,230	2,600
ダイチノユメ	2,280	2,390	2,540	3,040
こなみずき	2,510	2,490	3,030	3,280
バレイショ	-1,160	-1,100	-410	-380
キャッサバ	2,080	2,030	2,210	2,280

供試澱粉	2013			
	15 分	30 分	60 分	90 分
サツマイモ				
シロユタカ	2,630	2,670	2,890	3,540
コガネセンガン	2,490	2,770	3,250	4,160
ダイチノユメ	2,670	2,800	2,990	3,140
こなみずき	2,940	3,230	4,030	4,560

3-4 澱粉の分子構造

表 3-3 に各澱粉の一般特性を示した。4 品種のサツマイモ澱粉の見かけのアミロース含量は、15.4~19.6 % (2012 年) および 16.0~19.6 % (2013 年) であった。見かけのアミロース含量は、両年とも「シロユタカ」澱粉が最も高かった。「こなみずき」澱粉のリン含量は、2012 年が 1.16 $\mu\text{mol/g}$ 、2013 年が 1.50 $\mu\text{mol/g}$ となっており、他のサツマイモ澱粉 (3.61-7.70 $\mu\text{mol/g}$) よりも低かった。供試澱粉の中では、「ダイチノユメ」澱粉のリン含量が中間的であった。澱粉粒のメディアン径は、13.3-20.2 μm の範囲であった。メディアン径が最も大きかったのが「こなみずき」澱粉 (18.1, 20.2 μm) であり、次に「ダイチノユメ」澱粉 (15.3, 17.3 μm) であった。

表 3-3 サツマイモ澱粉の一般特性

品 種	2012			2013		
	アミロース 含量 (%)	リン含量 ($\mu\text{mol/g}$)	平均粒径 (メディアン径) (μm)	アミロース 含量 (%)	リン含量 ($\mu\text{mol/g}$)	平均粒径 (メディアン径) (μm)
シロユタカ	19.6	7.70	14.5	19.6	7.43	15.4
コガネセンガン	15.4	6.13	13.3	17.3	6.80	15.3
ダイチノユメ	15.9	3.61	15.3	16.0	3.91	17.3
こなみずき	17.4	1.16	18.1	17.7	1.50	20.2

澱粉および単離したアミロペクチンの鎖長分布は、イソアミラーゼ処理した試料について、2種類のカラムシステムによるゲルろ過クロマトグラフィーを使用して測定した。イソアミラーゼ処理した澱粉の鎖長分布のクロマトグラムおよびアミロース画分の拡大図を示した（図 3-5）が、主となる2つの画分が11.5–17.5分および17.5–20.5分に溶出された（図 3-5）。アミロースは比較的早い画分に溶出され、アミロペクチンを構成する単位鎖は遅い画分に溶出された。拡大図（図 3-5）では両年とも「こなみずき」のアミロースが他の澱粉のアミロースよりも早く溶出されており、このことから「こなみずき」澱粉は、他の澱粉よりも長いアミロース鎖を有することが示された。一方、「コガネセンガン」のアミロースは、供試澱粉の中で最も小さいことが示された。

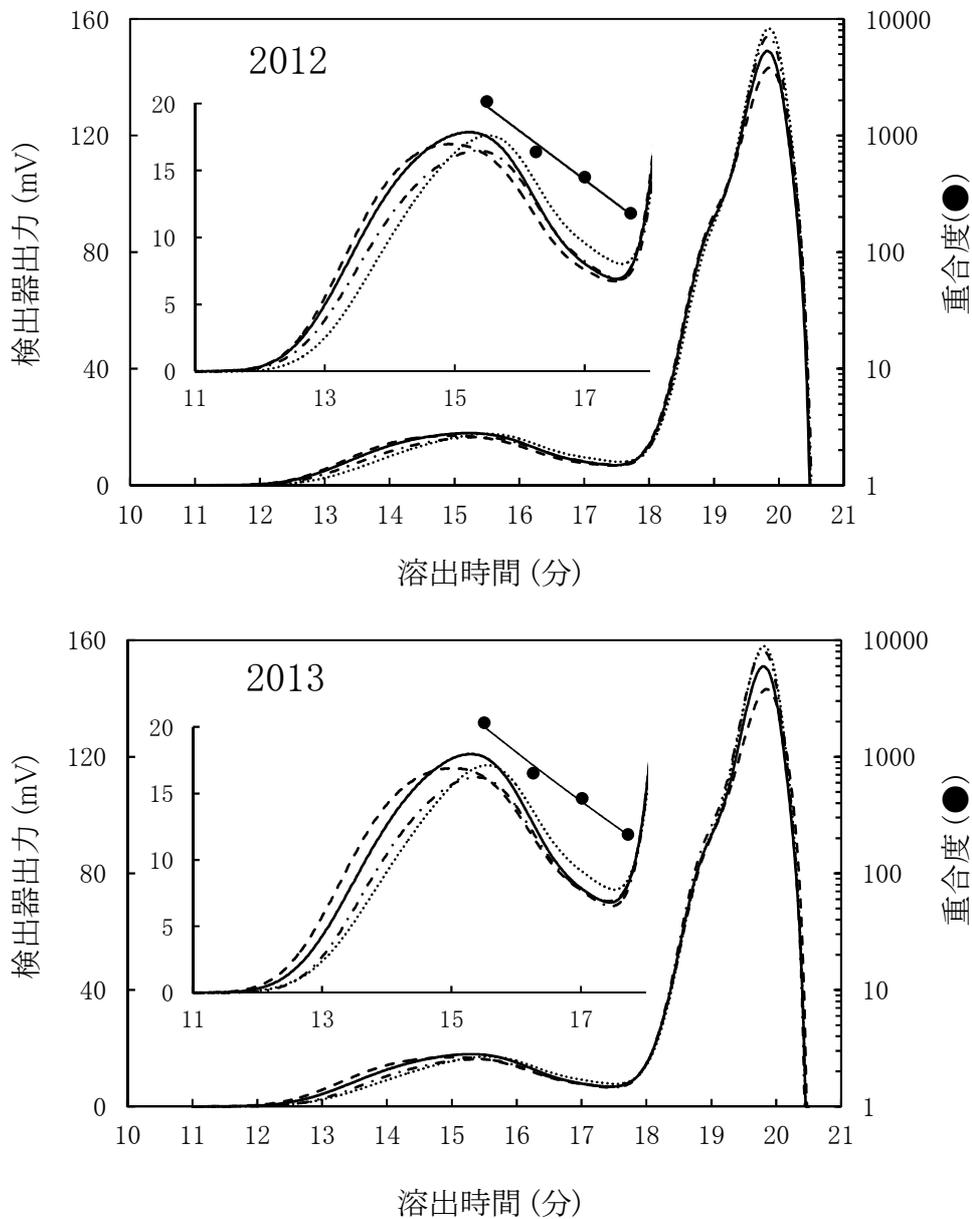


図 3-5 イソアミラーゼ処理した澱粉のゲルろ過による鎖長分布

分析カラムは TSKgel GMPWXL を使用し、アミロース直鎖の標準品 [重合度 (DP=1953, 722, 438, 215)] で校正した。サツマイモ澱粉は 2012 年および 2013 年の試料を使用した。拡大図はアミロースの高分子画分を示した。

—— シロユタカ, コガネセンガン, - · - · ダイチノユメ, - - - こなみずき

別のゲルろ過カラムシステムで分析した単離したアミロペクチンの鎖長分布では、「こなみずき」のアミロペクチンが他のアミロペクチンと明らかに異なることが示された（図 3-6）。「こなみずき」のアミロペクチンには多くのアミロース様の超長鎖や重合度 6-10 の単位鎖が確認され、このことは既報の結果と一致した⁹⁾。さらに、アミロペクチン中のアミロース様の超長鎖について、クロマトグラムおよび高分子画分の拡大図を示した（図 3-7）。「こなみずき」のアミロペクチンの超長鎖は、他のアミロペクチンの超長鎖よりも早く溶出しており、「こなみずき」のアミロペクチンのアミロース様の超長鎖は、他のアミロペクチンよりも長いことを見出した。これらの結果は、2012 年および 2013 年とも同様であった。

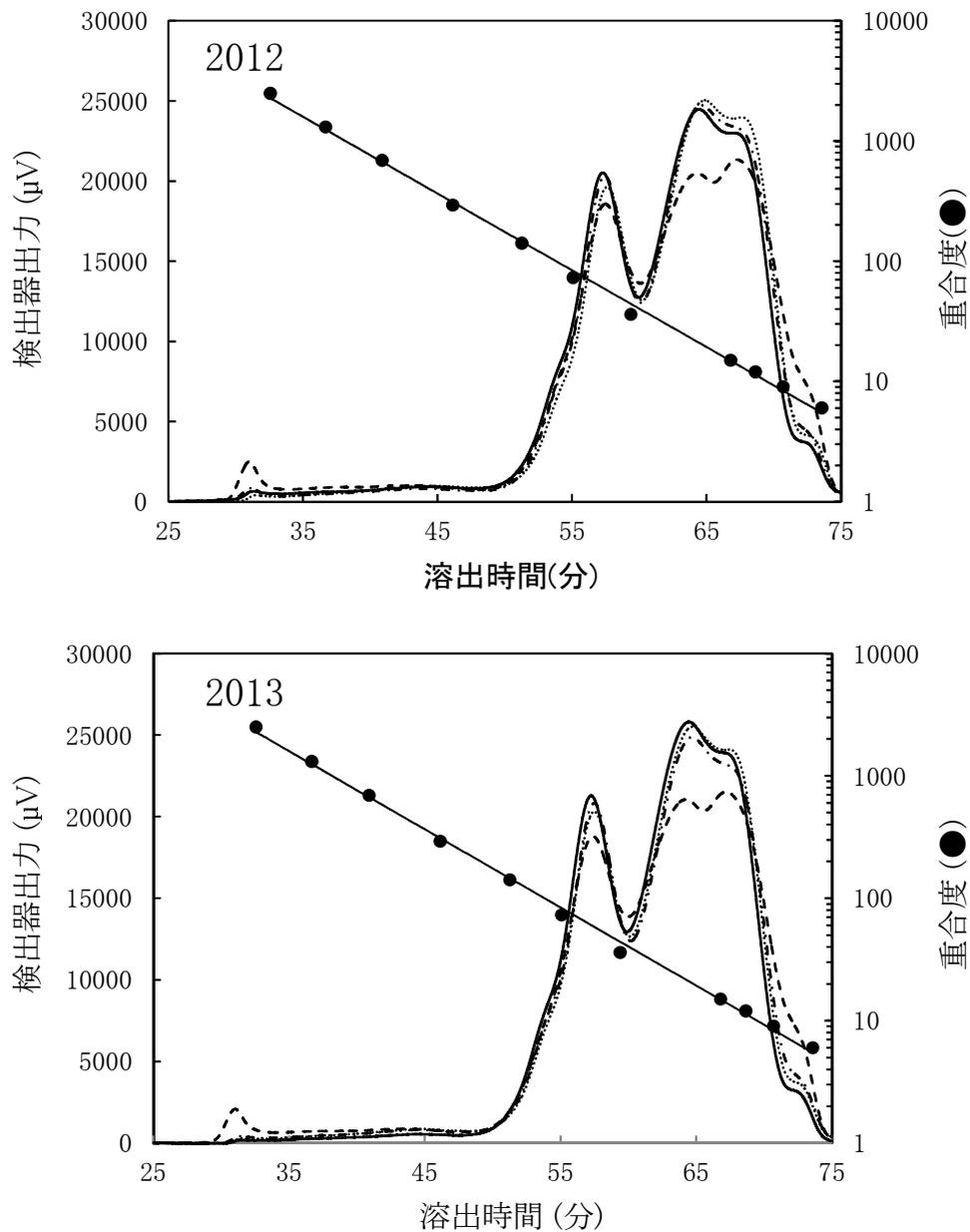


図 3-6 イソアミラーゼ処理したアミロペクチンのゲルろ過による鎖長分布
 分析には Superose 6 10/300 GL および Superdex Peptide 10/300 GL の 2 つ
 のカラムを連結して使用し、市販のプルラン標準品で校正した。澱粉は 2012
 年および 2013 年の試料を使用した。

—— シロユタカ, コガネセンガン, - . - . ダイチノユメ, - - - こなみずき

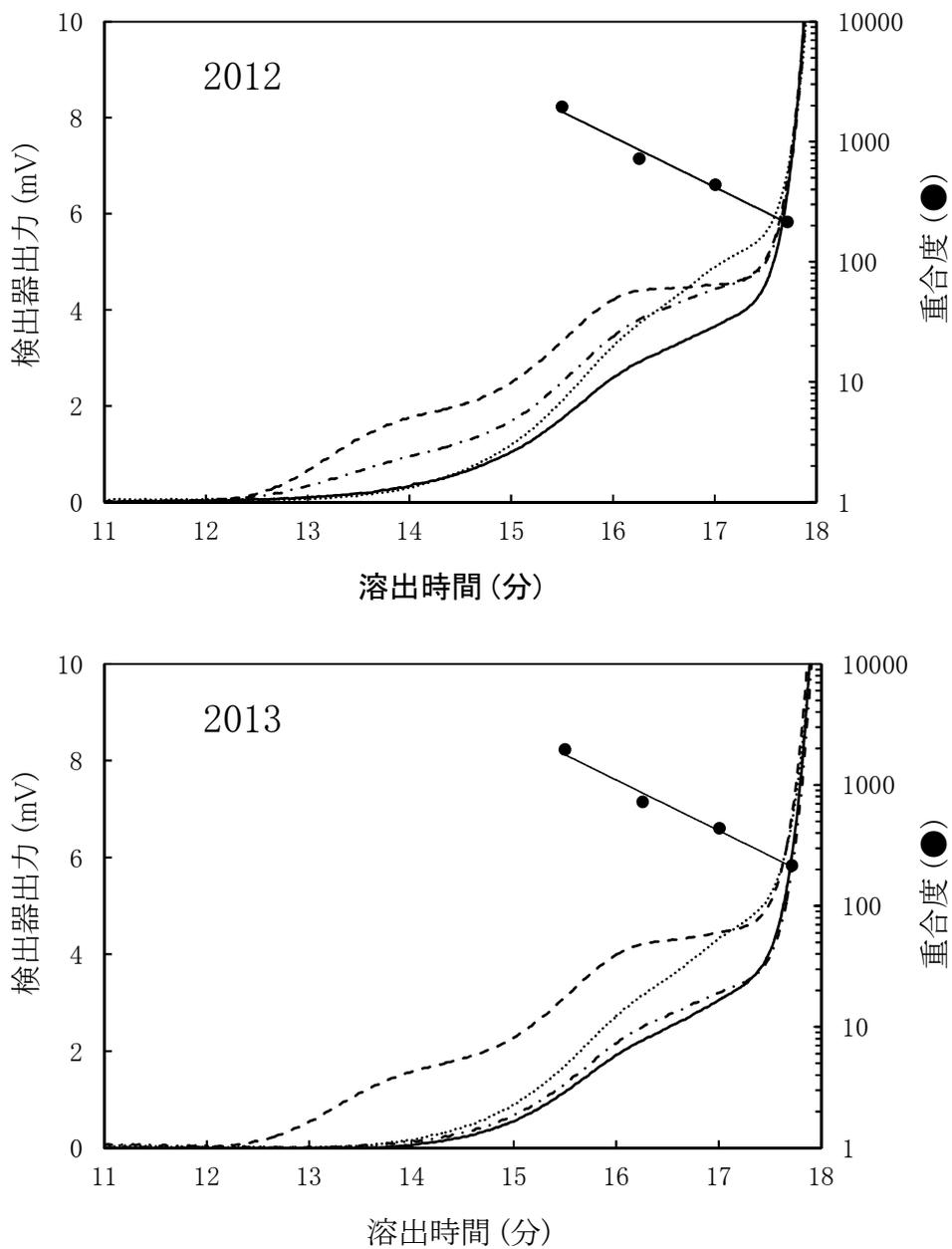


図 3-7 ゲルろ過クロマトグラフィーによるアミロペクチンの超長鎖画分の鎖長分布

分析カラムは TSKgel GMPWXL を使用し、直鎖アミロースの標準品 [重合度 (DP=1953, 722, 438, 215)] で校正した。澱粉は 2012 年および 2013 年の試料を使用した。

—— シロユタカ, コガネセンガン, - . - . - . ダイチノユメ, - - - - - こなみずき

3-5 「こなみずき」澱粉を利用した加工食品の特性

市販の「こなみずき」澱粉を使用してタピオカパール（澱粉の球状加工品）と澱粉麺（韓国冷麺）を製造し、茹でた製品の物性や食感を市販の従来サツマイモ澱粉（品種は主に「シロユタカ」）、キャッサバ澱粉およびバレイショ澱粉の製品と比較した。

タピオカパールは、小さな球状（1-6 mm 径）にしたキャッサバ澱粉を調理し、茹でて吸水すると透明な部分が多くなり、最終的に弾力性のある食感と光沢のある球状ゲルになる⁴⁷⁾。タピオカパールを茹で戻し、茹でた直後と 5 °C で 2 日間冷蔵した場合のかたさと凝集性を調査した（表 3-4）。市販のサツマイモ澱粉を使用したタピオカパールも作製したが、ほとんどにひび割れが生じ、かたさと凝集性の試験に供することができなかった。一方、「こなみずき」澱粉のパールの分析では、キャッサバ澱粉と比較して冷蔵期間中のパールのかたさと凝集性の値が高かった。このことは、「こなみずき」澱粉は、ソフトタイプの一般的なタピオカパールよりも適度なかたさと弾力性のあるパール製品が製造できることを示している。

澱粉麺のかたさについては、バレイショ澱粉が最も高い値（1.56 *N*）を示し、次いで「こなみずき」澱粉（1.00 *N*）、従来サツマイモ澱粉（0.68 *N*）となった（表 3-5）。澱粉麺の凝集性については、「こなみずき」澱粉が最も高く（0.80）、バレイショ澱粉（0.78）や従来サツマイモ澱粉（0.72）よりも有意に大きかった（表 3-5）。澱粉麺の官能評価では、かたさと弾力感の評価ではバレイショ澱

粉の麺が最も高く、「こなみずき」澱粉の麺は、のどごしおよび総合評価で最も高い評価となった（表 3-6）。

表 3-4 茹でたパール状加工品のかたさと凝集性

供試澱粉	かたさ (N)		
	0 day (調製直後)	冷蔵 (5°C)	
		1 日後	2 日後
こなみずき	0.85 ± 0.13	1.99 ± 0.33	2.28 ± 0.53
キャッサバ	0.39 ± 0.04	0.94 ± 0.18	0.79 ± 0.11
	**	**	**

供試澱粉	凝集性 (-)		
	0 day (調製直後)	冷蔵 (5°C)	
		1 日後	2 日後
こなみずき	0.95 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.87 ± 0.01
キャッサバ	0.89 ± 0.02	0.84 ± 0.01	0.67 ± 0.05
	**	**	**

数値は平均値±標準偏差 (n=10) で示した。

**は、t 検定により各試料間で有意差 (p < 0.01) があることを示す。

表 3-5 茹でた澱粉麺のかたさと凝集性

供試澱粉	かたさ (N)	凝集性 (-)
サツマイモ		
従来品種	0.68 ± 0.14 c	0.72 ± 0.02 c
こなみずき	1.00 ± 0.09 b	0.80 ± 0.01 a
バレイショ	1.56 ± 0.26 a	0.78 ± 0.01 b

数値は平均値±標準偏差 (n=15) を示す。

各測定項目の異なる符号間には最小有意差法により有意差 (p < 0.01) があることを示す。

表 3-6 澱粉麵の官能評価

供試澱粉	弾力性	かたさ	食感	のどごし	総合評価
サツマイモ					
従来品種	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
こなみずき	4.0 ± 0.00	3.9 ± 0.32	3.9 ± 0.71	3.5 ± 0.84	3.9 ± 0.88
バレイショ	4.7 ± 0.49	4.7 ± 0.48	2.7 ± 1.05	2.4 ± 0.68	2.6 ± 0.90

官能評価は、従来品種のサツマイモ澱粉（市販）の澱粉麵を基準点（3.0）とし、

1-5 の 5 段階評価で行った。数値は平均値±標準偏差（n=19）で示した。

第四節 考 察

2012 年および 2013 年の澱粉原料用品種から調製したサツマイモ澱粉について、澱粉ゲルや澱粉糊液の特性および澱粉の分子構造を比較した。RVA 粘度特性について、「こなみずき」澱粉は、他品種の澱粉よりもブレイクダウンが小さく、最終粘度が高い特徴を示した（表 3-1）。澱粉濃度 13%の澱粉ゲル（わらびもち）については、「こなみずき」澱粉は他の澱粉よりも冷蔵（5℃）時の見かけの弾性率の変化が小さく（図 3-1）、また、澱粉濃度 8%（w/w）の澱粉ゲルの冷凍解凍処理による離水率も少ない（図 3-2）ことから耐老化性であることが示され、このことは 2012 年、2013 年の結果が同等であることから「こなみずき」澱粉の普遍的な特性であることを明らかにした。

澱粉糊液の動的粘弾性の分析では、「こなみずき」澱粉の貯蔵弾性率（ G' ）は他の澱粉よりも高い値を示しており（図 3-3）、このことは「こなみずき」澱粉の澱粉糊液はゲルが形成し易く、安定性があることを明らかにした。一方、「コガネセンガン」澱粉の澱粉糊の貯蔵弾性率（ G' ）は測定途中から急激に上昇しており、特徴的な分子構造が関与していることが示唆された。また、澱粉糊液の流動特性において、「こなみずき」澱粉糊液のせん断応力やヒステリシスループの面積値は、他の澱粉よりも大きい値を示しており（図 3-4、表 3-2）、せん断に対する抵抗性が高いと考えた。これらの結果をまとめると、「こなみずき」澱粉の澱粉糊液は、せん断応力に対して高い耐性を有し、強いゲル形成能があることを示唆している。

ゲルろ過クロマトグラフィーによる澱粉の鎖長分布の分析では、「こなみずき」澱粉は、他の澱粉よりも長いアミロース主鎖を有することを見出し、「コガネセンガン」のアミロースは、供試澱粉の中で最も小さいことを見出した(図 3-5)。既報において⁴⁸⁾、アミロースのゲル特性は鎖長に由来することが示されていることから、これらの結果は、「コガネセンガン」澱粉糊液の貯蔵弾性率 (G') の急激な上昇に反映している可能性が考えられた (図 3-3)。

さらに、アミロペクチンの鎖長分布の分析では、「こなみずき」のアミロペクチンは他のアミロペクチンよりもアミロース様の超長鎖が多く (図 3-6)、しかも鎖長が長いことを明らかにした (図 3-7)。既報⁴⁹⁾において、澱粉粒から溶出したアミロースが粘弾性を決定する上で重要な役割を果たすことが示されている。しかしながら今回は、「こなみずき」澱粉のアミロース含量は他のサツマイモ澱粉のアミロース含量と同等となっており (表 3-3)、また、既報^{50, 51)}において、RVA 粘度特性のセットバック値とアミロペクチン中の超長鎖 (SLC) は高い正の相関があることが示されている。Lu ら⁵²⁾は、米のアミロペクチンの SLC はアミロペクチンの老化と澱粉ゲルのテクスチャーを決定づける重要な要素であることを報告している。これらの結果から、「こなみずき」澱粉はアミロペクチン中のアミロース様の超長鎖が他のサツマイモ品種よりも多く、さらにアミロース及びアミロペクチン中のアミロース様の超長鎖は他の澱粉よりも長いことが明らかになり、このような長い分子鎖の特徴により澱粉ゲルのネットワーク形成力が強く、優れたゲル弾力性とゲル成型性を示す (図 3-3, 3-4) のものと

考察した

「こなみずき」澱粉を使用したパール状加工品や澱粉麵の品質を評価した結果、両製品とも弾力性の指標となる凝集性の値が高かった（表 3-4, 表 3-5）。Xu ら⁵³⁾ は、高分子のアミロースを含むパールが調理中の崩壊に対して抵抗性があり、澱粉粒子間および粒子内のミセルの網状構造の存在を反映することを示している。このように、「こなみずき」澱粉の構造的な特徴は、パールの独特な食感に寄与している可能性が高いと推察した。また、「こなみずき」澱粉、従来のサツマイモ澱粉、バレイショ澱粉の澱粉麵のそれぞれのテクスチャー値についても異なる澱粉の特徴を反映していると考えられた。

以上の結果から、「こなみずき」澱粉を使用したゲル性の加工食品は、冷蔵・冷凍に対する耐老化性のみでなく、優れた弾力性やゲル成型性を有し、食品素材として高い適性を有することが示され、このことには「こなみずき」澱粉の分子構造の特徴が関与することが示唆された。

第五節 小 括

食品素材としての「こなみずき」澱粉を評価するために、「こなみずき」澱粉を使用していくつかの加工食品を試作し、それらの食品の物性を分析した。また、「こなみずき」澱粉の物性に寄与する分子構造特性を明らかにするために、4 品種（「シロユタカ」、「コガネセンガン」、「ダイチノユメ」、「こなみずき」）のサツマイモ澱粉の物性と分子構造を調査した。

澱粉物性についてはRVA粘度特性および澱粉糊液の動的粘弾性や流動特性を測定した。分子構造の分析は、澱粉および単離されたアミロペクチンの単位鎖分布をゲルろ過クロマトグラフィーで分析した。さらに、市販の「こなみずき」澱粉および従来サツマイモ澱粉、キャッサバ澱粉、バレイショ澱粉を使用して加工製品（パール状加工品および澱粉麺）を作製し、物性測定や官能評価を行った。

低温糊化性である「こなみずき」澱粉は、今回試験に使用した他の澱粉（従来サツマイモ澱粉やキャッサバ澱粉、バレイショ澱粉）と比較して耐老化性、高いゲル成型性および弾力性のあるゲル食感といった特性を有していた。

また、「こなみずき」澱粉のアミロースやアミロペクチンの分子構造については、他の品種のサツマイモ澱粉よりもアミロペクチンに超長鎖が多く、さらに、アミロースやアミロペクチンの超長鎖の分子鎖が長い特徴を有していた。これらの分子構造の特徴は、澱粉ゲルや澱粉糊液の粘弾性やゲル成型性といった物性に関与していた。

最終的に、作製したパール状加工品や澱粉麺の品質を評価した結果、「こなみずき」澱粉は他の澱粉にない弾力感があり、良好な食感が得られたことから、「こなみずき」澱粉は、澱粉ゲル製品の素材として優れた特性を有することを明らかにした。

総 括

従来のサツマイモ品種の澱粉より約 20 °C低い温度で糊化し、耐老化性を示す澱粉を有する品種「こなみずき」が育成され、サツマイモ澱粉の用途拡大が期待されている。本研究では、「こなみずき」澱粉の高品質化と用途拡大を目的とし、栽培条件が澱粉特性や品質に及ぼす影響の解明、澱粉製造時の白度向上のための高品質化技術の検討、さらに「こなみずき」澱粉の物理化学特性と加工食品への利用特性を明らかにした。

植付けと収穫時期および栽培期間が異なる「こなみずき」塊根について、澱粉の糊化特性を始め各種特性と、澱粉のポリフェノール吸着量及び塊根中のポリフェノール含量やポリフェノールオキシダーゼ活性との関係性を調査した。澱粉はいずれの栽培条件でも低温糊化性を示したが、粘度上昇温度は収穫時期が早いと高く、最高粘度は4月植えよりも5月植えで高かった。塊根の収穫時期が12月以降になると得られる澱粉の白度が顕著に低下し、このことは収穫時期の低温により増加した塊根中のポリフェノールの澱粉への吸着が要因と考えられた。このように、「こなみずき」塊根から調製される澱粉の物性と白度は、植付け時期や収穫時期といった栽培条件によって変化することを明らかにした。

高品質な「こなみずき」澱粉を製造するため、塊根磨砕物の pH 調整により澱粉白度の向上を検討した。モデル実験において「こなみずき」塊根の磨砕物に水酸化カルシウム飽和水溶液を添加して、弱アルカリ性 (pH 7.8~9.0) としてから調製した澱粉は白度が向上した。また、澱粉製造工場において塊根磨砕後

の pH を 8.8 に調整して製造した「こなみずき」澱粉は、物性への影響なく高い澱粉白度を示し、本法によりポリフェノール含量が高まった塊根であっても澱粉へのポリフェノールの吸着が抑制され、澱粉白度が向上できることを明らかにした。

2012 年および 2013 年の澱粉原料用品種から調製したサツマイモ澱粉について、澱粉ゲルや澱粉糊液の特性および澱粉の分子構造を比較した。澱粉濃度 13 % の澱粉ゲル（わらびもち）については、「こなみずき」澱粉は他の澱粉よりも冷蔵（5 °C）時の見かけの弾性率の変化が小さく、また、澱粉濃度 8 %（w/w）の澱粉ゲルの冷凍解凍処理による離水率も少ないことから耐老化性であることが示され、このことは「こなみずき」澱粉の普遍的な特性であることが示された。澱粉糊液の動的粘弾性や流動特性の分析では、「こなみずき」澱粉の貯蔵弾性率（ G' ）やせん断応力の値は他の澱粉よりも高く、「こなみずき」澱粉の澱粉糊液は、せん断応力に対して高い耐性を有し、強いゲル形成能があることを明らかにした。

「こなみずき」澱粉を食品素材として評価するために、加工製品（パール状加工品と澱粉麺）を作り、それらの物性等について従来のサツマイモ澱粉やキャッサバ澱粉およびバレイショ澱粉の製品と比較した。「こなみずき」澱粉を使用した製品は、従来のサツマイモ澱粉やキャッサバ澱粉を使用した製品よりも弾力性が高く、良好な食感が得られ、澱粉ゲル製品として優れた特性を認めた。澱粉の分子構造と加工製品の物性との関係を調べた結果、「こなみずき」アミロ

ペクチンは、アミロース様の超長鎖が他のサツマイモ品種よりも多く、さらに「こなみずき」のアミロース及びアミロペクチン中のアミロース様の超長鎖は他の澱粉よりも長いことを見出した。このような澱粉構造の特徴によりゲルのネットワーク形成力が強く、優れたゲル弾力性を示すものと考察した。

本研究成果は、新たなサツマイモ澱粉素材として高品質な「こなみずき」澱粉を提供するとともに、その用途開発に係る利用特性を明らかにしたものであり、サツマイモ澱粉産業や食品産業及び地域経済の活性化に寄与するものである。現在では、「こなみずき」澱粉を用いた麺や菓子類の製品化が実現している。

参考文献

- 1) 農林水産省政策統括官付地域作物課：生産状況，平成 27 年度版いも・でん粉に関する資料，pp. 1-8 (2016).
(<http://www.maff.go.jp/j/seisan/tokusan/imo/siryou.html>, 2016.10.28)
- 2) 農林水産省政策統括官付地域作物課：かんしょの用途別消費の推移，平成 27 年度版いも・でん粉に関する資料，pp. 27-31 (2016).
(<http://www.maff.go.jp/j/seisan/tokusan/imo/siryou.html>, 2016.10.28)
- 3) 農林水産省政策統括官付地域作物課：国内産いもでん粉の計画生産数量と生産実績の推移，平成 27 年度版いも・でん粉に関する資料，pp. 212 (2016).
(<http://www.maff.go.jp/j/seisan/tokusan/imo/siryou.html>, 2016.10.28)
- 4) 独立行政法人農畜産業振興機構：国内で生産されるいもでん粉の仕向け先。日本のでん粉事情，pp. 7 (2015).
- 5) 独立行政法人農畜産業振興機構：でん粉原料用いも生産者とでん粉製造事業者を支援する仕組み。日本のでん粉事情，pp. 12-13 (2015).
- 6) 井川佳子：市販サツマイモ澱粉(わらび餅粉)の性質に及ぼす粒子径，無機質，脱脂の影響. *J. Appl. Glycosci.*, 43, 517-524 (1996).
- 7) T. Noda, Y. Takayama, T. Sato, H. Ikoma, and H. Mochida: Combined effects of planting and harvesting dates on starch properties of sweet potato roots. *Carbohydr. Polym.*, 33, 169-176 (1997).
- 8) 時村金愛，下園英俊，池田健一郎，田之上隼雄：品種の異なるサツマイモ

- 澱粉の澱粉ゲルの老化特性と分子構造. *J. Appl. Glycosci.*, 49, 305-312 (2002).
- 9) 片山健二, 境 哲文, 甲斐由美, 中澤芳則, 吉永 優: サツマイモ新品種「こなみずき」の育成. 九州沖縄農研報告, 58, 15-36 (2012).
- 10) K. Katayama, K. Komae, K. Kohyama, T. Kato, S. Tamiya, and K. Komaki: New sweet potato line having low gelatinization temperature and altered starch structure. *Starch*, 54, 51-57 (2002).
- 11) K. Kitahara, S. Fukunaga, K. Katayama, Y. Takahata, Y. Nakazawa, M. Yoshinaga and T. Suganuma: Physicochemical properties of sweetpotato starches with different gelatinization temperature. *Starch*, 57, 473-479 (2005).
- 12) K. Katayama, K. Kitahara, T. Sakai, Y. Kai and M. Yoshinaga: Resistant and digestible starch contents in sweet potato cultivars and lines. *J. Appl. Glycosci.*, 58, 53-59 (2011).
- 13) K. Kitahara, T. Yamasaki, K. Fujita and T. Suganuma: Physicochemical properties of starches from recently bred sweetpotatoes in Japan. *J. Appl. Glycosci.*, 61, 81-88 (2014) .
- 14) 菊田千景, 岩城啓子, 太田夏未, 脇田あゆみ, 上田茂登子, 杉本温美: 落花生豆腐の性状に及ぼす各種澱粉の影響. 応用糖質科学, 57, 87-93 (2010).

- 15) T. Noda: Effect of cultivar and growth conditions on starch properties of sweet potatoes. *J. Appl. Glycosci.*, 48, No. 2, 233-238 (2001).
- 16) T. Noda, T. Kobayashi and I. Suda: Effect of soil temperature on starch properties of sweet potatoes. *Carbohydr. Polym.*, 44, 239-246 (2001).
- 17) K. Ishiguro, T. Noda and O. Yamakawa: Effect of cultivation conditions on retrogradation of sweetpotato starch. *Starch/Stärke*, 55, 564-568 (2003).
- 18) K. Kitahara, A. Goto, K. Nishizono, T. Suganuma and T. Nagahama: Characteristics of adsorption of some compounds into sweetpotato starch and their participation in starch quality. *J. Appl. Glycosci.*, 44, 497-504 (1997).
- 19) G.L. Miller: Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.*, 31, 426-428 (1959).
- 20) V.L. Singleton and J.A. Rossi, Jr: Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Viticult.*, 16, 144-158 (1965).
- 21) 鈴木繁男, 中村道徳: 澱粉製品の規格, 実用実験法. 「澱粉科学実験法」. 朝倉書店, 東京, pp. 279-281 (1979).
- 22) 山村颯, 河野利治, 中村英樹: 甘藷澱粉の汚染機構に関する研究(第2報) 甘藷各部位の呼吸成分の相違が澱粉白度におよぼす影響. 澱粉工業学会誌,

- 6, 64-69 (1959).
- 23) M. S. Padda, D. H. Picha: Phenolic composition and antioxidant capacity of different heat-processed forms of sweetpotato cv. 'Beauregard'. *Int. J. Food Sci. Tec.*, 43, 1404-1409 (2008).
- 24) T. Noda, N. Isono, A. V. Krivandin, O. V. Shatalova, W. Błaszczak, V. P. Yuryev: Origin of defects in assembled supramolecular structures of sweet potato starches with different amylopectin chain-length distribution. *Carbohydr. Polym.*, 76, 400-409 (2009).
- 25) 藤本滋生, 永浜伴紀, 蟹江松雄: 甘藷澱粉粒子の成長に伴う内部脂肪酸の変化について. *農芸化学会誌*, 46, 239-244 (1972).
- 26) 貝沼圭二, 山本和夫, 鈴木繁男, 高谷友久, 不破英次: 澱粉の構造と物性に関する研究 (第 4 報) 分級馬鈴薯澱粉の構造および利用特性. *澱粉科学*, 25, 3-11 (1978).
- 27) 鄭紹輝, 山崎菜穂子, 中元博明, 古門方子, 有馬進: カンショ塊根のポリフェノール含量と栽培環境の関係. *Coastal Bioenvironment*, 11, 37-42 (2008).
- 28) I. Uritani: Phytopathological chemistry of the black-rotted sweet potato: Part 5. Physiology of the polyphenols in injured sweet potato. *Agric. Biol. Chem.*, 27, 57-61 (1953).
- 29) W. M. Walter and W. E. Schadel: Distribution of phenols in 'Jewel'

- sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] roots. *J. Agric Food Chem.*, 29, 904-906 (1981).
- 30) 山村穎, 河野利治: 甘藷デンプンの汚染機構に関する研究 (第4報) ポリフェノール, オキシダーゼ, アスコルビン酸及びアミノ酸の添加によるデンプン白度の変化. 農芸化学会誌, 35, 826-831 (1961).
- 31) 山村穎, 河野利治: 甘藷デンプンの汚染機構に関する研究 (第5報) クロロゲン酸吸着のデンプン白度低下に及ぼす影響. 農芸化学会誌, 35, 1090-1095 (1961).
- 32) 時村金愛, 下園英俊, 久米隆志, 西原悟, 小山田耕作, 福元伸一, 藤田清貴, 北原兼文: 栽培条件の異なるサツマイモ新品種「こなみずき」塊根の澱粉品質, 応用糖質科学, 4, 234-240 (2014).
- 33) 室井孝仁: でん粉製造設備について. でん粉情報, 2012年8月号, 1-7 (2012).
- 34) K. Tokimura, K. Fujita and K. Kitahara: Physicochemical properties and food uses of starch from the new sweetpotato cultivar Konamizuki. *J. Appl. Glycosci.*, 64, 1-8 (2017).
- 35) I. Uritani: Phytopathological chemistry of the black-rotted sweet potato: Part 5. Physiology of the polyphenols in injured sweet potato. *Agric. Biol. Chem.*, 27, 57-61 (1953).
- 36) W.M. Walter and W.E. Schadel: Distribution of phenols in 'Jewel'

- sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] roots. *J. Agric Food Chem.*, 29, 904-906 (1981).
- 37) 瓜谷郁三 : 黒斑病甘藷の病理化學的研究 (第 10 報) 被害部隣接健全層の重曹水浸漬による緑変現象の機構 (その 1) . 農芸化学会誌, 27, 781-785 (1953).
- 38) 瓜谷郁三, 星谷巖夫, 滝田智久: 黒斑病甘藷の病理化學的研究第 (11 報) 被害部隣接健全層の重曹水浸漬による緑変現象の機構 (その 2) . 農芸化学会誌, 27, 785-780 (1953).
- 39) 山村穎, 河野利治: デンプンの汚染機構に関する研究 (第 6 報) デンプン調製時の pH がデンプン白度に及ぼす影響およびその機構について. 澱粉工業学会誌, 9, 49-56 (1961).
- 40) K. Ishiguro, T. Noda, K. Kitahara and O. Yamakawa: Retrogradation of sweetpotato starch. *Starch/Stärke*, 52, 13-17 (2000).
- 41) K. Kitahara, K. Hamasuna, K. Nozuma, M. Otani, T. Hamada, T. Shimada, K. Fujita and T. Suganuma: Physicochemical properties of amylose-free and high-amylose starches from transgenic sweetpotatoes modified by RNA interference. *Carbohydr. Polym.*, 69, 233-240 (2007).
- 42) R. Dewar and M. J. Joyce: The thixotropic and rheopectic behaviour of maize starch and maltodextrin thickeners used in dysphagia therapy. *Carbohydr. Polym.*, 65, 296-305 (2006).

- 43) H. Gambuś, D. Gumul and L. Juszczyk: Rheological properties of pastes obtained from starches derived from immature cereal kernels. *Starch/Stärke*, 56, 225-231 (2004).
- 44) M. Sikora, G. Adamczyk, M. Krystyjan, A. Dobosz, P. Tomasik, W. Berski, M. Lukaszewicz and P. Izak: Thixotropic properties of normal potato starch depending on the degree of the granules pasting. *Carbohydr. Polym.*, 121, 254-264 (2015).
- 45) J. Tattiyakul and M. A. Rao: Rheological behavior of cross-linked waxy maize starch dispersions during and after heating. *Carbohydr. Polym.*, 43, 215-222 (2000).
- 46) B. Wang, L.-J. Wang, D. Li, N. Özkan, S.-J. Li and Z.-H. Mao: Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. *Carbohydr. Polym.*, 77, 472-481 (2009).
- 47) M. R. Grace: Baked tapioca products. in Cassava Processing, FAO Plant Production and Protection Series No. 3, Food and Agriculture Organization, pp.55-61, Rome, Italy (1977).
- 48) A. H. Clark, M. J. Gidley, R. K. Richardson and S. B. Ross-Murphy: Rheological studies of aqueous amylose gels: The effect of chain length and concentration on gel modulus. *Macromolecules*, 22, 346-351, (1989).
- 49) W. Zhou, J. Yang, Y. Hong, G. Liu, J. Zheng, Z. Gu and P. Zhang: Impact

- of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato. *Carbohydr. Polym.*, 122, 417-427 (2015).
- 50) T. Horibata, M. Nakamoto, H. Fuwa, and N. Inouchi: Structural and physicochemical characteristics of endosperm starches of rice cultivars recently bred in Japan. *J. Appl. Glycosci.*, 51, 303-313 (2004).
- 51) N. Inouchi, H. Hibi, T. Li, T. Horibata, H. Fuwa and T. Itani: Structure and properties of endosperm starches from cultivated rice of Asia and other countries. *J. Appl. Glycosci.*, 52, 239-246 (2005).
- 52) Z.-H. Lu, T. Sasaki, Y.-Y Li, T. Yoshihashi, L.-T. Li and K. Kohyama: Effect of amylose content and rice type on dynamic viscoelasticity of a composite rice starch gel. *Food Hydrocolloids*, 23, 1712-1719 (2009).
- 53) A. Xu and P.A. Seib: Structure of tapioca pearls compared to starch noodles from mung beans. *Cereal Chem.*, 70, 463-470 (1993).

謝 辞

本研究を遂行するとともに本論文を取りまとめるにあたり，終始御懇篤な御指導と御鞭撻を賜りました，鹿児島大学大学院連合農学研究科応用生命科学専攻 北原兼文教授に心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり，貴重な御助言，御高閲を賜りました，鹿児島大学大学院連合農学研究科応用生命科学専攻 光富勝教授（佐賀大学），藤田清貴准教授，高峯和則教授，小西照子准教授（琉球大学），安部淳一教授に深く感謝申し上げます。

終始御懇篤な御指導と御助言を賜りました国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門食品物理機能ユニット長 神山かおる博士に感謝申し上げます。

本研究の遂行および本論文の作成にあたり，深い御理解と御支援を賜りました鹿児島県大隅加工技術研究センター 岩元睦夫所長，同センター 田川彰男調整監，同センター 山本誠次長，元鹿児島県農業開発総合センター副所長 松元順博士，元鹿児島県農産物加工研究指導センター所長 大江正和氏，鹿児島県農業開発総合センター徳之島支場長 永田茂穂氏，同大島支場長 久米隆志氏に謹んで御礼申し上げます。

本研究の遂行および学位論文取得を後押ししていただきました鹿児島大学名誉教授 菅沼俊彦博士，同名誉教授 竹田靖史博士，元鹿児島県農産物加工研究指導センター所長 田之上隼雄博士に深く感謝申し上げます。

また、本研究に御協力いただきました山崎智大氏，金原咲希氏，鹿児島県農業開発総合センター大隅支場，国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター都城拠点，日本澱粉工業株式会社，松谷化学工業株式会社，鹿児島県経済連農産事業部米穀特産課，JA 南薩拠点霜出澱粉工場，北斗工機株式会社の皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究の遂行にあたり、多大なるサポートをいただきました鹿児島県大隅加工技術研究センター（旧農業開発総合センター農産物加工研究指導センター）の職員および臨時職員の皆様に心より御礼申し上げます。