

糊化温度の低いでん粉を含むサツマイモ 「クイックスweet」におけるマルトース生成の特徴



農研機構作物研究所 畑作物研究領域 上席研究員 中村 善行

1. はじめに

サツマイモの国内生産量は現在、約90万t¹⁾で、これは最盛期の約15%に相当する。生産量がこのように激減した主要因として挙げられるのが、1963年（昭和38年）から始まった輸入自由化に伴う安価な国外産でん粉の普及である。事実、サツマイモでん粉の国内生産量はこの年に記録した約74.2万tをピークに減少し続け、最近では4.5万t程度で推移している。これは国内の全でん粉供給量の約1.5%に過ぎない。

サツマイモでん粉は糊化温度やリン含量などの特性値がいずれも各種でん粉の中で平均的な値を示し²⁾、殆どが輸入品であるトウモロコシやタピオカなどのでん粉に対して特性面で優位性がない。そのため、価格競争では圧倒的に優位なこれらのでん粉にはない新たな特徴をサツマイモでん粉に付与することで輸入でん粉との差別化を図ることがサツマイモでん粉の需要拡大にとって不可欠である。

2. 糊化温度の低いでん粉を含むサツマイモ品種「クイックスweet」

農研機構作物研究所では糊化温度が従来のサツマイモでん粉と比べて格段に低いでん粉を有するサツマイモ品種「クイックス

weet」が2002年に育成された³⁾。育種に携わった関係者の話によると当初からこのような特徴的なでん粉を含む品種を目指して育成したわけではないようで、その辺りのエピソードが本誌第100号記念誌に掲載されている⁴⁾。

「クイックスweet」に含まれるでん粉を水に懸濁し、温度を上げながらその液の粘度をRVA（Rapid Visco Analyser）と呼ばれる装置を使って測定すると、約55℃を境に粘度の急激な上昇が観測される。この境目の温度（糊化開始温度）は「ベニアズマ」や「高系14号」等の従来品種では75℃近辺であるので、「クイックスweet」では従来品種より20℃位低い温度からでん粉が糊化し始めることになる。なお、上記のようにして測定された温度は、示差走査熱量計の吸熱ピークから読み取られる糊化温度とは定義的に異なり、その値より5～10℃位高い⁵⁾が、おおまかな比較をするうえでは問題がないと考えられる。「クイックスweet」はこの種のでん粉変異を有する作物としては初めて育成された品種で、その後、ジャガイモや小麦などでも同様の取り組みが行われていると聞く。また、糊化温度の低いでん粉を含むサツマイモは糊化に要するエネルギーが少なく済むこと

や品質のよい干しいものが作りやすいことなどの利点が認められたことから、その後、同様のサツマイモ品種がいくつも育成されている^{6,7)}。

3. サツマイモの甘さに関わる糖分マルトースとその生成メカニズム

サツマイモの甘さに関わる主要な成分であるマルトースは、未加熱塊根には殆ど含まれず、加熱により糊化したでん粉に β -アミラーゼ (E.C.3.2.1.2, 1,4- α -D-glucan maltohydrolase) が作用することで生成する。 β -アミラーゼは未糊化の生でん粉を殆ど分解しないので、マルトース生成にはでん粉糊化が前提となる。一般のサツマイモでん粉は糊化開始温度が70～75℃である (RVAによる測定値、以下同様) ため、塊根内部がこの温度域に達しないとマルトース生成は起こらない。一方、 β -アミラーゼの耐熱性はそれほど高くはなく、90℃付近で活性が殆ど失われる。従って、糊化でん粉に酵素が働いてマルトースが生成するのは70℃付近から90℃付近までであり、この温度域をなるべく時間をかけて通過させることがサツマイモを甘く調理するために有効である。遠火でじっくりと加熱された焼きいもが甘くなるのはこのような性質を反映したものと言える。逆に、電子レンジで急速に加熱した場合には70～90℃の温度域を通過する時間が短すぎて十分にマルトースが生成しないため、甘さが不足しがちとなる。このように、マルトース生成には酵素活性とともにでん粉糊化特性が大きく影響する。食用に留まらず、原料用品種・系統やそれらの交配選抜前期世代なども供試して β -アミラーゼ活性およ

びでん粉糊化温度とマルトース生成量との関係を検討した結果⁸⁾については本誌前号で紹介させていただいた⁹⁾。正常に生育した現行食用品種のように β -アミラーゼ活性が一定水準を確保している場合には、でん粉糊化 (開始) 温度が低い方がマルトース生成量が多いことが判った。

4. 「クイックスweet」における加熱に伴うマルトース生成の特徴

上述のように、一般的なサツマイモ品種ではでん粉の糊化が始まる75℃付近から β -アミラーゼが失活する約90℃付近の温度域でマルトース生成が起こる。これに対して、「クイックスweet」のでん粉は55℃付近で糊化が始まるため、加熱調理過程のより早い段階から β -アミラーゼにより分解され、マルトースが生成する。即ち、「クイックスweet」は、その名の如く、加熱調理すると速やかに (Quick) 甘く (Sweet) なる特徴を有し、当初は、電子レンジで美味しい (甘い) いもが食べられるという利便性をアピールして普及が図られた。筆者らは「クイックスweet」の甘さの特徴について、交配親である「ベニアズマ」と比較しながら更に詳しく検討した。「ベニアズマ」は1984年に農林種苗登録された品種で、その後四半世紀以上を経た現在でも、東日本における食用主力品種の地位を保っている。「ベニアズマ」のでん粉糊化開始温度は約75℃と一般的な品種・系統のなかでも比較的が高いが、その「ベニアズマ」を母本とする交配系統から選抜された「クイックスweet」のそれが親とは全く異なる低い値を示したことは興味深い。現在では低温糊化性のメカニズムについての研究

も進んでおり、可溶性でん粉合成酵素 (starch synthase : SS) の欠失が関与することが明らかとなっている¹⁰⁾。この変異によってアミロペクチン側鎖に重合度 (DP) の低い ($6 \leq DP \leq 11$) 単位鎖の割合が多くなると、でん粉の結晶性が低下して糊化温度が低くなると考えられている。

初めに、「クイックスweet」と「ベニアズマ」塊根片を同時に蒸した時の糖度 (Brix%) の変化を追跡した。Brix 値とは、水溶液の屈折率が溶質の増加に伴って変化することに基づいて、溶液中の溶質濃度を 20℃ におけるショ糖水溶液中のショ糖の重量%に相当する値として数値化したもので、最近では果実や野菜の甘さ (糖度) をある程度客観的に表現する指標としても用いられている¹¹⁾。実験の結果、塊根の大きさ (重量) によって時間の値自体は異なるものの、「クイックスweet」の方が「ベニアズマ」に比べて早期に糖度が上昇し始める、即ち、速やかに (Quick) 甘く (Sweet) なる、ことが確認された (図 1)。糖度上昇が開始する温度は「クイックスweet」では約 50℃、「ベニアズマ」では約 80℃で

あった。そこで、50℃ から 100℃ までの範囲で 10℃ ずつ変えた温度で両品種の塊根片を加熱し、それらのマルトース含有率を測定した。「ベニアズマ」ではマルトース含有率の有意な増加が認められた温度は 80℃ であったが、「クイックスweet」では加熱温度 50℃ においてマルトース含量が顕著に増加した。その結果、加熱温度が 60～90℃ における「クイックスweet」のマルトース含有率は「ベニアズマ」における値に比べて大幅かつ有意 ($p < 0.01$) に高くなった (図 2)。

マルトースの生成はでん粉分解酵素 β -アミラーゼによって触媒されることから、加熱中に β -アミラーゼの活性がどのように変化するかを調べた。上述のように様々な温度で加熱した「クイックスweet」と「ベニアズマ」の塊根片から調製した粗酵素液を用いて β -アミラーゼ活性を測定した。品種間の比較をするため、粗酵素液中のタンパク質量 (mg) 当たりの一分間のマルトース生成量 (m mole)、m mole maltose/mg of protein/min、を単位として活性を数値化した。「クイックスweet」、

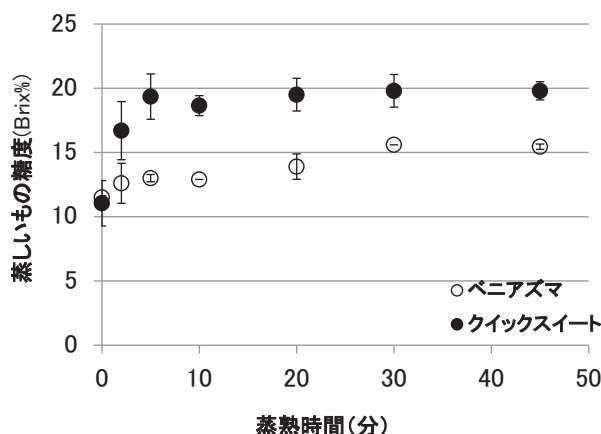


図1 「ベニアズマ」、「クイックスweet」塊根片を蒸した時の糖度変化
各々の点と縦棒は、異なる塊根を用いた8回の測定結果の平均値と標準偏差を各々表す。

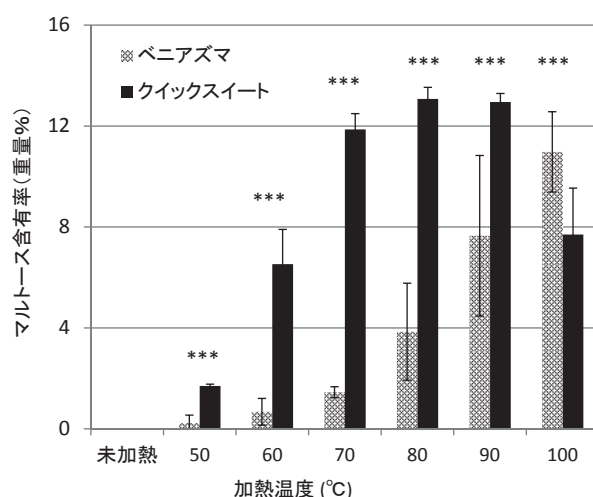


図2 様々な温度で加熱された「ベニアズマ」、「クイックスweet」塊根片から抽出された組織液のマルトース含有率

太い縦棒と細い縦線は、異なる塊根を用いた8回の測定結果の平均値と標準偏差を各々表す。
***は、その加熱温度における両品種のマルトース含有率に0.1%水準の有意差があることを表す。

「ベニアズマ」の未加熱塊根の β -アミラーゼ活性はそれぞれ、約0.20m mole maltose/mg/min、約0.14m mole maltose/mg/minと前者の方が高い値であった。一般的に、 β -アミラーゼ活性の高いサツマイモの方がマルトース含量も高いと考えられ、実際に筆者らも特定の条件下で両者の間に高い正相関を認めている⁸⁾。「クイックスweet」には「ベニアズマ」と比べて元々マルトース含量が高くなるポテンシャルがあると言えよう。さらに、80℃で加熱

した「クイックスweet」塊根の β -アミラーゼ活性は未加熱塊根と比べて殆ど低下しなかったが、80℃で加熱した「ベニアズマ」の活性は未加熱の1/4以下に低下した(表1)。しかし、未加熱塊根から抽出した β -アミラーゼの活性を温度を変えて測定すると、「クイックスweet」、「ベニアズマ」ともに45℃付近で最大となり、それ以上の高温では活性が低下し続け、90℃付近で失われるという同様の挙動を示した。すなわち、 β -アミラーゼ自体の耐熱性は両品種

表1 未加熱および様々な温度で加熱された「ベニアズマ」、「クイックスweet」塊根片から抽出した β -アミラーゼの活性

品種名	β - アミラーゼ活性 (m mole maltose/mg protein / min)						
	未加熱塊根		加熱塊根				
	**	加熱温度 (°C)					
		50***	60***	70***	80***	90***	100
ベニアズマ	0.139 ^a	0.145 ^a	0.147 ^a	0.140 ^a	0.031 ^b	0.046 ^b	0.050 ^b
	(0.033)	(0.025)	(0.018)	(0.039)	(0.024)	(0.039)	(0.042)
クイックスイート	0.199 ^a	0.224 ^a	0.261 ^a	0.264 ^a	0.258 ^a	0.128 ^b	0.089 ^b
	(0.043)	(0.026)	(0.042)	(0.055)	(0.083)	(0.035)	(0.045)

数値は10回の異なる実験における結果の平均値で、()内の数値はそれらの標準偏差を表す。
同一品種内の異なる英小文字を付した数値間には5%水準の有意差がある。

** : 両品種の未加熱塊根における活性に1%水準の有意差があることを示す。

*** : その温度における両品種の活性に0.1%水準の有意差があることを示す。

で差がなかった。従って、80℃で加熱された「クイックスイート」において β -アミラーゼ活性の低下がみられなかったのは、でん粉糊化特性の違いと関連があると思われる。

そこで、「クイックスイート」の塊根細胞内のでん粉が「ベニアズマ」に比べて低い温度から糊化するかどうかを確かめた。図3は「クイックスイート」と「ベニアズマ」の塊根片を所定の温度で加熱した時の組織細胞内ででん粉の糊化度を示したものである。糊化度は、組織細胞内のでん粉に β -アミラーゼとプルランナーゼを作用させた時に生じた還元糖の量を細胞外に単離して完全に糊化させたでん粉から生じた還元糖の量で割って求めた値で、細胞内ででん粉がどの程度糊化しているのかを知る目安となる¹²⁾。「ベニアズマ」のでん粉糊化度は加熱温度70℃までは未加熱の場合と殆ど変わらず、80℃で漸く上昇し始め、90℃で急激に80%程度に達した。これに対して、「クイックスイート」では50℃で加熱した時に

既に細胞内ででん粉の約60%が糊化しており、加熱温度70℃ではほぼ100%が糊化した。これらの塊根組織を走査電子顕微鏡で観察すると、60℃で加熱された「ベニアズマ」塊根の細胞内には未糊化の生でん粉粒が多数認められたのに対し、同じ温度で加熱された「クイックスイート」のでん粉はほぼ完全に糊化していることが観察された(図4)。このように「クイックスイート」の塊根細胞内ではでん粉が60℃で大部分糊化するため、60℃で加熱された塊根内には多量の糊化でん粉が活性を維持した β -アミラーゼとともに存在していると考えられる。サツマイモにはビタミンCが豊富で、しかも加熱調理による損失が他の野菜、果物類に比べて少ないことが知られているが、これは糊化したデンプンゲルがビタミンCの酸化や流出を防ぐからであるという指摘がある¹³⁾。同じように、「クイックスイート」では加熱調理の早い段階から糊化したデンプンゲルが β -アミラーゼの構造や機能を熱から守っているのかも知れな

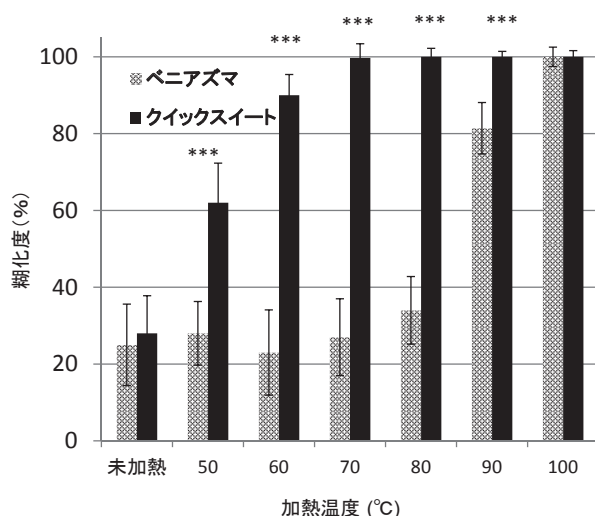


図3 様々な温度で加熱された「ベニアズマ」、「クイックスイート」塊根片におけるでん粉糊化度
太い縦棒と細い縦線は、異なる塊根を用いた6回の測定結果の平均値と標準偏差を各々表す。
***は、その温度における両品種のでん粉糊化度に0.1%水準の有意差があることを表す。

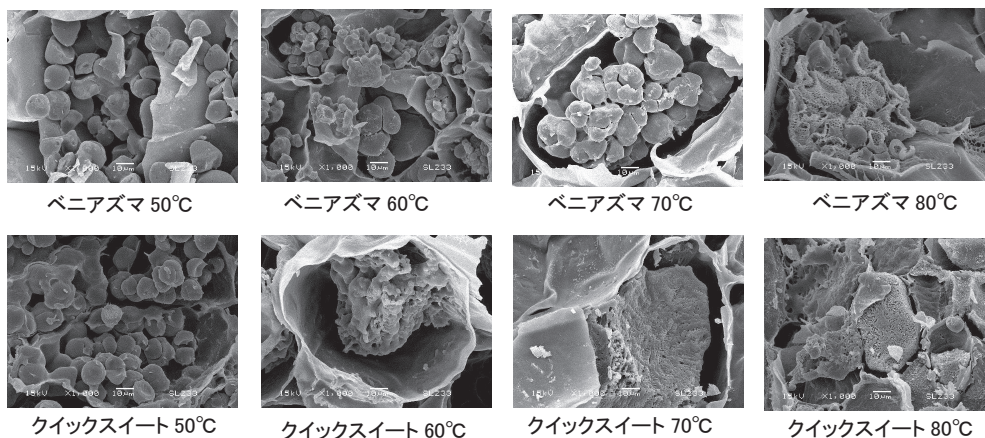


図4 異なる温度で加熱された「ベニアズマ」、「クイックスweet」塊根片組織の微細構造
加速電圧：15kV、倍率：1000倍、横棒は10mmを表す。

い。加熱調理中のサツマイモにおける本酵素の構造や機能の変化を追うことによって更に興味深い知見が得られるものと期待される。

5. おわりに

以上要するに、低温糊化性でん粉を含むサツマイモ「クイックスweet」では、でん粉糊化温度がより高い一般のサツマイモ品種に比べて加熱調理過程の早い段階（品温が低いうち）からでん粉糊化が起こり、 β -アミラーゼの作用によってマルトース生成が始まるうえに、酵素活性がより高温域まで持続されてマルトース生成が続くことが明らかになった。「クイックスweet」は、Quick（マルトース生成が早く起こる）のみならず、Long（マルトース生成が長く続く）にSweet（甘い）特徴を有したサツマイモであると言える。

本稿は筆者らによる論文（日本食品科学工学会誌第61巻p.62-69）に基づくもので、論文中的図、表は、いくつかを一部改変したうえで引用したが、紙面の都合上省略したものもある。それらは原著をご参照いた

だきたい。

謝辞

図、表の転載を許可いただいた日本食品科学工学会に御礼を申し上げます。また、原稿をご校閲いただいた片山健二博士に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 農林水産省生産局地域作物課、いも・でん粉に関する資料2013（2013）
- 2) 菅原俊彦、北原兼文、いも類振興情報 97：8-17（2008）
- 3) 片山健二ら、作物研報告3：35-52（2003）.
- 4) 中谷誠、いも類振興情報100：27-28（2010）.
- 5) 不破英次ら、澱粉科学の事典 p.194-196 朝倉書店（2003）.
- 6) 藏之内利和ら、作物研報告13：1-12（2012）
- 7) 片山健二ら、九州沖縄農研報告58：15-36（2012）
- 8) 中村善行ら、日本食品科学工学会誌 61：577-585（2014）

- 9) 中村善行、いも類振興情報125：44－48 (2015)
- 10) 高畑ら、育種学研究8 (別2) :297 (2006)
- 11) 高田明子、いも類振興情報 123：51 (2015)
- 12) 松永暁子、貝沼圭二、家政学雑誌 32：653－659 (1981)
- 13) 津久井亜紀夫、いも類文化学ノート 3「焼き芋小百科」p.20－29, 川越いも友の会 (2003)