

## サツマイモの細胞内デンプンの糊化特性

### Gelatinization of starches inside parenchyma cells separated from Sweet Potatoes

伊藤 知子\*

Tomoko Fujimura-Ito

The gelatinization of starches inside parenchyma cells of sweet potatoes was studied. The loss of birefringence of starches inside cells was low in the temperature range of 50 to 80°C, compared with those of isolated starches. While the differential scanning calorimetry curve of cells was similar to that of isolated starches. The solubilities and swelling power of starches in the cells were also low compared with those of isolated starches. From these results, it was concluded that the gelatinization of starches inside parenchyma cells of sweet potatoes was suppressed.

#### 1. 緒言

我々が日常的にデンプンを摂取する形態は、原料となる穀類、豆類などの植物性食品から分離精製された単離デンプン、加熱により組織を軟化してその形状を保ったままの組織状食品中の組織内デンプン、および組織を細胞単位に分離した単細胞食品中の細胞内デンプンに大別される。組織内デンプンおよび細胞内デンプンの糊化は、これらの食品の調理・加工技術および調理・加工品の品質と密接に関係すると考えられる (Waniska, 1992)。

これまでに、豆類 (小豆、ソラ豆、インゲン豆) およびジャガイモの細胞内デンプンの糊化について検討がなされ、いずれの場合も細胞内デンプンの糊化は抑制されるが、その程度は細胞壁の性状によって異なることが明らかにされている (藤村、1993a、藤村、1993b、Fujimura、1995およびFujimura、1994)。すなわち、強靱な細胞壁を有する豆類では、糊化に必要な水分の供給が制限されるため、細胞内デンプンの糊化は大きく抑制される (藤村、1995)。一方、細胞壁に間隙が認められたジャガイモの場合は、水分の供給はそれほど制限されていないと考えられ (釘宮、1996)、糊化の抑制程度も小さいことが明らかとなった。

本研究では、細胞壁の性状がジャガイモに近いと考えられるサツマイモを用いて細胞内デンプンの糊化について検討を行い、細胞内デンプンの糊化抑制の要因について考察を行った。

#### 2. 実験方法

##### (1) 試料

試料として、大阪府内で購入したサツマイモ (鳴門金時) を用いた。

##### (2) サツマイモ細胞試料の調製

サツマイモは外皮を取り除き、その中心部を10.0×10.0×1.2mmに切断した。表面のデンプン粒を洗い流したのち、キムワイプで軽く押さえて表面の水分を取り除き、0.045Nの塩酸に室温で1時間浸漬した。浸漬後、水洗した後、200メッシュの篩を用いて物理的操作による裏ごしを行い、細胞を分離した。さらに、280メッシュの篩で篩別を行うことにより、細胞の崩壊により露出したデンプン粒を取り除いた。再度、水洗した後、メタノール、アセトン、ジエチルエーテルで順次脱水し、風乾したものをサツマイモ細胞試料とした。なお、試料の分離は、顕微鏡によ

\* 食物栄養学科 教授

りその状態を観察しながら行った。サツマイモ細胞試料の顕微鏡観察を行ったところ、崩壊細胞は認められず、すべての細胞内デンプンが偏光十字を示した。

また、サツマイモ細胞試料の状態を、アンの崩壊粒子、損傷粒子および完全粒子の定量法（釘宮、1987および釘宮、1992）により測定した。その結果からも、損傷細胞は多いが、崩壊細胞は少ないと考えられた。

デンプン含量および水分含量は既報（藤村、1993a）と同様に常法にて行った。デンプン含量は76.1%、水分含量は12.3%であった。

### （3）単離デンプンの調製

サツマイモの外皮を取り除き、ホモジナイザーで粉碎したものを0.045Nの塩酸に室温で1時間浸漬し、280メッシュの篩を通過したものを単離デンプンとした。メタノール、アセトン、ジエチルエーテルで順次脱水し、風乾したものを単離デンプン試料とした。

デンプン含量は82.8%、水分含量は12.0%であった。

### （4）デンプンの溶解度、膨潤力、偏光十字消失割合の測定

貝沼らの方法（貝沼、1967）に準じて、試料を一定温度で加熱した際のデンプンの溶解度、膨潤力を測定した。すなわち、試料約0.2gを精秤し、蒸留水8 mLを加えた。攪拌しながら一定温度（50、60、70、80、90℃）の湯浴中で20分間加熱した後、冷却し、遠心分離（3,000r.p.m、30分間）により上澄液と沈殿部に分離した。上澄液はフェノール硫酸法により溶解したデンプン量を測定し、沈殿部はその重量を測定した。溶解度、膨潤力は次式により算出した。

$$\text{溶解度 (\%)} = (A / S) \times 100$$

$$\text{膨潤力} = B / (S - A)$$

A：上澄液中のデンプン量 (g)

B：沈殿部の重量 (g)

S：試料中のデンプン量 (g)

したがって、本研究でサツマイモ細胞試料の場合、膨潤力は厳密にはデンプンの膨潤力ではなく、デンプンを含む細胞の膨潤力となるが、これをデンプンの膨潤力と見なした。

偏光十字消失割合は、既報（藤村、1993a）と同様に、以下の方法で求めた。すなわち、溶解度、膨潤力の測定で得られた沈殿部を適当に水で懸濁、希釈したものを用いて、偏光十字が完全に見える場合を1個、粒子の約1/2が光る場合を1/2個、かすかに光る場合を1/4個、光らない場合を0個として、偏光十字を示す粒子数（偏光十字粒子数）を求めた。全粒子数に対する、全粒子数から偏光十字粒子数を差し引いたものの割合を百分率で表し、これを偏光十字消失割合とした。

### （5）示差走査熱量測定

示差走査熱量測定（DSC）は、単離デンプンの場合約4～6 mg、サツマイモ細胞試料の場合約3～5 mgを精秤し、水40 μLを加えて銀製容器に密封して、セイコー電子工業（株）製示差走査熱量計（DSC-10）を用いて、昇温速度1℃/分で行った。DSC曲線の特性値として、糊化の開始温度（To）、ピーク温度（Tp）、終了温度（Tr）をFig. 4に示した方法で求めた。また糊化のエンタルピー（ΔH）はピーク面積より算出し（cal/g無水物）、試料のデンプン含量により補正を行った。以上の測定値は3回以上の測定結果の平均値±標準偏差で示した。

### 3. 結果

#### (1) 偏光十字消失割合

デンプンの糊化に伴って生じる理化学的性状変化として、サツマイモ細胞および単離デンプンの偏光十字消失割合に及ぼす加熱温度の影響について検討を行い、その結果をFig. 1に示した。

単離デンプンの偏光十字消失割合は70℃で加熱すると、ほぼ100%に達したが、サツマイモ細胞内デンプンのそれは70℃加熱の場合は40%程度で、80℃に加熱するとほぼ100%に達した。

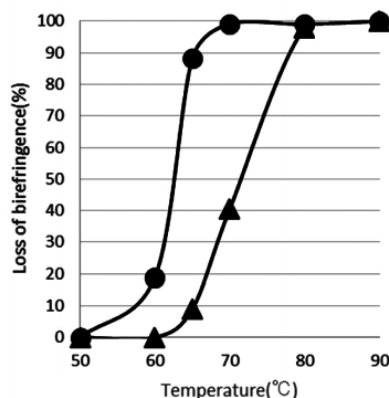


Fig.1 Effect of heating temperature on loss of birefringence of starches inside cells and isolated starches.

Parenchyma cells and isolated starches were heated in water for 20 min.

● ; isolated starches, ▲ ; parenchyma cells

以上の結果から、サツマイモ細胞内デンプンの糊化は単離デンプンと比較して抑制されていることが明らかとなった。

偏光十字の消失は、デンプン粒内の結晶領域と非晶領域の規則的な配向（層状構造、growth ring）のような比較的long rangeで認められる規則構造の崩壊を反映している（Cooke、1992）。サツマイモ細胞内デンプンの糊化においては、この層状構造の崩壊が抑制されていることが明らかとなった。

#### (2) 溶解度および膨潤力

サツマイモ細胞および単離デンプンを加熱した場合のデンプンの溶解度の変化をFig. 2に示した。単離デンプンの溶解度は加熱温度が60℃を超えると上昇し始め、90℃加熱では約16に達した。一方、サツマイモ細胞の溶解度は90℃加熱でも10に達しなかった。

また、同様にデンプンの糊化に伴う膨潤力の変化をFig. 3に示した。単離デンプンでは65℃以上の加熱で膨潤力は上昇し始め、90℃では約45に達した。サツマイモ細胞ではほとんど上昇がみられず、90℃加熱でも約15であった。これらの結果から、サツマイモ細胞内デンプンの糊化に伴う膨潤は、65℃以上の温度域において抑制されることが明らかとなった。

以上の結果から、サツマイモ細胞内デンプンの糊化に伴って生じる溶解および膨潤は、単離デンプンと比較して抑制されることが明らかとなった。

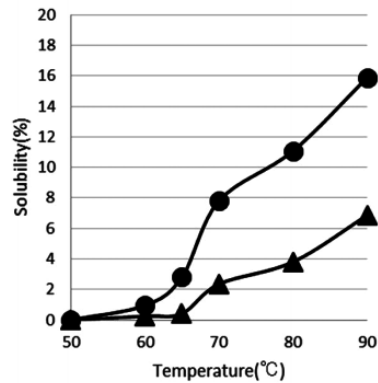


Fig2 Effect of heating temperature on solubilization patterns of starches inside cells and isolated starches.

Parenchyma cells and isolated starches were heated in water for 20 min.

● ; isolated starches, ▲ ; parenchyma cells

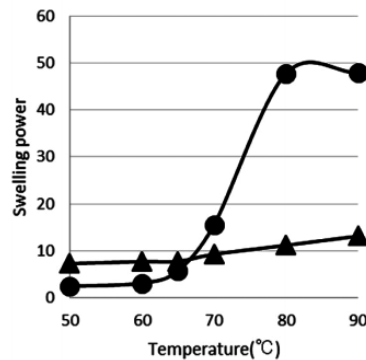


Fig.3 Effect of heating temperature on swelling power of starches inside cells and isolated starches.

Parenchyma cells and isolated starches were heated in water for 20 min.

● ; isolated starches, ▲ ; parenchyma cells

### (3) 示差走査熱量測定 (DSC)

サツマイモ細胞内デンプンと単離デンプンの糊化の違いを調べるために、サツマイモ細胞および単離デンプンのDSCを行った。DSC曲線の一部をFig. 4 に、特性値をTable 1 に示した。サツマイモ細胞内デンプンと単離デンプンのDSC曲線は、いずれも $T_p$ が72 ~ 73°Cの単一な吸熱曲線を示した。また、両者の特性値 ( $T_o$ 、 $T_p$ 、 $T_r$ および $\Delta H$ ) はほぼ同じであった。

DSCによる吸熱反応は、主としてアミロペクチンの隣接外部鎖間で形成される二重らせん構造のような比較的short rangeで認められる規則構造の崩壊を反映している (Gidley, 1991)。通常、偏光十字の消失に反映されるlong rangeで認められる規則構造との崩壊と、short rangeで認められる規則構造の崩壊は、デンプンの種類により同時に起こる場合と、別々に生じる場合がある (Cooke, 1992)。これまで検討した小豆 (藤村, 1993aおよび藤村, 1993b)、ソラ豆

(Fujimura, 1995)、インゲン豆 (Fujimura, 1994) およびジャガイモ (釘宮, 1996) の場合は、二つの規則構造の崩壊がほぼ同時に生じていると考えられたが、サツマイモの場合は別々に生じていることが示唆された。

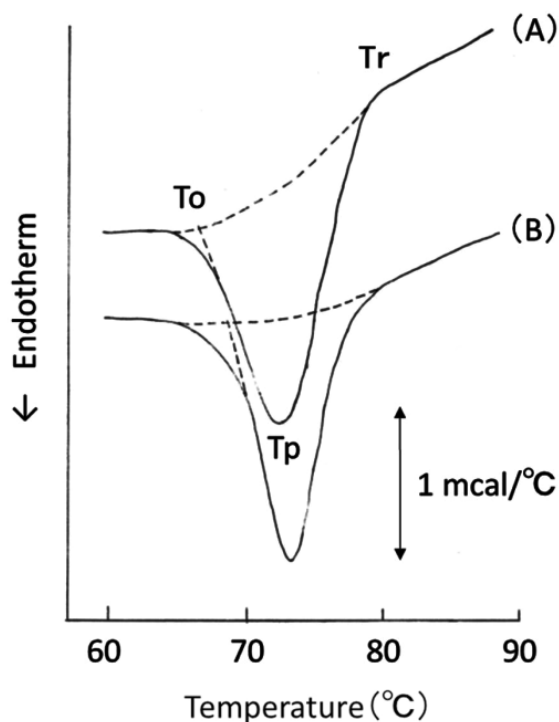


Fig.4 DSC thermograms of isolated starches (A) and parenchyma cells (B).

A ; 5.12mg of isolated starches with 35.34mg of water

B ; 3.54mg of parenchyma cells with 33.75mg of water

Table 1 DSC characteristics of isolated starches and parenchyma cells of sweet potatoes

	Endothermic transition (°C)			$\Delta H^d$
	$T_o^{a)}$	$T_p^{b)}$	$T_r^{c)}$	
Isolated Starches	$66.8 \pm 0.3$	$72.1 \pm 0.3$	$79.8 \pm 0.6$	$3.0 \pm 0.1$
Parenchyma cells	$68.9 \pm 0.3$	$72.9 \pm 0.5$	$80.4 \pm 0.1$	$3.1 \pm 0.2$

DSC characteristics are expressed as mean and standard deviation for triplicates.

a) Onset temperature

b) Peak temperature

c) Recovery temperature

d) cal/g starch

以上の結果から、サツマイモ細胞内の規則構造（二重らせん）の崩壊は、層状構造の崩壊とは別々に生じており、層状構造の崩壊は抑制されるが、二重らせん構造の崩壊は抑制されないことが示唆された。

#### 4. 考察

サツマイモ細胞内デンプンの糊化について検討を行った。細胞内デンプンの糊化の状態や機構を検討する上で問題となるのは、デンプンの糊化を評価する方法である。デンプンの糊化とは、過剰の水の存在下でデンプンを加熱して、その粒構造が崩壊してゲル状となった際にデンプンの結晶構造が消失し、デンプン粒が水和・膨潤してデンプン分子の一部は溶解するという一連の減少を総合的に示している (Zobel, 1984)。デンプンの糊化に伴って光学的性質、磁気的性質、熱的性質などの理化学的性質が変化するが、これらの性質変化は必ずしも同時に起こるものではないことが報告されている (久下, 1992)。

本研究では、総合的に糊化を評価するために、様々な手法を用いてサツマイモ細胞内デンプンの糊化の評価を行ったところ、単離デンプンと比較して糊化が抑制されているが、そのパターンは豆類やジャガイモの場合と異なることが明らかとなった。サツマイモ細胞の場合、偏向十字消失割合の結果 (Fig. 1) から、層状構造の崩壊は抑制されるが、二重らせん構造の崩壊は抑制されない (Fig. 4 および Table 1) ことが明らかとなった。これは、二重らせん構造の崩壊に必要な水分が細胞内に供給されているが、層状構造の崩壊に必要な水分が供給されていないこと、もしくは細胞内に必要な空間が確保されていないことがその理由として考えられる。

そこで、糊化の抑制要因について、他の細胞内デンプンの糊化抑制程度と比較により検討を行った。豆類の細胞内デンプンの場合、偏光十字消失割合、溶解度、膨潤力、DSCのすべての結果において糊化が抑制されていた。また、ジャガイモの細胞内デンプンの場合、溶解度および膨潤力においては糊化抑制されていたが、偏光十字消失割合およびDSCの結果において糊化は抑制されていなかった。サツマイモ細胞の場合、偏光十字消失割合、溶解度および膨潤力の結果かにおいては糊化が抑制されていたが、DSCの結果については糊化が抑制されていなかった。

以上のことから、豆類とイモ類ではDSCの結果が大きく異なることが分かった。DSCにおける糊化抑制については、細胞内への水分の供給が大きく関わるということが明らかになっている (藤村, 1995)。豆類の子葉細胞の細胞壁は強靱であるため、細胞内への糊化に必要な水分の供給を妨げるが、イモ類の場合はその細胞壁がある程度の弾力性を有すると考えられ、また損傷細胞が多いために、加える熱量の増加に伴って、細胞壁の間隙を通じて細胞内に水が取り込まれたと考えられる。

これらのことは、それぞれの細胞内デンプンの膨潤力からも類推することができる。すなわち、ソラ豆およびインゲン豆の細胞内デンプンの膨潤力は約 5 (90°C、60分加熱の場合)、小豆の場合は約 8 (90°C、60分加熱) であるのに対し、サツマイモの場合は約 15 (90°C、20分加熱)、ジャガイモの場合は約 27 (90°C、20分加熱) であった。いずれの場合も、それぞれの単離デンプンの膨潤力と比較すると、著しく低い値ではあるが、細胞内デンプンの膨潤力が上昇するということは、細胞内にデンプンの規則構造の崩壊に必要なある程度の空間的余地があることを示していると考えられた。

規則構造の崩壊に必要な空間については、細胞壁の強靱さ以外に、細胞内におけるデンプンの濃度の影響を受けると考えられる。図示していないが、顕微鏡観察の結果、豆類では小豆の細胞内デンプン濃度が少なく、ソラ豆およびインゲン豆は多い。イモ類ではジャガイモの細胞内デンプン粒数が少なく、サツマイモの方が多く含まれていることが分かった。このことから、豆類では小豆の膨潤力が大きく、イモ類ではジャガイモの膨潤力が大きいことを説明できる。

このような細胞内デンプンの糊化状態の違いは、細胞状食品の品質と密接に関係している。既存

の細胞状食品である餡（あん）、マッシュポテトおよびポタージュスープなどだけでなく、新規食品として凍結減圧酵素含浸による植物組織の単細胞化食品なども開発されている。デンプンの糊化のみならず、例えばタンパク質も細胞という限られた空間で加熱された場合にその変性の程度が異なることが考えられる（渡辺、2006）。今後、デンプンの糊化状態が異なる場合も含め、通常とは異なる条件下で成分変化が起こった場合の消化性などについても検討が必要であると考えられた。

## 5. まとめ

サツマイモ細胞内デンプンの糊化は、単離デンプンと比較して抑制されていることが明らかとなった。しかし、サツマイモの細胞壁は豆類の場合ほど強靱ではなく、また、short rangeの規則構造の崩壊に必要な水分は供給されていることが明らかとなった。

糊化が抑制された原因として、long rangeの規則構造の崩壊や、膨潤に必要な空間的余地がないことが考えられた。サツマイモ細胞の場合は、細胞内デンプン濃度が高いために、その余地が不足していると考えられた。

したがって、サツマイモ細胞内デンプンの糊化抑制のメカニズムは、豆類の場合と異なり、1個の細胞内に含まれるデンプン粒子の数（細胞内デンプン濃度）も大きく関与していることが示唆された。

## 参考文献

- 貝沼圭二、小田恒郎、鈴木繁男、澱粉工誌、**14**、24-29（1967）。
- 釘宮正往・平田 健、アンの崩壊粒子及び損傷粒子の定量法Ⅱ アミラーゼ処理によるデンプンの溶解率に基づくアンの崩壊粒子の定量法：アンの崩壊粒子及び損傷粒子の定量法（第2報）、日食工誌、**34**、654-658（1987）。
- 釘宮正往、小豆煮豆中のアン粒子の崩壊、損傷に及ぼす煮豆調整条件の影響、日食工誌、**39**、167-172（1992）。
- 釘宮正往・伊藤（藤村）知子、ジャガイモから分離した細胞中に存在するデンプンの糊化、日本食品科学工学会誌、**43**、951-955（1996）。
- 久下 喬、澱粉の物性、澱粉科学、**39**、51-56（1992）
- 藤村知子・釘宮正往、小豆の子葉細胞内デンプンの糊化、日食工誌、**40**、490-495（1993a）。
- 藤村知子・釘宮正往、小豆子葉細胞の示差走査熱量測定：細胞内デンプンの糊化に関する研究（第2報）、日食工誌、**40**、702-707（1993b）。
- 藤村知子、釘宮正往、豆類の子葉細胞内デンプンが糊化する際の細胞内の水分の推定、応用糖質科学、**42**、7-13（1995）。
- 渡辺篤二・廣瀬理恵子、単細胞化食品—既存食品と新しい試み—、日調科誌、**39**、83-87（2006）。
- Cooke,D. and Gidley,M.J., Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization : origin of the enthalpic transition, *Carbohydr.Res.*, **227**, 103-112（1992）。
- Fujimura.T., and Kugimiya,M., Gelatinization of Starches inside Cotyledon Cells of Kidney Beans, *Starch*, **46**, 374-378（1994）。
- Fujimura,T., Liu, X.Y. and Kugimiya,M., Gelatinization of Starches inside Cotyledon Cells Separated from Faba Beans, *J.Jpn.Soc.Food Sci.Technol.*, **42**, 190-195（1995）。
- Gidley,M.J. and Cooke,D., Aspects of molecular organization and ultrastructure in starch granules, *Biochem.Soc.Trans.*, **19**, 551-555（1991）。
- Zobel, H.F. : Starch : Chemistry and Technology, 2nd ed. (ed.by Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall, E.F.), Academic Press, New York, p.285（1984）。
- Waniska,R.D. and Gomez, M.H., Dispersion behavior of starch, *Food Technology*, **46**, 110-123（1992）。