

論 説

サトイモ水晶芋の硬さの定量

谷 口 芽 依 (産業イノベーション学科)

小長谷 圭 志* (産業イノベーション学科)

木 村 太 郎 (農学研究科)

高 橋 憲 子 (農学研究科)

* 責任著者

Quantification of taro crystalline hardness

Mei TANIGUCHI (Industrial Innovation)

Keiji KONAGAYA * (Industrial Innovation)

Taro KIMURA (Graduate School of Agriculture)

Noriko TAKAHASHI (Graduate School of Agriculture)

* Corresponding author

キーワード：サトイモ、水晶芋、弾性率、圧縮試験、空隙率

Keywords: taro, crystalline taro, Young's modulus, compression test, porosity

【原稿受付：2025 年 7 月 14 日 受理・採録決定：2025 年 8 月 1 日】

要旨

サトイモに発生する水晶症状は、加熱後の硬さの増加、食感の低下を伴う。このため、水晶芋の自動検出が切望されている。そこで本研究では、サトイモ水晶芋を自動検出することを目指して、二つの目的を設定した。一つ目は、正常芋と水晶芋の硬さの違いを表す指標を見出すことである。二つ目は、正常芋と水晶芋の硬さの違いを構成成分との関連で明らかにすることである。実験材料として、県内の加工会社より提供いただいた加熱済み芋 18 個（正常芋 9 個、水晶芋 9 個）を使用した。形状の影響をなくすため円筒にくり抜き、一軸圧縮試験を行い、弾性率によって評価した。また、空隙率との相関の解析から、構成成分により説明できる個体とそうでないものが存在し、繊維質の異方性が関与している可能性が示唆された。本研究により、正常芋と水晶芋の硬さの違いとして弾性率は正常芋で 0.23 ± 0.11 MPa、水晶芋で 0.49 ± 0.29 MPa となり、水晶芋で弾性率が高くなった。このことは、正常芋と水晶芋を判別するデバイスの開発にとっての指標になると期待できる。

I 緒 言

サトイモに発生する水晶症状は、加熱後の硬さの増加、食感の低下を伴う。このため加工現場では、皮むき後と加熱処理後の 2 回、硬さを確認し、水晶芋を除去している。労力軽減と人手不足の懸念から、水晶芋の自動検出が切望されている。

自動検出において、まずは、加工業者が判断した水

晶芋の硬さを定量的に把握する必要がある。また、力学的なエビデンスを与えるには、構成成分（空隙や水、固形物）との関係を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、サトイモ水晶芋を自動検出することを目指して、二つの目的を設定した。一つ目は、正常芋と水晶芋の硬さの違いを表す指標を見出すことである。二つ目は、正常芋と水晶芋の硬さの違いを構

成分との関連で明らかにすることである。これらの知見は、科学的に裏付けられた方法で、正常芋と水晶芋を判別するデバイスの開発につながる。

II 実験方法

1. サンプルと試験片

実験で使用した試料は2024年11月20日に株式会社中温（松山市小栗）より提供いただいたサトイモ18個（正常芋9個、水晶芋9個）である。正常芋は、加熱殺菌後のサンプルをそのまま開封して実験に用いた。水晶芋は、生芋の状態でご提供いただき、100℃の水で40分間加熱し、実験に用いた。これらサンプルはすべて、クールインキュベーター（アズワン株式会社、FCI-280G）の中で20℃にて実験日2024年11月28日まで保管した。

試験の方法を決めるにあたり、加工業者が手で押して判断している基準を定量する必要がある。そのため、予備検討では芋そのままに対し円筒プランジャーを貫入させたが、安定した結果が得られなかったため、一定形状の円筒試験片を採用した。

円筒試験片の作製手順は以下のようにした。まず、サトイモの平らな面を底面とし、穴の空いた板状のアルミニウム治具を周囲に置いたのち、カッター刃で芋を切断することで板状の塊を準備した。その後、コルクボーラーを用いて円筒状の試験片（直径19.5 mm、厚み10 mm）を作製した。

なお、すべての実験は独立して2回実施し、再現性を確認した。

2. 圧縮試験

応力-変位の曲線は、変形や破壊の特性に基づいて、硬さの指標を検討できる。一般的には、応力-ひずみ曲線が採用されるが、加工業者が手で何ミリメートル押すときの反力に相当するのかも重要となるため、ひずみの代わりに変位に対する応力を示した。

加工業者が芋に対し爪ほどの面積を押下するとき、加圧方向に加え、側方に広がるように芋が圧縮されるが、押下面積が小さいときには側面方向の変形は小さい。よって今回は、側面変形を拘束して試験した。その他に、変形のしにくさを主要な構成成分である水の体積率や、変形しやすい空隙の体積率で説明する際、水や空気の変形しにくさは弾性率を定義できず、体積弾性率で定義するため、側面拘束した試験のほうが解釈するのに都合がよい。これら二つの理由から、アルミニウム板（厚み20 mm）に円筒凹み（直径20 mm、深さ10 mm）をつくり、そこに円筒試験片を入れて圧縮試験した（岡田ら、2012）。

応力-変位の曲線を得るため、卓上圧縮試験機

（MCT-2150、株式会社エー・アンド・デイ）を用いた。圧縮の速度は 10 mm min^{-1} 、荷重の停止値は200 Nとした。変位の停止値は目視で芋がくず状になるまでとし、3-5 mmで試験片ごとに判断した。弾性率の算出では、すべての試験片で負荷開始位置から直線部分になっている部分として、変位が5 mm増加する部分の2点の傾きを求めた。その後、試験片ごとにマイクロメーターで測定した正確な厚みを用い、弾性率を算出した。

3. 構成成分の体積率の決定

空気を含む等方的な材料を圧縮したとき、変位は成分ごとの変位の和となる。また、成分の境界にかかる内部応力が等しいとき、材料の体積弾性率の逆数が構成成分の体積率の逆数の重み付き線形和となり、この重みは成分の体積率となる（岡田ら、2012；Tanaka et al. 2014）。またポアソン比の変化が小さいとき、弾性率は体積弾性率と比例する。バレイショでは弾性率が空隙率と逆数的関係になることが報告されており、体積弾性率のみならず弾性率も構成成分と逆数的な相関が認められている（西津、2020）。また一般的な材料でも、空隙の形に依存して弾性率の逆数と体積率の間には線形あるいは非線形の関係となる。これらは、それぞれReuss則、Voight則として知られる（尾中と安藤、1999）。以上から、弾性率の逆数との相関が期待される空隙の体積率を測定した。

芋の空隙率を減圧や含浸で直接求めようとすると、芋の粘着物質で阻害され、容易ではなかった。今回、空隙率は全体から他の構成成分の体積率を引くことで得た。空隙以外の構成成分は、8-9割程度を占める水に加え、1割ほどを占める固形物の2つである。したがって、以下の式（1）が成り立つ。

$$\varphi_{\text{空隙}} = 1 - \varphi_{\text{水}} - \varphi_{\text{固形物}} \quad (1)$$

水と固形物の体積率の計算は式（2）を用いた。

$$\varphi = \frac{\left(\frac{M}{\rho}\right)}{V} \quad (2)$$

ここで、 φ は構成成分の体積率、 M は構成成分の質量、 ρ は構成成分の真密度、 V は円筒の体積である。固形物の質量はドライオープン（DVS403、ヤマト科学株式会社）にて105℃で24時間乾燥させた質量とした。水の質量は湿潤状態と乾燥状態の差から求めた。体積 V は円筒の直径と厚みから計算した。

Ⅲ 結果と考察

1. 圧縮試験

円筒サンプルの応力-変位曲線を図1に示す。正常芋すべてが変位リミッターで停止し、水晶芋のすべてが荷重リミッターで停止した。これは正常芋では負荷が急増したあとにおよそ変化しなくなり、治具の隙間から芋のくずが流出し円筒の形が維持できなかったことと対応し、水晶芋では治具の隙間からは水のみが流出し、円筒の形を保ったまま急激に負荷が増加したことと対応した。

初期変位は図1挿入図で拡大して示した。正常芋、水晶芋ともに線形の領域が確認でき、初期は弾性的な性質を示していると考えられる。弾性率は正常芋で 0.23 ± 0.11 MPa、水晶芋で 0.49 ± 0.29 MPa と水晶芋で有意に高かった ($p < 0.05$)。弾性率は現場で判断された正常芋と水晶芋の違いのうち、硬さを定量する指標として適していると言える。

2. 体積率

弾性率の逆数と空隙の体積率の相関を図2に示す。正常芋、水晶芋ともに空隙率と弾性率の逆数が単純に線形の相関とはならなかった。この要因として、今回の値が縦弾性率であり、体積弾性率ではないことが考えられる。また、空隙の配向性がランダムの場合、構成成分の間で応力が均一となり、線形関係が成り立つが実際には繊維や管が配向を有し、配向に対してどの角度で圧縮したかで線形関係から逸脱した可能性があり、今後の課題である。

本研究により、正常芋と水晶芋の硬さの違いとして弾性率は正常芋で 0.23 ± 0.11 MPa、水晶芋で 0.49 ± 0.29 MPa となり、水晶芋で弾性率が高くなった。このことは、正常芋と水晶芋を判別するデバイスの開発にとっての指標になると期待できる。

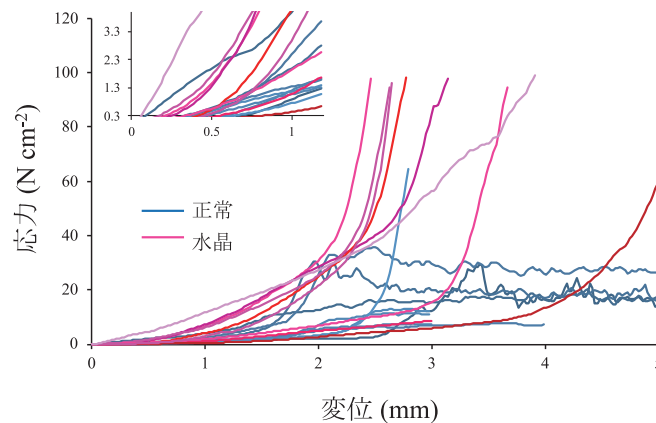


図1 応力-変位曲線 青、赤はそれぞれ正常芋 (n=9) と水晶芋 (n=9)

Fig. 1 Stress-displacement curve. Blue and red lines indicate the normal (n=9) and crystalline (n=9) taro, respectively.

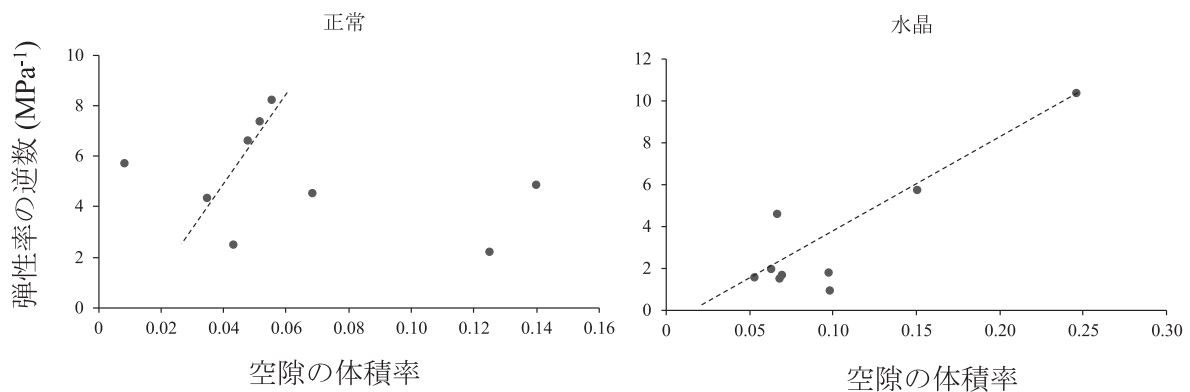


図2 弾性率の逆数と空隙の体積率の相関 (固形物の真密度を 1.4 g cm^{-3} としたとき)

Fig. 2 Relationship between the reciprocal of Young's modulus and volume fraction of air (when assuming the true density of solid matter is 1.4 g cm^{-3}).

謝辞

本研究の実施にあたりご協力をいただいた株式会社中温に感謝の意を表する。

References

- 西津貴久, 2020. 音響による食品物性評価法. 日本食品工学会誌, 21 (2), 53-62.
- 岡田崇宏, 大橋裕成, 石川靖晃, 2012. 粗骨材の体積弾性係数の簡易測定に関する基礎的研究. 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会要旨集. 長野市, 425-426.
- 尾中晋, 安藤嘉門, 1999. 複相材料の平均的ヤング率に及ぼす構成相の形状とポアソン比の影響. 日本金属学会誌, 63 (10), 1283-1289.
- Tanaka Y., Sakama S., Goto H., 2014. Experimental investigation of effective bulk modulus of oil with entrained air bubbles. Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration. Sapporo, Japan, 1-8.