

# 新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

科 別： 生活與應用科學科 (二)

組 別： 國中組

作 品 名 稱： 「Q」的物理本質：

利用自組微壓縮系統探討澱粉、幾何與製程  
對軟物質力學之影響

關 鍵 詞： 澱粉凝膠、真實應力、質地剖面分析 (TPA)

編 號： 115JA-L002

## 「Q」的物理本質：

### 利用自組微壓縮系統探討澱粉、幾何與製程對軟物質力學之影響

## 摘要

本研究系統性探討澱粉來源、幾何形狀及加熱方式對澱粉凝膠物理力學之影響。我們運用自組微壓縮測試系統與影像分析，對樹薯粉、地瓜粉及馬鈴薯粉製成的球體（粉圓）、立方體與扁圓柱體進行定量分析。

結果顯示，蒸製（限制水合）比沸煮更能抑制澱粉溶出，保留較高初始剛性。材料本質上，樹薯粉憑藉支鏈澱粉網路展現優異加工硬化特徵，為「Q 彈」核心；地瓜粉受直鏈澱粉回凝主導，硬度極高；馬鈴薯粉則因冷水穩定性過低而不易成型加工。

本研究核心貢獻為建立基於真實應力修正的軟物質壓縮模型，成功分離幾何形狀與材料本質的力學差異。我們進一步將硬度、內聚性與回復率整合，量化定義出「Q 度」指標，成功將主觀「口感」轉化為可量測的物理量，為傳統澱粉食品製程提供科學依據。

## 壹、前言

### 一、研究動機

在臺灣飲食文化中，澱粉類原料（如樹薯粉、地瓜粉、馬鈴薯粉等）扮演著決定性角色。無論是追求 Q 度的粉圓、具有咬感的粉角，或是用於勾芡的太白粉，不同粉類在加工中往往具有不可替代性。若隨意更換配方，成品常面臨結構崩解、口感失準或無法成型等問題。這引發了本研究的核心好奇：究竟是何種物理機制，決定了特定澱粉與特定食品質地之間的必然聯繫？

過去研究指出，澱粉的分子結構（如直鏈與支鏈澱粉比例）會影響其糊化溫度與黏彈性。然而，在實際製程中，我們觀察到除了材料本質外，加熱方式（沸煮或蒸製）以及幾何形狀（球體或方體）似乎同樣對最終產品的力學特性產生顯著干擾。例如，為何馬鈴薯粉在冷水中極易擴散？為何特定形狀的粉角在咀嚼時比粉圓更具「厚實感」？

目前對於澱粉質地的描述仍多停留在感官層次的形容詞，缺乏標準化的物理量化指標。因此，本研究動機在於透過自組微力學測試系統，嘗試將抽象的「彈牙」、「嚼勁」等感官特徵，轉化為應力-應變曲線中的楊氏模數、功損失及真實應力等科學參數，藉此揭開澱粉、形狀與加工過程三者間交互作用的關係。

## 二、 研究目的

本研究透過自組微力學測試系統，結合微觀結構鑑定與巨觀力學模型，探討澱粉凝膠在不同加工過程下之「Q度」物理本質。

1. **建構「Q度」之多維度量化模型**：利用自組微壓縮測試系統，將感官術語「Q度」科學化定義為由「相對硬度、內聚性與彈性回復率」構成之綜合力學指標，並引入真實應力與真實應變的修正，以精確描述軟物質在大形變測試下之材料本質特徵。
2. **探究幾何形狀對水分擴散與受力面積之貢獻**：量化分析不同比表面積 (SA:V Ratio) 對水分滲透動力學之影響；並論證在凝膠邊界模糊之物理量測限制下，建立「各向同性膨脹模型」以推算有效基準受力面積之科學性。
3. **界定加熱處理過程對凝膠網路之調控機制**：系統性對比「限制性水合 (蒸製)」與「溶劑過量 (沸煮)」兩種加熱環境對澱粉網路穩定性之衝擊，尋找維持結構韌性 (內聚性) 與動態回彈 (回復率) 之最佳製程組合。
4. **剖析微觀顆粒尺寸對加工適性之影響邊界**：透過顯微觀察鑑定馬鈴薯澱粉之巨型顆粒特徵，結合冷水擴散之動態影像分析，從物理結構角度解釋特定澱粉材料在保形加工與力學穩定性上之結構缺陷，進而界定其應用極限。
5. **整合微觀組成與巨觀性能之因果律**：透過碘液顯色鑑定確保各組原料化學組成之同質性，進而聚焦討論「顆粒物理尺寸」與「分子鏈纏結特性」如何共同決定巨觀力學曲線中之「加工硬化」與「應變硬化」行為。

## 貳、 文獻探討

本研究綜合整理了澱粉化學、流變學與加工動力學的相關文獻，深入剖析樹薯澱粉、馬鈴薯澱粉與甘藷澱粉在分子結構、加熱處理及幾何效應上的根本差異。

### 一、 澱粉原料的物理化學特性

#### (一) 樹薯澱粉

樹薯澱粉 (又稱木薯澱粉) 源自 *Manihot esculenta* 塊根。其直鏈澱粉含量較低 (約 17-20%)，且支鏈澱粉具有較高的分子量與長鏈分支 (He et al., 2020)。這種獨特的分子

結構使其在糊化後能形成穩定的纏結網路 (Entanglement Network)，賦予凝膠極佳的黏彈性與拉伸性，這正是臺灣消費者所熟知 Q 度口感的分子基礎。此外，樹薯澱粉的回凝 (Retrogradation) 速率較慢，冷卻後不易變硬，適合作為粉圓或珍珠等需保持柔軟彈性的食品原料 (Zhu, 2015)。

## (二) 馬鈴薯澱粉

馬鈴薯澱粉具有巨大的顆粒尺寸 (可達 100  $\mu\text{m}$ ) 與天然結合的磷酸單酯基 (Phosphate Monoesters)。這些帶負電的磷酸基團在水中產生強烈的庫倫排斥力，導致澱粉顆粒在受熱時發生吸水膨潤，產生極高的峰值黏度 (Wang et al., 2017)。然而，這種高度膨潤的結構對剪切力極為敏感，容易在沸煮過程中解體，導致質地變得軟爛且缺乏彈性的口感。

## (三) 地瓜澱粉

天然地瓜澱粉的直鏈澱粉含量較高 (約 20-30%)，這使其具有強烈的回凝傾向 (Kim et al., 2020)。糊化後的凝膠在冷卻過程中，直鏈澱粉迅速重組形成雙螺旋結晶，導致硬度顯著增加，口感偏硬脆 (Baek et al., 2000)。

# 二、 加熱處理機制

## (一) 沸煮

澱粉在沸煮環境下會迅速吸水膨脹，尤其是結構較脆弱的馬鈴薯澱粉。根據 Hongbo et al. (的研究，馬鈴薯澱粉相較於木薯與甘薯澱粉，具有顯著較高的溶脹力 (Swelling capacity) 與崩解值 (Breakdown)，這解釋了馬鈴薯澱粉在過度吸水後顆粒結構易破裂、導致質地不均的物理基礎。

## (二) 蒸製

蒸製過程通常被視為「水分限制」系統，澱粉顆粒在此環境下發生限制性膨潤。根據 Wang et al. (的研究，澱粉在水分遷移受限的情況下，傾向於形成更為緻密且均勻的三維蜂窩狀網路 (SEM 觀察結果)，且其儲能模量  $G'$  的變化反映了凝膠網路的彈性增長。這種微觀結構的完整性不僅有助於維持食品整體的硬度，也能提升凝膠系統的持水性，從而在巨觀上表現出乾爽且具彈性的質地。

# 三、 幾何形狀對水分擴散之影響機制

澱粉製品在加熱處理過程中的吸水行為，主要受限於水分從表面向核心移動的擴散速率。根據費克擴散定律 (Fick's Second Law)，擴散通量與接觸面積成正比。

## (一) 比表面積之物理意義

比表面積 (Surface Area to Volume Ratio, SA:V) 的定義為單位體積的表面積，不同的幾何形狀具有不同的比表面積。擴散速率與物質交換的表面積成正比，對於相同體積（或相同重量）的澱粉團塊，比表面積越大，擴散速率越快。

- **立方體 (Cube)：角點效應 (Corner Effect)** 導致角點處局部含水量迅速升高，吸水最快。
- **薄圓柱體 (Cylinder)**：由於厚度極小，其 SA:V 遠高於其他幾何體。這將導致其吸水速率極快，澱粉顆粒在短時間內即達到飽和膨潤，口感趨於均質軟化。
- **球體 (Sphere)**：具有最小的理論比表面積 ( $3/r$ )，水分擴散過程最長，容易形成中心未熟、外層糊化的有嚼勁層次感。

## 四、 軟物質力學

### (一) 黏彈性 (Viscoelasticity)

澱粉凝膠同時展現黏性與彈性，當材料受到外力時，應力會隨時間耗散，表現出趨向液體的黏性；而當外力移除後，部分儲存的能量可使形變恢復，表現出固體的彈性。

### (二) 軟物質力學之幾何非線性與修正必要性

澱粉凝膠等軟物質在受到大形變壓縮時，與金屬或陶瓷等硬質材料有顯著差異。其最主要的特徵在於「幾何非線性」，即樣本在高度降低的同時，會發生明顯的橫向擴張。

過去針對粉圓力學的探討（如 戴翊喬等（2025））多聚焦於利用商用質構儀進行經驗模型的建立，其數據核心仍基於傳統之「工程應力 (Engineering Stress)」。然而，軟物質在大形變下會因忽略截面積隨形變增加而產生「應力稀釋」現象，導致測得的硬度包含幾何外形改變的貢獻，而非純粹的材料特徵。因此，本研究認為引入真實物理量的修正，對於精確描述澱粉製品在大形變下的應變硬化 (Strain Stiffening) 行為至關重要。

## 五、 前人研究：粉圓彈性模型之經驗建立

中華民國第 65 屆科展作品《Q 不容緩！粉圓彈性模型之建立》（戴翊喬等，2025）針對粉圓（球體幾何）的烹煮工藝與力學表現進行了系統性探討。

該研究之核心貢獻在於：

- **工藝優化**：透過單變因與多變因實驗（SN 反應圖），確認了「80 度熱水浸泡 90 秒、10 度冷水浸泡 1 小時」等參數對提升粉圓內聚性的顯著影響。
- **口感與內聚性之關聯**：該文獻證實了內聚性 (Cohesiveness) 是決定粉圓「Q 度」的關鍵指標，並嘗試為不同年齡層建立適配的烹煮模型。

然而，前人研究主要定位於「生活應用」，對於「材料本質（如不同澱粉來源）」以及「非球體幾何」對力學行為的影響探討較少。本研究將以此為基石，進一步從軟物質物理學的角度，解析導致這些現象的深層力學機制。

## 六、 質地剖面分析之理論架構與 Q 度量化

質地剖面分析 (Texture Profile Analysis) 是透過模擬人類口腔兩次咀嚼行為，獲取力-位移數據的標準化量測方法。本研究旨在將抽象的感官特徵「Q 度」，透過以下物理指標進行多維度的科學分析：

- **硬度 (Hardness)**：指材料抵抗初始形變的能力。在感官上對應牙齒切入樣本瞬間的阻抗感。
- **內聚性 (Cohesiveness)**：定義為第二次下壓所作之功與第一次之比值。其反映澱粉凝膠內部網路的韌性與牢固程度。根據 戴翊喬等 (2025) 的實驗結果，內聚性的提升是改善粉圓嚼感的核心物理量。
- **彈性 (Springiness)**：量化樣本受力後的幾何恢復能力。此指標區分了材料的彈性與塑性形變，對應感官上的「反彈感」與「彈牙感」。
- **咀嚼性 (Chewiness)**：為硬度、內聚性與彈性的綜合產物，最能代表固體澱粉食品的整體質地特徵，亦即本研究所欲定義之「Q 度」量化基礎。

## 七、 非線性力學指標之延伸觀察

除 TPA 指標外，本研究進一步引入以下指標，用以探討澱粉製品在大形變下的特殊現象：

- **剛性 (Stiffness)**：即楊氏模數 ( $E$ )。在應力-應變曲線中表現為初始線性段之斜率。斜率較大者展現出較為硬實的初次咬感，此特徵與樣本之幾何形狀（如球體之點接觸或立方體之面接觸）具高度相關性。
- **循環載重下之結構演變 (Fatigue & Damage)**：指材料在重複壓縮中展現的力學特性變化。若第二次下壓之斜率顯著變緩，通常代表澱粉網路內部發生了微觀損傷；反之，若斜率變陡或內聚性指標大於 1.0，則反映了樣本具備「加工硬化 (Work Hardening)」特徵。這可能因壓縮過程導致局部水分擠出，使澱粉基質在受壓後趨於緻密，進而增強其抗力。

## 參、 研究設備及器材

本研究之設備依功能分為實驗原料、樣本製備與加熱設備、以及自組之力學測試系統三大類：

### 一、 實驗原料與試劑

- **澱粉原料**：樹薯粉、太白粉（馬鈴薯粉）、地瓜粉各一包。

- **鑑定試劑**：碘液（用於澱粉顆粒結構與直鏈/支鏈比例之初步鑑定）。

## 二、 樣本製備與加熱設備

- **加熱設備**：大同電鍋（含內鍋與蒸盤）一組。
- **成型與盛裝器具**：燒杯（3 個）、培養皿（3 個）、載玻片。
- **計量儀器**：高精度電子秤（2 台，感測精度達 0.01 g）。

## 三、 自組力學測試系統

為達成對軟物質樣品之微壓縮控制，本研究未使用成本昂貴的商業質構儀，改為開發一套基於複式顯微鏡機構改造的「微壓縮力學測試系統」。本系統的設計核心在於利用顯微鏡調焦機構的機械特性，達成超越一般簡易架具的控制精度，且與商業質構儀內建的自動補償算法不同，本系統直接讀取力感測器與位移角度數據，使我們能繞過商業軟體的黑箱運算，直接獲得最原始的力-位移曲線，並在此基礎上進行「真實應力」與「幾何修正」的物理計算。

本研究開發之微壓縮力學測試系統，其核心規格標定如下：

- **位移控制單元**：改裝自複式顯微鏡之齒輪齒條機構。
  - **位移解析度**：經標定之校準係數  $k = 0.006 \text{ cm}/^\circ$ 。
  - **回饋裝置**：180 點重力基準量角器（用於角度追蹤）。
- **力感測單元**：
  - **解析度與範圍**：感測精度 0.01 g，有效量程達 500.00 g。
  - **操作功能**：具備歸零功能，用於每次測試前之零點校準。
- **系統輔助材料**：防水膠帶、橡皮筋、保護紙張（用於鏡頭防護）、載玻片（建立受力平面）。



圖 1. 微壓縮力學測試系統。  
(本圖由作者拍攝)

## 肆、 研究過程或方法

### 一、 實驗變因設計

本研究旨在透過量化手段探討多維度變因對澱粉質地之影響，實驗變因設計如下：

- **操作變因**：

- 澱粉種類：樹薯澱粉、地瓜粉（馬鈴薯粉經成型測試後排除）。
- 幾何形狀：粉圓（球體）、粉角（正立方體）、脆圓（薄圓柱體）。
- 加熱處理方式：煮製（溶劑過量環境）、蒸製（限制性水合環境）。
- **控制變因**：電鍋外鍋水量 (200 mL)、內鍋水量 (3600 mL)、加熱時間、冷卻靜置時間。
- **應變變因**：吸水率、線性膨脹率、相對硬度、內聚性、彈性回復率及綜合 Q 度。

## 二、 澱粉配比標準化

為確保樣本具備市場代表性與物理再現性，本研究之澱粉與水之重量配比是透過分析十餘組教學資料，歸納出在維持樣本結構完整性與成型操作性間的最佳平衡點：

為確保測試基準一致，實驗前對各澱粉種類進行成型測試，但預實驗發現馬鈴薯澱粉（太白粉）於冷水捏合階段具高度擴散性與低內聚力，無法依定義塑形為固定幾何模型，故其力學測試部分予以排除。

- **粉角/脆圓 (1.33 : 1)**：較高之含水量有助於澱粉團塊之平整鋪展與切割，減少成型過程中產生的邊緣裂紋。
- **粉圓 (1.54 : 1)**：採較高之澱粉含量，以提供足夠之表面張力，防止球體在加熱前因自重產生底部塌陷。

以上兩種配比之澱粉與水的重量差異僅約 3.46%，故在吸水性與力學實驗中，將三種形狀之澱粉團視為同密度基準。

## 三、 幾何模型定義

本研究定義三種幾何模型以利量化分析，並制定標準化手工成型程序。各樣本目標質量固定為  $1.00 \pm 0.05$  g，假設初始密度趨近一致：

- **粉角-立方體**：代表具稜角幾何體。採「手動捏壓法」成型，利用載玻片平直邊緣進行邊界校準，確保形成六面垂直之立方結構，以利觀察「角點效應 (Corner Effect)」。其比表面積定義為  $SA : V = 6/a$ 。

$$V = a^3, \quad A = 6a^2, \quad \frac{A}{V} = \frac{6}{a} \quad (1)$$

其中  $a$  為邊長。

- **脆圓-薄圓柱體**：代表高比表面積之薄片組。採「厚度規壓平法」成型：將樣本置於兩片載玻片間，並以「一元硬幣」作為基準厚度規均勻下壓，獲得厚度固定（約 0.16 cm）之圓柱體。其比表面積定義為  $SA : V = 2/h + 2/r$ 。

$$V = \pi r^2 h, \quad A = 2\pi r^2 + 2\pi r h, \quad \frac{A}{V} = \frac{2}{h} + \frac{2}{r} \quad (2)$$

其中  $h$  為固定厚度。

- **粉圓-球體**：代表低比表面積之對照組。採「手工搓揉法」成型，透過手掌均勻旋轉施力成圓球狀。其比表面積定義為  $SA : V = 3/r$ 。

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3, \quad A = 4\pi r^2, \quad \frac{A}{V} = \frac{3}{r} \quad (3)$$

其中特徵尺寸（半徑） $r = \sqrt[3]{3V/4\pi}$ 。

#### 四、 樣本幾何特徵參數

本研究計算各組樣本之初始幾何參數如表 1。其中比表面積 ( $SA : V$ ) 為影響吸水與糊化程度之關鍵指標。

表 1. 各幾何模型之初始特徵參數 (1.00 g 基準)

幾何參數	粉角 (立方體)	脆圓 (薄圓柱體)	粉圓 (球體)
特徵尺寸 (cm)	$a = 0.95$	$D = 1.6, H = 0.16$	$D = 1.08$
預估體積 $V$ (cm <sup>3</sup> )	0.857	0.330	0.660
預估面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	5.415	4.846	3.664
比表面積 $SA:V$ (cm <sup>-1</sup> )	6.32	14.70	5.56
配比 (澱粉: 水)	1.33 : 1	1.33 : 1	1.54 : 1

註：計算公式如下：立方體  $SA : V = 6/a$ ；薄圓柱體  $SA : V = (2/r) + (2/H)$ ；球體  $SA : V = 6/D$ 。

#### 五、 加熱處理之標準化程序

本研究使用標準化的加熱流程，利用間接加熱原理，確保所有樣本在相同的加熱條件下糊化。加熱流程如下：

- **加熱設備**：採用容量為 3600 ml 之間接加熱式電鍋，外鍋加入 200 ml 過濾水作為加熱介質，利用其汽化潛熱維持內部為 100°C 之飽和蒸汽環境。
- **「沸煮」組：高浴比對流加熱**：此方式屬「溶劑過量」環境，熱量與水分傳遞以傳導與對流為主。將樣品置於內鍋內的三個燒杯中，燒杯內盛裝過濾水作為樣本之沸煮介質，並在沸騰之內鍋水中加熱。此配置優點在於利用腔體內蒸汽均勻加熱燒杯壁，達成穩定的恆溫水浴效果，避免傳統直火加熱導致的局部過熱。樣本與沸煮介質之浴比維持於 1 : 20 以上。
- **「蒸製」組：受限水體恆溫加熱**：此方法屬於「水分限制」環境，樣品置於蒸盤上之培養皿內，與鍋底沸水隔開，於皿內加入 40 ml 之過濾水，利用水蒸氣進行加熱，吸水途徑僅限於樣本周遭之水。此法雖提供液態水環境，但由於培養皿之受限水體特性且缺乏直接對流，其物理效應更接近於「低浴比水熱平衡」，能抑制表面澱粉之過度流失，保留較完整的凝膠邊界。

- **加熱時的空間配置**：燒杯在內鍋中呈正三角形排列，培養皿在蒸盤上呈對稱四點排列，此對稱空間佈局可讓加熱時熱場更均勻。所有樣本於電鍋電源跳脫後，統一進行 60 min 之保溫靜置，隨後切斷電源並移出樣本。

## 六、 自組力學測試系統之建置與原理

為量化澱粉凝膠在微小位移下的受力，本研究開發一套基於複式顯微鏡改造之「微壓縮力學測試系統」。該系統整合了位移控制、力感測與角度轉換三大模組，其組裝原理如下（見圖 1）：

利用複式顯微鏡之粗調節輪作為精密位移控制器。粗調節輪透過內部齒輪齒條機構，將旋轉運動轉換為鏡筒的垂直線性位移，可進行微米級的壓縮控制：

### (一) 位移控制與角度轉換機制

- ① **角度觀測**：於調節輪轉盤中心黏貼高精度量角器，並於轉軸處懸掛由螺帽構成之鉛垂線作為重力基準，用以精確紀錄調節輪之轉動角度。
- ② **幾何轉換**：藉由紀錄旋轉之角度變化 ( $\Delta\theta$ )，透過校準係數  $k$  計算出相對應之垂直下壓深度 ( $\delta$ )。
- ③ **幾何推導**：經預實驗測得，調節輪每旋轉  $5^\circ$  產生 0.03 cm 之垂直位移。定義校準係數  $k$  如下：

$$\delta = k \cdot \Delta\theta \quad (4)$$

其中各項代號說明如下：

- $\delta$ ：垂直下壓深度 (cm)
- $k$ ：校準係數，定值為 0.006 cm/ $^\circ$
- $\Delta\theta$ ：調節輪之旋轉角度變化量 ( $^\circ$ )

此公式建立了手動操作角度與樣本壓縮深度之間的精確函數關係。

### (二) 力感測與數據同步

將改裝後之壓頭（物鏡部）對置於高精度電子秤上之樣本施壓。實驗過程中同步讀取量角器角度（位移來源）與電子秤數值（抗力  $F$ ），即可建構完整之應力-應變特徵曲線。

### (三) 力感測與載台模組

系統之底座採用解析度為 0.01 g 之電子秤作為力感測器，並於秤面放置載玻片以建立平整之受力基準面。

- **應力傳遞**：將包覆防水薄膜之物鏡作為壓頭，由上而下對置於電子秤上之樣本施壓。

- **數據同步**：實驗時手動同步紀錄量角器之角度值（位移）與電子秤之讀數（受力  $F$ ），進而建構應力-應變曲線。

## 七、 應力—應變測試之標準操作流程

為確保不同形狀與澱粉種類之樣本在相同物理基準下進行對比，本研究制定標準化力學測試流程，以最小化人為操作誤差：

### (一) 測試前校準與零點設定

- ① **系統水平檢核**：觀察粗調節輪轉軸上之鉛垂線，確保其與量角器  $90^\circ$  基準線完全重合，確認儀器處於垂直下壓狀態。
- ② **壓頭歸零**：將乾淨載玻片置於電子秤面並執行歸零，隨後緩慢轉動調節輪使物鏡壓頭接觸載玻片，確認電子秤讀數產生跳動之瞬間角度，作為位移之絕對零點。

### (二) 樣本置放與初始高度測量 ( $h_0$ )

- ① **幾何對心**：使用鑷子將樣本置於載玻片幾何中心，確保下壓受力點位於樣本正上方，避免產生側向滑移。
- ② **初始接觸點判定**：緩慢降低物鏡，直到電子秤讀數顯示為 0.05 g 至 0.10 g 之間，此時紀錄量角器角度  $\theta_0$ ，並定義此位置為樣本之原始高度  $h_0$ 。

### (三) 雙次壓縮測試程序 (Double Compression Test)

為模擬牙齒咀嚼過程並計算內聚性，每組樣本均執行兩次連續下壓循環：

- ① **第一次下壓 (Run 1)**：以恆定速率（每 2 秒旋轉  $5^\circ$ ）均勻轉動調節輪，每隔  $5^\circ$  紀錄一次電子秤讀數，在每一段壓縮後預留了穩定的時間，以確保記錄到的是準確的數據，直至達到預定之最大變形量或電子秤量程上限（約 500 g）。
- ② **卸載與恢復**：將壓頭旋回至  $h_0$  位置，靜置 5 秒。在兩次壓縮之間設定了固定的恢復間隔，以期觀察黏彈性材料的延遲回彈特徵。
- ③ **第二次下壓 (Run 2)**：重複 Run 1 之操作流程，獲取第二次受力數據，用以評估材料內部結構之受損程度與能量耗散。

### (四) 環境控制與設備維護

- ① **樣本一致性**：所有樣本自烹煮完成後，於  $25^\circ\text{C}$  室溫環境下靜置至少 10 分鐘，待表面冷凝水穩定後立即進行測試，以排除回凝（老化）速率不一之干擾。
- ② **殘渣清理**：每完成一組樣本測試，擦拭載玻片與物鏡保護膜，避免殘留之澱粉膠體產生多餘之黏附力，確保下一組數據之純淨。

## 八、量測與分析方法

### (一) 擴散速度影像分析法

利用影像追蹤技術量化樣本於靜止水域中之崩解速率。將樣本置於培養皿中心，以俯視錄影紀錄白色區域面積隨時間  $t$  之變化。採用「初始面積標準化」法計算擴散比  $A_t/A_0$ 。

### (二) 黏性與表面特性分析

將樣本自加熱環境取出後靜置 20 秒除去浮水。以樣本自重貼附於標準平面底部，紀錄其克服重力落下所需之時間（上限 180 秒），作為表面黏性之量化指標。

### (三) 應力-應變量測

本研究利用「微壓縮力學測試系統」（見圖 1），同步紀錄下壓角度與電子秤讀數，將數據轉換為應力與應變後繪製力學曲線。

## 九、資料處理與計算模型

本研究之原始觀測量（量角器角度  $\theta$ 、電子秤讀數  $F$ ）需透過物理模型轉換為力學指標。數據處理流程採用自編 R 語言腳本進行自動化分析。

### (一) 樣本製備品質之量化鑑定 (CV Analysis)

為確保力學測試之基準一致性，本研究引入變異係數 (Coefficient of Variation, CV) 作為樣本品質指標。CV 定義為標準差與平均值之比值：

$$CV = \left( \frac{SD}{\bar{h}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

其中  $\bar{h}$  為樣本之初始平均高度。

### (二) 位移與基礎物理量轉換

- 吸水率 (%)：量化烹煮過程中的質量變化。

$$\text{吸水率 (\%)} = \frac{W_{after} - W_{before}}{W_{before}} \times 100\% \quad (6)$$

- 垂直位移轉換：將量角器觀測之轉動角度  $\theta$  轉換為下壓深度  $\Delta h$ ：

$$\Delta h = k \cdot (\theta - \theta_0) \quad (k = 0.006 \text{ cm}/^\circ) \quad (7)$$

其中  $\theta_0$  為感測器偵測到樣本抗力之初始零點。

- **工程應變 (Engineering Strain,  $\epsilon_{eng}$ )**：描述樣本垂直方向的形變程度：

$$\epsilon_{eng} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (8)$$

其中  $\Delta h$  為下壓深度， $h_0$  為樣本初始高度。在圖表呈現時，應變以百分比 ( $\epsilon_{eng} \times 100\%$ ) 表示。

- **工程應力 (Engineering Stress,  $\sigma_{eng}$ )**：

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_{init}} \quad (9)$$

本研究之應力單位統一採用  $\text{g}/\text{cm}^2$  標註。

### (三) 加熱後樣本尺寸與受力面積之幾何修正模型

針對加熱糊化後之澱粉樣本，本研究採取「實測高度」結合「理論膨脹模型」之方式定義加熱後樣本幾何尺寸，其理由如下：

**1. 初始高度 ( $h_0$ ) 之精確度** 樣本之初始高度係利用微壓縮力學測試系統之零點判定程序達成。透過壓頭接觸樣本表面產生之微小抗力 (0.05 g) 定義起點，此法可避免傳統測微器手動接觸時產生的物理形變，確保垂直位移之基準精確。

**2. 橫向尺寸之量測限制**：澱粉顆粒糊化後，會在樣本表面形成一層具高度黏性且邊界模糊的凝膠狀物質。若使用卡尺或尺規進行橫向測量，將產生以下誤差：

- **物理形變**：量具之夾持力會壓迫軟物質，導致測得尺寸小於真實值。
- **邊界界定模糊**：凝膠狀外層與殘餘水分相互交織，導致樣本之實體邊界在目視下難以精確定義。

由於橫向尺寸測量存在上述限制，本研究之初始受力面積 ( $A_{init}$ ) 改採「體積與線性膨脹修正模型」推算。此法結合了吸水性實驗之精確質量變化，並假設樣本為各向同性膨脹 (Isotropic Swelling)，能比手動測量更真實地反映樣本內部結構的擴張情形。

**3. 初始受力面積 ( $A_{init}$ ) 之計算** 以烹煮後、受壓前之理論尺寸作為工程應力之基準面積  $A_{init}$ ：

- **線性膨脹係數推導**：假設樣本為各向同性膨脹，由重量變化推算線性尺寸增長倍率  $L_{ratio}$ ：

$$V_{ratio} = \frac{W_{after}}{W_{before}}, \quad L_{ratio} = \sqrt[3]{V_{ratio}} \quad (10)$$

- **立方體**：以理論邊長之平方計算： $A_{init} = (L_{initial} \cdot L_{ratio})^2$ 。
- **薄圓柱體**：以理論底面積計算： $A_{init} = \pi \cdot (R_{initial} \cdot L_{ratio})^2$ 。
- **球體**：為與其餘形狀進行力學基準對照，採用球體之最大赤道截面積作為初始受力面積： $A_{init} = \pi \cdot (R_{initial} \cdot L_{ratio})^2$ 。

#### (四) 大形變力學修正：真實應力與真實應變之計算

為修正大形變過程中的幾何誤差，本研究根據樣品在壓縮過程中的瞬時尺寸，將數據轉換為真實物理量：

- **真實應變 (True Strain,  $\epsilon_{true}$ )**：考慮變形過程的連續性，透過對變形過程的積分，本研究採用以下公式計算壓縮過程中的真實應變：

$$\epsilon_{true} = -\ln(1 - \epsilon_{eng}) \quad (11)$$

其中  $\epsilon_{eng}$  為工程應變。此公式能修正工程應變在大形變下對變形程度的低估。

- **真實應力 (True Stress,  $\sigma_{true}$ )**：基於澱粉凝膠之不可壓縮性假設（泊松比  $\nu \approx 0.5$ ），假設變形過程中體積守恆 ( $V = A_0 L_0 = A_{inst} L_{inst}$ )。修正公式如下：

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \times (1 - \epsilon_{eng}) \quad (12)$$

藉由上述修正，本研究計算出的能量指標均基於真實應力-應變曲線下面積，以確保物理意義之嚴謹性。

#### (五) 質地指標與曲線標準化

本研究利用雙次壓縮測試，量化 Q 度之多維度力學特徵，為確保統計嚴謹性，本研究先根據單一編號樣本計算各別指標，再行匯總統計：

- **線性插值標準化**：利用線性插值法將各樣本應變軸對齊至  $\Delta\epsilon = 0.5\%$  之等距網格，並強制曲線由原點 (0, 0) 起始。
- **相對硬度 (Relative Hardness)**：由於電子秤量程限制，本研究定義工程應變量（下壓百分比）達 30% 時之真實應力值作為相對硬度基準，確保所有樣本皆能在同一變形程度下進行橫向對比。（註：在食品質地分析 TPA 中，Hardness 指壓縮過程的抗力峰值，與材料力學中通常指表面抗刮/抗壓入之定義不同，本研究採食品科學通用定義。）
- **內聚性 (Cohesiveness)**：定義為兩次下壓曲線下面積（Area Under the Curve, AUC）之比值，用來量化結構完整性：

$$\text{Cohesiveness} = \frac{AUC_2}{AUC_1} \quad (13)$$

- **彈性回復率 (Springiness)**：定義為第二次下壓抗力起點之高度恢復百分比，用來量化樣本高度之恢復能力：

$$\text{Springiness} = 1 - \frac{\delta_{contact}}{h_0} \quad (14)$$

其中  $\delta_{contact}$  為第二次下壓抗力起點之高度， $h_0$  為樣本初始高度。

- **Q 度 (Chewiness)**：結合硬度、內聚性與彈性回復率綜合指標，用來量化樣本咬

感：

$$\text{Chewiness} = \text{相對硬度} \times \text{內聚性} \times \text{彈性回復率} \quad (15)$$

## 伍、結果與討論

本研究結果顯示，不同澱粉種類、製程方式與幾何形狀，會同時影響樣品的吸水行為與壓縮力學表現，以下透過「材料物理」與「軟物質力學」維度進行深度解析。

### 一、顯微顆粒形態與結構失效分析：馬鈴薯粉之物理限制

在微觀鑑定中，本研究不僅觀察形態，更進一步對馬鈴薯澱粉進行「結構失效分析」，解釋其不適合作為成型原料的物理基礎。

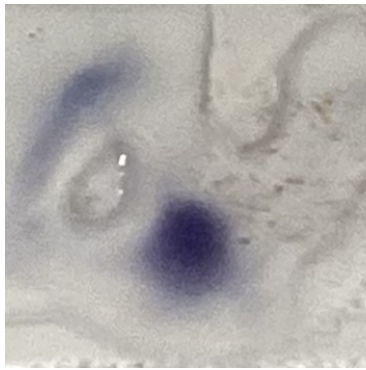
#### (一) 碘液顯色鑑定

實驗結果顯示，地瓜粉、樹薯粉與馬鈴薯粉在滴入碘液後均呈現深藍紫色（圖 2a, b, c），且顏色無顯著目視差異。此現象指出本研究所採用之三種澱粉原料均屬於直鏈澱粉與支鏈澱粉混合物，具備典型的澱粉呈色特性。

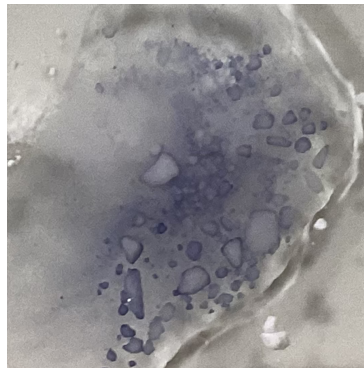
#### (二) 顯微顆粒特徵與電荷斥力

透過顯微鏡觀察，三者顆粒特徵上存在顯著差異（圖 2d, e, f），馬鈴薯澱粉顆粒巨大（ $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ），遠大於地瓜與樹薯粉。前人研究多僅關注糊化溫度，本研究則指出：巨大的顆粒尺寸結合其天然帶電之磷酸酯基團（Phosphate monoesters），會產生強烈的分子間靜電斥力（Wang et al., 2017），使其在受熱時會產生爆發性的吸水，但也因結構單薄而易於破碎。相比之下，地瓜與樹薯粉的小顆粒結構有利於在「蒸製」過程中形成較為緻密的堆積，這解釋了其在後續測試中具備較高內聚性與 Q 度之結構來源。

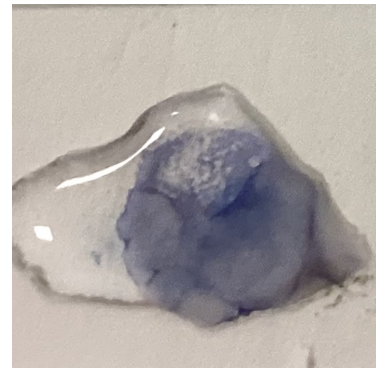
- **馬鈴薯澱粉（圖 2f）**：具備最大的平均粒徑（約  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ），顆粒呈明顯的橢圓或梨形。
- **地瓜（圖 2d）與樹薯澱粉（圖 2e）**：粒徑較馬鈴薯粉小且較為均勻，呈圓形或多邊形塊狀。其中樹薯澱粉顆粒更趨近於規則圓形。



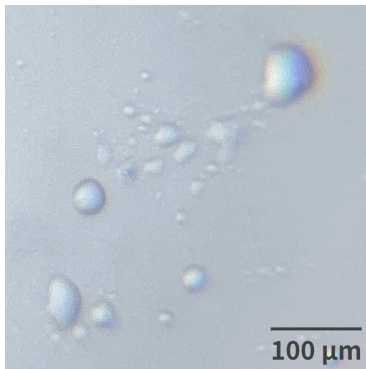
(a) 地瓜粉



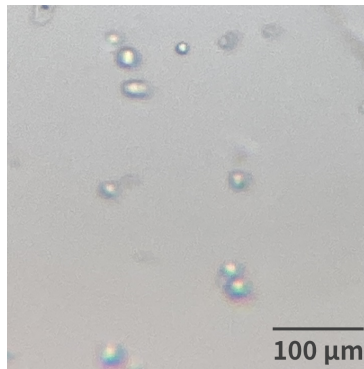
(b) 樹薯粉



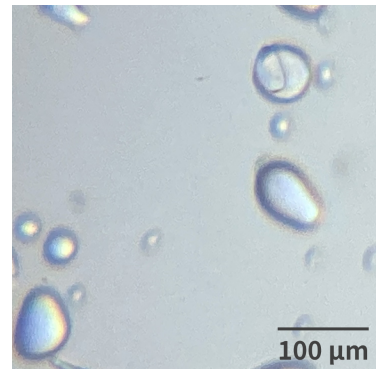
(c) 馬鈴薯粉



(d) 地瓜粉



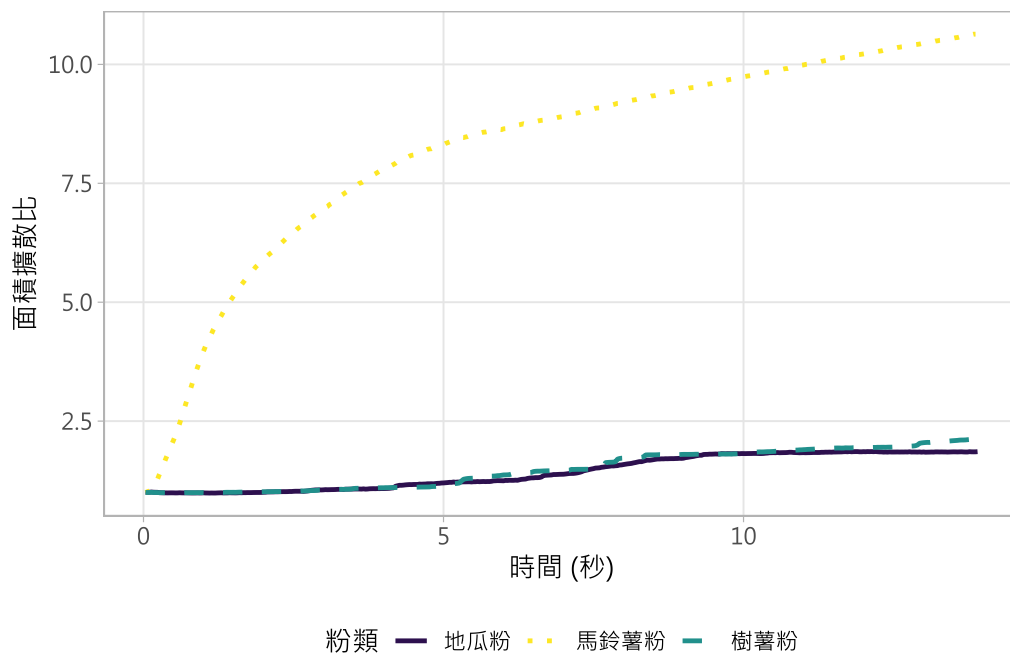
(e) 樹薯粉



(f) 馬鈴薯粉

**圖 2.** 澱粉原料鑑定。上列 (a)-(c) 為滴加碘液後之呈色反應；下列 (d)-(f) 為 400x 顯微鏡下之顆粒形態觀察。(本圖由作者拍攝)

## 二、 冷水擴散動態與結構穩定性分析



**圖 3.** 不同澱粉種類於冷水中之標準化面積擴散比 ( $A/A_0$ ) 隨時間變化趨勢。馬鈴薯粉展現極高之不穩定性，與樹薯、地瓜粉形成強烈對比。(本圖由作者繪製)

本研究透過影像分析技術量化澱粉團在未糊化狀態下的結構穩定性。實驗結果顯示，馬鈴薯粉（太白粉）在置入冷水後立即發生劇烈崩解，其標準化面積擴散比 ( $A/A_0$ ) 在 13 秒內即突破 10.0（如圖 3），顯示其顆粒間缺乏足夠的物理交聯力以維持幾何形狀。這種「結構失效」現象證實馬鈴薯澱粉在成型過程中存在先天物理限制，無法形成穩定的三維網路以支撐力學測試，這解釋了為何傳統粉圓鮮少以馬鈴薯粉作為主體結構。

相較之下，樹薯粉在觀測期間內的擴散比始終維持於  $1.00 \pm 0.01$  之極穩定狀態。此現象驗證了馬鈴薯澱粉顆粒因較大的粒徑，且其含有帶負電的磷酸酯基團產生之靜電斥力，會削弱澱粉分子間的相互作用並增強其結合水的能力 (Wang et al., 2017)。這種內在結構特性使其在未受熱前即對溶劑極為敏感，導致其在冷水中呈現極高的不穩定性與擴散性。

由於馬鈴薯粉無法在室溫下維持穩定的操作性定義形狀（粉圓、粉角等），其結構完整性的缺失使其無法進行應力-應變的測試。因此，本研究後續之質地剖面分析僅針對具備冷水穩定性的樹薯粉與地瓜粉進行對比。

### 三、 樣本製備一致性分析

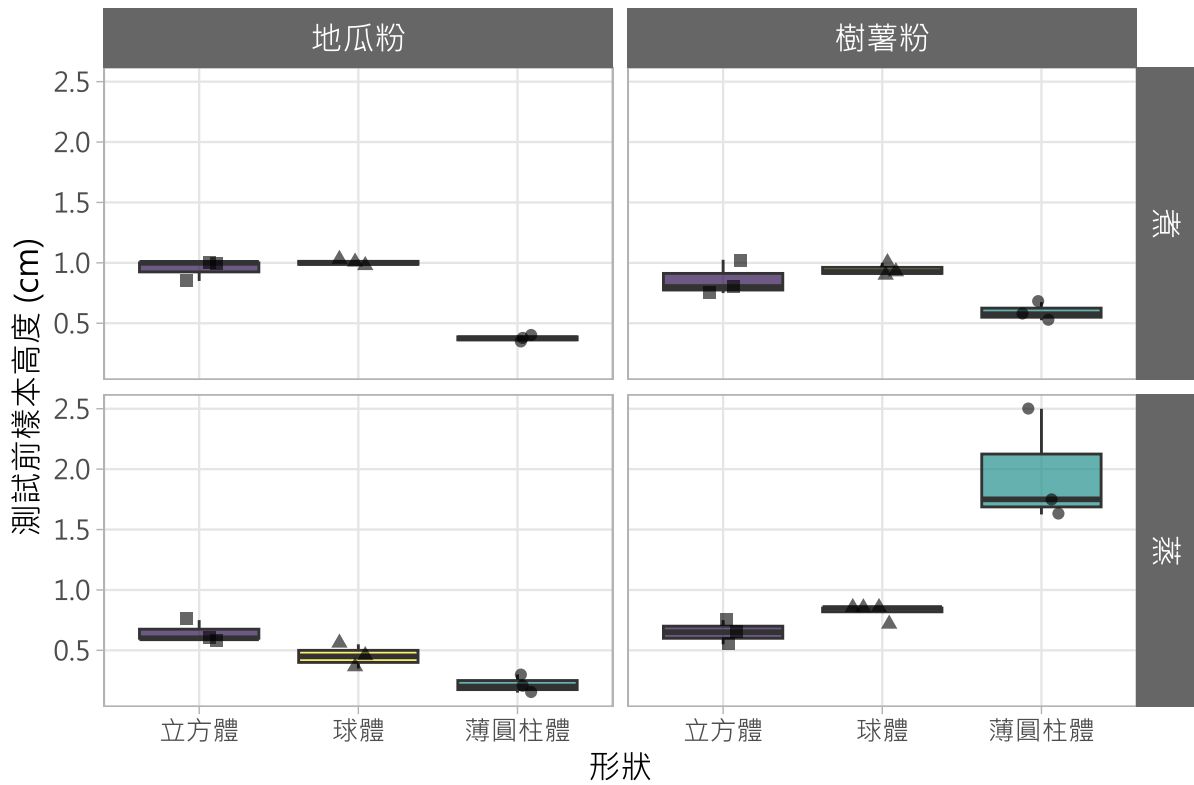


圖 4. 樣本製作一致性分析：各組樣本測試前原始高度 ( $h_0$ ) 之分布。標記點代表平均值，誤差條代表標準差。(本圖由作者繪製)

表 2. 各組樣本初始幾何規格與變異係數 (CV) 完整摘要表

澱粉種類	加熱方式	形狀	平均高度 $\bar{h}$ (cm)	標準差 (SD)	CV (%)
地瓜粉	煮	立方體	0.950	0.087	9.12
地瓜粉	煮	薄圓柱體	0.375	0.025	6.67
地瓜粉	煮	球體	1.000	0.025	2.50
地瓜粉	蒸	立方體	0.650	0.087	13.32
地瓜粉	蒸	薄圓柱體	0.217	0.076	35.25
地瓜粉	蒸	球體	0.450	0.100	22.22
樹薯粉	煮	立方體	0.858	0.146	17.07
樹薯粉	煮	薄圓柱體	0.592	0.076	12.91
樹薯粉	煮	球體	0.942	0.052	5.53
樹薯粉	蒸	立方體	0.650	0.100	15.38
樹薯粉	蒸	薄圓柱體	1.958	0.473	24.17
樹薯粉	蒸	球體	0.819	0.062	7.63

註 1：CV < 10% 代表具備優異之手工製備一致性；CV > 15% 通常反映材料受熱膨脹不均。

為確保力學測試中位移轉換為應變之基準一致性，本研究針對各組別之初始高度 ( $h_0$ ) 進行測定。觀察圖 4 與表 2，結果顯示手工製備程序在大多數組別中均展現了極佳的一致性。

### (一) 手工成型之精密性鑑定

在「沸煮」處理組中，各組樣本之變異係數 (CV) 普遍維持在 10% 以下。特別是地瓜粉粉圓組之 CV 僅為 2.50%，證實本研究使用的標準化手工成型流程具備極高的再現性。此數據排除了因樣本初始尺寸差異（如長寬比不一）所導致的應力估算誤差。

### (二) 異常變異之物理意義

相較於沸煮組，蒸製組（特別是脆圓）展現了較高的 CV 值（最高達 35.25%）。這反映了該幾何形狀在「限制性水合」環境下發生了強烈的垂直扭曲或局部膨脹。

## 四、 吸水性與加熱處理環境分析

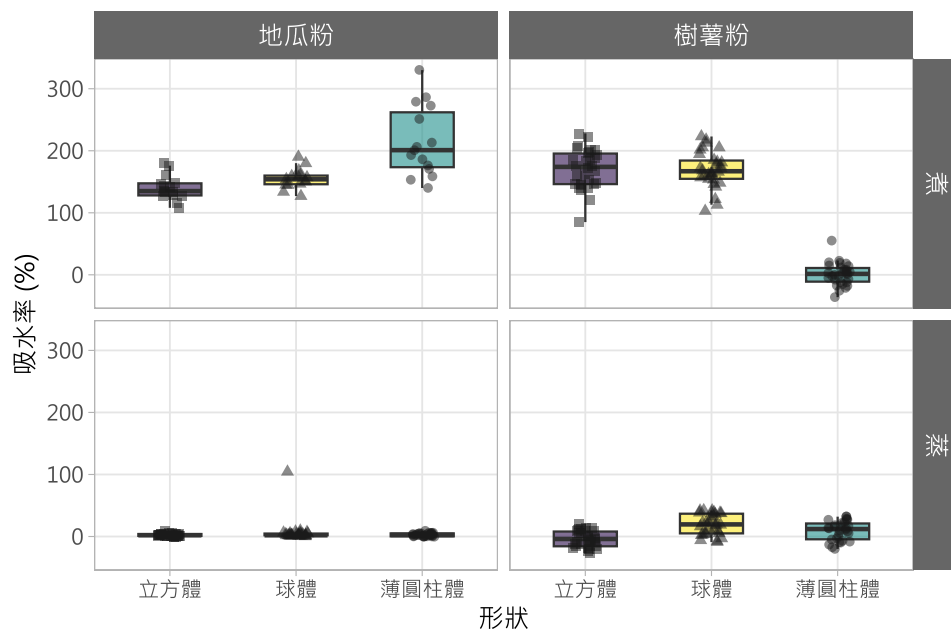


圖 5. 不同澱粉種類於不同形狀及加熱方式下之吸水率百分比。(本圖由作者繪製)

實驗結果顯示，「煮（沸煮）」組別之吸水率（約 140% 至 214%）顯著高於「蒸（蒸製）」組別（2% 至 20%），此趨勢與加熱處理中「溶劑過量（Excess-water system）」與「水分限制（Limited-water system）」之理論預測一致 (Delcour et al., 2010)。在沸煮環境下，液態水透過毛細作用與分子擴散大量進入澱粉基質，導致顆粒發生劇烈膨潤。

在形狀效應方面，地瓜粉之薄圓柱體在沸煮下展現了全組別最高之吸水率 ( $214.47 \pm 56.50\%$ )，這與其較高的比表面積有利於水分滲透有關。相對地，地瓜粉在蒸製條件下的吸水率極低（平均僅約 2% ~ 6%），顯示在缺乏流體水接觸的情況下，該澱粉結構保持了較高的緊密度。

地瓜粉組別展現出的極端吸水特性，可能源於其較高的直鏈澱粉含量在足夠水分下能形成具有高彈性與強度的凝膠網路 (Torres-Álvarez et al., 2025)。然而，實驗觀測到沸煮組別的數據標準差較大（尤其是地瓜粉薄圓柱體），這反映了在高吸水狀態下，樣本顆粒因過度膨潤導致結構不穩定，容易發生部分崩解或表面水分黏附，這種物理性質的變異性也預示了後續質地剖面分析中結構潰散的來源。

## 五、 表面黏性分析：加熱環境與澱粉溶出之影響

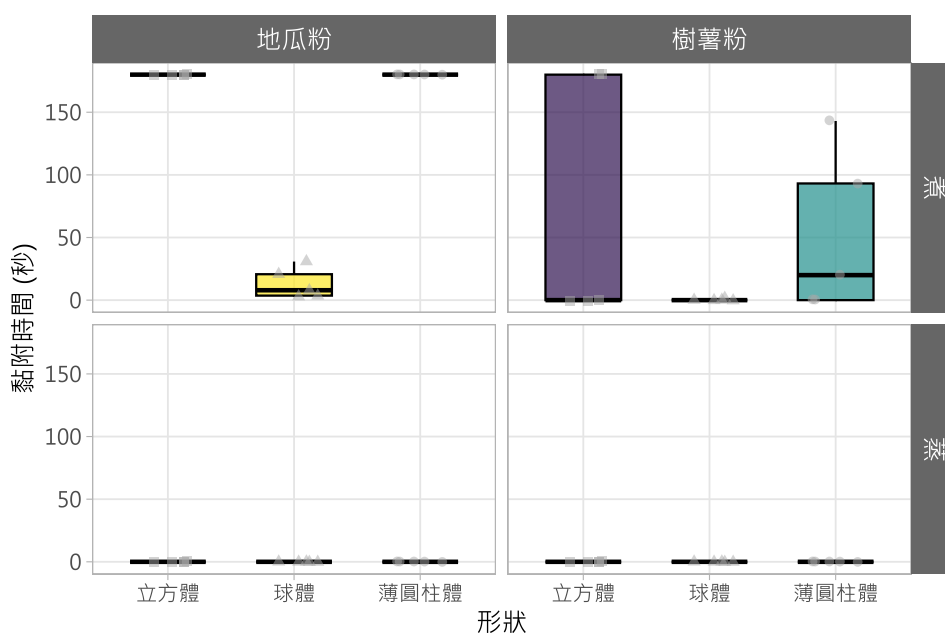


圖 6. 不同澱粉製品之表面黏性分佈圖。y 軸代表樣本克服重力脫離平面所需之時間，上限設定為 180 s。(本圖由作者繪製)

本研究透過樣本自重附著法量化其表面黏性。實驗結果顯示，加熱環境對澱粉表面的物理特性具有決定性的影響。

### (一) 加熱處理過程之決定性作用

觀察圖 6 可發現，「煮（沸煮）」組別之黏附時間普遍遠高於「蒸（蒸製）」組別。在蒸製環境下，所有樣本之黏附時間均趨近於 0s；而在沸煮環境下，地瓜粉之立方體與薄圓柱體組別則達到了測量上限之 180s。此現象可由「澱粉溶出」理論解釋：沸煮時的過量水分導致樣本表層澱粉顆粒過度膨潤並破碎，使得直鏈澱粉與支鏈澱粉分子大量溶出至表面形成一層高度黏稠的膠質層；反之，蒸製之「限制性水合」有效抑制了表面分子的擴散，維持了乾爽的表面狀態。

### (二) 澱粉種類與幾何效應之交互影響

在相同之沸煮條件下，地瓜粉展現了較樹薯粉更為強烈的表面黏滯性：

- **地瓜粉的高黏度特徵：**地瓜粉之立方體與薄圓柱體在多次重複實驗中均呈現 180s 之滿格黏附。這可能源於地瓜粉較高的直鏈澱粉含量在長時間高溫下，與表面殘餘水分形成了更具穩定性的黏彈性薄膜。
- **樹薯粉之結構內聚力：**樹薯粉球體之黏附時間中位數落在 50 ~ 100s 區間，相較於地瓜粉較短。這反映了樹薯澱粉凝膠具有較強的內部內聚力，分子傾向於留在基質內部而非擴散至表面。
- **幾何形狀之貢獻：**立方體與薄圓柱體因具備較大的比表面積，在沸煮過程中提供了更多分子溶出的過程，故其表面黏性顯著高於球體。

綜合上述結果，表面黏性之差異解釋了為何傳統「煮」的粉圓需要過冷水或加糖水潤滑，以避免發生大規模的相互結塊現象，而「蒸」的製程則能有效降低此物理風險。

## 六、 膨脹各向異性 (Anisotropy) 與幾何形狀對口感之調控

本研究在高度變化測試中發現了顯著的「各向異性膨脹」現象，這是前人僅研究體積膨脹倍數時所忽略的物理細節。

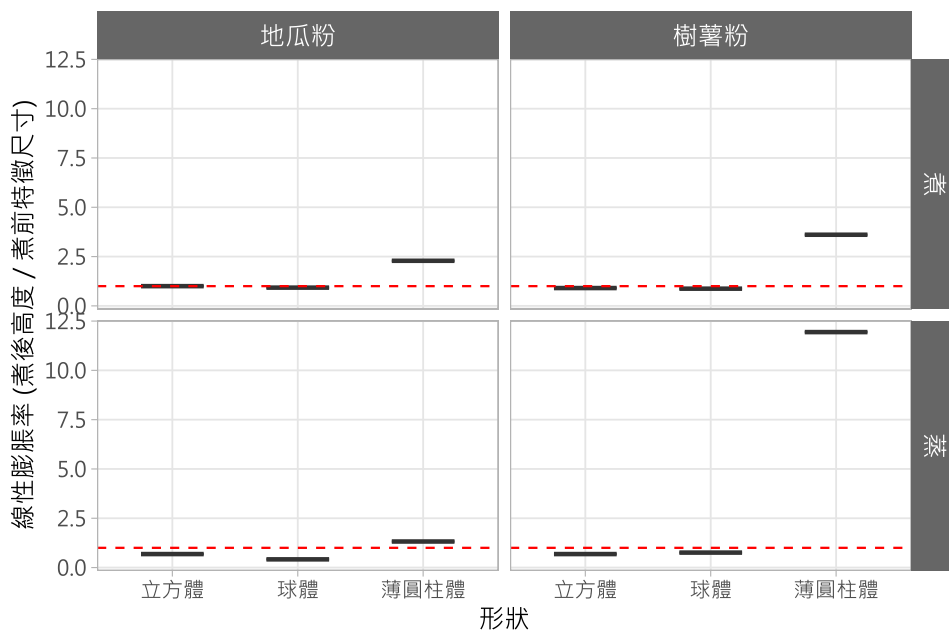


圖 7. 不同幾何形狀之垂直線性膨脹率對照。Ratio = 1.0 為原始高度基準。觀察可見球體、立方體與薄圓柱體呈現截然不同的膨脹率。(本圖由作者繪製)

### (一) 形狀決定性膨脹

本研究對比加熱處理後之垂直線性膨脹率，發現了顯著的「形狀決定性膨脹」現象：

1. **立方體與球體：各向異性膨脹** 立方體與球體之垂直膨脹率普遍落在 0.7 ~ 1.0 區間，儘管其吸水質量增加逾一倍，高度卻未顯著增長。這證實了澱粉凝膠在糊化過程

中，因重力與分子鏈鬆弛影響，物理特徵傾向於往水平（徑向）擴散。這增加了咀嚼時的有效截面積，提供了口感上的厚實感。水平擴張導致單位應變下的總回饋力增加，提供了感官上更為「厚實」且具「剪切阻力」的嚼感，解釋了為何方型粉角在口中感受比同質量的圓形粉圓更具飽足感。

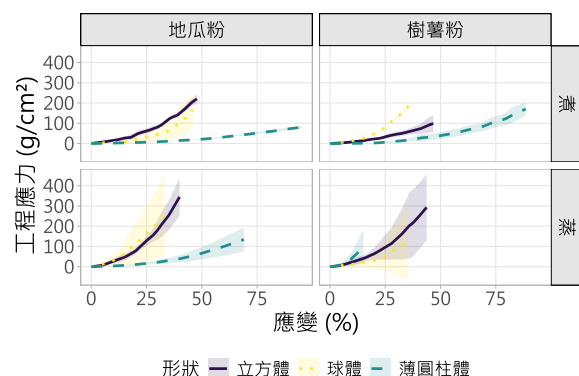
**2. 薄圓柱體：垂直應力釋放** 相較之下，原本最扁平的「薄圓柱體」展現了驚人的垂直膨脹，其高度膨脹率介於 2.2 ~ 11.9 倍（見圖 7）。本研究提出以下解釋：薄圓柱體在成型時係經由載玻片強行壓平，內部積累了顯著的垂直預應力。在加熱糊化時，凝膠網路軟化並伴隨大量水合，導致原本被壓縮的分子結構發生垂直回彈。此現象使薄圓柱體從扁平片狀轉化為具備高度彈性緩衝空間的結構，這也是其在力學測試中展現極佳延展性的根本原因。

## (二) 膨脹特性對真實應力之影響

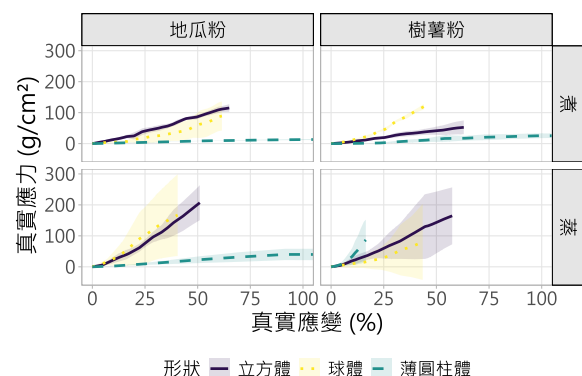
此幾何演變驗證了本研究採用「真實應力修正」的必要性。對於立方體而言，面積擴張導致應力稀釋；而對於薄圓柱體而言，急遽的高度增加則大幅改變了應變的計算基準。這說明了澱粉食品的 Q 度不僅取決於澱粉種類，更受到加工成型引發的預應力與幾何形狀導向的膨脹過程之共同調控。

## 七、 應力-應變曲線與力學分析

本研究透過自組量測系統取得不同澱粉製品之壓縮曲線。為確保數據在物理意義上的一致性，分析過程中將原始數據由「工程物理量」轉換為「真實物理量」，即引入真實應力修正以排除幾何擴張影響，並採用真實應變以描述連續形變過程。各組數據均以「真實應變」作為插值基準進行對齊，以確保橫向可比性，並繪製平均應力趨勢線與標準差陰影帶。



**圖 8.** 工程應力-應變曲線分析圖。實線代表平均應力，陰影區域為  $\pm$  SD。(本圖由作者繪製)



**圖 9.** 真實應力-真實應變曲線分析圖。同時修正截面積擴張與應變過程誤差，能更嚴謹地描述材料在大形變下的本質特徵。(本圖由作者繪製)

## (一) 真實物理量轉換與應變硬化現象

對比圖 8 與圖 9，可觀察到轉換後的曲線更貼近材料的本質力學行為。在工程應力視角下，未考慮樣本變扁導致截面積擴大的物理事實，使得大形變時的應力值會因幾何效應而被人為高估；同時，工程應變僅考慮初始長度，在大形變階段會低估材料內部的實際形變累積。

若大形變階段的應力上升僅是受面積增加所導致的幾何假象，則在排除面積變化的真實應力曲線中，斜率應趨於平緩甚至飽和。然而本研究基於體積不變假設，透過真實應力  $\sigma_{true} = \sigma_{eng} \times (1 - e_{eng})$  與真實應變  $\epsilon_{true} = -\ln(1 - e_{eng})$  進行轉換後，發現曲線依然呈現顯著的上升趨勢。這可以明確剔除純幾何變形因素的干擾，明確證實了澱粉凝膠具備材料本質上的「應變硬化」(Strain Hardening) 行為。

在微觀機制上，隨壓縮深度增加，凝膠內部水分受擠壓重分佈，支鏈澱粉纏結網路在空間上更趨緻密，分子間作用力因距離縮短而強化。此特徵正是粉圓在「深咬」過程中，口感能從初始的柔軟轉向韌性與回彈感的物理來源。

## (二) 初始接觸幾何與感官反饋

觀察真實應力-應變曲線的初始斜率（楊氏模數），可發現初始幾何形狀對初次咬感的決定性影響：

- **球體之彈牙感**：球體因初始為「點接觸」，受力面積趨近於零，局部應力隨應變增加迅速攀升。此特徵對應感官上的「彈牙感」，即齒尖接觸瞬間即感受到強烈的回饋力。
- **薄圓柱體之柔韌性**：薄圓柱體初始即為「面接觸」，壓力分佈較均勻，初期應力上升趨緩，呈現較為平穩且柔韌的咬感。

## (三) 應變能密度與咀嚼感：韌性之物理基礎

「真實應力-真實應變」曲線下方的面積定義為「應變能密度」(Strain Energy Density,  $J/m^3$ )，代表材料在斷裂前單位體積能吸收的能量：

- **應變過程與韌性累積**：薄圓柱體雖初始剛性較低，但在真實應變軸上展現了極佳的延展性。根據數據顯示，部分樣本在真實應變超過 100%（對應工程應變約 63.2% 以上）時仍能保持結構完整性而不發生脆裂。
- **Q 的力學來源**：由於真實應變考慮了連續過程，累積的應變能密度能更精確地反映感官上的「嚼勁」。高能耗材料意味著牙齒在切割樣本的過程中，必須持續克服材料內部的分子纏結阻力，這正是「Q」感的力學本質。

## 八、 相對硬度分析：工程應變 30% 下之真實應力對比

### (一) 加熱過程：限制性水合之結構強化

數據顯示，「蒸製」過程對結構強度的提升具備決定性影響。以地瓜粉球體組別為例，蒸製組之相對硬度達  $149.74 \pm 119.18 \text{ g/cm}^2$ ，顯著高於沸煮組之  $30.56 \pm 22.52 \text{ g/cm}^2$ 。

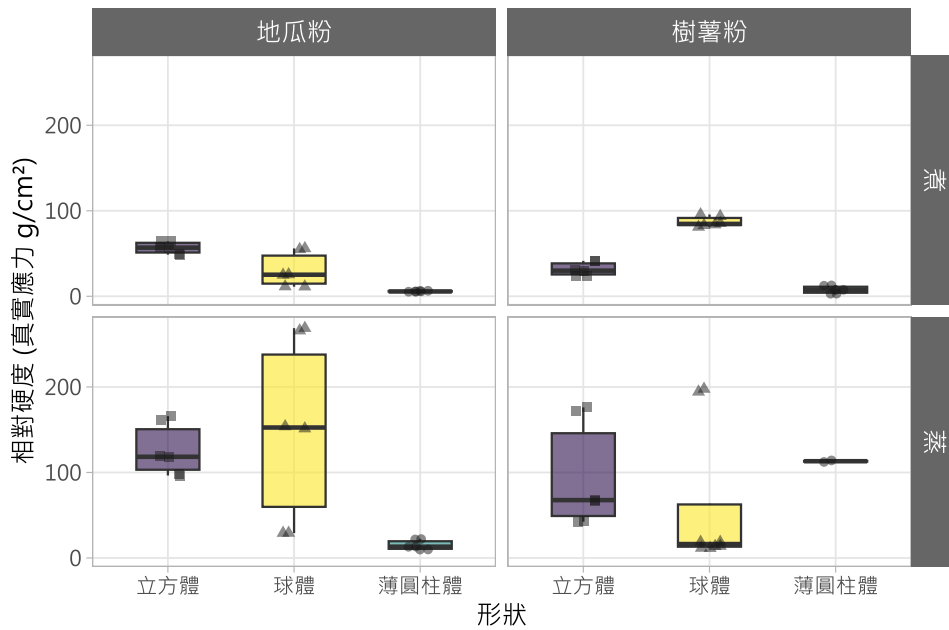


圖 10. 不同澱粉製品之相對硬度比較圖。標註數值為樣本於下壓深度 30% 時之真實應力值 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )。採用真實應力修正可排除樣本因受壓變扁導致截面積擴張產生的幾何支撐誤差。(本圖由作者繪製)

此結果證實蒸製過程處於「限制性水合」環境，能抑制澱粉顆粒在加熱過程中的過度溶出，保留了較高的顆粒接觸密度與內部膠結強度；反之，沸煮組因吸水過量導致基質大幅軟化。

相較於前人研究專注於「水浴煮法」的參數優化，本研究發現「蒸製」製程能保留樣本極高的「初始剛性」與結構完整性。這是因為限制水分能避免澱粉網路因過度膨潤而發生「應力稀釋」(Stress dilution)，使凝膠維持緻密的顆粒堆積。

## (二) 澱粉種類與回凝作用之貢獻

分析不同粉類之表現，可觀察到顯著的組成差異：

- **地瓜粉之回凝強度**：地瓜粉製品在蒸製條件下展現了最強的結構支撐力。這歸因於地瓜粉較高的直鏈澱粉比例，在限制水分加熱後迅速發生「回凝作用」(Retrogradation)，形成了密集的分分子纏結網路。
- **樹薯粉之穩定特徵**：樹薯粉製品雖相對硬度稍低(如樹薯粉立方體蒸製組為  $94.66 \pm 38.03 \text{ g}/\text{cm}^2$ )，但其在不同製程間的波動(標準差)相對較小，顯示其支鏈澱粉纏結網路能提供較為穩定的彈性支撐，受加熱條件變化的敏感度較低。
- **幾何因素與材料本質的拆解**：透過真實應力分析，本研究得以將「幾何因素」與「材料本質」進行拆解。實驗發現，若僅使用工程應力，部分高應變樣本會因截面積擴張而產生「假性硬度」；而在扣除幾何變形因素後，地瓜粉的高硬度確實源於其材料本質的剛性，而樹薯粉則展現出更佳的力學穩定性。此量化分析驗證了加熱方法與澱粉種類是調控澱粉食品「Q 彈」質感的關鍵因素。

## 九、 質地剖面分析 (TPA)：內聚性與彈性回復率

本研究利用雙次壓縮測試，量化樣本在經歷初始形變後的結構修復能力。為排除大形變下的幾何誤差，所有質地剖面分析指標均基於真實應力與真實應變曲線計算。圖 11 對比了同一樣本在兩次連續壓縮過程的應力-應變曲線，此為評估材料內部網路完整性之基準。

本研究利用自組系統建立的「真實應力-真實應變」模型，這能為前人觀察到的「內聚性」提供底層物理學解釋。

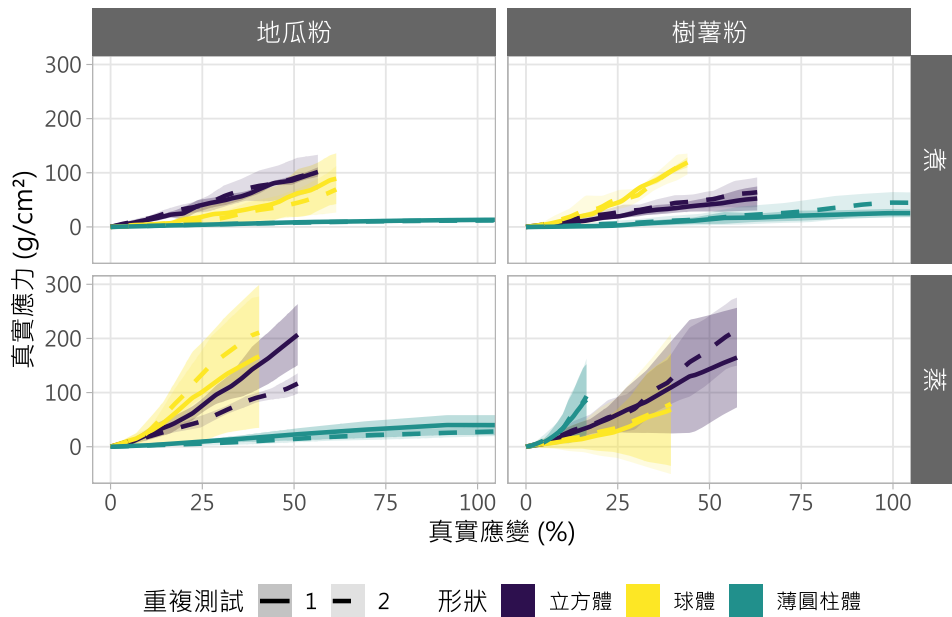


圖 11. 內聚性分析受力對照圖。實線為第一次下壓 (Run 1)，虛線為第二次下壓 (Run 2)。X 軸採用真實應變，Y 軸為真實應力。虛線在相同應變下高於實線之現象，即為材料發生應變硬化之證據。(本圖由作者繪製)

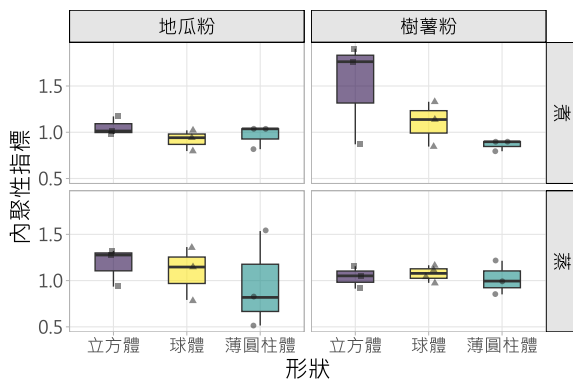


圖 12. 內聚性 (Cohesiveness) 指標，反映材料微觀結構之抗損毀能力。(本圖由作者繪製)

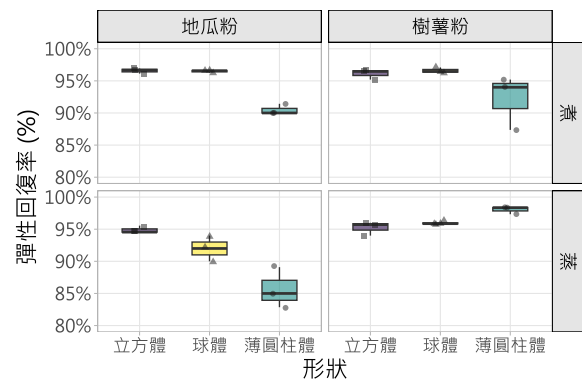


圖 13. 彈性回復率 (Springiness) 指標。反映樣本在移除外力後之高度恢復能力。(本圖由作者繪製)

## (一) 內聚性與應變硬化效應

根據真實應力-應變曲線下面積所得之內聚性指標（圖 12），多數澱粉製品展現了極強的結構韌性。數據顯示，樹薯粉製品在多數條件下內聚性均接近或大於 1.0（如樹薯粉立方體沸煮組達  $1.51 \pm 0.56$ ），這意味著材料在經歷初次壓縮後，結構不僅未受損，反而因「應變硬化」機制而變得更加強韌。

透過真實應力修正（圖 9），本研究證實樹薯粉凝膠在壓縮過程中，應力上升速率隨應變增加而加快。這是因為壓縮過程擠出了凝膠間隙的自由水，迫使支鏈澱粉網絡在空間上更趨緻密，分子間作用力因距離縮短而強化。

由於樹薯粉具備優異的支鏈網路穩定性，其結構在初次受壓時能有效吸收能量而不斷裂，隨後的密度提升反而增強了對第二次壓縮的抗力。相較之下，地瓜粉在「蒸製」條件下的薄圓柱體內聚性約為  $0.96 \pm 0.52$ ，顯示其回凝後的結晶結構脆性較高，在初次大形變中易產生微觀損傷，導致部分結構完整性喪失。

## (二) 對前人「內聚性」觀察的解釋

前人研究（戴翊喬等（2025））發現內聚性是 Q 度的關鍵，但未解釋其成因。本研究指出：樹薯粉之所以具備高內聚性，物理本質源於其優異的「應變硬化」特徵。當材料經歷第一次壓縮後，結構非但未損毀，反而因被壓實而變得更加強韌，進而增強了對第二次咀嚼的抗力。這種「越咬越韌」的力學表現，正是高品質 Q 度口感的物理真相。

## (三) 彈性回復率與彈牙感之關聯

彈性回復率（圖 13）提供了位移維度的資訊。實驗結果顯示，樹薯粉製品展現出極佳的高度恢復力，例如其薄圓柱體蒸製組之回復率高達  $98.0 \pm 0.6\%$ 。這種極高的位移恢復能力，在感官上構成了「彈牙感」的物理基礎，確保牙齒在連續咀嚼時能獲得即時且穩定的反饋阻力。

反之，地瓜粉薄圓柱體在蒸製條件下的回復率僅約  $85.6 \pm 3.2\%$ ，為全實驗組別最低值。這代表該組樣本在大形變後產生了顯著的永久性塑性形變，無法恢復原始形狀，反映在口感上即為缺乏活性的「死硬」感。

綜合能量維度（內聚性）與位移維度（回復率）之表現，樹薯粉製品展現了高品質澱粉食品「既耐咀嚼（高結構抗性）又具回彈力（高恢復率）」的力學特徵，這亦是其在綜合評比中具備較高「Q 度」的關鍵因素。

## (四) Q 度（咀嚼性）之量化定義

「Q 度」的物理意義為材料在被牙齒粉碎至可吞嚥狀態前，所能抵抗變形、維持結構與提供動態回彈的總和能力。

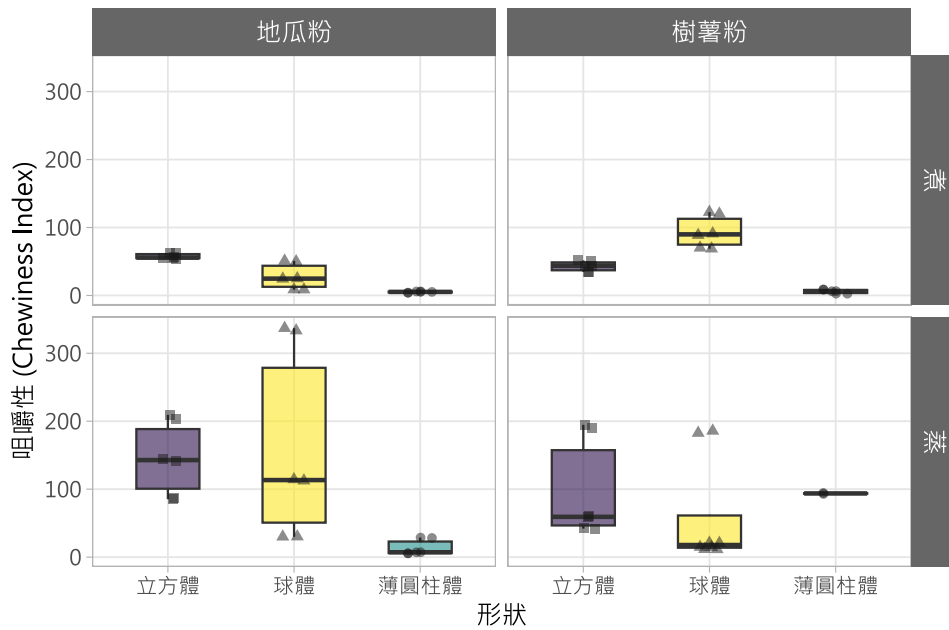


圖 14. 綜合 Q 度 (咀嚼性) 分析圖。結合真實硬度、結構完整性與回彈力之綜合指標，反映了材料在大形變咀嚼過程中的總能耗特徵。(本圖由作者繪製)

### (五) 硬度與 Q 度之分析：為何「硬」不等於「Q」

觀察圖 14，本研究驗證了單純的「高硬度」並不同於高品質的「Q 度」。以地瓜粉「蒸製」組別 (如球體) 為例，其相對硬度雖然高達  $149.68 \pm 106.55 \text{ g/cm}^2$ ，位居全實驗組之冠，但其 Q 度表現卻呈現極大的不穩定性 ( $159.55 \pm 141.04$ )。

在物理本質上，地瓜粉蒸製組別雖然具備極高的初始抗力，但其極大的標準差顯示其內部澱粉網路在「限制性水合」環境下發展不均勻，導致口感呈現不穩定的「死硬」感。相較之下，樹薯粉製品 (如立方體沸煮組) 雖初始硬度較低 ( $31.80 \pm 9.48 \text{ g/cm}^2$ )，但憑藉著極高且穩定的內聚性 ( $1.51 \pm 0.56$ ) 與優異的彈性回復，使其在咀嚼過程中能提供更長效且穩定的阻力感。

此結果從力學角度解釋了為何市售粉圓多選用樹薯澱粉：因其在修正幾何誤差後，仍能同時兼顧足夠的受力強度與極佳的結構回彈特性，且在不同製程條件下均能保有較高的口感一致性。

## 十、幾何效應與力學特性之討論

結合比表面積 (表 1)、吸水性數據 (圖 5) 與應力-應變曲線 (圖 9)，本研究發現幾何形狀與力學行為間存在相關性：

### (一) 從高比表面積到基質軟化

薄圓柱體之  $SA : V$  達  $14.70 \text{ cm}^{-1}$ ，為球體的 2.6 倍。此極高的幾何優勢使其在沸煮過程中吸水率高達 214.5% (圖 5)。極致的吸水導致澱粉網路過度膨潤，反映在力學曲線上 (圖 9)，其初始剛性最低，且真實應力修正後的「應變硬化」斜率較為平緩。

## (二) 初始接觸面積與口感反饋

幾何形狀不僅影響吸水，更決定了初次咬感之應力分布：

- **低 SA:V 與應力集中**：球體雖吸水較慢，但其球體結構在壓縮初期為「點接觸」，導致有效受力面積極小，應力瞬間升高。這解釋了其高楊氏模數與「回彈感」的物理來源。
- **真實應力之修正意義**：在壓縮後半段，立方體結構之各向同性膨脹，維持了較穩定的受力截面積。透過真實應力修正，可觀察到其內部分子鏈被壓實產生的硬化效應，這與口感上立方體的粉角較為紮實且具備剪切阻力的特徵吻合。

## (三) 角點效應與澱粉特性的交互作用：非均勻擴張之雙向表現

在多面體幾何中，角點（Corners）是質量傳遞最為活躍的區域。本研究透過比較立方體（粉角）與球體（粉圓）在相同加熱條件下的表現，觀察到幾何特徵與澱粉種類間存在顯著的交互作用：

- **擴散過程與非均勻膨潤**：根據擴散理論，立方體角點處受水分從三個正交維度同時滲透，其局部水合速率理論上高於平滑球面。此幾何特徵可能導致樣本內部形成不同的「硬度梯度」。
- **地瓜粉之幾何支撐現象**：數據顯示，在沸煮條件下，地瓜粉立方體之相對硬度 ( $56.72 \text{ g/cm}^2$ ) 顯著高於球體 ( $30.65 \text{ g/cm}^2$ )。
  - **推測機制**：地瓜粉製品在加熱過程中，角點處的高速水合可能率先引發表面糊化。若此糊化層限制了水分進一步向核心遷移，則會保留較大比例未充分溶脹的核心區域。
  - **力學特徵**：這種「外軟內硬」的結構分佈，在巨觀壓縮測試中表現為較強的抗變形能力。
- **樹薯粉之幾何弱化現象**：反之，樹薯粉立方體之硬度 ( $31.80 \text{ g/cm}^2$ ) 遠低於球體 ( $87.13 \text{ g/cm}^2$ )。
  - **推測機制**：此趨勢可能反映了樹薯澱粉具備較高的膨潤力與較快的水合反應速率。角點提供的多維過程在樹薯粉中反而促進了全域的均質水合。
  - **力學特徵**：相較於球體受到徑向擴散過程較長的限制，立方體因角點效應加速了整體的結構軟化，導致其在相同時間內的硬度下降更為顯著。
- **小結**：實驗結果顯示，幾何形狀對口感的調控並非單一趨勢。地瓜粉傾向於透過角點限制效應保留核心強度，而樹薯粉則傾向於透過角點效應達成快速軟化。此差異驗證了澱粉種類是影響最終產品力學特徵的關鍵。

## 十一、 研究問題之整合討論

綜合前述結果，本研究原先欲探討之問題：相似配方的澱粉製品為何在不同粉類、製程與形狀條件下呈現明顯口感差異，可獲得明確回應。研究顯示，澱粉分子結構決

定膠體網路的穩定性，製程方式影響水分進入與結構形成程度，而幾何形狀則透過比表面積調控整體受力與破壞行為。因此，所謂「Q 度」並非主觀感受，而是由材料性質、加工條件與幾何限制共同決定之可量化物理結果，不同澱粉製品的口感差異，來自水分擴散受幾何限制後，所形成的結構穩定度差異。

## 陸、結論

本研究透過影像分析技術與自組微壓縮力學測試系統，量化探討了澱粉種類、幾何形狀與加熱處理環境對澱粉凝膠物理特徵的影響。綜合實驗數據與理論模型分析，本研究歸納核心結論如下：

### 一、 馬鈴薯粉之結構失效結論

本研究透過影像分析證實馬鈴薯粉因「顆粒巨大」與「靜電斥力」之雙重因素，存在冷水擴散失效的物理缺陷，從而界定了其在成型加工上的應用界限，補足了前人對澱粉原料限制探討之不足。

### 二、 Q 度的量化定義與科學鑑定

本研究將臺灣傳統感官術語「Q 度」轉化為具備力學定義的「咀嚼性指標 (Chewiness Index)」。實驗證實：

- **Q 度的物理本質**：Q 度並非單一的力學數值，而是由「相對硬度」、「內聚性 (Cohesiveness)」與「彈性回復率 (Springiness)」三者共同影響。
- **「硬」不等於「Q」之實證**：數據顯示地瓜粉雖具備最高之相對硬度，但因其彈性回復率與內聚性較低，最終 Q 度評分顯著低於樹薯粉。此發現區別了「死硬」與「彈牙」在力學上的差異。

### 三、 加熱處理環境對質地之決定性影響

實驗證實加熱過程是決定澱粉凝膠基礎質地的關鍵因素。「沸煮 (溶劑過量)」環境導致澱粉顆粒發生劇烈膨潤與氫鍵破壞，吸水率高達 140% ~ 214%，造成結構顯著軟化與表面高度黏附；而「蒸製 (限制性水合)」則能有效抑制表面分子溶出，保留較高的初始剛性與結構完整性。

### 四、 澱粉種類與分子結構之功能對照

- **樹薯澱粉**：展現出優異的黏彈性與內聚性，其回復率在多組實驗中均穩定維持於 1.0 以上，顯示支鏈澱粉網路在受壓後具備良好的加工硬化特徵，是提供 Q 彈口感的核心基材。
- **地瓜粉**：受直鏈澱粉回凝作用影響，冷卻後呈現較高的相對硬度，但其結構變異性較大，質地傾向於硬脆而非高彈。

- **馬鈴薯粉**：影像分析證實其在冷水中具有極高之擴散比（13 秒內  $A/A_0 > 10.0$ ），主因為其顆粒較大且帶有帶電之磷酸酯基團，導致結構穩定性不足，不適合作為需成型加工之澱粉食品原料。

## 五、 幾何工程與各向異性膨脹

研究揭示了澱粉凝膠在糊化過程中的膨脹各向異性現象：樣本在吸水時傾向於往水平（徑向）擴張，而非垂直向增長。此幾何演變增加了咀嚼時的有效截面積，為粉角等具稜角的幾何體，在感官上產生的厚實感與剪切阻力提供了物理力學證據。

## 六、 力學建模之學術價值

本研究成功建立基於真實應力修正的壓縮分析模型，區分了「幾何形狀改變」與「應變硬化」對受力表現的差異。透過對應力-應變曲線下方的能量吸收面積與初始斜率之量化，本研究將抽象的感官體驗轉化為具備再現性的物理參數，為臺灣傳統澱粉食品的配方優化與製程標準化提供了量化指標。

## 七、 研究限制與物理模型假設說明

本研究在建立力學量化模型時，為了處理澱粉凝膠大形變下的受力特徵，引入了真實應力修正。針對模型中的物理假設與實驗限制，特別說明如下：

- **體積守恆假設與泊松比**：在計算真實應力時，本模型假設澱粉凝膠樣本在壓縮過程中遵循體積守恆。此假設前提為材料之泊松比趨近於 0.5，即視為不可壓縮之軟物質。雖然實際澱粉凝膠內部的微小氣孔可能導致輕微的體積改變，但在本研究之應變範圍內，此假設能有效將「幾何形狀變扁導致的受力面積增加」與「材料本質的硬化行為」進行初步分離。
- **均勻變形與邊際效應**：真實應力模型假設樣本在壓縮過程中保持均勻的橫截面擴張。然而，在實際測試中，由於壓頭與樣本表面的摩擦力，可能產生輕微的桶狀形變。本研究透過在壓頭表面保持適度濕潤以降低摩擦干擾，並將分析重點聚焦於應變 30% 以內的區間，以最小化非線性邊際效應對數據穩定性的影響。
- **各向異性膨脹對初始狀態之影響**：如前所述，樣本在加熱過程中存在膨脹各向異性，這可能導致不同形狀樣本內部的澱粉鏈密度分布不完全均勻。本力學模型將加熱處理後的樣本視為均質結構進行壓縮分析，然而，本研究關注的是不同樣本間力學行為之相對差異而非絕對材料常數，因此此一近似不影響比較結果之整體趨勢與研究結論。未來的研究可進一步結合數位影像相關技術，精確追蹤不同幾何部位在壓縮過程中的局部應變變化。

## 參考文獻

- Baek, Man-Hee, Dong-Su Cha, Hyun-Jin Park & Seung-Taik Lim (2000). Physicochemical properties of commercial sweet potato starches. In: *Korean Journal of Food Science and Technology*, 32. (4), 755–762.
- Delcour, Jan A, Charlotte Bruneel, Liesbeth J Derde, Sara V Gomand, Bram Pareyt, Joke A Putseys, Edith Wilderjans & Lieve Lamberts (2010). Fate of starch in food processing: from raw materials to final food products. In: *Annual review of food science and technology*, 1. (1), 87–111.
- He, Rui, Nai-Fang Fu, Hai-Ming Chen, Jian-Qiu Ye, Li-Zhen Chen, Yun-Feng Pu & Wei-Min Zhang (2020). Comparison of the structural characteristics and physicochemical properties of starches from sixteen cassava germplasms cultivated in China. In: *International Journal of Food Properties*, 23. (1), 693–707.
- Hongbo, Tang, Li Yanping, Ma Haoran & Sun Min (2020). EFFECT OF MIXING CASSAVA, POTATO AND SWEET POTATO STARCHES ON THE PROPERTIES OF THEIR BLENDS. In: *CELLULOSE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*, 54. (3-4), 265–273.
- Kim, Hyun-Joo, Koan Sik Woo, Hyeong-Un Lee, Sang Sik Nam, Byong Won Lee, Min Young Kim, Yu-Young Lee, Jin Young Lee, Mi Hyang Kim & Byoungkyu Lee (2020). Physicochemical characteristics of starch in sweet potato cultivars grown in Korea. In: *Preventive Nutrition and Food Science*, 25. (2), 212.
- Torres-Álvarez, Cynthia, Karla G García-Alanís, Carlos A Amaya-Guerra, Ethel D Cabello-Ruiz, Abelardo Chávez-Montes, Sandra L Castillo-Hernández & Minerva Bautista-Villarreal (2025). Effect of Sweet Potato Starch on Rheological Properties and Emulsion Stability of Salad Dressings. In: *Polysaccharides*, 6. (2), 51.
- Wang, Jiaxun, Shanshan Zhang, Nan Wang, Hongxiu Fan, Hanmiao Wang & Tingting Liu (2023). Tremella polysaccharide has potential to retard wheat starch gel system retrogradation and mechanism research. In: *Foods*, 12. (16), 3115.
- Wang, Wei, Wenting Chen, Hong Yang & Min Cui (2017). Textural and rheological properties of potato starch as affected by amino acids. In: *International Journal of Food Properties*, 20. (sup3), S3123–S3134.
- Zhu, Fan (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. In: *Carbohydrate polymers*, 122, 456–480.
- 戴翊喬、邱筠琦、黃若慈 (2025)。Q 不容緩！粉圓彈性模型之建立。中華民國第 65 屆中小學科學展覽會作品說明書 032906。臺南市立建興國民中學，臺南市。

## 附錄 A. 人工智慧輔助研究說明

本研究秉持科學誠信與學術嚴謹原則，於研究執行過程中部分諮詢人工智慧（AI）工具（如 Google Gemini）作為技術顧問與方法論引導。具體協作內容與驗證機制說明如下：

### A.1 文獻檢索與理論導讀

- **應用範圍：**利用 AI 輔助進行跨領域文獻之初步篩選與分類，協助釐清「溶劑過量（Water-excess）」與「水分限制（Water-limited）」系統在澱粉加工與糊化過程中的熱力學基礎差異。
- **驗證機制：**所有由 AI 彙整之學術觀點及引用線索，均由作者回溯檢核原始論文進行事實核對，確保學術引用之準確性，排除 AI 可能產生之虛假文獻風險。

### A.2 R 語言數據科學分析

- **應用範圍：**協作開發本研究專屬之自動化數據處理腳本（R Script）。核心功能包含：
  - **插值算法：**編寫分組線性插值函數 `interpolate_dataframe`，有效解決不同實驗樣本間取樣頻率不一致之問題，實現數據標準化。
  - **物理建模：**指導開發「真實應力（True Stress）」與「真實應變（True Strain）」之物理修正公式，排除大形變下幾何面積擴張對強度測量之干擾。
  - **指標整合：**協助構建綜合「Q 度」（咀嚼性指標，Chewiness Index）之運算邏輯，整合硬度、內聚性能量比值與彈性回復率之樣本級動態運算。

### A.3 論文編排與視覺化

- **應用範圍：**協助編寫 **LaTeX** 專業排版語法，精確呈現應力應變、線性膨脹率等數學方程式與圖表索引；並指導使用 `ggplot2` 與 `ggbreak` 套件進行符合期刊規範之科學繪圖。
- **修正程度與責任聲明：**AI 主要協助處理技術性語法、程式碼除錯及部分學術詞彙之潤飾。本研究之所有實驗設計、數據真實性、結果詮釋及核心科學發現，均由作者獨立完成並負完全責任。