

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

第一名

030312

「螺」中有因，「旋」中有序：探討洋紫荊果莢
規律螺旋開裂之因

學校名稱：新北市立義學國民中學

作者： 國二 冷昆叡 國二 王維辰	指導老師： 陳又君 洪寬亮
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：內捲外翻、爆開動力學、厚壁細胞

得獎感言

蛻變與感謝--科展讓我成為更好的自己

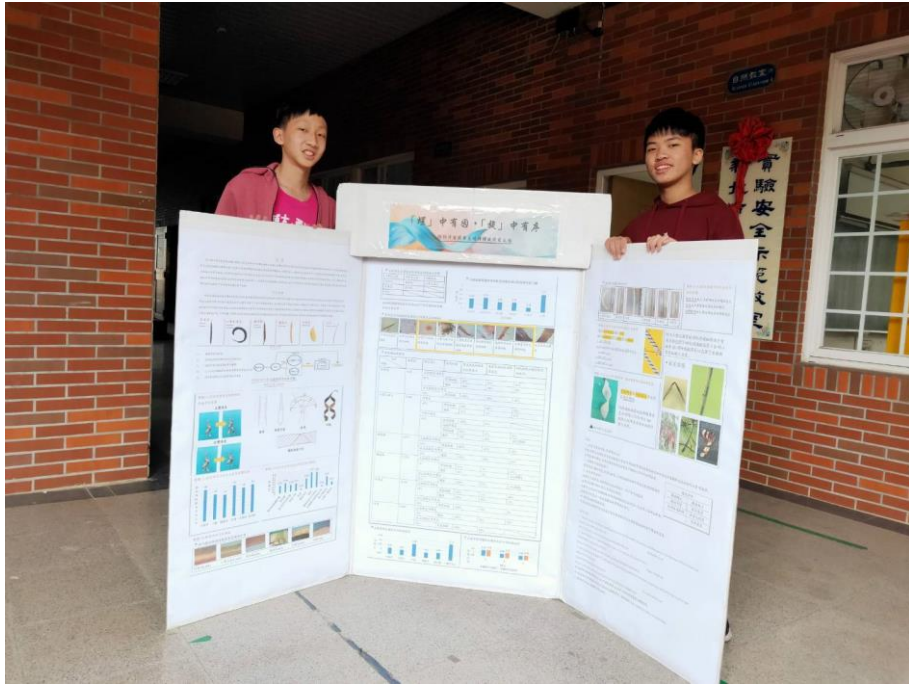
算算我們這件作品也做了一年又八個月，一路走來屬實不易，這一個過程中，我們克服了萬難。從一開始觀察果莢，到最後整合出一份完整的報告，就像是從毛毛蟲羽化成一隻翩翩彩蝶，雖然過程也許無比艱辛，但這才能造就出最後的美麗。

初時製作時將目標放在國展，鼓舞兩人的心志，提升勇氣與毅力，因此當公布名次時，能夠得到這個獎項令我們十分開心與振奮！回想起當初與夥伴閒聊著「一定要拿個獎回來！」，當初認為遙不可及的夢想，如今能夠達成，心情上真的萬分雀躍。

這次得獎，首先要感謝我們的家人，他們的全力支持，讓我們能夠全心全意在這件作品上；接著要感謝指導老師，當我們寫報告還是做實驗失焦的時候，都會將我們從迷霧森林裡面拉出來，從他們身上學到了好多好多，他們那義無反顧追尋真理的精神，是我們一輩子都會不可能忘記的；最後要感謝的就是合作夥伴，在這些漫長的日子裡，我們不單只是學到了，一件作品如何完成，不僅學到了如何去承擔自己在團隊中應盡的角色，這一次難能可貴的經驗，更使得我們在未來的人生旅途中，懂得如何去突破和挑戰。這一切就好像是一場旅程，在看不見盡頭的道路，依舊執著的一步一步的向前進，只為了能夠更接近所謂的終點。能夠遇到這樣志同道合，而且敢衝敢拚的夥伴，真的很不容易，謝謝你，也謝謝參與在其中的所有人！



利用鐵夾夾住洋紫荊果莢，細心觀察，大膽假設小心求證。



校內初審時用心製作海報，向評審闡述想法。



進行實驗時，指導老師精心指導，學生專注學習。

摘要

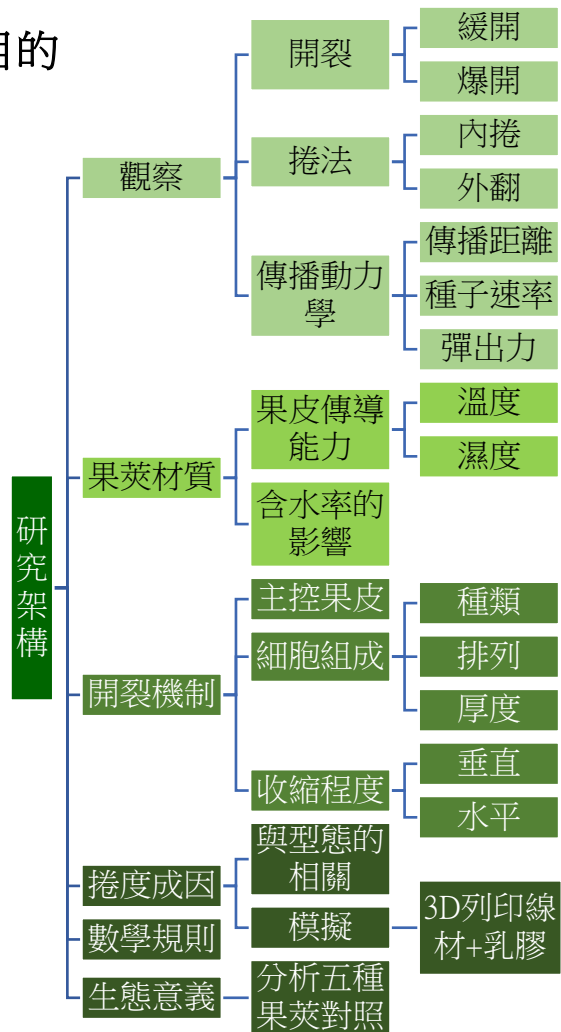
研究首度發現果莢兩種捲法，是因果皮的三種細胞薄壁細胞、厚壁細胞及纖維的排列及厚度不同導致，其中厚壁細胞收縮最大。成熟時內果皮收縮較外果皮多，常瞬間爆開，之後形成內捲式螺旋，測得種子最遠達 9 公尺，平均速度 6.5m/s，彈出力最大 0.55N；老化後，形成外翻型。纖維斜向造成螺旋，越平行越規律，在螺旋中發現內捲外翻的單節螺旋長與纖維夾角和果莢旋轉圓周有不同的數學關係。果莢傳導不佳，但可吸放水蒸氣及輻射熱，改變含水量，促使開裂及捲度的改變。分析 22 個果莢的型態，加上以高溫尼龍線材及乳膠模擬纖維與厚壁細胞，發現果皮收縮程度大、寬度越小及纖維角度越大會使捲度提升，另分析五種果莢也得證。各果莢已演化出特有開裂與捲曲幫助傳播。

壹、研究動機

偶然在學校看到樹上螺旋的洋紫荊果莢，發現果莢捲曲很有規律，覺得好奇。捲是怎麼造成的？為什麼會捲？有什麼功能？打算從觀察果莢開始，錄影及長期觀察了解果莢生長情形，分析外型、內部結構，了解果莢開裂與捲曲機制，並模擬出果莢，控制變因找出各因子對捲曲的影響，再比對其他豆科果莢。最後也想要了解果莢開裂捲曲會如何影響種子傳播。

貳、研究目的


- 一、觀察洋紫荊果莢
 - (一) 觀察洋紫荊果莢成長及其外觀特徵
 - (二) 了解果莢開裂模式
 - (三) 探討果莢爆開動力學
- 二、了解洋紫荊果莢材質特性
 - (一) 比較內捲和外翻果莢的含水率
 - (二) 探討環境因子之變動對果莢開裂後捲曲程度的影響
 - (三) 了解果莢傳導能力
- 三、探討洋紫荊果莢內部組織如何造成開裂
 - (一) 了解控制果莢開裂及捲曲的位置
 - (二) 探討果莢內部組織的種類、排列及分布
 - (三) 觀察果莢內部不同組織之收縮
- 四、了解果莢外部型態對開裂後捲曲情況的影響
 - (一) 觀察果莢各種外部型態並將其量化
 - (二) 利用相關係數分析各型態對果莢捲曲之影響
- 五、以 3D 列印線材模擬果莢，了解影響捲度因素
- 六、探討洋紫荊果莢螺旋中的數學
- 七、取其他五種果莢作為對照，以驗證果莢材質及結構對開裂及捲曲的影響



參、研究器材及設備

一、 設備器材

表 1：設備及器材

				
烘箱 登盈 circulater oven D060	電子秤 vibra AJ-220E 誤差+/-0.001	3D 列印機 Atom 2.0	解剖顯微鏡 HamletMSH655-T	溫溼度箱 BTH 80/-20
				
dino-capture (Dino-Lite)AM4023 低照度電子目鏡	複式顯微鏡 hamlat	手持式顯微鏡 (DinoLite)Basic AM2111	燈箱 HAMLET MS621-L6	鎢絲燈泡
				
Canon SX50HS	Sony RX10II	小飛碟烤肉爐	熱風槍	大同家用烤箱 TOT-1200A

二、 藥劑及物品

乙醇，甘油，過氧化氫，染劑番紅花紅，染劑快綠，3D 列印線材 8801 工業用高溫尼線材，乳膠手套，環氧樹脂，硬化劑。

三、 軟體

TINKERCAD、CURA3.2.1、ATOM2.0、ImageJ、Tracker、Media Player Classic。

肆、文獻整理

進行研究時，找到以下 5 篇文獻。利用表格整理出各文獻的研究。

表 2：各篇文獻重點整理

作者	研究題目	論點
Armon <i>et al.</i> , 2011	洋紫荊果莢打開的幾何與力學	果莢內部結構為兩方向垂直的纖維。相互收縮後即會導致螺旋。
Rivka and Yael, 2014	深入了解植物種子傳播中吸濕運動的微觀結構	果莢會隨著濕度轉換形態與變化動作。常見於會乾燥噴飛種子植物：羊蹄甲
歐 <i>et al.</i> , 2015	旋轉乾坤	果莢乾燥時纖維緊密的力和收縮的力導致果莢螺旋
Qiuying <i>et al.</i> , 2018	大豆莢果開裂中的解剖、形態和開裂	果莢種子邊會收縮較非種子邊多，而在種子邊的薄壁細胞會弱化形成開裂區，果莢被撐開
Anahit and Angela, 2018	爆裂性果莢的研究	果莢有分內外層，相互垂直，失水時細胞壁收縮再加上纖維斜向排列導致捲曲

伍、研究過程與方法

一、觀察洋紫荊果莢

(一) 觀察洋紫荊果莢成長及其外觀特徵

1. 果莢分成內外果皮，靠種子者稱內果皮，靠外者稱外果皮。(見圖 1)
2. 果莢的種子會著生在特定一邊稱為種子邊，另一邊稱為非種子邊。(見圖 2)
3. 節數計算方式為種子邊面朝自己，內外果皮交替算一節。(見圖 3、4)

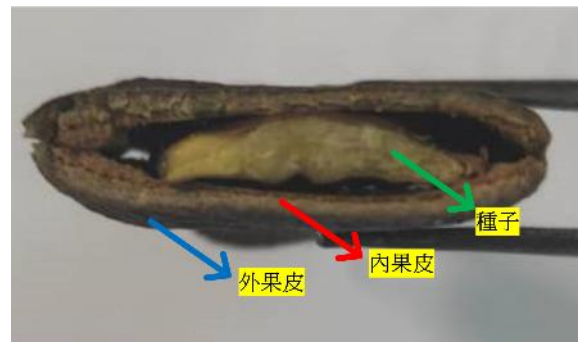


圖 1：果莢橫切面，兩片果莢夾一種子

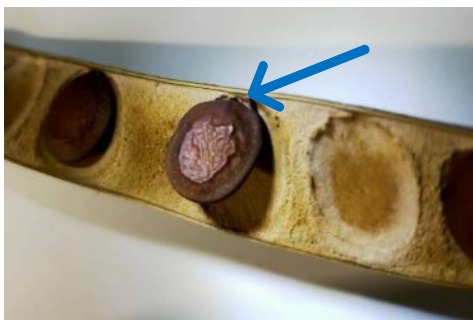


圖 2：藍色箭頭指向種柄，上邊為種子邊，下邊為非種子邊



圖 3：測量時種子邊朝自己，上圖紅色線段即為種子邊



圖 4：此果莢共 7 節
左 3 節，右 4 節

(二) 了解果莢開裂模式

1. 觀察地點

					
圖 5：國 中校園	圖 6：大 學校園	圖 7：文程路	圖 8：南投	圖 9：青年 公園	圖 10：新泰游泳 池

2. 觀察方法

從 2019/12/28 開始尋找果莢進行標記和觀察，到了 2020/11/21 觀察時間變密集，間隔約為 1~2 天，觀察到 2021/06/14，共一年六個月。標記方式是將標籤掛在樹上觀察。記錄方式為拍照及錄影，並列表紀錄各果莢的外型，及特殊觀察到的事項（見附錄一、二）。而果莢緩開的觀察則是在 3 天內觀察，早上和傍晚各觀察一次並做紀錄（見附錄三）。

(三) 探討果莢爆開動力學

1. 研究方法

(1) 問題導向的研究流程

表 3：探討果莢爆開動力學的研究流程

問題	作法
Q1 果莢會爆開嗎?	在烈日下看到果莢爆開
Q2 爆開種子飛多遠? (爆開速度極快，野外 環境雜亂，無法判斷)	1. 摘下果莢看是否會爆，比對與野外有無差異
	2. 記錄果莢爆開的種子噴飛範圍
	3. 以錄影機錄爆開過程
Q3 自然爆開時間太難 掌握，如何促使果莢爆 開?	1. 改為人為加熱成熟待開果莢，看和自然爆開是否相同
	2. 持續以吹風機加熱果莢並以 240fps 錄影，紀錄加熱時間及種子速度
	3. 持續以烤肉爐加熱果莢並以 240fps 錄影 (圖 16) 紀錄加熱時間及種子速度
	4. 持續以熱風槍上下移動加熱並以 960fps 高速攝影機回溯攝影，紀錄加熱時間及種子速度
Q4 如何拍到種子離開 果莢的時間?	必須尋找可拍攝<1ms 的相機，網路聯繫台大機械系實驗室，商借 2500fps 的高速攝影機
Q5 如何讓果莢在 10 分 鐘之內爆開?	發現只要加熱一段時間後給予冷卻就會爆開，改以小烤箱加熱，取出冷卻
Q6 如何計算種子彈出 力?	以 Tracker 分析，利用動力學算出彈出力

(2) 選果莢

在野外觀察發現寬度均勻、厚實、縫合線明顯且指甲輕敲聲音清脆的果莢爆開機率高。

(3) 紀錄種子及拍攝方法

① 架設兩部攝影機一部果莢朝種子邊向 (見圖 11)，畫面橫向為 X 方向(爆開時種子向果莢兩側噴飛，向種子邊拍攝是最接近平行種子路徑之角度)；另一部拍攝 Y 方向(果莢表面)(見圖 12)，確認種子在 Y 方向的偏移程度。

② 爆開後以果莢位置為原點，延伸出一線令其為 0 度，利用捲尺量原點與種子的距離，並記錄與 0 度的夾角度數 (見圖 13)，再以 gorgebra 畫出種子分布圖。

(4) 種子噴飛過程的測量及計算

① 計算種子噴飛速率

I. 用 Media Player Classic 擷取爆開過程 3 個影格 (未開→爆開第一幀→爆開第二幀)，利用 Image J 測量種子在一幀內飛的距離。

II. 噴飛速率 = $\frac{\text{種子一幀飛的距離}}{\text{一幀的時間}}$ ；一幀的時間 = $\frac{1}{\text{幀數}}$ 秒。

② 計算種子的彈出力

I. 台大實驗室的高速攝影存檔為照片檔 (一幀一張)，先將照片串接成影片，再使用 Tracker 分析影片中種子的軌跡及位移。

II. 對 x 位移取 curve fitting，再取一次微分得到 x 方向速度。

III. 由以下公式算出 x 方向之衝量 (J)，帶入種子質量，即可算出衝量 $J = F\Delta t = \Delta P = m\Delta v$ 。

(Δt) 定義：從果莢爆開看到種子到種子飛出去前的時間。

IV. 算出衝量後，除以外力作用的時間 (Δt)，即可得 x 方向受力。

V. 對 Y 方向也計算受力大小。

VI. 彈出力即為 x 方向力與 y 方向力之合力。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

2. 各種觀察果莢爆裂的詳細作法

(1) 野外觀察果莢爆開：選定易爆果莢，駐守在果莢邊，以手機 (iphone XR) 及相機 (Canon SX50H) 拍攝 (見圖 14)，在 2021/04/03 和 2021/04/21 捕捉到果莢爆開。

(2) 摘取成熟果莢，外加熱源，觀察果莢爆裂

在乾燥炎熱時於露台掛置果莢並攝影。(見圖 15)

① 持續以烤肉爐加熱果莢並以 240fps 錄影

I. 將果莢以烘箱 100 度烘烤。

II. 駐守在烘箱旁，聽到爆開聲立即取出果莢並觀察變化。

III. 比較加熱促使爆開與自然爆開的差別。



圖 11：種子邊向 (X 方向)

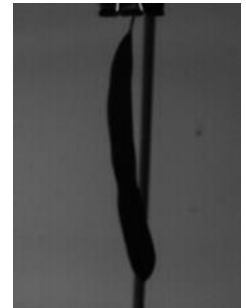


圖 12：果莢表面向 (Y 方向)



圖 13：紀錄種子噴飛位置，圖中以粉筆編號



圖 14：野外實地觀察果莢



圖 15：摘下果莢露台觀察

- IV. 將烤肉爐置於果莢下方作為熱源加熱果莢 (見圖 16)。
- V. 實驗過程以兩台手機 (iphone 6s plus / 240fps 及 oppo R17 / 240fps) 拍攝，紅外線溫度計監測果莢表面溫度確保高溫，並且記錄加熱時間。
- ② 持續以熱風槍上下移動加熱並以 960fps 高速攝影機 (Sony DSC-RX10 II) 回溯攝影
- I. 將果莢架起，熱風槍上下移動加熱。
 - II. 以高速攝影機拍攝，相機的高速攝影模式可回溯攝影兩秒，在爆開後兩秒內按下錄製，即可以 960fps 觀察果莢爆開 (見圖 17)。
- ③ 以小烤箱加熱後冷卻等待爆裂，並以 2500fps 高速攝影機回溯攝影
- I. 小烤箱以 170 度加熱果莢 4 分鐘上下 (見圖 18) (果莢會被烤出氣味)，另準備一條毛巾置於烤箱上方加溫。
 - II. 取出果莢時以毛巾暫時保溫，在保溫的情況下迅速將果莢架起，取下毛巾待果莢降溫爆開。
 - III. 以高速攝影機 (2500fps) 拍攝 XY 方向。
 - IV. 拍攝完爆開影像後，收集種子並計算平均重量。



圖 16：烤肉爐熱果莢並攝影



圖 17：熱風槍加熱果莢



圖 18：以小烤箱 170 度加熱果莢



圖 19：戶外觀察果莢

二、了解洋紫荊果莢材質特性

(一) 比較內捲和外翻果莢的含水率

1. 摘乾燥未開裂果莢、內捲果莢及外翻果莢秤重，烘箱預熱 100 度，將果莢烤至恆重。

2. 果莢含水率百分比 = $\frac{\text{前重}-\text{後重}}{\text{前重}}$ 。

(二) 探討環境因子之變動對果莢開裂後捲曲程度的影響

1. 在戶外觀察果莢的變化

(1) 摘下 8 根外翻果莢，選擇早晚溫差大，又不下雨的日子吊置於照的到陽光處，此次選在 2021/01/15 (見圖 19)。

(2) 從早上 8 點到晚上 8 點每隔一小時用溫濕度計測量環境溫濕度，紅外線溫度計測量果莢表面溫度，紀錄節數及拍下樣貌。

(3) 相對溼度 = $\frac{\text{水的實際蒸氣壓}(P)}{\text{該溫度下的飽和蒸氣壓}}$ ，查表該溫度下的飽和蒸氣壓。

(4) 使用 $pV=nRT$ (v 為該空間大小， $R=0.082$ ， T 溫為度， n 為空間含水量) 算出 $\frac{n}{v}$ (每單位空間中的含水量)。

2. 探討溫度改變對果莢捲度的影響

- (1) 選擇變化幅度大 (編號 4)的果莢進行實驗。
- (2) 用溫溼度箱將起始溫度固定成 13°C，濕度固定 80%。
- (3) 每隔一小時測量溫溼度箱內溫溼度、果莢表面溫度、果莢重量並將溫度上調 2 度。

3. 探討濕度改變對果莢捲度的影響

- (1) 選擇變化幅度大 (編號 4)的果莢進行實驗。
- (2) 用溫溼度箱將起始濕度固定成 80%，溫度固定 13°C。
- (3) 每隔一小時測量溫溼度箱內溫溼度、果莢表面溫度、果莢重量以及並將濕度下降 6%。

4. 了解輻射熱對果莢捲度的影響

- (1) 與實驗 2 同操作，另外加入鎢絲燈泡作為輻射熱來源 (見圖 20)。
- (2) 由於燈泡加熱到一定程度後，會受溫溼度箱裡的溫度限制，所以溫溼度箱裡的溫度也必須從 13°C 調整到 31°C，半小時調 3°C。



圖 20：模擬輻射熱裝置

(三) 了解果莢傳導能力

1. 果莢的吸水情形。
2. 果莢去除縫合線後的吸水情形

將果莢去除兩側縫合線、表皮以及絨毛後，一端插入水中，隔一段時間觀察果莢吸水的狀況。接著再將衛生紙沾紅墨水，附著在果莢兩側上模擬垂直纖維方向給水，觀察情形。

三、 探討洋紫荊果莢內部組織如何造成開裂

(一) 了解控制果莢開裂及捲曲的位置

1. 將內捲及外翻果莢內外果皮分離並以烘箱 100 度烤 1 小時。
2. 以捲曲情況判斷控制位置。

(二) 探討果莢內部組織的種類、排列及分布

1. 內部組織種類

(1) 果莢處理

將外翻果莢煮沸至無氣泡後泡入軟化劑 (甘油：酒精 =1：1)1~2 天，再將果莢泡入 35%雙氧水中 1~2 天。

(2) 分離單一細胞並染色判別組織種類

- ① 將分離出的單一細胞滴入番紅花紅，等待一天。
- ② 接著依序每隔 15 分鐘置換 50%、75%、95%及無水酒精。
- ③ 最後滴入快綠 30 秒後，滴入無水酒精用顯微鏡觀察。
- ④ 染上紅色為厚壁組織，染上綠色為薄壁組織。

2. 內部組織分布及排列

- (1) 埋蠟切片：使用固定液固定未成熟果莢，再埋蠟切綠果莢橫斷面。
- (2) 徒手切片：將內捲及外翻果莢摺出纖維斷面 (見圖 21)，以單面刀片切下薄片以觀察組織分布情況 (見圖 22)。



圖 21：折果莢斷面



圖 22：果莢斷面切薄片

(三) 觀察果莢內部不同組織之收縮

1. 細胞吸水的形變

- (1) 分離單一細胞至於載玻片上，滴水使其吸飽水。
- (2) 使用複式顯微鏡將視窗至於可觀察目標細胞處。
- (3) 將載玻片取下以酒精燈烘烤直到水份完全蒸乾。

(4) 長度變化比例 = $\frac{\text{烤乾前長度} - \text{烤乾後長度}}{\text{烤乾前長度}}$ 。

2. 果莢表面平行及垂直纖維方向收縮比

- (1) 將果莢的絨毛及外果皮去除後，折纖維向斷面。
- (2) 在種子面及非種子面皆畫與平行纖維與垂直纖維的線 (見圖 23、24、25) 或直接量測果莢內外面長度。
- (3) 將果莢以烘箱烤 1 小時，測量烤前後線段長或果莢。

(4) 收縮比例 = $\frac{\text{前測} - \text{後測}}{\text{前測}}$ (實驗進行 6 次取平均)。

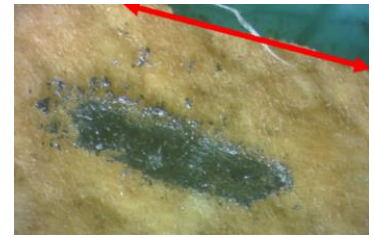


圖 23：平行纖維方向，紅箭為纖維斷面

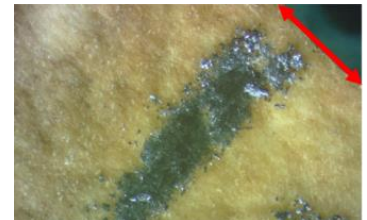


圖 24：垂直纖維方向，紅箭為纖維斷面

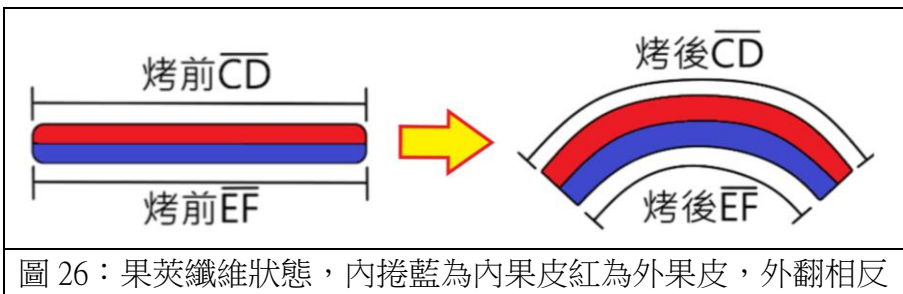


圖 26：果莢纖維狀態，內捲藍為內果皮紅為外果皮，外翻相反

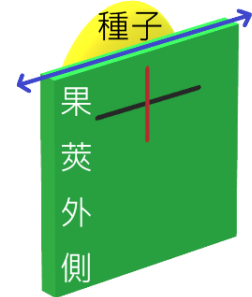


圖 25：綠為果莢、黃為種子，藍為纖維斷面。黑線、紅線分別為平行及垂直纖維方向

四、了解果莢外部型態對開裂後捲曲情況的影響

捲度量化是計算節數的數量，節數越多代表果莢越捲

(一) 觀察果莢各種外部型態並將其量化

1. 腰身：洋紫荊果莢會有部分往內凹 (見圖 27)

- (1) 訂出局部的縊縮面積，將果莢邊開始向內凹的那一個點稱為腰身端點，總共有四個端點，將四個端點連成一個四邊形，稱為腰身四邊形 (見圖 28)

- (2) 測量凹陷進去縊縮面積 (見圖 29)；腰身對整體影響 = $\frac{\text{縊縮面積}}{\text{果莢全面積}}$ ；腰身對局部影響 = $\frac{\text{縊縮面積}}{\text{腰身四邊形}}$



圖 27：上為無腰身的果莢，下為有腰身的果莢



圖 28：使用 imagej 計算 ABCD 腰身四邊形

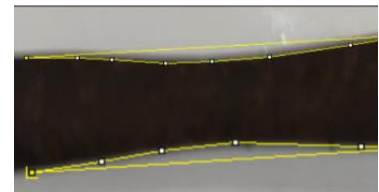


圖 29：Image J 測量圍起區域為縊縮面積

2. 果寬勻度：洋紫荊果莢寬度上下不均值的程度 (見圖 30)

- (1) 將洋紫荊果莢頭尾連線，稱為頭尾連接線
- (2) 再以頭尾連接線做一中垂線，分割果莢上下半部，並分別測量出面積 (見圖 31)

(3) 果寬勻度 = $\frac{\text{上半面積}}{\text{下半面積}}$ ；數據大於 1，則果上半寬大於下半寬，否則果上半寬小於下半寬

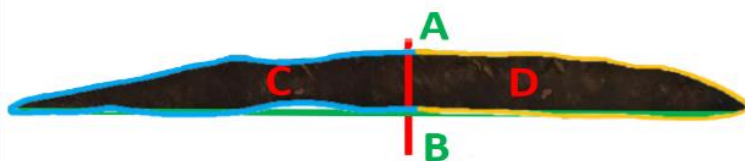


圖 30：上面的果莢上半部較窄， 圖 31： \overline{AB} 線段為中垂線，C 為上半面積，D 為下半面積
下面的果莢上下均衡

3. 弧度：量化洋紫荊果莢彎曲幅度

- (1) 用 ImageJ 量出果莢弧以及弦 (見圖 32)
- (2) 使用弧弦計算器 (見圖 33)，半徑代表弧度
- (3) 數值越小代表弧度越大

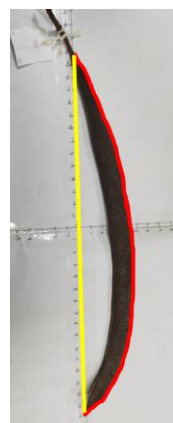


圖 32：紅線 圖 33：弧弦計算
為弧，黃線 器
為弦

4. 纖維角度：洋紫荊果莢斜纖維的角度

- (1) 將洋紫荊果莢不朝任意方向用力折，果莢會依平行纖維方向裂開
- (2) 測量纖維和果莢邊切線的夾角 (見圖 34)

5. 果莢寬：洋紫荊果莢的寬度

- (1) 果莢頭尾連線，取連線一半處標記
- (2) 作一直線和果莢兩邊垂直且通過一半處的標記點，線段長即為果莢寬 (見圖 35)

6. 洋紫荊果莢垂直纖維方向收縮的現象

- (1) 外果皮裂痕與內果皮纖維垂直，在外果皮使用美工刀照著外果皮裂痕割線 (見圖 36)
- (2) 烤乾前後皆測量一次割去外果皮部分的內果皮 (褐色)

(3) 收縮比例 = $\frac{\text{前測}-\text{後測}}{\text{前測}}$

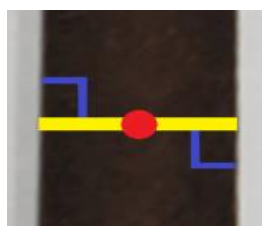


圖 34：黃色標示為 圖 35：紅色點為一 圖 36：烤前用美工刀沿 圖 37：上圖為烤後的線
纖維角度 半處標記點，黃色 著外果皮裂痕割出線條 條
線段為果莢寬

7. 兩側縫合線收縮情形：烤乾後計算種子邊和非種子邊之收縮比例

- (1) 分別測量種子邊和非種子邊烤前和烤後的長度
- (2) 單邊的收縮比例 = $\frac{\text{前測}-\text{後測}}{\text{前測}}$ ；兩邊收縮比 = $\frac{\text{種子邊的收縮比例}}{\text{非種子邊的收縮比例}}$

(二) 利用相關係數分析各型態對果莢捲曲之影響

實驗採用 72 根果莢進行，但多數果莢烤後沒有開裂，剩下 20 根樣本進行分析。首先分析兩種與腰身有關的型態時，只取樣有腰身的 4 個樣本進行分析。而分析其他型態時，選取的樣本會去掉有腰身的 4 個樣本，共 16 個樣本進行分析。

五、以 3D 列印線材模擬果莢，了解影響捲度因素


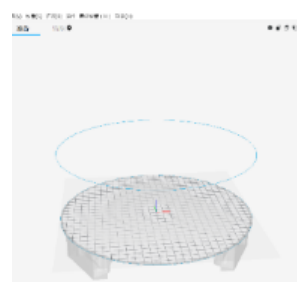
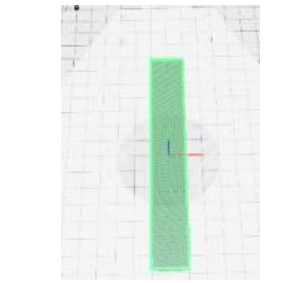
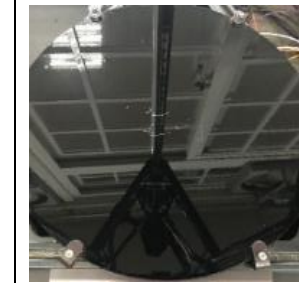
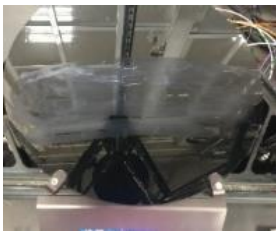



(一) 設計概念

相關係數分析後發現纖維角度、寬度與捲度最有關係，所以決定分別模擬這些，因為厚壁細胞收縮比例大於纖維，所以以高溫尼龍線材模擬纖維，乳膠模擬厚壁胞。

(二) 作法




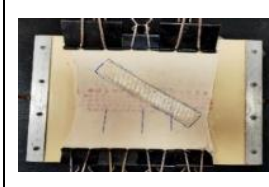
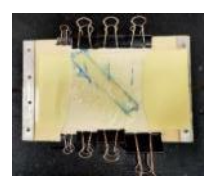
1. 使用高溫尼龍線材列印纖維，作法如下表

表 4：3D 列印機操作

操作照片				
步驟	在 tinkercad 匯出選擇 STL 檔	Cura 介面	匯入檔案最後再匯出成 g.code 檔	將印床擦拭乾淨
操作照片				
步驟	塗上口紅膠，並用抹布塗抹均勻	選擇要列印的 g.code 檔案	列印完成	最後完成品

2. 以乳膠手套模擬厚壁細胞，作法如下表

表 5：3D 列印片製作流程表

				
將乳膠手套剪下均質部分	將剪下部分一邊固定在板子上並畫上三段 1 公分直線	將三條線段一一拉至 3 公分	將 3D 列印片纖維方向調整與乳膠拉撐方向平行	塗上環氧樹脂，貼上 3D 列印片

六、探討洋紫荊果莢螺旋中的數學


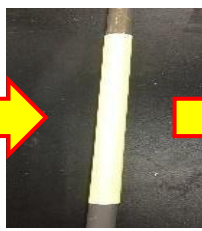
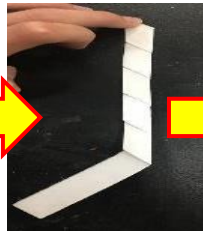
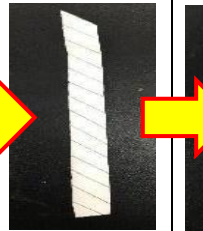
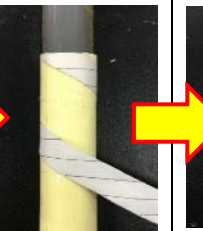

(一) 觀察洋紫荊的螺旋

折內捲和外翻果莢看果莢纖維排列，並找出果莢旋轉軸心。

(二) 以紙條模擬豆莢，並找出數學規則

紙條纏住棍棒模擬旋轉圓周。藉由模擬捲曲幫助找出數學公式。(見表 6)

表 6：模擬外翻果莢捲曲流程圖

					
紙纏繞棍棒	模擬旋轉圓周	折出纖維角度	摺出纖維	纖維平行纏繞	模擬果莢捲曲

(三) 以紙條模擬不同纖維角度、果莢寬度及果莢旋轉圓周對外翻式果莢捲曲的影響

果莢纖維角度落在 40 度到 55 度之間，寬度落在 1.5~2cm 之間，而旋轉圓周差異較大；模擬角度時選擇 40 度及 55 度，模擬寬度時選擇 1.5cm 及 2cm 而角度統一 40 度，模擬旋轉圓周時角度固定。

七、取其他五種果莢作為對照，以驗證果莢材質及結構對開裂及捲曲的影響

(一) 樣本說明

表 7：樣本外觀特徵及開裂時期 (開裂時期為果莢開裂時期非果期) 莊，(2000)

名稱	小實孔雀豆	銀合歡	鳳凰木	水黃皮	田菁
選擇原因	捲度大	外型與洋紫荊相似	果莢堅硬且厚實	落下時果莢不開裂	纖維為直向排列
地點	校園	新莊	校園	校園	大溪
外觀	鐮刀樣彎曲	帶狀直而扁平	刀劍狀	先端有微彎曲的短喙	細長長圓柱形
大小	14~18*	15~20*	25~70*	4~8*(cm)	21~22*
長*寬	1~1.5(cm)	2~2.5(cm)	4~7(cm)	1.5~2.5	0.2~0.35(cm)
開裂時期	3~4 月	11~12 月	11~1 月	落下後很久才會開裂	11~12 月

(二) 重複三、四洋紫荊的實驗

陸、研究結果

一、觀察洋紫荊果莢

(一) 觀察洋紫荊果莢成長及其外觀特徵

1. 洋紫荊果莢長 16~33cm，寬 2~2.5cm，4 月開始開裂。
2. 果莢剛開裂不捲 (見圖 41)，不久會先內捲 (見圖 42，內果皮向內捲導致外果皮顯露在外)，經過數月再轉變成外翻。(見圖 43，內果皮向外翻導致內果皮顯露在外)

3. 兩種捲法一日內不同時段捲度皆會變化。(見表 8)

4. 果莢經下雨天晴後也會改變捲度。(見圖 44)



圖 38：樹上開
花 (10/18)



圖 39：綠色
果莢 (11/17)



圖 40 咖啡果
莢 (4/2)



圖 41：果
莢剛開不
捲 (4/2)



圖 42：內捲
(4/2)



圖 43：外翻
(8/6)

表 8：果莢捲度變化

內捲 (捲度變化 小→大→中)			外翻 (一天內捲度變化 小→大→中)		
2021/04/08	2021/04/11	2021/04/14	2021/01/15		
8：06AM	3：18PM	7：48AM	8：10AM	2：10PM	8：10PM



圖 44：1/1 晴天時本來 9 節，1/4 下雨後捲度下降，1/6 再次放晴捲度提升

(二) 了解果莢開裂模式

果莢分成緩開及爆開，緩開果莢縫合線裂縫漸大，有些種子隨之離去，有些則等捲度變大才掉落。若果莢瞬間爆開時，種子噴飛，有時連兩片果莢也被彈飛。

1. 野外觀察果莢緩開

果莢 2021/04/27 底部開裂，1 顆種子離開，留存兩顆種子。到當天晚上，果莢開裂加大，3 顆種子掉落，3 顆留存。再過了 4 天，果莢捲度增加，種子全數離開。(見圖 45)

2. 野外觀察果莢爆開

爆開時，種子全數離開並往果莢兩側噴飛（約 6~7 公尺），且有時兩片果莢也會跟著彈飛（約 4 公尺），爆開的果莢不捲，會隨著日曬越來越捲。（見表 9）

表 9：果莢爆開過程 2021/04/21

還未爆開	種子噴飛	果莢彈飛	剛爆開不捲	2 小時後變捲
				

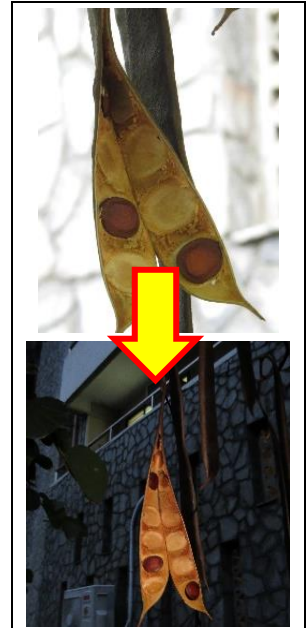


圖 45：2021/04/27 底部開裂，留存 2 顆種子→果莢 3 顆種子掉，3 顆留存

(三) 探討果莢爆開動力學

1. 野外觀察果莢爆開

觀察發現果莢爆開時段大約落在下午 1 點到 3 點

2. 摘取成熟果莢，在陽光下觀察爆裂

摘下的果莢和枝上的爆裂類似。果莢兩片彈飛，種子多分布在果莢兩側，因為牆體阻擋所以第二、三象限種子少，最遠彈 941 公分遠，計算種子速度為 507.84cm/s，由路徑推測種子在飛行過程中有翻轉，30fps 攝影機拍攝無法測量種子離開果莢時間。

表 10：在露臺拍攝果莢

爆開後 1/30s	爆開後 2/30s	爆開後 3/30s	種子分布
			

3. 外加熱源，觀察果莢爆裂

(1) 持續以烤肉爐加熱並以 240fps 錄影

① 比較自然爆開與加熱爆開的差別

自然爆開及烘箱爆開後型態相似，證明外加熱源不會影響果莢爆開情況（見表 11）。

② 持續以烤肉爐加熱並以 240fps 錄影

實驗過程使用紅外線溫度計測量果莢表面溫度約為 40~60 度，果莢 A 種子速度為 897.3cm/s，彈的也較遠，最遠距離為 521.2cm；而果莢 B 爆開後發現種子乾癟，爆開動作相對較慢，

表 11：爆開前後果莢變化

自然爆開	烘箱爆開
	

種子速度只有 302.16cm/s，位置較近，最遠距離為 423.6cm，而兩者種子多分布在兩側。加熱時間為 1 小時上下，雖使用 240 fps 攝影機拍攝，但依然無法捕捉種子離開果莢瞬間。

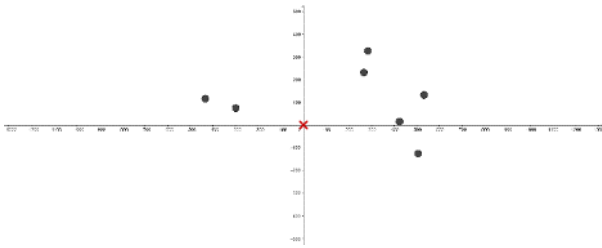


圖 46：果莢 A 種子分布，種子彈的較遠

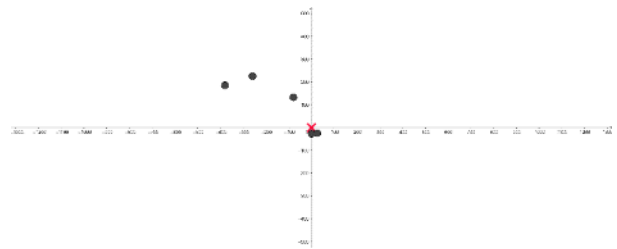








圖 47：果莢 B 種子分布，種子彈飛距離短

表 12：烤肉爐加熱果莢爆開情形

	爆開前	爆開後 1/240sec	爆開後 2/240sec
果莢 A			
果莢 B			

(2) 持續以熱風槍加熱並以 960fps 高速攝影機回溯攝影

使用 960fps 攝影機拍攝，更清楚觀察種子，速度為 1585.88cm/s；其中發現有少數種子滯空（紅色圈起為滯空種子），可能是因為其種柄在加熱過程中斷掉，因此應避免加熱過度。噴飛的種子會像飛盤般飛行，飛行過程中會上下震盪。在實驗過程中發現若在加熱後快速冷卻果莢會使其快速爆開。

表 13：以熱風槍加熱果莢並以 960fps 拍攝

爆開前	爆開後 9/960sec	爆開後 23/960sec
		

(3) 以小烤箱加熱後冷卻等待爆裂，並以 2500fps 高速攝影機回溯攝影

將拍攝照片串接為影片，利用 Tracker 分析，成功得出種子彈出力 F 介於 0.0959~0.55N。

表 14：以 2500fps 的高速攝影機拍攝果莢爆開過程並計算彈出力

軌跡 力量				
	F_x (N)	0.095	0.149	0.129
F_y (N)	0.013	0.00841	0.0141	0.0146
V_x (m/s)	7.3207	4.903	3.24	8.853
F_t (N)	0.0959	0.149	0.130	0.55

表 15：種子速率和距離之平均值及標準差(n 為實驗次數)

統計	項目	種子速率(V_x) n=8	最遠距離 n=3
平均		7.15m/s	6.28cm
標準差		4.202748	2.751751

二、了解洋紫荊果莢材質特性

(一) 比較內捲和外翻果莢的含水率

洋紫荊果莢成熟未開時含水量是 34%~38%，內捲果莢開裂含水量 14%，外翻果莢開裂含水量 11%~8%。

(二) 探討環境因子之變動對果莢開裂後捲曲程度的影響

1. 在戶外觀察果莢的變化

- (1) 發現各果莢在下午 2:10 節數都達到最高。而下午 2:10 也是溫度最高，濕度最低的時候。但各果莢的節數變化不同，總節數變化最少為 2 節，變化最多為 7 節。(見表 16 以編號 4 果莢做說明)
- (2) 空氣中含水量越低，捲度越高。(見圖 48)
- (3) 發現果莢表面溫度高於環境溫度，推測果莢受到輻射熱影響。(見圖 49)

表 16：戶外觀察之果莢變化

時間	8:10 79.5% 12.8°C	11:10 58.2% 17.5°C	14:10 33.2% 31.4°C	17:10 64.5% 19.7°C	20:10 80.9% 16.3°C
節數	4	8	11	9	6
照片					

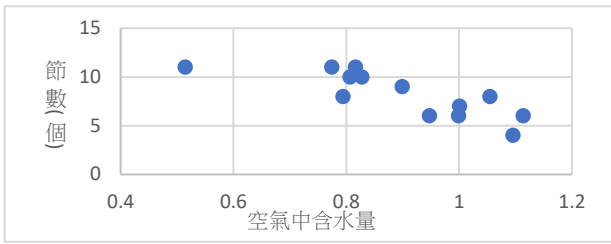


圖 48：捲度與空氣中含水量關係圖，空氣中含水量越低捲度越高

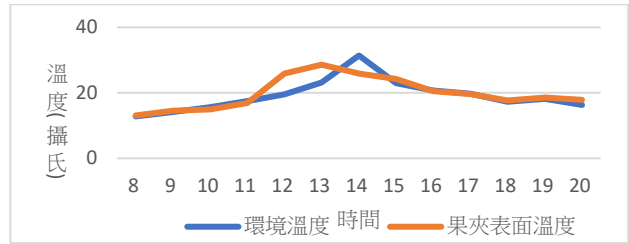


圖 49：果莢表面溫度與環境溫度有差異，推測為陽光輻射熱影響

2. 探討溫度及濕度改變對同一果莢捲度的影響

濕度對果莢捲度有影響；而溫度改變則不影響（見表 17）。但實驗中發現改變溫度時果莢表面溫度介於 20~22 度，並不會隨溫溼度箱而改變（見圖 50），推測果莢熱傳導不佳，唯熱輻射可順利傳熱

當固定濕度，改變溫度時，環境含水量、果莢重量變化不大，所以果莢捲度沒有變化。而固定溫度改變濕度時，環境含水量、果莢重量及果莢的表面溫度皆有明顯的變化故果莢捲度改變（見圖 51）

表 17：改變濕度或溫度之果莢變化圖

控溫 13°C，改濕 (80%-32%)					控濕 80%，改溫 (13~31°C)	
濕度 80%	濕度 62%	濕度 50%	濕度 38%	濕度 32%	溫度 13°C	溫度 31°C

3. 了解輻射熱對果莢捲度的影響

加入燈泡後，果莢表面溫度明顯改變（見表 7），且捲度增加（見表 8），可知輻射熱與捲度有關係。

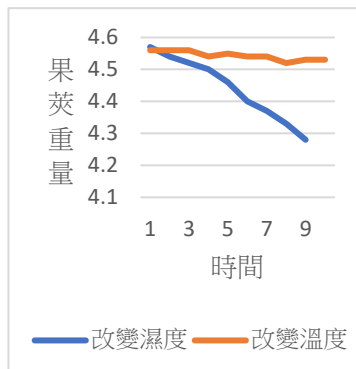
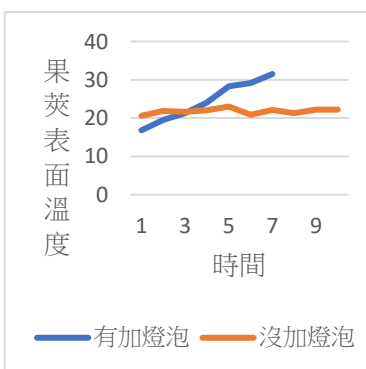


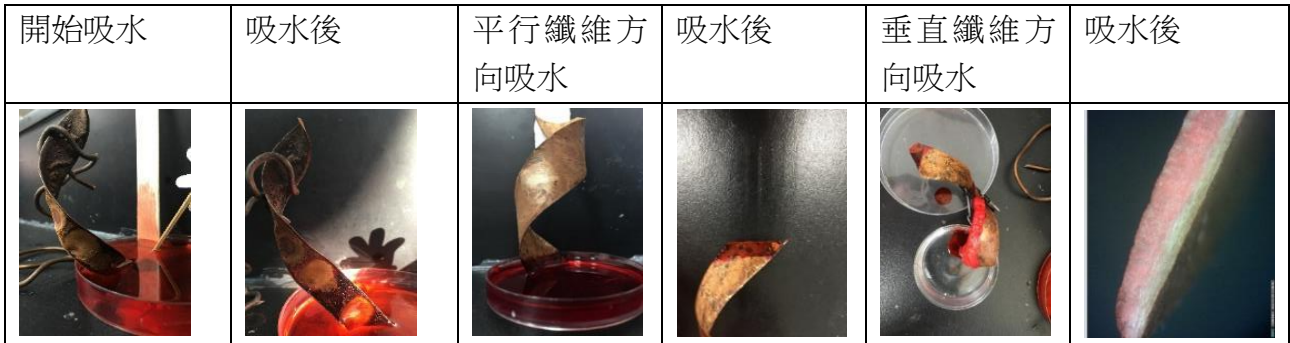
圖 50：輻射熱對果莢影響 圖 51：溫溼度對重量的影響 圖 52：輻射熱 13°C 圖 53：輻射熱 31°C

(三) 了解果莢傳導能力

1. 比較果莢吸水情形

洋紫荊果莢吸水後不是整個果莢染上色素，只在兩側縫合線附近處才有色素，認為是兩側縫合線吸水再擴散到整個果莢。利用衛生紙模擬垂直方向給水後也得證。同時發現纖維垂直方向吸水和平行纖維方向相似，推測是纖維排列過緊密導致吸水不佳。

表 18：不同種類材質吸水

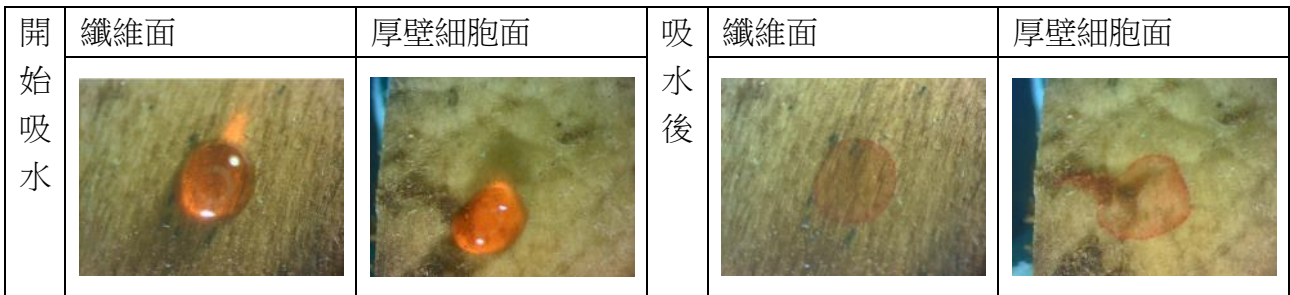


2. 觀察水分在表面的移動

(1) 觀察水分的移動

果莢兩面的水分皆無法傳遞。因纖維及厚壁細胞平面無明顯溝槽

表 19：水分在不同表面擴散狀況

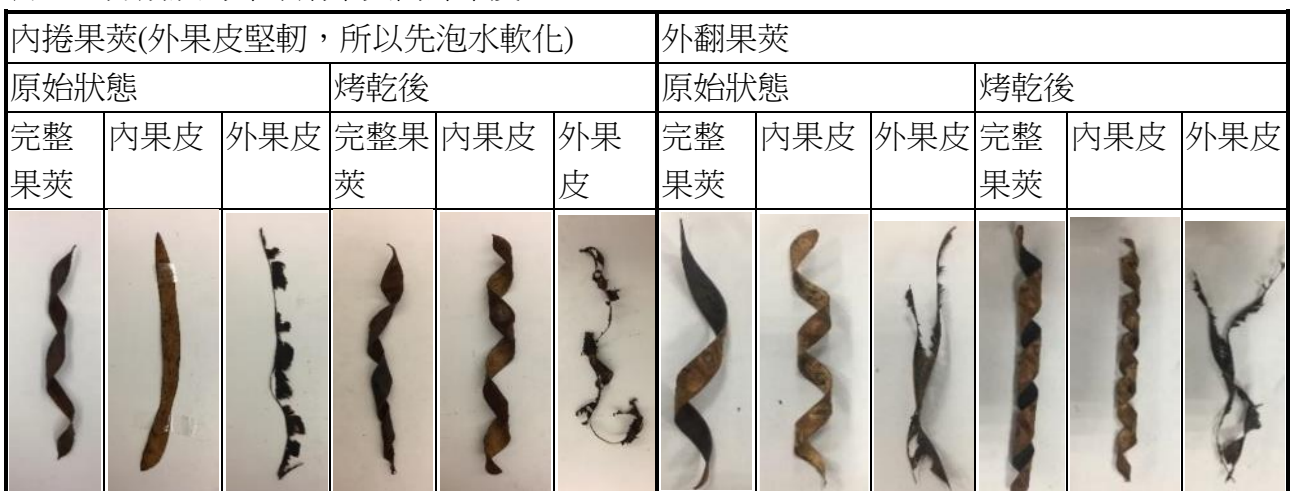


三、 探討洋紫荊果莢內部組織如何造成開裂

(一) 了解控制果莢開裂及捲曲的位置

因內捲果莢烤乾的完整果莢較內果皮捲，故捲度是為內外果皮一起控制；外翻果莢的內果皮較完整果莢捲，故為內果皮控制。

表 20：分別烘烤洋紫荊果莢內外果皮



(二) 探討果莢內部組織的種類、排列及分布

1. 內果皮：由纖維及厚壁細胞構成，前者較靠種子，後者靠外

(1) 纖維 (示意為綠色)

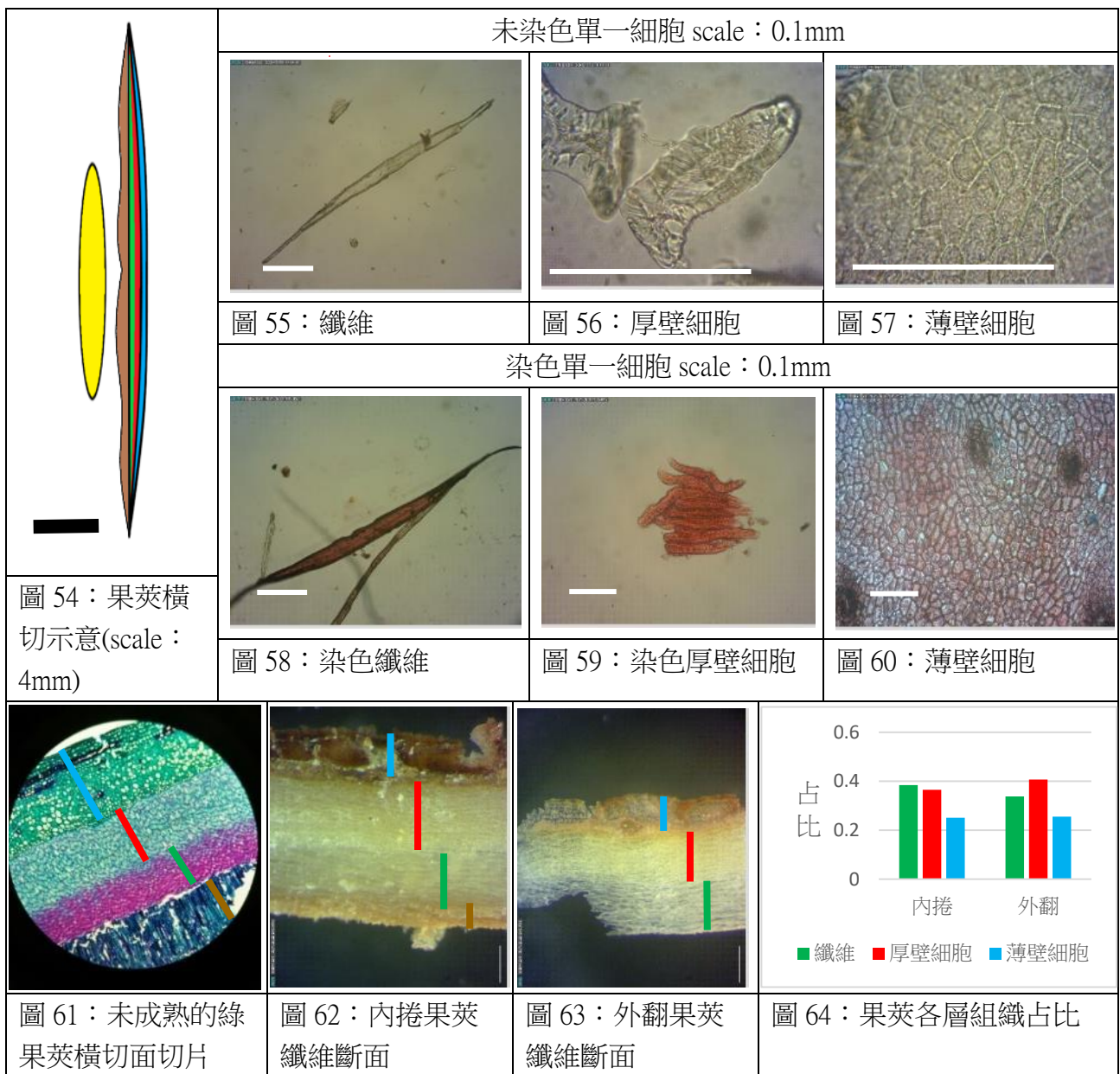
細胞細長兩端尖銳，中有空腔，屬厚壁組織，染色時次生細胞壁染上番紅花紅。

(2) 厚壁細胞 (示意為紅色)

細胞較為短小，細胞壁均勻加厚，與纖維同屬厚壁組織，染色時次生細胞壁染上番紅花紅。

(3) 絨毛層 (示意為咖啡色)

2. 外果皮：由薄壁細胞 (示意為藍色)構成，老化後會脆化而剝落，細胞成群出現，屬薄壁組織，染色時初生細胞壁會染上快綠。



(三) 觀察果莢內部不同組織之收縮

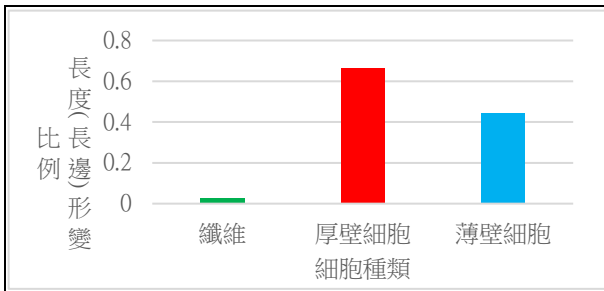


圖 65：吸水後的形變量厚壁細胞>薄壁細胞>纖維

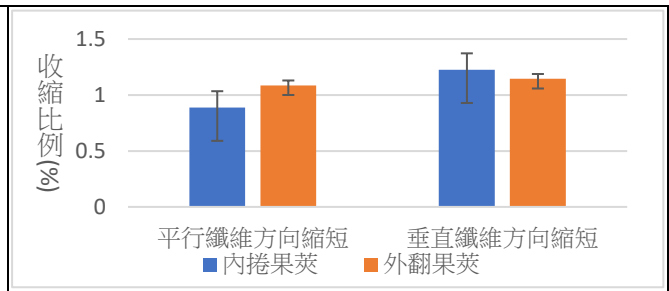


圖 66：平行和垂直纖維方向力量比較，垂直方向力量較大

四、了解果莢外部型態對開裂後捲曲情況的影響

(一) 採樣發現果莢中出現腰身的機率不高，20 根裡只有 4 根有腰身，且腰身數皆為 1 個 (見圖 68、69)。果寬勻度平均值小於 1，可知果莢下半部大多數較寬 (見圖 70)。弧度分布均勻，且皆不大 (見圖 71)。果莢纖維角度分布大約 35°~55° (見圖 72)。果莢寬分布大

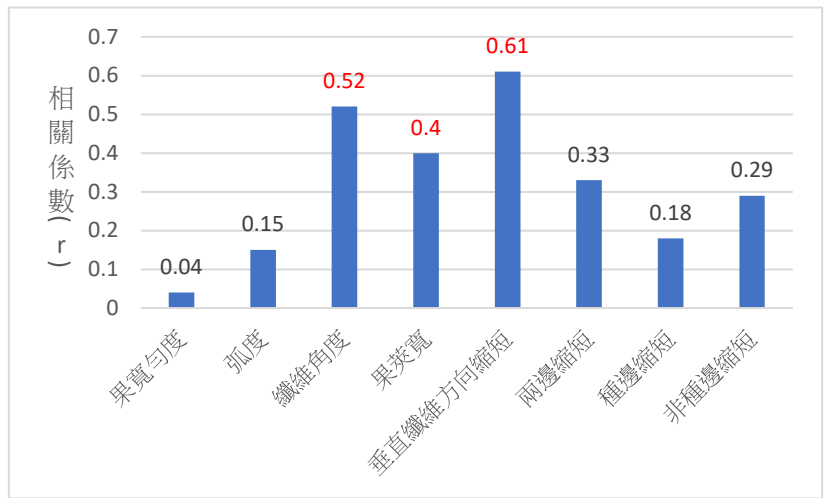


圖 67：果莢各造型與捲度之相關性。

1.4cm~1.9cm (見圖 73)纖維垂直方向收縮大約介於 5%~25%之間 (見圖 74)。兩側縫合線縮短比例數值大多為負，可知果莢開裂時一邊收縮另一邊則脹大 (見圖 75)。種子邊扮演收縮的一邊 (見圖 76)，而非種子邊為脹的一邊 (見圖 77)。(樣品選擇見附錄四)(以下圖說 n 為樣本數)

(二) 用相關係數分析後發現纖維垂直方向縮短、腰身對整體影響、纖維角度、腰身對局部影響和果莢寬與果莢捲度最有相關 (見圖 67、78)。垂直方向收縮比例越大、纖維角度越大、果莢寬越小及皆會使捲度越大。(完整數據見附錄五)

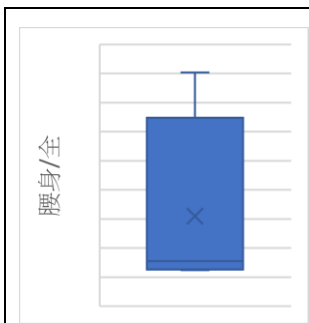


圖 68：腰身對整體影響 n=4

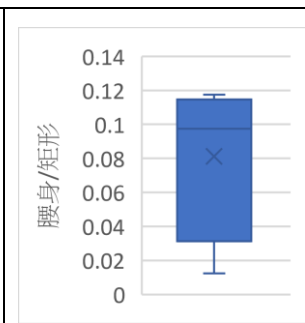


圖 69：腰身對局部影響 n=4

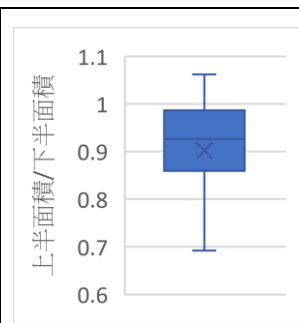


圖 70：果寬勻度 n=16

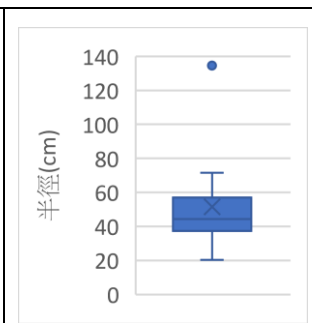


圖 71：弧度 n=16

<p>圖 72：纖維角度 n=16</p>	<p>圖 73：果莢寬 n=16</p>	<p>圖 74：垂直纖維方向收縮 n=16</p>	<p>圖 75：兩側縫合線收縮比例 n=16</p>
<p>圖 76：種子邊收縮 n=16</p>	<p>圖 77：非種子邊收縮 n=16</p>	<p>圖 78：腰身對果莢捲度之相關性</p>	

五、以 3D 列印線材模擬果莢，了解影響捲度因素

角度越大及寬度越窄果莢捲度提升

表 21：3D 列印片最終完成品與數據 (S 代表單節螺旋長，H 代表螺距，C 代表圓周長)

寬度 1.5cm			
<p>∠40° C=10.5</p>	<p>∠45° S=8.3 H=5.5 C=5.8</p>	<p>∠50° S=7.6 H=6 C=4.6</p>	<p>∠55° S=7.1 H=6.3 C=7.4</p>
寬度 2cm			
<p>∠55° S=7.1 H=6.3 C=7.4</p>	<p>∠55° S=7.1 H=6.3 C=7.4</p>	<p>∠55° S=7.1 H=6.3 C=7.4</p>	<p>∠55° S=7.1 H=6.3 C=7.4</p>

六、探討洋紫荊果莢螺旋中的數學

(一) 觀察洋紫荊的螺旋

- 內捲式，旋轉時纖維垂直地面，平行中間軸。
- 外翻式，旋轉時纖維平行地面，垂直中間軸。

(二) 以紙條模擬果莢，並找出數學規則

\overline{AB} 為單節螺旋長； \overline{AC} 為螺距； \overline{CB} 為旋轉圓周。

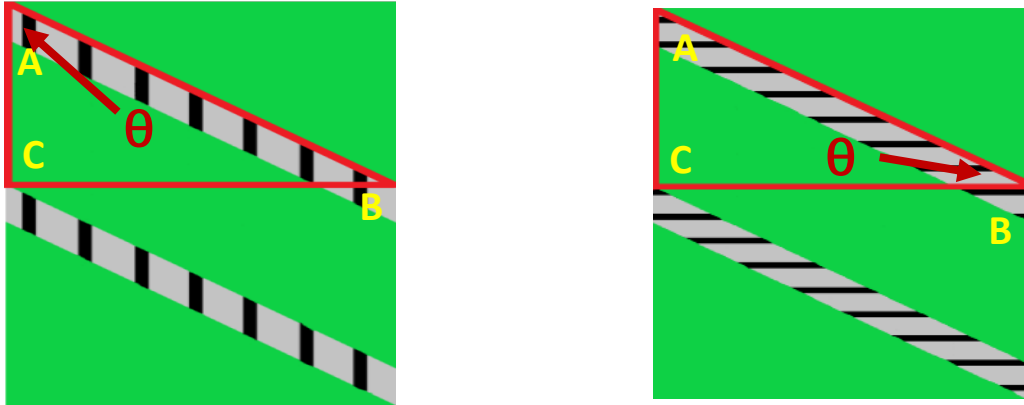


圖 79：左側為內捲果莢，右側為外翻果莢。綠色為旋轉圓周，灰色為果莢，黑線是纖維，纖維角度為 $\angle\theta$ 。內捲果莢公式為單節螺旋長=旋轉圓周/ $\sin\theta$ 、螺距=旋轉圓周/ $\tan\theta$ 。外翻果莢公式為單節螺旋長=旋轉圓周/ $\cos\theta$ 、螺距=旋轉圓周 $\times\tan\theta$

(三) 以紙條模擬外翻果莢不同纖維角度、果莢寬度及果莢旋轉圓周對捲曲的影響

表 22：果莢之不同型態的比較

果莢之不同纖維角度的比較			果莢之不同果莢寬的比較			果莢之不同旋轉圓周的比較		
角度	項目		寬度	項目		圓周	項目	
40 度	單節螺旋長	10cm	1.5cm	單節螺旋長	10cm	4.5cm	單節螺旋長	10cm
	螺距	7cm		螺距	7cm		螺距	7cm
55 度	單節螺旋長	13cm	2cm	單節螺旋長	10cm	7.5cm	單節螺旋長	6cm
	螺距	10cm		螺距	7cm		螺距	6cm

表 23：改變不同型態觀察對果莢捲曲的影響

角度越大，單節螺旋長和螺距越大	果莢寬並不影響單節螺旋長和螺距	旋轉圓周越大，單節螺旋長和螺距就越大

七、取其他五種果莢作為對照，以驗證果莢材質及結構對開裂及捲曲的影響

(一) 果莢的開裂及捲曲

				
<p>圖 80：左圖為小實孔雀豆從底部開裂(2020/3/28)右圖為果莢捲曲，種子宿存(2020/3/4)</p>		<p>圖 81：左圖為銀合歡果莢緩開，種子全掉落(2020/12/9)中間圖為果莢扭轉爆裂(2021/4/9)右圖為果莢爆開後變捲(2021/2/25)</p>		
				
<p>圖 82：左圖為鳳凰木果莢開裂，種子存留(2020/11/25)右圖為果莢分開，種子全掉(2021/11/26)</p>		<p>圖 83：水黃皮不開，適合水漂(2020/10/8)</p>	<p>圖 84：左圖為田菁果莢的種子卡入裂縫撐開(2020/11/27)右圖為種子離開果莢未捲曲(2020/11/27)</p>	

(二) 了解控制位置

由內果皮主控的有：洋紫荊外翻果莢、水黃皮以及田菁。外果皮主控的有鳳凰木及合歡。內+外果皮主控的有洋紫荊內捲果莢。都可控制的有小實孔雀豆。







表 24：分離五種果莢的各果皮拿去烘烤觀察捲曲

水黃皮	完整果莢 	內果皮 	外果皮 	銀合歡	完整果莢 	內果皮 	外果皮 	田菁	單片果莢 	內果皮 
鳳凰木	完整果莢(木質化) 	小實孔雀豆	完整果莢 	內果皮 	中間外果皮+內果皮 	兩邊外果皮+內果皮 				

(三) 比較各果莢的纖維排列

洋紫荊的纖維排列相互平行，為規律螺旋的原因；而田菁因為纖維平行果莢邊(直向排列)，所以只能 C 字形彎曲。


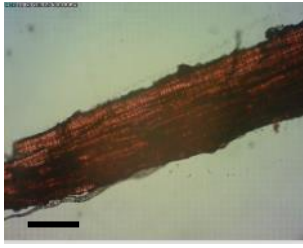
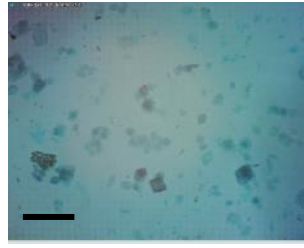


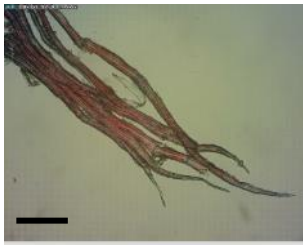

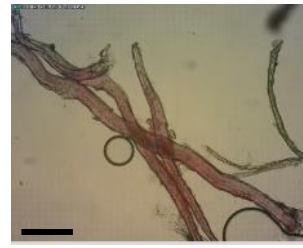
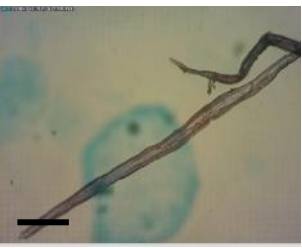


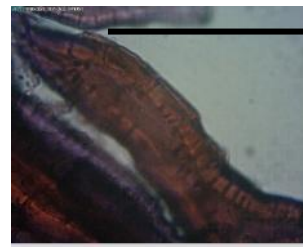
表 25：各果莢纖維排列方式 (scale：5cm)

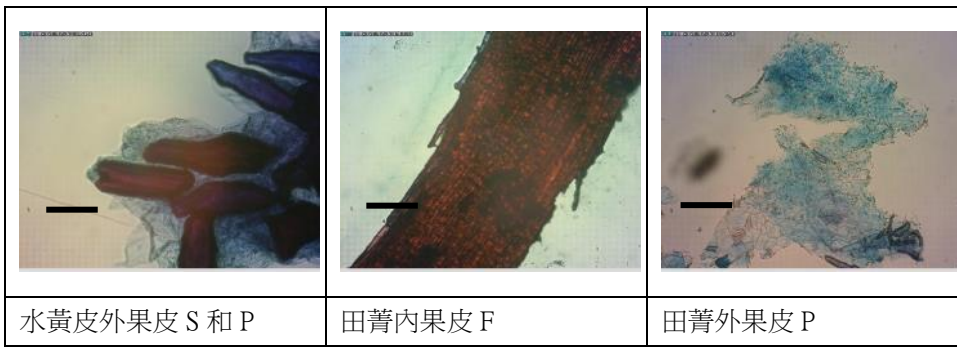
					
洋紫荊	小實孔雀豆	銀合歡	鳳凰木	水黃皮	田菁

(四) 了解五種果莢內部組織的種類及分布

1. 分離細胞並染色確認組織種類

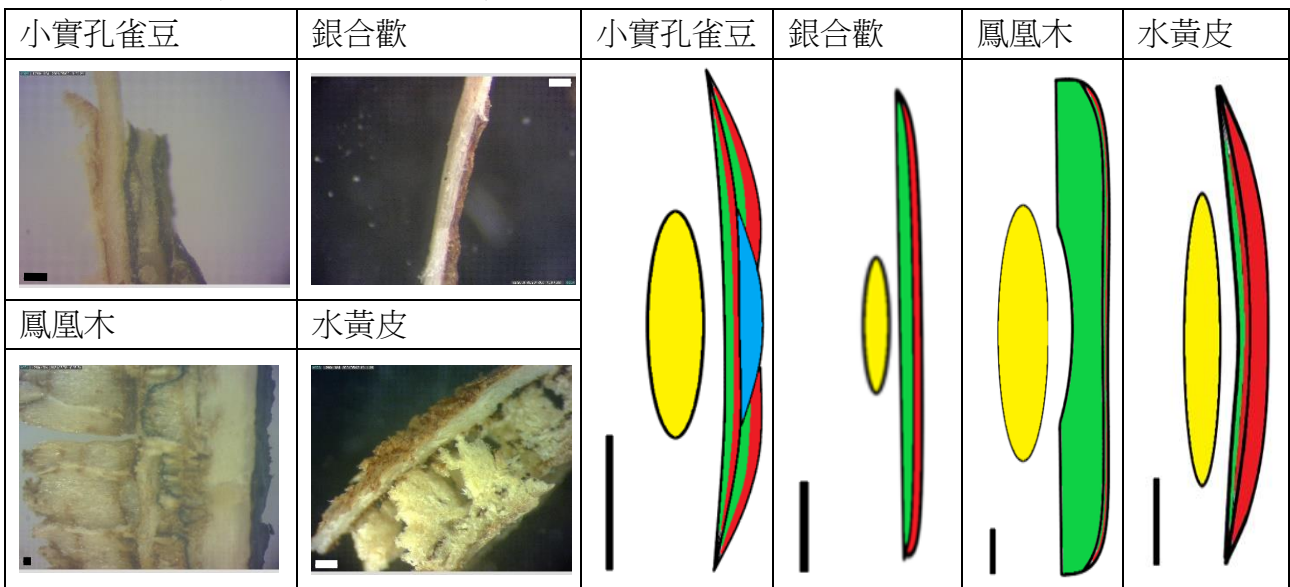
表 26：果莢組織單一細胞分離 (scale：0.1mm) (纖維=F、厚壁細胞=S、薄壁細胞=P)

			
小實孔雀豆內果皮 F	小實孔雀豆內果皮 S	小實孔雀豆中間外果皮 P	小實孔雀豆兩邊外果皮 F
			
小實孔雀豆兩邊外果皮 S	銀合歡內果皮 F	銀合歡外果皮 S	鳳凰木內果皮 F
			
鳳凰木外果皮 F	鳳凰木外果皮 S	水黃皮內果皮 F	水黃皮內果皮 S



2. 切果莢斷面觀察組織分布情況

表 27：不同果莢的組織分布 (左四張 scale : =0.1mm)※綠：纖維；紅：厚壁細胞；藍：薄壁組織；黃：種子 (右四張 Scale : 4mm)



3. 觀察果莢內部不同組織之形變

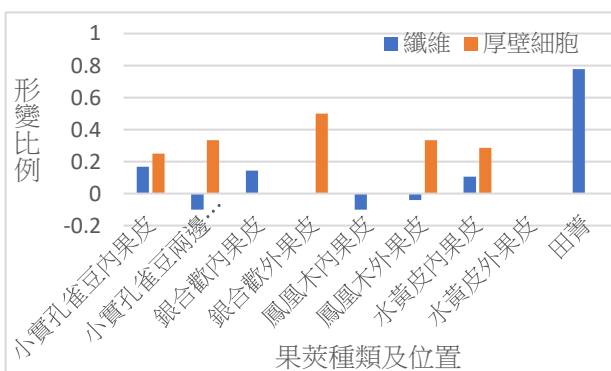


圖 85：不同果莢內部組織吸水的形變，纖維在各果莢表現不一，厚壁細胞形變量較多

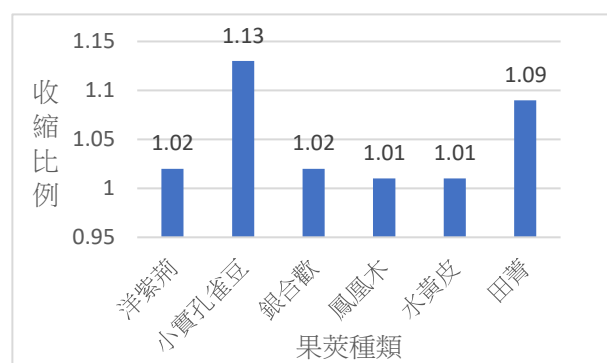


圖 86：各果莢斷面收縮比之比較，小實孔雀豆收縮比最大

柒、討論

一、觀察洋紫荊果莢

(一) 觀察洋紫荊果莢成長及其外觀特徵

洋紫荊在 9~10 月會開花、11 月結果、果莢在 4 月會成熟變咖啡色且果莢會開始開裂，種子很多在開裂時就掉落。4 月剛開時不捲。接著變內捲式捲曲，內果皮向內捲使外果皮外露；8 月時，內捲果莢會逐漸轉為外翻，內果皮向外翻使內果皮翻到外側，本研究首次發現內捲及外翻現象，從前無文獻記載。

(二) 了解果莢開裂模式

在野外有觀察到果莢緩開、爆開這兩種開裂模式。在南部氣候較為乾燥炎熱的區域，多為爆開，常聽到爆開的聲響；而在北部氣候較南部濕冷，常見緩開，推測空氣中溫溼度的不同可能會影響果莢的形變程度。其中爆開的模式，可以在一瞬間大力地將種子散彈彈出，使其分散傳播到較遠的地方，增加植物拓展生長地盤的機會。而緩開模式則是逐漸開裂讓種子落腳在母株附近，以確保附近有養分的土壤能夠讓種子發芽長大。

觀察緩開果莢的開裂情形，發現當捲度增加時，不一定會使原本留存在果莢上的種子離開，推測果莢捲曲必須加上種柄弱化，才能進行傳播。

(三) 探討果莢爆開動力學

在野外觀察果莢，因為開裂後果莢很快形變，都是看到捲曲的，所以推測種子是借由果莢捲曲傳播，後來看到果莢爆開不捲，且上面種子全數離去，才知道果莢不捲就可以傳播種子。

發現果莢會爆開後想了解爆開的傳播距離，但枝上果莢爆開速度極快且環境雜亂，找不到果莢對應的種子，所以將果莢摘下置於實驗室觀察，仍可自然爆開，測得種子可飛到 9 公尺，果莢彈到 4 公尺。

覺得種子可以彈到很遠，所以想計算爆開時種子彈出力大小，為此需捕捉種子離開果莢的瞬間。首先在野外錄下爆開影像觀察，發現種子朝果莢兩側噴飛，果莢有時也會彈飛。但由於果莢生長方向不一定而難以拍攝，所以將果莢摘下在乾燥炎熱時架在適合觀察處，利用陽光熱度使其爆開。再來，經測試後發現加熱會促使果莢爆開且不影響爆開情況。先以烤肉爐加熱果莢，果莢溫度落在 40~60 度，加熱 1 小時左右才爆；又試了溫度更高的熱風槍，果莢溫度落在 70~80 度，加熱 15 分鐘即爆開；在實驗過程中，發現果莢加熱後快速冷卻，就會更快爆開，這是個突破性的作法，可以將實驗時間縮短，且提高果莢爆開率，就可以用高速攝影機拍攝果莢。因此以 170 度高溫的小烤箱加熱果莢，將其取出後快速架起，等待冷卻後爆開，過程不出 6 分鐘。雖有成功拍攝爆開，因使用相機幀率過低，無法測量出種子離開果莢的時間，所以不能計算出果莢施力的時間也就無法計算彈出力，只能得到種子噴飛速度平均 7.15m/sec，而平均最遠距離為 6.28cm。

為此，我們帶著小烤箱造訪台大機械系實驗室借用 2500fps 的高速攝影機，進行實驗，成功得出種子彈出力介於 0.0959~0.55N。

二、了解洋紫荊果莢材質特性

(一) 比較內捲和外翻果莢的含水率

洋紫荊果莢成熟未開裂時含水量 34%~38%，降到 14% 才會開。外翻果莢因外果皮乾裂脆化，含水率更低。

(二) 探討環境因子之變動對果莢開裂後捲曲程度的影響

1. 比較果莢與其他材質的吸水情形

在戶外，洋紫荊果莢在中午高溫、空間含水低的情況下捲度最高，將果莢放置戶外觀察並秤重，發現果莢只要失水 0.07g 便能提升節數，捲度調控十分靈敏。想量了解溫度和濕度影響程度各如何？打算使用溫溼度箱控制溫度或濕度對同一果莢進行實驗。

2. 探討溫度及濕度改變對同一果莢捲度的影響

當控制溫度，濕度逐漸降低時。果莢捲度提升，重量減輕，空間含水量也隨之降低，推測空氣中的含水量會影響果莢吸放水分。

當控制濕度，溫度逐漸增加時。果莢捲度及重量變化小，推測溫度不影響捲度。但發現果莢表面溫度並不隨控制箱的溫度提升，放置戶外照射陽光卻會升溫，推測它不吸收傳導熱會吸收輻射熱。

3. 了解輻射熱對果莢捲度的影響

研究加以燈泡照射，果莢捲度提升，重量減輕，顯示輻射熱會影響果莢吸放水分。

(三) 了解果莢傳導能力

觀察洋紫荊果莢的吸水後，發現吸水現象不明顯。在微觀觀察後推測因其纖維排列太過緊密、分層分明，無混雜其他種類細胞，再加上水的表面張力，導致水分無法進入，也無法在表面移動。

由此可推論果莢只吸收接觸型的水分，例如空氣中的水蒸氣。纖維面的疏水性最佳可形成防水層，避免種子未傳播前就先發芽。

三、探討洋紫荊果莢內部組織如何造成開裂

(一) 了解控制果莢開裂及捲曲的位置

觀察果莢時發現果莢構造有分層，為了解果莢開裂之控制位置，徒手分離各層，個別烘烤並觀察其變化。

1. 內捲果莢：雖因外果皮堅韌難以去除，分離的稍顯破碎，但仔細觀察後發現其捲曲有一中心軸（見圖 87），且為平行外果皮紋路（垂直纖維）方向捲曲（見圖 88、89），再加上完整果莢較內果皮捲，所以內外果皮皆對捲曲有貢獻，兩者一同控制。



圖 87：外果皮捲曲有中心軸



圖 88：紅色箭頭為外果皮紋路



圖 89：紅色箭頭為外果皮紋路，綠色為纖維斷面

2. 老化外翻果莢：外果皮薄而易碎、捲法凌亂，去除後捲曲照常；內果皮單獨作用則更捲，故控制位置為內果皮。

(二) 了解控制位置組織如何作用導致果莢開裂。

果莢內果皮由內至外為纖維、厚壁細胞，兩者相互垂直排列；外果皮為薄壁細胞。(見圖 90)

分別計算了內捲及外翻的平行及垂直纖維收縮比例，發現內捲果莢因外果皮的捲曲是平行外果皮紋路，而外果皮紋路垂直纖維(見圖 89)，所以加成了垂直纖維方向的收縮，為垂直纖維方向捲；而外翻的果莢因外果皮薄壁細胞脆化而無法收縮，變平行方向收縮較垂直多，為平行纖維方向捲(見圖 91)。

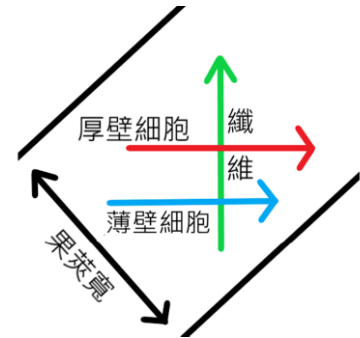


圖 90：纖維、厚壁細胞及薄壁細胞紋路的方向

四、了解果莢外部型態對開裂後捲曲情況的影響

洋紫荊果莢外型各有差異。本實驗藉由相關係數統計果莢，得出果莢各型態對捲度的影響。相關係數數值判別依據陳(2007)：相關係數 0.25 以下為缺乏相關，0.25~0.5 為相關不強，0.5~0.75 為良好相關，0.75 以上為相關性非常好；由圖 21 可得，洋紫荊果莢捲度與纖維垂直方向縮短、腰身和纖維角度最為相關。而果莢寬雖然相關性小於 0.5，但腰身其實就是果莢寬的變化，於是也就將果莢寬視為與捲度有相關。

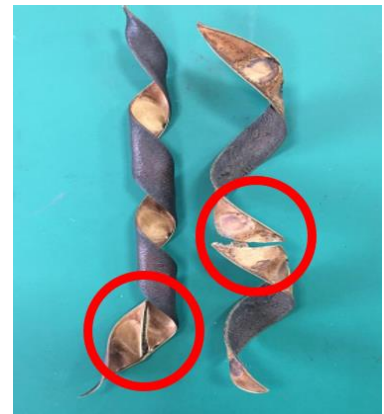


圖 91：左為內捲，右為外翻，圈起位置為纖維斷面

得出這些因子與果莢捲曲有相關後，想要了解各型態的影響，但由於果莢內包含各種型態，無法控制變因，打算利用 3D 模擬來幫助分析。

五、以 3D 列印線材模擬果莢，了解影響捲度因素

由於洋紫荊果莢內包含各種型態，所以以模擬來幫助分析。由相關係數分析可知。垂直纖維方向縮短、腰身及纖維角度與果莢捲度最為相關。而腰身特徵即是寬度的變化，故本研究決定模擬纖維角度及寬度，而垂直纖維方向縮短即為一種收縮程度，是改變拉伸力量，本研究尚未做。

因為可以自由調整及控制變因；而厚壁細胞的模擬，首先選擇糝糊，因為其乾後會收縮，但收縮的比例會因塗抹的均勻度不同而改變，所以改成利用乳膠手套的可拉撐性，模擬收縮力量；而因為模擬材料無纖維與厚壁細胞的型態差異，所以須人工給予方向，在拉撐及黏附時，拉撐的方向須與纖維方向平行。模擬結果為纖維角度越大及寬度越窄會使果莢捲度提升，推測是因為在一樣的寬度下，角度越大纖維越短，在一樣的角度下寬度越窄纖維越短，然而在一樣的收縮比例下，纖維越短，旋轉圓周越小，同捲度提升。

在紙條繞圓棍模擬果莢中，寬度不影響捲度是錯誤的，是因紙條纏綁在棒上，將模擬限制成相同的旋轉圓周，但實際上並非如此，3D 列印的情況更為符合果莢，結果也與相關係數相符，成功得出纖維角度與寬度如何影響捲度。

在紙條繞圓棍模擬果莢中，寬度不影響捲度是錯誤的，是因紙條纏綁在棒上，將模擬限制成相同的旋轉圓周，但實際上並非如此，3D 列印的情況更為符合果莢，結果也與相關係數相符，成功得出纖維角度與寬度如何影響捲度。

六、探討洋紫荊果莢螺旋中的數學

觀察洋紫荊果莢捲曲時會繞中心旋轉，且果莢捲曲十分規律，推測可推導出數學公式。利用不同的纏繞方式做出外翻果莢及內捲果莢的模型（見圖 79），並且在其中找到三角形，最後利用三角函數的關係成功推導出公式。

七、取其他五種果莢作為對照，以驗證果莢材質及結構對開裂及捲曲的影響

在洋紫荊及五種果莢中有四種開裂模式，分別是爆開、開一小縫、邊捲邊開及不開裂。

(一) 爆開：洋紫荊、銀合歡

爆開是因果莢材質均勻，共同作用下力量大，可以瞬間爆開；洋紫荊果莢早期外果皮堅韌，提升果莢的剛性，使爆開力量更大，有時果莢兩片會被彈飛。

兩者的爆開方式不同，洋紫荊因為內外果皮一起控制且內果皮厚壁組織形變較多，所以向內捲，把果莢撐開，力量較大，種子可以被彈到 9 公尺；銀合歡是外果皮的厚壁細胞形變而捲曲帶動內果皮的纖維，所以向外翻，把果莢拉開，力量較小，種子只能被彈到 60 公分遠。

(二) 開一小縫；鳳凰木、田菁

鳳凰木因為木質化嚴重且果莢十分厚實，所以果莢只能微微彎曲使果莢開裂，種子會因重力而掉落；而田菁因為纖維是直向排列，所以不能捲曲，只能 C 字形彎曲，風會吹拂枝條使種子從縫隙甩出。由田菁得知，捲曲是因果莢纖維的斜向排列。

(三) 邊捲邊開：小實孔雀豆

小實孔雀豆有獨特的兩邊外果皮構造且其平行果莢邊，收縮力量很大可以大幅拉動果莢，但是因為果莢的材質不均勻，收縮不均勻，所以無法爆開，只能邊捲邊開，有利其顯露宿存種子。

(四) 不開裂：水黃皮

水黃皮是海漂植物，因為縫合線緊密，且外果皮木質化也嚴重，所以果莢難以開裂，會在海上漂流，等到縫合線弱化才會開裂傳播。

八、豆科果莢開裂與捲曲的原因

(一) 開裂：果莢開裂是因兩層材質的差異。由纖維、厚壁細胞及薄壁細胞以不同排列與厚度造成。厚壁細胞形變程度最大。

(二) 捲曲及規律：纖維以果莢邊為基準斜向排列，斜向排列造成螺旋，若纖維間排列越平行，捲曲越規律。

(三) 捲度

由 3D 列印模擬得知果莢寬度、纖維角度與捲度有相關，比對了四種果莢(田菁不捲曲，水黃皮不開裂)，整理出下表。小實孔雀豆因為寬度最窄、纖維角度也大再加上收縮比例最高，導致旋轉圓周最小，捲度最大；而鳳凰木因為寬度最寬、纖維角度最小再加收縮比例最低，導致旋轉圓周最大，捲度最低。可得知寬度越窄、纖維角度越大及收縮比例越大使捲度提升為形成各果莢捲度的因素。

表 28：四種果莢捲度、寬度及纖維角度比對表

果莢 \ 項目	窄度	纖維角度	收縮比例	旋轉圓周	捲度
洋紫荊	第二	第三	第二(並列)	第二	第二
小實孔雀豆	最窄	第二	最高	最小	最大
銀合歡	第三	最大	第二(並列)	第三	第三
鳳凰木	第四	第四	第四	第四	第四

九、本研究之創見

根據 Armon *et al.* (2011) 的研究，使用 X 光分析果莢構造，發現有兩方向的纖維互相垂直，導致捲曲。但本研究以組織切片和染色的方法，發現果莢內有三層組織，由外而內是薄壁細胞、厚壁細胞及纖維。薄壁細胞與厚壁細胞彼此平行，纖維與其垂直。果莢爆開後，會內捲，內果皮的纖維及厚壁細胞會按照外果皮薄壁細胞的方向捲曲。外翻時，外果皮脫落，厚壁細胞會按照纖維的方向捲曲。本研究對組成細胞有較詳細的說明，且兩類型的捲法也是首度報導。

科展作品「旋轉乾坤」中 (歐 *et al.*, 2015)，有提到洋紫荊的捲曲原因及原理，但是其論點與本報告不同，以下整理出不同點。

表 29：與旋轉乾坤之比較

報告項目	「旋轉乾坤」	本報告
型態觀察方式	觀察果莢	1.除了觀察，還增加了取樣數做統計 2.首次發現果莢有兩種捲法 3.顯微觀察 4.取 5 種果莢作為對照
模擬方式	使用鋁箔及紙片	3D 列印(高溫尼龍線材、乳膠手套、環氧樹脂)
果莢捲曲動力來源	纖維之間密合的力和收縮的力 (單一組織)	果皮由外果皮的薄壁組織及內果皮的厚壁細胞和纖維組成，其中厚壁細胞收縮最大，位在中層薄壁和厚壁的收縮方向相同，爆開後，薄壁細胞限制厚壁細胞的收縮，呈現內捲型捲法，內果皮會照外果皮的方向捲曲，垂直纖維方向收縮大於平行方向。果莢老化時，外果皮脫落，厚壁細胞不再被限制，收縮較大，就形成外翻式的捲法，垂直纖維方向收縮力下降，平行方向收縮力上升

捌、結論

- 一、研究首度發現果莢有內捲外翻不同捲法，在捲之前大部分種子掉落，捲度隨環境改變果莢有緩開及爆開，爆開果莢的種子最遠達 9 公尺，速率 7.2m/s，彈出力最大 0.55N。
- 二、果莢水分降至 14%時即會開裂。且因果莢纖維排列緊密導致果莢對水分及熱傳導不佳，但可吸收接觸型的水分，因應環境溫溼度及輻射熱改變捲度。
- 三、果莢有三層組織，由內而外為：纖維、厚壁細胞及薄壁細胞，厚壁細胞收縮最多，因各層的不同厚度及排列導致不同收縮方向。
- 四、分析 20 根果莢，發現垂直纖維方向收縮程度、腰身縊縮面積、纖維角度和果莢寬與捲度最為相關。
- 五、以 3D 線材加上乳膠模擬果莢，發現纖維角度越大、寬度越小使捲度提升。
- 六、內捲螺旋的數學規則為單節螺旋長=旋轉圓周/ $\sin\theta$ ；螺距=旋轉圓周/ $\tan\theta$ 。外翻的為單節螺旋長=旋轉圓周/ $\cos\theta$ ；螺距=旋轉圓周 $\times\tan\theta$ 。
- 七、取其他五種果莢作為對照，以驗證果莢材質及結構對開裂及捲曲的影響，纖維斜向造成螺旋，越平行越規律，各果莢已演化出特有的開裂與捲曲幫助傳播。

玖、參考文獻

- 一、莊溪 (2000 年)。植物分科索引。認識植物。民 109 年 11 月 18 日，取自 <http://kplant.biodiv.tw/index.htm>。
- 二、陳加忠 (2007)。相關係數之介紹：國立中興大學生醫研究之統計方法。民 109 年 5 月 25 日，取自 <https://docs.google.com/document/d/15fHwcB6hINjGoJwOYoDVMeLqQYCHz1l2/edit>。
- 三、歐陽琦，吳啟豪，張馨文 (2015)。旋轉乾坤。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。民 109 年 9 月 7 日，取自 <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=12572>
- 四、蔡淑華 (2012)。植物解剖學。薄壁組織、厚角組織、厚壁組織、木質部。臺北市：世界書局。(66-98 頁)。
- 五、Anahit, G., & Angela, H. (2018) Snap, crack and pop of explosive fruit. *Current Opinion in Genetics & Development*. 51: 31-36. Retrieved. December 29, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959437X1830011X>
- 六、Armon, S., Efrati, E., Kupferman, R., & Sharon, E. (2011) Geometry and mechanics in the opening of chiral seed pods. *Science*. vol 333: 1726-1730. Retrieved. December 30, 2020, from <https://science.sciencemag.org/content/333/6050/1726.full>
- 七、Qiuying, Z., Bingjie, T., CHangkai, L., & Xiaobing, L. (2018) Pod anatomy, morphology and dehiscing forces in pod dehiscence of soybean. *Flora*. vol 248: 48-53. Retrieved. January 3, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0367253018301439>
- 八、Rivka, E., & Yael, A. (2014) Insights into the microstructures of hygroscopic movement in plant seed dispersal. *Plant Science*. vol 223: 124-133. Retrieved. May 31, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168945214000661>

【評語】 030312

1. 由校園中觀察到洋紫荊果莢螺旋兩種捲法，進而研究分析其捲曲的規律，提出果莢形成內捲式螺旋與外翻型螺旋的機制，源自於果皮的三種細胞薄壁細胞、厚壁細胞及纖維的排列及厚度不同導致，透過一系列試驗驗證想法並獲初步結論。作品觀察仔細，思考邏輯與驗證過程表現令人驚豔。
2. 本研究的目的、過程與框架清楚且聚焦，適切地整理前人的文獻資料，並有系統地收集數據及統計分析，數據足以證實結論及釋義，是很好的科展作品。
3. 實驗中善用各種儀器工具協助觀察，並運用生物學、數學、物理學、工程學及 3D 列印相關知識來分析與解釋洋紫荊果莢開裂的原因並建立模型，深具科學精神及態度。
4. 作者說明作品研究成果的口語表達力佳，台風穩健，回答問題侃侃而談，態度大方自信，表現令人印象深刻。
5. 作品說明書部中照片未標比例尺(如圖 1-圖 4)無法清楚了解尺度大小。同一份報告書中，宜使有相同顏色代表(如圖 54 與表 27)，但在圖 85 中卻用不同色柱呈現，易使讀者混亂、誤解。
6. 作品明書中部分實驗結果未見標準差，或未顯示該實驗樣品數，建議應仔細檢查圖表且各組實驗的重複試驗最好有三重複以上為佳。

作品簡報

中華民國第61屆中小學科學展覽會

「螺」中有因，「旋」中有序：

探討洋紫荊果莢規律螺旋開裂之因

組別：國中組

科別：生物科

編號：030312

研究背景及目的



圖1：野外標記觀察



圖2：研發觀察爆開的方法



圖3：切片剖析內部結構



觀察

開裂

捲法

傳播動力學



圖 4：緩開



圖 5：開裂變大



圖 6：捲幫種子掉



圖 7：爆開



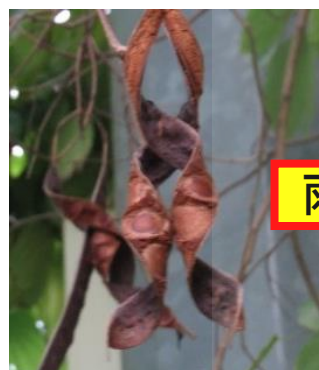
圖 8：剛爆開不捲



圖 9：日曬後變捲



二個月



雨



晴



圖 10：捲度有重複性



圖 11：內捲兩個月後變外翻

數學規則

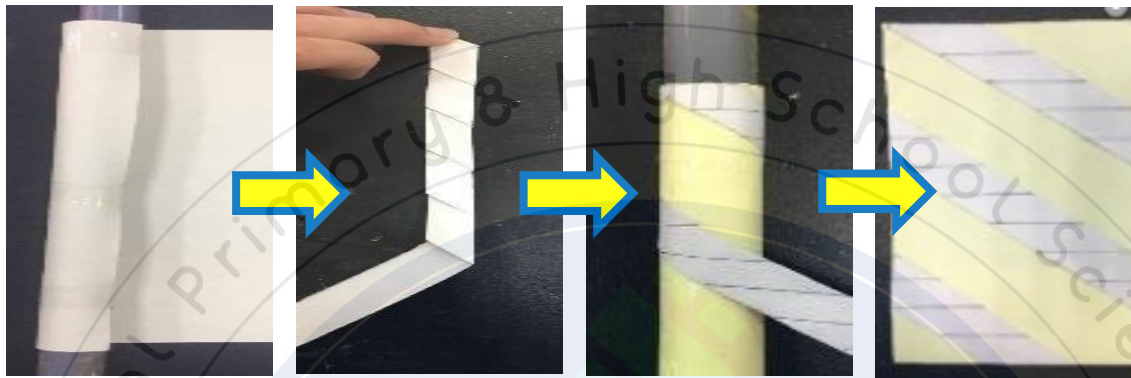


圖 12：製作模型

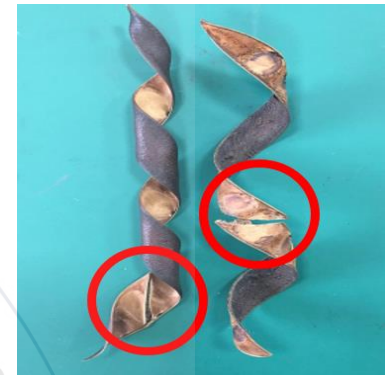


圖 13：兩種捲型

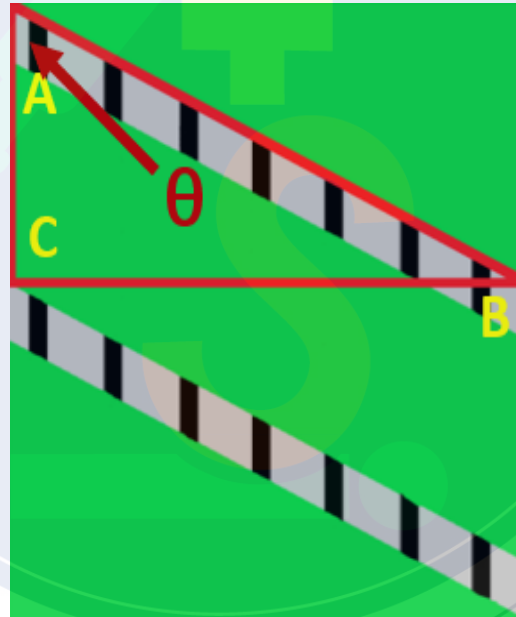
內捲

內捲

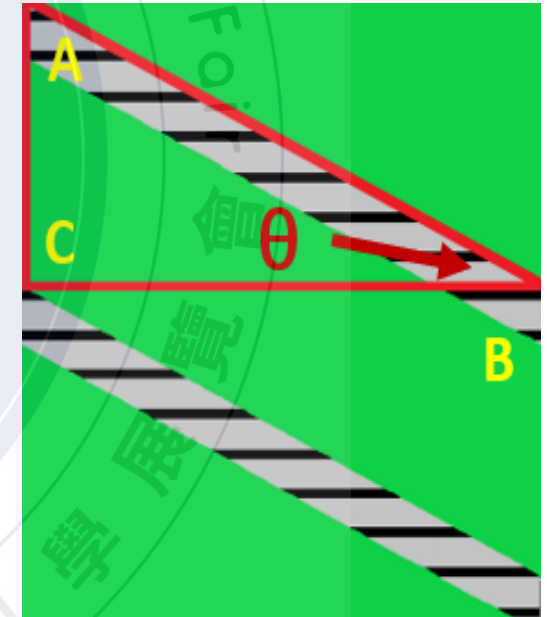
外翻



外翻



$$\sin\theta = \frac{\text{旋轉圓周}}{\text{單節螺旋長}}$$



$$\cos\theta = \frac{\text{旋轉圓周}}{\text{單節螺旋長}}$$

選擇果莢

小烤箱170度加熱4分鐘

毛巾保溫果莢快速架起

等待冷卻爆開

2500fps拍攝

圖14：研究研發觀察爆開的方法

果莢瞬間爆開過程



圖15：種子邊向



圖16：種子離開



圖17：種子全數離開



圖18：果莢噴飛



圖19：枝上爆開

VS



圖20：烤箱爆開

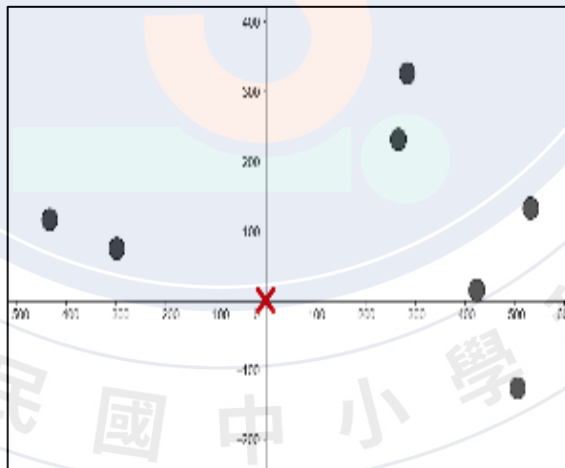


圖21：種子多分布在兩側

$$\begin{aligned}
 J &= m\Delta v \\
 &= (2.73e-4g)*8.853m/s \\
 &= F\Delta t \\
 &= F*0.0044s \\
 F &= 0.55N
 \end{aligned}$$

果莢材質

含水率的影響

果皮傳導能力



圖22：8:10 · 4捲

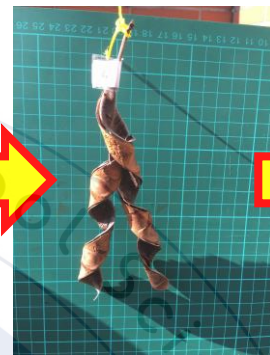


圖23：14:10 · 11捲



圖24：20:10 · 6捲

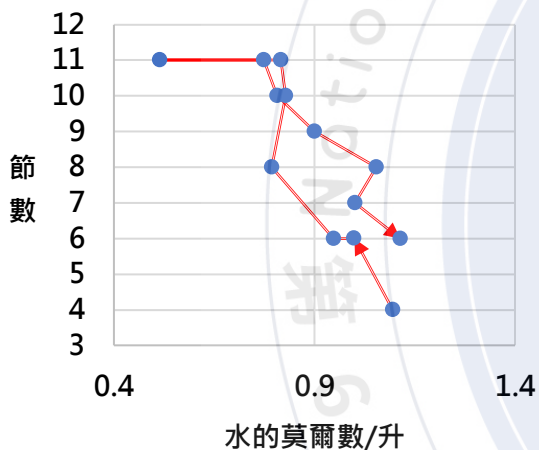


圖25：空間含水對節數的影響

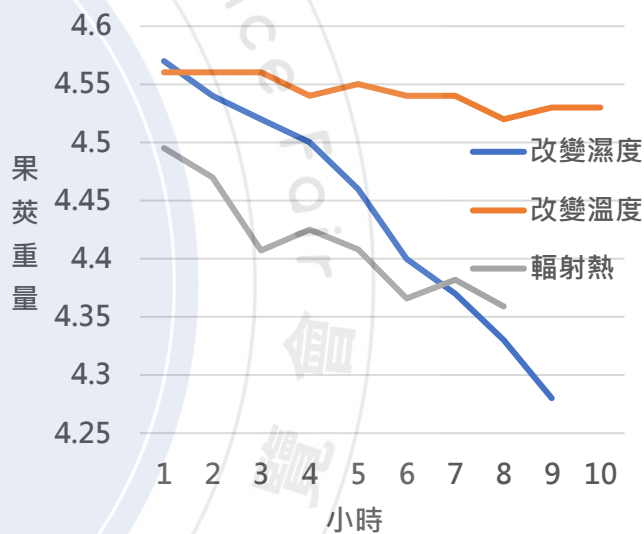


圖26：比較溫濕度及輻射熱的影響

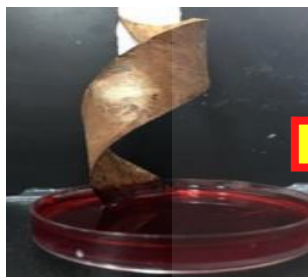


圖27：單點接觸水



圖28：水傳遞差



圖29：纖維防水

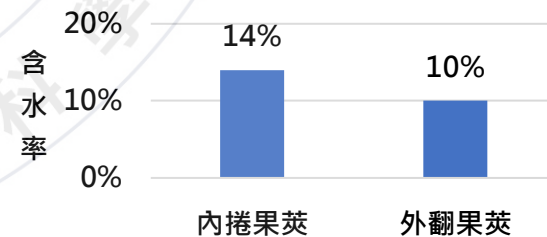


圖30：比較果莢含水率

開裂機制

主控果皮

細胞組成

收縮程度

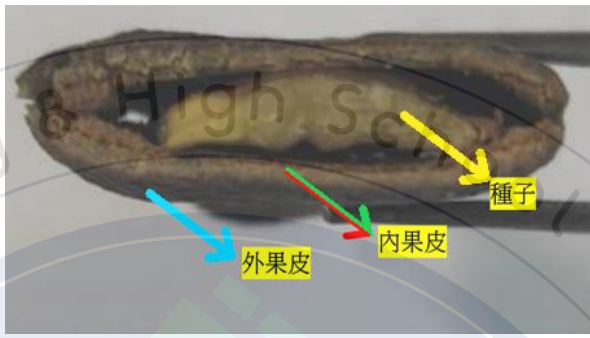


圖31：果莢橫切面

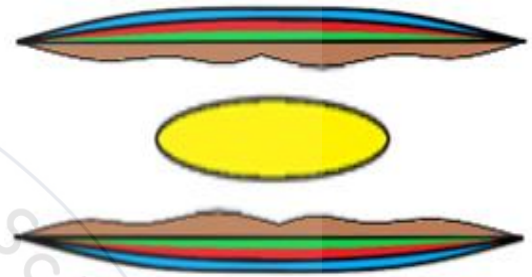


圖32：果莢橫切面



圖33：內捲型內外果皮一起控制



圖34：外翻型內果皮主控

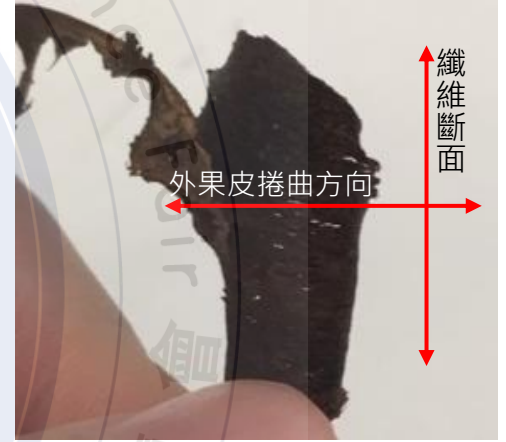


圖35：外果皮捲向

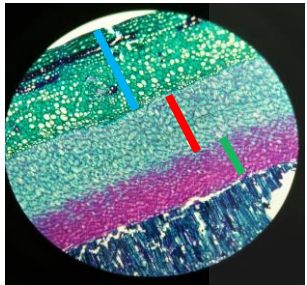


圖36：果莢橫切

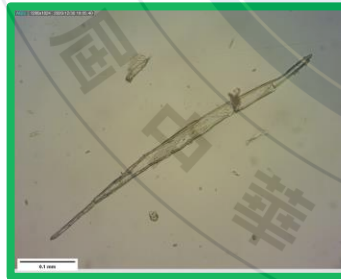


圖37：纖維

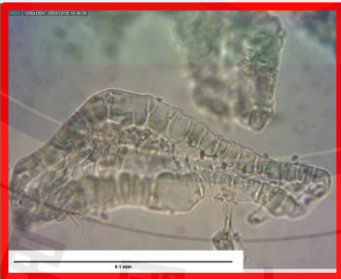


圖38：厚壁細胞

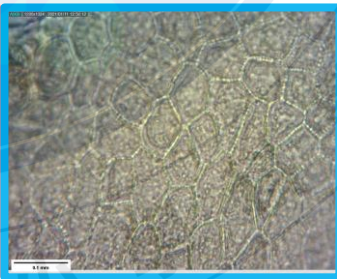


圖39：薄壁細胞

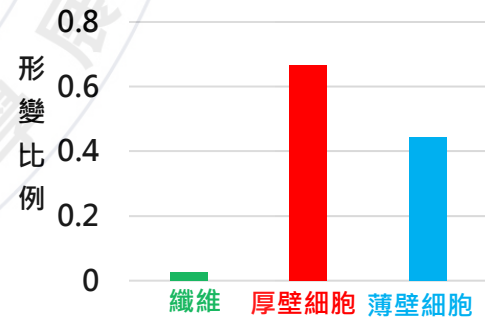


圖40：三種細胞形變比

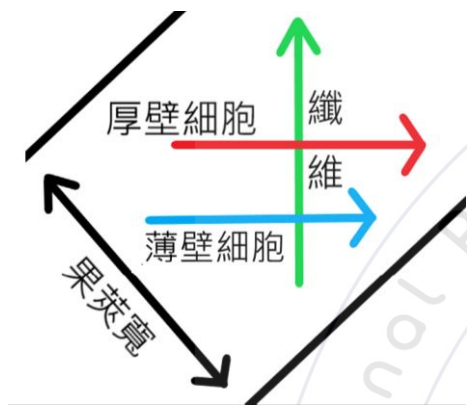


圖41:細胞間排列關係

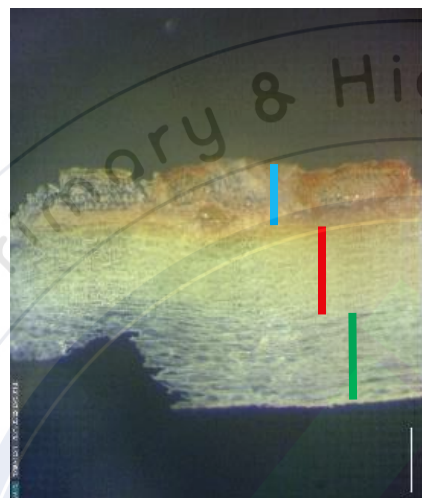


圖42:內捲纖維斷面

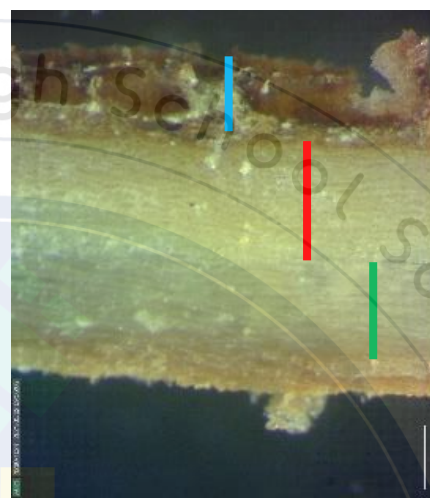


圖43:外翻纖維斷面

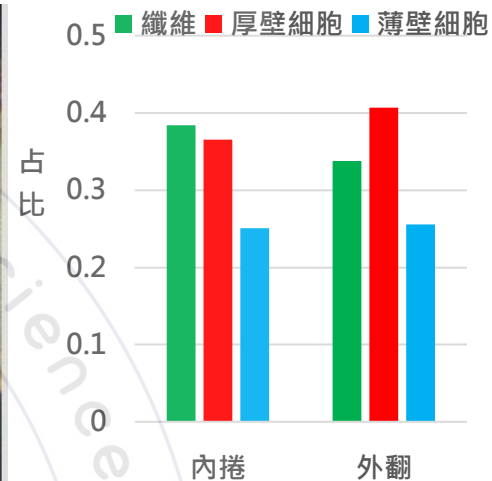


圖44:不同捲法細胞占比

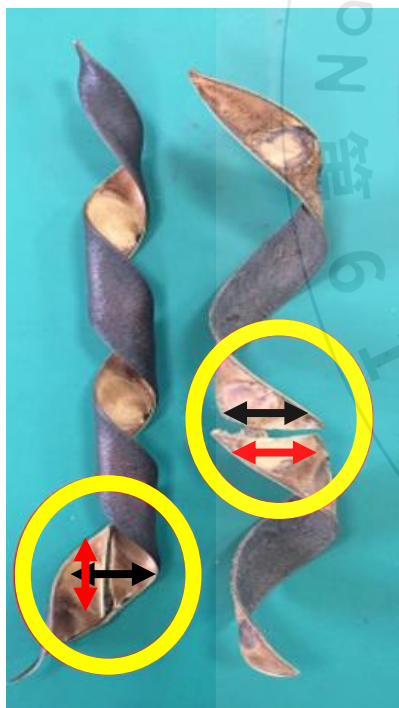


圖45:黑色是捲曲方向, 紅色是纖維斷面



圖46:平行纖維方向

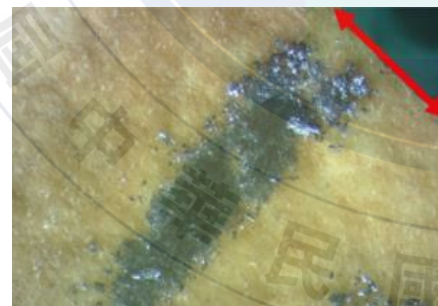


圖47:垂直纖維方向



圖48:平行及垂直纖維斷面

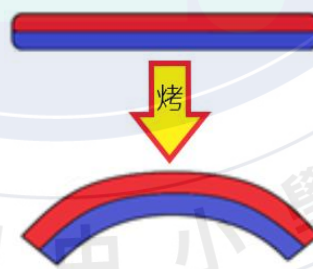


圖49:烤乾形變

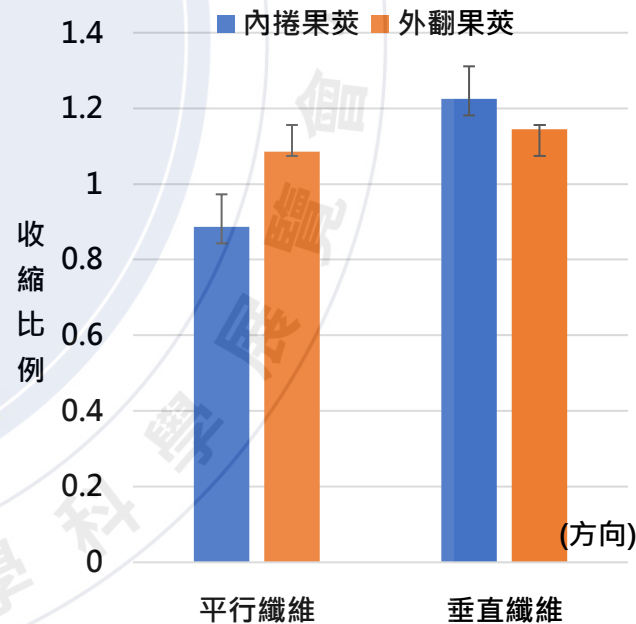


圖50:平行垂直纖維兩方向收縮比例

形態影響

統計
模擬



圖 51：垂直纖維縮短



圖 52：果莢寬

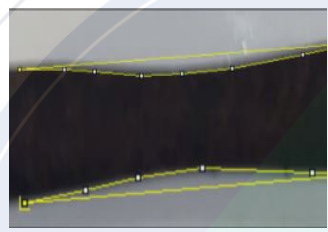


圖 53：腰身



圖 54：纖維角度

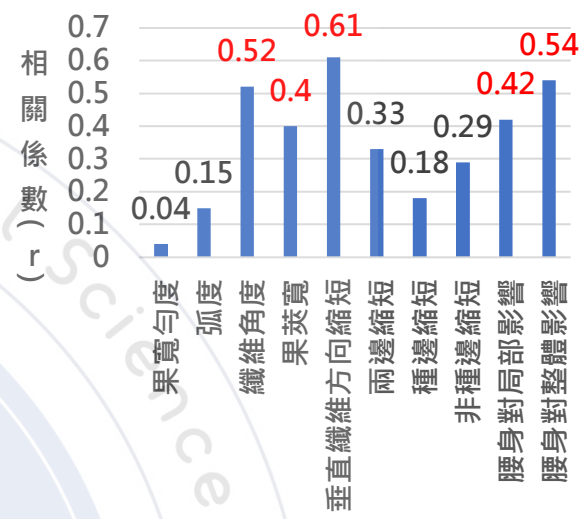


圖 55：果莢造型與捲度的相關性



圖 56：乳膠手套

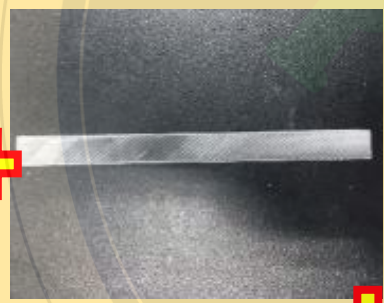


圖 57：高溫尼龍線材

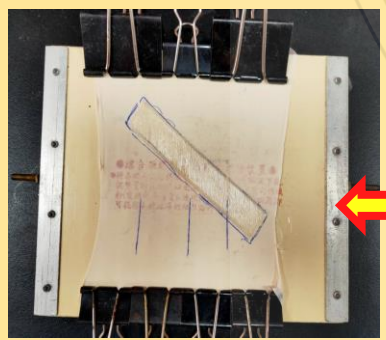


圖 59：環氧樹脂黏合



圖 58：拉伸乳膠

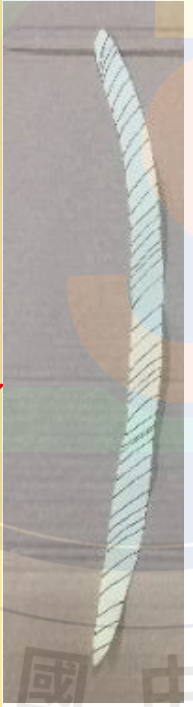
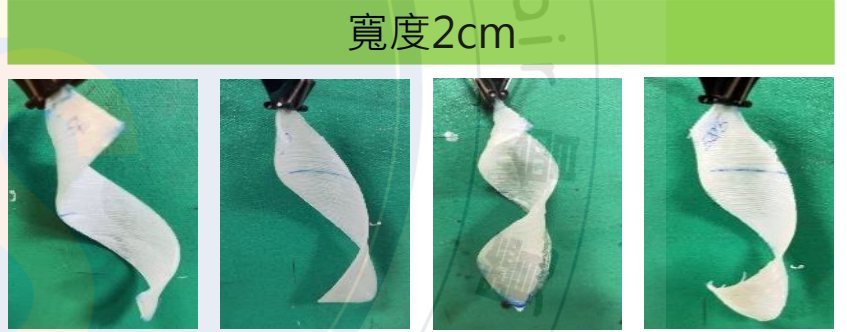
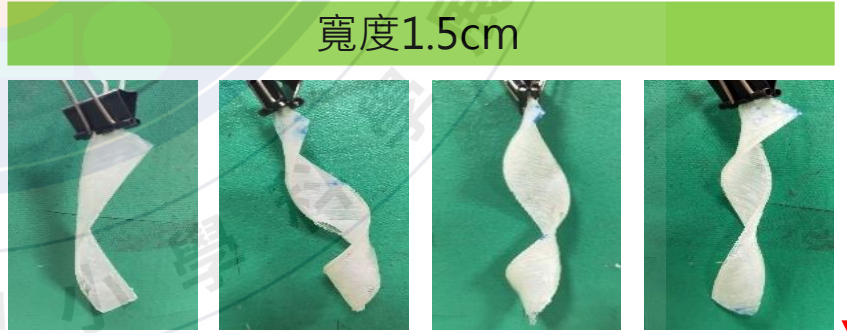


圖 60：纖維排列



寬度2cm



寬度1.5cm

捲度大 8

生殖意義

一 爆開：銀合歡 *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit



圖 61：有緩開及爆開



圖 62：外翻爆開



圖 63：只有外果皮收縮

分析五種果莢對照

二 邊捲邊開：小實孔雀豆 *Adenanthera microsperma* L 三 不開裂：水黃皮 *Pongamia pinnata* (L.) Pierre

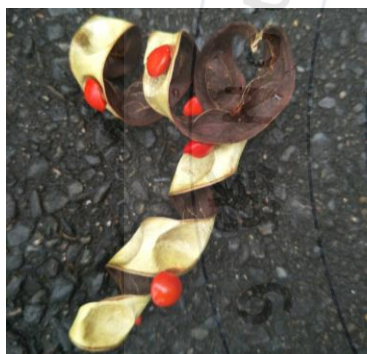


圖 64：捲度大



圖 65：邊捲邊開



圖 66：兩邊外皮

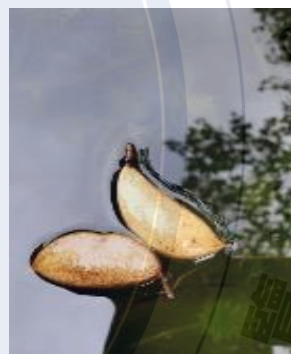


圖 67：適合水飄



圖 68：縫合弱化可捲曲

四 開一小縫：田菁 *Sesbania cannabiana* (Retz.) Poir



圖 69：風吹果莢種子掉



圖 70：C字彎曲



圖 71：直向排列



圖 72：種子因重力掉



圖 73：木質化嚴重⁹

小實孔雀豆 洋紫荊 銀合歡 鳳凰木



纖維排列



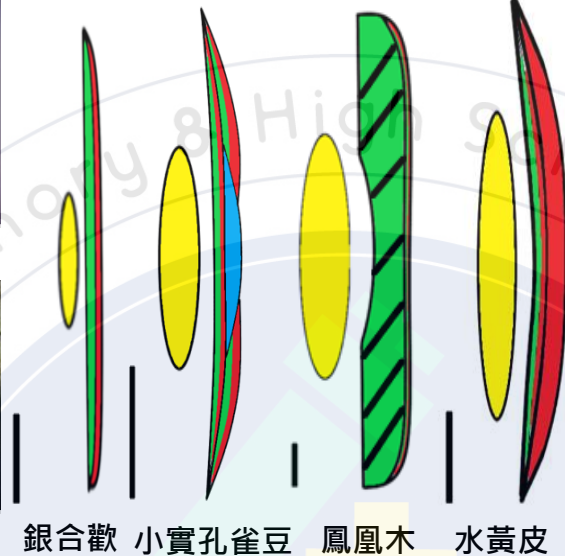
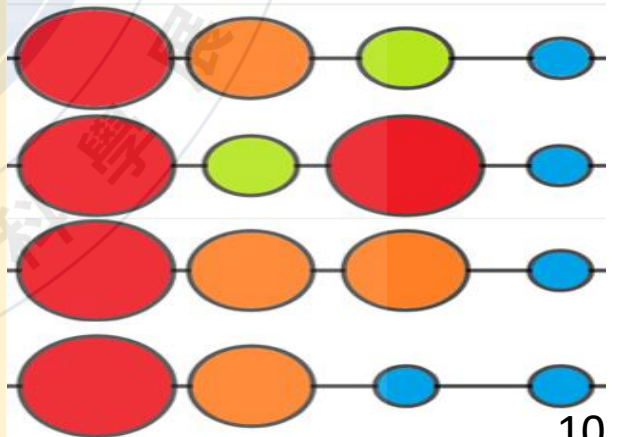
捲度

寬度

纖維角度

收縮比例

弧度



銀合歡 小實孔雀豆 鳳凰木 水黃皮



銀合歡



小實孔雀豆



鳳凰木



水黃皮

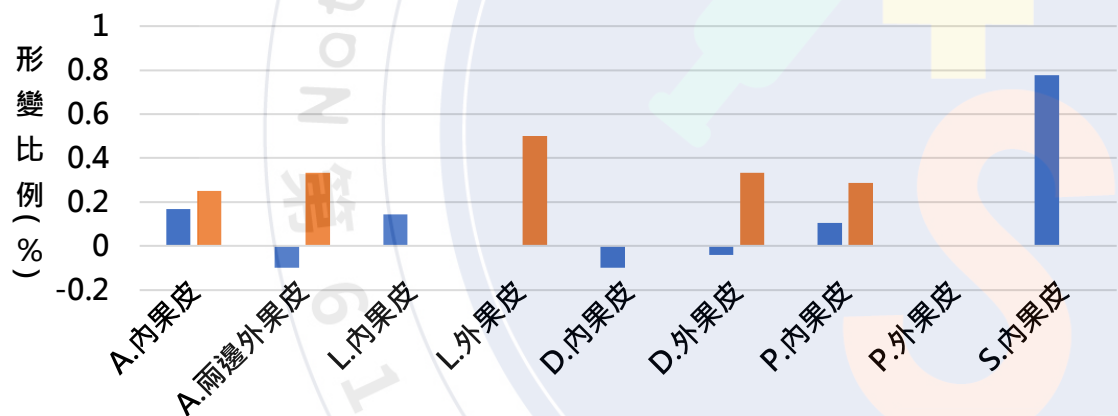


圖74：細胞吸水形變比例

纖維 厚壁細胞



圖75：平行纖維收縮比

創見與結論



一、歐陽琦·吳啟豪·張馨文。(2015)。旋轉乾坤。中華民國第55屆中小學科學展覽會。民109年9月7日·取自 <https://www.ntsec.edu.tw/ScienceContent.aspx?a=6821&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=12572>

二、Armon, S., Efrati, E., Kupferman, R., & Sharon, E. (2011). Geometry and mechanics in the opening of chiral seed pods. Science. vol 333: 1726-1730. Retrieved. December 30, 2020, from <https://science.sciencemag.org/content/333/6050/1726.full>