

新竹市第四十三屆中小學科學展覽會  
作品說明書

科別：生物組

組別：國中組

作品名稱：絲瓜的攀爬哲學—絲瓜捲鬚的神奇適應術

關鍵詞：絲瓜捲鬚莖、彈簧指數  $C$  、彈性係數  $k$

編號：

# 目錄

摘要.....	2
壹、前言 .....	3
貳、研究設器材及設備 .....	6
參、研究過程或方法 .....	8
肆、研究結果 .....	10
伍、討論 .....	19
陸、結論 .....	21
柒、參考文獻.....	22
捌、附錄.....	23

# 絲瓜的攀爬哲學—

## 絲瓜捲鬚的神奇適應術

### 摘要

本研究旨在探討絲瓜（Luffa）不同型態莖所產生的捲鬚莖特性，以及其在攀附不同直徑物體時的生物力學表現。透過拍攝絲瓜捲鬚莖及其切面，測量了直徑、螺寬、螺距及中心徑等基本參數，進而推算出彈簧指數  $C$  以進行比較。實驗結果顯示，捲鬚莖的結構特徵顯示出其在攀附過程中的適應性，在有攀附物時，絲瓜的捲鬚莖會出現較堅韌的結構以緊靠攀附物。此外，利用 ImageJ 軟體分析捲鬚莖剖面中的膠質纖維（G-fiber）比例，發現植物端的膠質纖維含量顯著高於攀附端，這表明絲瓜利用膠質纖維調整捲鬚莖的物理性質，以適應不同的攀附需求。透過伸長量的測量，應用虎克定律推算出彈性係數  $k$ ，結果顯示無論攀附物的直徑如何，捲鬚莖的彈性係數均呈現相似性。與未攀附物體的水平莖相比，攀附的捲鬚莖彈性係數較小，顯示其在形變上具有更高的靈活性，能有效調節植株與攀附物之間的距離，促進絲瓜的生長。本研究結果不僅揭示了絲瓜捲鬚莖的生物力學特性，亦為未來植物生理學及生態適應性研究提供了重要的實證基礎。

# 壹、前言

## 一、研究動機

當我們觀察隔壁鄰居在門口種的絲瓜時，會發現有些絲瓜的莖是攀附在竹竿上的，而有些則是匍匐在地面上。這讓我們感到非常好奇。在七年級的生物課上，老師提到絲瓜具有向觸性，能沿著物體向上攀爬，但並沒有提到為什麼有些絲瓜的莖會選擇在地上生長。因此，我們決定上網查找相關資料，發現佛手瓜的捲鬚莖因為彈簧指數 C、彈性係數 k、拉力以及內部結構等因素的不同，會影響其向觸性；這讓我們想透過實驗來研究絲瓜是否也會因為類似的原因，而展現出不同的向觸性行為。

## 二、研究目的

- (一) 測量絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖中不同端點的彈簧指數 C
- (二) 觀察絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖不同部位的橫切面並測量 G-fiber (膠質纖維) 的含量
- (三) 測量並計算絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖之彈性係數 k
- (四) 探討絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖其內部與外部構造的差異
- (五) 探討不同直徑攀附物對於絲瓜捲鬚莖之影響

## 三、文獻回顧

### (一) 絲瓜

絲瓜 (*Luffa aegyptiaca* Mill.)，屬葫蘆科 (Cucurbitaceae) 絲瓜屬，為典型藤本植物。其生育週期具顯著光溫敏感性，自播種至初生雌花分化約需 50-60 日，品種間存在花器分化時序差異。幼苗發育速率顯著，播後 4-5 日即完成萌芽，子葉展開後 14 日（約 4-6 片本葉期）可進行定植，營養生長期約 40 日即進入生殖階段，開花後 50 日達採收適期。葉片呈掌狀裂葉，葉緣具粗鋸齒；花器為單性雌雄異花同株，雄花序呈總狀花序腋生，花序軸可延伸逾 30 公分，依基頂向頂式 (basipetal) 逐次開放，單次花序通常著生 1-3 朵雄花；雌花單生葉腋，花梗長 1-5 公分。其發芽適溫為 25-28°C，營養生長最適溫區間為 20-30°C，當環境溫度低於 15°C 時生長遲緩，10°C 以下則呈現生理抑制現象。當缺乏可供攀附的支撐結構時，絲瓜的莖部將呈現無限生長 (indeterminate growth) 態勢（食農教育資訊整合平台，2025）。

## （二）莖部形態可塑性

絲瓜莖部具顯著形態可塑性（phenotypic plasticity）：當存在垂直攀附基質時，莖頂端特化形成螺旋狀捲鬚（tendril），我們稱此類具攀附能力的莖結構稱為直立莖（圖 1-1）；在無支撐基質條件下，莖部雖仍分化捲鬚但轉為匍匐生長，我們稱此類形態為水平莖（圖 1-2）。本研究特別設置直徑 1.25 cm 與 3.25 cm 之攀附柱體，據此將實驗組分為「攀附物直徑 1.25 cm 直立莖」與「攀附物直徑 3.25 cm 直立莖」進行比較分析（圖 1-3）。



圖 1-1 直立莖生長照



圖 1-2 水平莖生長照



圖 1-3 攀附物直徑 1.25cm 直立莖生長照

## （三）捲鬚之生物力學機制

捲鬚的機械特性源自細胞壁特化結構。研究指出（Tatyana Gorshkova et al., 2018），其細胞壁內含膠質纖維（gelatinous fibers, G-fibers），此類纖維通過彈性物質累積形成類彈簧結構，賦予組織類似動物肌肉的動態能力。絲瓜捲鬚呈現雙向螺旋構型，分為植物端（螺距與螺徑較大）與攀附端（螺旋緊密），兩者通過反向水平區連接（張寓閔，2015）。力學分析顯示，此結構能有效吸收

外界機械應變能量，並於應力解除後漸進釋放，顯著降低外力對纖細莖部的直接損傷（張寓閔，2015）。基於此生物擬態特性，本研究將卷鬚視為彈簧體，通過測量拉力-形變關係計算彈性係數  $k$ ，並結合彈簧指數  $C$  進行結構力學比對，以探討環境因子對捲鬚形態功能的影響。

#### （四）彈簧指數 $C$ 之生物物理意義

彈簧指數  $C$  的定義為螺旋平均直徑與中心徑（螺寬減莖直徑）之比值，該值與結構剛度呈現負相關： $C$  值增大表示彈簧柔度（compliance）提升，形變潛能增加；反之則剛度（stiffness）增強（李榮華、謝文忠，2020）。彈性係數  $k$  遵循虎克定律  $F=kx$ ，在彈性限度內， $k$  值與形變量  $x$  呈反比關係，反映材料抵抗形變的能力（學呀 Zetria，2025）。我們用以上兩種參數來檢測不同環境下所產生的絲瓜捲鬚莖，用以探討絲瓜的生存適應策略。

#### （五）G-fiber 之生態適應功能

膠質纖維（G-fiber）作為植物機械抗性的關鍵物質，展現出顯著的環境適應特性，透過捲鬚莖中膠質纖維（G-fiber）的含量及排列，使植物能動態調整組織剛柔平衡，例如在風荷載或重力脅迫下，G-fiber 通過纖維排列密度與交聯程度的改變，提升莖部的抗彎曲強度與能量耗散效率，此機制有效緩解外界機械應力對維管系統的衝擊（Tatyana Gorshkova et al., 2018）。此類生物材料的智能響應特性，為植物適應異質性環境提供重要結構基礎。

## 貳、研究器材及設備

### 一、設備與器材：

圓筒絲瓜種子	澆水用具	C 組水管 (直徑：1.25cm)	D 組水管 (直徑：3.25cm)
花盆	植物低溫培養箱	游標尺	燒杯架
手機(拍照)	直尺	載玻片	刀片

			
解剖針	解剖顯微鏡	迴紋針	電腦
			
染劑	燕尾夾	電子秤	培養土

二、電腦軟體：ImageJ、Excel

## 參、研究過程或方法

### 一、測量絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖中不同端點的彈簧指數 C

- (一) 輕輕鬆開已攀附在竹枝上，由直立莖 40cm 左右處所長出捲鬚莖，用剪刀將靠植物端一側的捲鬚莖剪下。
- (二) 將捲鬚莖編號，並拍攝照片。
- (三) 利用軟體 ImageJ，計算出植物端直徑、植物端螺寬、攀附端直徑、螺旋長度，如圖 3-1 所示。
- (四) 將螺寬減去兩倍直徑得到中心徑值，並利用中心徑值/螺寬得到植物端及攀附端的彈簧指數 C。
- (五) 重複以上步驟，取下 5 條捲鬚莖，求取直立捲鬚莖的植物端及攀附端的平均彈簧指數 C。
- (六) 剪取未攀附於任何物體的捲鬚莖，重複以上步驟，求取水平捲鬚莖的植物端及攀附端的平均彈簧指數 C。

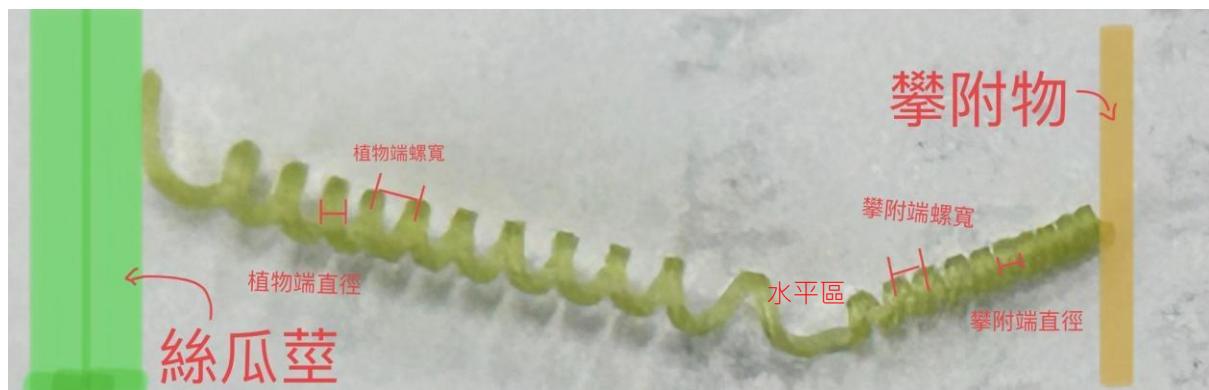


圖 3-1 絲瓜捲鬚莖各部位名稱

### 二、觀察絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖不同部位的橫切面並測量 G-fiber (膠質纖維) 的含量

- (一) 將直立莖及水平莖的植物端、攀附端及水平區的捲鬚莖，用刀片切成薄片。
- (二) 滴一滴染劑於載玻片上，將莖的橫切面加以染色，用以辨識不同細胞。
- (三) 利用解剖顯微鏡觀察各種絲瓜捲鬚莖的橫切面，並用手機拍攝照片。



圖 3-2 捲鬚莖剖面的示意圖

(四) 利用軟體 ImageJ 辨識出膠質纖維 G-fiber 的區域（如圖 3-2），並計算膠質纖維 G-fiber 所占的面積及莖的剖面面積，得到直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖，不同部位膠質纖維 G-fiber 所佔的百分比。

(五) 取直立莖及水平莖各 5 條，重複以上步驟，得到直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖，不同部位膠質纖維 G-fiber 所佔的平均百分比。

(六) 取攀附於不同直徑的捲鬚莖重複以上步驟 1-5，記錄其膠質纖維 G-fiber 所佔的百分比。

### 三、測量並計算絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖之彈性係數 k

(一) 輕輕鬆開已攀附在竹枝上，由直立莖 40cm 左右處所長出捲鬚莖，用剪刀將靠植物端一側的捲鬚莖剪下。

(二) 將靠近植物端的捲鬚莖部分，夾在測量裝置上（如圖 3-3），並記錄自然垂放時捲鬚莖攀附端所在的刻度數字。

(三) 將已秤取重量的 1 個迴紋針，懸掛至攀附端上。

(四) 當捲鬚莖靜止時，紀錄捲鬚莖攀附端所在的刻度數字，與步驟二的所得的數字兩兩相減，得到伸長量 x 值。

(五) 依次增加 1 個相同重量的迴紋針，最多懸掛至 3 個，利用虎克定律  $F=kx$  求出彈性係數 k。

(六) 重複以上步驟，取 5 條捲鬚莖，求出直立捲鬚莖的平均彈性係數 k。

(七) 重複以上步驟，求出水平捲鬚莖、攀附物直徑 1.25cm 直立捲鬚莖及攀附物直徑 3.25cm 直立捲鬚莖的平均彈性係數 k。

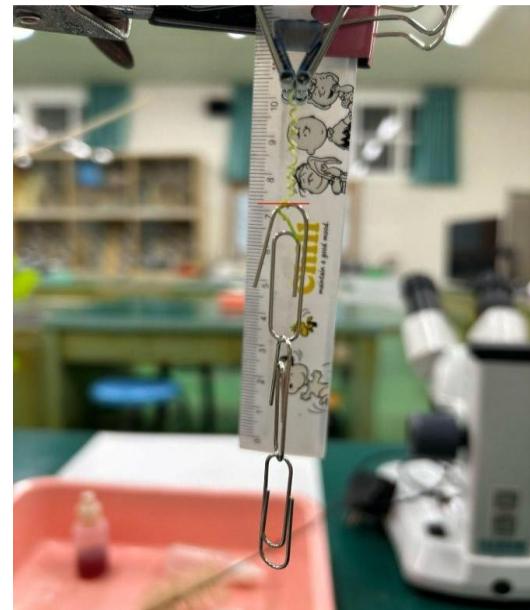


圖 3-3 捲鬚莖彈性係數 k 測量裝置圖

〈以上照片皆為作者自行拍攝〉

## 肆、研究結果

### 一、測量絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖中不同端點的彈簧指數 C

(一) 絲瓜的直立莖與水平莖所產生的捲鬚莖在植物端與攀附端的形態上，存在著顯著差異。具體而言，兩種捲鬚莖的植物端似彈簧構造其平均中心徑較大，螺距亦較寬，而攀附端的捲鬚莖則呈現出較小的平均中心徑及較窄的螺距，而在兩者之間形成了一個反轉的水平區域。無論是直立莖還是水平莖所產生的捲鬚莖，其形態特徵均顯示出這樣的相似性。



圖 4-1 直立莖的捲鬚莖外觀

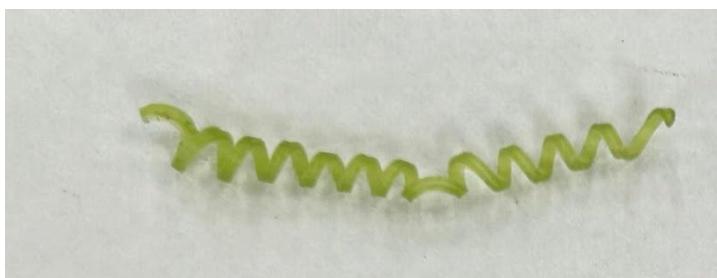


圖 4-2 水平莖的捲鬚莖外觀

(二) 根據對直立莖及水平莖所產生的捲鬚莖不同部位的平均彈簧指數 C 的計算，數據如表一所示。張寓閔（2015）的研究指出，捲鬚莖的彈簧指數 C 值越大，則該處捲鬚莖的剛硬度越小，顯示出較高的柔軟性。在相同外力作用下，彈性係數 C 值較大的捲鬚莖會產生較大的形變。從表一的數據中可以看出，直立莖所產生的捲鬚莖在植物端與攀附端的彈簧指數 C 值存在顯著差異（植物端：0.217，攀附端：0.165），其中植物端的捲鬚構造彈簧指數 C 較攀附端為大，這表明植物端的捲鬚構造更容易產生形變，顯示出其相對較軟的特性。

(三) 在表一中，水平莖所產生的捲鬚莖無論是在植物端還是攀附端，其計算出的平均彈簧指數 C 值均相近（植物端：0.400，攀附端：0.418），這表明兩端的捲鬚構造具有相似性。在相同外力作用下，這兩端所產生的形變亦會相對接近。

(四) 進一步比較直立莖與水平莖所產生的捲鬚莖其平均彈簧指數 C，結果顯示水平莖所產生的捲鬚莖的彈簧指數 C 值普遍高於直立莖（植物端： $0.400 > 0.217$ ，攀附端： $0.418 > 0.165$ ），這意味著在相同受力條件下，水平莖的捲鬚莖將會產生較大的形變。這一發現對於理解絲瓜植物在不同生長姿態下的適應性及其生物力學特性具有重要意義。

表一 直立莖與水平莖所出現的捲鬚莖不同端點的平均彈簧指數 C

	不同端點的平均彈簧指數 C	
	植物端	攀附端
直立莖的捲鬚莖	0.217	0.165
水平莖的捲鬚莖	0.400	0.418

二、觀察絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖不同部位的橫切面並測量 G-fiber（膠質纖維）的含量

(一) 我們利用解剖顯微鏡拍攝捲鬚莖的剖面照，經染色後 ImageJ 計算膠質纖維 G-fiber 與捲鬚莖的截面積的比例〈如圖 4-3 及圖 4-4〉，將其平均後結果如表二。

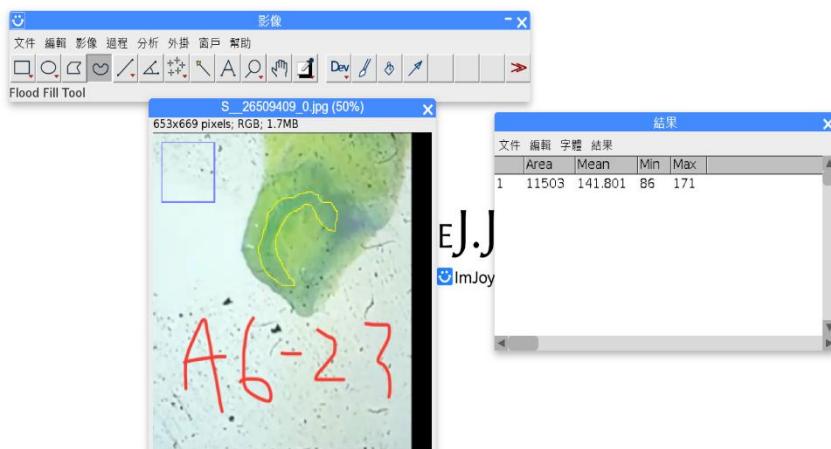


圖 4-3 直立莖的捲鬚莖剖面圖 G-fiber 計算

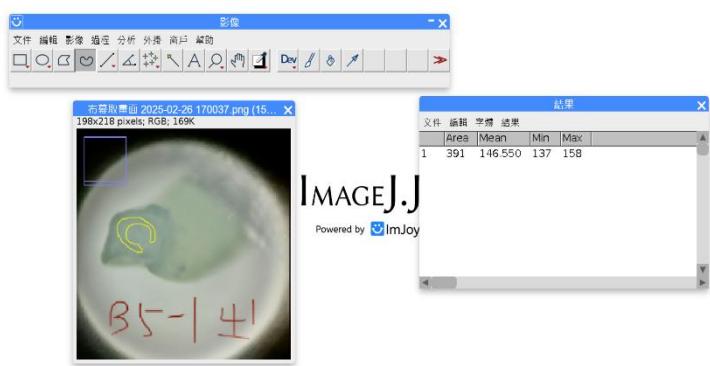


圖 4-4 水平莖的捲鬚莖剖面圖 G-fiber 計算

〈以上照片皆為作者自行拍攝〉

(二) 根據文獻資料，膠質纖維 G-fiber 是植物中提供彈性的結構，G-fiber 的含量越高，表示該部位的彈性越強，且能更有效地恢復原狀 (Tatyana Gorshkova et al., 2018)。這一特性對於植物在面對外部環境變化時的適應能力至關重要。從表二的數據中可以看出，直立莖所產生的捲鬚莖其植物端所含的 G-fiber 量明顯高於攀附端 ( $7.81\% > 5.80\%$ )，而水平莖所產生的捲鬚莖其兩端 G-fiber 含量則相近 ( $16.02\% \approx 16.42\%$ )。這表明直立莖所產生的捲鬚莖其植物端和攀附端在彈性上存在差異，可能是由於功能需求不同所致。

(三) 進一步對比直立莖與水平莖的捲鬚莖中平均 G-fiber 含量，我們發現水平莖的捲鬚莖中 G-fiber 含量普遍高於直立莖，無論是哪一端；這一結果顯示，水平莖的捲鬚莖擁有較大的彈性。

表二 直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖不同部位的橫切面平均膠質纖維 G-fiber 的含量

	植物端	水平區	攀附端
直立莖的捲鬚莖	7.81%	12.08%	5.80%
水平莖的捲鬚莖	16.02%	34.29%	16.42%

### 三、測量並計算絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖之彈性係數 k

(一) 測量絲瓜直立莖及水平莖所產生的捲鬚莖固定重量的形變量，運用  $k=F/x$  算出 k 值，根據上述算式可知：若施加外力固定，則 k 值越小，形變量越大，兩者為反比的關係。我們將所測得的數字利用 Excel 程式繪成散布圖，並計算出方程式 (如圖 4-5)，得出每一條的捲鬚莖的彈性係數 k 並加以平均，結果如下表三。

(二) 由表三中，我們發現直立莖的平均彈性係數  $k$  比水平莖來的大 (0.454229 > 0.33264)，代表在相同的受力下，水平莖所產生的捲鬚莖較容易產生形變，是一條較軟的彈簧。

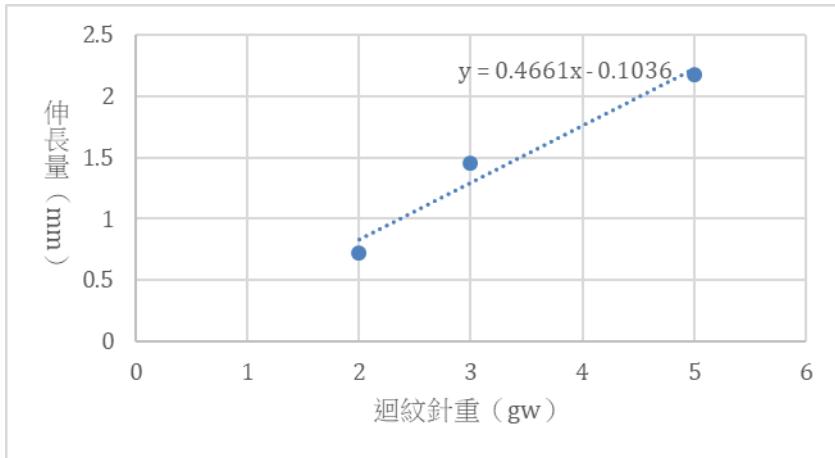


圖 4-5 直立莖的捲鬚莖受力與伸長量的散布圖（以其中一條為例）

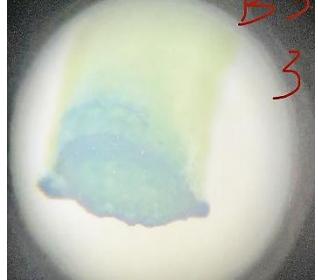
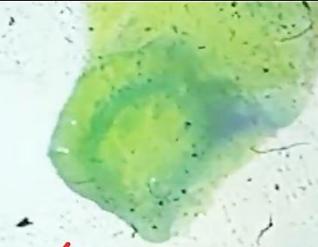
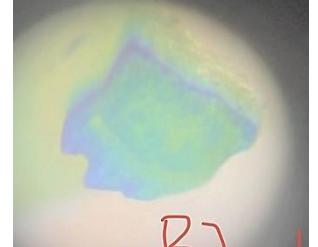
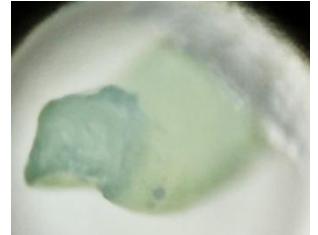
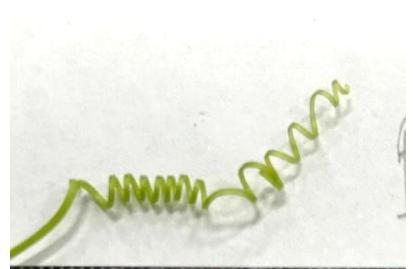
表三 直立莖與水平莖所出現的捲鬚莖平均彈性係數  $k$

種類	平均彈性係數 $k$ (gw/mm)
直立莖的捲鬚莖	0.454229
水平莖的捲鬚莖	0.33264

#### 四、探討絲瓜直立莖及水平莖所出現的捲鬚莖其內部與外部構造的差異

(一) 根據直立莖和水平莖的剖面觀察，明顯可見水平莖中被染色的構造較多。在捲鬚莖的不同部位中，水平區域所被染色的膠質纖維 (G-fiber) 範圍最大且最為完整。相較之下，其他部位的膠質纖維在觀察中常出現斷裂現象，例如圖 4-10 及圖 4-11 中無法觀察到完整的環帶結構，顯示出在同一條捲鬚莖中不同部位之間，在構造上存在著顯著差異。

(二) 在直立莖與水平莖所產生的捲鬚莖外觀上，亦存在明顯的差異。直立莖的捲鬚莖其螺距及中心徑顯著小於水平莖，且攀附端與植物端之間的差異亦相當明顯。相對而言，水平莖的捲鬚莖上並未觀察到類似的現象，這表明了有無攀附物對於絲瓜的捲鬚莖的結構特徵有著深遠的影響。

	直立莖的捲鬚莖	水平莖的捲鬚莖
攀附端		
	圖 4-6 直立莖攀附端剖面圖	圖 4-7 水平莖攀附端剖面圖
水平區		
	圖 4-8 直立莖水平區剖面圖	圖 4-9 水平莖水平區剖面圖
植物端		
	圖 4-10 直立莖植物端剖面圖	圖 4-11 水平莖植物端剖面圖
外觀		
	圖 4-12 直立莖的捲鬚莖外觀	圖 4-13 水平莖的捲鬚莖外觀

## 五、探討不同直徑攀附物對於絲瓜捲鬚莖之影響

(一) 不同攀附物對絲瓜捲鬚莖彈簧指數 C 之差異：我們測量三組攀附不同直徑的捲鬚莖，計算其彈簧指數 C 後，結果如表四，兩組使用大管徑攀附物的捲鬚莖兩端其 C 值都較攀附一般竹枝的直立莖大，由此可知使用大直徑的攀附物後，會使絲瓜所產生的捲鬚莖形變量更大 ( $0.348 > 0.217, 0.338 > 0.165$ )。再來比較植物端與攀附端捲鬚莖的彈簧指數 C，一般直立莖的捲鬚莖兩端其 C 值出現差異（植物端：0.217，攀附端：0.165），代表植物端與攀附端所出現的類彈簧結構，外表的構造並不相同；而大直徑攀附物的捲鬚莖，兩端的 C 值則是相當接近（植物端：0.348、0.320，攀附端：0.338、0.372），代表兩端捲鬚莖的類彈簧外形結構相似；綜合以上數據，我們發現一般直立莖的捲鬚莖在兩端點，會出現兩種型態不同的類彈簧結構，屬於較為剛硬的彈簧，而大直徑攀附物的捲鬚莖，兩端點所出現的捲鬚莖結構相似，屬於較為柔軟的彈簧。

表四 不同直徑攀附物所出現的捲鬚莖不同端點的平均彈簧指數 C

	不同端點的平均彈簧指數 C	
	植物端	攀附端
直立莖的捲鬚莖	0.217	0.165
攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖	0.348	0.338
攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖	0.320	0.372

(二) 本研究利用 ImageJ 分析三種莖剖面中膠質纖維 G-fiber 的含量，結果整理於表五。結果顯示，使用大直徑水管作為攀附物的兩組捲鬚莖，其 G-fiber 含量顯著高於普通直立莖所產生的捲鬚莖，這表明使用較大直徑的攀附物會促使植物捲鬚莖，產生更多的彈性纖維 G-fiber，從而使捲鬚莖具有更好的彈性，受力後容易產生形變，並更容易恢復原狀，這與彈簧指數 C 的結果相吻合。

表五 不同直徑攀附物所出現的捲鬚莖不同部位的橫切面平均膠質纖維 G-fiber 的含量

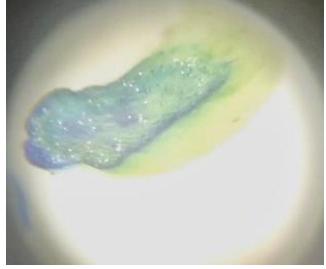
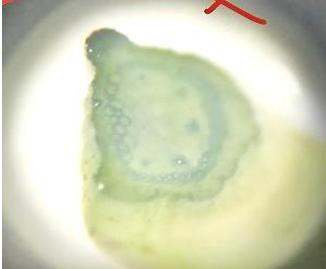
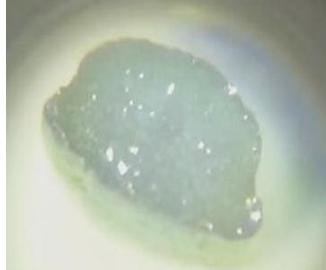
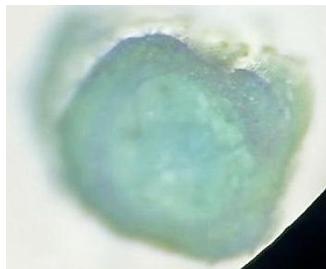
	植物端	水平區	攀附端
直立莖的捲鬚莖	7.81%	12.08%	5.80%
攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖	25.22%	16.62%	26.99%
攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖	13.07%	21.93%	12.89%

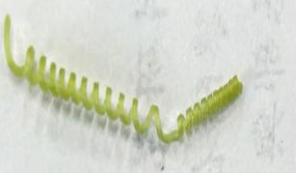
(三) 不同攀附物對絲瓜捲鬚莖彈性係數  $k$  之差異：我們利用固定重量迴紋針下拉三種不同管徑攀附物的絲瓜捲鬚莖，紀錄其伸長量及所受拉力，利用虎克定律計算其彈性係數  $k$  值，結果紀錄於表六。我們發現，三者的彈性係數  $k$  差異不大 (0.454229、0.43086、0.4958)，也就是說，在彈性係數內，三條捲鬚莖若受相同的力，則伸長量會差不多，具有相同的彈性。

表六 不同直徑攀附物所出現的捲鬚莖平均彈性係數  $k$

種類	平均彈性係數 $k$ (gw/mm)
直立莖的捲鬚莖	0.454229
攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖	0.43086
攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖	0.4958

(四) 根據三種不同捲鬚莖的剖面觀察，明顯可見使用大直徑攀附物的捲鬚莖剖面中被染色的構造較多。在捲鬚莖的不同部位中，水平區域所染色的膠質纖維 G-fiber 範圍最大且最完整，而其他部位的膠質纖維 G-fiber 則常出現斷裂現象，如圖 4-22 所示，無法形成完整的環帶。這些觀察結果顯示，不同直徑的攀附物對絲瓜捲鬚莖的內部結構及其功能性有顯著影響。

	直立莖的捲鬚莖 攀附端	攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖	攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖
攀附端			
	圖 4-14 直立莖攀附端剖面圖	圖 4-15 攀附物直徑 1.25cm 直立莖攀附端剖面圖	圖 4-16 攀附物直徑 3.25cm 直立莖攀附端剖面圖
水平區			
	圖 4-17 直立莖水平區剖面圖	圖 4-18 攀附物直徑 1.25cm 直立莖水平區剖面圖	圖 4-19 攀附物直徑 3.25cm 直立莖水平區剖面圖
植物端			
	圖 4-20 直立莖攀附端剖面圖	圖 4-21 攀附物直徑 1.25cm 直立莖植物端剖面圖	圖 4-22 攀附物直徑 3.25cm 直立莖植物端剖面圖

	直立莖的捲鬚莖	攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖	攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖
外觀			

〈以上照片皆為作者自行拍攝〉

## 伍、討論

### 一、直立莖與水平莖生成捲鬚莖之形態與力學特性差異分析

(一) 就形態特徵而言，直立莖與水平莖的捲鬚莖在莖徑、螺距及中心徑等參數呈現顯著差異。透過彈簧指數 C 值量化分析顯示，直立莖的捲鬚莖其 C 值顯著低於水平莖（植物端： $0.217 < 0.400$ ；攀附端： $0.165 < 0.418$ ），表明直立莖的捲鬚莖具備較高剛性之彈簧結構。進一步對比膠質纖維 G-fiber 含量，直立莖的捲鬚莖於植物端（ $7.81\% < 16.02\%$ ）及攀附端（ $5.80\% < 16.42\%$ ）均顯著低於水平莖，其彈性係數 k 值（ $0.454229 > 0.33264$ ），亦證實該結構具備較低形變率。此力學特性有助於維持攀附穩定性，抵禦外力干擾（如風力或動物牽拉），確保植株垂直生長優勢；相對而言，水平莖的捲鬚莖因無需支撐主體結構，其較高柔韌性雖利於適應環境，卻增加結構斷裂的風險。

(二) 針對直立莖兩端捲鬚莖之異質性分析顯示，植物端的彈簧指數 C 值（0.217）顯著高於攀附端（0.165），且膠質纖維 G-fiber 含量亦呈相同趨勢（植物端： $7.81\% > 5.80\%$ ），此雙端異構特徵與張寓閔（2014）之研究相符。值得注意的是，水平莖的捲鬚莖未呈現此種兩端分化現象，代表當捲鬚莖處於未攀附狀態時，其兩端 C 值及 G-fiber 含量趨於一致，顯示環境刺激對彈簧結構分化具誘導作用。

(三) 橫向比較莖體各區段膠質纖維分布，水平區 G-fiber 含量無論攀附與否均顯著高於兩端。推測該水平區具備高彈性特質，功能上作為植物端與攀附端之緩衝介面，藉由形變吸收外力以降低結構斷裂風險，此設計符合生物力學之能量耗散原理。

### 二、攀附物直徑對捲鬚莖力學適應性之影響

(一) 形態觀察顯示，攀附直徑 3.25cm 之捲鬚莖螺距增加且兩端結構趨同，然其攀附效能卻低於攀附直徑 1.25cm 之植株（如圖 5-1）。定量分析證實，大直徑攀附莖的捲鬚莖之 C 值均大於常規直立莖，且兩端 C 值差異縮小，表明其彈簧剛性降低導致攀附力不足，此現象與張芮瑜等（2010）之研究具一致性。膠質纖維分析進一步顯示，大直徑攀附莖 G-fiber 含量增加，顯示彈性增加導致過度形變，可能會引發纏繞失效。



圖 5-1 不同攀附物之實際生長狀況  
(左為直徑 1.25cm 水管，右為直徑 3.25cm 水管)



圖 5-2 一般常規捲鬚莖攀附形式  
(以上照片皆為作者自行拍攝)

(二) 透過分析三種捲鬚莖的彈性係數  $k$  值，發現其數值皆分佈於 0.4-0.5 之間，顯示在不同攀附條件下，絲瓜的捲鬚莖均遵循特定力學閾值。常規直立莖的捲鬚莖透過兩端異質彈簧串聯達成目標  $k$  值，而大直徑攀附物的捲鬚莖則藉單一均質結構實現。此機制提示植物可調控 G-fiber 區域性分布比例，以動態適應不同攀附直徑的需求。

(三) 進一步分析膠質纖維區域分佈顯示，相較於其他兩種攀附物的捲鬚莖，攀附直徑 1.25cm 的捲鬚莖其水平區 G-fiber 含量明顯低於兩端（植物端：25.22%、水平區：16.62%、攀附端：26.99%），可能源於影像解析度不足所致之測量誤差。我們認為後續應增加樣本量並增加不同直徑的攀附物，以完善分佈模式驗證。

### 三、捲鬚莖膠質纖維功能性分布探討

分析四種不同的捲鬚莖，發現捲鬚莖的水平區雖缺乏螺旋捲曲特徵，但其 G-fiber 含量顯著高於兩端區，推論該區域兼具機械支撐與能量緩衝雙重功能。相對地，植物端與攀附端主要專注於附著功能，故膠質纖維需求較低。此分佈模式符合植物器官功能特化之演化策略，顯示結構材料分配與生物力學需求間存在精準對應關係。

## 陸、結論

### 一、捲鬚莖結構力學差異

透過測量絲瓜 (Luffa cylindrica) 直立莖與水平莖衍生捲鬚莖的彈簧指數  $C$  與彈性係數  $k$ ，研究顯示兩類捲鬚莖具有顯著力學的差異性。直立莖生成的捲鬚莖呈現較高剛性 ( $k$  值較大)，形變抗力較強；水平莖生成的捲鬚莖則具較低剛性 ( $k$  值較小)，形變能力顯著提升。這兩種捲鬚莖的差異證實，若絲瓜的捲鬚莖攀附於物體上時，會出現高剛性彈簧結構，我們推論這種力學調控機制源自膠質纖維 (G-fiber) 對中心徑、螺旋間距及圈數的動態調整。

### 二、膠質纖維空間分布特徵

利用捲鬚莖膠質纖維 (G-fiber) 分布面積與莖截面積的比例，我們發現絲瓜的捲鬚莖中，靠近兩端的膠質纖維 (G-fiber) 分布較少，而在水平區膠質纖維 (G-fiber) 的比例較高，無論是否有攀附物體，皆會出現同樣的分布狀況，至於形成這種分布的原因，我們推測是因為水平區作為連接兩種不同似彈簧結構，需具有一定的柔軟度及彈性，才不會因兩端受力不均拉扯後而斷裂；然而這部分的推論還需進一步的力學測量才能證實。

### 三、異質結構的功能整合

一般攀附物的捲鬚莖，是由兩條具不同彈簧指數  $C$  的捲鬚莖所構成，而水平莖及攀附較大直徑所產生的捲鬚莖，則沒有此種現象，我們認為透過膠質纖維 (G-fiber) 產生的比例，去影響及改變兩端捲鬚莖彈簧構造的彈性係數  $k$ ，使得能進行攀附的捲鬚莖經串聯後，能出現具有相似的彈性係數  $k$  的彈簧結構，以利絲瓜進行攀附生長；而要使捲鬚莖具有多少的彈性係數  $k$  才能順利攀附呢？是否有閾值呢？這部分還需更深入的實驗才能加以解答。

### 四、功能區域的結構適應性

我們發現捲鬚莖中水平區的膠質纖維含量較植物端及攀附端來得高，推論是因為水平區不僅需要提供支持，還必須承受來自外部環境的力量，這使得水平區的膠質纖維在結構上更為重要，以確保植物的穩定性和生長能力。相對而言，植物端和攀附端的主要功能是附著，對膠質纖維的需求較為一致，因此兩端的含量及分布較類似，含量也較低，這一發現強調不同植物部位在功能和結構上的差異，並指出膠質纖維在植物生長和適應環境中的重要性。

## 柒、參考文獻

- 一、食農教育資訊整合平台（2025年2月24日）。絲瓜。食農教育資訊整合平台。2025年2月24日，取自：[https://fae.moa.gov.tw/map/food\\_item.php?type=AS01&id=96](https://fae.moa.gov.tw/map/food_item.php?type=AS01&id=96)
- 二、Tatyana Gorshkova, Tatyana Chernova, Natalia Mokshina, Marina Ageeva, Polina Mikshina (2018). Plant ‘muscles’ : fibers with a tertiary cell wall. *New Phytologist*. Volume218, Issue1. 66-72
- 三、張寓閔（2014）。大自然的神奇----彈簧植物卷鬚構造彈簧性質之研究。2015年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。國立臺灣科學教育館。
- 四、方斐儀、林巧文、張容禎、黃薇婕（2007）。無所不捲----似彈簧的卷鬚構造對藤本植物的作用與影響。2009年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。國立臺灣科學教育館。
- 五、張芮瑜、何岫雲、陳偉智（2010）。絲絲入扣—絲瓜生長記實。第50屆中小學科學展覽會生物科國小組。國立臺灣科學教育館。
- 六、學呀 Zetria(2025年3月3日)。虎克定律。2025年3月3日。,取自：<https://zetria.tw/physics/656cbe3196>
- 七、李榮華、謝文忠（2020）。機件原理全。新北市：紅動創新。

## 捌、附錄

組別代號說明：

A 為直立莖的捲鬚莖

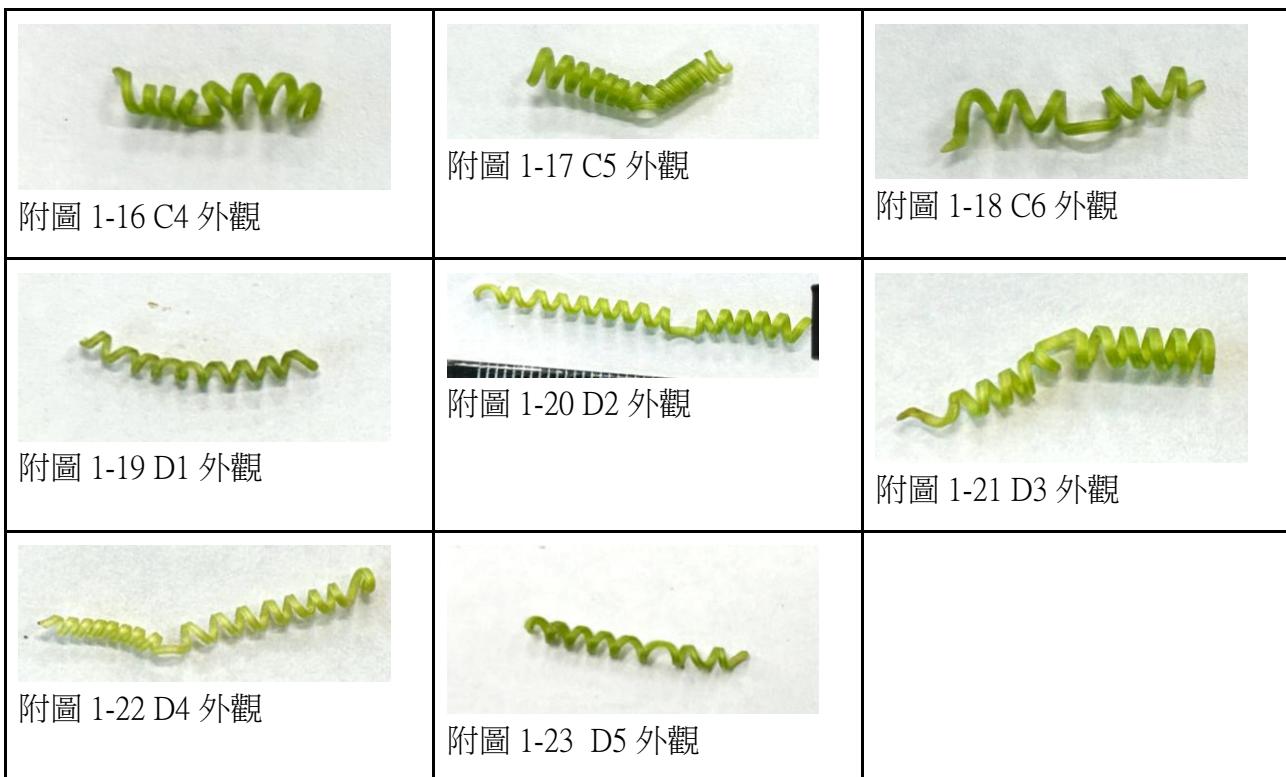
B 為水平莖的捲鬚莖

C 為攀附物直徑 1.25cm 直立莖的捲鬚莖

D 為攀附物直徑 3.25cm 直立莖的捲鬚莖

### 附錄一 捲鬚莖外觀照片

		
附圖 1-1 A1-1 外觀	附圖 1-2 A1-2 外觀	附圖 1-3 A1-3 外觀
		
附圖 1-4 A1-4 外觀	附圖 1-5 A2-1 外觀	附圖 1-6 A2-2 外觀
		
附圖 1-7 A2-3 外觀	附圖 1-8 B1 外觀	附圖 1-9 B2 外觀
		
附圖 1-10 B3 外觀	附圖 1-11 B4 外觀	附圖 1-12 B5 外觀
		
附圖 1-13 C1 外觀	附圖 1-14 C2 外觀	附圖 1-15 C3 外觀

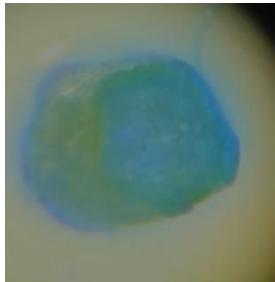
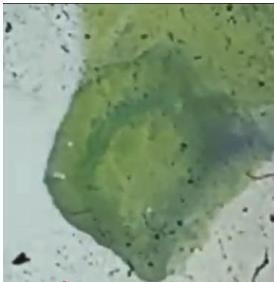
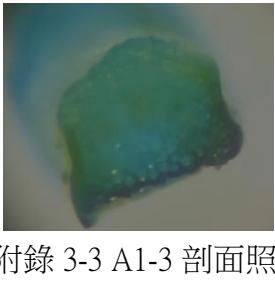
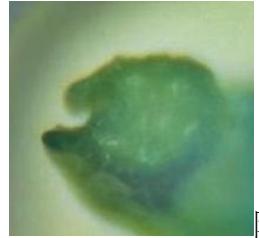
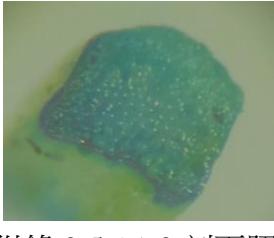


## 附錄二 不同捲鬚莖的彈簧指數 C

捲鬚莖編號	植物端彈簧指數 C 值	攀附端彈簧指數 C 值
A1-1	0.353	0.168
A1-2	-0.400	0.271
A1-3	0.425	0.229
A1-4	0.322	0.019
A2-1	0.381	0.269
A2-2	0.218	0.077
A2-3	0.281	0.119
B1	0.102	0.353
B2	0.428	0.486
B3	0.568	0.712
B4	0.486	0.049
B5	0.533	0.491
C1	0.434	0.338
C2	0.300	0.278
C3	0.438	0.153

C4	0.153	0.422
C5	0.283	0.361
C6	0.479	0.474
D1	0.317	0.344
D2	0.352	0.281
D3	0.413	0.299
D4	0.132	0.566
D5	0.388	0.368

附錄三 不同捲鬚莖剖面照片

不同捲鬚莖	植物端	水平區	攀附端
直立莖			
	附錄 3-1 A1-4 剖面照	附錄 3-2 A2-2 剖面照	附錄 3-3 A1-3 剖面照
			
	附錄 3-4 A1-2 剖面照	附錄 3-5 A1-3 剖面照	附錄 3-6 A1-1 剖面照
水平莖			
	附錄 3-7 B5 剖面照	附錄 3-8 B5 剖面照	附錄 3-9 B2 剖面照

	附錄 3-10 B2 剖面照	附錄 3-11 B1 剖面照	附錄 3-12 B1 剖面照
攀附物直徑 1.25cm 的直立莖			
	附錄 3-13 C6 剖面照	附錄 3-14 C6 剖面照	附錄 3-15 C4 剖面照
	附錄 3-16 C4 剖面照	附錄 3-17 C1 剖面照	附錄 3-18 C1 剖面照
攀附物直徑 3.25cm 的直立莖			
	附錄 3-19 D2 剖面照	附錄 3-20 D5 剖面照	附錄 3-21 D2 剖面照
	附錄 3-22 D3 剖面照	附錄 3-23 D2 剖面照	附錄 3-24 D1 剖面照

附錄四 不同捲鬚莖的伸長量(mm)

編號\外力(g)	0.725	1.094	1.45	2.175	2.182	3.273
A1-1	2		6	9		
A1-2	2		3	5		
A1-3	2		3	4		
A1-4	3		6	9		
A1 組平均	9		18	27		
A2-1		1			4	5
A2-2		5			6	8
A2-3		3			8	10
A2 組平均		9			18	23
B1		2			4	7
B2		2			4	6
B3		6			10	16
B4		2			7	14
B5		3			8	10
B 組平均		15			33	53
C1		10			18	25
C2		1			8	10
C3		4			8	9
C4		2			3	4
C5		1			2	4
C6		1			3	4
C 組平均		19			42	56
D1		2			4	7

D2		1			3	4
D3		1			4	5
D4		5			9	11
D5		2			3	4
D 組平均		11			23	31

附錄五 不同捲鬚莖的平均彈性係數 k

組別	k 值
A 組	0.454229
B 組	0.33264
C 組	0.43086
D 組	0.4958

〈以上照片皆為作者自行拍攝〉