

2016 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 060007
參展科別 植物學
作品名稱 百香果捲鬚之扭轉運動對其向觸性與拉力的影響
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 國立台中女子高級中學
指導教師 陳玉珊
作者姓名 呂紹寧

關鍵字 可逆性扭轉、不對稱形彈簧、緩慢生長區

作者簡介



我是呂紹寧，目前就讀台中女中數理資優班。我從小就喜愛動手做和參與許多不同的活動，因此國中時開始做有關百香果的科展。我的高中生活豐富多樣，包括擔任游泳社社長和理科小老師。我從高中課程裡和課外活動中學到許多新知識，並將其運用在這篇高中版的百香果科展。照片中是四年來陪我努力至今的百香果棚。去年的秋颱把她傷的很重，我有些感傷，希望今年的夏天她會再度綠意盎然。

摘要

本研究首先以改變捆束物的位置，測試百香果捲鬚的反應。發現捲鬚在幾乎無生長的情況下，可多次改變扭轉方向，搜尋捆束物。接著本實驗製作三種不同支架，模擬不同捆束條件。發現捲鬚捆束物體後若遇較大抵抗，可預先發生扭轉運動，再差異化生長，使得捲鬚一側生長較快，一側生長較慢，而形成彈簧狀。本實驗測量彈簧狀捲鬚的多項形態測量數據(如粗細、外徑…)以進行幾何與實體模型的模擬。由模型可發現：捲鬚預先扭轉的角度越大，則可施更大的力拉近基部與捆束物的距離。此外，捲鬚的特定直帶狀區域，會扭轉至彈簧的內側，此區域也是捲鬚在捆束物體前，藉扭轉運動轉向與捆束物接觸的地方。

由解剖橫切面構造顯示，此直帶狀區域在彈簧狀捲鬚形成後，會在捲鬚中心近髓的木質部逐漸出現加厚的細胞，使橫切面成不對稱的構形。依據幾何模型推導，不對稱構形會使彈簧在受拉力而發生扭轉形變時，縮小彈簧的環直徑。此現象應有利提升彈簧狀捲鬚的拉力耐受力。

Abstract

The study first tested the reaction of the tendrils of *Passiflora edulis* by changing the positions of stimulation. Results show that the tendrils can change coiling directions multiple times without growth. We also tested how tendrils behaved at three types of support that simulated varying resistant conditions. When the tendril bundled the support with stronger resistance, it would reverse the coiling before undergoing differential growth to perverted spring-like tendril. This experiment also used empirical measurements of spring-like tendrils (ex. thickness, outer diameter, etc.) for geometrical analyses and making physical models. At greater pre-twisting angle, the tendrils could generate greater force to shorten the distance between the tendril's base and end. Furthermore, our models reveal that the special straight strip region would reverse to the virtual line of the inner side of the spring, which is consistent with our observation in live tendrils where the corresponding region would reverse to have contact with the support.

Dissection shows that, after the tendrils became spring-like, the cells in the straight strip region became thicker (ex. Sclerenchyma, collenchyma) to make the cross-section asymmetric. According to our geometric analyses, when under pulling, such asymmetric structure in the tendrils would lead to reduced coil diameter in the tendril spring and consequently enhance its pulling performance.

(一)、前言

一般教科書與文獻所提到的莖扭轉現象，主要是莖生長時產生扭轉，形成螺旋狀而纏繞其它物體，本實驗將此扭轉現象，稱之為『生長型的扭轉運動』。例如旋花科(*Convolvulaceae*)與豆科(*Fabaceae*)等。除此之外，文獻指出，具向觸性的捲鬚於捆束物體後，由於捲鬚的兩端點固定，差異化生長不但使捲鬚形成彈簧狀，且迫使捲鬚發生扭轉形變(本實驗將捲鬚受外力而發生的扭轉，稱為扭轉形變)，並形成稱為 **Spiral perversion** 的 U 型構造(圖 1) (Goriely, A. and Tabor, M.)。U 型構造可使捲鬚的兩個彈簧同時以同方向扭轉，以相互抵銷所造成的扭轉角度(圖 2)，並縮短植物體與捆束物間的距離及增加拉力。

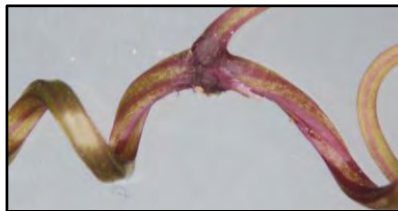


圖 1：虎葛捲鬚 U 型構造



圖 2：U 型構造與兩端的彈簧

本實驗初期以虎葛(*Cayratia japonica* 葡萄科)為觀察目標，發現虎葛捲鬚會藉由扭轉運動，在數十分鐘至數小時內將某個表面轉向捆束物(刺激物)(圖 3)。當人為改變刺激位置時，部分捲鬚可以順或逆時針方向扭轉，反覆的搜尋刺激物，且此過程中捲鬚無明顯的生長現象，本實驗稱此為『非生長型的扭轉運動』(因本實驗不探討生長型扭轉運動，故本篇後文所有的扭轉運動，皆指非生長型的扭轉運動)。經由數十次的重複測試，發現捲鬚可藉由扭轉運動，將特定表面轉向刺激物，這些特定表面大致可連成一條直帶狀區域。經解剖觀察，這條直帶狀區域，在捲鬚形成彈簧狀的過程中，生長速率較慢；形成彈簧狀後，有明顯增加厚角細胞的數量(圖 4)，使捲鬚的橫切面由對稱的形態，發育成不對稱的形態。由於一般教科書所提及的向觸性，是指植物體表面受刺激後，直接發生差異化生長，然而虎葛的捲鬚卻是將可發育出加厚構造的直帶狀區域，先藉扭轉運動轉向刺激面，再產生差異化生長。當進一步探究扭轉運動和捲鬚的拉力關係時，礙於虎葛捲鬚太軟，以至於難進行有關拉力的試驗，因此改換捲鬚較粗的百香果(*Passiflora edulis* 西番蓮科)進行實驗。

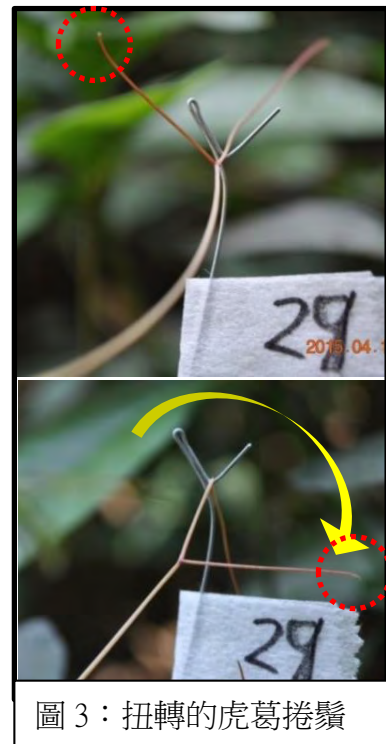


圖 3：扭轉的虎葛捲鬚

本研究的目的主要有二項：

1. 探討捲鬚扭轉運動對向觸性的影響。
2. 探討捲鬚在不同捆束條件下，扭轉運動對拉力的影響。

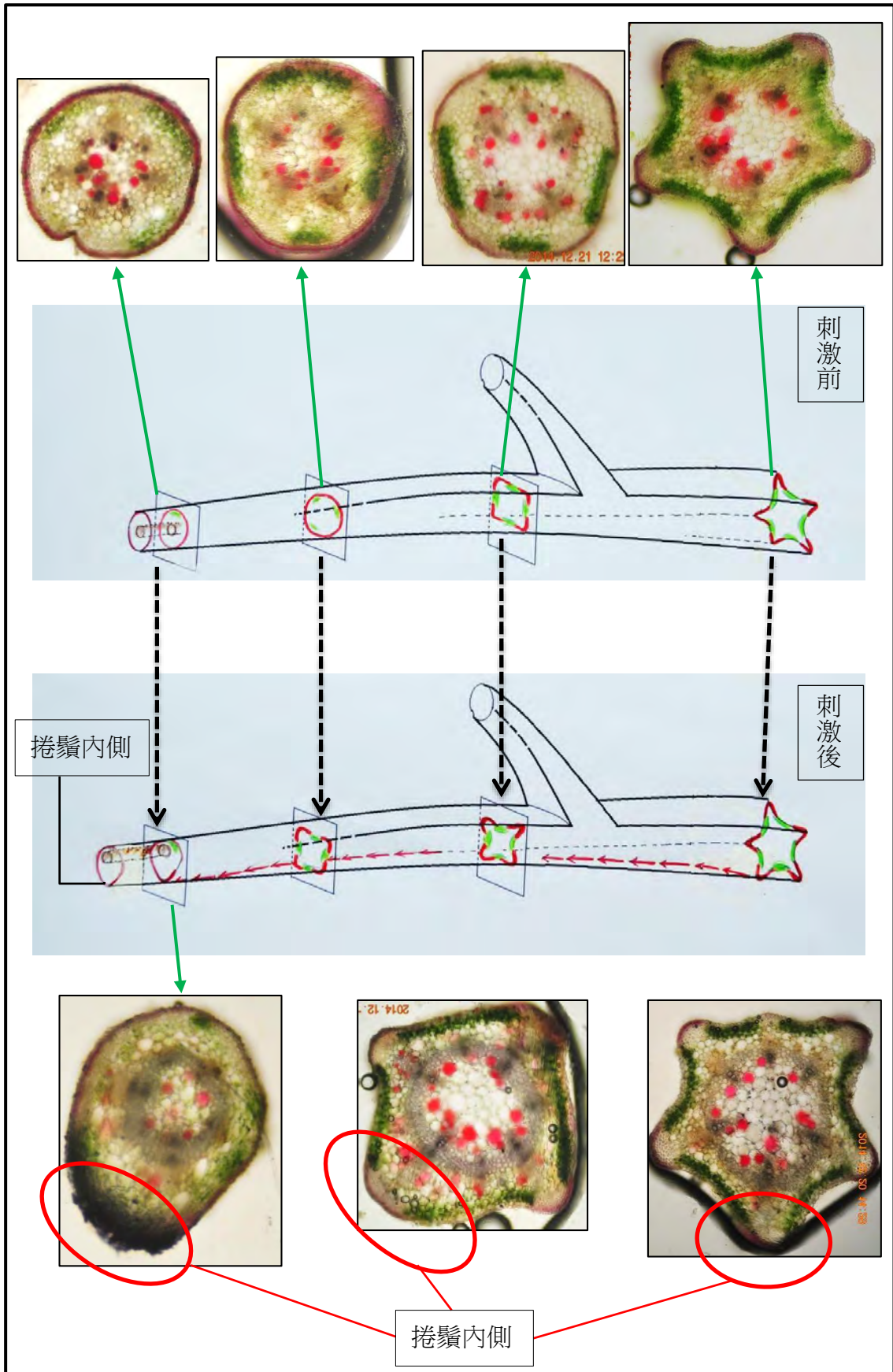
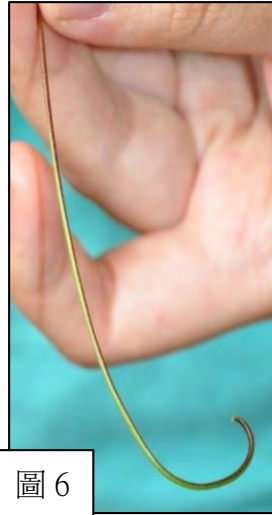
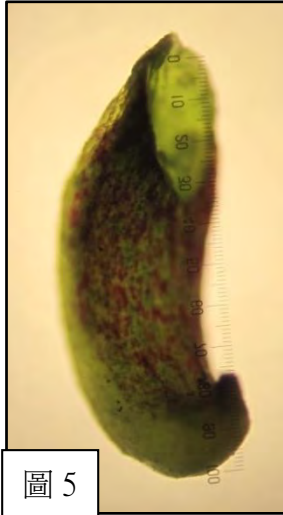


圖 4：虎葛捲鬚之緩慢生長區逐漸增加厚角細胞的過程

(二)、研究方法或過程

百香果捲鬚介紹：

百香果捲鬚尾段有鉤(圖 5)，在三月至六月期間捲鬚鉤部內側到基部之間顏色較深(圖 6)。百香果捲鬚未捲束到其它物體時，可直接回捲而形成「彈簧狀」(圖 7)，且鉤部到基部之間顏色較深區域位於彈簧內側。



研究流程

探討一、探討捲鬚扭轉運動對向觸性的影響

以鐵絲碰觸百香果捲鬚，並不斷改變刺激位置，以確認捲鬚扭轉後最終與鐵絲接觸位置，並記錄捲鬚可承受改變刺激位置的次數。



探討二、探討捲鬚在不同捆束條件下，扭轉運動對拉力的影響

設計三種難易不同的捆束條件，詳細記錄捲鬚於此三種條件下，形成彈簧狀的過程與構形的差異。



探討三、比較捲鬚形成彈簧狀前與形成彈簧狀後，表面與解剖構造的差異

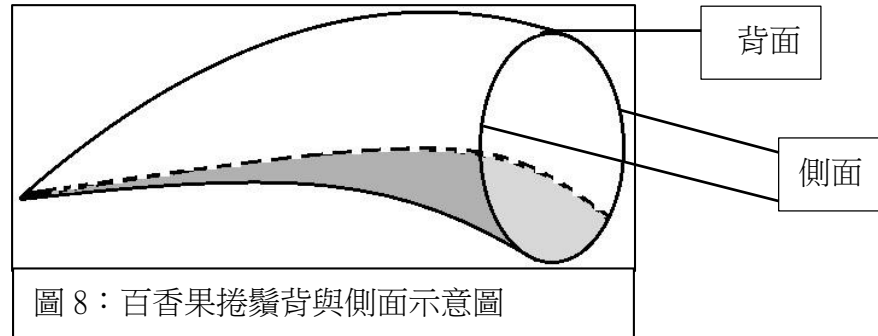


探討四、建立捲鬚形成彈簧狀時受扭轉運動影響的幾何模型

運用探討二所得的數據，建立扭轉運動影響捲鬚形成彈簧狀的幾何模型。幾何模型建立後，並以實體的彈性水管模擬捲鬚與幾何模型，藉以相互驗證其正確性。

1. 探討捲鬚扭轉運動對向觸性的影響

將已彎曲的捲鬚以鐵絲刺激捲鬚背面或側面(以相對於捲鬚深色區域之對面為背面，其兩側為側面(圖 8))，經一段時間後記錄其所發生的反應。當捲鬚有明顯扭轉改變捆束狀態，即變更刺激點位置，經一段時間後再觀察記錄。持續上述步驟，直到捲鬚不改變扭轉與捆束狀態。紀錄捲鬚可承受改變刺激點的次數。



2. 探討捲鬚在不同捆束條件下，扭轉運動對拉力的影響

製作兩型(I、II)讓百香果捲鬚捆束的鐵架(圖 9)，並將鐵架固定於百香果莖枝上，讓捲鬚附著於白色棍棒上，並在捲鬚背面上畫間隔 1 毫米的刻度。(圖 10)。

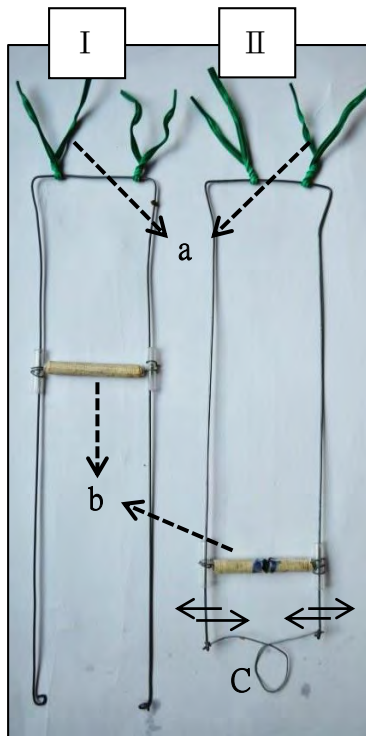
將受測捲鬚分為三組：

第一組：利用 I 型鐵架，捲鬚可滑動白色棍棒(可滾動)

第二組：利用 II 型鐵架，捲鬚可滑動白色棍棒(不可滾動)

第三組：利用 II 型鐵架，調整環型鐵絲使捲鬚無法滑動白色棍棒(不可滾動)。此組於清晨和傍晚時，調整環型鐵絲，使捲鬚瞬間拉回白色棍棒(由於清晨至傍晚、傍晚至清晨期間，捲鬚會產生相當的拉力，所以藉此方式釋放這段時間產生的拉力)。捲鬚拉回後，再次利用環形鐵絲固定白色棍棒。記錄其過程及捲鬚形態。記錄方式：

- 將第一組標示為 R(Rolling)組、第二組標示為 F(Flexible)組、第三組標示為 S(Straight)組。
- 紀錄捲鬚第一個環產生前的扭轉角度與位置(圖 11)
- 紀錄捲鬚第一個環產生的位置(圖 12-a.b.c.)
- 當捲鬚基部開始硬化時，剪下捲鬚，測量每個環的直徑、粗細與生長刻度的長度變化量(圖 14)，若有連續兩個以上的環產生，則測量相鄰的環的距離(圖 13)



圖示說明：

綠色鐵絲(構造 a)：可將鐵架固定於伸出捲鬚的莖枝上。

白色棍棒(構造 b)：重量控制在 0.6g 至 0.7g 之間，可在鐵架上上、下滑動，用於讓捲鬚捆束。I 型鐵架的白色棍棒可滾動；II 型不可滾動(中央有藍色記號)。

環形鐵絲(構造 c)：可調整長條平行鐵絲的間距，控制白色棍棒可、或不可於鐵架上滑動。

圖 9：捲鬚捆束鐵架 I、II 型

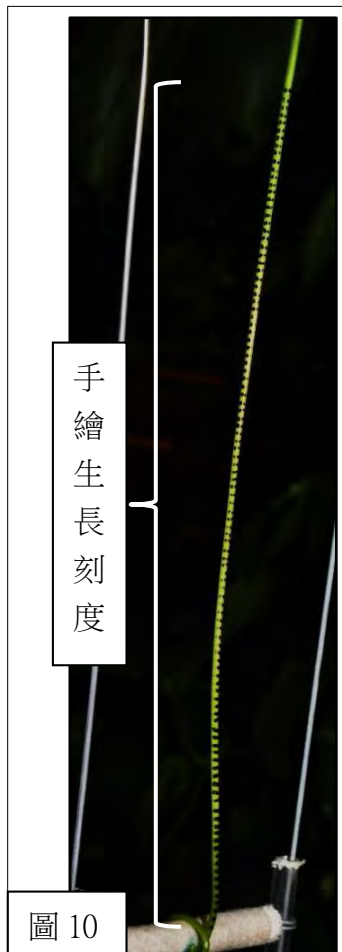


圖 10

圖示說明：
在捲鬚背面上畫間隔 1 毫米的刻度。

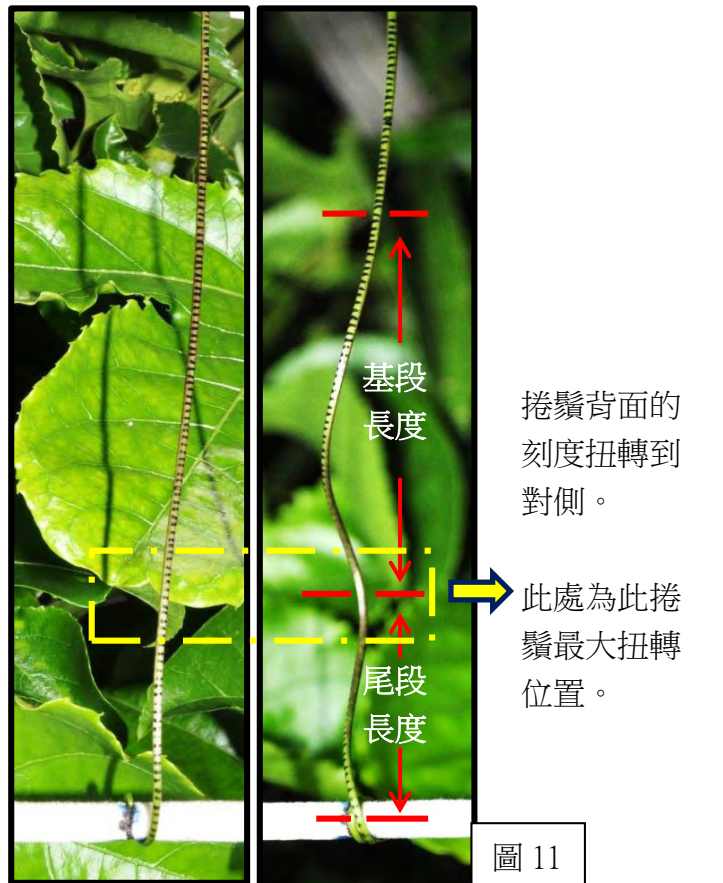


圖 11

圖示說明：

捲鬚在形成第一個環之前會先扭轉。

記錄最大扭轉位置與兩端未扭轉位置之距離。

(記錄基段長度與尾段長度)

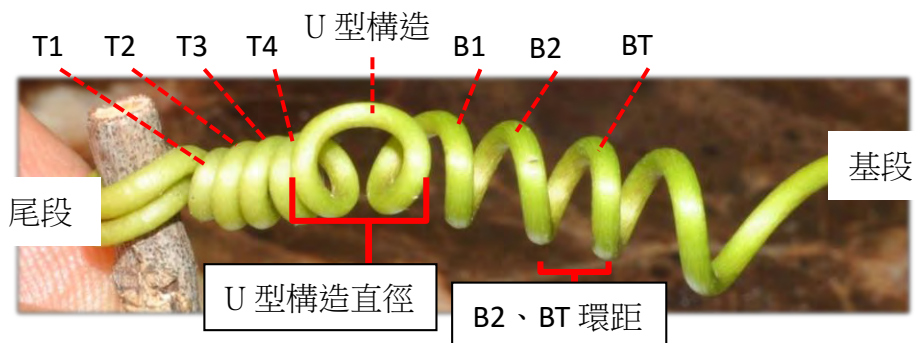
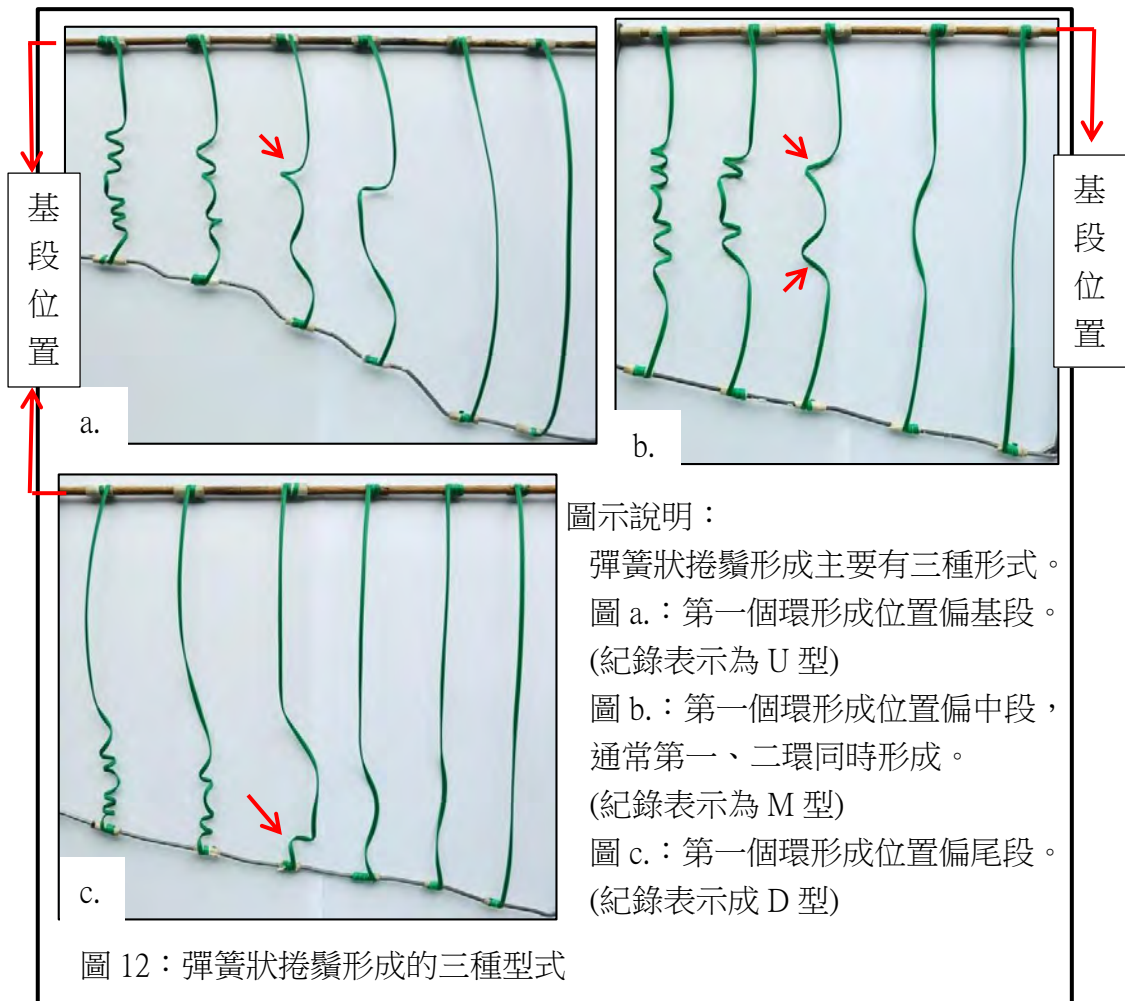


圖 13：彈簧狀捲鬚部位命名

T1：第一尾環；T2：第二尾環；T3：第三尾環；T4：第四尾環

U 型構造：尾環與基環中間的 U 型環

B1：第一基環；B2：第二基環；BT：最終基環



圖 14：紀錄生長刻度的變化

紀錄外周生長率時，以最長能和捲尺刻度對齊的位置為準。該圖顯示：捲鬚 9 格刻度對應捲尺 10 mm 之刻度。

3. 比較捲鬚形成彈簧狀前與形成彈簧狀後，解剖與表面構造的差異

(1) 鐵絲刺激捲鬚之表面觀察

觀察鐵絲刺激捲鬚，捲鬚多次扭轉後與鐵絲最終接觸位置之範圍。

(2) 彈簧形成前後之表面觀察

將已勾到捆束物的捲鬚之背面畫上黑線，觀察當形成彈簧狀後黑線的位置。

(3) 彈簧形成前後之解剖橫切面構造觀察

比較彈簧形成前後切片構造。

4. 建立捲鬚形成彈簧狀時，受扭轉運動影響的幾何模型

選用具有環節、伸縮彈性的塑膠水管(管粗細=37mm)，每間隔四個環節，用鐵絲環繞節間，並在鐵環外作一個小圈，再以細繩穿過每個小圈。各節的鐵環皆可360°轉方向(圖 15.16)。

實驗時轉動鐵環來改變細繩在水管表面的角度，使水管上小圈與細繩的連線，可模擬捲鬚的特定直帶狀區域(緩慢生長區)。接著，拉動細繩使水管彎曲(圖 15)，並測量水管所形成的彈簧，其內徑、外徑、粗細和環距等數值，並比較不同捆束條件下所得的數據差異。

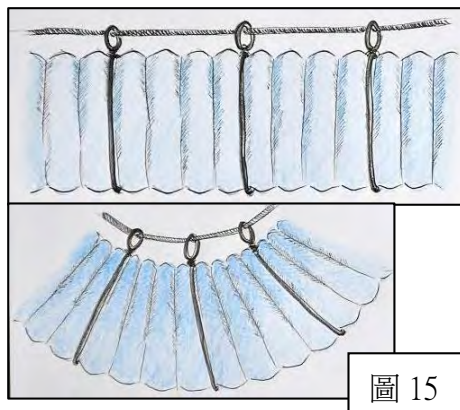


圖 15

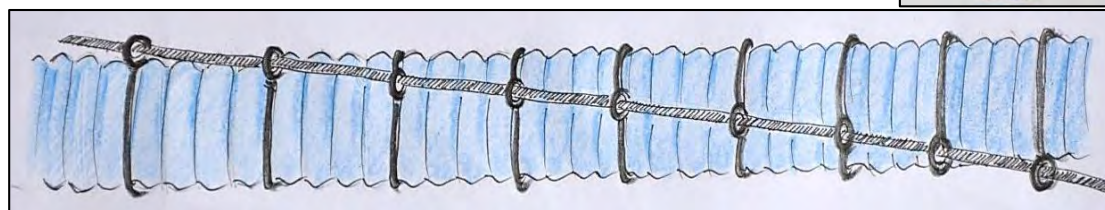


圖 16：水管表面可調整捆繞角度的細繩

(三)、研究結果與討論

1. 探討捲鬚扭轉運動對向觸性的影響

此實驗於 3 月 20 至 4 月 3 日進行，共測試 38 個捲鬚。

表 1：已彎曲捲鬚可承受改變刺激點而重新捆束的次數(原始數據如附件 1)

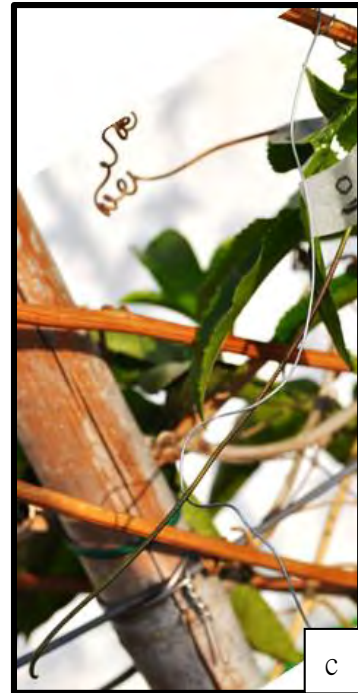
	直接回捲前最後刺激方式及總刺激次數				完全脫離 鐵絲
	一次	二次	三次	四次	
捲鬚個數	11 個	19 個	3 個	3 個	2 個
註：以側面或背面為彈簧內側，直接回捲之捲鬚個數 = 0					



a 圖示說明：
將已彎曲的捲鬚以
鐵絲進行側面刺激。



b 圖示說明：
捲鬚扭轉使內側朝
向鐵絲且發生彎曲。



c 圖示說明：
將彎曲的捲鬚再次改
變刺激點(側面刺激)，
捲鬚重新伸直。



d 圖示說明：
伸直的捲鬚再次扭轉，捆
束側面的鐵絲。因再次改
變刺激點時，此捲鬚已無
法重新伸直扭轉捆束新
的刺激點，故紀錄為：
可承受兩次刺激點改變

圖 17-a.b.c.d.：已彎曲的捲鬚改變刺激點後重新捆束的現象(以 10 號捲鬚為例)

2. 探討捲鬚在不同捆束條件下，扭轉運動對拉力的影響

本實驗從 4 月 18 日到 7 月 1 日，R 組 22 個、F 組 41 個、S 組 39 個。

設計不同條件之支架，觀察並記錄不同拉力對捲鬚生長的影響

R(Rolling)組：捲鬚捆束點可滑動、可滾動

F(Flexible)組：捲鬚捆束點可滑動但不可滾動

S(Straight)組：捲鬚捆束點不可滑動、不可滾動



圖 18：R 組、F 組與 S 組捲鬚硬化前之典型形態

表 2：S 與 F 組捲鬚扭轉運動所產生之數據比較(原始數據如附件 2)

組別	第一個環產生前的扭轉角度與位置 (圖 19、20)		第一個環產生的位置之 捲鬚數量百分比(圖 21)		
	平均角度	平均位置(基段 / 尾段)(cm)	U	M	D
F	$117.75^{\circ} \pm 33.13^{\circ}$	4.23 ± 0.87 / 4.04 ± 1.58	66%	5%	29%
S	$158.33^{\circ} \pm 21.92^{\circ}$	4.79 ± 1.5 / 2.56 ± 1.0	3%	12%	85%

表 2 說明：

U：第一個環產生的位置偏基段

M：U 型構造兩端幾乎同時產生環，且 U 型構造偏中段

D：第一個環產生的位置尾段



圖 19、20：第一個環產生前的扭轉位置
 圖 19 最大扭轉角度偏基段。
 圖 20 最大扭轉角度偏尾段。

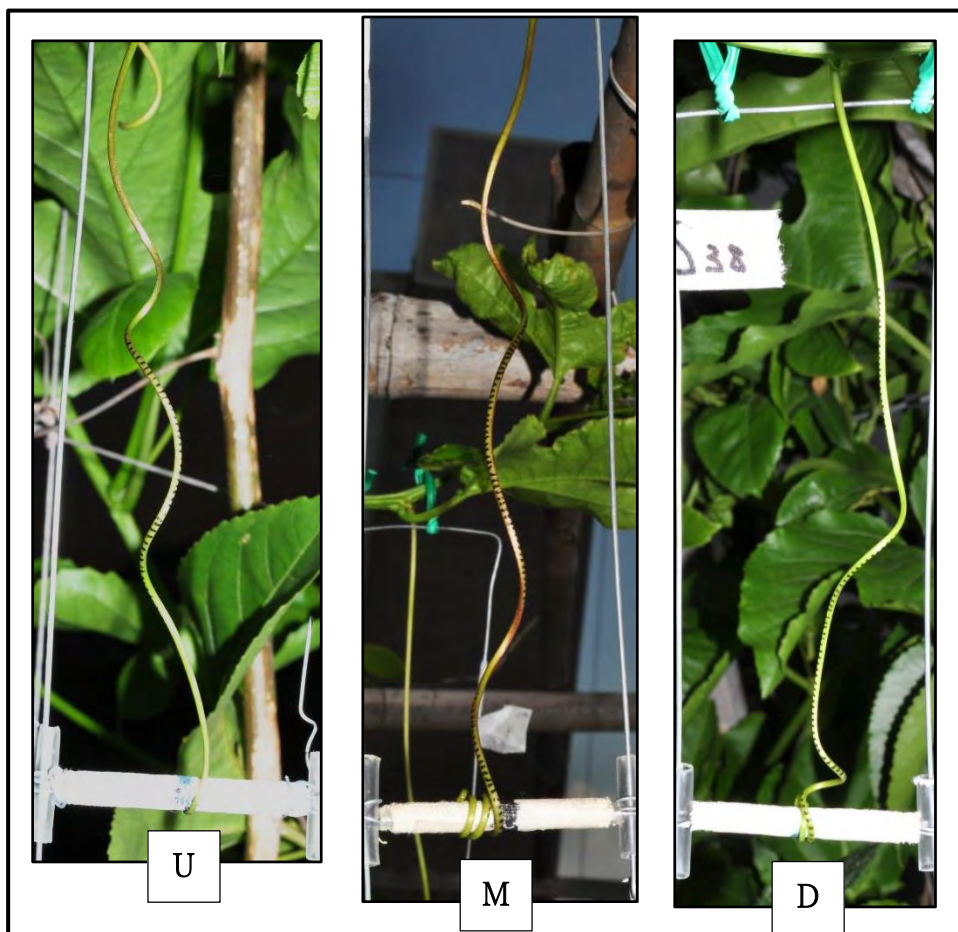


圖 21：第一個環產生的位置

表 3：R 組捲鬚直接回捲(不扭轉)或發生扭轉之百分比(原始數據如附件 2)

組別	直接回捲	第一個環產生的位置之捲鬚數量百分比		
		U	M	D
R	50%	32%	4%	14%

表 3 說明: R 組捲鬚會可能不發生扭轉而直接回捲。若發生扭轉，則紀錄第一個環產生之位置。

表 4：S 組捲鬚外周生長率與外/內徑之關係(S 組總測試 36 個)
(原始數據如附件 2)

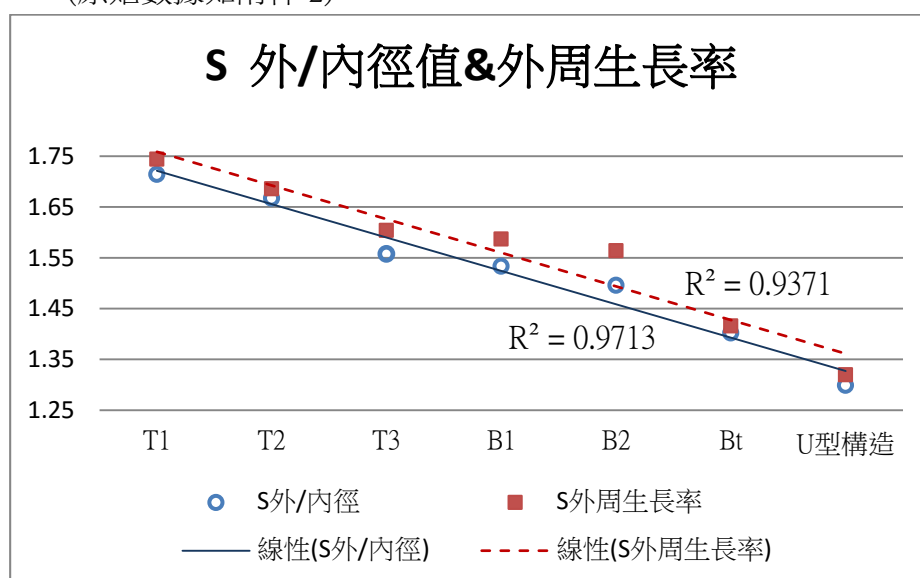


表 5：F 組捲鬚外周生長率與外/內徑之關係(F 組總測試 41 個)
(原始數據如附件 2)

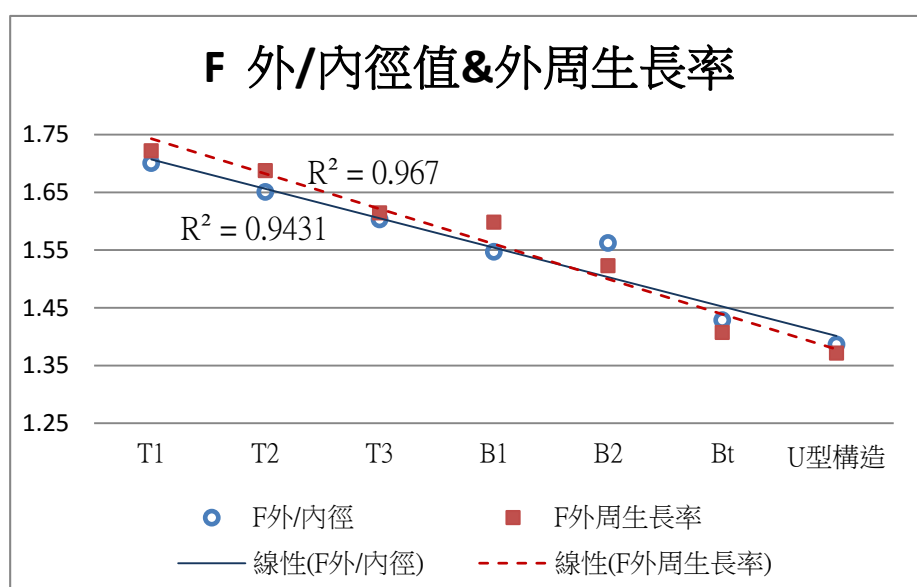


表 4、5 說明：

外周生長率：測量捲鬚形成彈簧後每個環的生長刻度變化。(彈簧形成後，生長刻度均位於彈簧外徑的位置，圖 20、21)

$$\text{外周生長率} = \frac{\text{生長後長度}}{\text{生長前長度}}$$

外/內徑：測量捲鬚形成彈簧後每個環的環外直徑與捲鬚粗細。

$$\text{外/內徑} = \frac{\text{環外直徑}}{\text{環外直徑} - \text{捲鬚粗細} \times 2} = \frac{\text{環外直徑}}{\text{環內直徑}}$$

表 4、5 計算證明：

令原捲鬚長 = x ，外周生長率 = a ($a > 1$)，內周長生長量(內徑 $\times \pi$) = b ($b = 0$; $b > 0$; $b < 0$)

i. $\text{外/內徑} = \frac{\text{環外直徑}}{\text{環內直徑}}$; $\frac{\text{環外直徑} \times \pi}{\text{環內直徑} \times \pi} = \frac{\text{外周長}}{\text{內周長}}$; 故 $\text{外/內徑} = \frac{\text{外周長}}{\text{內周長}}$

ii. 當捲鬚外周長生長，但內周長生長量為原來長度時($b=0$)：

$$\frac{\text{外周長}}{\text{內周長}} = \frac{ax}{x+b} = \frac{ax}{x} = a = \text{外周生長率}$$

iii. 當捲鬚外周長生長，且內周長長度增加時($b > 0$)：

$$\text{當 } b > 0, \frac{ax}{x+b} < a \rightarrow \text{故, } \frac{\text{外周長}}{\text{內周長}} < \text{外周生長率}$$

iv. 當捲鬚外周長生長，但內周長反而縮短時($b < 0$ ，且 $x + b > 0$)：

$$\text{當 } b < 0, \frac{ax}{x+b} > a \rightarrow \text{故, } \frac{\text{外周長}}{\text{內周長}} > \text{外周生長率}$$

表 6：F、S 組捲鬚扭轉角度與外周生長率之相對時間示意圖

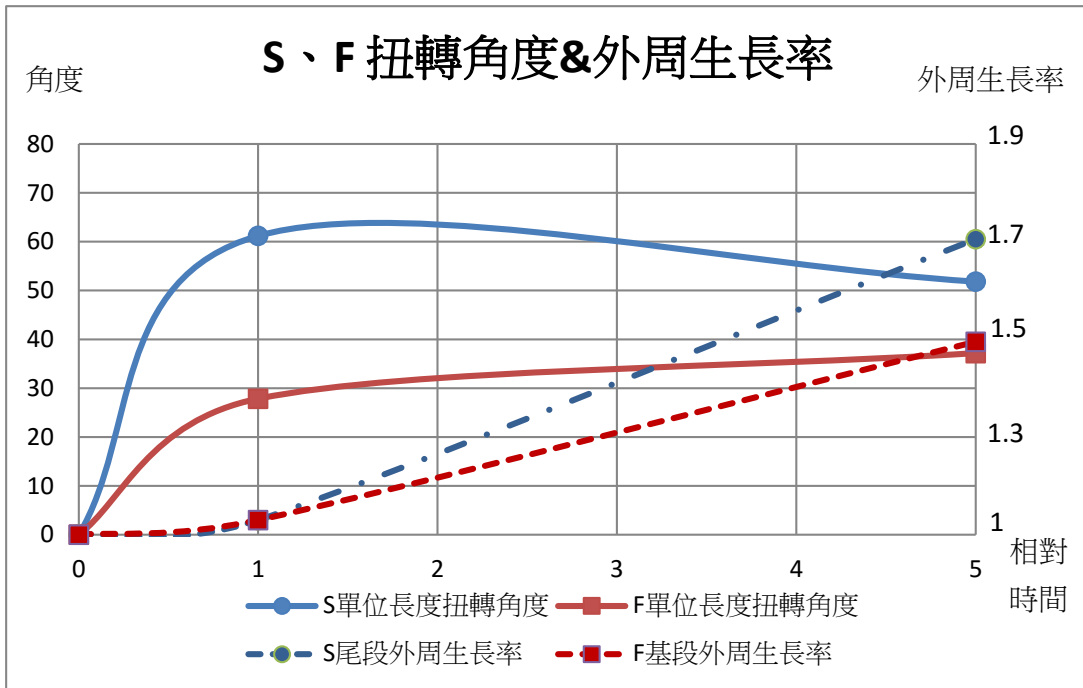


表 6 說明：

相對時間 1：捲鬚在形成第一個環產生前最大扭轉角度的時間，在此之前捲鬚幾乎無生長。

相對時間 1 至 5：捲鬚開始差異化生長，環圈逐漸形成。

相對時間 5：捲鬚形成彈簧狀後基段開始硬化的時間。

相對時間 1 的單位長度扭轉角度(度/公分) (圖 23)：

S 組：第一個環產生前最大扭轉角度除以尾段長度。

F 組：第一個環產生前最大扭轉角度除以基段長度。

相對時間 5 的單位長度扭轉角度(度/公分)：(圖 22)

S 組：形成彈簧狀後，尾段彈簧扭轉角度除以周長/2。

F 組：形成彈簧狀後，基段彈簧扭轉角度除以周長/2。

表 6 折線圖顯示：

S 組：第一個環產生前，最大單位長度扭轉角度大於彈簧產生所需角度。

F 組：第一個環產生前，最大單位長度扭轉角度小於彈簧產生所需角度。

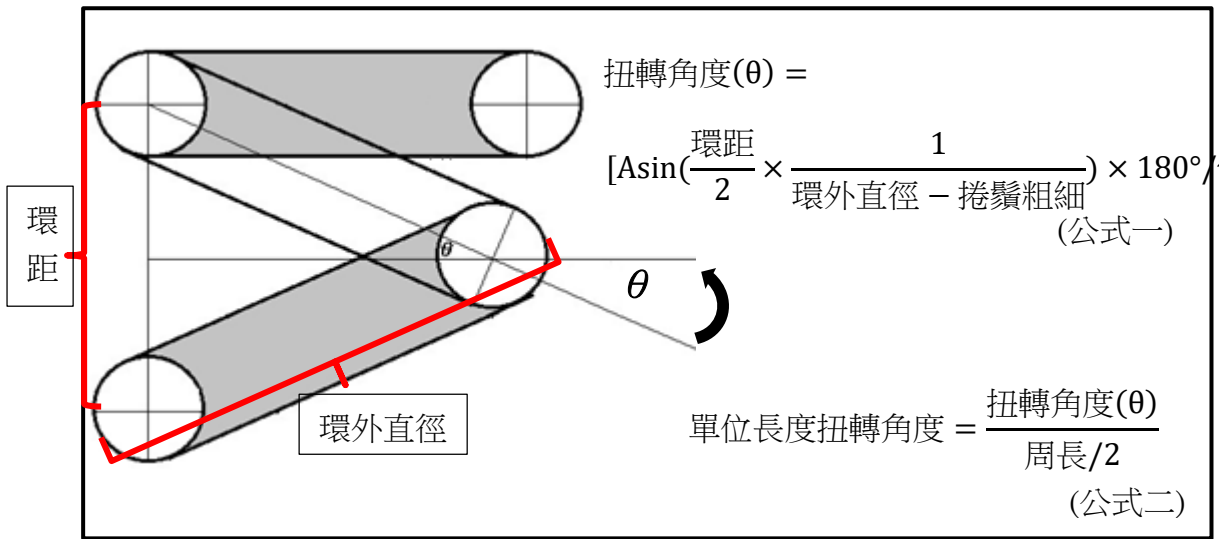


圖 22：彈簧狀捲鬚扭轉角度計算方式

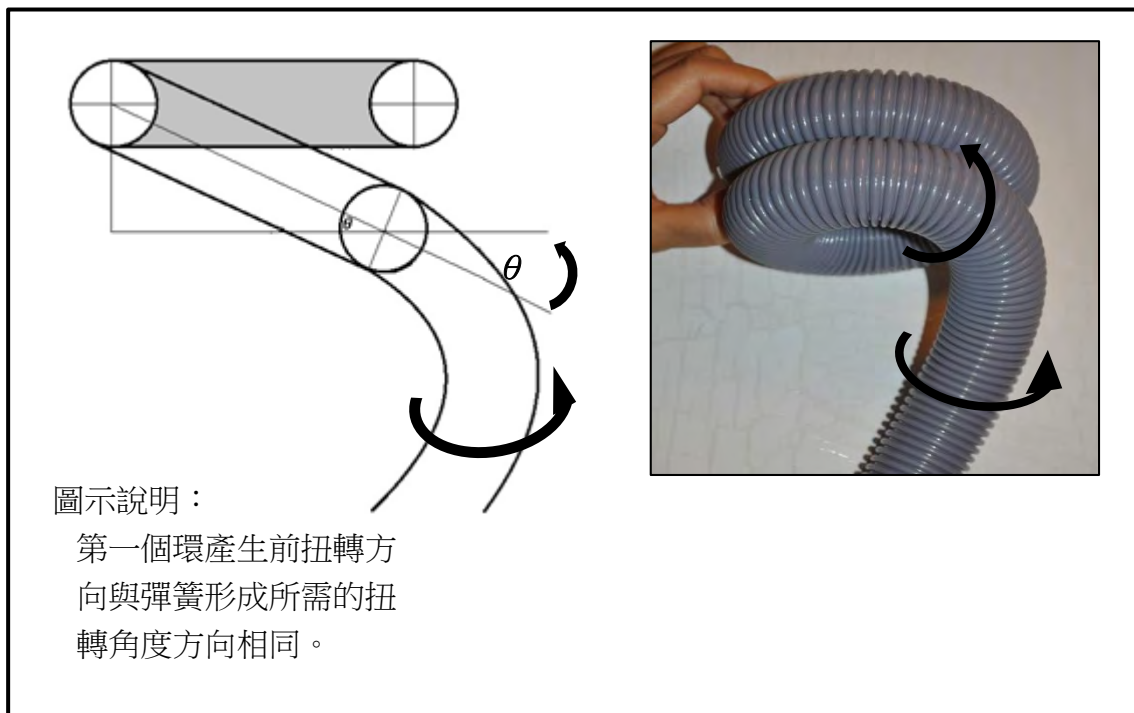
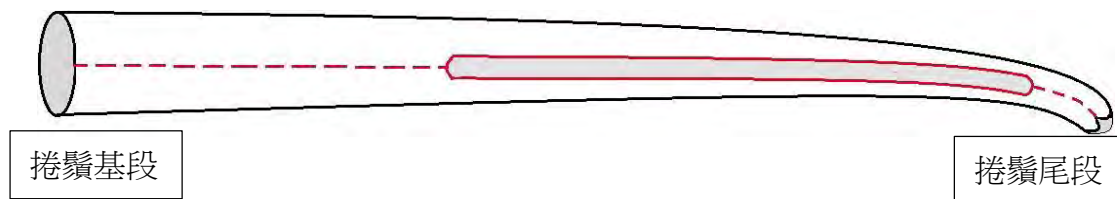


圖 23：第一個環產生前之扭轉角度與彈簧產生後扭轉角度之關聯性

3. 比較捲鬚形成彈簧狀前與形成彈簧狀後，表面與解剖構造之差異

(1) 鐵絲刺激捲鬚之表面觀察

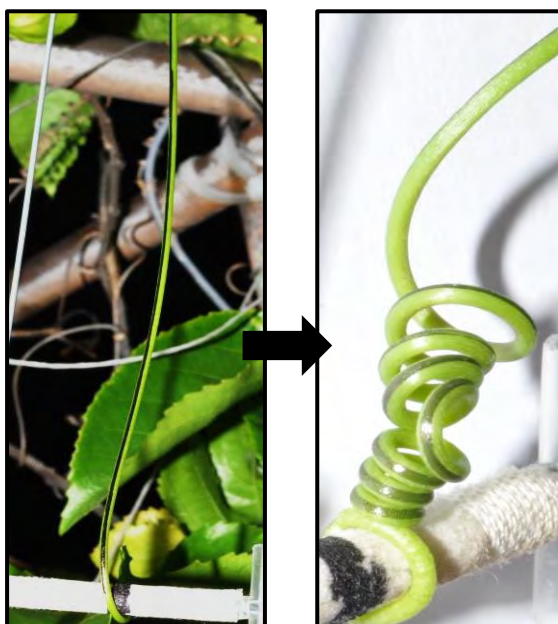
圖 24：捲鬚多次扭轉後與鐵絲最終接觸位置之範圍



圖示說明：在改變刺激點的實驗中，上圖紅線內灰色區域會成為捲鬚扭轉後與鐵絲碰觸的主要位置。

(2) 彈簧形成前後之表面觀察

圖 25、26：彈簧形成前後之表面外觀圖

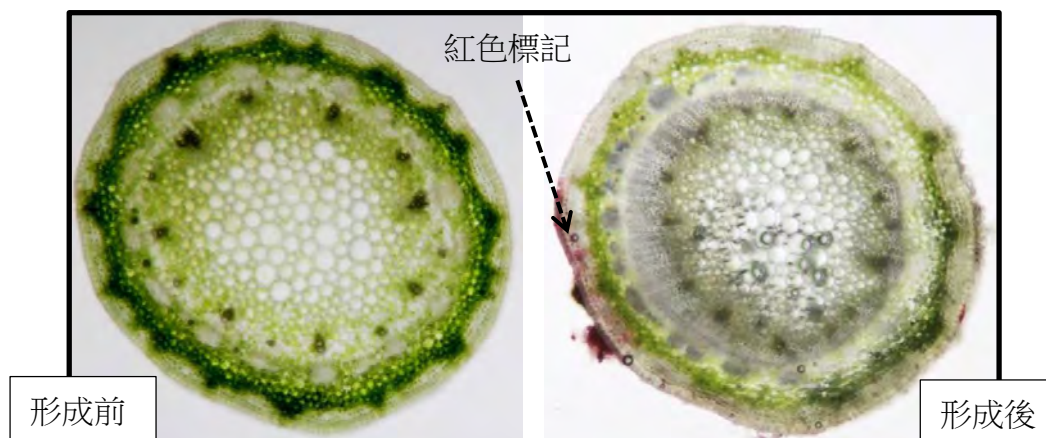


圖示說明：

將圖 24 紅線內灰色區域的背面畫上黑線(圖 25)，當捲鬚形成彈簧狀時，黑線會完全位於彈簧外側(圖 26)。黑線標示位置，即為圖 10 中手繪生長刻度的位置。

(3) 彈簧形成前後之解剖橫切面構造觀察

圖 27：捲鬚切片比較圖



圖示說明：將彈簧狀捲鬚的內側畫上紅色標記，再進行切片。發現彈簧內側之木質部不均勻增厚(靠近紅色標記處較厚)。

4. 建立捲鬚形成彈簧狀時，受扭轉運動影響的幾何模型

為簡化討論條件，本模型假設內周長生長量為零。

水管粗細=37mm，該水管具有彈性，被擠壓成全長為 540mm(用細繩固定其長度，視為彈簧的內周)的直管(圖 28)

∴圓環直徑=內直徑+水管粗細；外直徑=內直徑+(水管粗細*2)；

且 外/內直徑=外周生長率

∴水管粗細=37mm，外周生長率=1.65，則直管模型彈開後，可形成圓環直徑 $\cong 150.8$ mm 之彈簧，彈簧約 1.5 圈。

以下各模型則以圓環直徑 $\cong 150.8$ mm，利用圖 22：公式一、公式二，代入不同扭轉角度，求得環距。

$$\text{捲鬚單位扭轉角度} = \frac{\text{扭轉角度}(\theta)}{\text{周長}/2} \quad (\text{公式二})$$

$$\therefore \frac{360^\circ}{\text{捲鬚單位扭轉角度}} = \text{扭轉 } 360^\circ \text{ 所需的捲鬚長度(cm)}$$

又 捲鬚長度：水管長度 = 捲鬚粗細：水管粗細

∴已知 捲鬚粗細：水管粗細

∴可知 扭轉 360° 所需的水管長度，並將長度 cm 換算成 mm

帶入 540mm(水管模型總長度)

∴可知 540mm 所扭轉的角度 (公式三)

(1) 模型一：抑制軸為鉛直線(圖 28)： $0^\circ/540\text{mm}$

當模擬抑制軸為鉛質線時，相當於捲鬚無扭轉行為，則捲鬚無法形成彈簧狀。

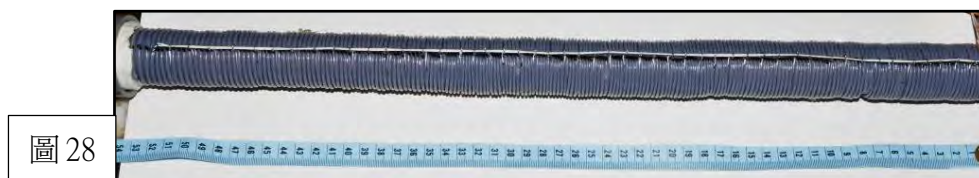


圖 28

(2) 模型二：F 組形成彈簧狀後基段彈簧扭轉角度除以周長(度/公分，可得單位扭轉角度)= 37.17° (F 組基段平均值)

水管粗細：F 組基段捲鬚平均粗細=37：0.882 (mm)；

經下圖公式 1 計算，可知水管的單位扭轉角度(圖 29) = $47.85^\circ/540\text{mm}$ ；

因為環直徑=150.8 mm 且單位扭轉角度= $47.85^\circ/540\text{mm}$

經過圖 26 之公式計算→環距=82.88mm；底=145mm (圖 32)

原單位扭轉角度	捲鬚粗細	水管單位扭轉角度	水管環距	水管底
$37.17^\circ/10\text{mm}$	0.882mm	$47.85^\circ/540\text{mm}$	82.88mm	145mm

(請注意水管上的黑線與白色細繩之間的偏移，此黑線為基準鉛直線。)

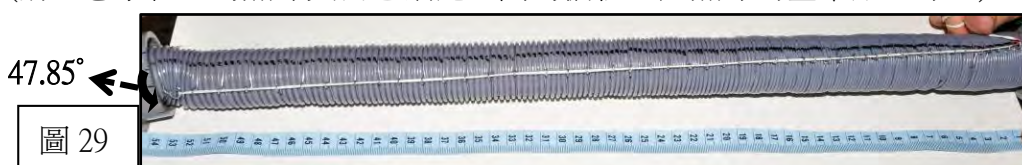


圖 29

(3) 模型三：S 組形成彈簧狀後尾段彈簧扭轉角度除以周長(度/公分，可得單位扭轉角度)= 51.83° (S 組尾段平均值)

水管粗細：S 組尾段捲鬚平均粗細=37：0.882 (mm)；

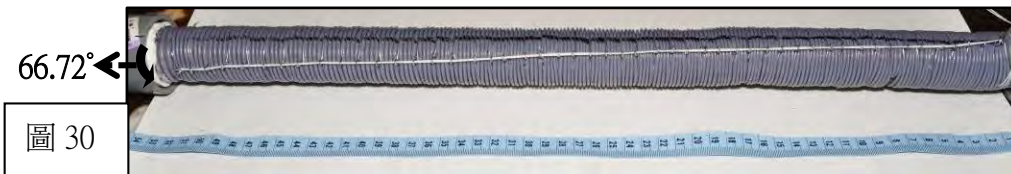
經下圖公式 1 計算，可知水管的單位扭轉角度(圖 30) = $66.72^\circ/540\text{mm}$ ；

因為環直徑=150.8 mm 且單位扭轉角度= $66.72^\circ/540\text{mm}$

經過圖 26 之公式計算→環距=114.15mm；底=139.58mm (圖 33)

原單位扭轉角度	捲鬚粗細	水管單位扭轉角度	水管環距	水管底
$51.83^\circ/10\text{mm}$	0.882mm	$66.72^\circ/540\text{mm}$	114.15mm	139.58mm

(請注意水管上的黑線與白色細繩之間的偏移，此黑線為基準鉛直線。)



(4) 模型四：在 S 組第 3 組捲鬚中，有次大值單位長度扭轉角度= 93.24°

水管粗細：S 組第 5 組捲鬚環粗細=37：0.85 (mm)；

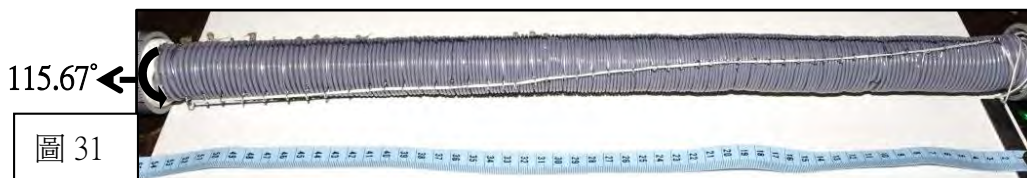
經下圖公式 1 計算，可知水管的單位扭轉角度(圖 31)： $115.67^\circ/540\text{mm}$

因為環直徑=150.8 mm 且單位扭轉角度= $115.67^\circ/540\text{mm}$

經過圖 26 之公式計算→環距=187.98mm；底=117.93mm (圖 34)

原單位扭轉角度	捲鬚粗細	水管單位扭轉角度	水管環距	水管底
$93.24^\circ/10\text{mm}$	0.85mm	$115.67^\circ/540\text{mm}$	187.98mm	117.93mm

(請注意水管上的黑線與白色細繩之間的偏移，此黑線為基準鉛直線。)



公式推導數值

實際模型數值

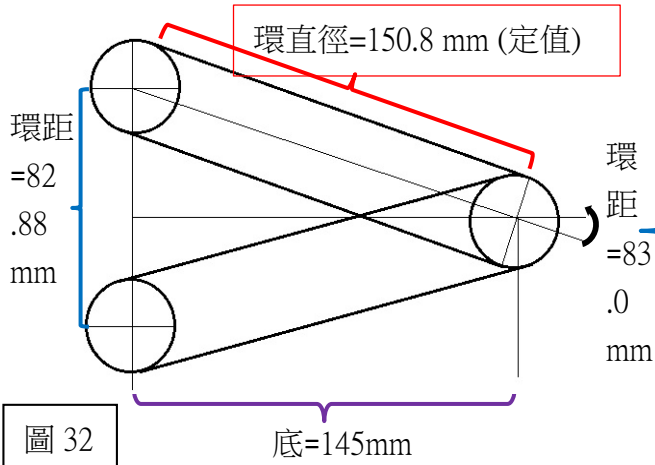


圖 32

底=145.5mm

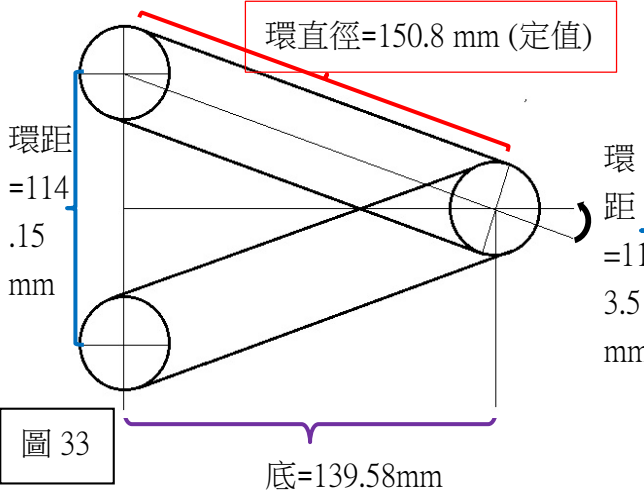


圖 33

底=142.0mm

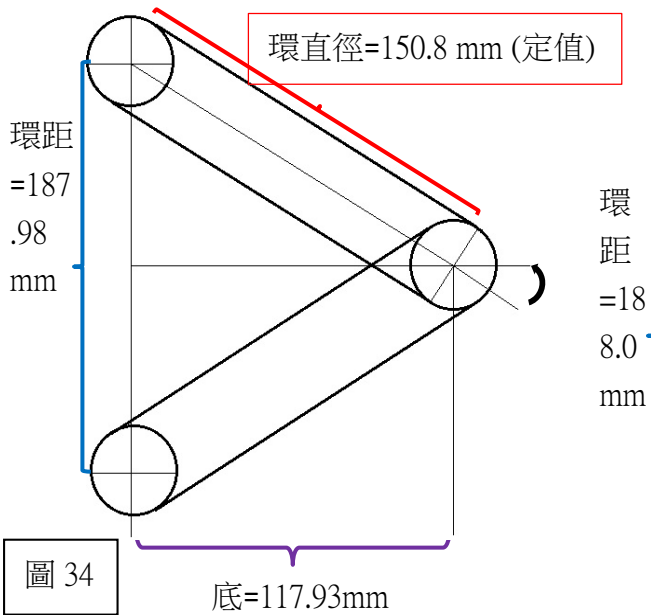


圖 34

底=118.5mm

5. 討論

(1) 扭轉運動的主動性與可逆性

在進行百香果捲鬚實驗前，已經發現若以鐵絲刺激虎葛捲鬚，有 86.2% 的捲鬚會先發生扭轉運動，再行差異化生長捆束鐵絲。在百香果實驗中，發現以人為方式改變鐵絲與捲鬚的接觸位置，100% 的捲鬚會發生扭轉運動，重新捆束鐵絲(圖 17-a.b.c.)。再次改變捲鬚與鐵絲的接觸位置，有 50% 的捲鬚會重新捆束鐵絲，(未重新捆束鐵絲的捲鬚，則不捆束鐵絲而直接回捲。圖 17-d.)。有 6.33% 的捲鬚可發生三次的扭轉方向改變(表 1)。此現象顯示，百香果捲鬚的扭轉運動，較虎葛更具可逆性。

(2) 緩慢生長區應為特定的直帶狀區域

解剖結果顯示，在發生差異化生長前，百香果與虎葛捲鬚的橫切面構造，幾乎是對稱的(圖 4、27)。差異化生長使捲鬚形成彈簧狀，彈簧狀捲鬚成形後，彈簧的內側才逐漸生成硬化組織(厚角或厚壁細胞)，使捲鬚橫切面明顯呈現不對稱構造(圖 4、27)。捲鬚藉扭轉運動使某些表面與捆束物接觸，這些表面大致可連成直帶狀區域。此直帶狀區域在捲鬚形成彈簧狀的過程中，為生長緩慢的區域。就百香果而言，我們推測直帶狀的緩慢生長區域約位於捲鬚尾部鈎尖至基部的連線(直線)(圖 24)；虎葛則是基部五稜(主要為厚角細胞所組成)中的一稜，向尾部延伸的連線。本實驗認為：雖然差異化生長前的解剖構造是幾乎對稱的，而緩慢生長的直帶狀區域，也無明顯的特徵，但並非任意區域皆可成為緩慢生長帶。百香果與虎葛的捲鬚是藉扭轉運動將特定帶狀區域轉向接觸物，之後再行差異化生長捆束刺激物。若將刺激物直接碰觸此特定面，捲鬚則不會扭轉，直接捆束。

(3) 扭轉使直帶狀緩慢生長區成為螺旋狀

由於本實驗推測應有既定的直帶狀緩慢生長區，因此於此直帶狀區域之對側(快速生長帶)畫上一條直線(圖 25)，在歷經捲鬚發育為彈簧狀後，發現此直線始終位於彈簧的外側(圖 26)，此現象顯示：捲鬚形成彈簧狀需經扭轉，才能使該直線始終位於外側。就水管模型而言，調整水管上的鐵環與細繩的連線成螺旋狀，也可使水管在不扭轉的情況下形成彈簧狀(圖 32-圖 34)。由上述兩點可知，捲鬚形成彈簧狀有兩種可能方式：將原本是直帶狀的緩慢生長區，扭轉成螺旋狀，再行差異化生長；或者，捲鬚先形成螺旋狀的緩慢生長區，再行差異化生長。但由畫在捲鬚上的直線顯示，捲鬚是將直帶狀的緩慢生長區扭轉成螺旋狀，而非直接發育出螺旋狀的緩慢生長區。依據酸生長假說得知：IAA 在細胞間的頂端向基部運送(basipetal)。因此，本實驗推測：捲鬚並非以固定的螺旋途徑傳遞 IAA。此外，依據水管模型推導：若螺旋狀抑制區的角度、水管粗細與外周生長率為定值，則轉向與環距即為定值。如此僵化的調控機制，可能使捲鬚難以應付不可預測的外力阻抗。相對的，若是捲鬚遭遇不同的外力阻抗時，直帶狀緩慢生長區再扭轉成不同程度的螺旋狀，應是較佳的適應方式。

(4) 捲鬚拉近捆束物受到阻抗時，可預先扭轉捲鬚

本實驗原先設計不同拉力的支架，但由於拉力量難以精確控制，故改成可滑動支架(F 組與 R 組)與不可滑動支架(S 組，僅於清晨與黃昏讓捆束物短暫滑動，鬆弛繃緊的捲鬚)進行對照。該實驗結果顯示：當捲鬚已將捆束物繃緊，即使未開始拉近捆束物與基部的距離，捲鬚會在幾乎無生長的情況下發生扭轉運動(圖 19、20)。實驗結果顯示：S 組的第一個環產生前的扭轉角度大於 F 組(表 2)。扭轉運動發生後，捲鬚的差異化生長使彈簧狀構造逐漸形成(此時扭轉運動可能持續進行)，捲鬚會拉近捆束點與基部的距離，而捲鬚所拉近的距離 = (捲鬚原來長度) - (彈簧形成後總長)。在差異化生長過程中，假設彈簧內徑毫無生長，則可將彈簧的內徑視為捲鬚原來的長度，因此彈簧的環距越大，彈簧總長越長，拉近距離就越短。依據扭轉水管模型的推導：
$$\text{扭轉角度} = \text{Asin}\left(\frac{\text{環距}/2}{\text{環直徑}}\right) * 180/\pi$$
，當環直徑相同，扭轉角度 \propto 環距。換言之，扭轉角度越大，彈簧的環距越大，而拉近的距離也就越短。為了簡化討論條件，假設捲鬚差異化生長過程中，細胞生長運動所提供的能量(W)相同，當拉近的距離(S)越短，則可施出更大的力(F)將捆束物回捲(依據 $W = F \times S$ ，若 W 為定值，F 與 S 成反比)。此推論可說明，捲鬚在拉近捆束物前，若主動扭轉捲鬚，使直帶狀的緩慢生長區成螺旋狀，這雖使捲鬚形成彈簧狀的過程中減少拉近距離，但可增加拉力。此推論也可解釋：S 組第一個環產生前的扭轉角度大於 F 組的現象(表 6)。此外，在 R 組支架(捆束點可滾動且能滑動)中，發現有 50%的捲鬚不發生扭轉(表 3)(圖 18)，直接藉差異化生長回捲捲鬚。此現象與百香果捲鬚未碰觸物體會直接回捲的狀況相似(圖 7)。該現象應是捲鬚未捆束物體，或捆束點可輕易滾動與滑動時，捲鬚在回捲過程中，遭遇的阻抗過小，不足以引發捲鬚的扭轉運動。

(5) 基部的扭轉運動應較尾部更早發生

本實驗初期，曾嘗試以鐵絲碰觸虎葛捲鬚。藉由虎葛捲鬚上的稜線，可觀察到捲鬚是由靠近基部的位​​置先行扭轉，再慢慢延伸到尾段，而尾段的扭轉角度最大。在百香果 S 組與 F 組的實驗結果也顯示：扭轉角度越大時，最大扭轉角度與第一個環產生位置較接近尾段(表 2)。本實驗推測，百香果捲鬚也與虎葛相同，是由靠近基部的位​​置先行扭轉，但因該實驗進行時，捲鬚的尾端已捆束固定，因此最大扭轉角度的位置，隨扭轉角度的增加，逐漸靠近尾段。

(6) 遞減的差異化生長率

圖表 4、5 的結果顯示：若將彈簧狀捲鬚的『外周生長率』依 T1、T2、T3、B1、B2、Bt、U 型構造的順序排列，可以得到相關係數高於 0.9 的線性回歸關係。此現象顯示，捲鬚的差異化生長率，會依此順序逐漸遞減。換言之，若將捲鬚視為：兩個藉 U 型構造連接的彈簧，則不論 S 組或 F 組，近基部的彈簧的『外周生長率』均小於近尾部的彈簧；就單一彈簧而言，亦是近基部的彈簧大於近尾部的彈簧(圖 18)。相較『討論 5』的內容則可發現：扭轉運動

是由基部逐漸擴至尾部；差異化生長則是尾部朝基部遞減，顯示扭轉運動與差異化生長，不但是先後發生，發展的方向也相反。

(7) 不同阻力下捲鬚的發育差異

依據文獻所述：捲鬚在差異化生長過程中，內徑依然有些微的生長。本實驗試著利用『外周生長率』與『外/內徑值』的比較，驗證此一觀點。依據幾何圖形推論，若假定內徑無生長，則應『外周生長率』等於『外/內徑值』，而『外周生長率』大於『外/內徑值』時，內徑則有伸長。依據表 5 顯示，除 F 組的 B2、Bt 和 U 型構造以外，『外周生長率』均略大於『外/內徑值』。此數據顯示：除 F 組的 B2、Bt 和 U 型構造外，符合文獻的觀點。可是 F 組的 B2、Bt 和 U 型構造為何會有不符合的現象？本實驗推論，由於 F 組受到的阻力低，這些部位內徑的新生細胞，可能較外徑柔軟，因此在外徑快速生長的壓迫下，壓縮了細胞的長度。此現象在受阻力高的 S 組中並未發生。由於所查到的文獻，並未對不同阻力下捲鬚的發育差異進行討論，因此難以得知本結果是否具有普遍性。依水管模型推論：內徑細胞的縮短，無助於增加拉力，但應可大幅、快速拉近與捆束點間的距離，所以有利 F 組(捆束點易滑動、阻抗低)的情況。

(8) 彈簧橫切面不對稱形與拉力的關聯性

虎葛或是百香果的捲鬚，在靠近彈簧內徑的部位均會出現加厚構造，使捲鬚明顯的呈現不對稱形(圖 27)。多數具有捲鬚的植物，常是由對稱形發育為不對稱形(除葡萄科與西蕃連科外，還有紫葳科 *Bignoniaceae* 等)，瓜科(*Cucurbitaceae*)，則是原本即為不對稱形。一般彈簧在壓縮或伸長時，扭轉形變是產生彈力的主因，但由於橫切面近乎對稱，因此受力發生扭轉形變時，其環直徑幾乎不發生改變。然而，內徑的加厚構造可能使扭轉的中心位置偏向內側，造成彈簧扭轉時環直徑縮短(圖 35)。由幾何圖形推導運算，當環直徑縮短時，環距會縮短，但彈簧回圈量會增加，故彈簧總伸長量不變。換言之，這類不對稱彈簧，在相同拉伸長度下，相較於對稱形彈簧，不對稱形彈簧由於多了環直徑縮小的形變，需較大的拉力。因此，不對稱形彈簧可藉較小的扭轉形變角度，承受相同的拉力，捲鬚可能較不易受損。

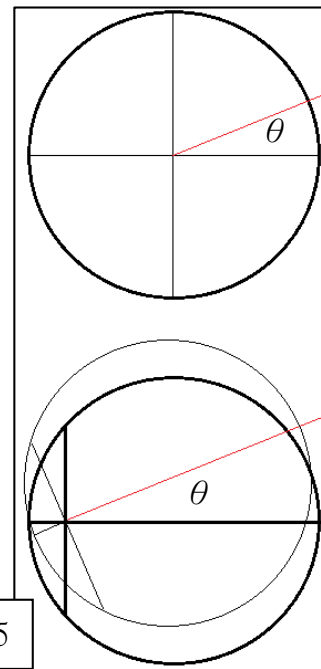


圖 35

(9) 扭轉運動對捲鬚所施予的預力

本實驗將所測得的『第一個環產生前最大扭轉角』和『形成彈簧狀後捲鬚扭轉角度』，對應所觀察到的『外周生長率』製成示意圖(表 6)。該圖顯示，不論 F 或 S 組，產生『第一個環產生前最大扭轉角』時，捲鬚幾乎觀察不到外徑生長。此外，不論『第一個環產生前最大扭轉角』或『形成彈簧狀後捲鬚扭轉角度』，F 組均小於 S 組。此示意圖還顯示一個重要現象：S 組『第一個環產生前最大扭轉角』大於『形成彈簧狀後捲鬚扭轉角度』；F 組則是小於。

S 組的現象可根據『討論 4』的內容：越大的『第一個環產生前最大扭轉角』可產生更大的拉力，來說明。但此現象也顯示：部分 S 組捲鬚，由於『第一個環產生前最大扭轉角』大於『形成彈簧狀後捲鬚扭轉角度』，使得在形成彈簧狀過程中，反而逐漸減少扭轉角度。依據水管模型，減少扭轉角度可縮短環距，拉近捆束物。

歸納上述諸點討論：當捲鬚回捲遭遇大的阻抗時，扭轉運動可令直帶狀緩慢生長區產生過大的扭轉角度，此形態有利於差異化生長運動產生更大的拉力。當彈簧逐漸形成後，扭轉運動反向進行，減少扭轉角度，拉近捆束物。本實驗將此現象視為：扭轉運動對捲鬚所施予的預力。事實上，百香果捲鬚逆轉扭轉方向的現象，在先前改變鐵絲與捲鬚的接觸位置的實驗中，已經出現了(圖 17-a.b.c.)。

(10) 扭轉運動可能與韌皮部細胞的位置錯動有關

本實驗未在文獻中查閱到有關扭轉運動的敘述，故僅能以有限的植物學知識和本實驗的初步結果，推測扭轉運動可能的成因。就初步結果顯示，扭轉運動應有下列的特點：可在幾乎無生長的情況下發生；直帶狀分布的細胞被扭轉成螺旋狀；可反覆扭轉。本實驗曾對扭轉劇烈的捲鬚進行連續切片，初步認為維管束的排列也扭轉成螺旋狀 (因成功標示的標本有限，故僅供討論參考)，所以扭轉運動並非僅發生在表面的細胞。依據上述論證，本實驗試著將維管束與其周圍的基本組織(皮層或髓等細胞)，設想成一個圓筒狀，再將該圓筒剪開，展開成四方形。維管束內的細胞較長條形且排列緊密；其周圍的基本組織較為圓形且鬆散。若排列緊密的維管束細胞發生錯動而傾斜，周圍的基本組織也被迫調整排列方式，形成另一個四邊形(圖 36)，將此四邊形捲回圓筒狀，則可呈現直帶狀分布的細胞被扭轉成螺旋狀的現象。在維管束中，靠近中心的木質部多為死細胞，發生細胞壁微纖維重新排列或中膠層瓦解的可能性較低；外圍的韌皮部多為活細胞，較可能藉上述機制調整細胞間的相對位置，況且就力學原理而言，靠外側的細胞帶動中心位置的細胞扭轉，應較中心位置的細胞帶動外側的細胞扭轉更有效率。綜言之，扭轉運動可能與韌皮部細胞的位置錯動有關。

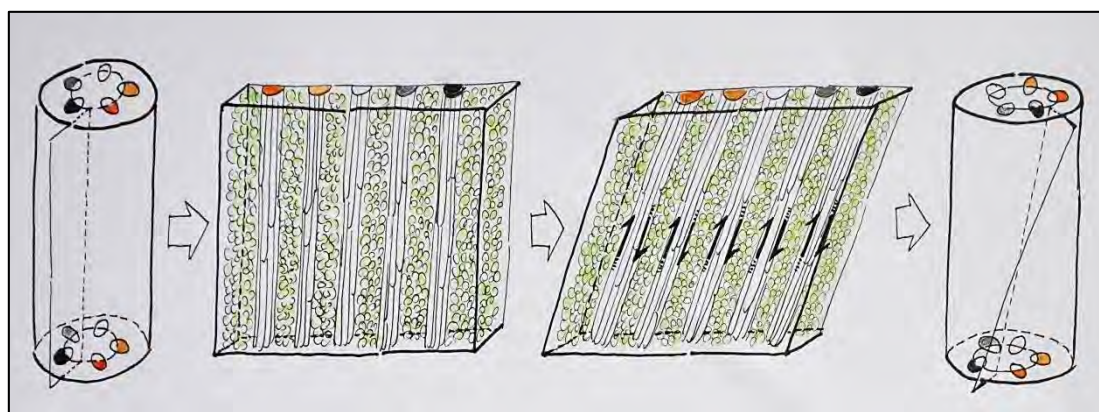


圖 36

(四)、結論與應用

1. 百香果與虎葛捲鬚的緩慢生長區為特定的直帶狀區域。
2. 改變捆束物位置，捲鬚可藉扭轉運動反覆搜尋捆束物，使緩慢生長區轉向捆束物。
3. 捲鬚拉近捆束物受到阻抗時，可藉扭轉運動，先使直帶狀緩慢生長區成為螺旋狀，再行差異化生長形成彈簧狀捲鬚。
4. 彈簧狀捲鬚形成後，直帶狀緩慢生長區附近會產生加厚構造，使彈簧橫切面成為不對稱形。
5. 依據圖 35 模型推論，當受到伸縮的外力時，不對稱形彈簧較一般對稱形彈簧，多了環直徑改變的形變，因此可以較小的扭轉形變承受外力，減少對彈簧的損壞。本研究認為以金屬或碳纖維作為彈簧內側的材料，再包覆塑膠於外側，製成複合材料的彈簧，應可達到類似捲鬚彈簧質輕且高承載力的效果。在一般日常用品中，塑膠複合材料的製作方式很常見，如碳纖布與塑膠複合成的車體、球拍、釣竿等。這些雖常為高單價製品，但若有質輕且高承載力需求的彈簧製品，這項仿生製品應是有其可觀的應用價值。

(五)、參考文獻

蔡淑華著 植物解剖學 國編館

William G. Hopkins、Norman P.A Huner 植物生理學 偉明

總審校：鐘楊聰 偉明 生物學

Cogdel I,C. and Riechers,P. 2012 **Nonlinear Dynamics of Passionflower Tendril Free Coils** csc.ucdavis.edu/

Goriely,A. and Neukirch,S. 2006 **The mechanics of climbing and attachment in twining plants** PHYSICAL REVIEW LETTERS

Goriely,A. and Tabor,M. **The Mechanics and Dynamics of Tendril Perversion in Climbing Plants**

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.38.1730>

【評語】 060007

本研究作品主旨在於討百香果捲鬚在不同支架，捆束而產生扭轉，並探索解剖橫切面內、外圈細胞生長與不對稱的構形。針對學生對研究工作的熱忱與辛勞的付出表示嘉許。學生自行設計的幾何與實體模型的模擬，理論與實際能相互印證，尤為表現出色。