

2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 060009

參展科別 植物學

作品名稱 似彈簧的卷鬚構造對藤本植物的作用與影響

得獎獎項 大會獎：三等獎

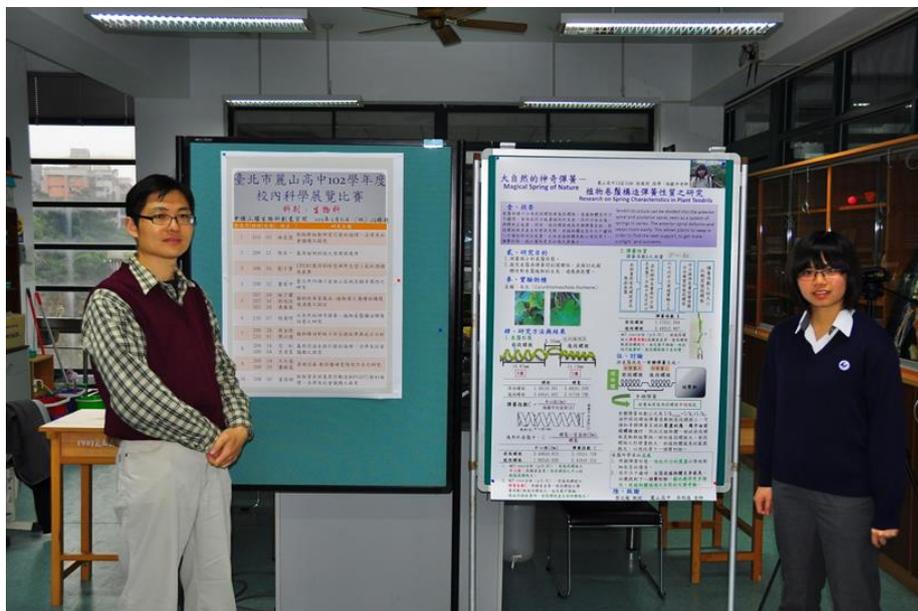
就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 林獻升、郭瓊華

作者姓名 張寓閔

關鍵字 彈簧指數 C、彈簧常數 K、膠質纖維 G-fiber

作者簡介



我是張寓閔，就讀於臺北市立麗山高中。小時候，父母經常帶著我和姐姐去郊遊，除了欣賞大自然外，也培養出了我對大自然的求知慾。在好奇心的驅使下，使我從小時候開始，時常至圖書館借閱自然方面的相關書籍，由此，我發現我對於生物方面的知識，特別具有熱情。在進入麗山高中後，我們學校有別於一般高中，有著全國首創的校本特色課程-研究方法與專題研究。在因緣際會與興趣的引領下，我進入了生物研究方法課程。在研方課程中，由生物老師帶領著我們認識學校的動植物，並引領著我們去探究生物的奧妙，經由此課程，讓我對生物越來越有興趣。接下來我繼續選修生物專題研究課程，這是麗山高中每一位高一學生都要選修的一門專題課程，在課程之中老師繼續教導我們該如何進行一個科學研究，並要求我們實際進行一個有深度的專題實驗，來驗證所學到的科學研究方法。在進行兩年的專題實驗過程中，我學習到如何設定一個有深度的題目、該如何尋找適合的文獻參考、設計實驗方法解決問題、如何精確的測量實驗數據及統計與分析，撰寫一個科學研究報告等，在在都是在磨練著我們的研究技能，非常的實用。雖然這兩年的過程常常會遇到挫折與失敗，但我都堅信只要努力，就可以解決困難，因此在專題研究中我獲得了許多人生的經驗與研究的技能，非常有別於傳統上課的知識傳授。最後我很開心能夠有機會參與今年 2015 台灣國際科展，讓大家能了解到我兩年努力的研究歷程。

似彈簧的卷鬚構造對藤本植物的作用與影響

壹、摘要

瓜科植物的卷鬚分為基部與末端螺旋，兩者方向相反，中間以逆向纏繞區相連。基部螺旋的螺距與螺寬較大，是一種較大型的彈簧。由形態數據推導出彈簧指數 C ，結果為基部螺旋的 C 值較大，**受力作用後形變量較大**。利用虎克定律探討彈簧常數 K ，結果為末端螺旋 K 值較大，是一種**剛硬度較大的彈簧**。將卷鬚切片染色後發現，膠質纖維(G-fiber)細胞與厚角細胞分布於螺旋內側面，在迴旋盤捲時逐漸生成。由於『**纖維帶不對稱木質化程度**』與『**螺旋不對稱柔硬組織分佈**』，造成莖兩側不對稱收縮力作用，讓彈簧狀的卷鬚形成。而基部與末端螺旋有不同彈簧性質的原因，是因為兩段螺旋的『**膠質纖維不同含量**』及『**纖維帶木質化程度**』不同，造成卷鬚內部彈性與收縮力的差異所致。

The function and influence of spring-like tendrils in vine plants

貳、Abstract

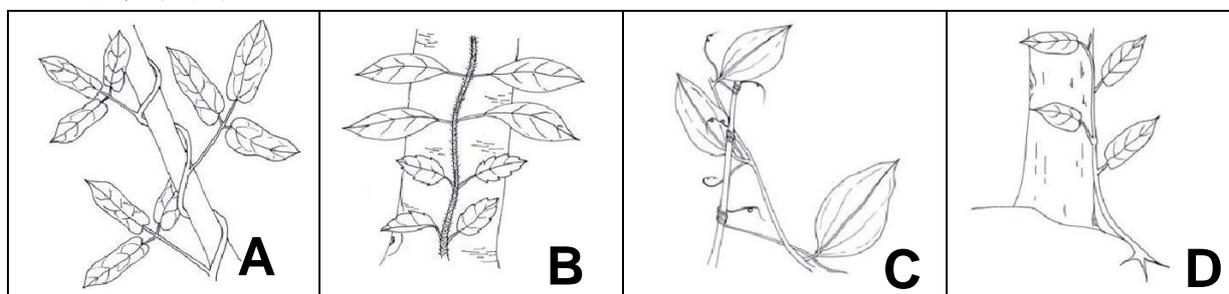
The spring-like tendril found in Cucurbitaceae can be divided into the base spiral and terminal spiral. They wind in opposite directions and are connected by a helical perversion. The base spiral has a larger pitch and width, and is thus a larger spring. Deriving their spring indexes (C) from measurements, the C value of the tip spiral was found to be higher, which makes it deform more easily. Using Hooke's law to find their spring constants (K), the K value of the base spiral was found to be higher, resulting in higher stiffness. Samples from both spirals were then stained and observed by microscope. Gelatinous fiber cells (g-fiber) and collenchyma cells are distributed along the interior side of the helix, formed during free coiling. Because "fiber ribbon asymmetry lignification" and "spiral asymmetric stiffness tissue distribution", causing asymmetric contractile force in stem. It let spring-like tendrils forming. Base and terminal spiral have different characteristics. The reason is that G-fiber different content and degree of fiber ribbon lignification in two spring causing different elasticity and contraction strength in internal tendril.

參、前言

一、研究動機

植物生長時會受外界環境因子的刺激，而產生改變生長方向或開花等反應。其中某些植物的幼芽或卷鬚碰到物體時，會產生彎曲生長的現象，稱為**向觸性(thigmotropism)**，此現象除了可避免幼嫩的組織受到傷害，又可使其枝條支撐植物體，攀緣至陽光充足的地方，以獲得更多養分，為一種重要的生存適應。而藤本植物更是經常被拿來研究向觸性的對象。

藤本植物 (vine) 為莖部細長，無法直立，藉由依附其他物體或匍匐於地面生長的非自體支撐植物。由於可節省生長支撐組織的能量，使它們能聚集更多資源刺激其生理活動，葉的增長使藤本植物能更有效地吸收陽光、獲得養分。而大部分的藤本植物為被子植物，依莖的結構可分為木質藤本與草質藤本，依攀爬方式可分為纏繞藤本，吸附藤本，卷鬚藤本，攀緣藤本。而其中卷鬚藤本 (圖一 C.) 如瓜科、葡萄科或西番蓮科植物等，便是利用卷鬚構造抓住物體得到支撐。



圖一、各藤本植物其攀爬示意圖(取自：張，2005)。

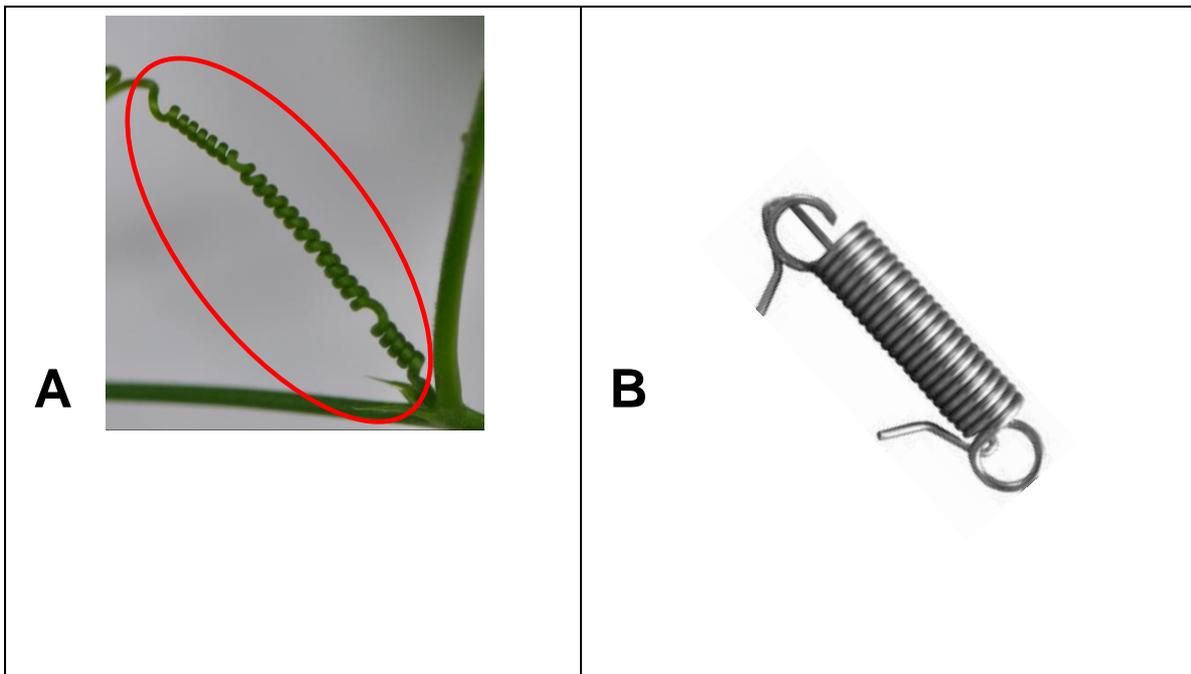
A. 為主莖纏繞藤本

B. 為不定根吸附藤本

C. 為卷鬚纏繞藤本

D. 為蔓型依附藤本

卷鬚 (tendrils) 為葉、莖或托葉的特化構造，如圖 (二) 所示，形態如**彈簧 (spring)**。於生長時做迴旋運動以尋找可以抓住的物體。碰到適當的物體時，卷鬚的末端便產生向觸性運動，纏繞物體而攀附。而後，連接植物與物體的卷鬚變形，而後卷鬚中央拱起，並以物體與植物的連接線為軸心做自由盤旋 (free coiling)，而當莖結束自由盤旋後，便形成了極似彈簧的卷鬚構造。

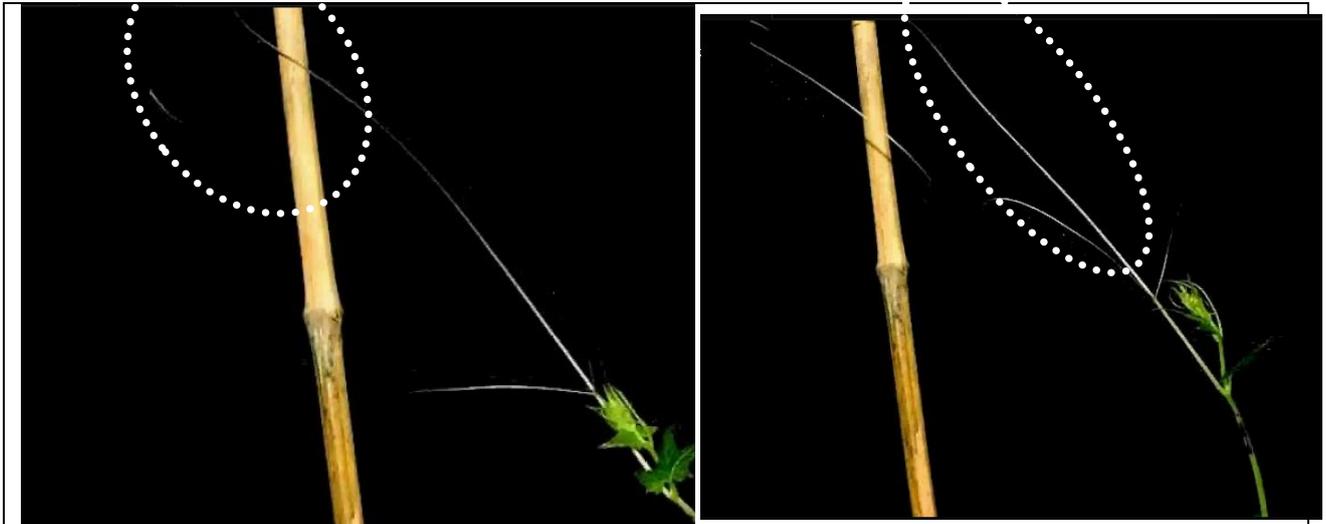


圖二、卷鬚型態與張力彈簧比較圖

A.卷鬚構造照片

B.張力彈簧圖

如圖三 A.所示，在其特化莖欲形成卷鬚構造時，會先進行迴旋運動以尋找可以攀附的物體。攀住物體後，卷鬚的末端便產生向觸性運動，纏繞物體並攀附，而後如圖三 B.所示，因不斷盤旋纏繞逐漸形成螺旋狀。



圖三、卷鬚形成示意圖

A.行迴旋運動之卷鬚

B. 不斷盤旋纏繞逐漸形成螺旋狀

如圖三C.所示，因卷鬚一側固定於植物體，另一端固定於攀附物，兩端纏繞方向相反，於莖中央拱起一段區域，此為逆向纏繞區。形成逆向纏繞區後，便可將卷鬚分為基部螺旋與末端螺旋兩段，其中基部螺旋為逆向纏繞區至植物體的區域，而末端螺旋則為逆向纏繞區至被攀物的區域。拱起逆向纏繞區後，如圖三D.所示，以物體與植物的連接線為軸線，做自由盤旋（free coiling）運動，以形成基部、末端螺旋之圈數。



圖三、卷鬚形成示意圖

C.拱起逆向纏繞區之卷鬚

D.行自由盤旋之卷鬚

而後經莖不斷自由盤旋，使基部、末端螺旋圈數增加，當卷鬚區域停止自由盤旋後，便完成了卷鬚構造，而卷鬚成熟後形態看起來極似彈簧。

彈簧是利用彈性材料製造成特種形狀之機件，受到外力時，能產生伸長或縮短或其他不同方式的變形，以吸收外力而儲存於本體內，待外力除去後，將原來吸收儲存於本體內的能量放出，恢復原來的形狀，此即彈簧所具有的特性。如圖（四）所示，依照力學性質可分為張力彈簧、壓縮彈簧、扭轉彈簧，分別用來抵抗張力、壓力、與扭轉的力。



圖四、各力學彈簧之種類。

A.張力彈簧

B.壓縮彈簧

C.扭轉彈簧

查爾斯·達爾文 (Charles Robert Darwin) 於 1895 年撰寫的《攀緣植物的運動和習性》中，描述攀緣植物將葉子伸向有光線處，以便獲得更多養分。並在此報告中，提出了卷鬚植物作為「軟性彈簧」(soft spring)，即非金屬製、天然彈簧的可能。此點被大多數的科學家認同，但其彈簧性質的證明及力學的特性等少有人去研究。

而國內有關卷鬚的報告中，方燮儀、林巧文、張容禎、黃薇傑等四人在 2007 年第四十七屆全國科展研究報告中，主要探討卷鬚構造的形態與形成，並研究了生長激素、溫度、酸鹼對向觸性的影響，更以顯微鏡探求卷鬚內部之生理。林巧文、張容禎二人在 2010 年國際

科展的報告中，其研究方向為探討向觸性的原理，發現含量極為豐富的螺旋狀構造分布於維管束中，並推測卷鬚碰觸到物體時，似彈簧構造產生形變牽引卷鬚向內彎曲，形成彈簧狀，最後還分析卷鬚內部的調控蛋白質含量的差異。

既然藤本植物耗費能量去產生似彈簧形態的卷鬚，那麼不應單單只是外型相似而已，也應具備彈簧的力學特性及功能。然而以上的二篇報告沒有以**彈簧力學角度**進行卷鬚的功能探究，也較無以植物適應的角度去探討似彈簧構造卷鬚對植物的作用與影響。因此若能以彈簧性質的思維切入去探討此構造所帶來的作用與影響，也許便能為達爾文所提出的卷鬚作為軟性彈簧的假說提出合理的解答。

二、研究目的

(一)探討問題

- 1.卷鬚的基本結構與形態為何？
- 2.卷鬚是否具備類似彈簧的性質？
- 3.卷鬚構造中有哪些構造會影響其功能？
- 4.卷鬚形成過程中如何盤捲形成類似彈簧的型態？
- 5.類似彈簧的卷鬚如何幫助藤本植物適應環境的變化？

(二)研究目的

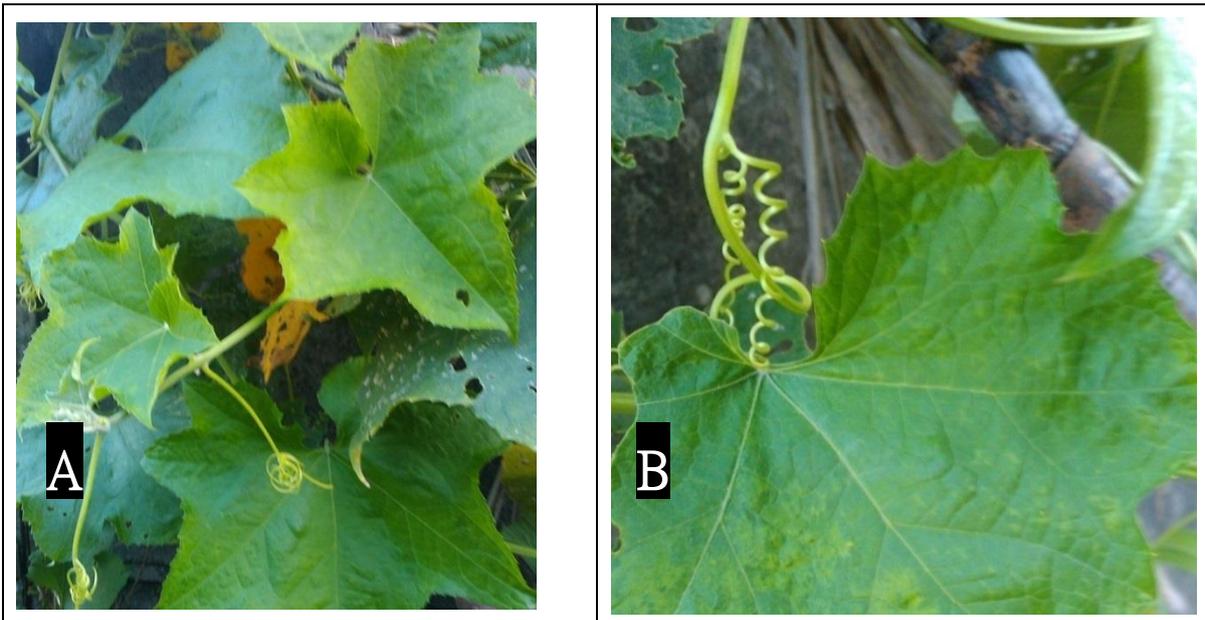
- 1.量測卷鬚外觀形態，統計分析後建構基本形態特徵，以了解卷鬚的形態結構，與彈簧性質之間的關聯性。
- 2.以形態數值帶入物理公式，導出卷鬚的彈簧指數 C 。
- 3.以虎克定律實驗測量卷鬚形變量，測出彈簧常數 K 。
- 4.以切片染色法研究卷鬚內組織構造與彈簧性質的關係。
- 5.研究卷鬚盤捲形成彈簧過程中外觀形態與組織構造的變化。
- 6.綜合彈簧的力學性質與的卷鬚的組織結構，推測類似彈簧的卷鬚構造對植物的生存適應有何作用與影響。

肆、研究方法

一、研究物種

(一)佛手瓜(*Sechium edule*)

1. 分類：葫蘆科(Cucurbitaceae)佛手瓜屬(*Sechium*)
2. 分布：原產於南墨西哥及中美洲、西印度群島。台灣於1935年自日本引進種植。
3. 特徵：蔓性藤本，莖蔓匍匐性或攀援性，卷鬚多，攀緣力強；卷鬚 2~5 歧，常 3 歧。葉心形，長 10~20公分，寬 10~20 公分，先端銳，基部心形，常 3~5裂，細鋸齒緣，表面粗糙。



圖五、佛手瓜之相關照片。

A.植物形態

B.卷鬚形態

(二)選擇佛手瓜進行卷鬚研究的原因

國內進行卷鬚研究的科展大多以佛手瓜為研究物種，如方等人2007年全國科展、林與張2010年國際科展，因此佛手瓜的卷鬚累積較多的研究報告，可以跟本研究的實驗結果作比較與討論。

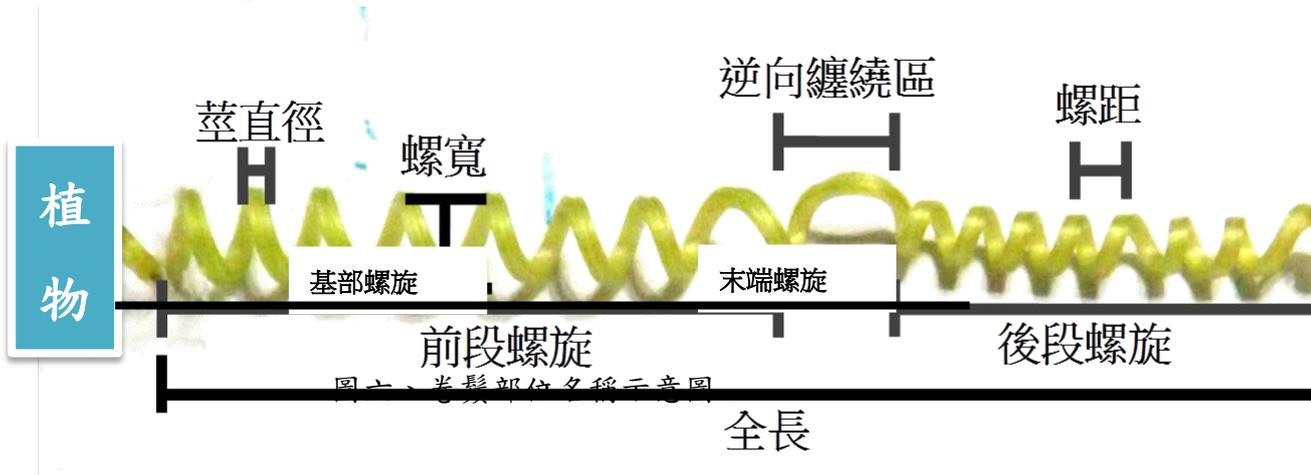
三、研究過程

(一)卷鬚外觀形態研究

1.卷鬚形態測量

(1)卷鬚形態

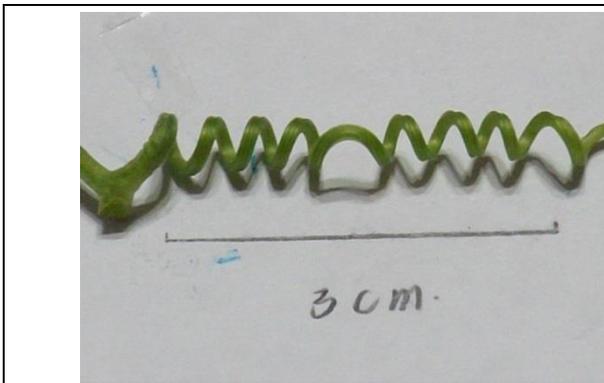
卷鬚各部位名稱定義如圖六所示，其中「基部螺旋」為主幹莖與逆向纏繞區之間的區域，而「末端螺旋」則為逆向纏繞區與被攀藤物之間的區域。



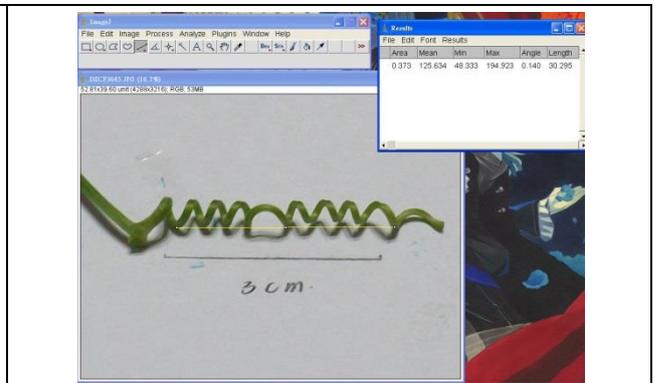
(2)測量方法

以臺北市南港區菜園隨機採集25個卷鬚，測量其卷鬚形態：

- (a) 「逆向纏繞區域長」、「螺距」、「基部、末端螺旋區域長」與「卷鬚區域總長」：
先以鉛筆畫1公分、3公分的直線做為比例尺，後以相機拍照，如圖七。後再以 Image J軟體測量準確長度，如圖八所示。
- (b) 「莖直徑」、「莖寬」：以游標尺測量長度。
- (c) 「螺旋方向」：以肉眼觀察，說明如下：
螺旋的方向判定為，基部螺旋頭向內部看，若為左旋則旋轉方向則定義為左旋、右旋則反之。

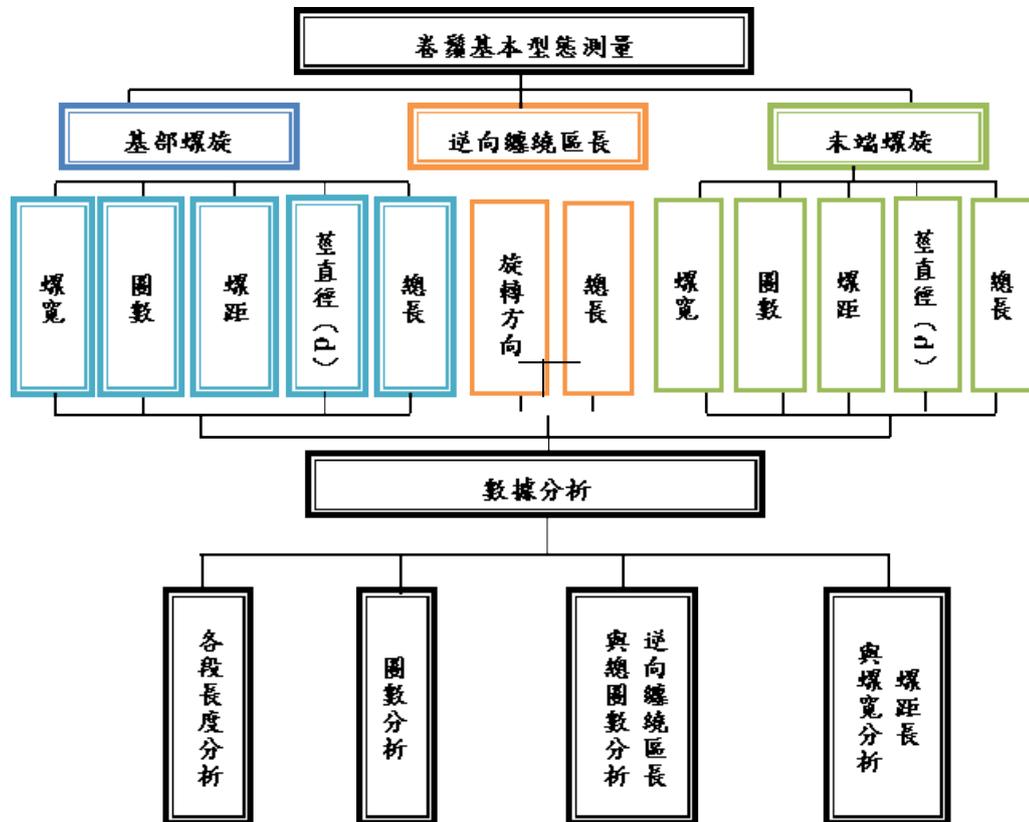


圖七、卷鬚與比例尺測量圖



圖八、image J 軟體測量卷鬚各構造長度

(3)卷鬚構造量測與分析項目如圖九所示：



圖九、卷鬚形態量測項目

2. 建構標準模型

以形態測量所得到的基部螺旋、末端螺旋與逆向纏繞區之長度數據，以卷鬚的總長除之，後以百分比表示各項長度所佔卷鬚區域總長之比率。以了解卷鬚各段長度所佔的比例，並統計基部、末端螺旋的平均纏繞圈數，用以建構出佛手瓜卷鬚的基本型態(type)。

3. 分析數據意義

(1) 各段長度分析：

以各卷鬚之逆向纏繞區、基部螺旋、末端螺旋之區域長度與螺寬、螺距等數據進行數據分析，以了解各構造長度與寬度的差異性。

(2) 螺旋圈數分析：

以各卷鬚之螺旋圈數進行數據分析，以了解基部、末端螺旋圈數的差異性。

(3) 圈數與逆向纏繞區域長分析：

以各卷鬚的總圈數與逆向纏繞區域長做一線性圖表，並做迴歸分析，以了解逆向纏繞區域長對圈數的影響。

(4)螺距長與螺寬分析：

以各卷鬚之螺距長與螺寬做一線性圖表，並做迴歸分析，以了解螺距對螺寬的影響。

(二)卷鬚彈簧性質研究

1.推導卷鬚彈簧指數 C

(1)彈簧指數 C 的意義

彈簧指數 C 為彈簧線圈平均直徑(m)與中心徑(Dm)之比值 $\frac{\text{中心徑}(Dm)}{\text{線圈平均直徑}(m)}$

A.中心徑為平均直徑減去線徑(d)。示意圖如圖十所示。又稱旋繞比。

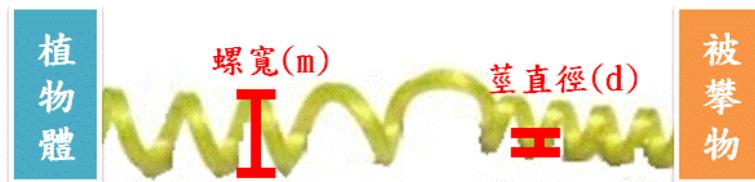
B.若彈簧指數 C 愈大，則彈簧較軟，當彈簧受到外力時，彈簧會產生較大的形變量。



圖十、彈簧指數 C 各部位名稱示意圖

(2)推導方式

應用於卷鬚中，卷鬚彈簧指數 C 的定義為 $\frac{\text{中心徑}(Dm)}{\text{螺寬}(m)}$ ，其中中心徑定義為螺寬減去莖直徑 (圖十一)。若卷鬚彈簧指數 C 越大，即代表此彈簧的剛硬度較小且較軟，則當基部、末端旋受相等外力時，此段螺旋會產生較大形變。



圖十一、卷鬚彈簧指數 C 各部位名稱示意圖

(3)基部、末端螺旋比較

得到數據後，比較基部與末端螺旋之彈簧指數 C 的大小，並以 t-test 檢驗兩段螺旋是 否具差異。以了解基部、末端螺旋受到外力干擾時，各段卷鬚形變的情形。

2.實測卷鬚彈簧常數 K

(1)彈簧常數 k 的意義

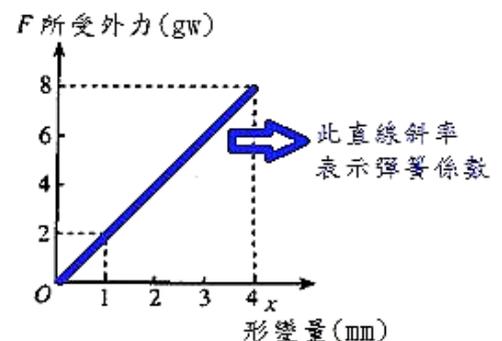
A.當一彈簧受力時，其關係式滿足 $F=-kx$

F 為彈簧所受外力、k 為彈簧常數、x 為彈簧所產生之形變量

B.可將上式整理為 $k=F/X$ ，以外力值為 y 軸，伸長量(形變量)為 x 軸，而由不同外力所實驗出的各點數據，所連成的直線斜率，即為此螺旋的彈簧常數 k。

C.於物理上，彈簧受力時滿足 $F=-kx$ ，

將 F 固定，當彈簧常數 k 越大時，此彈簧剛硬度較大且較硬，且產生的形變量較小。

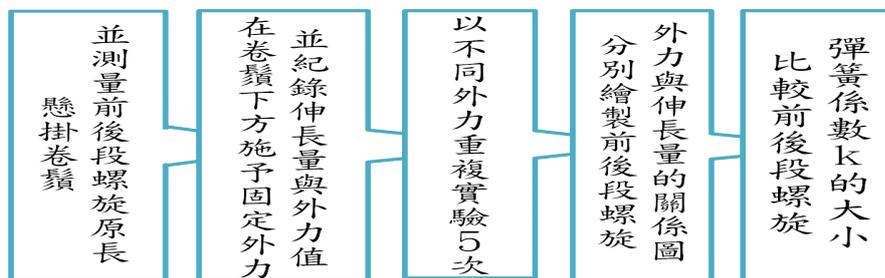


(2)測量方式

由於以彈簧指數 C ，所推測出基部、末端段螺旋的形變情形，僅為理論上的推測，而為了證實卷鬚實際上的形變情形，也因此在此實驗中，隨機取樣 20 個卷鬚，施加不同外力於卷鬚上，以測得實際上卷鬚的形變情形，並利用 EXCEL 作圖，計算出卷鬚的彈簧常數 k 值(直線斜率)。

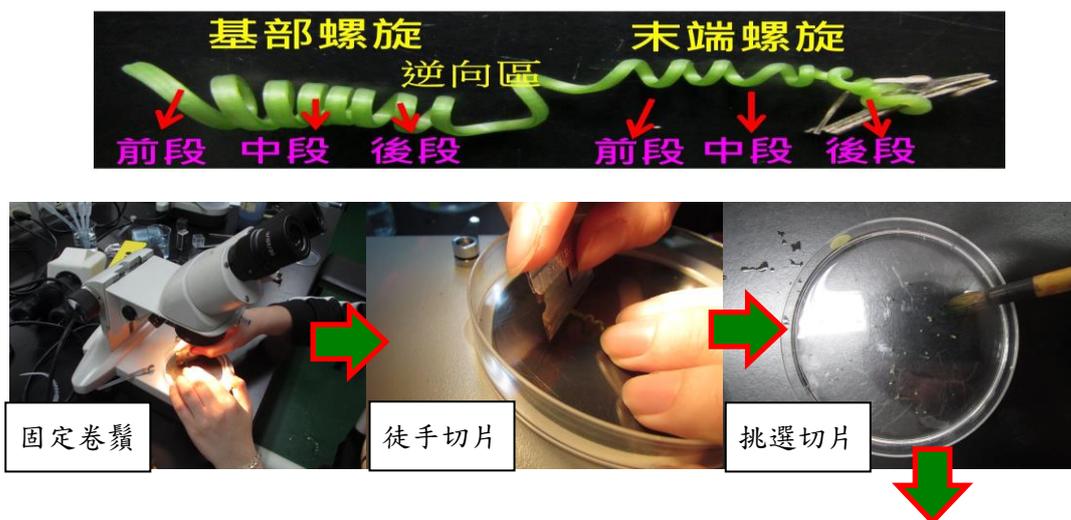
(3)基部、末端螺旋比較

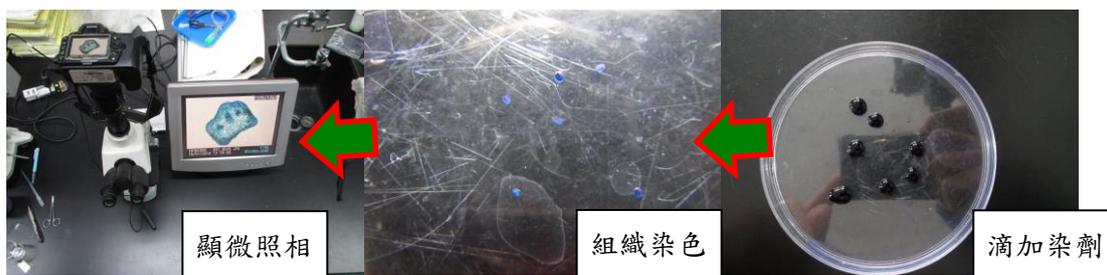
彈簧常數 k 應用於卷鬚中的意義為，當一螺旋的彈簧常數 k 較大，則代表此段螺旋所產生的形變量較小，是一種較剛硬的彈簧。比較基部、末端螺旋的彈簧常數 k ，並以 t-test 檢驗兩段螺旋是否具差異。以了解基部、末端螺旋受到外力干擾時，各段螺旋實際形變的情形。



(三)卷鬚切片染色研究

將卷鬚基部與末端螺旋各分為前、中、後三個區段，各段經徒手切片後，以亞甲藍液進行染色，再利用顯微鏡進行觀察。經染色後於卷鬚螺旋內側發現特殊纖維帶(the fiber ribbon)，由兩層膠質纖維(gelatinous fiber cells, g-fiber)所形成，可幫助莖盤捲為彈簧形態 (Sharon J. Gerbode, et.al., 2012)。將各段切片染色結果拍照後，利用 Image J 軟體計算 G-fiber 含量=纖維化比例(G-fiber 面積/卷鬚面積)，分析未捲、微捲、已捲卷鬚中 G-fiber 的構造,含量與彈簧性質的關係。實驗設計與流程如圖十二所示。





圖十二、卷鬚切片染色區段與實驗過程示意圖

伍、研究結果與討論

一、卷鬚的形態研究

(一)卷鬚形態測量 (原始數據如附錄一至四)

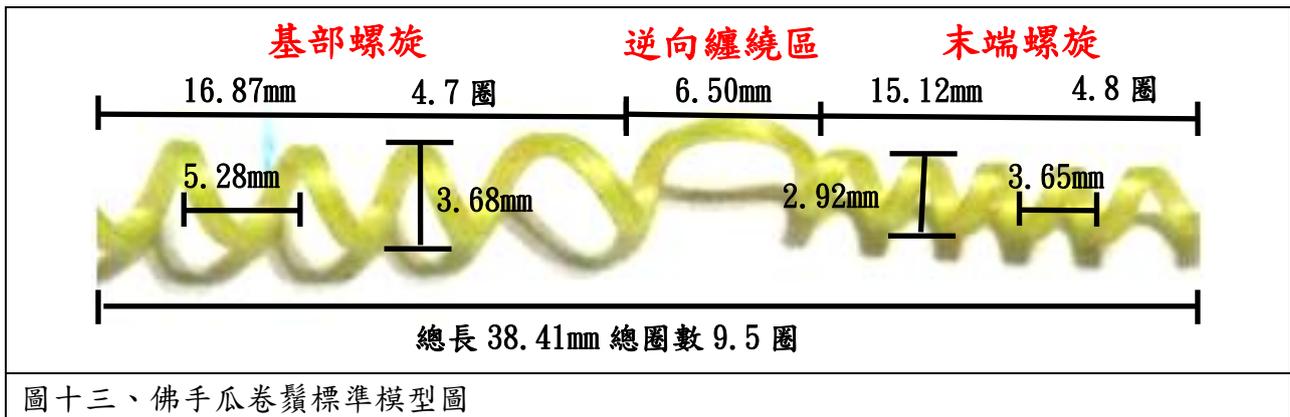
測量 25 個卷鬚後，經統計分析，可發現卷鬚區域總長的平均為 38.41 mm、平均圈數為 9.52 圈、平均螺距為 4.46 mm、平均螺寬為 3.3 mm，平均莖直徑為 1.12mm，其中 11 株為右旋旋轉，14 株為左旋旋轉。而基部螺旋與末端螺旋的形態各數據，經統計分析後，結果如表一所示：

表一、卷鬚各構造形態測量數據

形態測量項目 平均值	卷鬚區域	各構造數據統計		
		基部螺旋	逆向纏繞區	末端螺旋
卷鬚區域總長(mm)	38.41 ± 20.28	16.87 ± 11.11	6.50 ± 3.96	15.12 ± 10.96
圈數	9.52 ± 3.61	4.68 ± 2.17	—	4.84 ± 1.77
螺距(mm)	4.46 ± 2.67	5.28 ± 3.26	—	3.65 ± 1.60
螺寬(mm)	3.30 ± 0.99	3.68 ± 1.04	—	2.92 ± 0.80
莖直徑(mm)	1.12 ± 0.33	1.18 ± 0.12	—	1.05 ± 0.09

(二)建構標準模型

將表一測量的平均數據繪製到構造圖上，建構佛手瓜卷鬚標準模型，如圖十三所示。



(三)卷鬚構造與彈簧的相似性

1. 卷鬚彈簧種類

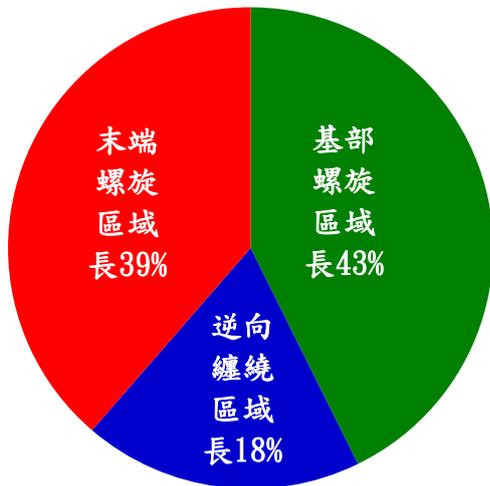
彈簧一般可分為張力彈簧、壓縮彈簧、扭轉彈簧等，分別用來抵抗張力、壓力、與扭轉的力。由卷鬚形態的研究可知為基部、末端螺旋的螺旋形態是一種「張力彈簧」與「壓縮彈簧」，受外力干擾時，因風的方向不同，有些卷鬚呈伸張的情況，有些則被壓縮。此兩種彈簧皆可以抵抗外界的張力或壓力作用，儲存能量後產生形變與震盪。

2. 卷鬚的基部、末端螺旋中間是由一段逆向纏繞區所連結，類似一種「串聯彈簧」，干擾的外力由基部、末端螺旋平均吸收，基部、末端螺旋的形變量總加等於整個卷鬚的形變量。卷鬚的彈簧性質也受基部、末端螺旋的彈簧常數 K 或彈簧指數 C 所影響。

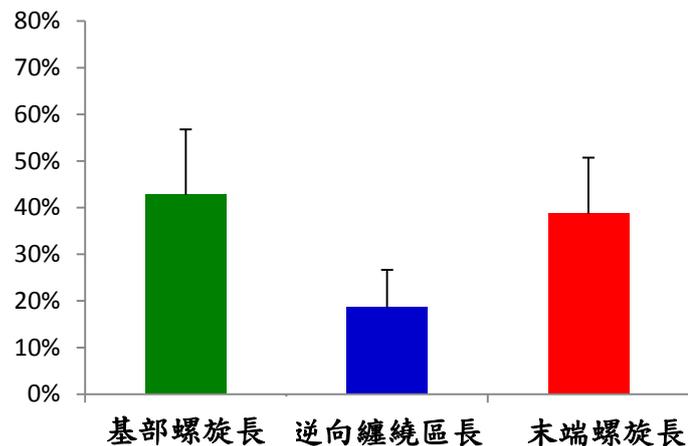
(四)分析數據意義

1.各段長度分析（原始數據如附錄五）

以基部螺旋、末端螺旋、逆向纏繞區的長度除以卷鬚區域總長後，再將其轉換為百分比，以瞭解其在整段卷鬚中所佔的比例，而實驗結果如圖十四與十五，基部、末端螺旋比例相當，其中以**逆向纏繞區最短**。



圖十四、長度比例圓餅圖



圖十五、長度比例長條圖

2.基部、末端螺旋的比較分析（表二、原始數據如附錄一至四）

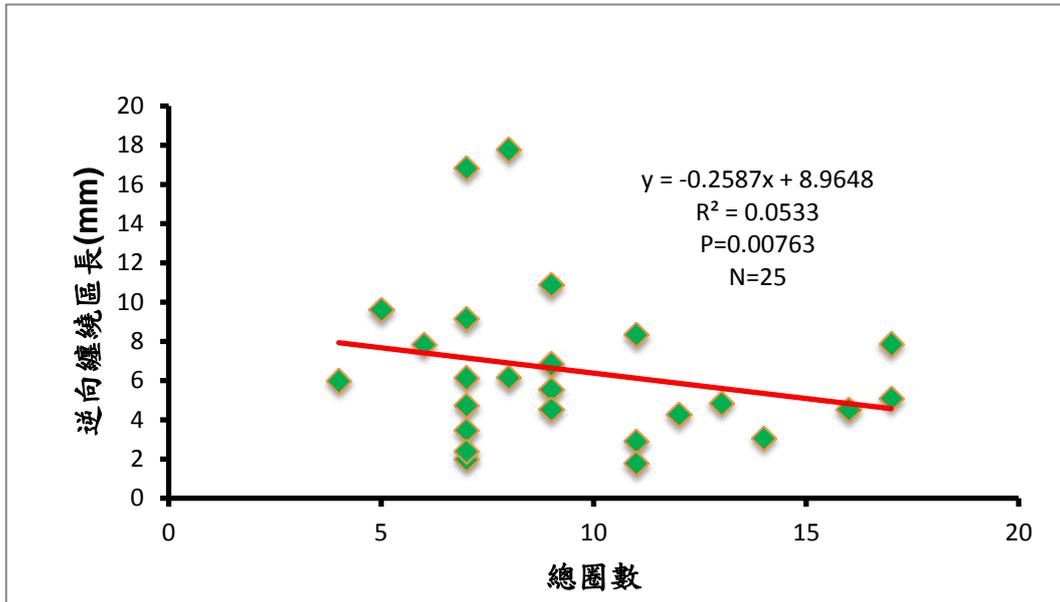
- (1)長度比較：基部、末端螺旋的各長度數據，經 t-test 分析後， $P=0.58391$ ($P>0.05$)，可知兩者在長度上並未有顯著差異。
- (2)圈數比較：基部、末端螺旋的各圈數數據，經 t-test 分析後， $P=0.776695$ ($P>0.05$)，可知兩者在圈數上並未有顯著差異。
- (3)螺距比較：基部、末端螺旋的各螺距數據，經 t-test 分析後， $P=0.02907$ ($P<0.05$)，可知兩者在螺距上具有顯著差異，**基部段螺旋之螺距較末端螺旋之螺距大**。
- (4)螺寬比較：基部、末端螺旋各螺寬數據，經 t-test 分析後， $P=0.0005230$ ($P<0.05$)，可知兩者在螺寬上具有顯著差異，**基部段螺旋之螺寬較末端螺旋之螺寬大**。
- (5)莖直徑；基部、末端螺旋的各莖直徑數據，經 t-test 分析後， $P=0.1422$ ($P>0.05$) 可知兩者在莖直徑上並未有顯著差異。

表二、卷鬚基部、末端螺旋各構造統計分析結果

形態比較	各構造 t-test 分析結果			
	基部螺旋 (靠植物體)	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)	T-test 結果
長度	16.87 ± 11.11	>	15.12 ± 10.96	$P>0.05$
圈數	4.68 ± 2.17	<	4.84 ± 1.77	$P>0.05$
螺距	5.28 ± 3.26	>	3.65 ± 1.60	顯著差異
螺寬	3.68 ± 1.04	>	2.92 ± 0.80	顯著差異
莖直徑	1.18 ± 0.12	>	1.05 ± 0.09	$P>0.05$

3. 圈數與逆向纏繞區長分析 (原始數據如附錄六)

以逆向纏繞區域長與總圈數作一迴歸分析，以了解兩因子的相互關係，而實驗結果如圖十六，圈數與逆向纏繞區域長的 $P=0.00763$ ($P<0.05$)，可知圈數與逆向纏繞區域長具有顯著相關，即圈數會受逆向纏繞區域長影響，呈負相關。當總圈數越多時，逆向纏繞區域長將越短。



圖十六、圈數與逆向纏繞區域長迴歸分析圖

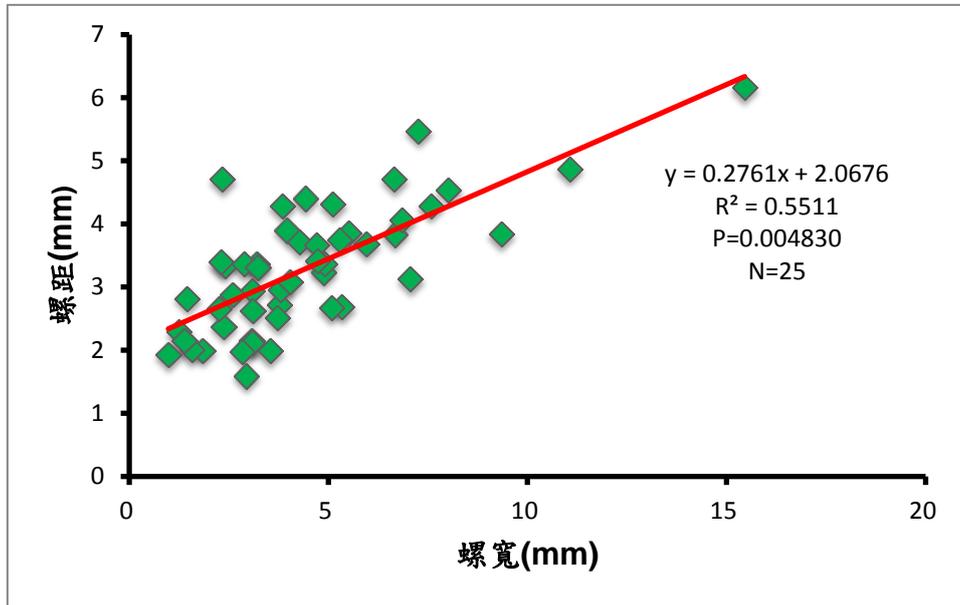
由於當卷鬚植物在拱起逆向纏繞區後，會經由自由盤旋以產生基部、末端兩段不同的圈數。而當卷鬚植物經由迴旋運動抓至被攀物後，卷鬚結構的區域總長就已固定，如圖十七所示。若逆向纏繞區在尚未完成的卷鬚結構中佔的長度越長，其兩端能形成基部、末端兩段螺旋圈數的長度就越短，而當卷鬚植物進行自由盤旋時，基部、末端兩段螺旋所形成的圈數當然也就會越少。此就是為何逆向纏繞區域長與圈數成反比的原因。



圖十七、圈數與逆向纏繞區域長關係示意圖

4. 螺距長與螺寬分析 (原始數據如附錄三)

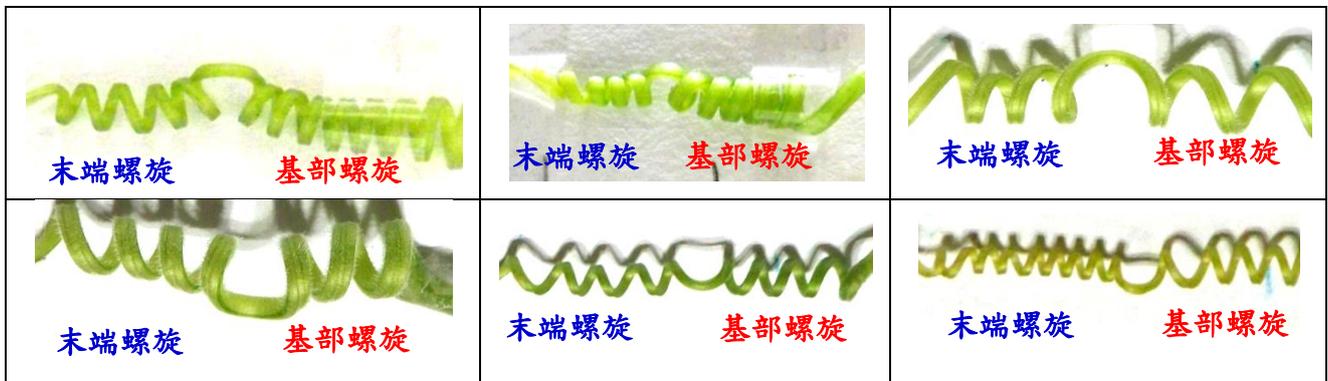
以螺距長與螺寬做一迴歸分析，以了解兩因子的相互關係，實驗結果如圖十八，螺距與螺寬的 $P=0.0004830$ ($P<0.05$)，可知螺距與螺寬具有顯著相關，螺距長度受螺寬長度影響，成正相關。當螺距長度越長，螺寬越大。



圖十八、螺距與螺寬迴歸分析圖

經由螺距與螺寬分析的結果，由於數據經 t-test 檢驗後，呈顯著相關，可知螺距受螺寬影響，呈正相關。當螺距越大時，螺寬也將越大。由此結果可知，卷鬚的螺距與螺寬具有一特定的比例關係，當卷鬚每形成一螺距，便會產生一特定長度的螺寬。

比較基部、末端螺旋的長度、圈數、螺距與螺寬等資料後，可發現靠近植物體的基部螺旋的長度較長、圈數較少，雖然兩者統計上沒有呈現顯著差異，但是兩者的螺寬與螺距都呈現基部螺旋大於末端螺旋的情況，兩項比較都呈現顯著差異。由於基部螺旋的螺距較大，若是與末端螺旋一樣的圈數，則會造成基部螺旋的長度顯著大於末端螺旋，但是基部、末端螺旋的圈數只相差一點，因此基部、末端螺旋的長度才會沒有明顯的差異。但在統計 25 個卷鬚後，還是可以發現**基部螺旋是種較大的彈簧，末端螺旋是一種較小的彈簧**，如圖十九所示。



圖十九、不同卷鬚基部、末端螺旋形態比較圖

二、卷鬚的彈簧性質研究

(一)推導卷鬚彈簧指數 C

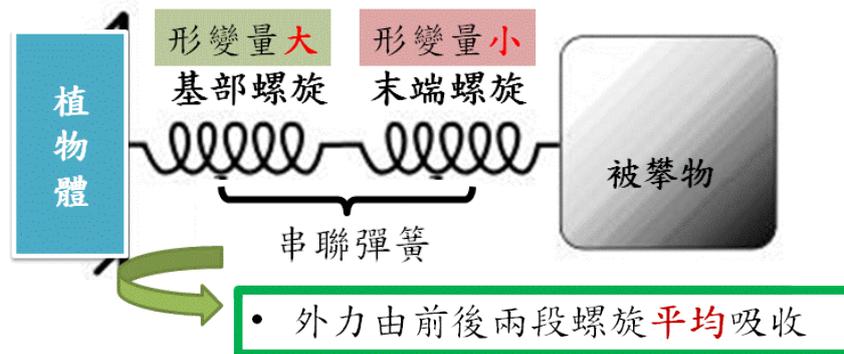
1.將卷鬚形態研究所得的數據(表一)代入卷鬚彈簧指數 C 的公式= $\frac{\text{中心徑}(D_m)}{\text{線圈平均直徑}(m)}$ 其中中心徑定義為：莖寬-莖直徑。所得的結果如表三所示(原始數據如附錄七)。

表三、基部、末端螺旋的中心徑 D_m 、彈簧指數 C 與理論形變量比較表

比較項目	基部段螺旋(靠植物體)	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)
中心徑 D_m	2.50 ± 0.81	>	1.91 ± 0.64
彈簧指數 C	2.14 ± 0.41	>	1.70 ± 0.25
彈簧形變量	較大	>	較小

2.上述資料經統計分析後,比較基部、末端螺旋的彈簧性質如下:

- A.基部、末端螺旋中心徑(D_m)各數據,經由 t-test 分析, $P=0.0006290$ ($P<0.05$), 可知基部與末端螺旋中心徑(D_m)具顯著差異,基部螺旋中心徑(D_m)較末端螺旋大。
- B.基部、末端螺旋的彈簧指數 C 各數據,經由 t-test 分析後, $P=0.008903$ ($P<0.05$), 可知基部與末端螺旋的彈簧指數 C 具顯著差異,基部螺旋的彈簧指數 C 較末端大。由彈簧指數 C 的定義,可知當基部、末端兩段螺旋受吸收相等外力時,靠近植物體一端的基部螺旋會產生較大的形變量,彈簧震盪較為明顯,有較大的左右晃動。

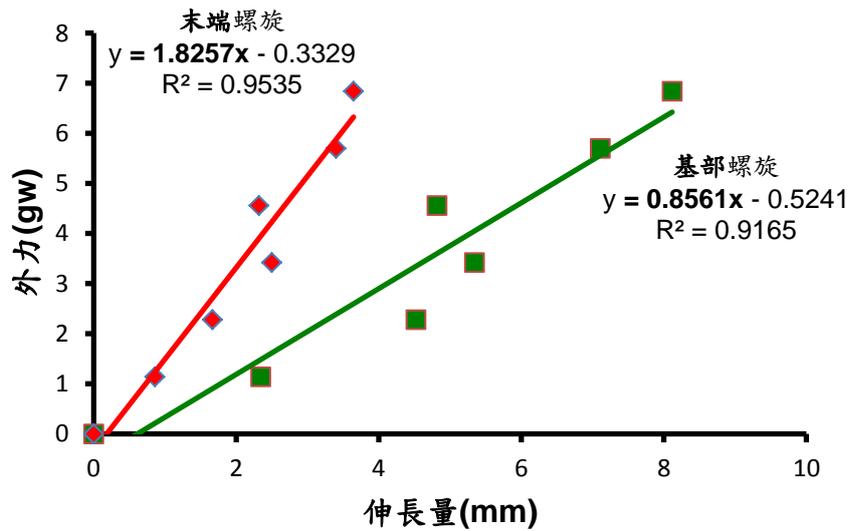


圖二十、卷鬚串聯彈簧示意圖

由於卷鬚的基部、末端螺旋中間由逆向纏繞區相連,可視為串聯彈簧系統(圖二十)。經串聯彈簧定義可知,基部、末端螺旋吸收外力相等。已知基部螺旋的彈簧指數 C 較末端大,故其所產生的形變量較末端螺旋大。也就是說基部彈簧吸收相等外力,釋放後會產生較大位移,若藤本植物莖上具有許多的卷鬚,則會使植物體的莖產生較大的晃動,進而擴大其可攀附的空間,可增加其生存的優勢。

(二)實測卷鬚彈簧常數 K

1.由於上述彈簧指數 C,所推測出基部、末端螺旋的形變情形,僅為理論上的推測,而為了證實卷鬚實際上的形變情形,利用虎克定律的原理,施加不同外力於同一個卷鬚上,以測得實際施加外力時基部與末端螺旋之形變情形(伸長量),並利用 EXCEL 作圖,計算出回歸曲線的斜率,即為該卷鬚的彈簧常數 k 值,如圖二十一所示。最後統計 20 個卷鬚的 K 值,算出基部螺旋與末端螺旋的彈簧常數平均值(以大寫 K 表示),並整理成表四(原始數據如附錄八)。



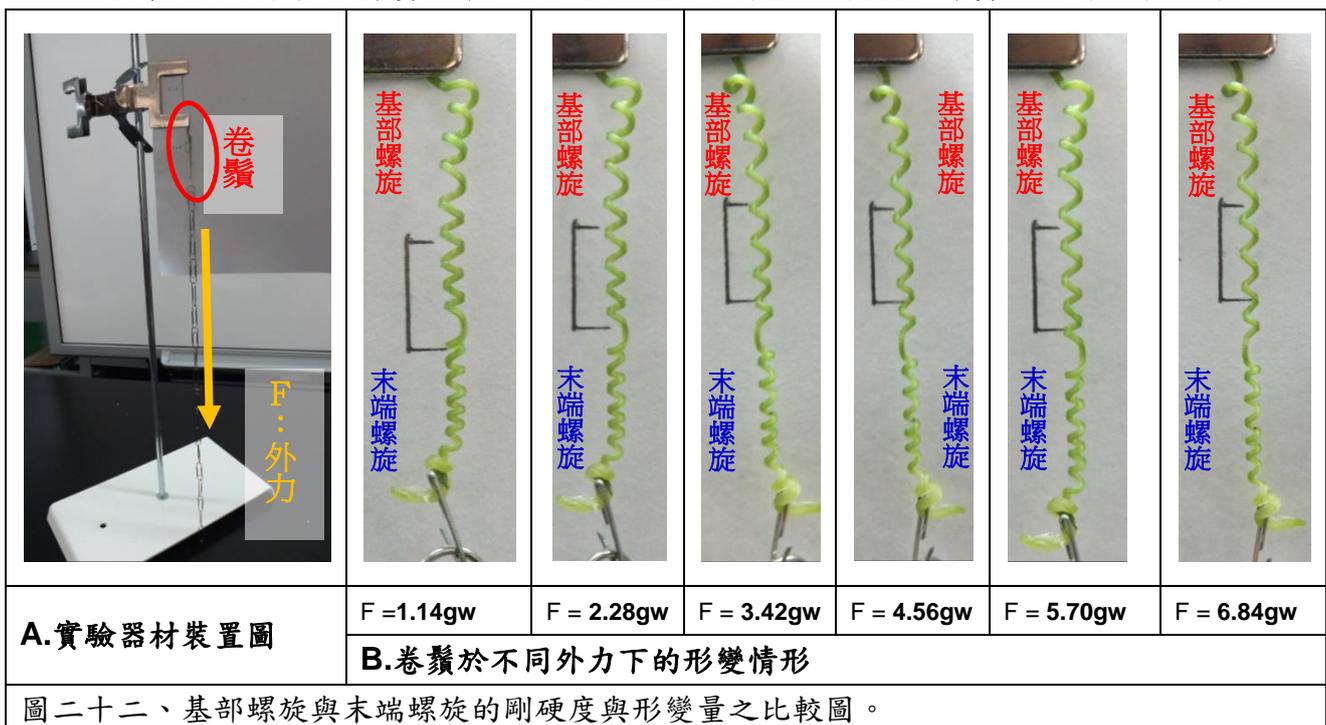
圖二十一、一個卷鬚的基部、末端螺旋測量彈簧常數 k 值數據分佈圖

表四、基部、末端螺旋的彈簧常數 K 與彈簧剛硬度比較表

比較項目	基部螺旋 (靠植物體)	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)
彈簧常數 K	12.83 ± 6.86	<	18.17 ± 7.98
彈簧剛硬度	較軟	<	較硬

2. 上述資料經統計分析後，比較基部、末端螺旋的彈簧性質如下

基部、末端螺旋的彈簧常數 k 各數據，經 t-test 分析後， $P=0.03374$ 可知基部、末端螺旋的彈簧常數 K 具有顯著差異，末端螺旋之彈簧常數 K 較基部螺旋大。由彈簧常數 k 的定義 $F=-kx$ 可知，當一彈簧受相同外力時，若其彈簧常數 K 越大，則代表此彈簧產生的形變較小，且較不易產生形變，屬於較硬的彈簧。由實驗結果可知基部螺旋是一種容易形變與震盪的彈簧，末端螺旋是一種剛度較大且較硬的彈簧，如圖二十二所示。



(三)卷鬚彈簧性質之比較

利用卷鬚形態測量數據所推導出的基部、末端螺旋之彈簧指數C，再與利用實際施加外力所測量出之彈簧指數K，兩者方法所得到的結論都有一致性(表五)，可得到一個重要結論：若是一個卷鬚遭受外力的干擾(拉扯)，由於基部、末端螺旋藉由逆向纏繞區相連一起，可視為一個串聯的彈簧系統，干擾的外力會由基部、末端螺旋平均吸收，因此基部、末端螺旋被施加的外力F相同，則由理論推導出的彈簧形變情況與實際測量的彈簧形變情況，都是『基部螺旋大於末端螺旋』，基部螺旋震盪情況大於末端螺旋震盪情況。

表五、基部、末端螺旋的彈簧指數C、彈簧常數k與形變量比較表

比較項目	基部螺旋(靠植物體)	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)
彈簧指數 C 彈簧形變量	2.14 ± 0.41 較大	>	1.70 ± 0.25 較小
彈簧常數 K 彈簧剛硬度	12.83 ± 6.86 較軟	<	18.17 ± 7.98 較硬

(四)卷鬚是一種軟性彈簧

以上彈簧性質的研究解釋了藤本植物的似彈簧結構的卷鬚不是只有外觀像彈簧，它也具有與彈簧一般的功能，可以幫助植物更適應環境的變化，實驗結果為查爾斯·達爾文於《攀緣植物的運動和習性》提出卷鬚做為「軟性彈簧」的假說提供一個非常重要的驗證。

當植物體受到外力干擾時，卷鬚可吸收外力能量儲存於自身，待外力除去後，在逐漸釋放能量，以減少對其細長莖的傷害，也可當作一個緩衝媒介，被免外力直接施壓於植物體本身。由於基部螺旋為近植物體一側的螺旋(彈簧)，當受外力干擾如風吹或其他外力的拉扯，其形變與震盪都較大時，眾多卷鬚的釋放的力量將使植物體產生較大的晃動，使藤本植物其他部位的莖或卷鬚的末端有機會晃動到其他可攀附物上，產生盤旋運動纏繞物體，以擴大其生長空間與獲得更多的陽光與養分；而且已攀附固定物體的末端螺旋，由於形變量與震盪都較小，也可避免外力干擾時，過大的震盪讓卷鬚無法繼續纏繞住攀附物而產生脫落的現象。因此藤本植物卷鬚基部螺旋與末端螺旋，兩種不同彈簧性質的設計是有其重要的演化與適應的意義存在。

三、卷鬚切片染色研究

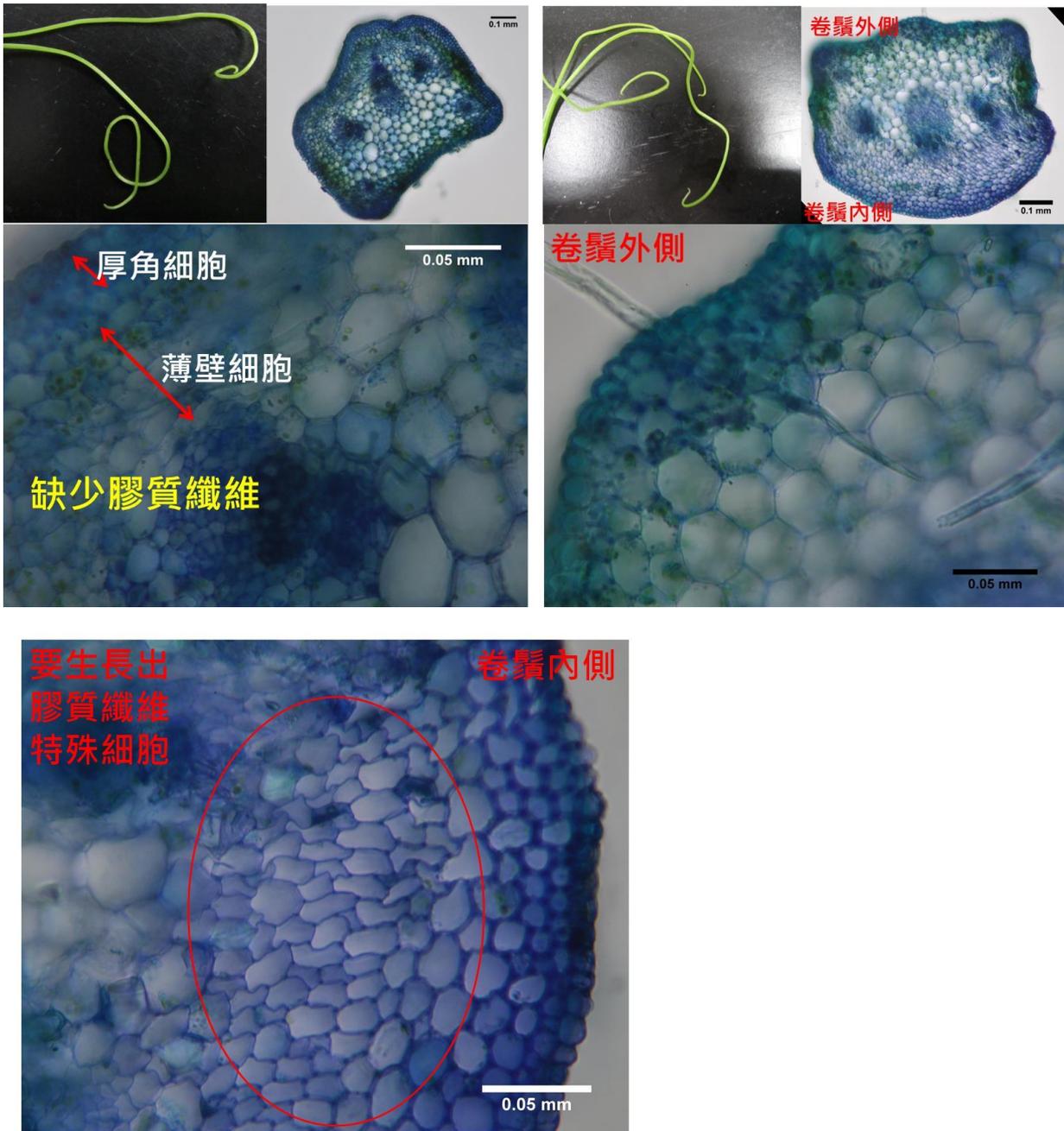
(一)卷鬚形成各階段切片研究

1.未盤捲莖的研究

取一段還未發生向觸性運動，形成纏繞盤捲的一段莖，進行組織切片染色觀察，紀錄結果如表六。在切片中沒有觀察到 G-fiber 細胞生成，但可觀察到要生成纖維帶區域的細胞與其他薄壁細胞不一樣的形態，細胞形態扭曲變形，彼此鑲嵌排列(圖二十三)。

表六、未盤捲的莖組織切片染色觀察紀錄表 (纖維化比例=纖維層面積/莖面積)

測量項目	膠質纖維 (G-fiber) 定量測量			膠質纖維定性觀察	
	纖維層面積 mm ²	莖面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維層細胞層數	最普遍層數
未捲曲	0	0.366	0	0	0
未卷曲	0	0.425	0	0	0



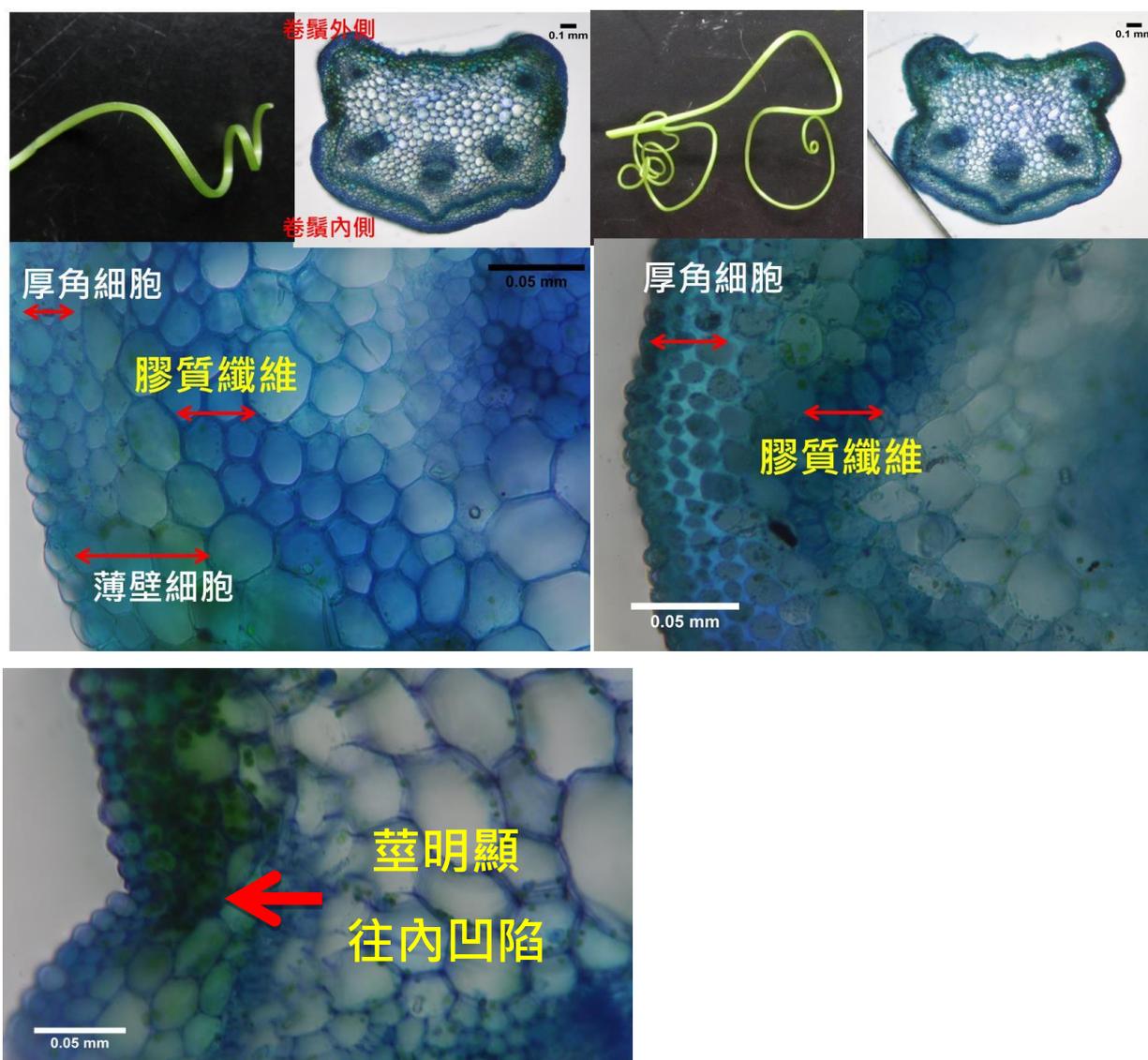
圖二十三、未盤捲莖組織切片染色圖

2. 微盤捲莖的研究

取一段剛發生向觸性運動，前端已出現一小段纏繞盤捲的莖，進行組織切片染色觀察，紀錄如結果表七。在切片中(圖二十四)有觀察到膠質纖維 G-fiber 細胞生成，纖維化比例平均為 6.24%，纖維帶比成熟卷鬚略小，比較薄，只有 3 層增厚細胞，增厚的幅度也較小。此外，在莖兩側可明顯看到凹陷，但在未盤捲及已盤捲的莖未觀察到。

表七、未盤捲與剛盤捲的莖組織切片染色觀察紀錄表 (纖維化比例=纖維層面積/莖面積)

測量項目	膠質纖維 (G-fiber) 定量測量			膠質纖維定性觀察	
	纖維層面積 mm ²	莖面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維層細胞層數	最普遍層數
微捲曲	0.057	1.026	5.56	2 至 3	2
微捲曲	0.078	1.031	7.57	2 至 4	3
微捲曲	0.110	1.587	6.93	2 至 4	3
微卷曲	0.075	1.660	4.52	2 至 4	3
微捲曲	0.118	1.782	6.62	2 至 4	3



圖二十四、剛盤捲莖組織切片染色圖

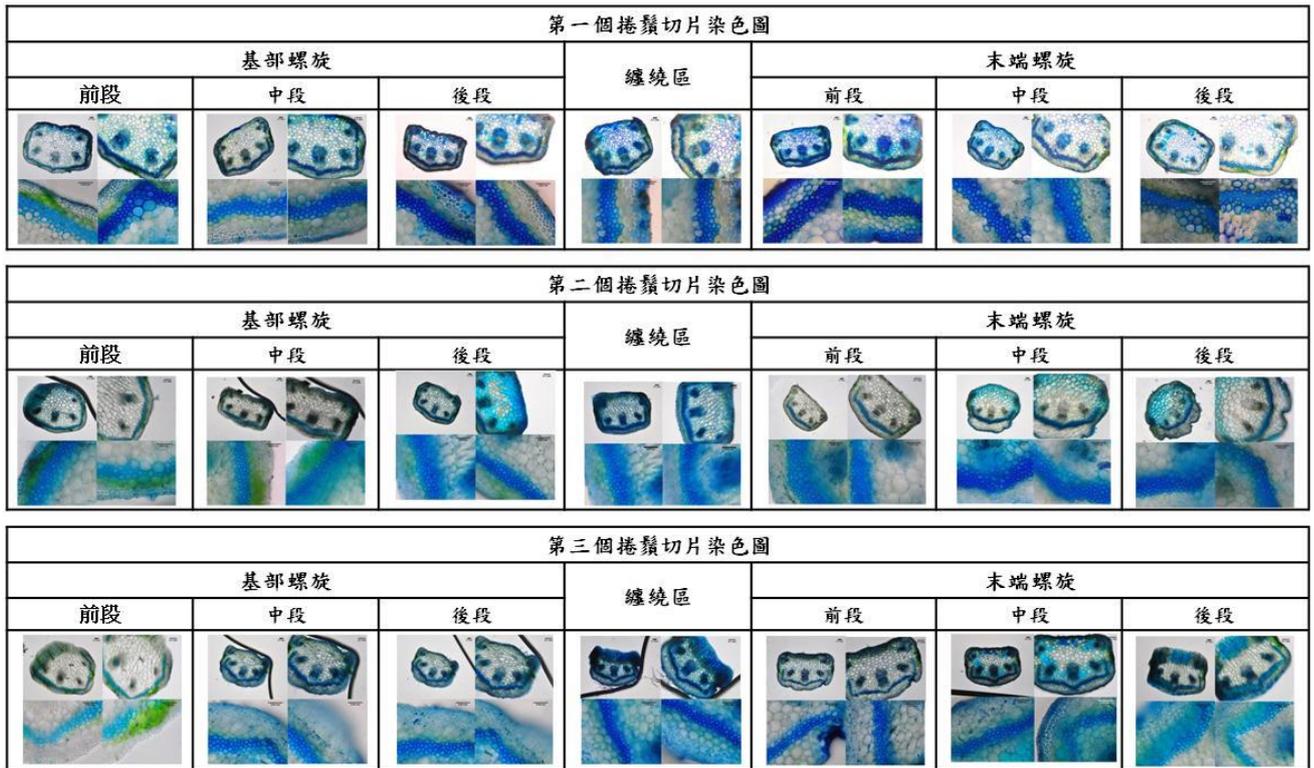
(二)卷鬚前後段螺旋切片研究

取三條已形成盤捲且攀附在其他物體上的卷鬚，每一個卷鬚分成基部螺旋、纏繞區、末端螺旋三個區域來研究，基部與末端螺旋因有很多段迴圈，故再分成前段、中段與後段來進行進行組織切片染色觀察。三條卷鬚各段測量原始數據如附錄九，整理結果如表八，各段切片結果如圖二十五。綜合未盤捲、剛盤捲及已盤捲的研究數據整理的結果如表九及圖二十六。

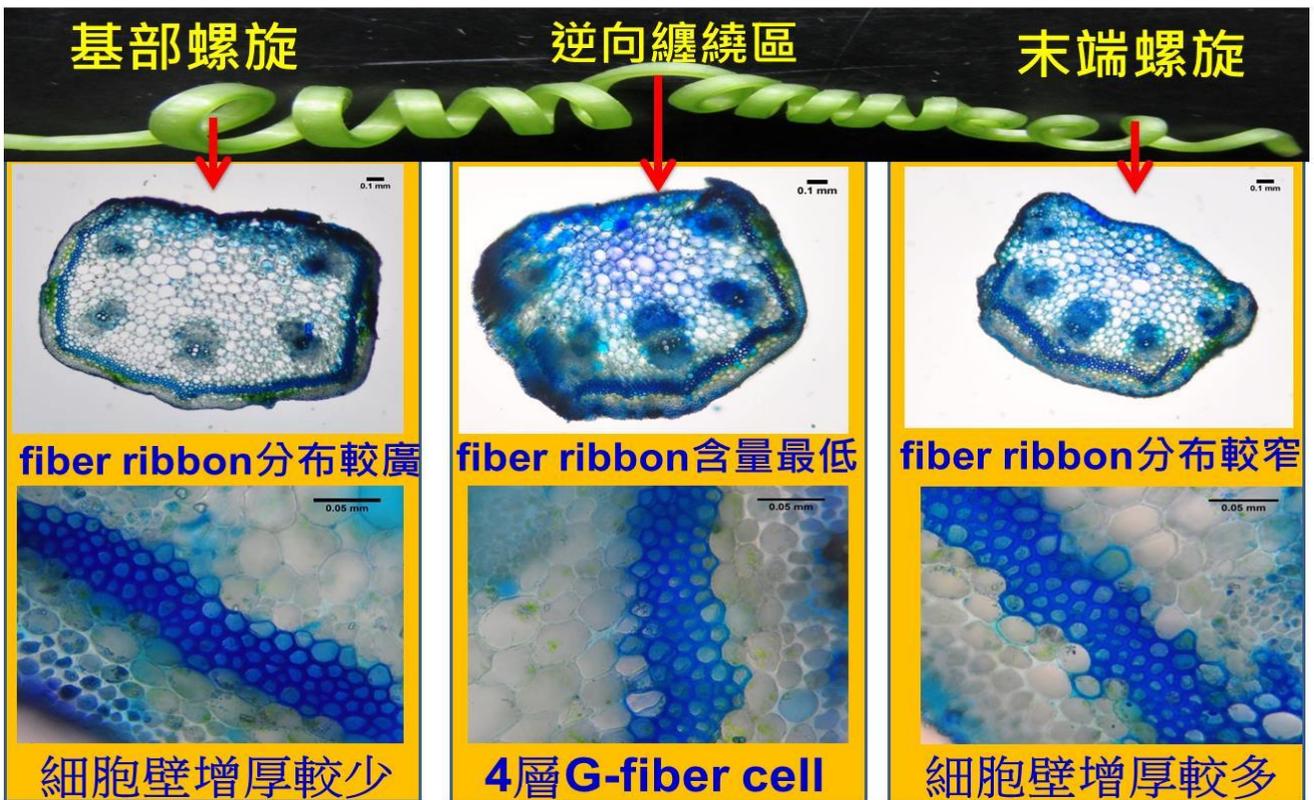
第一個捲鬚實驗數據					
測量項目	膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維定性觀察	
測量區域	纖維帶面積 mm ²	莖面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數
基部螺旋	0.160	1.318	12.25	3 至 4	4
逆向區	0.087	1.164	7.47	3 至 4	4
末端螺旋	0.104	1.055	9.95	2 至 5	5
第二個捲鬚實驗數據					
測量項目	膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維定性觀察	
測量區域	纖維帶面積 mm ²	莖面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數
基部螺旋	0.117	1.023	11.34	3 至 4	4
逆向區	0.062	0.785	7.90	3 至 4	4
末端螺旋	0.074	0.978	7.72	2 至 5	5
第三個捲鬚實驗數據					
測量項目	膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維定性觀察	
測量區域	纖維帶面積 mm ²	莖面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數
基部螺旋	0.096	0.862	11.11	3 至 4	4
逆向區	0.061	0.727	8.39	3 至 4	4
末端螺旋	0.062	0.975	6.40	2 至 4	4

表九、三種盤捲狀態的莖各段的組織切片染色觀察紀錄表

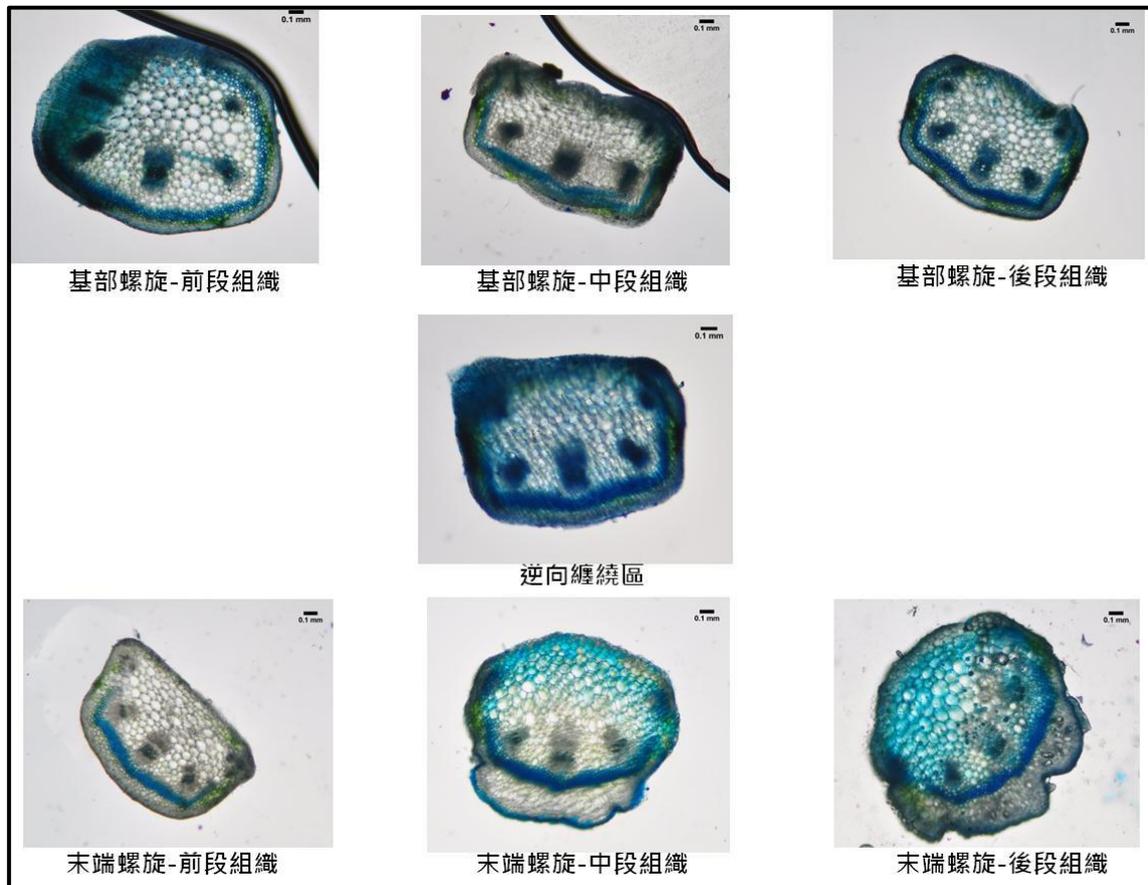
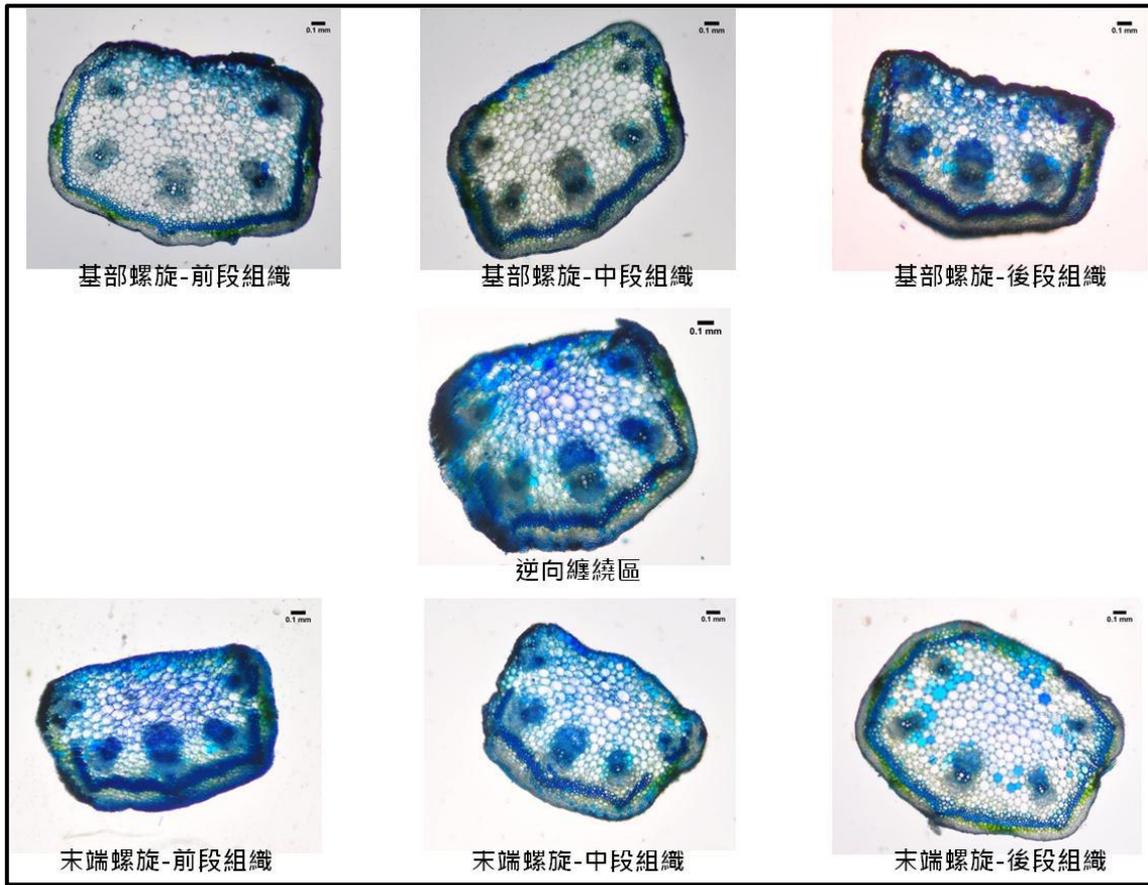
測量卷鬚 盤捲狀態	膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量				膠質纖維 定性觀察	
	測量 區域	纖維層 面積mm ²	卷鬚莖 面積mm ²	纖維化 比例(%)	纖維層 細胞數	最普遍 層數
未盤捲莖	未捲曲	0.000	0.396	0	0	0
微盤捲莖	微卷曲	0.088	1.417	6.24	2至4	3
已盤捲莖	基部螺旋	0.124	1.068	11.57	3至4	4
	逆向區	0.070	0.892	7.92	3至4	4
	末端螺旋	0.080	1.003	8.02	2至5	5



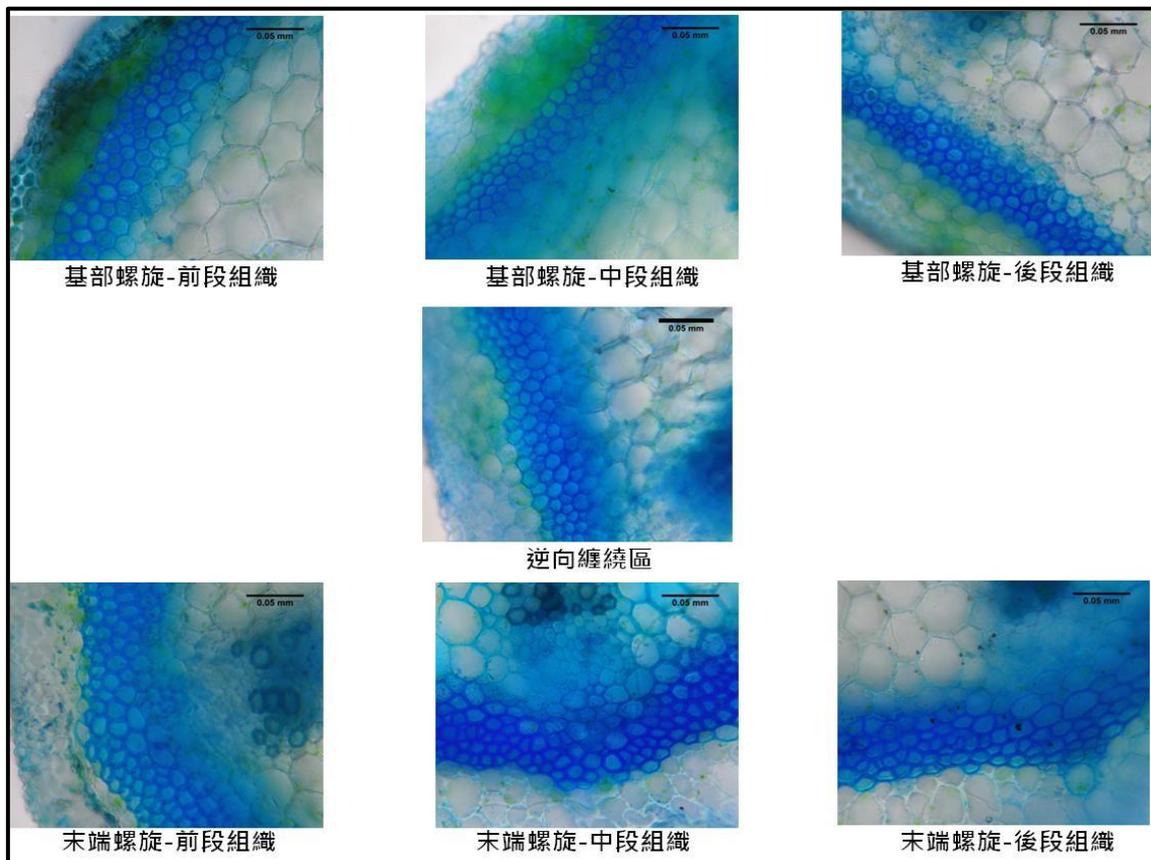
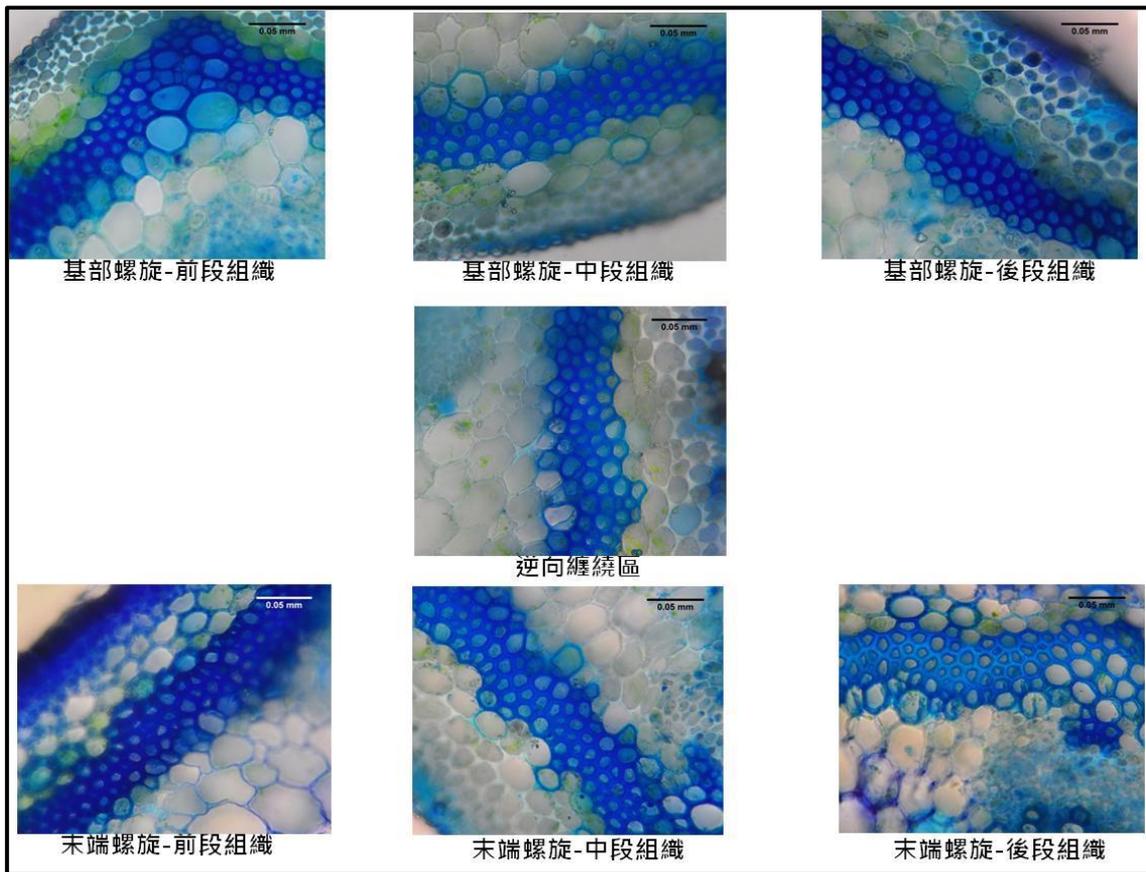
圖二十五、三條已盤捲莖各部位組織切片染色比較圖



圖二十六、卷鬚各區域纖維帶分布區域與 G-fiber 細胞壁增厚厚度比較圖



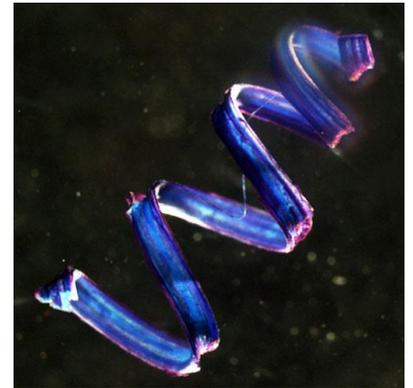
圖二十七、兩條卷鬚各部位的纖維帶長度與分布範圍之比較圖



圖二十八、兩條卷鬚各部位的膠質纖維細胞壁增厚程度之比較圖

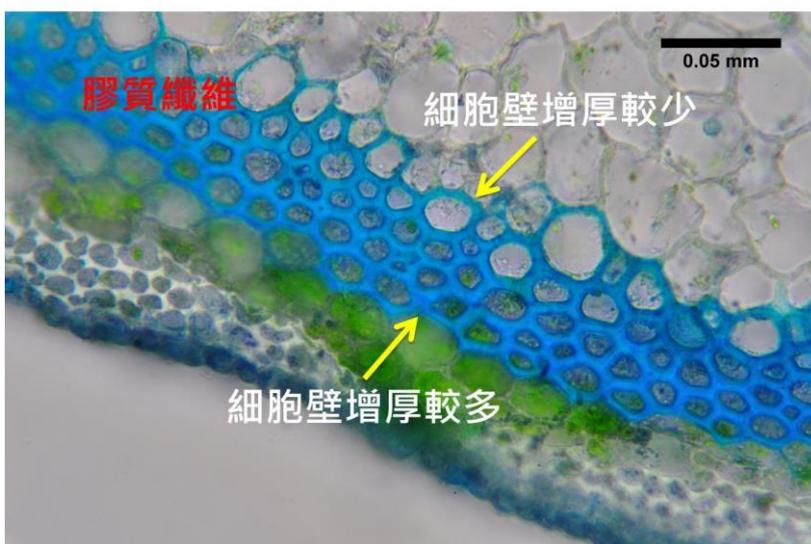
由圖二十七與二十八的切片染色結果可知，基部螺旋所形成的纖維帶(fiber ribbon)分布範圍較廣，從卷鬚內側面往兩邊延伸，形成U字型包圍住維管束，由3至4層膠質纖維細胞組成，最常觀察到的層數為4層，纖維化比例平均為11.57%，比纏繞區與末端螺旋來得大。而末端螺旋的纖維帶主要分布於卷鬚內側面而已，U字型的兩端較少延伸至另一側，纖維帶可由2至5層G-fiber細胞組成，寬度變異度較大，不像基部螺旋較均勻，纖維化比例平均為8.02%，略低於基部螺旋。但是纖維帶常由4-5層G-fiber cell組成，且細胞壁增厚的程度比基部螺旋來得大，木質化程度較高。而逆向區也有出現此纖維帶，纖維化比例平均為7.92，是三段中最低的。

由於卷鬚三段區域的纖維帶都出現在螺旋的內側面，形成U字型，因此此纖維帶應該是有連續性，從基部螺旋一直延伸至逆向區，最後至末端螺旋。2012年Sharon J. Gerbode等人利用特殊的酵素將細胞其他組織溶解，只留下纖維帶，結果如右圖所示。此纖維帶從卷鬚基部沿著螺旋莖一直延伸至攀附物，也呈現螺旋形狀，具有彈性，也分為三段構造，此構造即是造成卷鬚盤捲的關鍵原因，不過此研究報告沒有分析兩段螺旋的彈簧性質有何差異，也沒有分析彈簧狀的纖維帶在不同部位有何不同。

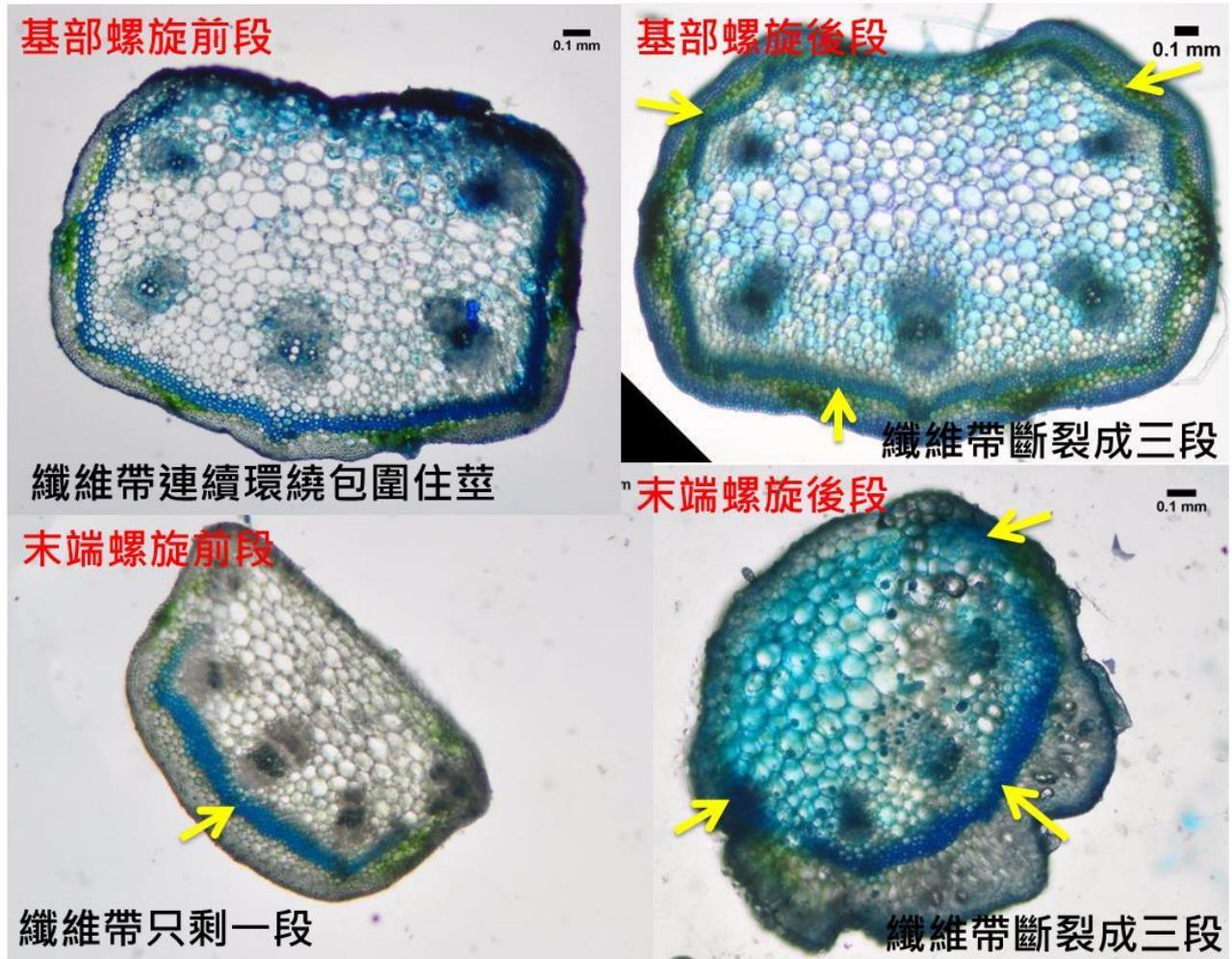


Sharon J. Gerbode等人也發現黃瓜鬚螺旋內側分佈的纖維帶，由兩層G-fiber細胞所形成，外層與內層G-fiber細胞壁增厚特化的程度不同，Gerbode等人認為這兩層纖維帶不均勻木質化與縱向的收縮是造成卷莖盤捲成螺旋狀的卷鬚機制。而從佛手瓜的組織切片結果中也發現纖維帶內側細胞壁特化較少，外側特化較多，也呈現兩側不均勻增厚的現象(圖二十九)，但佛手瓜是四至五層的結構，不像黃瓜只有兩層較簡單。

此外，已盤捲莖內的纖維帶在基部螺旋靠近植物體端的部位是一條連續很完整的構造，但越離開植物體往中間的逆向區部位，就會出現纖維帶斷裂成三段的現象，到末端螺旋有些卷鬚有些就會只剩下一段纖維帶，有些也還有呈現三段纖維帶(圖三十)。因此卷鬚前後段的纖維帶應該不會只有一條，可能會有一條較主要的纖維帶貫穿基部螺旋與末端螺旋，另外兩條小的纖維帶在螺旋的外側，這樣的分布差異是否會影響基部與末端螺旋的彈簧性質？



圖二十九、膠質纖維帶兩側細胞壁不均勻增厚比較圖

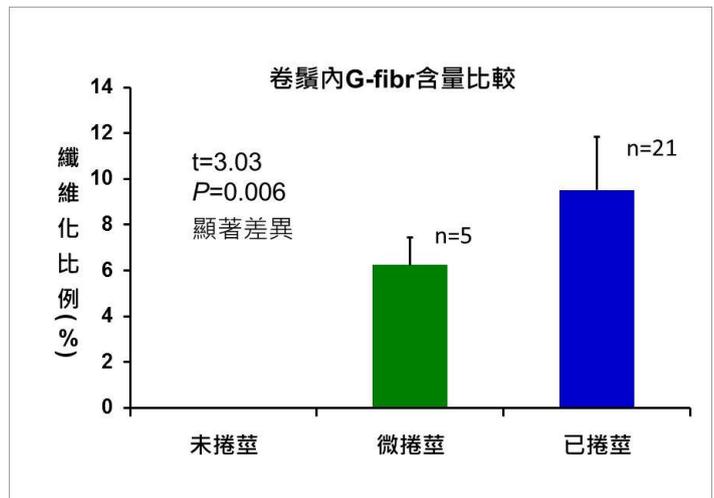


圖三十、卷鬚不同部位的纖維帶長度與數量變化比較圖

(三)卷鬚組織構造與彈簧性質

1.不同捲階段組織構造與彈簧性質

將不同盤捲形態的莖內纖維化比例結果(表九)繪製成柱狀圖比較，可以了解卷鬚在形成過程中 G-fiber 細胞生成及發育扮演何種角色。由圖三十一中可知卷鬚的形成與纖維層有密不可分的關係，當莖未捲時沒有纖維層出現，當莖開始捲曲時膠質纖維細胞開始增多，到最後卷鬚完全盤捲形成後，纖維層比例最高，讓卷鬚形成螺旋的彈簧形狀。



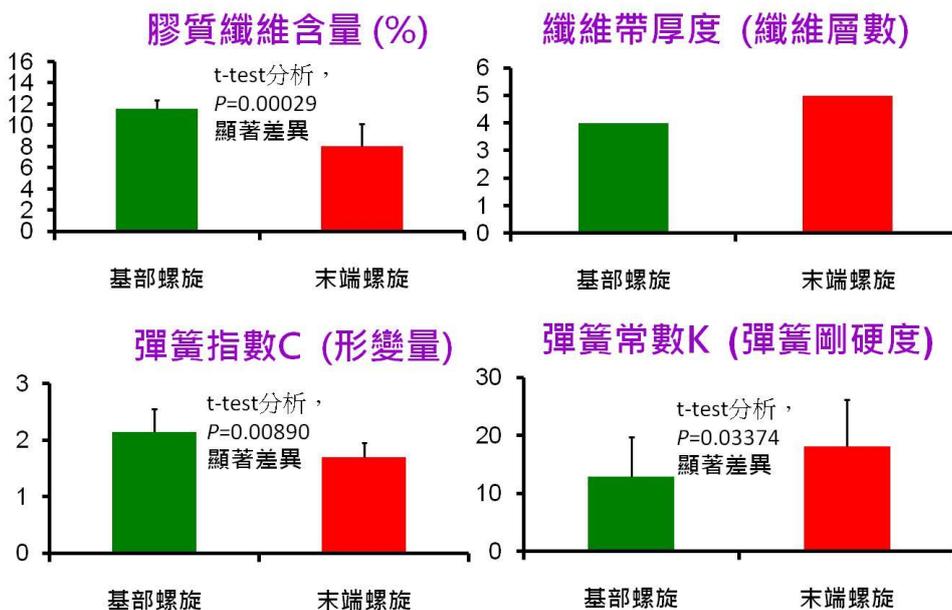
圖三十一、不同階段莖內纖維層的含量變化

2.不同部位的組織構造與彈簧性質

- (1)分析不同卷鬚的切片結果(表八、九與圖二十七、二十八)，發現都有一個固定的形態：
 - A.基部螺旋纖維帶含量較多、分佈較廣泛
 - B.末端螺旋纖維帶層數較多、細胞壁較厚
- (2)分析兩段螺旋的彈簧性質(表五、圖十九)，也發現都有一個固定的特性：
 - A.基部螺旋彈簧較大、形變量較大
 - B.末端螺旋彈簧較小、剛硬度較高
- (3)綜合以上的實驗數據後整理成表十與圖三十二，得到以下結論：
 - A.膠質纖維含量與形變量(彈簧指數C)有相似性
 - B.纖維帶厚度與剛硬度(彈簧常數K)有相似性。

表十、基部螺旋與末端螺旋的形態特徵、組織測量與彈簧性質之比較表

測量區域	彈簧大小(螺寬)	纖維化比例(%)	彈簧指數C	纖維帶厚度(纖維層數)	彈簧常數K
基部螺旋	3.68 ± 1.04	11.57 ± 0.86	2.14 ± 0.41	4	23.11 ± 1 6.59
末端螺旋	2.92 ± 0.80	8.02 ± 2.14	1.7 ± 0.25	5	35.78 ± 23.74



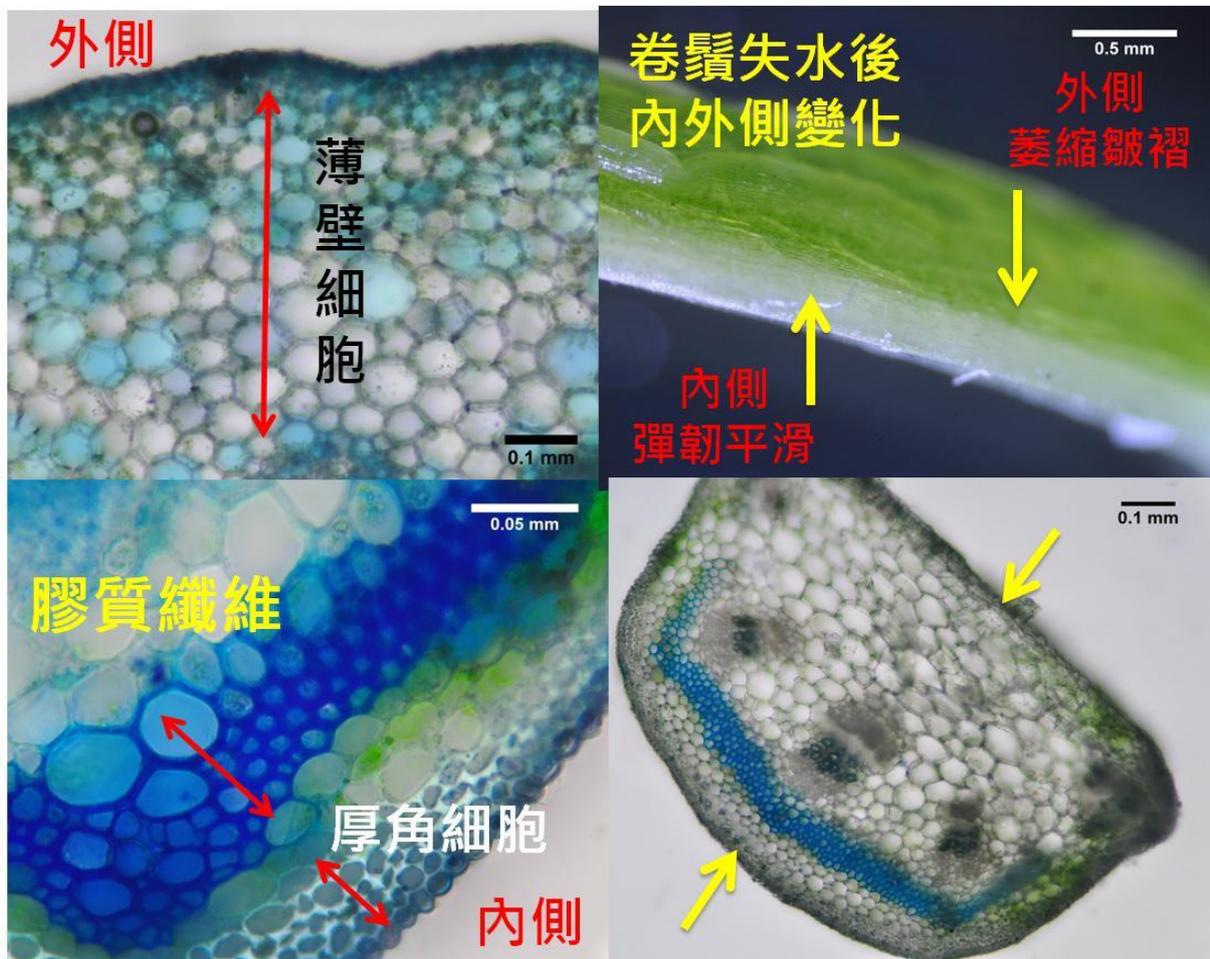
圖二十九、基部與末端螺旋的膠質纖維量、彈簧指數C、纖維帶厚度及彈簧常數K與的比較

(四)卷鬚螺旋內外側構造研究

在進行卷鬚研究時，發現摘下來的卷鬚在隔天出現乾硬、彈性變差的變化，而且在彈簧內外側有不一樣的萎縮差異，螺旋外側面的細胞失去水分後，出現明顯的萎縮皺褶；而螺旋內側面則一樣保持彈韌平滑，並沒有萎縮發生（圖三十一）。

比對組織切片的結果，螺旋外側面多為大型的薄壁組織，中央液胞儲存大量水分形成較大的膨壓，支撐螺旋外側面的組織形態，卷鬚一旦從植物體摘下來後，失去水分供應，蒸散作用持續進行，則細胞失水後膨壓下降，就會出現很明顯的萎縮形態。而膠質纖維細胞形成的纖維帶與堅韌的厚角細胞分布於螺旋內側，這些組織的細胞壁都有增厚，這些組織主要利用這些較強韌的纖維素、木質素及果膠層等維持細胞形態，不是水分的膨壓來維持。

螺旋最內側面的厚角組織在卷鬚形成的不同時期有變化，在未發生盤捲的莖及剛發生盤捲的莖組織切片結果中，厚角細胞較少，細胞壁增厚較少；已盤捲的卷鬚莖厚角細胞明顯可見，數量很多，細胞壁較厚。此變化應該與卷鬚形成時，要盤捲成螺旋狀，螺旋內側面會受到纖維帶不對稱與縱向木質化收縮產生的拉力而彎曲，需要較彈性且強韌的細胞來支撐擠壓的力量，避免內側面的莖組織擠壓變形而破損。



螺旋內外側生長不同特性的組織 外側多薄壁組織，內側多厚壁組織

圖三十一、螺旋內外側分佈不同特性的組織造成卷鬚失去水分後兩側形態變化差異

(五) 莖盤捲形成卷鬚機制探討

1. 以前研究對於卷鬚形成的錯誤解釋

(1) 生長素影響接觸面的組織生長差異

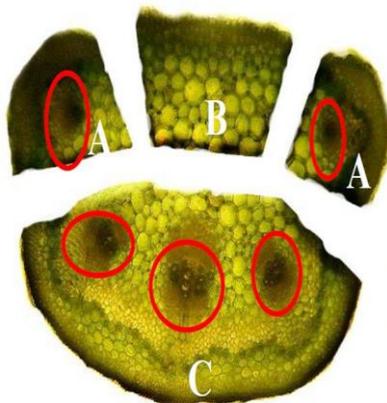
舊的高中生物課本解釋卷鬚產生向觸性是利用生長素分布不均的假說來解釋，當莖與固體物接觸時，接觸面生長素較少→細胞生長慢；另一面生長素較多→細胞生長快，因此莖的盤旋纏繞住接觸物而形成卷鬚。

但此生長素不均導致生長速度差異的解釋已經在新的高中課本刪除了，並指出向觸性的原因不明。

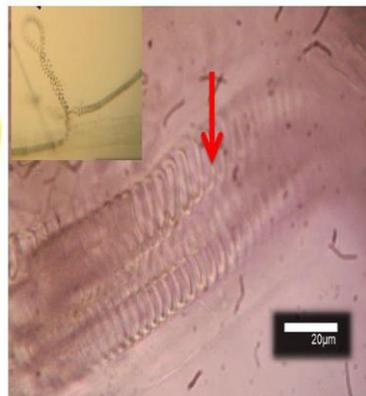
(2) 維管束中似彈簧構造影響卷鬚形成

張容禎、林巧文在 2010 年台灣國際科展研究報告中，提出似彈簧構造為整束連續的存在木質部及韌皮部之間在卷鬚內側有較多的似彈簧構造(spring-like structure)。

她們推測這是因為當卷鬚碰觸到物體時，似彈簧構造產生形變，進而牽引卷鬚向內彎。
但是這個研究報告所提出似彈簧構造，我在生物課觀察其他植物的維管束時也有發現，因此我認為此彈簧應該是維管束的其他構造，此研究結果無法來解釋卷鬚形成的機制。



張容禎、林巧文，台灣國際科展（2010）

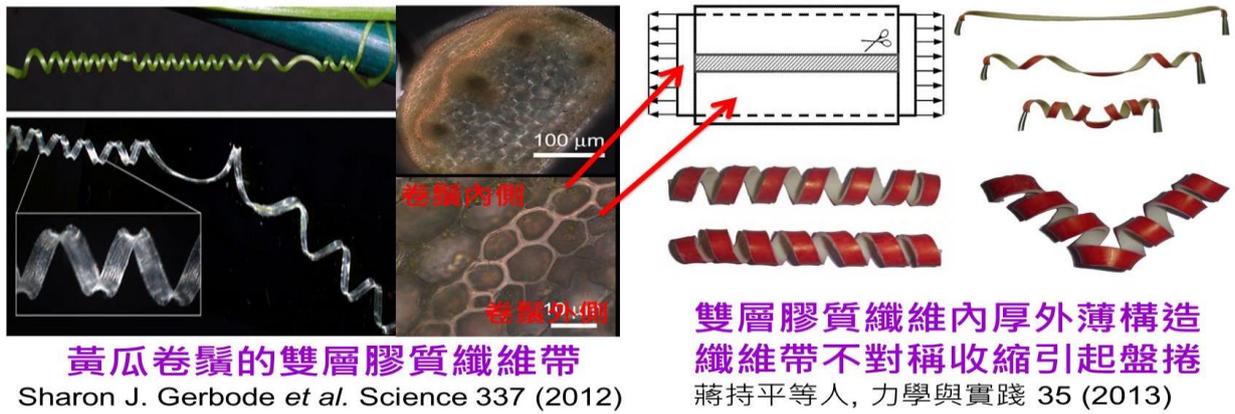


其他植物也出現似彈簧構造

2. 現在對於卷鬚形成的解釋:預應力(prestressing force)雙層複合條模型

在 2012 年 Sharon J. Gerbode 等人在 Science 發表一篇研究報告，提出黃瓜卷鬚螺旋內側分佈著特殊纖維帶，由兩層 G-fiber 所形成，透過纖維帶不對稱與縱向的木質化收縮，導致卷鬚形成，並利用力學原理來解釋為何會盤捲成彈簧狀。這個研究報告所提出的新理論是現在科學界比較普遍接受的形成機制。

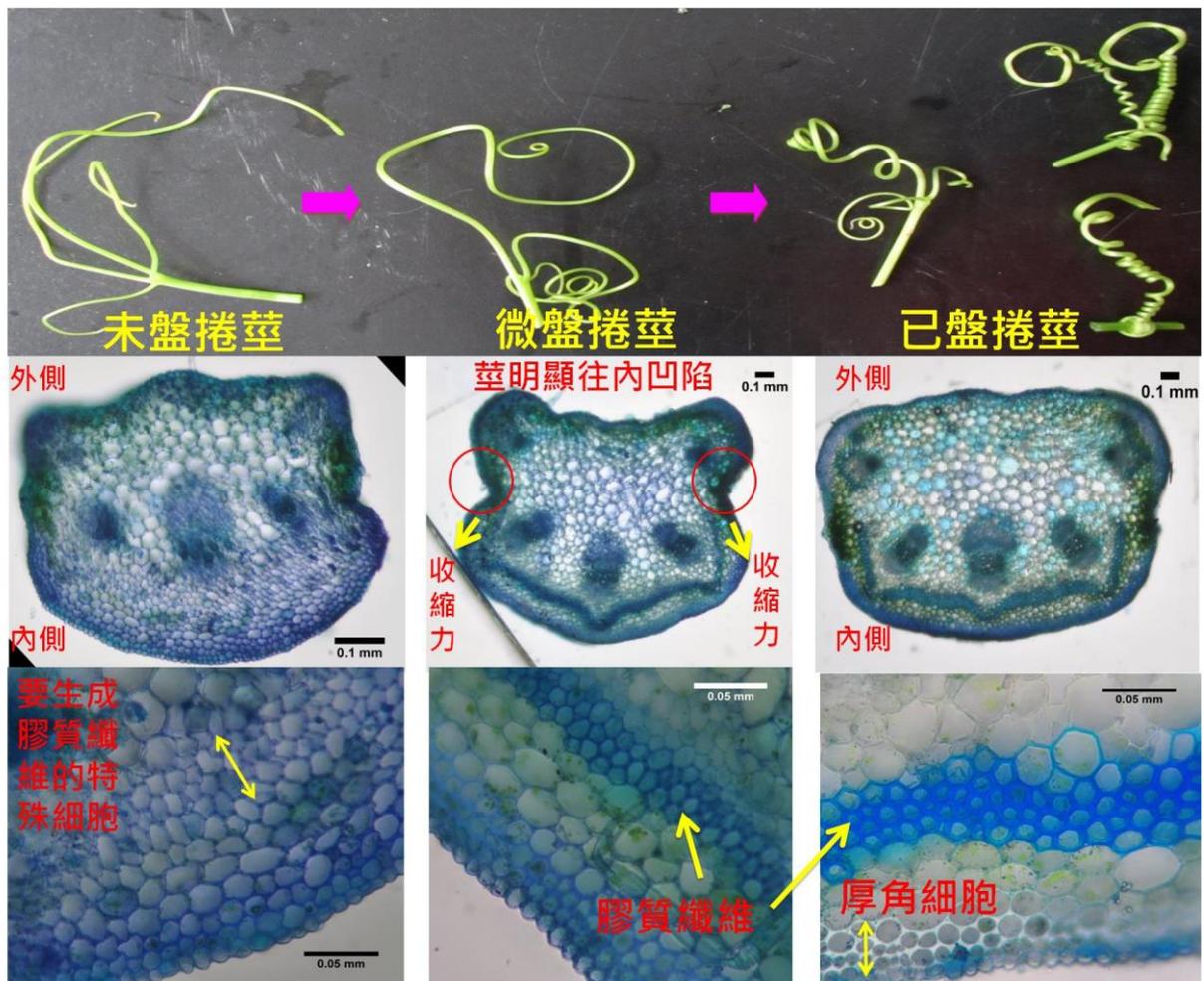
蔣持平等人在 2013 年利用兩層不同預應力的橡膠連合一起來模擬兩層不同木質化的 G-fiber 纖維帶的收縮力差異，結果這個橡膠模型在自然捲的狀態下可以形成單一旋轉方向的，但是在兩邊受到限制的情況下(模擬一端接植物，一端接攀附物)，則就會形成兩段不同旋轉方向的螺旋，中間有一段逆轉區。此模型非常成功的解釋藤本植物的卷鬚形成的機制。



(六) 卷鬚盤捲過程外觀形態與組織構造的變化

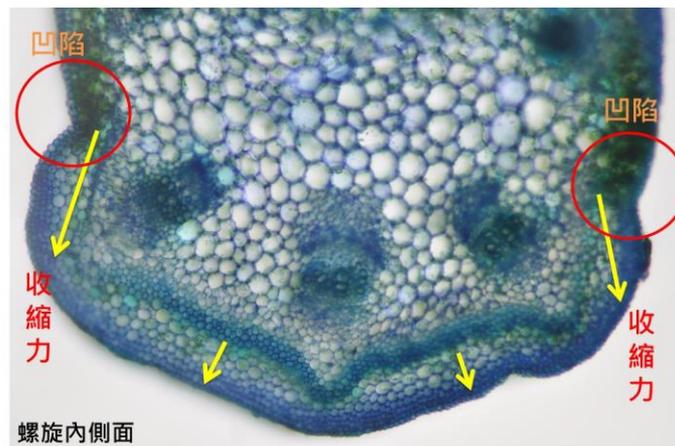
不過由於佛手瓜的纖維帶是由四至五層的 G-fiber 細胞組成，層數明顯多於黃瓜的研究結果，因此藤本植物的卷鬚形成機制，是否可用纖維帶不對稱的收縮造成的預應力差異來解釋值得繼續深入探討。另外不管是在 Sharon J. Gerbode 或蔣持平等人的研究報告都沒有說明在卷鬚形成過程中，莖內部纖維帶與其他組織的變化過程，只有用物理力學角度來解釋，缺少卷鬚形成過程各個階段，生物組織切片的直接證據。

因此我開始再深入分析未捲曲、微捲曲與已捲曲等不同發育時期的莖組織構造，來了解卷鬚形成過程的詳細變化過程與莖呈螺旋狀旋轉的機制(圖三十二)。



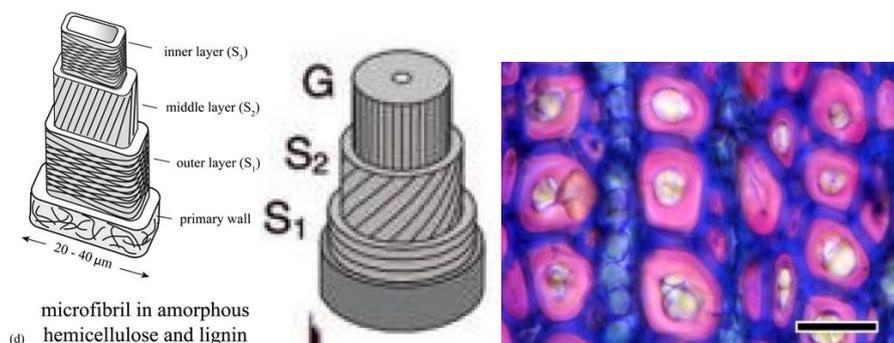
圖三十二、不同發育時期的卷鬚其形態與組織變化比較圖

- (1)在未捲曲的莖:沒有發現纖維帶，將來要形成纖維帶的內側面，表皮下的厚角細胞不明顯，但在將來要產生纖維帶的區域發現特殊形態的細胞，此細胞有可能是纖維細胞的前身。
- (2)在微捲曲的莖:隨著盤捲的發生，逐漸形成纖維帶，也發現表皮下的厚角細胞逐漸增多，此階段的莖在不同部位的組織切片中都可以發現一個特殊的構造，在莖兩側面會出現凹陷的區域，讓莖看起來有兩個耳朵凸出去(圖三十三)。在未捲曲或成熟已捲曲的莖則沒有發現此凹陷的區域，此構造滿特別的。我推測微捲莖在兩側面出現凹陷的區域，應該是因為逐漸生成 G-fiber cell，細胞壁逐漸木質化，纖維帶開始出現收縮的拉力，木質化收縮向下的拉力，將莖兩側拉扯內陷，莖逐漸彎曲盤旋形成螺旋狀的卷鬚構造。



圖三十三、微盤捲莖兩側凹陷形成機制解釋圖

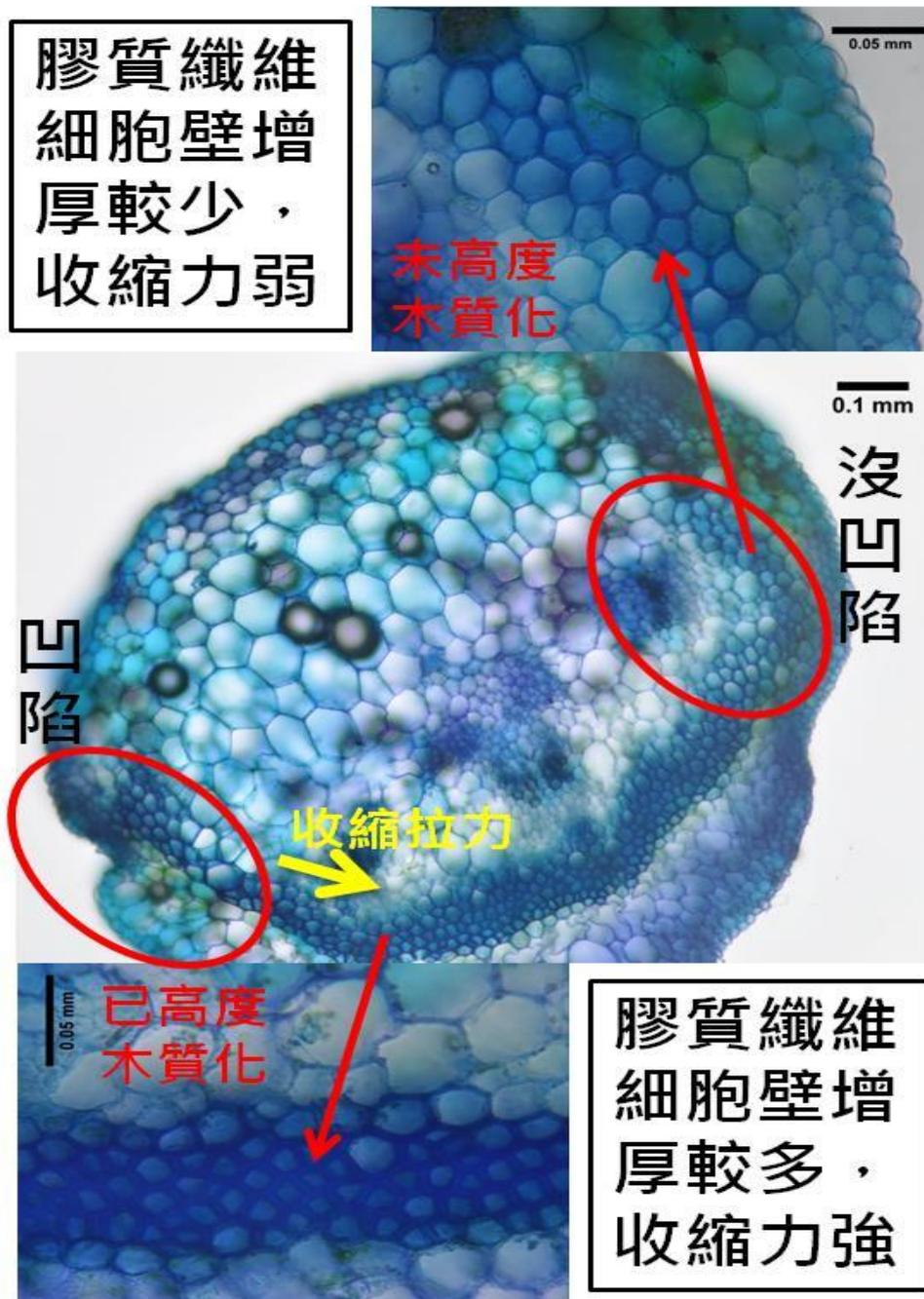
纖維(fiber)的細胞壁組成一般由外而內為初級細胞壁和次級細胞壁，其中次級細胞壁又可分成 S1, S2 和 S3(有些種類沒有 S3)，各層的微纖維(由纖維素結晶組成的構造)排列通常會和纖維細胞的主軸形成特定的角度(如下圖左)，而且在細胞壁加厚時會伴隨著木質素的填充，增加強度，提供支持的作用。被子植物反應材(抗張材)的 G-fiber(膠質纖維)發生在傾倒主幹的上側，它的特性是在次級細胞壁的最內側產生 G 層(G-layer)取代 S3 或取代 S2+S3，G 層的微纖維排列平行纖維細胞主軸(下圖中)，從 TBO 染色中，可以清楚發現 G 層很厚且不含木質素(下圖右，紫紅色是 G 層)。G 層的微纖維結晶方式、排列角度和組成成分(主要是纖維素、含大量木糖葡萄糖以及不含木質素)被認為是造成膠質纖維具有收縮能力的原因。



Gerbode 等人在 Science 的報告中，認為黃瓜卷鬚中兩層特化的纖維細胞是 G-fiber，也是因為其中含有木糖(xylan)，但其收縮的運作方式似乎和抗張材的 G-fiber 不太一樣。Science 文中認為 G-fiber 木質化之後會排斥水分，不等程度的木質化是造成其收縮捲曲的

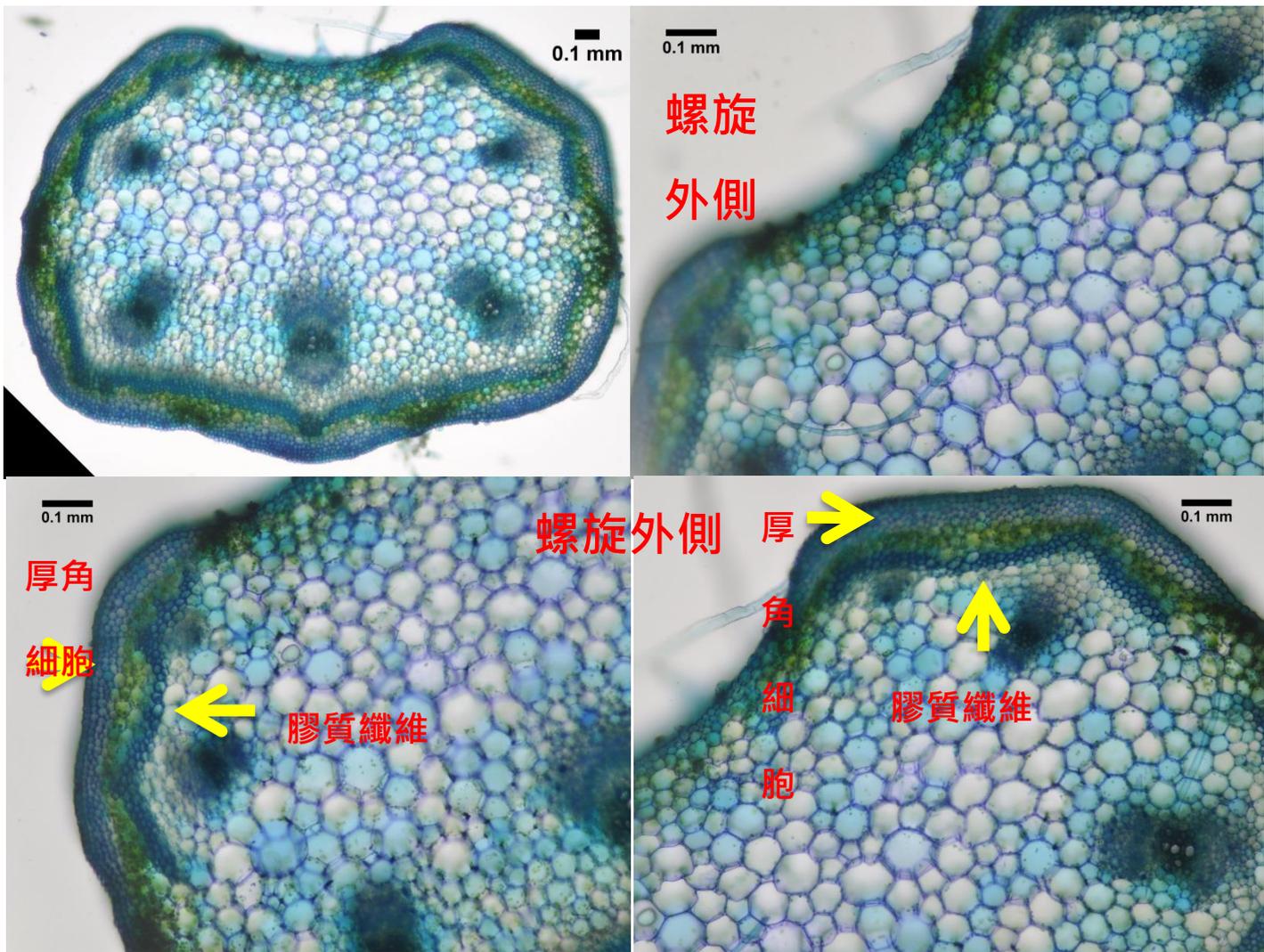
原因。但怎麼證明有木質化收縮的拉力存在，再來證明莖盤卷彎曲是 G-fiber 細胞木質化收縮的作用結果呢？Gerbode 等人在 Science 的研究報告並沒有證據說明。

而我從其他的微捲莖切片樣本中發現右側有特殊的凹陷構造，而左側沒有凹陷（圖三十四），此切片樣本可以用來證明有木質化收縮的拉力存在：下圖右半邊的纖維帶層比左半邊清楚明顯可見，此為右半邊膠質纖維細胞細胞壁增厚較多的結果，而左半邊因為 G-fiber 細胞還未明顯木質化，所以左半邊的莖則沒有出現凹陷特徵。因此圖一側出現已高度木質化且凹陷的特徵，一側則沒有木質化沒有收縮的現象，很清楚的說明是 G-fiber 細胞出現木質化時會產生一個收縮拉力。所以 Gerbode 等人在 Science 的研究提出卷鬚形成時木質化收縮力確實存在。



圖三十四、微盤捲莖兩側不對稱木質化與凹陷構造之比較圖

(3)在已盤捲的莖:則有發達的厚角組織出現在纖維帶的外側面，而且由於基部螺旋的纖維帶範圍較廣，有延伸至螺旋外側面，則在螺旋外側面靠近纖維帶的表皮下也出現厚角細胞，因此厚角組織的分布位置與纖維帶的區域是有一致性的，有 **G-fiber** 細胞的外側一定有出現厚角細胞(圖三十五)。因此推測表皮下細胞壁增厚的厚角組織層可以抵抗莖彎曲盤旋時向螺旋內側擠壓的力量，來維持螺旋內側面組織的完整性。而在螺旋外側則分佈有體積較大的薄壁細胞，此薄壁組織細胞壁沒有增厚，使莖在彎曲盤旋時有較大的彎曲變形能力，而且液胞含有較多水分產生膨壓，也可以抵抗螺旋外側面的彎曲的張力。



圖三十五、已盤捲莖的纖維帶及厚角組織的相對位置比較圖

四、模擬卷鬚形成的模型

為了驗證利用預應力雙層複合條模型是否可以驗證 Gerbode 等人在 Science 所提的不對稱木質化收縮造成卷鬚盤捲形成螺旋狀的理論，另外也想瞭解卷鬚彈簧性質與膠質纖維 G-fiber 有何關係，我修改蔣持平等人在 2013 的文獻所提供的方法，製作一個模型來模擬。

我利用一條可拉長的彈力伸縮帶與一條軟性的隔音條，利用雙面膠將其黏合一起，模擬一側具有收縮的膠質纖維，一側沒有收縮的薄壁組織(圖三十六)。結果真得出現因內側伸縮帶拉長後彈力回復的向內收縮的力量，使得這個模型開始盤捲，形成螺旋狀。而且如果是兩端拉住讓其受到限制，則會形成兩段方向不同的螺旋，中間有一段逆向區 (C)。如果是讓其自由捲，不要拉住兩邊，則只會捲成一個方向的螺旋，順時鐘或逆順時鐘都有可能出現 (B)。而且如果是兩側都有黏彈力伸縮帶，則因兩邊都有拉扯的力量，就無法形成螺旋狀的卷鬚 (A)。卷鬚形成應該是如同 Gerbode 等人所提出的機制：兩側不對稱的木質化收縮所造成的結果。

不過我用此模型發現一個特殊的情況：如果兩段螺旋黏上去的伸縮帶收縮的彈力是一樣的，則會出現兩段螺旋一樣大且彈簧性質一樣的螺旋 (C)。但是如果將兩段收縮帶施以不同的拉力，模擬兩段螺旋不同的收縮力量，一邊拉力較強，黏上去後收縮力就會較強，而另一邊則以施以較弱的力量。結果出現兩段螺旋伸長量與軟硬的差異：一段伸縮帶收縮力量較弱，造成彈簧螺旋較大、較軟，伸長量較大；另一段螺旋則相反處理，收縮力量較小，造成彈簧螺旋較小、較硬，伸長量較小 (D)。



圖三十六、利用伸縮帶黏合隔音條，模擬卷鬚形成的過程

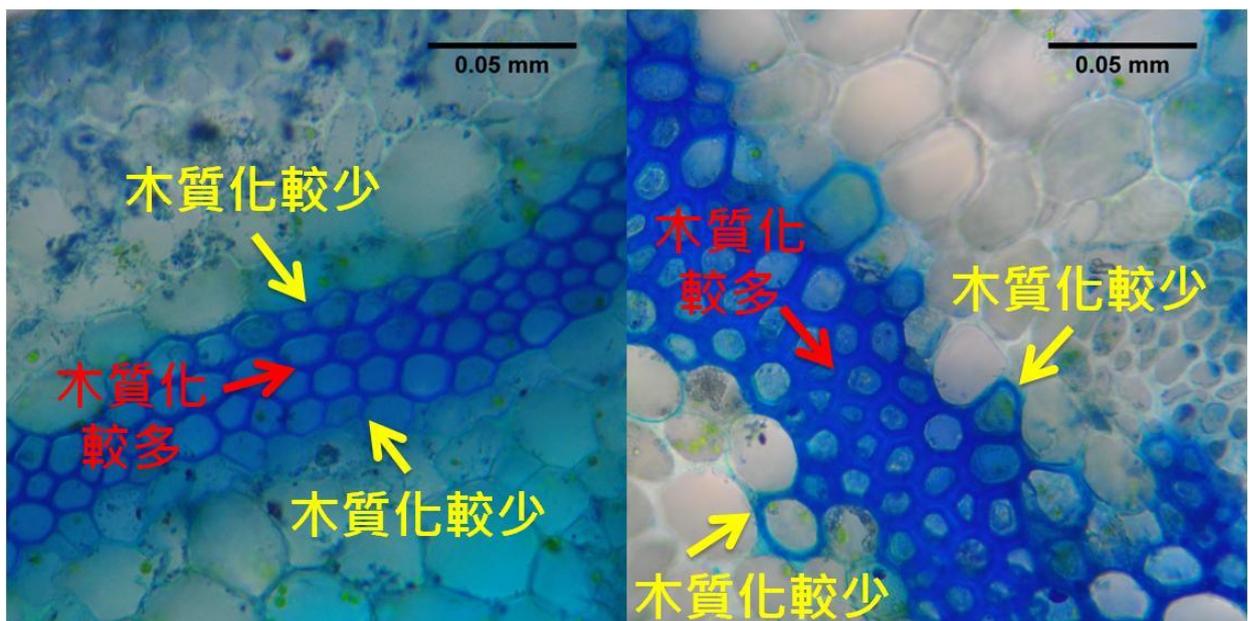
由此模擬模型與之前的研究結果相比對，基部螺旋形態較大、較軟、伸長量較大，由圖三十六 D 模型推測莖內的木質化收縮力應該較小；而末端螺旋形態較小、較硬、伸長量較小，由模型推測木質化收縮力應該較大。到底是什麼因素造成兩段螺旋內收縮力量的差異？由圖二十九的實驗結果推論，應該是纖維層的寬度與細胞壁增厚的程度所導致的結果。當卷鬚形成過程膠質纖維 G-fiber 逐漸生成，纖維帶層數增加，細胞壁也開始出現增厚的現象（圖三十二），之後形成前後兩段卷鬚。前後兩段卷鬚內的纖維帶發育程度不同，基部螺旋膠質纖維含量多、纖維帶較細、分佈較廣，但膠質纖維細胞木質化程度較低，讓基部螺旋保有較多的彈性，彈簧指數 C 較大、形變量較大；但末端螺旋的纖維帶出現較高度的木質化現象，層數較多、細胞壁較厚，因此收縮的力量也較強，讓基部螺旋的彈簧常數 K 較大、剛硬度較高。也因為末端螺旋內部纖維帶收縮力量較強，造成纖維帶外的厚角細胞層比基部螺旋還要發達（圖二十六至二十八），發達的厚角組織可以抵抗收縮力量造成莖向內彎曲時的擠壓力量，避免表皮組織破裂。

基部螺旋與末端螺旋的『膠質纖維不同含量』及『纖維帶木質化程度』是導致這兩段螺旋彈簧性質差異的最主要原因。

五、卷鬚形成機制的修正理論

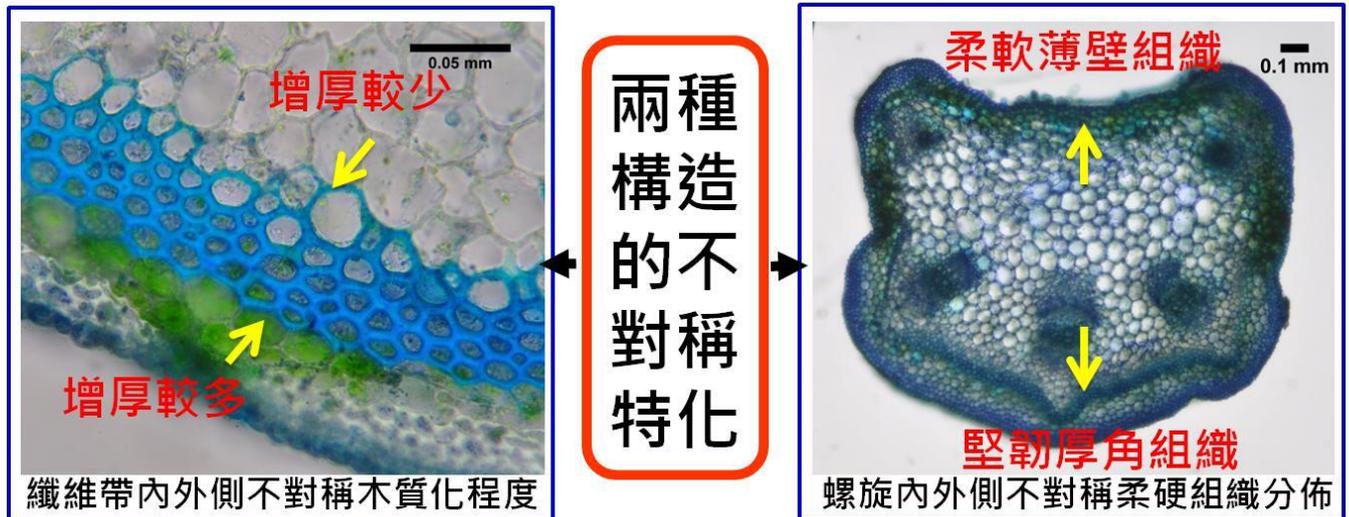
2012 年 Sharon J. Gerbode 等人因觀察到黃瓜有兩層不對稱特化的纖維帶認為：莖盤捲原因是因為這兩層木質化程度上的差異，外層細胞壁較厚，木質化較多，收縮力量較強，因此內、外兩側收縮力量的不同而導致莖出現扭轉現象。

而在佛手瓜的組織切片研究中我觀察到纖維層數不只 2 層，而是多達 4 至 5 層，有些纖維帶內外兩側有不對稱的細胞壁增厚（圖三十八），但也有些纖維帶是兩側木質化程度較低，中間木質化程度較高，卷鬚內部存在著多樣性的不對稱木質化差異。因此我認為蔣持平等人在 2013 年利用兩層收縮力不同的橡膠來模擬這樣層不對稱的纖維帶，而證明 Gerbode 等人在 2012 年 Science 所提的不對稱木質化收縮造成卷鬚盤捲形成螺旋狀的理論是正確的，是有問題存在的。



圖三十七、纖維帶兩側細胞與中間細胞木質化程度的比較圖

我從卷鬚螺旋內外側構造研究結果發現(圖三十八),不只是卷鬚內部纖維帶內、外兩側存在有不對稱的構造,在卷鬚螺旋的內、外兩側組織也出現不對稱的特化,靠螺旋內側組織分佈的膠質纖維帶與厚角組織,具有彈性可收縮性;靠螺旋外側則分佈著充體積較大的薄壁細胞,具有柔軟可彎曲性。這種兩構造的不對稱的特化才是真正造成卷鬚得以形成類似彈簧的螺旋形狀。



圖三十八、卷鬚莖內的纖維帶厚薄差異與螺旋內外側組織特性差異的比較圖

因此本研究提出「莖盤旋彎曲呈螺旋狀的卷鬚的機制」應該可以修正為:

螺旋內、外側分佈著不同特性的組織,外側面多為大型的薄壁組織,具柔軟彎曲性,具彈性收縮性的膠質纖維(G-fiber)細胞與厚角細胞分布於螺旋內側面,在迴旋盤捲時逐漸生成。當纖維細胞壁逐漸木質化且不對稱的增厚,木質化會排斥水分,纖維帶(fiber ribbon)則失水萎縮,致使莖兩側產生不對稱的收縮力量,造成特化莖逐漸迴旋盤捲形成彈簧狀的卷鬚。

陸、結論

- 一、藤本植物的盤旋卷鬚分為基部螺旋與末端螺旋，兩者螺旋方向相反，中間以逆向纏繞區相連。基部螺旋的螺距螺寬較大、彈簧指數 C 較大、彈簧常數 K 較小，是一種較大、較軟性的彈簧；末端螺旋是較小、較硬性的彈簧。
- 二、由於基部螺旋為近植物體一側的軟性彈簧，受外力干擾時，形變與震盪都較大。當眾多卷鬚釋放的力量將使植物體產生較大的晃動，故植物體其他部位的莖或卷鬚的末端有機會晃動到其他可攀附物上，產生自由盤旋運動纏繞物體，以擴大其生長空間而獲得更多的生存優勢。而已攀附固定物體的末端螺旋，是較剛硬的彈簧，不易產生形變位移，因可避免外力作用時，過大的位移震盪將使固定端產生脫落的現象，致使卷鬚無法繼續纏繞攀附物上。因此藤本植物卷鬚基部螺旋與末端螺旋，兩種不同彈簧性質的設計是有其重要演化與適應的意義存在。
- 三、基部與末端螺旋有不同彈簧性質的原因，是因為兩段螺旋內部『膠質纖維含量』及『纖維帶木質化程度』不同，造成卷鬚內部彈性與收縮力的差異，最後導致彈簧性質不同。基部螺旋膠質纖維含量多但木質化程度低，讓基部螺旋保有較多的彈性；而末端螺旋的纖維細胞壁木質化程度高，且纖維帶發達，因此收縮力量較強，讓基部螺旋的剛硬度較高。
- 四、螺旋內、外側分佈著不同特性的組織，外側面多為大型的薄壁組織，具柔軟彎曲性，具彈性收縮性的膠質纖維細胞與厚角細胞分布於螺旋內側面，在迴旋盤捲時逐漸生成。由於『纖維帶不對稱木質化程度』與『螺旋不對稱柔硬組織分佈』，致使莖兩側產生不對稱的收縮力量，內側面收縮力量較強，造成特化莖逐漸迴旋盤捲形成彈簧狀的卷鬚。

柒、參考文獻

(一)期刊文獻

Sharon J. Gerbode, L. Mahadevan, Andrew G. McCormick, Joshua R. Puzey. (2012).

How the Cucumber Tendril Coils and Overwinds. *Science* 337:1087-1091.

蔣持平、尚律、柴慧，2013。黃瓜卷鬚一：自盤捲拉拽。《力學與實踐》35(2):100-102。

蔣持平、尚律、趙婧、姜無厚，2013。黃瓜卷鬚二：維組織與力學行為的實驗模擬。《力學與實踐》35(3):99-102。

(二)書籍文獻

趙大衛 (2010)。普通高級中學基礎生物上冊，台南市，翰林出版事業股份有限公司。

(三)論文文獻

張善誌 (2012)。熱帶森林木質藤本的特性與構造。國立屏東科技大學森林系研究所碩士論文，未出版，屏東縣。

(四)科展文獻

方雯儀、林巧文、張容禎、黃薇捷 (2007)。中華民國第四十七屆中小學科學展覽會參展作品-生物及地球科學科國中組無所不捲。

林巧文、張容禎 (2010)。台灣國際科展參展作品-植物學科以蛋白質體學方法分析佛手瓜卷鬚之向觸性調控蛋白質。

綠色彈簧的扭轉乾坤-探討瓠瓜卷鬚的纏繞現象。嘉義市第29屆中小學科學展覽會

附錄一

卷鬚編號	基部螺旋長(mm)	逆向纏繞區長(mm)	末端螺旋長(mm)	總長(mm)
1	9.156	6.151	8.581	23.803
2	24.374	16.841	21.717	62.337
3	8.132	4.743	11.430	24.398
4	21.701	6.848	11.072	39.467
5	17.554	4.525	13.441	35.452
6	17.651	17.781	15.451	50.942
7	9.030	3.444	7.495	20.029
8	9.664	5.536	14.631	29.944
9	17.021	8.335	27.894	52.893
10	39.064	4.280	13.006	56.626
11	21.525	4.854	52.205	78.285
12	18.928	7.848	9.576	36.849
13	12.206	9.599	21.659	43.154
14	4.434	5.977	4.923	15.328
15	12.118	2.900	6.176	21.138
16	10.595	6.132	14.525	31.308
17	28.110	5.094	21.940	54.313
18	7.241	9.141	23.328	39.699
19	35.471	10.869	8.107	54.752
20	47.772	7.856	36.003	91.067
21	21.049	3.070	15.360	39.390
22	1.955	1.998	4.497	8.444
23	12.893	4.522	5.771	23.022
24	2.938	2.414	3.783	9.207
25	11.255	1.782	5.347	18.293

附錄二

卷鬚編號	基部	末端	總共
1	4	4	8
2	3	4	7
3	3	4	7
4	5	4	9
5	8	8	16
6	4	4	8
7	3	4	7
8	4	5	9
9	3	8	11
10	6	6	12
11	7	6	13
12	3	3	6
13	2	3	5
14	2	2	4
15	6	5	11
16	3	4	7
17	9	8	17
18	2	5	7
19	6	3	9
20	9	8	17
21	7	7	14
22	3	4	7
23	6	3	9
24	3	4	7
25	6	5	11

附錄三

卷鬚編號	測量區段	螺距		螺寬	
		圈數	平均長度(mm)	圈數	平均長度(mm)
1	基部	4	3.778	4	2.720
	末端	4	3.077	4	2.153
2	基部	3	11.065	3	4.870
	末端	4	6.671	4	3.830
3	基部	3	3.840	3	4.285
	末端	4	3.961	4	3.893
4	基部	5	5.505	5	3.858
	末端	4	3.727	4	2.510
5	基部	8	2.375	8	2.376
	末端	8	1.841	8	1.994
6	基部	4	6.858	4	4.060
	末端	4	4.345	4	2.683
7	基部	3	5.120	3	4.310
	末端	4	2.410	4	3.340
8	基部	4	3.205	4	3.363
	末端	5	3.790	5	2.948
9	基部	3	9.349	3	3.835
	末端	8	4.035	8	3.079
10	基部	6	7.584	6	4.286
	末端	6	3.088	6	2.946
11	基部	7	6.653	7	4.702
	末端	6	3.103	6	2.628
12	基部	3	7.263	3	5.470
	末端	3	4.426	3	4.400
13	基部	2	15.456	2	6.160
	末端	3	8.024	3	4.540
14	基部	2	4.884	2	3.230
	末端	2	4.914	2	3.370
15	基部	6	2.342	6	4.706
	末端	5	2.310	5	3.393
16	基部	3	5.289	3	3.745
	末端	4	4.278	4	3.710
17	基部	9	3.544	9	1.990
	末端	8	2.939	8	1.589
18	基部	2	4.707	2	3.660
	末端	5	4.732	5	3.408
19	基部	6	7.061	6	3.128
	末端	3	3.095	3	2.110
20	基部	9	5.956	9	3.676
	末端	8	5.083	8	2.673
21	基部	7	2.885	7	3.367
	末端	7	3.231	7	3.310
22	基部	3	0.982	3	1.925
	末端	4	1.57	4	2.000
23	基部	6	2.603	6	2.870
	末端	3	2.846	3	1.980
24	基部	3	1.453	3	2.820
	末端	4	1.255	4	2.287
25	基部	6	2.259	6	2.658
	末端	5	1.395	5	2.148

附錄四

卷鬚編號	測量區段	莖直徑	
		圈數	平均長度(mm)
1	基部	4	1.324
	末端	4	1.244
2	基部	3	1.500
	末端	4	1.306
3	基部	3	1.763
	末端	4	1.456
4	基部	5	1.173
	末端	4	1.035
5	基部	8	1.211
	末端	8	1.161
6	基部	4	1.380
	末端	4	1.037
7	基部	3	1.422
	末端	4	1.313
8	基部	4	1.046
	末端	5	0.924
9	基部	3	1.540
	末端	8	1.277
10	基部	6	1.458
	末端	6	1.316
11	基部	7	1.058
	末端	6	0.905
12	基部	3	1.628
	末端	3	1.364
13	基部	2	1.752
	末端	3	1.629
14	基部	2	1.363
	末端	2	1.291
15	基部	6	1.634
	末端	5	1.465
16	基部	3	0.981
	末端	4	0.799
17	基部	9	0.639
	末端	8	0.675
18	基部	2	1.011
	末端	5	0.778
19	基部	6	0.856
	末端	3	0.692
20	基部	9	0.869
	末端	8	0.827
21	基部	7	0.809
	末端	7	0.885
22	基部	3	0.758
	末端	4	0.695
23	基部	6	0.900
	末端	3	0.763
24	基部	3	0.813
	末端	4	0.713
25	基部	6	0.700
	末端	5	0.612

附錄五

卷鬚編號	基部螺旋長(mm)	逆向纏繞區長(mm)	末端螺旋長(mm)
1	38%	26%	36%
2	39%	27%	35%
3	33%	19%	47%
4	55%	17%	28%
5	50%	13%	38%
6	35%	35%	30%
7	45%	17%	37%
8	32%	18%	49%
9	32%	16%	53%
10	69%	8%	23%
11	27%	6%	67%
12	51%	21%	26%
13	28%	22%	50%
14	29%	39%	32%
15	57%	14%	29%
16	34%	20%	46%
17	52%	9%	40%
18	18%	23%	59%
19	65%	20%	15%
20	52%	9%	40%
21	53%	8%	39%
22	23%	24%	53%
23	56%	20%	25%
24	32%	26%	41%
25	62%	10%	29%

附錄六

卷鬚編號	圈數	逆向纏繞區長(mm)
1	8	6.151
2	7	16.841
3	7	4.743
4	9	6.848
5	16	4.525
6	8	17.781
7	7	3.444
8	9	5.536
9	11	8.335
10	12	4.28
11	13	4.854
12	6	7.848
13	5	9.599
14	4	5.977
15	11	2.9
16	7	6.132
17	17	5.094
18	7	9.141
19	9	10.869
20	17	7.856
21	14	3.07
22	7	1.998
23	9	4.522
24	7	2.414
25	11	1.782

附錄七

卷鬚編號	部位	Dm-螺寬-莖直徑 (mm)	彈簧指數 C
1	基部	1.396	1.054
	末端	0.909	0.731
2	基部	3.370	2.247
	末端	2.524	1.933
3	基部	2.522	1.431
	末端	2.437	1.674
4	基部	2.685	2.289
	末端	1.475	1.425
5	基部	1.165	0.962
	末端	0.833	0.718
6	基部	2.680	1.942
	末端	1.646	1.588
7	基部	2.888	2.031
	末端	2.027	1.544
8	基部	2.317	2.215
	末端	2.024	2.190
9	基部	2.295	1.490
	末端	1.802	1.411
10	基部	2.828	1.940
	末端	1.630	1.239
11	基部	3.644	3.444
	末端	1.723	1.904
12	基部	3.842	2.360
	末端	3.036	2.226
13	基部	4.408	2.516
	末端	2.911	1.787
14	基部	1.867	1.370
	末端	2.079	1.610
15	基部	3.072	1.880
	末端	1.928	1.316
16	基部	2.764	2.818
	末端	2.911	3.643
17	基部	1.351	2.114
	末端	0.914	1.353
18	基部	2.649	2.620
	末端	2.630	3.380
19	基部	2.272	2.654
	末端	1.418	2.049
20	基部	2.807	3.230
	末端	1.846	2.232
21	基部	2.558	3.162
	末端	2.425	2.740
22	基部	1.167	1.540
	末端	1.305	1.878
23	基部	1.970	2.189
	末端	1.217	1.595
24	基部	2.007	2.469
	末端	1.574	2.207
25	基部	1.958	2.797
	末端	1.536	2.509

附錄八

卷鬚編號	部位	彈簧係數 k
1	基部	24.6159
	末端	22.7609
2	基部	21.5395
	末端	27.6358
3	基部	17.8411
	末端	25.2262
4	基部	20.0434
	末端	26.2016
5	基部	7.5858
	末端	12.4547
6	基部	13.1063
	末端	17.2526
7	基部	3.97496
	末端	10.6418
8	基部	17.1711
	末端	17.8832
9	基部	14.9119
	末端	19.2618
10	基部	6.24414
	末端	15.3284
11	基部	23.3161
	末端	19.6517
12	基部	15.0204
	末端	35.7709
13	基部	7.30962
	末端	17.774
14	基部	14.4901
	末端	13.5684
15	基部	36.0344
	末端	31.3332
16	基部	5.16016
	末端	10.0224
17	基部	8.1978
	末端	20.9155
18	基部	2.53432
	末端	2.77368
19	基部	5.99426
	末端	6.13703

附錄九

第一個捲鬚實驗數據						
基部螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.179	1.625	11.0	3 至 4	4	
中段	0.162	1.198	13.5	3 至 4	4	
後段	0.138	1.131	12.2	3 至 4	4	
三段平均	0.160	1.318	12.25	3 至 4	4	
逆向區		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
中段	0.087	1.164	7.47	3 至 4	4	
末端螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.129	1.022	12.6	2 至 5	4	
中段	0.096	1.028	9.3	2 至 5	4	
後段	0.088	1.115	7.9	2 至 5	3	
三段平均	0.104	1.055	9.95	2 至 5	3	

第二個捲鬚實驗數據						
基部螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.158	1.322	12.0	3 至 4	4	
中段	0.105	0.947	11.1	3 至 4	4	
後段	0.088	0.801	11.0	3 至 4	4	
三段平均	0.117	1.023	11.34	3 至 4	4	
逆向區		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
中段	0.062	0.785	7.90	3 至 4	4	
末端螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.057	0.671	8.5	2 至 5	5	
中段	0.092	1.085	8.5	2 至 5	5	
後段	0.073	1.178	6.2	2 至 5	5	
三段平均	0.074	0.978	7.72	2 至 5	5	

第三個捲鬚實驗數據						
基部螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.134	1.211	11.1	3 至 4	4	
中段	0.077	0.681	11.3	3 至 4	4	
後段	0.076	0.693	11.0	3 至 4	4	
三段平均	0.096	0.862	11.11	3 至 4	4	
逆向區		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
中段	0.061	0.727	8.39	3 至 4	3	
末端螺旋		膠質纖維 (gelatinous fiber) 定量測量			膠質纖維 定性觀察	
測量項目	纖維帶面積 mm ²	卷鬚面積 mm ²	纖維化比例(%)	纖維帶細胞層數	最普遍層數	
前段	0.064	0.875	7.3	2 至 4	3	
中段	0.063	0.964	6.5	2 至 4	3	
後段	0.058	1.086	5.3	2 至 4	3	
三段平均	0.062	0.975	6.40	2 至 4	3	

【評語】 060009

本研究針對南瓜卷鬚進行型態與彈簧功能的探討。已獲得相當成果，並得到初步結論，可惜較多內容為觀察結果的推論，可再加強量化實驗，以增加理論的佐證。