

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

第三名

040708

大自然的神奇彈簧

—植物卷鬚構造彈簧性質之研究

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 張寓閔	指導老師： 林獻升 郭瓊華
-------------------	-----------------------------

關鍵詞：卷鬚、彈簧指數 C 、彈簧常數 k

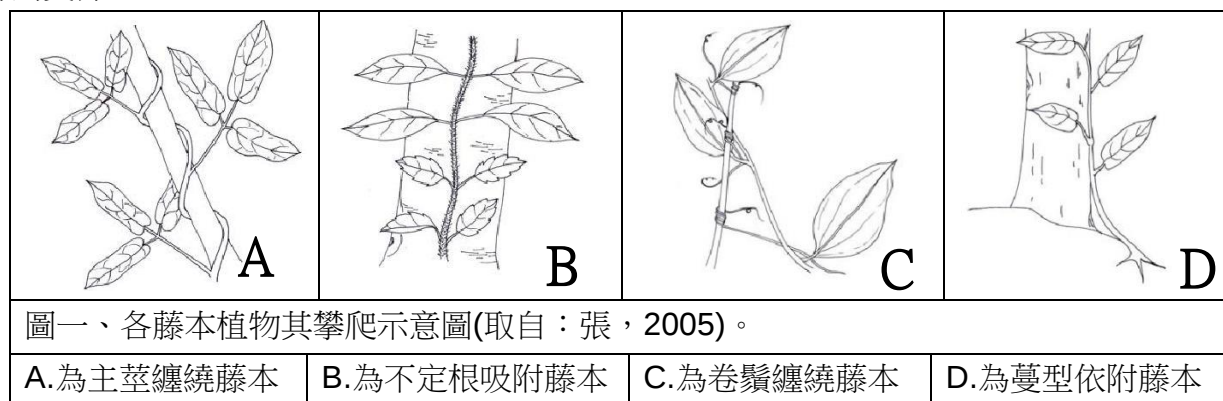
摘要

彈簧有貯存能量與降低震盪等功能。藤本植物莖細長，利用似彈簧的卷鬚纏繞物體得到支撐。採集南瓜卷鬚，測量形態可知其結構分為基部、末端螺旋，中間以逆向纏繞區相連，兩者的長度、圈數、莖直徑無顯著差異，但基部螺旋的螺距與螺寬較末端大。利用公式導出卷鬚彈簧指數 C ，結果基部 C 值較末端大，具顯著差異，顯示**基部螺旋較易產生形變**。施加外力於卷鬚探討基部、末端螺旋的形變情況，以獲得卷鬚彈簧常數 k ，結果與理論推導相同。綜合理論與實測結果可知：若將基部、末端螺旋視為串聯彈簧，當植物體受外力干擾時，卷鬚吸收能量後，末端螺旋可降低震盪避免脫落，而基部螺旋能產生大幅度的擺動，幫助植物找尋新的攀附物，以獲取更多陽光與生長空間。

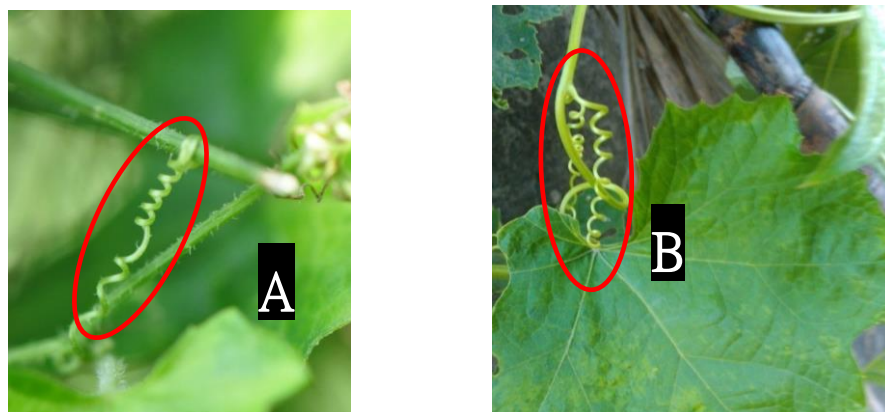
壹、研究動機

本研究與高中基礎生物教材相結合，其中—**高中基礎生物第四章第三節——植物對環境刺激的反應**單元中，提及植物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**，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.）如南瓜、三角葉西番蓮等，便是利用卷鬚構造抓住物體得到支撐。



卷鬚（tendrils）為葉或莖的變態構造，如圖（二）所示，**形態如彈簧**，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（Thigmotropism），纏繞物體而攀附。而後，連接植物與物體的卷鬚變形，其中一側的細胞會因木質化而縮短（Sharon J. Gerbode et al., 2012），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。

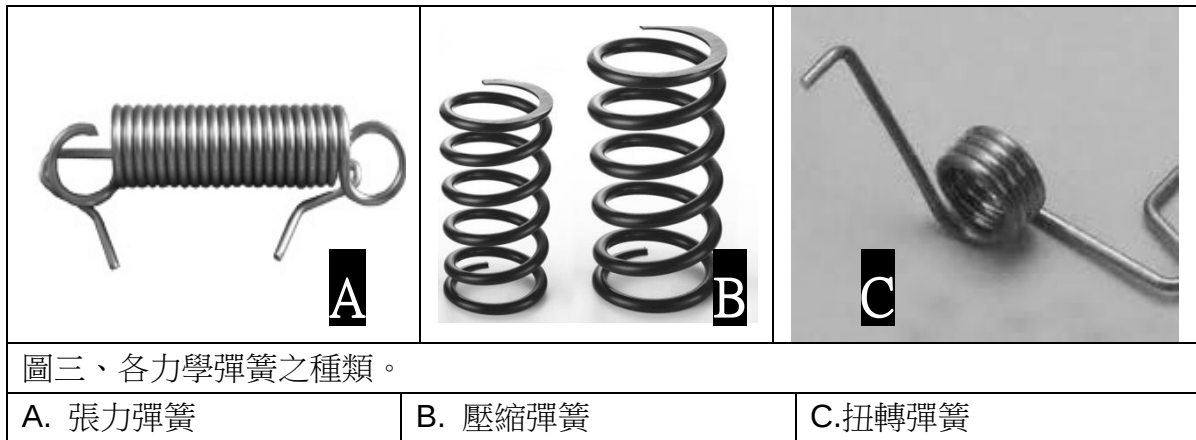


圖二、卷鬚形態照片

A 三角葉西番蓮之卷鬚

B 南瓜之卷鬚

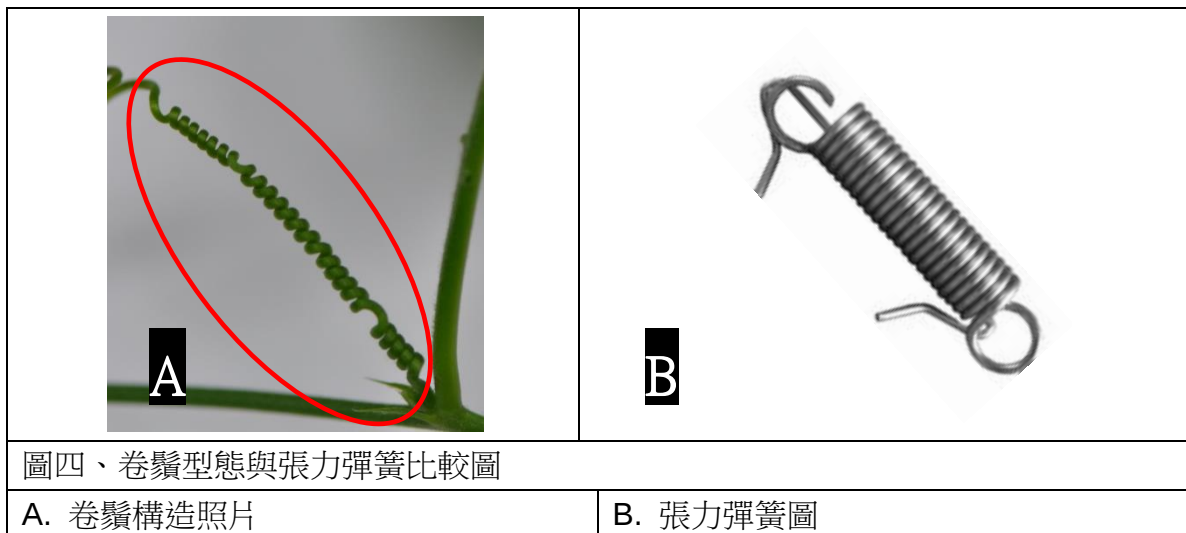
彈簧（spring）是利用彈性材料製造成特種形狀之機件，受到外力時，能產生伸長或縮短或其他不同方式的變形，以吸收外力而儲存於本體內，待外力除去後，將原來吸收儲存於本體內的能量放出，恢復原來的形狀，此即彈簧所具有的特性。如圖（三）所示，依照力學性質可分為張力彈簧、壓縮彈簧、扭轉彈簧，分別用來抵抗張力、壓力、與扭轉的力。



彈簧的受力與變形符合虎克定律，即受力與形變量成正比。可以由公式： $F = -kx$ 表示，其中 F 為彈簧所受到的力、 k 為彈簧常數、 x 為彈簧的形變量。將 F 固定，當彈簧常數 k 越大時，形變量 x 就會較小，較不易形變。另外彈簧的性質還可以用彈簧指數 C 來了解，彈簧

之平均直徑與線徑之比 $C = \frac{D_m}{d}$ ，可以直接由彈簧的形態測量數據帶入公式後直接計算出 C 值。彈簧指數 C 愈大，彈簧愈容易變形，因此彈簧指數 C 與彈簧常數 k 為反向關係。若彈簧指數 C 越大，則彈簧常數 k 較小。

於先前觀察具有卷鬚的植物時，由卷鬚的形態聯想到『彈簧』（如圖四）。



查爾斯·達爾文（Charles Rebert 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」即非金屬製、天然彈簧的可能。此點被大多數的科學家認同，但其力學行為

直至今日仍不為人知。

而國內有關卷鬚的報告中，方雯儀、林巧文、張容禎、黃薇健等四人在 2007 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 國際科展的報告中，研究方向為探討向觸性的原理，並以蛋白質的方向切入，分析卷鬚內部的調控蛋白質。然而以上的二篇報告，偏重於卷鬚的內部構造與形成方法，較少以物理原理進行卷鬚形態探究，此外，也較無以植物適應的角度去探討此卷鬚植物形成似彈簧構造對植物的影響。

既然卷鬚植物耗費能量去產生卷鬚的似彈簧形態，那麼不應單單只是外型相似而已，也應具備彈簧的物理特性以及彈簧所具備的功能。因此若能以彈簧性質的思維，切入去探討此卷鬚構造所帶來的影響，也許便能為達爾文所提出的卷鬚作為軟性彈簧的力學行為提出解答。

貳、研究目的

一、探討問題

- 1.卷鬚的基本構造與形態為何？
- 2.卷鬚構造中有哪些特性會影響其功能？
- 3.卷鬚是否具有類彈簧性質？
- 4.卷鬚構造的類彈簧性質如何幫助卷鬚植物適應環境變化？

二、研究目的

- 1.量測南瓜卷鬚構造特徵，建構卷鬚基本形態，並統計分析數據，探討與彈簧之關聯性。
- 2.利用形態測量數據，代入彈簧計算公式，推導出彈簧指數 C ，瞭解卷鬚的彈簧性質。
- 3.實測卷鬚受外力干擾後的形變數據，計算出彈簧常數 k ，瞭解卷鬚的彈簧性質。
- 4.比較與綜合理論彈簧指數 C 值與實際彈簧常數 k 值的相關性，推測類似彈簧的卷鬚構造對植物的生存適應有何幫助。

參、研究器材及設備

一.設備及器材

本研究所使用的器材與設備如下表一所示。

表一、實驗器材表

器材	用途	數量
游標尺	測量卷鬚各部位長度	2把
相機	拍攝照片	1台
滴定架	懸掛卷鬚	1個
釘書針	掛於卷鬚下方，使迴紋針不易脫落	數個
迴紋針	作為外力施於卷鬚下方	18個
Image J 軟體	測量各部位長度	1套
EXCEL 軟體	統計分析數據	1套

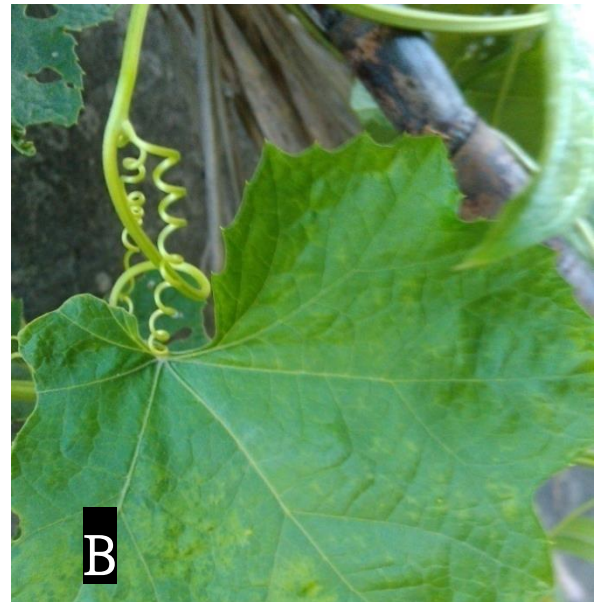
二.研究對象

(一)南瓜(*Cucurbitamoschata* DuChesne)

1.分類：葫蘆科(*Cucurbitaceae*)南瓜屬(*Cucurbita*)

2.分布：台灣各地均有栽種。

3.特徵：一年生蔓性草本植物，全株多具細柔毛。莖具細毛，莖節上具葉卷鬚以纏繞他物，卷鬚腋生。葉片為單葉互生，為圓形或心型，鋸齒緣，上表面為綠色，背面呈淡綠色，葉片長約20-25公分。



圖五、南瓜之相關照片。

A 南瓜之形態

B 南瓜之卷鬚形態

(二)卷鬚

卷鬚（tendrils）為卷鬚植物的葉或莖的變態構造，如圖六 A.所示，在其變態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（Thigmotropism），纏繞物體並攀附。而後如圖六B.所示，其中一側的細胞因木質化而縮短(Sharon J. Gerbode et al.,2012)。



圖六、卷鬚形成示意圖

A. 行迴旋運動之卷鬚

B. 因一端木質化而縮短之卷鬚

如圖六C.所示，其中一側的細胞因木質化縮短後，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、末端螺旋，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，如圖六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。



圖六、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。

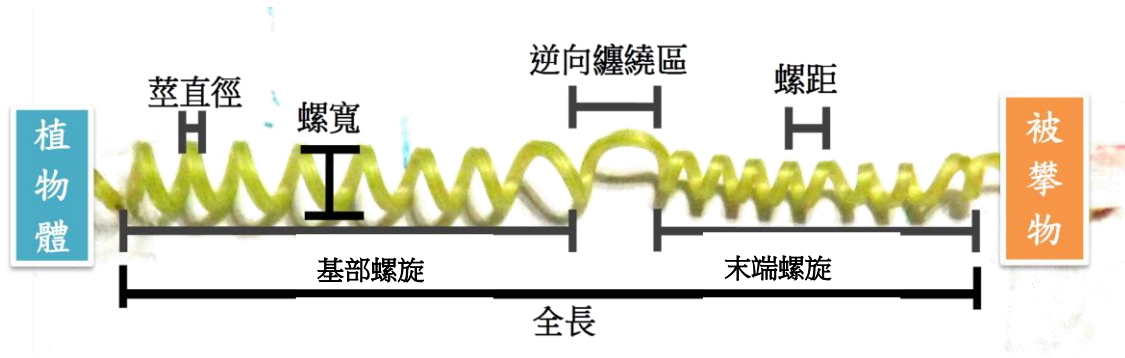
肆、研究過程或方法

一.卷鬚形態研究

(一)卷鬚形態測量

1.卷鬚形態

卷鬚各構造名稱定義如圖七所示，其中「基部螺距」為主幹莖與逆向纏繞區之間的區域，而「末端螺距」則為逆向纏繞區與被攀藤物之間的區域。



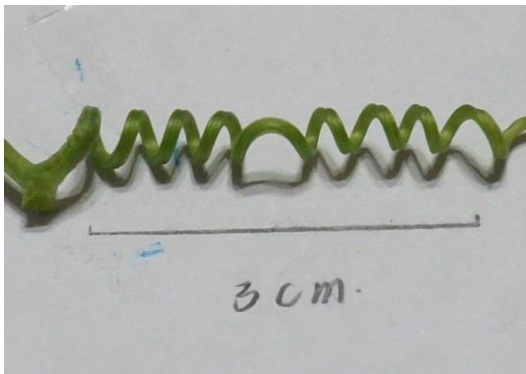
圖七、卷鬚各段名稱示意圖

2.測量方法

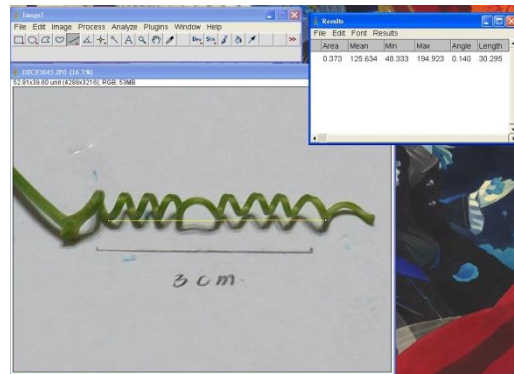
以臺北市南港區菜園隨機採集25個卷鬚，測量其卷鬚形態：

- (1) 「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，如圖八。再以Image J軟體測量準確長度，如圖九所示。
- (2) 「莖直徑」、「莖寬」：以游標尺測量長度。
- (3) 「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。

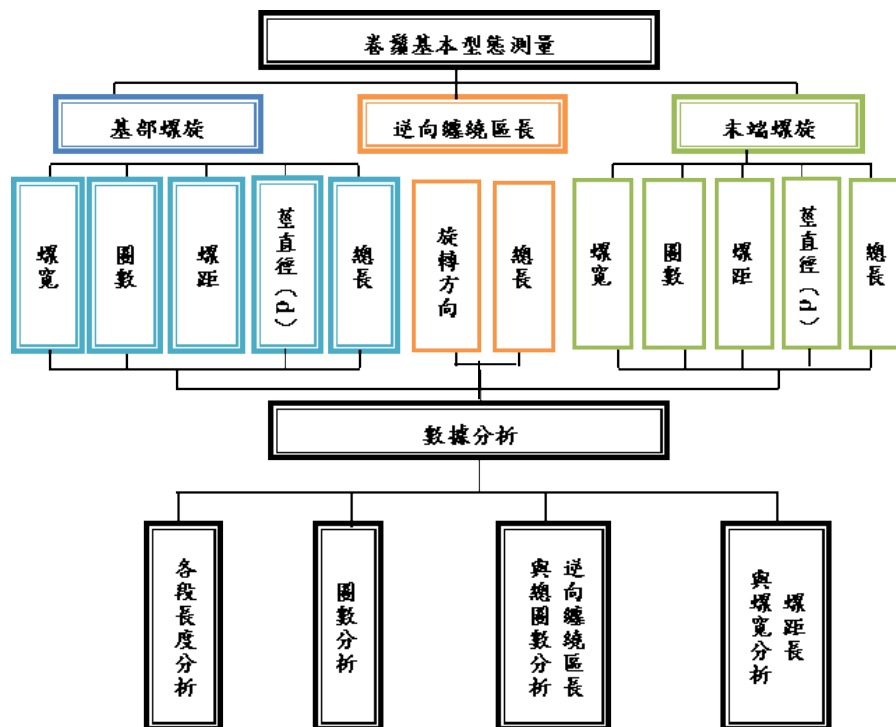
圖八、卷鬚與比例尺測量圖



圖九、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十所示：



圖十、卷鬚形態量測項目概念圖

(二)建構標準模型

以形態測量所得到的逆向纏繞區域長、基部、末端螺旋之區域長度數據，以卷鬚區域總長除之，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、末端螺旋的平均圈數，用以建構出南瓜卷鬚的在野外常見的基本型態(type)。

(三)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

(一)推導卷鬚彈簧指數 C

1.彈簧指數 C 的意義

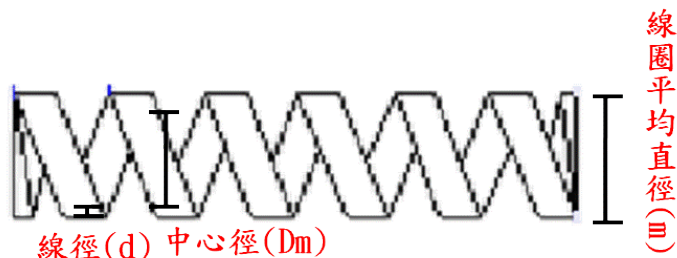
彈簧指數 C 為彈簧線圈平均直徑(m)與中心徑(Dm)之比值

中心徑(Dm)

線圈平均直徑(m)

(1)中心徑為平均直徑減去線徑(d)。示意圖如圖十一所示。又稱旋繞比。

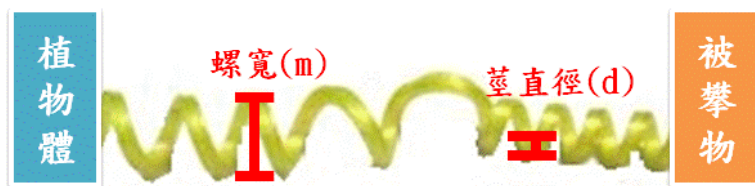
(2)若彈簧指數 C 越大，則彈簧較軟，當彈簧受到外力時，彈簧會產生較大的形變量。



圖十一、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 $\frac{\text{中心徑}}{\text{莖寬(m)}}$ ，其中中心徑定義為螺寬減去莖直徑，若卷鬚彈簧指數 C 越大，即代表此段螺旋較軟，則當基部、末端旋受相等外力時，此段螺旋會產生較大形變。



圖十二、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 大小，並以 t-test 檢驗兩段螺旋是否具有差異。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。

(二)實測卷鬚彈簧常數 k

1.彈簧常數 k 的意義

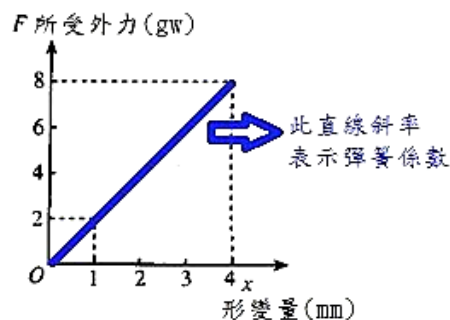
(1)當一彈簧受力時，其關係式滿足 $F=-kx$

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

(2)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。

(3)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，形變量 x 就會較小，由此可知，當一彈簧的彈簧常數 k 越大時，受到外力所產生的形變量較小，且較不易形變。

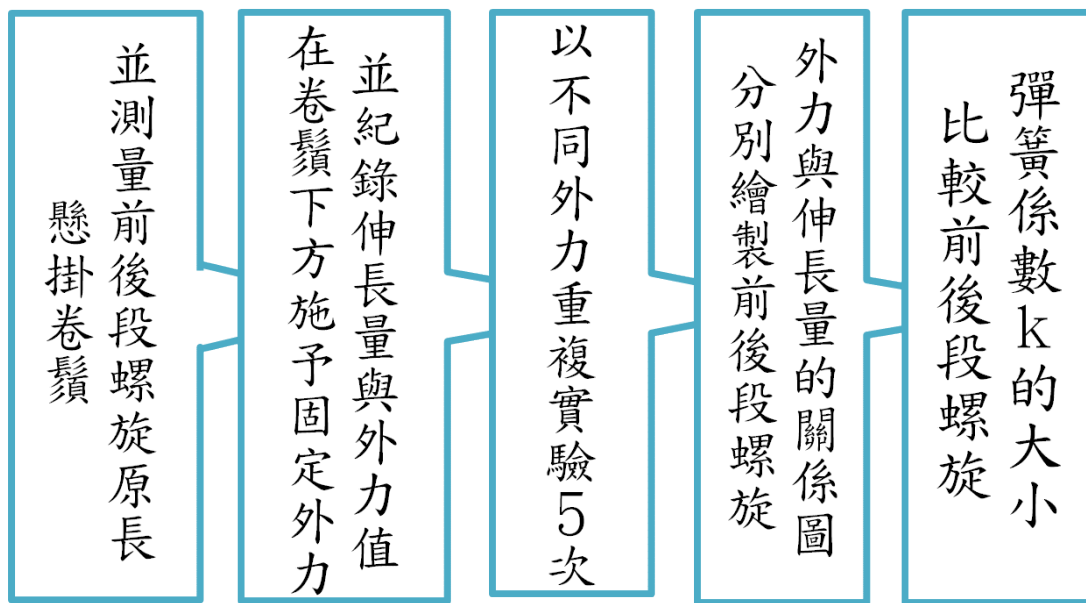


2.測量方式

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。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有差異。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。實驗流程如圖十二所示。



圖十二、卷鬚彈簧常數 k 探討實驗之流程圖

伍、研究結果

一、卷鬚形態研究

(一)卷鬚形態測量（原始數據如 附錄一至四）

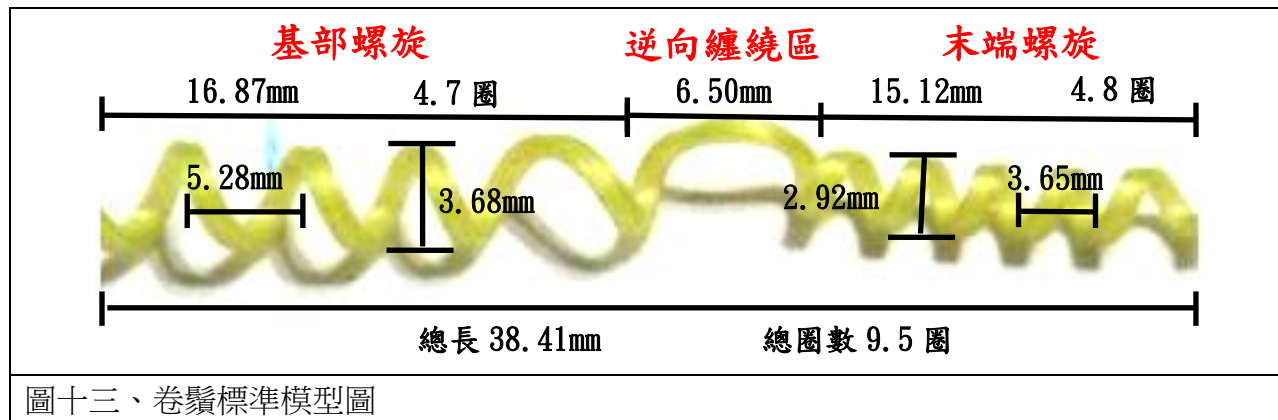
測量 25 個卷鬚後，經統計分析，可發現卷鬚區域總長的平均為 38.41 mm、平均圈數為 9.52 圈、平均螺距為 4.46 mm、平均螺寬為 3.3 mm，平均莖直徑為 1.12mm，其中 11 株為右旋旋轉，14 株為左旋旋轉。而基部螺旋與末端螺旋的形態各數據，經統計分析後，結果如表二、表三所示：

表二、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

將表二測量的平均數據繪製到卷鬚構造圖上，建構南瓜結果標準模型，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

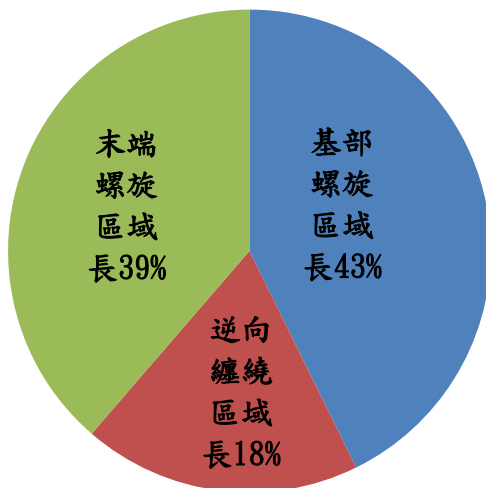
彈簧一般可分為張力彈簧、壓縮彈簧、扭轉彈簧等，分別用來抵抗張力、壓力、與扭轉的力。由卷鬚形態的研究可知為基部、末端螺旋的螺旋形態是一種「張力彈簧」與「壓縮彈簧」，受外力干擾時，因風的方向不同，有些卷鬚呈伸張的情況，有些則被壓縮。此兩種彈簧皆可以抵抗外界的張力或壓力作用，儲存能量後產生形變與震盪。

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。

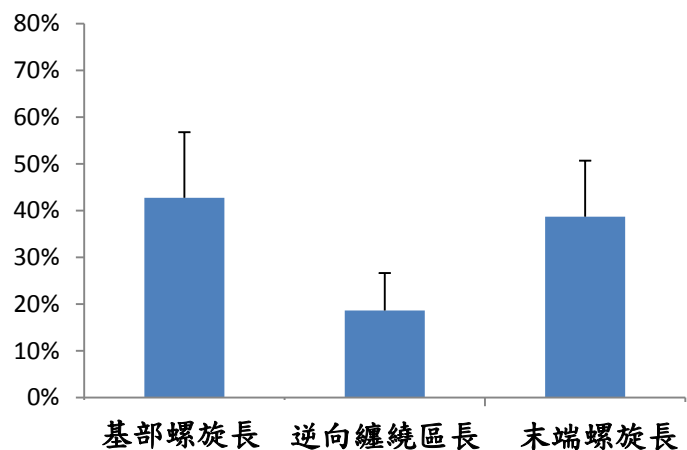
(三)分析數據意義

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（原始數據如 附錄一至四）

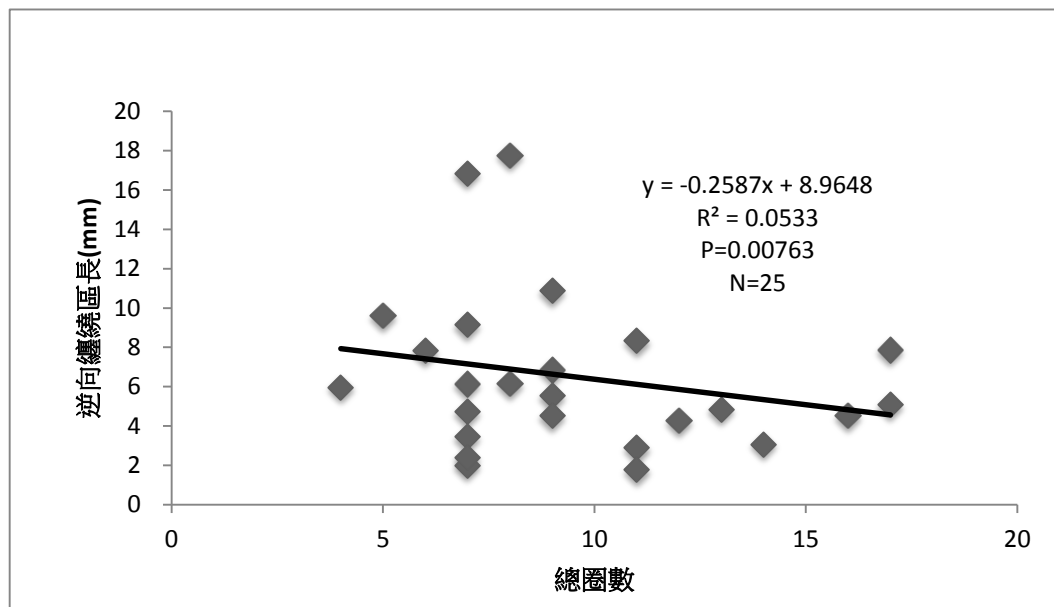
- (1)長度比較：基部、末端螺旋的各長度數據，經 t-test 分析後， $P=0.58391$ ($P>0.05$)，可知兩者在長度上並未有顯著差異。
- (2)圈數比較：基部、末端螺旋的各圈數數據，經 t-test 分析後， $P=0.776695$ ($P>0.05$)，可知兩者在圈數上並未有顯著差異。
- (3)螺距比較：基部、末端螺旋的各螺距數據，經 t-test 分析後， $P=0.02907$ ($P<0.05$)，可知兩者在螺距上具有顯著差異，基部段螺旋之螺距較末端螺旋之螺距大。
- (4)螺寬比較：基部、末端螺旋的各螺寬數據，經 t-test 分析後， $P=0.0005230$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

表三、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）

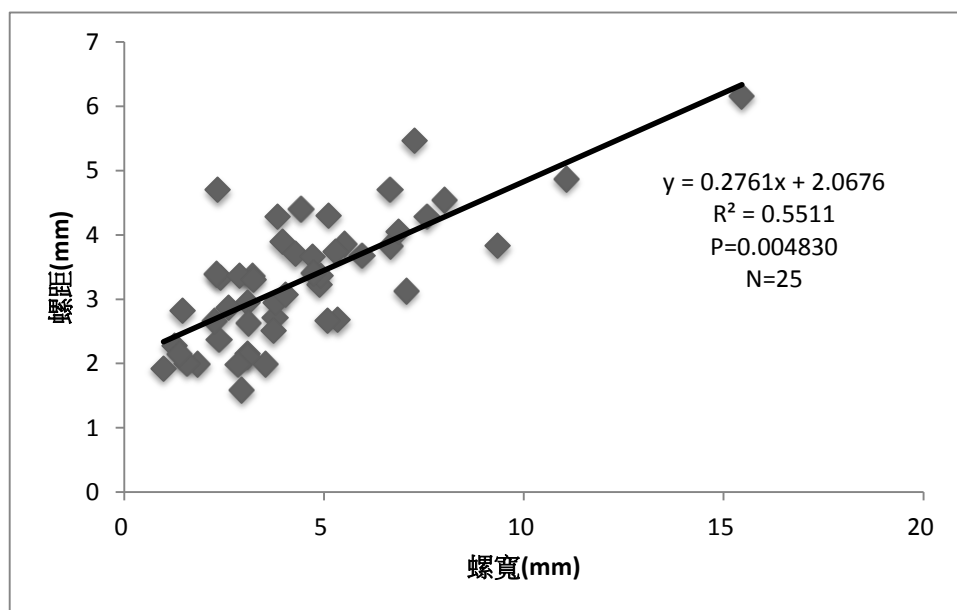
以逆向纏繞區域長與總圈數作一迴歸分析，以了解兩因子的相互關係，而實驗結果如圖十六，圈數與逆向纏繞區域長的 $P=0.00763(P<0.05)$ ，可知圈數與逆向纏繞區域長具有顯著相關，即圈數會受逆向纏繞區域長影響，呈負相關。當總圈數越多時，逆向纏繞區域長將越短。



圖十六、圈數與逆向纏繞區域長迴歸分析圖

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，實驗結果如圖十七，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。



圖十七、螺距與螺寬分析散布圖

二.卷鬚彈簧性質研究

(一)推導卷鬚彈簧指數 C

- 1.將卷鬚形態研究所得的數據（表二）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。所得的結果如表四所示（原始數據如附錄七）。

表四、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

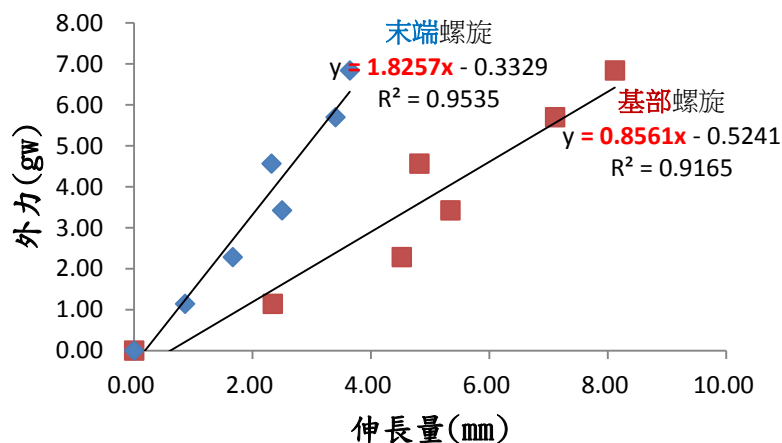
比較項目	基部段螺旋（靠植物體）	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)
中心徑 D_m	2.50 ± 0.81	>	1.91 ± 0.64
彈簧指數 C	2.14 ± 0.41	>	1.70 ± 0.25
理論形變量	較大	>	較小

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：

- (1) 基部、末端螺旋的中心徑 (D_m) 各數據，經由 t-test 分析後， $P=0.0006290$ ($P<0.05$)，可知基部螺旋與末端螺旋的中心徑(D_m)具顯著差異，基部螺旋的中心徑(D_m)較末端螺旋大。
- (2) 基部、末端螺旋的彈簧指數 C 各數據，經由 t-test 分析後， $P=0.008903$ ($P<0.05$)，可知基部螺旋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，靠近植物體那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。

(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，也因此在此實驗中，施加不同外力於同一個卷鬚上，以測得真實的、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。其中統計 20 個卷鬚，於相同外力下的平均形變量，繪製成迴歸分析圖，如圖十八所示。此外，統計 20 個卷鬚的基部、末端螺旋 k 值，整理成表五（原始數據如附錄八）。



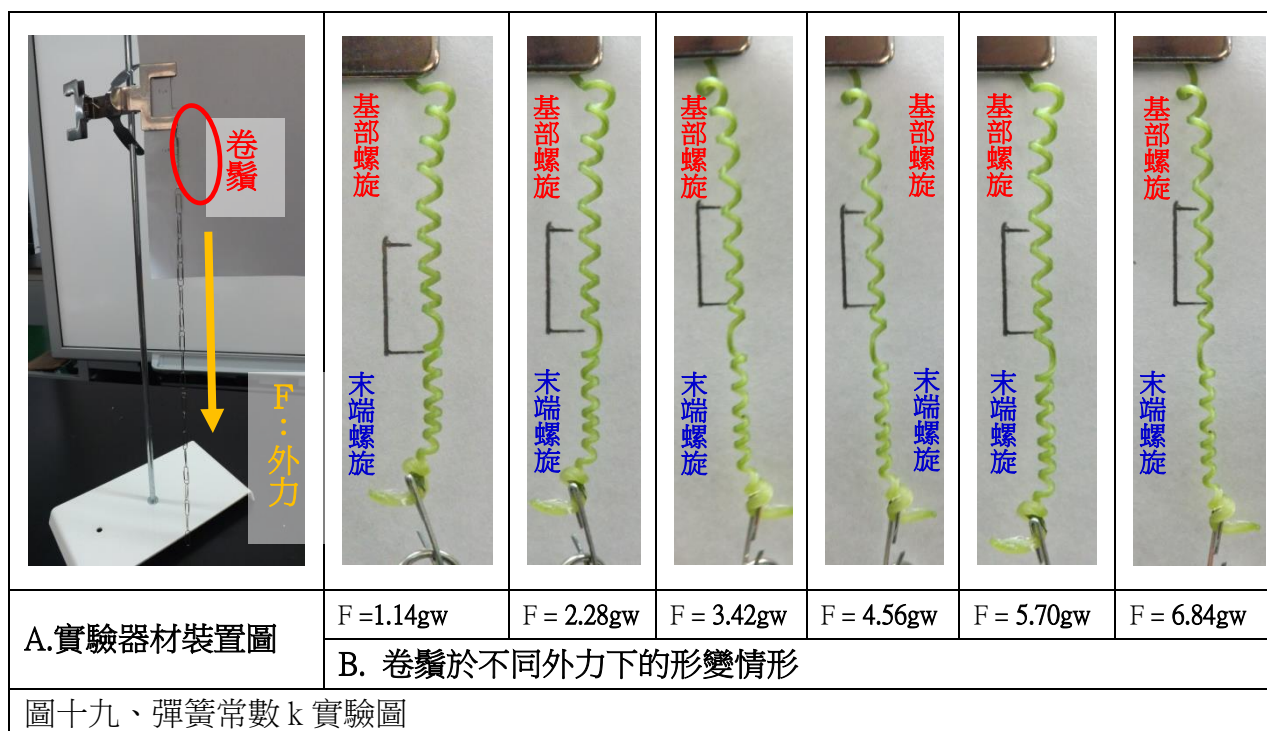
圖十八、卷鬚的基部、末端螺旋測量彈簧常數 k 值數據分佈圖

表五、基部、末端螺旋的彈簧指數 k 與實際形變量比較表

比較項目	基部螺旋（靠植物體）	比較結果	末端螺旋(靠攀附物)
彈簧常數 k	1.58 ± 1.50	$<$	2.49 ± 2.97
實際形變量	較大	$<$	較小

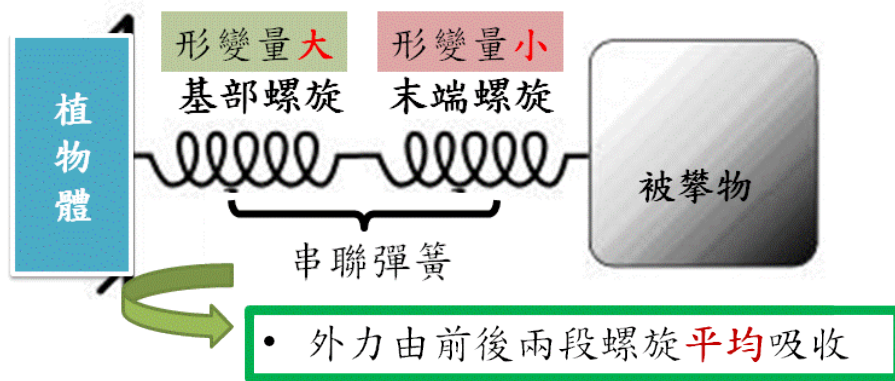
2. 上述資料經統計分析後，比較基部、末端螺旋的彈簧性質如下

基部、末端螺旋的彈簧常數 k 各數據，經 t -test 分析後， $P=0.05989$ 可知基部、末端螺旋的彈簧常數 k 具有顯著差異，基部螺旋之彈簧常數 k 較末端螺旋小。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。將此應用於卷鬚，可知當基部、末端螺旋吸收相等外力時，基部螺旋所產生的形變量較末端螺旋大，即彈簧震盪較為明顯，有較大的左右晃動，如圖十九所示。



(三) 卷鬚彈簧性質之綜合比較

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果是相同的，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』（如圖二十），基部螺旋震盪情況大於末端螺旋震盪情況。



圖二十、卷鬚串聯彈簧示意圖

由於一個卷鬚是由兩個彈簧所串聯，串聯彈簧的彈簧常數計算公式為

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$$

因此可以計算出整個卷鬚的彈簧常數 k ，將 20 個卷鬚的彈簧常數 k 統計後，得到南瓜這種物種的卷鬚的彈簧常數 k 值的平均值為 0.943 ± 0.698 。

陸、討論

一、卷鬚形態研究

(一)逆向纏繞區域長與圈數之分析

將逆向纏繞區域長與圈數的結果分析，數據經 t-test 檢驗後，呈顯著相關，可知圈數受逆向纏繞區域長影響，呈負相關。當逆向纏繞區域越長時，圈數則越少。

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，如圖二十一所示。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。



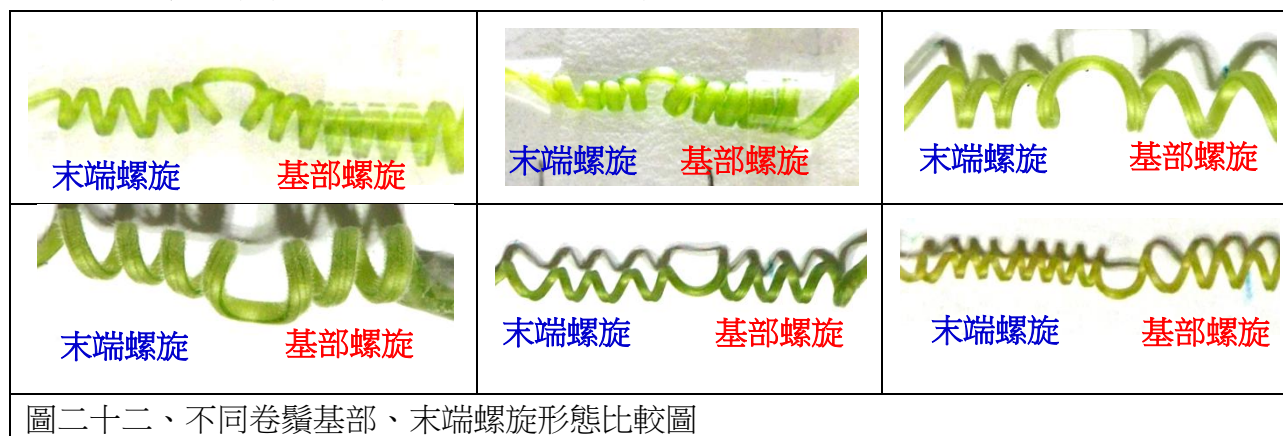
圖二十一、圈數與逆向纏繞區域長關係示意圖

(二)螺距與螺寬之分析

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。

(三)基部、末端螺旋之分析

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，如圖二十二所示。



圖二十二、不同卷鬚基部、末端螺旋形態比較圖

二.卷鬚彈簧性質研究

(一)串聯的彈簧與彈簧指數 C 的關係

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)。經由串聯彈簧的定義可知，基部、末端螺旋吸收的外力相等。經由彈簧指數 C 的定義可知，當吸收相等外力時，彈簧指數 C 大的彈簧會產生較大的形變。利用形態測量出的卷鬚構造數值代入公式後計算出基部、末端彈簧的彈簧指數 C，可知基部螺旋的彈簧指數 C 較末端螺旋大，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的外力再釋放後會產生較大的位移，若是藤本植物莖上具有許多的卷鬚，則會讓植物體的莖產生較大的晃動。

(二)彈簧常數 k 與彈簧指數 C 的關係

物理上，當一彈簧受力時，會滿足 $F=-kx$ 的關係式。將外力設為定值，若一彈簧彈簧指數 C 越大時，受外力後所產生的形變量較大，將使 x 較大，為使 F 值為定值，因此彈簧常數 k 則較小。也因此彈簧指數 C 與彈簧常數 k 為反向關係，當彈簧指數 C 越大時，彈簧常數 k 將越小。利用公式推導出的基部螺旋彈簧指數 C 大於末端螺旋(表四)，而實際測量出的彈簧常數 k 則以基部螺旋較小，兩者確實有反向的關係(表六)。

表六、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	2.14 ± 0.41	>	1.70 ± 0.25
彈簧常數 k	1.58 ± 1.50	<	2.49 ± 2.97
彈簧形變量	較大	>	較小

(三)中心徑 Dm 與彈簧常數 k 的關係

$$K = \frac{G * d^4}{8 * D_m^3 * N_c}$$

若將基部、末端螺旋視為一彈簧，以彈簧公式 代入，以推測基部、末端螺旋受外力時的形變情形。

●公式符號對應名稱如下：

k：彈簧常數 G：線材之鋼性模數 d：線徑

Dm：中心徑 = 為外徑-線徑 NC：有效圈數，為總圈數減 2

●套入卷鬚後，則各符號定義名稱為：

k：螺旋之彈簧常數 G：構成螺旋物質的模數 d：莖直徑

Dm：中心徑=螺寬-莖直徑 NC：有效圈數，為卷鬚總圈數減 2

由於基部、末端兩段螺旋構成物質皆相同，可知兩者 G 相等；d 為卷鬚的莖直徑，經卷鬚形態測量的數據結果分析後，可知基部、末端螺旋的莖直徑未呈顯著差異，即基部、末端螺旋莖直徑未有差異，故 d^4 兩者相等；NC 為基部、末端圈數減 2，經卷鬚形態測量的數據結果分析後，可知基部、末端螺旋的圈數未呈顯著差異，即基部、末端螺旋圈數未有差異，各 NC 兩者相等；經由中心徑(Dm)分析的結果，可知基部、末端螺旋的中心徑(Dm)呈顯著差異，且基部的中心徑(Dm)較末端螺旋大(表四)，故 Dm^3 基部螺旋較末端螺旋大。經計算後，「理論上」基部螺旋的 k 值較小，而末端螺旋的 k 值較大，這個理論上的推測也符合實際實驗測量出的基部、末端彈簧 k 值情況。因此不管是用哪一種方式所得到的結論都是一致的。

三、卷鬚對卷鬚植物的生存適應與影響

由於卷鬚可視為軟性彈簧，故符合彈簧的相關性質。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。

綜合卷鬚與彈簧性質的討論與結果，可知由於基部螺旋的彈簧指數 C 較大，故受外力影響時，所產生的形變量較末端螺旋大。此外，物理上，串聯彈簧常數公式為 $1/k_{total}=1/k_1+1/k_2$ 由於卷鬚為一串聯彈簧系統，故代入彈簧常數 k 實驗的數據，經計算與推論後，可知此串聯彈簧的震盪效應，主要由基部螺旋進行，也就是基部螺旋產生的形變量與震盪都較末端螺旋大。

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，產生向觸性運動纏繞物體，以擴大其生長空間與獲得更多的陽光與養分，此結論符合查爾斯·達爾文於《攀緣植物的運動和習性》的描述，提出卷鬚做為「軟性彈簧」的可能，並符合本研究之實驗假說。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，過大的震盪讓固定端無法繼續纏繞住攀附物而產生卷鬚脫落的現象。因此卷鬚基部、末端不同彈簧性質的設計是有其重要的演化意義。

綜合以上，由達爾文所提出的物競天擇學說，可知大自然會保留具有競爭優勢的物種。當卷鬚植物具有卷鬚後，可減少外力對細長莖的傷害，且基部螺旋形變量較大的卷鬚，又可幫助其找到被攀物，末端形變量較小的卷鬚可避免攀附脫落。也因此卷鬚的出現，幫助了卷鬚植物獲得競爭優勢，以通過大自然的天擇考驗，故本研以物理的理論與實際的測量實驗，證明卷鬚植物的卷鬚具備重要的彈簧性質。

柒、結論

一、卷鬚形態

- 1.卷鬚結構可分為基部螺旋與末端螺旋，中間以逆向纏繞區相連。
- 2.基部螺旋的長度較大、莖直徑較小，螺旋數圈較少，但兩者無顯著差異。
- 3.卷鬚的逆向纏繞區域長與總圈數呈反比關係，且螺距與螺寬成一特定比例關係。

二、卷鬚與彈簧性質

- 1.卷鬚構造可視為一串聯彈簧的系統，受力時基部、末端螺旋吸收的外力相等。
- 2.基部的螺旋彈簧指數 C 較大，彈簧常數 k 較小，受力時容易產生較大的形變量。

三、卷鬚對卷鬚植物的作用與影響

- 1.卷鬚可作為軟性彈簧，可吸收與儲存干擾的能量。
- 2.卷鬚基部螺旋能幫助植物產生較大的搖晃，移動至新的攀附物，以獲得更多的生長空間與養分，末端螺旋能穩固原攀附物。

捌、參考文獻

(一)期刊文獻

Sharon J. Gerbode, L.Mahadevan,Andrew G.MCCormiCk,JoshuaR.Puzey.(2012).
How the Cucumber Tendril Coils and Overwinds. Science 337:1087-1091.

(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

- 1、方雯儀、林巧文、張容禎、黃薇婕（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。
- 2、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。

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	0.5585
	末端	1.5284
2	基部	1.768
	末端	4.7525
3	基部	0.819
	末端	1.5797
4	基部	2.9362
	末端	4.0381
5	基部	0.559
	末端	0.8815
6	基部	1.2425
	末端	1.5284
7	基部	1.4129
	末端	1.2536
8	基部	1.1283
	末端	2.3672
9	基部	2.3621
	末端	3.6893
10	基部	0.5375
	末端	0.9302
11	基部	3.4676
	末端	4.013
12	基部	3.9663
	末端	6.7188
13	基部	0.3342
	末端	1.0009
14	基部	4.0691
	末端	4.7911
15	基部	1.9623
	末端	3.3557
16	基部	0.3262
	末端	0.8016
17	基部	1.8531
	末端	1.7868
18	基部	0.2834
	末端	1.0605
19	基部	0.3515
	末端	0.546
20	基部	1.5714
	末端	3.2256

【評語】 040708

探討卷鬚的基本構造及其功能。

應再深入探討 G 蛋白對其彈簧性質的影響及 G 蛋白在不同部位之分佈。