

第五屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA5-300

作品名稱：鳳仙花果實的物理機制

姓名：黃春靜

關鍵字：果實皮束、自力彈開、鳳仙花

鳳仙花果實的物理機制

摘要

鳳仙花的果實，平常維持一類似橢球狀之形狀生長，但若加以些微擾動，即爆破開來。討論鳳仙花的果實是以何種機制維持此困難之平衡，提出三項假設：雙面尺模型、果實皮束之力平衡、及果實內氣壓不等於外壓。雙面尺模型證明非主要原因；果實皮束之靜力平衡為維持平衡之主因；果實之內外並無壓力差。

鳳仙花果實的物理機制

壹、研究動機

在上生物課的「繁衍」時，討論到植物散播種子的機制，風力、昆蟲為媒介、水為媒介等方法都很好理解；但課本上說鳳仙花是「自力彈開」，引起我的興趣。什麼是「自力彈開」？物理上的模型如何解釋這個「自力」？這就是我研究的動機了。

貳、研究目的

有些物理老師或許從來不知道有鳳仙花這種東西，我猜想如果他們知道應該會十分感興趣。而生物老師或許個個都知道鳳仙花的特色「自力彈開」，但卻很少有人去質疑這「自力」究竟如何達成。我參考了相關文獻，發現在大學裡生物方面的研究或有關於鳳仙花的，但都在探討鳳仙花與環境的交互作用、鳳仙花的族群等問題，沒有人提到鳳仙花的物理。或許身為一個高中生才會想到去探討這個生物的物理之謎！

參、研究設備及器材

鳳仙花果實、解剖刀、塑膠盤、雙面尺、墊板、橡皮筋、剪刀、小刀、打火機、快乾、金屬剪、量筒、酒精、鋼片、熱塑性塑膠條、錐形瓶、玻璃管、鐵絲、有刻度玻璃管、保麗龍片、木塊、漆包線、皮球、油性筆、玻璃毛細管、水銀、彈簧秤、量角器

肆、研究過程及方法

觀察→假設→實驗方法→研究結果→討論

一、第一階段

(一)、觀察

- 果實爆開前如<圖一>，但彈開後變成如<圖二>



<圖一>



<圖二>

- 果實怕火，用打火機烘之則乾掉而失去其彈力；放太久亦如是
- 果實放在水或油中於短時間內即爆開，甚至未成熟之果實亦如是
- 果實皮束，如<圖四>，中間以薄膜連接；此薄膜之生長與果實皮束垂直且從柄上長出，多條薄膜環繞果實皮束之柄生長
- 果實內種子生於一柄如<圖三>，為果實生長柄之延續，而果實彈開時此柄被切斷；此柄短於果實之長



<圖三>



<圖四>

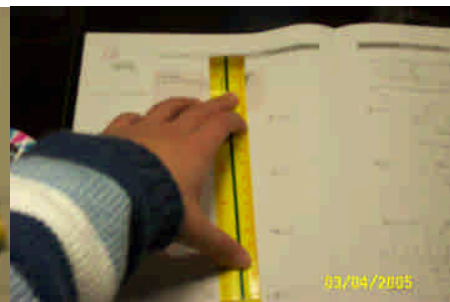
- 果實上彎肚凸，但剛開始生長時兩側形狀皆同
- 果實皮束若分成單束其內捲情況益發嚴重
- 果實皮束邊緣向內微彎，中間微凹
- 果實靠柄部分相較於另一端較容易彈開

(二)、假設：雙面尺模型

小時後玩過一種尺，雙面都可以捲起來（有點類似捲尺，但較短，見圖）。這種尺由兩面的彈簧構成；一面是縱向、一面為橫向如圖七。若此模型是正確的則植物不需很大的立即可維持平衡。原因是在越接近臨界之處所需改變平衡之力越小（尺會有想往任一面捲的傾向）。



<圖五>



<圖六>



<圖七>



<圖八>

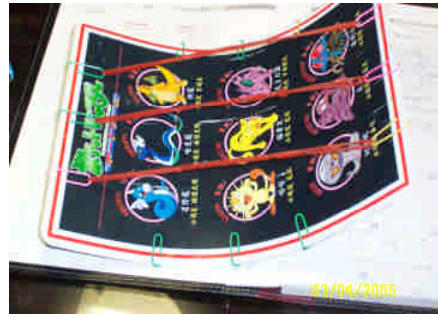
(三)、實驗方法：實驗——果實皮束切片

- 實驗目的：證明雙面尺模型
- 實驗原理：若以兩塊墊板為材料，在其中一塊繫上橫向的橡皮筋束，另一塊繫上縱向的橡皮筋束，再將兩塊墊板合併，則可得類似雙面尺的模型。此時若將兩塊墊板分開，則兩塊會往不同方向捲去。猜測果

實皮束亦如是，故欲將其切成兩半，若上半會往橫向捲則證明之



<圖九>



<圖十>

- 實驗做法：取解剖刀一、果實皮束一，以解剖刀小心切其表皮

(四)、實驗結果

表皮無預測之性質，即果實皮束反面在切下後並不見往後橫向捲去



<圖十一>



<圖十二>

(五)、討論

果皮無預測之性質，即為雙面尺模型非完全正確（靜力平衡模型會討論到，果實側面亦須有強度，只是不強到讓表皮能倒彎回去）

二、第二階段

(一)、觀察

- 做模型過程中發現單靠力平衡十分難維持固定形狀

(二)、假設

果實內之氣壓與外界氣壓不同

(三)、實驗方法

1、實驗二之一——測定果實內氣壓

- 實驗目的：證明果實內外（大氣壓）壓不同
- 實驗原理：若果實內外壓不同，則會使空氣柱之體積改變
- 實驗做法：將果實裝於一裝有水之量筒內，將其倒插入一水面，而使果實浮於量筒內之水面（此水面高於所插入之水面）；此時將果實戳破，若水面下降，即為內壓大於外壓；反之則為內壓小於外壓

2、實驗二之二——測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之一
- 實驗原理：選用毛細作用較小之液體，及管徑較粗之量筒



<圖十三>



<圖十四>

- 實驗做法：取粗管徑量筒、果實、酒精

- 1、使用與實驗二之一相同之裝置，但量筒內液體改為酒精，量筒改為以 0.2ml 為一格、總體積 25ml 之量筒（實驗三之一之量筒一格為 0.1ml、總體積 10ml），其管徑粗。
- 2、又由於直接讓果實浮在水面並戳破，果實的體積亦易造成誤差，故使果實完全沉入水面並將其戳破，再分開測量果實之體積

3、實驗二之三—測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之二
 - 實驗原理：液體改回水，但依舊選用管徑粗之量筒，並使果實完全離開水面再讀取刻度以減少果實本身體積所造成誤差
 - 實驗做法：取粗管徑量筒、果實、鐵絲
- 1、在粗管徑量筒（以 0.2ml 為一格，總體積 25ml）中裝水，倒插入一水面，讀取刻度 I。
 - 2、將果實從量筒開口端放入，即浮至量筒內水面，再將固定有保麗龍片在其上之鐵絲插入量筒開口端，讀取刻度 II。
 - 3、攪動鐵絲使果實爆破，讀取刻度 III。
 - 4、將果實之皮取出，讀取刻度 IV。
 - 5、再取果實與鐵絲共同放入，讀取刻度 V。
 - 6、使果實爆破，讀取刻度 VI。
 - 7、將果實之皮取出，讀取刻度 VII。

4、實驗二之四—測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之三
 - 實驗原理：同時達成一置放果實之大空間及精細之刻度
 - 實驗做法：取果實一顆、鐵絲、錐形瓶、有刻度玻璃管
- 1、取果實一顆，先測其體積（一）。
 - 2、將果實置於錐形瓶中，錐形瓶瓶塞插入一有刻度之玻璃管，其總體積為 3ml，最小刻度 0.05ml。以一鐵絲穿過玻璃管，將鐵絲頂端折成易於戳破果實之形狀。將玻璃管整支置於水中，快速將錐形瓶與插毛細管之塞子結合而使毛細管內液面高於水面，讀取刻度（二）。攪動鐵絲使果實破

裂，讀取刻度（三）。

3、取出果實之皮，測其體積（四）。



<圖十五>



<圖十六>

5、實驗二之五—測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之四

- 實驗原理：不以將鐵絲伸入錐形瓶之方式弄破果實，以此降低水沿鐵絲之毛細作用而減少誤差；錐形瓶改為正立，故可確實放入多顆果實而不容易爆破；玻璃管改為玻璃毛細管，使現象明顯。

又水銀若上移則果實內壓大於外壓，下降為內壓小於外壓

- 實驗做法：取一錐形瓶與錐形瓶塞、玻璃毛細管、果實十數顆、水銀少許

- 1、將錐形瓶塞鑽洞，使與毛細管契合（圖十七）

- 2、將毛細管插入錐形瓶塞，以毛細管取水銀一滴，此滴水銀將因上下毛細作用抵銷而滯留於毛細管中（圖十八）

- 3、在錐形瓶內置入多顆果實（約十顆）

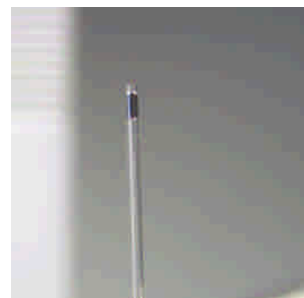
- 4、將錐形瓶塞塞住錐形瓶（圖十九）

- 5、搖晃錐形瓶使果實破裂

- 6、觀察水銀之移動



<圖十七>



<圖十八>



<圖十九>

6、實驗二之六一測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之五
- 實驗原理：改善漏氣
- 實驗做法：取一錐形瓶與錐形瓶塞、玻璃毛細管、果實十數顆、水銀少許、凡士林少許

- 1、架設裝置如實驗二之五
- 2、測試是否漏氣（見附錄一）
- 3、觀察水銀之移動

7、實驗二之七一測定果實內氣壓

- 實驗目的：欲證明果實內外壓不同，並改良實驗二之六
- 實驗原理：先做空白實驗（見附錄二）發現若上下搖晃錐形瓶，水銀亦有可能上下移動；若左右移動錐形瓶則水銀會保持在原處。故採左右搖晃代替上下搖晃，以避免因搖晃造成水銀移動
- 實驗做法：取一錐形瓶與錐形瓶塞、玻璃毛細管、果實十數顆、水銀少許、凡士林少許

- 4、架設裝置如實驗二之五
- 5、測試是否漏氣（見附錄一）
- 6、觀察水銀之移動

（四）、研究結果

1、實驗二之一一測定果實內氣壓

看不出明顯結果

2、實驗二之二一測定果實內氣壓

於酒精測得果實之體積為 1.0ml；將果實在酒精液面下弄破而氣泡往上冒造成的體積改變為 0.8ml

3、實驗二之三一測定果實內氣壓

I (原刻度) — 9.4ml ; II (放入果實及保麗龍片) — 11ml ;
 III (果實爆破後) — 11ml ; IV (取出果實皮及保麗龍片) — 9.6ml ;
 V (再放入果實及保麗龍片) — 11.2ml ; VI (果實爆破後) —
 11.2ml ; VII (取出果實皮及保麗龍片) — 9.8ml

依實驗之假設所欲觀察之變化值應發生於2~3及5~6間但未見變化

4、實驗二之四—測定果實內氣壓

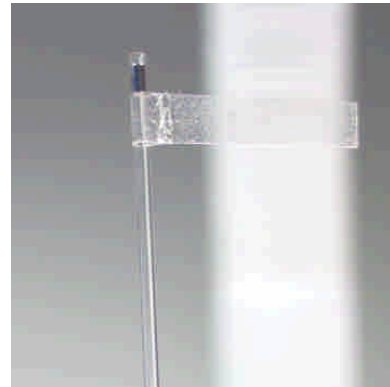
見果實爆破後玻璃管內之水面上升，即內壓小於外壓之意

5、實驗二之五—測定果實內氣壓

未見水銀移動



實驗前



實驗後

6、實驗二之六—測定果實內氣壓

見水銀移動 2.7cm



實驗前



實驗後



水銀原本位置 (黑點處，右) 與
果實破裂後之位置 (左)



實驗前後水銀移動之距離

7、實驗二之七一測定果實內氣壓

未見水銀移動



實驗前



實驗後

(五)、討論

1、實驗二之一一測定果實內氣壓

由於量筒管徑太小，水的毛細作用強，且果實易沾黏於量筒避而使刻度不易讀取，故需改良實驗方法。

2、實驗二之二一測定果實內氣壓

在酒精中將果實弄破時果實內之氣泡上升十分緩慢，且實驗進行一段時間後發現酒精開始混濁。猜測酒精會與果實反應而造成誤差，故需改良實驗方法。

3、實驗二之三一測定果實內氣壓

又果實的體積僅約 0.4ml，推測變化量在 0.1ml 之內，而量筒之刻度一格即為 0.2ml；故若有體積變化亦會極不明顯，故需改良實驗方法。

4、實驗二之四一測定果實內氣壓

玻璃管之管徑甚細，往往與外界所造成之水面差為毛細作用而非壓力所造成，又沿著插於玻璃管內之鐵絲（用於攪破果實）有毛細作用而使水面升降，故誤差大而無法確定所見之現象是否證明內壓小於（或大於）外壓，故需改良實驗方法。

5、實驗二之五一測定果實內氣壓

毛細管極細，致使錐形瓶上之孔十分難鑽，推測在鑽孔的過程使孔非完全與毛細管契合，故可能漏氣；錐形瓶塞與錐形瓶的接合處亦可能漏氣而使實驗結果錯誤，故需改良實驗方法。

6、實驗二之六一測定果實內氣壓

查此實驗前後相異之原因可能為上下晃動導致水銀移動，故需改良實驗方式。

7、實驗二之七一測定果實內氣壓

水銀不移動，知鳳仙花果實之物理機制非由內外壓力差造成。

三、第三階段

(一)、觀察

- 果實皮束在前端其內捲傾向較後端小，若折之使與後端分離則幾乎不捲，而後端則捲得十分厲害

- 果實皮束側面間張力甚強

(二)、假設：靜力平衡模型

五片果實皮束後端有內捲的力，而其前端抵在一起互相撐住，以膜（側面張力）為其作最後支撐。一旦膜被破壞則平衡破壞而使皮束內捲。

(三)、實驗方法

1、實驗三之一—模型製作

- 實驗目的：證明模型二
- 實驗原理：若模型有相同性質，即可確定力平衡為可能原因
- 實驗做法：取皮球一，將其剪開成多束如〈圖二十一〉，但底端先預留不剪；在每束底端以快乾黏上有彈性鋼片如〈圖二十〉，前端黏貼鐵片以固定



〈圖二十〉



〈圖二十一〉

2、實驗三之二—模型製作

- 實驗目的：證明模型二；並改良實驗三之一
- 實驗原理：選用具彈性物質（熱塑性塑膠條如〈圖二十二〉），易剪裁，且其內捲之力較小而不至於影響側面強度甚鉅



〈圖二十二〉



〈圖二十三〉

- 實驗做法：使用與實驗二之一相同之做法，但在底端黏貼之物改為可塑性塑膠條（用熱水調到想要的曲度）

3、實驗三之三—模型製作

- 實驗目的：證明模型二，並改良實驗三之二
- 實驗原理：以事實而言彈開後果實相連部位非前兩個實驗所

做的底端部分，而是中間靠尾端。又上一個實驗中果實靠尾端之曲度不足，改良之

- 實驗做法：取皮球一，以量角器輔助將其分割為六束並剪開。切割長度足夠之熱塑性塑膠條，捲成想要的曲度，放進熱水中使維持改變之形狀如〈圖二十四〉。將熱塑性塑膠條貼在皮球內側，最後取一完全平直之熱塑性塑膠條，將皮束黏於其上如〈圖二十五〉



〈圖二十四〉



〈圖二十五〉

4、實驗三之四—測量果實側面張力

- 實驗目的：證明果實的側面間確實有強大的張力
- 實驗原理：夾住果實的兩塊皮束，固定其一端，以彈簧秤鉤住其另一端，以測量果實皮束側面破裂時所需的力
- 實驗做法：取爆開後的果實、衣夾兩只、彈簧秤一只
- 1、用衣夾分別夾住兩塊果實皮束，固定其中一個衣夾
- 2、以彈簧秤鉤住另一個衣夾
- 3、拉彈簧秤，直至兩塊果實皮束分離
- 4、讀取分離瞬間彈簧秤上所顯示的刻度

5、實驗三之五—測量果實側面張力

- 實驗目的：證明果實的側面確實有強大的張力
 - 實驗原理：同實驗三之四
 - 實驗做法：取爆開後的果實、鑷子、小型夾資料用夾子一只、另外的夾子一只、彈簧秤一只
 - 1、用鑷子鑷住小型夾資料用夾子尾端，使保持一定程度張開
 - 2、以另外的夾子夾住鑷子靠小型夾資料用夾子端，以維持鑷子的位置；如此移動另外的夾子即可調整鑷子的張合度，進而改變小型夾資料用夾子的開口大小
 - 3、將一塊仍然與其他塊連著的果實皮束塞入小型夾資料用夾子之開口（因皮束有彈性，故可塞入），用手固定住露出的其他塊皮束
 - 4、以彈簧秤鉤住鑷子尾端，拉彈簧秤
 - 5、讀取兩塊果實皮束分離瞬間彈簧秤上刻度
- #### 6、實驗三之六—測量果實側面張力

- 實驗目的：證明果實的側面確實有強大的張力
 - 實驗原理：以墊片黏住果實、再以夾子夾住墊片並同上處理
 - 實驗做法：取墊板一大塊、爆開的果實皮束、快乾、彈簧秤
- 1、剪四塊與果實寬度大略同寬（0.5mm）的墊片
 - 2、用快乾小心將果實皮束（兩束）黏於墊片上（圖十九），分成兩邊黏，但左邊的墊片不可以黏到右邊的皮束上
 - 3、用小型夾資料用夾子夾住兩端墊片
 - 4、固定一邊的夾子，用彈簧秤鉤住另一邊夾子的尾端
 - 5、拉彈簧秤，讀取果實皮束分離瞬間刻度



7、實驗三之七一測量果實皮束之 k 值

- 實驗目的：求出果實皮數彈力之 k 值
- 實驗原理： $\tau = k\theta$ ，求出拉開皮束之力矩 τ 與當時與法線所偏折之角度 θ ，即可求知 k
- 實驗做法：取爆開的果實皮束、快乾、360°量角器、彈簧秤、小型夾資料用夾子、鑷子

- 1、取一條爆開的果實皮束，以墊片粘住兩端
- 2、將 360°量角器固定於桌緣，並在桌子下方固定住鑷子，鑷子尖端對準 360°量角器之軸心
- 3、將果實皮束懸掛於鑷子上
- 4、用小型夾資料用夾子夾住其中一邊的墊片，以彈簧秤拉之
- 5、讀取彈簧秤在各個讀數時果實皮數偏轉角度對應到 360°量角器之 θ

8、實驗三之八—測量固定果實頂端張角下其側面張力 T 及皮束 k 值

- 實驗目的：由於每個果實之間張力、皮束 k 值不盡相同，估計與其頂端張角有關，因此計算時不能以平均代入，此舉在於標準化果實頂端張角與側面張力 T 及皮束 k 值之關係
 - 實驗原理：果實的張角為一百八十度扣掉其頂端切線與果皮延伸方向的夾角之兩倍
 - 實驗作法：取數位相機、腳架、墊板一大塊、爆開的果實皮束、快乾、360°量角器、彈簧秤、小型夾資料用夾子、鑷子
- 1、將所有未爆開果實放在長條型 A4 紙上，編號

2、架好腳架，使用數位近拍，替所有果實拍照

3、對每個果實重覆時驗三之六、三之七，紀錄結果

(四)、研究結果

1、實驗三之一—模型製作

由於鋼片力道太強，使側面的力顯得相當弱而不符事實

2、實驗三之二—模型製作

曲成一球狀如〈圖二十三〉

3、實驗三之三—模型製作

可保持一球形，且能彈開如〈圖二十六〉



〈圖二十六〉

4、實驗三之四—測量果實側面張力

以左邊衣夾夾住兩塊皮束、右邊衣夾夾住另外兩塊皮束，破裂時彈簧秤顯示讀數 100g；但破裂時由左邊衣夾中第一塊皮束與第二塊皮束間斷裂，非由兩衣夾中間的皮束接縫斷裂

5、實驗三之五—測量果實側面張力

由於小型夾資料用夾子之開口無法任意給予大程度的改變，故在果實皮束之間破裂前，果實皮束即由小型夾資料用夾子中滑出而無法順利讀取到刻度

6、實驗三之六—測量果實側面張力

測得五組數據如下表：

組別	第一組	第二組	第三組	第四組	第五組
所需之力	110g	60g	85g	60g	45g

7、實驗三之七—測量果實皮束之 k 值

測得五組數據如下表：

組別	第一組	第二組	第三組	第四組	第五組
彈簧秤讀數(g)	5g	7.5g	12.5g	25g	35g
偏轉之角度 θ	25°	30°	35°	40°	50°

8、實驗三之八—測量固定果實頂端張角下其側面張力 T 及皮束 k 值

測得數據如下表：

組別	第一組	第二組	第三組
張角	129.12°	131.20°	124.12°
側面張力 T	35g	20g	50g
皮束 k 值	————	————	————
組別	第四組	第五組	第六組
張角	130.38°	118.93°	120.28°
側面張力 T	45g	70g	40g
皮束 k 值	————	————	————

(五)、討論

1、實驗三之一—模型製作

鋼片之力道太強，使實驗難以進行，故需改良實驗方法

2、實驗三之二—模型製作

球狀模型底端部分曲度不足，又上端無法完全密合，故需改良實驗方法

3、實驗三之三—模型製作

因熱塑性塑膠條易變形，凡施外力於其上即難保持原本形狀，故無法非常像鳳仙花

4、實驗三之四—測量果實側面張力

因衣夾的夾力太大，常使果實皮束在實驗完成前即破裂，而影響連接兩塊果實皮束之膜而使實驗可信度降低；又皮束太小，以衣夾難以只夾住一塊皮束，而斷裂之皮束接縫非於衣夾中間，此或造成誤差，故需改良實驗方法

5、實驗三之五—測量果實側面張力

因無法任意的調整小型夾資料用夾子的開口大小，難以維持一剛好的力以將果實皮束夾住但不夾壞，故無法順利量得兩塊果實皮束分離瞬間的力，需改良實驗方法

6、實驗三之六—測量果實側面張力

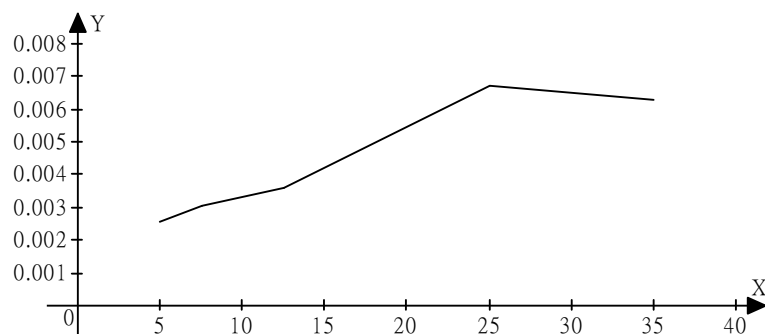
測得鳳仙花本身葉子的表面張力（取一條，寬 0.5mm，約與果實皮束之寬度相同）約 70g，故果實皮束之側面張力並非異常於本身其他組織

7、實驗三之七—測量果實皮束之 k 值

由測得數據求 $\tau = k\theta$ 之 k 值：

組別	第一組	第二組	第三組	第四組	第五組
k(Nt • m)	2.544*10 ⁻³	3.039*10 ⁻³	3.593*10 ⁻³	6.721*10 ⁻³	6.316*10 ⁻³

試繪圖：



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alentum.com/agr>

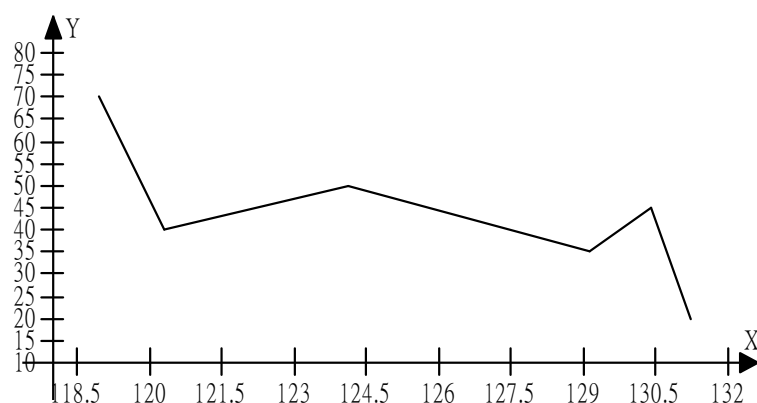
討論此五組數據：5g、25g、35g 組最先測量，因果實皮束隨時間之過去其彈性漸減，故越先測量者越為準確。又 25g 組與 35g 組相差極為接近，有可能是誤差造成之緣故。

又由 $\frac{1}{2}k\theta^2$ 知每片果實皮束所貯藏之能量約為 $1.638 \times 10^{-3} \text{ J}$ 。若一顆果實為 0.35g，則由 $\frac{1}{2}k\theta^2 = \frac{1}{2}mV^2$ ，得果實爆開時速率約為 20.52 m/s。

由於實驗將果實皮束以快乾固定，亦有可能改變其本身性質，而造成低估。實驗中數據高者有意義，故概算時取之。又施以 40g 以上之力時果實皮束斷裂而無法繼續實驗，故若欲求果實皮束伸開至 90° 以上之力時，以 k 值推之。

8、實驗三之八——測量固定果實頂端張角下其側面張力 T 及皮束 k 值

試將所得數據繪圖如下：



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alentum.com/agr>

所得數據僅六組，太少，因此畫出來的圖曲折看不出明顯趨勢。

又，由於花季未至，所得材料質量均不佳，降低實驗可信度。由上述數據中可見，皮束之 k 值均未求得，此乃因實驗三之七原本

就甚難進行，加上器材精確度不佳，以及上述的快乾會改變果實皮束性質等原因，均未求得可信之數據。需改良實驗方法。

伍、討論及應用

一、綜合討論

（一）第一階段：

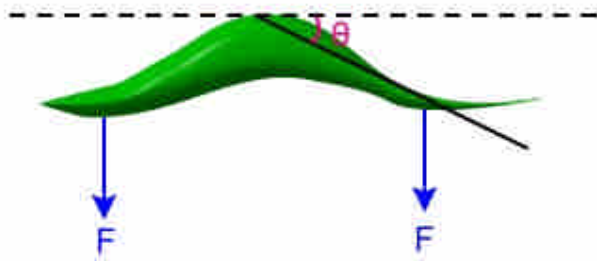
果實非完全由雙面尺模型構成。

（二）第二階段：

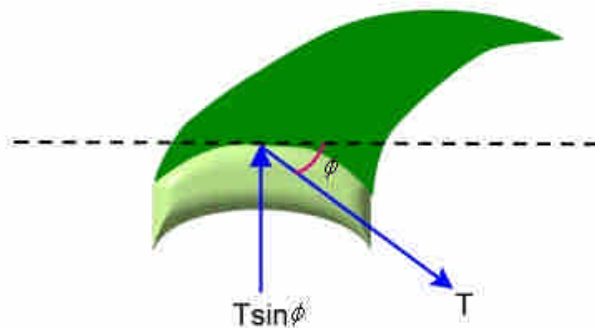
果實非藉內外壓力差達成其平衡。

（三）第三階段：

果實共有五片皮束，故其圓心角為 72° ，而皮束的橫切面為一弧形，與弧形頂端作切線之夾角為 36° （下圖二十八之角 ϕ ）。上述實驗中知果實之側面張力 $T=100g$ ，其垂直於果實皮束表面之分力 $T \sin \phi$ 約為 $58.78g$ 。果實皮束成熟時期偏折之（下圖二十七之角 θ 之二倍角之補角，即 $180^\circ - 2\theta$ ）角度約為 120° ，由上述實驗中求得之 k 值可推算維持此角度需 $F=57.46g$ 之力。又 $57.46g$ 略小於 $58.78g$ ，今若擠壓果實使 ϕ 角略為改變（變小），則側面張力於垂直果實皮束表面之分力稍微降低，使小於果實皮束維持偏折 120° 所需之力，而平衡被破壞則果實皮束捲起。



<圖二十七>



<圖二十八>

但此方面討論尚未標準化，在花季開始之後方可繼續這部份的實驗與討論。

二、未來研究方向

(一)、確立鳳仙花果實物理機制的模型

此研究報告中所提出之證據不足以證明鳳仙花果實之物理機制即為以上所描述，故務必做到以下幾點方可證明。

- 1、以實驗三之八中的方式，標準化果實的張角與其側面張力以及皮束 k 值的關係，並以統計的方式證明模型的可信度。
- 2、使用所得的數據，應用電腦軟體模擬出鳳仙花果實的實際狀況，並試圖證明鳳仙花果實目前的形狀乃其欲達成此機制之最佳形狀。
- 3、根據以上資料，製作一精緻模型，可確實模擬鳳仙花果實爆開之狀況。

(二)、從鳳仙花果實機制之模型預測其散播種子能力

既已知鳳仙花果實機制之模型，可從此處擴展，推知鳳仙花果實如何將種子彈出，又彈出的範圍為何。並研究族群的生長環境及個體發育情形與散播種子能力之關係。

(三)、討論造成鳳仙花果實物理機制的生物機能

根據筆者對鳳仙花果實最基本的觀察，此項生物機制似乎與水的膨壓有關，可舉兩例說明此猜測。一，鳳仙花果實置放約一天左右，其內水分蒸乾，果實萎軟、機制消失。二，以打火機烘乾之，果實之機制立即消失。筆者另在實驗期間發現一有趣之現象，紀錄於第一階段觀察的第三點，即將果實置入液體，過約兩小時果實爆開；猜測與其生物機能有關。此階段需找出鳳仙花以什麼樣的生物機能造成了此種可能性。

陸、結論

- 一、鳳仙花果實非完全由類似雙面尺性質構成
- 二、鳳仙花果實之平衡非以內外壓力差達成
- 三、鳳仙花果實之面與面間有強度，以抵抗底端向內捲之力，而完成其平衡
- 四、鳳仙花果實皮束之 k 值隨偏轉角度變大而增加
- 五、鳳仙花果實皮束所貯存能量可供彈開時達到 10m/s 以上之速度
- 六、鳳仙花果實之平衡乃由靜力平衡達成

柒、附錄

一、如何測知錐形瓶是否漏氣

做法：

- 1、架設好裝置（但可不必置入果實）
- 2、以手溫之，改變其內部空氣溫度
- 3、若水銀有上下移動之現象即知裝置並未漏氣

原理：

根據 $PV=nRT$ ，當壓力固定（容器內之壓力恆等於外壓）且莫耳數一定

(容器內之氣體莫耳數不變)時，若溫度改變則體積改變，又毛細管體積遠小於錐形瓶，故水銀上下移動之情形應十分明顯

二、空白實驗

做法：

- 1、架設好裝置 (不置入果實)
- 2、上下晃動錐形瓶，見水銀有可能隨之移動
- 左右晃動錐形瓶，見水銀不隨之移動