

2012 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：140002

作品名稱

不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析

得獎獎項

大會獎：四等獎

作者姓名：蔡亞婷

就讀學校：國立中科實驗高級中學

指導教師：胡裕仁、蔡明致

關鍵字：上反角、俯仰角、圓錐角

作者簡介



我是蔡亞婷，目前就讀國立中科實驗高中二年級。從小在爸爸實驗室下的耳濡目染，造就我對於科學與自然的現象都會特別的有興趣。每當我們家出去爬山或是逛花市時，爸爸都會用心教導並回答我們因為好奇問的問題，而那些問題，如今都在國高中派上了用場，也讓我對於科學研究更加有了興趣。在高一時，我進入了中研院參加培訓，也因為學校尤其注重科學方面的研究與探討，因此我也進一步地接觸各種科學競賽。

高二，我參加了科教館青少年培育計畫，進入大學實驗室完成了我的實驗計畫，為了紮實實驗的數據與理論，我花了不少時間，其中也找許多大學教授解惑與借用設備儀器，整個過程中最重要的還是家人的支持和老師的幫忙，而終於有了現在的成果！

不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析

摘要

大葉桃花心木的種子是單翅種子，經測試發現它的結構有降低終端速度及飄移過程具方向性提高種子分佈間距的特性，研究結果顯示：

1. 飛行軌跡可分成五個時期：自由落體期、減速期、緩飛期、加速期及終端速度期。
2. 種子旋轉飛行軌跡的前進比(advance ratio)屬於推進效率 <1 的滯空旋轉型態。
3. 種子翼面有上反角可因白努利現象造成下壓力，提供水平飄移位移及產生公轉，增加種子之飄移間距。
4. 種子載重位置可提供旋轉過程的圓錐角，翼面展長一端有肋痕重量，提供旋轉過程的俯仰角。對飛行過程升阻力的影響：俯仰角 $>$ 圓錐角。
5. 種子翼面有截角可減少抗力矩，比較容易啟動旋轉飛行。
6. 遠距自由墜落之過程，載重量越大偏移距離及公轉半徑越遠。

本次成果是藉由單翅種子的簡易飛行模式，在材料、結構及應用上，比雙翅及螺旋更簡易且方便，適合設計為滯空載具。

Flight path analysis on the winged seeds of *Honduras mahogany*

Abstract

The seed of the Honduras mahogany (*Swietenia macrophylla*) tree consists of a pod capsule connected to a single wing. The structure of the seed of this particular species is interesting due to its ability reduce its terminal flight velocity and increase its drift distance, thus enabling the wind to carry its fruit farther than that of most other plant species. This characteristic, along with the simple make and build of the mahogany's lightweight, fibrous wing, makes the seed a viable model to recreate in applications of agriculture or field botany.

In this study, we aim to find the relevant parameters of the single-winged seeds that will enable us to recreate its flying pattern. We used materials such as wind tunnels and high-speed cameras capable of shooting 500 frames per second to analyze a sample of mahogany seeds collected from our school. We also applied the relevant principles of fluid dynamics to design a single-winged seed model in order to increase our model's flight time and sowing distance. We analyzed the seed's physical attributes in the following order: (1) the structure and trajectory, (2) the advance ratio (the ratio between the distance the wing moves through the air during one revolution and the diameter of the wing), (3) the lift force of the structure versus its pitching and coning angle, (4) its lodge versus terminal velocity, and (5) the cut-off angle in the wing.

We concluded that the flight path of the seed can be divided into five periods: free-fall, slow down, slow flight, increasing velocity, and terminal velocity periods. We also concluded that the advance ratio of the seed is of low advance ratio type ($e < 1$). In addition, the lodge position and the weight of the rib mark can influence the coning angle of the seed and path of the flight trajectory. We also found that the pitching angle has more effect than the coning angle on the lift and drag force of the seed in flight. Last but not least, we concluded that a higher cut-off angle can increase the rotational velocity (8.06Hz) necessary to help the seed to fly, and when dropped from a great height, the weight of the seed's lodge is proportionally related to how far the seed drifts from its parent tree.

Finally, we obtained the necessary parameters to build our own flight model. By using easy-to-obtain, inexpensive materials, we can develop useful tools to disperse seeds, remote sensors, or other materials in an economic and efficient way.

一、前言

大葉桃花心木的種子，是單翅種子，下墜過程之飛行軌跡屬於單翅旋轉飛行。經測試發現它的結構有降低終端速度及以及飄移過程具方向性提高種子分佈間距的特性，在材料、結構及應用上，比雙翅及螺旋更簡易且方便，適合設計為滯空載具。滕菟婷等(2010)分析有翅種子的旋轉飛行過程，旋轉過程對於升力的影響，包含翅的圓錐角(coning angle)及俯仰角(pitching angle)會影響種子旋轉飛行。圓錐角主要造成風阻面積，俯仰角主要造成切風角度使種子自轉及提供升力。本研究追蹤大葉桃花心木種子的飛行軌跡，並進行影響單翅種子下墜過程終端速度與飄移間距的結構因子分析與測量，希望完成單翼滯空載具的結構參數，提供農委會的坍塌地空播造林(林務局，2000)技術之改進，以及提供氣象局滯空遙測載具之研發參考。

二、研究方法或過程

(一)研究方法：我們設計以下流程進行研究(如表一)，研究架構如圖 1. 所列：

1. 種子結構分析：取 100 片成熟種子，進行各項結構之測量，並取其平均值。藉以了解造成單翅種子旋轉飛行的升力來源與結構參數。
2. 飛行軌跡分析：以高速攝影機架接標準鏡頭，進行幀率 500 frame/s 的拍攝，並以 tracker 軌跡追蹤軟體，追蹤大葉桃花心木種子自由落下過程的飛行軌跡，分析種子結構與飛行軌跡之間的關聯性。
3. 風洞力學分析：在風洞固定風速的情況下，測量不同的圓錐角與俯仰角對風阻與升力的影響，藉以了解造成單翅種子旋轉飛行的升力來源與結構參數的影響情形。
4. 載重空拋測試：以四倍及十倍載重量，進行空拋高度對飄移距離的影響，藉以測試造成飄移的原因及其影響程度。

表一、研究流程			
種子結構分析	飛行軌跡分析	圓錐角俯仰角風洞力學分析	載重空拋測試
測量種子結構	高速攝影	升力、推力測量	飄移距離測量

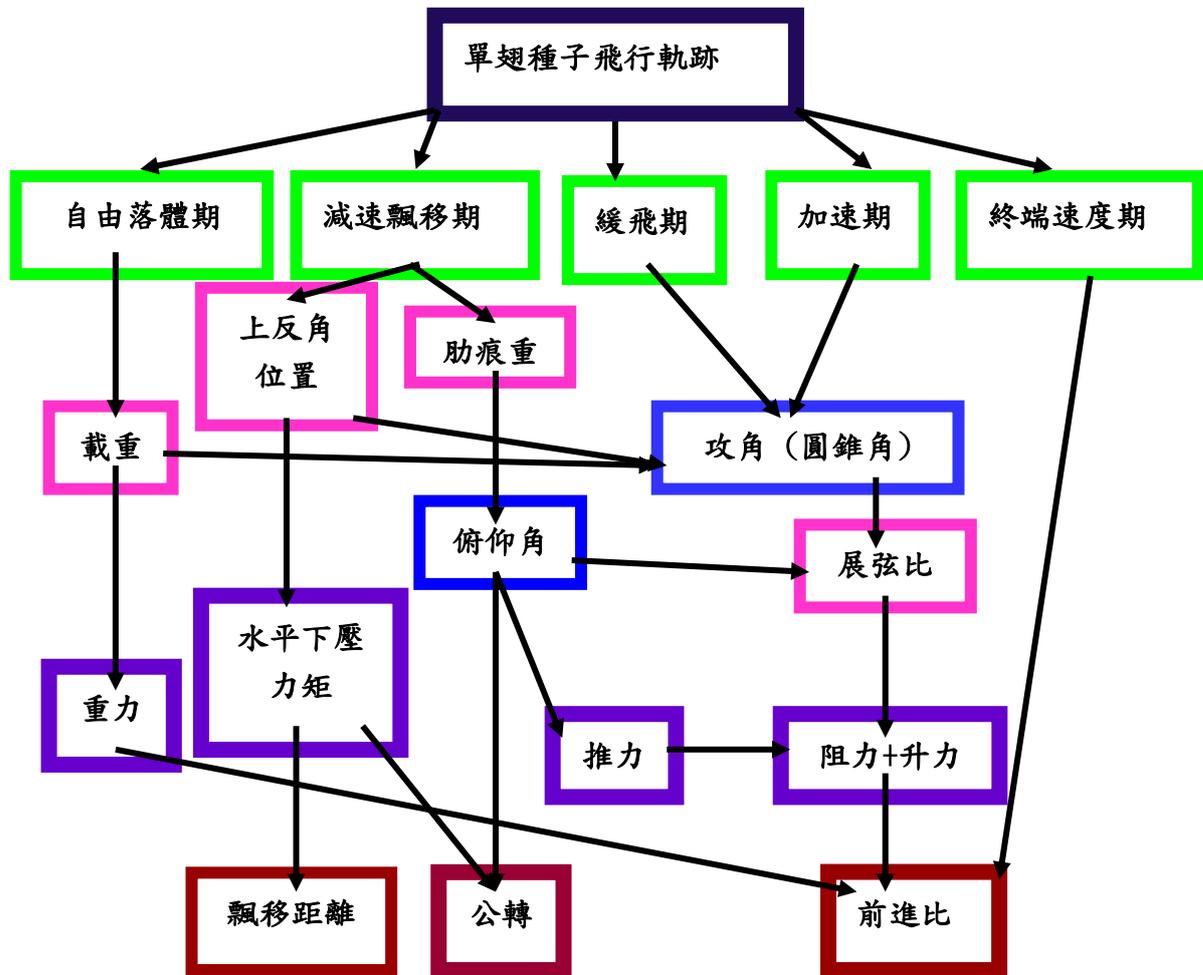


圖 1.研究架構

(二)實驗器材：

成熟大葉桃花心木種子、五吋風扇(50W)、自製吸管風洞、漆包線(0.025g/cm)、#22 鐵絲、護貝透明片、#1 打字紙、量角器、方格紙、10M 捲尺、美工刀、掌上型風速計(型號 LM81AM)、電子秤(Jadever 型號 LPWN3075)、高速攝影機(IDT X-stream 型號 XS-4)、軌跡追蹤軟體(tracker)、捲尺、座標方格、壓克力箱。

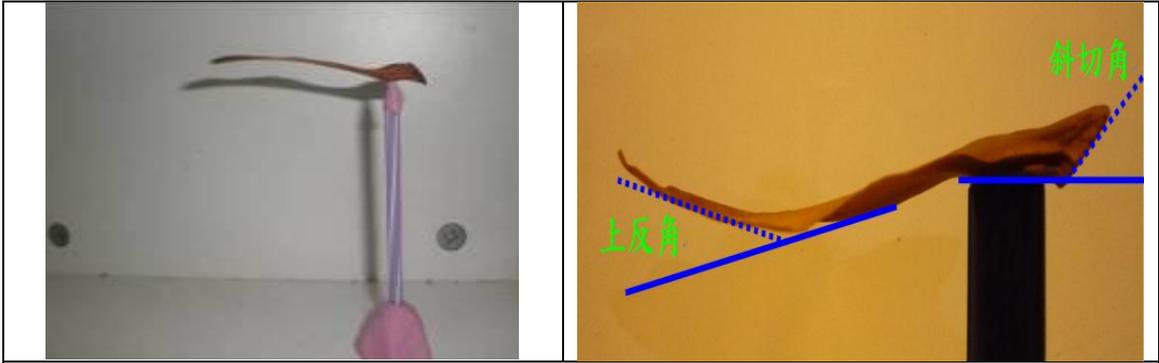


圖 2.種子結構分析



圖 3.高速攝影機
(IDT X-stream 型號 XS-4)



圖 4.影像處理軟體
(MotionPro X studio)

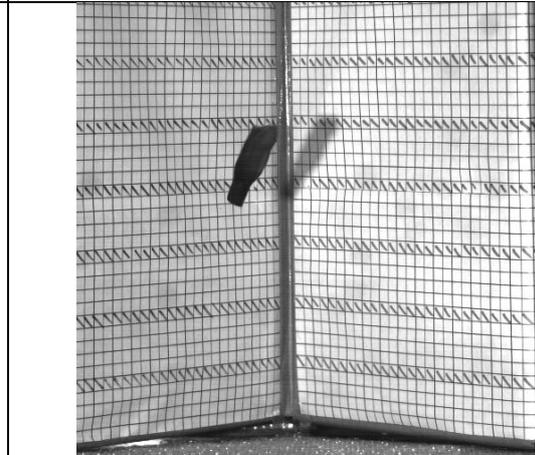


圖 5.高速攝影機之軌跡分析



圖 6.風洞測試圓錐角及俯仰角之力學分析

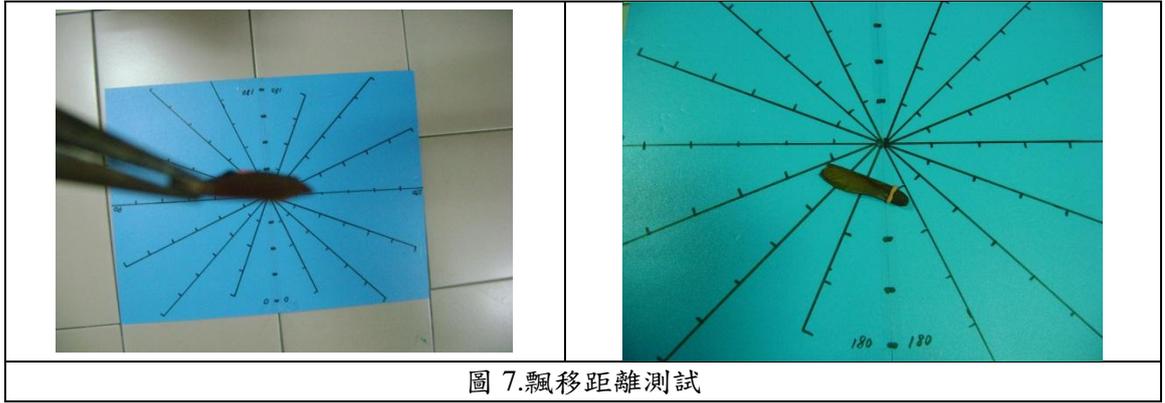


圖 7.飄移距離測試

三、研究結果與討論

(一)大葉桃花心木種子造成「旋轉飛行」的構造分析

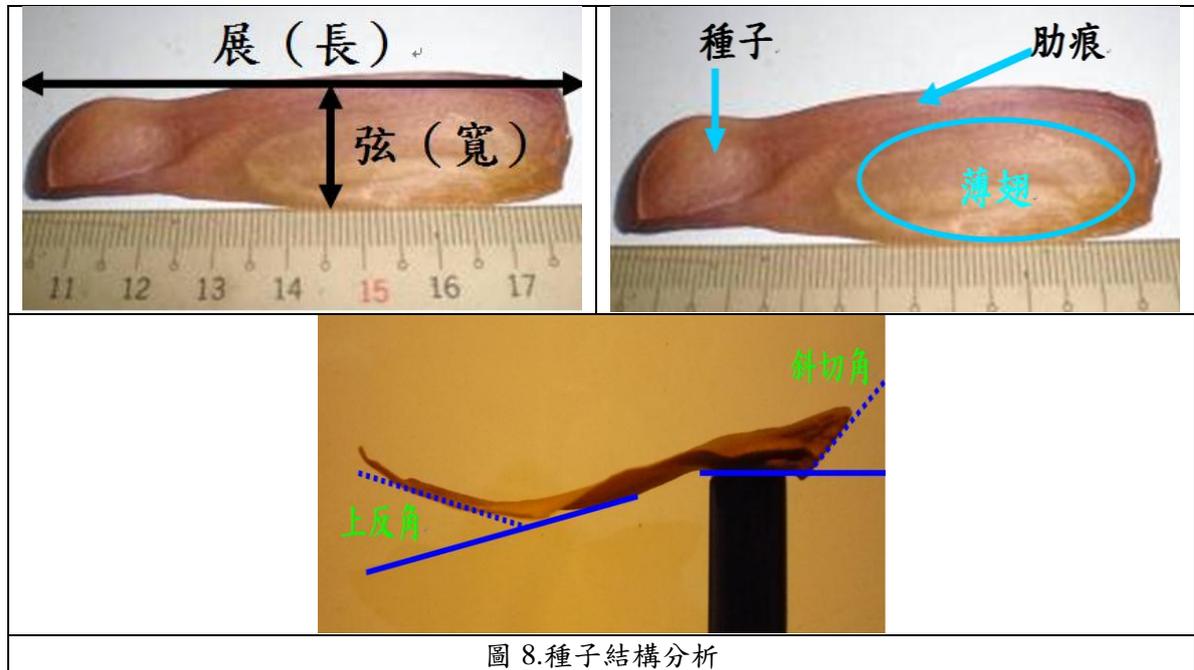


圖 8.種子結構分析

表 2.大葉桃花心木種子結構量測結果

	總重量	整體長度	展重心位置	弦重心位置	翅長(展)	翅寬(弦)	翅重	種子重	肋痕重
平均	0.51	7.73	1.65	0.82	6.23	1.82	0.03	0.31	0.03

測量大葉桃花心木種子與旋轉飛行相關的構造：

- 1.展弦比約為 3.4。
- 2.翼面彎曲，有上反角。
- 3.種子重量約為翼面重量的十倍，使重心約在展長四分之一處。
- 4.翼面一端有肋痕，使重心約在弦長四分之一處。

依測量結果推測與旋轉飛行結構之相關因素有：

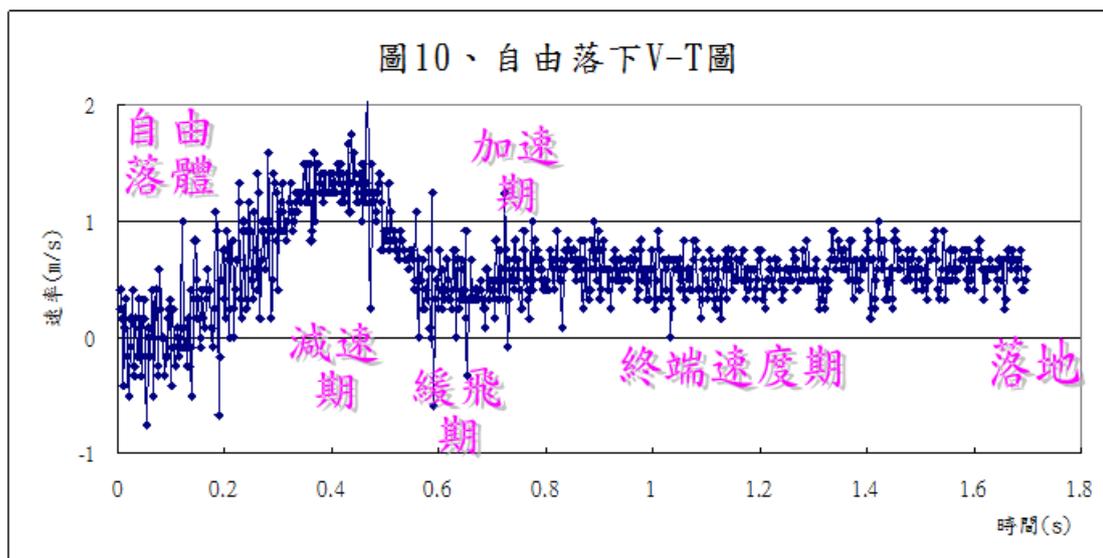
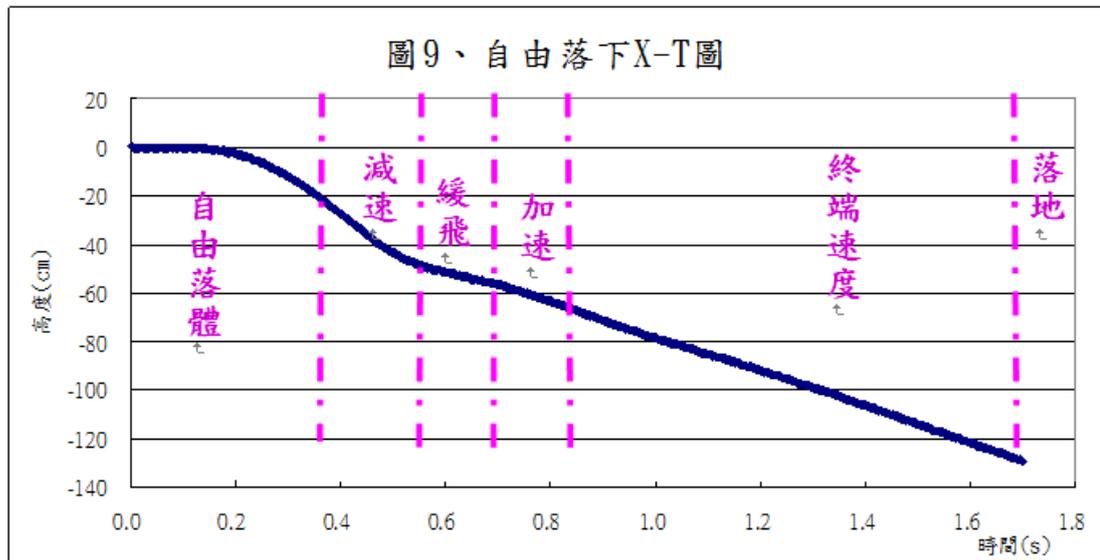
1. 展弦比與受風時白努利現象所產生之升力相關。在相同風速與攻角的狀況下，展弦比越大升力越大。
2. 翼面彎曲的上反角會在受風時因白努利原理產生下壓力，推測此下壓力會產生

使翼面由鉛直運動轉為水平運動的旋轉力矩。

3. **種子的重量**提供下墜時之重力，會產生相對的風速，影響白努利現象所產生之壓力差。此時重心位置會影響順時力矩與逆時力矩的大小，進而造成種子的旋轉，影響種子下墜時的運動狀態。
4. 因為**翼面的肋痕**比薄翼部分厚，所以推測肋痕可造成翼面上下氣流的流速差，並且因**肋痕重量**使重心前移，所以下墜過程使翼面向前傾斜產生俯仰角，因此使翼面受相對風力的衝量而進行旋轉。

(二)種子自由落下運動軌跡與運動速率之分析

經高速攝影(500f/s)及 tracker 軟體的追蹤分析種子的運動軌跡，飛行過程 X-T 圖及 V-T 圖如下：



測量結果：最大相對風速 1.5m/s，終端速度約為 0.58m/s 轉速為 8.06Hz，緩飛期速度約為 0.33m/s。自由下墜 129cm 耗時 1.698 秒，共轉動 14 圈。

根據影片的軌跡分析：

1. 軌跡分為五個時期：由圖 10.種子的自由落下 V-T 圖可將飛行軌跡分為：自由落體期、減速期、緩飛期、加速期及終端速度期。

2. 減速期的水平飄移速率較大：由於減速期的開始，是因為翼面的上反角因下墜過程之相對風力造成白努利現象，進而產生下壓力矩，使種子由鉛直下墜狀態轉為水平旋轉下墜狀態，轉動過程增加受風面積而開始減速，同時由於翼面產生圓錐角的傾斜角度，使下壓力在水平方向產生水平移動的分力(如圖 11.)，進而開始產生水平位移的初速度。

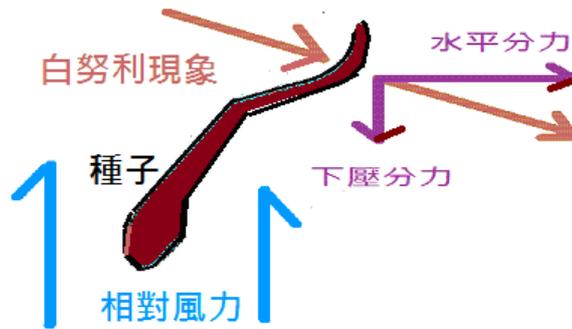
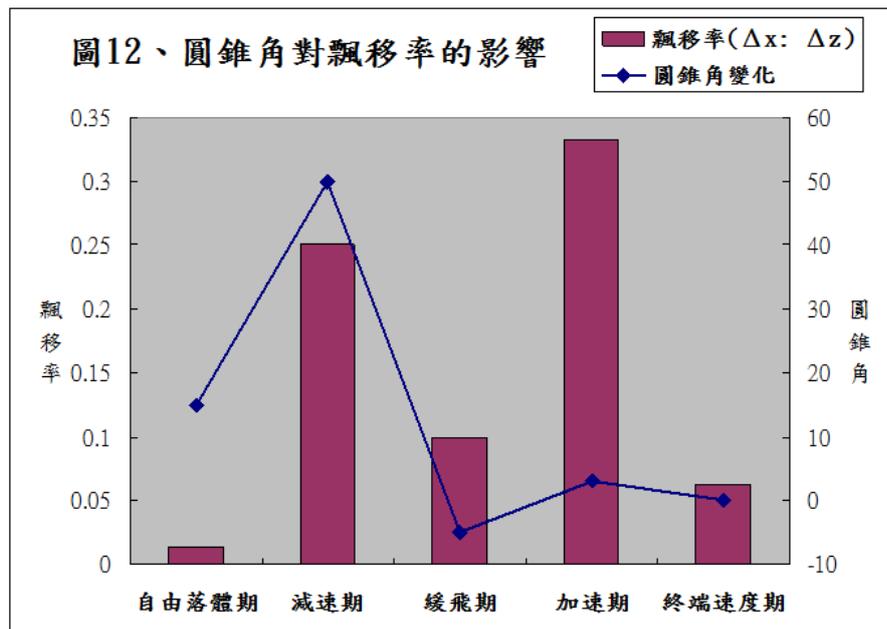


圖 11.上反角因白努利現象所造成的水平分力

根據高速攝影分析，各個時期的飄移率(Δx 水平: Δz 下墜)如下。



由圖 12.可知：飄移率增大時，都在圓錐角變小，且風速較大時發生，推測是因為種子下墜時的相對風力提供自轉的角動量(如圖 11.)，而上反角所產生的氣流壓力差(下壓力)則可提供 X 軸的位移初速度，或是風速較大時，下壓力提供垂直於自轉角動量的公轉角動量(如圖 12.)。也就是有上反角的翼面，在水平風力變大時可產生較大下壓力，此時自轉角動量若隨圓錐角變小而傾斜，則下壓力將使自轉角動

量產生公轉。(如圖 13)

3. 緩飛期的形成：根據照片(圖 12.)發現種子的圓錐角最接近水平。推測：減速期是翼面上的上反角因白努利原理產生下壓力矩，使種子由鉛直下墜狀態持續轉為水平狀態，轉動過程增加受風面積而使風阻變大，增加阻力及升力而減速。



圖 13. 緩飛期(圖左)加速期(圖中)與終端速度期(圖右)的圓錐角

4. 加速期的形成：推測是因為緩飛期的減速造成相對風速變小，使白努利原理的影響漸少而降低下壓力，種子因而以較大圓錐角而加速下墜飛行。
5. 終端速度期：在重力與升力、推力與拉力達成平衡時，種子即就能穩定地以終端速度旋轉降落。
6. 公轉的形成：推測是因為從減速期開始上反角所形成的下壓力在圓錐角與俯仰角的傾斜狀況下，以螺旋面(Helicoid)軌跡下墜，提供垂直於自轉角動量的力矩，因而形成公轉的角動量(如圖 15.)。

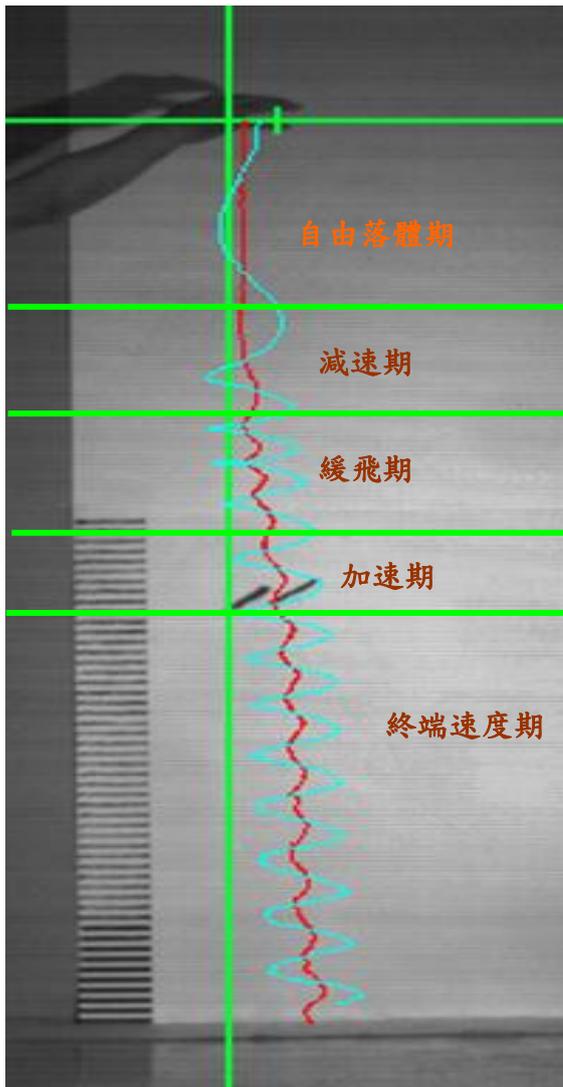


圖 14.大葉桃花心木種子之旋轉飛行軌跡

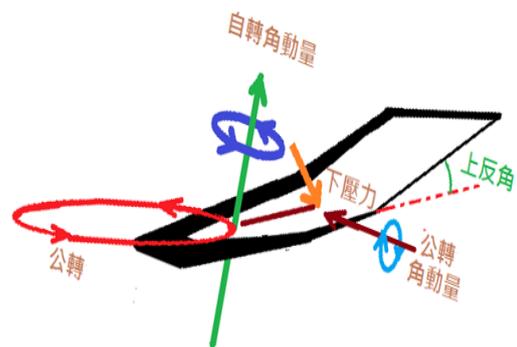


圖 15.自轉與公轉角動量

(三) 種子自由落下運動軌跡之「前進比」類型分析

由於轉動葉片之前進比 $e = v/\omega r$ (v 是前進速度 ω 是角速度 r 是轉動半徑)。一般依照前進比的大小，葉片之軌跡也各自呈現不同種類的擺線軌跡(Harvald, 1983)。將擺線分為 $e < 1$ 的 epicycloid 擺線， $e = 1$ 的 cycloid 擺線， $e > 1$ 的 trochoid 擺線(如圖 13.)。其中葉片轉動與前進的推進效率： $\text{epicycloid} < \text{cycloid} < \text{trochoid}$ 。若將大葉桃花心木種子的轉動過程分為 X 軸及 Y 軸兩個方向的位移，而且 X 軸的座標定為 Y 軸的轉動位移加上 Z 軸的前進位移，則葉片的「轉動-移動座標軌跡」會是一條擺線，藉由擺線的形狀分析，可以了解種子旋轉與滯空的推進效率特性。

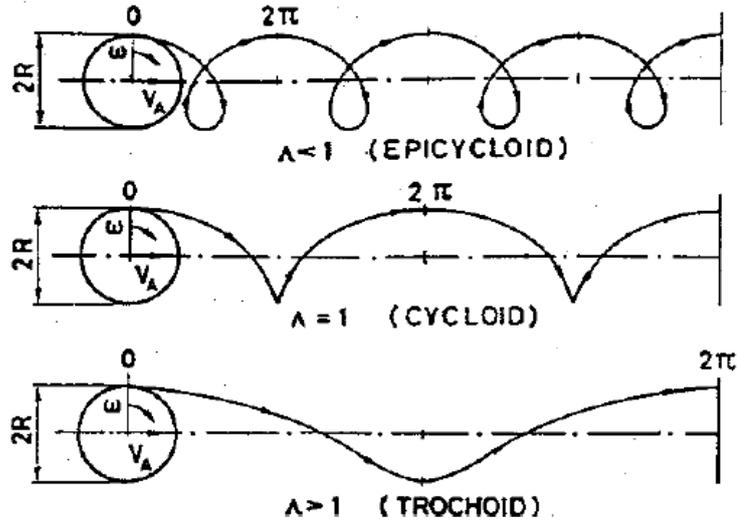
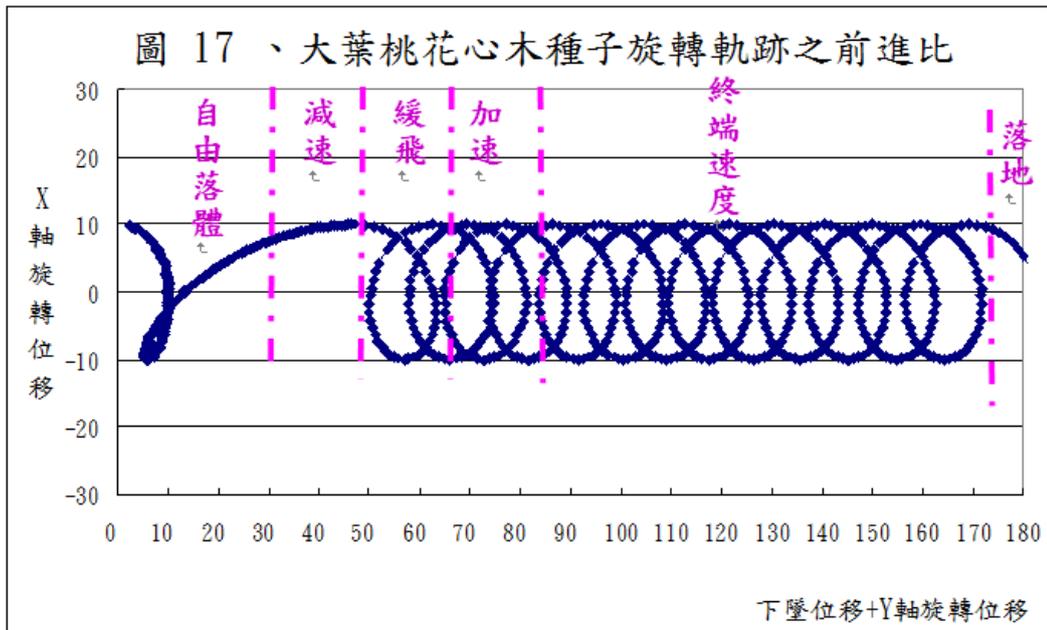


圖 16. 葉片的「前進比擺線」類型(Harvald, 1983)



飛行軌跡之前進比結果分析如下：

1. 大葉桃花心木種子除了自由落體期之軌跡前進比 $e > 1$ 以外(呈現高推進效率的 trochoid 擺線軌跡)，其餘各時期均呈現 $e < 1$ 較低前進效率的 epicycloid 擺線軌跡。
2. 不同載重量的種子(原種子重的1~4倍)以高速攝影分析其軌跡的前進比，結果終端速度期之前進比都是 $e < 1$ (如圖 18)，呈現低推進效率的 epicycloid 擺線軌跡。(如圖 16.)。其中又以載重量在原種子重量 1~2 倍範圍內的軌跡前進比會比較小，根據終端速度時，重力與升阻力相等：

$$mg = \alpha v^2 + \beta v + c \quad (1)$$

(m：質量；g：重力加速度； α ， β ：係數；v：速度；c：常數)

推測，增加載重量也就是提升重力，雖會使下墜的相對風速增加，但是也會提升自轉角動量，

$$L = I \times \omega \quad (2)$$

(L：角動量；I：轉動慣量； ω ：角速度)

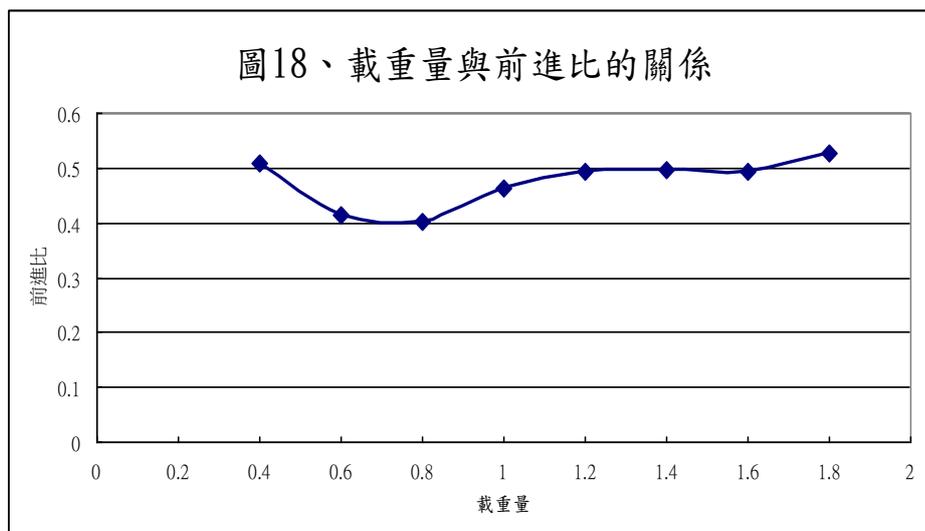
依據流體連續方程式，

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2 \quad (3)$$

(A 流體截面積；V 流速)

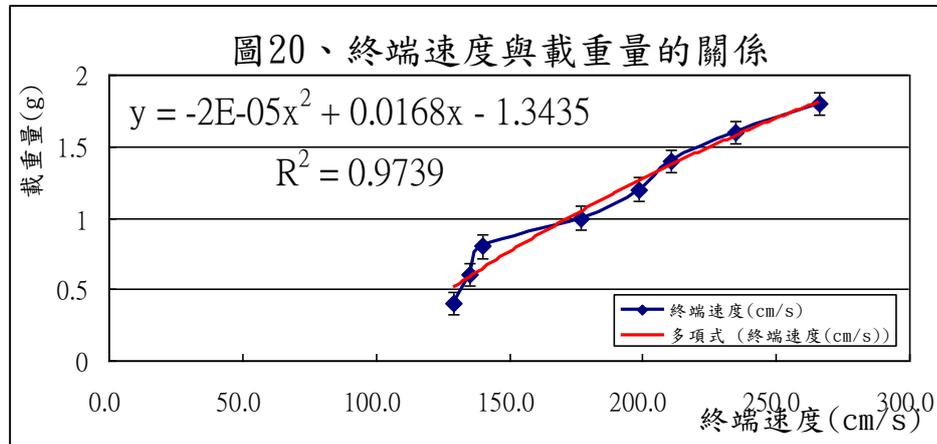
當種子的 ω 越大，風阻面積越大，則流體的截面積 A 會越小，因此通過種子翼面的氣體流速 V 會增加，進而增加白努利原理所造成之氣流壓力差，使升力提升，降低下墜之相對速度，因而使前進比降低。根據圖 18. 終端速度的前進比可知：此大葉桃心木種子最適當的旋轉飛行載重量在 0.6~0.8g。

3. 因此，由前進比大葉桃花心木種子的飛行模式屬於低推進效率的旋轉模式，可以有效降低種子下墜的動能，減少種子墜地時撞擊面的損傷，在設計滯空載具上是值得參考的結構。



(四)種子載重量對終端速度的影響

以高速攝影機拍攝不同載重量的種子自由落下過程，計算其中Z軸之終端速度，實驗結果如下圖：



實驗討論：

1. 考慮終端速度受風阻力及白努利定律的升力影響

$$F = mg - \alpha v^2 - \beta v - c \quad (1)$$

參考 牛頓第二運動定律

$$F = ma = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

達終端速度時

$$M \cdot \frac{dv}{dt} = mg - \alpha v^2 - \beta v - c$$

$$\therefore \text{終端速度} \rightarrow \frac{dv}{dt} = 0$$

$$\therefore 0 = mg - \alpha v^2 - \beta v - c$$

$$\text{則 } mg = \alpha v^2 + \beta v + c \quad (3)$$

(F：受力；m：質量；g：重力加速度； α ， β ：係數；v：速度；t：時間；c：常數)

在實驗結果中，趨勢線方程式為：

$$Y = -0.00002X^2 + 0.0168X - 1.3435 \quad (4)$$

其中 $\beta \gg \alpha$ ，除與(3)方程式符合之外，也顯示當時的風速不大，所以，此一飛行模式終端速度對升阻力的影響，以速度一次方項的影響方式為主。

2. 實驗中將載重量增為4倍，終端速度雖然增為2倍，但是仍然可以旋轉減速落下，所以，在四倍載重量的範圍內，種子均有足夠的升阻力可以避免種子因失速而成為自由落體。

(五)種子圓錐角對升力的影響

由於風力對於翼面會產生正向之衝量，因此在不同的圓錐角(攻角)情況下，翼面所受升阻力應包含氣體的正向力與白努利原理所產生之升力。若翼面面積 A，在不同的圓錐角 θ_c 情況下鉛直受風，產生水平方向之正向力(1)及白努利原理(2)的升力：

$$F_{\perp} = ma = \rho V \cdot a = \rho A y \cdot a = \rho A y \cdot \frac{v}{t} = \rho A \frac{y}{t} \cdot v = \rho A v^2 \quad (1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad (2)$$

當達終端速度時，翼面受風的正向力及升力的鉛直分力與翼面的重力相等(4)，因此

$$mg = (F_{\perp} - F_{//}) \cdot \sin \theta_c \quad (3)$$

$$mg = (\rho v_{\perp}^2 \cdot A - \frac{1}{2} \rho v_{//}^2 \cdot A) \cdot \sin \theta_c \quad (4)$$

其中， $v_{//} = v \cdot \cos \theta_c$ ； $v_{\perp} = v \cdot \sin \theta_c$

則(4)可換成

$$mg = \left[\rho A (v \cdot \sin \theta_c)^2 - \frac{1}{2} \rho A (v \cdot \cos \theta_c)^2 \right] \cdot \sin \theta_c \quad (5)$$

$$\text{則 } mg = \frac{1}{2} \rho A v^2 \left[(\sin^2 \theta_c) - 2 \cos^2 \theta_c \right] \cdot \sin \theta_c$$

$$mg = \frac{1}{2} \rho A v^2 \left[(\sin^2 \theta_c) - 2(1 - \sin^2 \theta_c) \right] \cdot \sin \theta_c$$

$$mg = \frac{1}{2} \rho A v^2 \left[(\sin^2 \theta_c - 2 + 2 \sin^2 \theta_c) \right] \cdot \sin \theta_c$$

$$mg = \frac{1}{2} \rho A v^2 (3 \sin^2 \theta_c - 2) \cdot \sin \theta_c$$

$$mg = \frac{1}{2} \rho A v^2 (3 \sin^3 \theta_c - 2 \sin \theta_c) \quad (6)$$

由上式可知，翼面所受風的升阻力與圓錐角之正弦的三次方成正比。

(P：氣流壓力； ρ ：空氣密度； v ：相對風速； g ：重力加速度； θ_c ：圓錐角； a ：加速度； m ：質量； V ：體積； A ：翼面面積； $v_{//}$ ：翼面平行風速； v_{\perp} ：翼面垂直風速； y ：位移； F ：風力； F_{\perp} ：正向力； $F_{//}$ ：升力)

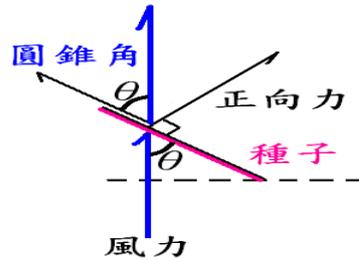
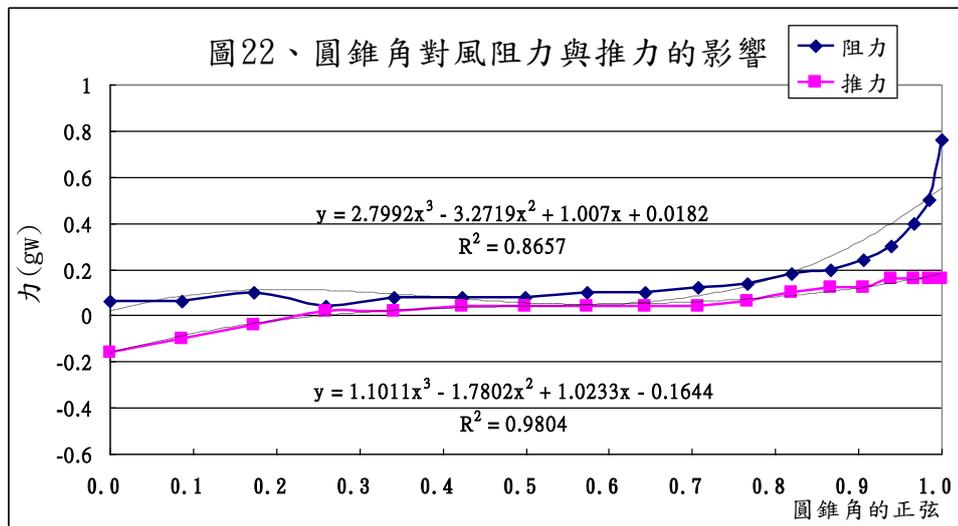


圖 21.圓錐角對於推力的影響



實驗結果：

1. 如圖 22.中之趨勢線與方程式(6)之相符，也就是受風的升阻力與圓錐角之正弦的三次方相關。

趨勢線： $y = 2.8x^3 - 3.3x^2 + x + 0.02$

方程式(6)： $mg = \frac{1}{2}\rho Av^2 (3 \sin^3\theta_c - 2 \sin\theta_c)$

2. 當風速 1.5m/s 時，圓錐角在 90~75 度角之間(水平夾角 25 度以內)，此時的升阻力才會達到種子的載重量(0.5g)以上，因此風洞的測試結果與高速攝影機拍攝到的相對風速相同(最高風速 1.5m/s，圓錐角 63 度)。

(六)種子俯仰角對推力與升力的影響

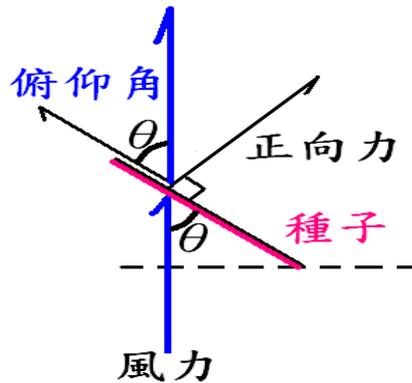
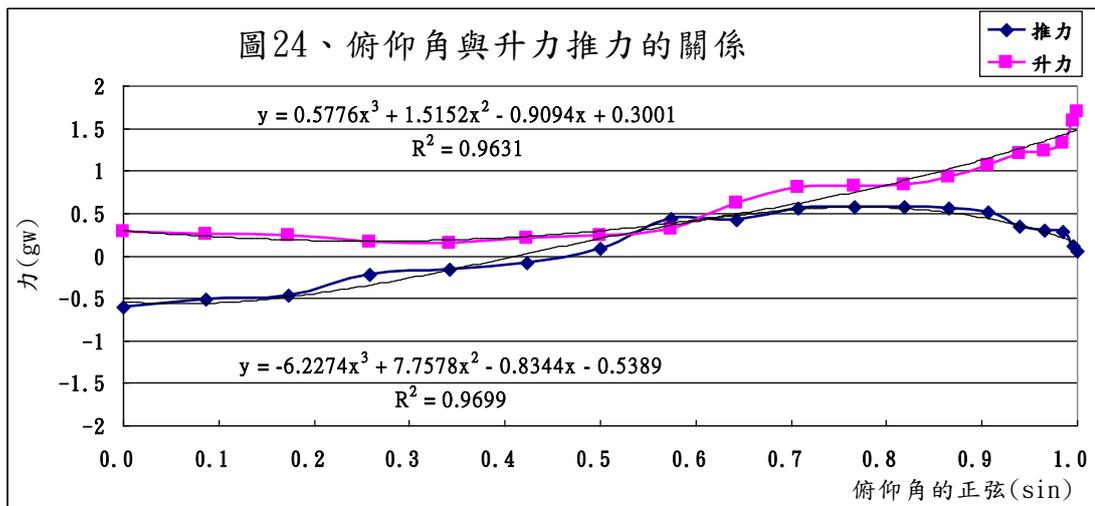


圖 23.俯仰角對於推力的影響

由於風洞中俯仰角與圓錐角相當展與弦方向調換，所以，相同風速情況下，展弦比較高的俯仰角，其所產生的升力應會更高。結果如圖 24。



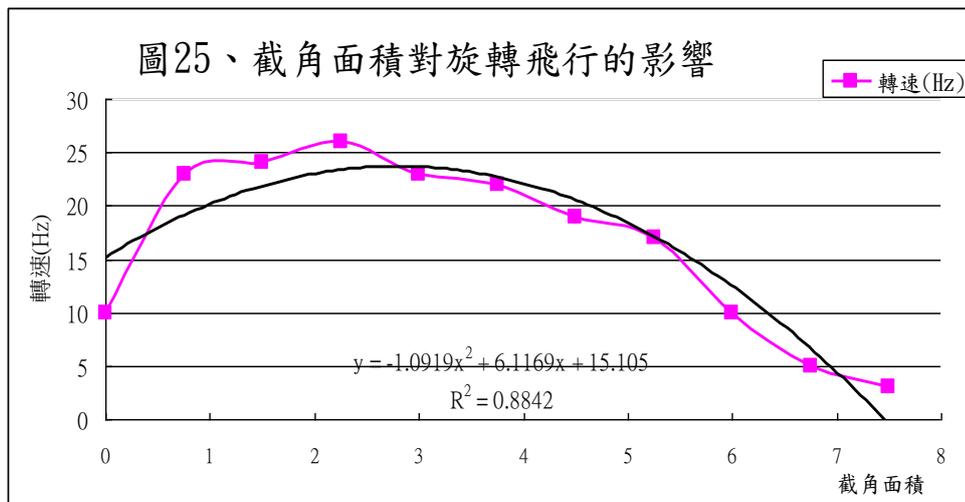
結果：

1. 俯仰角與圓錐角相當展與弦方向調換，所以，相同風速情況下，展弦比較高的俯仰角，所產生的升力更高。如圖 24。
2. 當風速 1.5m/s 時，俯仰角在 90~40 度角之間(水平夾角 50 度以內)，此時的升阻力才會達到種子的載重量(0.5g)以上，因此風洞的測試結果與高速攝影機拍攝到的相對風速相同，可以說明為何終端速度只有最高風速 1.5m/s 的三分之一，而且終端速度圓錐角 63 度即可支撐種子的載重量。

可見是俯仰角與圓錐角相互作用所造成，其中對升阻力的影響：俯仰角 $>$ 圓錐角。

3. 俯仰角在 25~0 度角之間(水平夾角 90~75 度)，此時風洞中的翼面竟然會產生反向之推力(下壓力)，因此証實：上反角會因為白努力原理而提供下壓力。

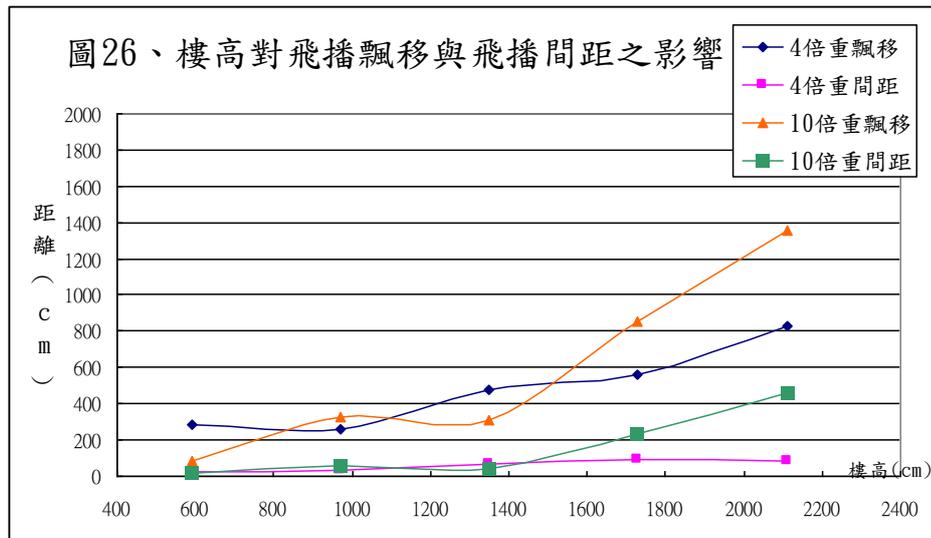
(七) 「截角面積」對種子飛行的影響



截角面積 1~3cm² 時(約為展長一半)，能使載具更容易啟動旋轉，但截角過大 (>4.5cm²) 則會很快落地。

推測：截角可減少抗力矩。但，截角面積過大翼面的受風面積變小，施力矩會被降低，旋轉啟動距離會增長。因此適當截角有助於載具旋轉飛行。

(八)測試「飛播高度」對飄移與間距的影響



由於上反角會提供下壓的水平力，除了使種子維持圓錐角，穩定旋轉降落之外，還能提供公轉的角動量。此外，轉換相同位能獲得相同轉動動能時：

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

上式中，轉動慣量越大，則公轉週期越長，飄移距離越遠。

而且根據實驗數據趨勢線推估：飄移距離應與公轉半徑相關。所以，十倍載重載具模型會比四倍載重載具模型的飄移距離遠。

四、結論與應用

大葉桃花心木的種子，是單翅種子，可以像竹蜻蜓一樣地旋轉飄落。經測試發現它的結構有降低終端速度及增加飄移間距的特性，實驗結果顯示：

1. 對於描述旋轉飛行種子的軌跡，前進比(advance ratio)是相當方便描述其推進效率的一種描述方式，因為經因素分析結果發現升力與推力屬於交互作用的現象，不易單一解釋旋轉及升阻力的關係，因此建議：將來旋轉飛行相之研究應先以「前進比」進行旋轉軌跡之描述，再以因素分析方式提供各項參數之特徵描述。
2. 種子翼面有上反角除了可以造成白努利現象提供下墜過程產生水平轉動穩定飛行軌跡，並且提供水平飄移之位移及產生公轉，因此可以藉以增加種子飄移間距。
3. 種子載重位置在翼面的一端，將重心偏移在展長四分之一處，可提供旋轉過程的圓錐角，讓種子端的升阻力比末端大可以穩定飛行軌跡，減少達終端速度時的橫向飄移
4. 種子翼面展長方向一端有肋痕，將重心偏移在弦長四分之一處，提供旋轉過程的俯仰角，讓翼面獲得旋轉推力，可以增加風阻面積穩定飛行軌跡。
5. 對升阻力的影響：俯仰角 > 圓錐角。
6. 種子翼面有截角可以減少抗力矩容易旋轉啟動飛行。
7. 遠距自由墜落之過程，載重量越大偏移距離及公轉半徑越遠。

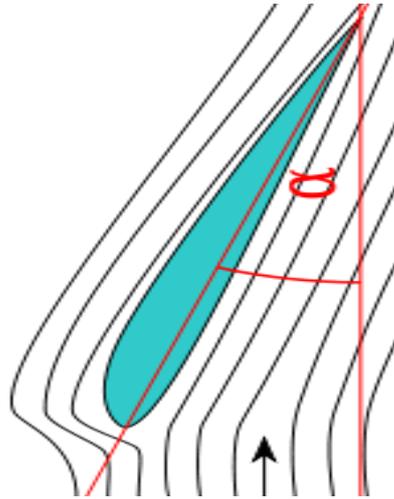
本次成果藉由單翅種子的簡易飛行模式，已可設計為簡易滯空遙測之信號機載具(如下圖照片)，增加滯空時間，並提高灑播間距。甚至可提供林務局未來飛播造林工作之應用，進行崩塌地及惡劣地形之水土保持工作。(林務局臺東林區管理處，2000)。本模型使用簡易材料，適合兒童教學使用，亦可提供流體力學原理學習使用，開發為探究課程教具。

五、參考文獻

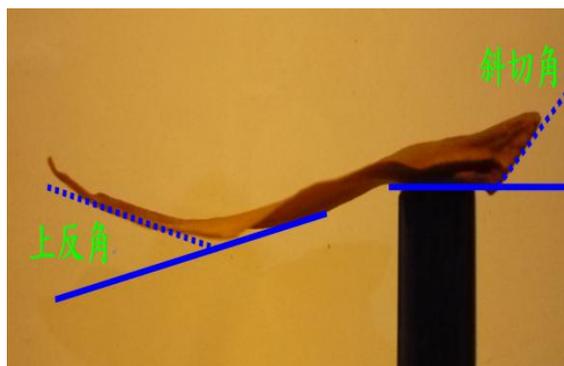
1. 陳政宏，2002，渦漩對翼片性能影響之研究，國立成功大學造船與船舶機械工程學系碩士論文，未出版。
2. 滕菀婷、蔡峰岳、紀凱容，2010，天外『杞機』：台灣黃杞的升力機制；2010年動物行為暨生態研討會及生物學會年會聯合會議論文集。
3. 「國有林崩塌地，林務局實施飛播造林」，2000，行政院農業委員會林務局臺東林區管理處。2012年10月30日節錄自
<http://www.forest.gov.tw/ct.asp?xItem=4581&ctNode=1787&mp=355>
4. Harvald, Sv.A.A.，1983，Resistance and Propulsion of Ships, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
5. Zhu, D.M.，1981，A Computational Method for Cycloidal Propellers, Int. Shipbuild. Progr., Vol. 28, pp.102-111.
6. Bose, N. and Lai, P.S.K.，1989，Experimental Performance of a Trochoidal Propeller with High-Aspect-Ratio Blades, Marine Technology, Vol. 26, No. 3, pp192-201.
7. Riijarvi, T., Li, J., Veitcj, B.J., and Bose, N.，1994，Experimental Performance and Comparison of Presence of Point Vortices, AIAA J., Vol.34, No. 11, pp2315-2319.
8. Masato Okamoto, Kunio Yasuda and Akira Azuma，1996，Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly，The Journal of Experimental Biology 199, 281–294。
9. Will J. Maybury and Fritz-Olaf Lehmann，2004，The fluid dynamics of flight control by kinematic phase lag variation between two robotic insect wings，The Journal of Experimental Biology 207, 4707-4726。
10. D. Lentink,^{1*} W. B. Dickson,² J. L. van Leeuwen,¹ M. H. Dickinson，Leading-Edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seeds，Science 324, 1438 (2009)
11. Hiroto Tanaka, John P. Whitney and Robert J. Wood，2011，Effect of Flexural and Torsional Wing Flexibility on Lift Generation in Hoverfly Flight，Integrative and Comparative Biology, volume 51, number 1, pp. 142–150。

附錄、名詞解釋

1. 展弦比 (Aspect Ratio)：翼展和翼弦長的比值，低展弦比誘導阻力較大，適合高速物體。
2. 俯仰角 (pitching angle)：是指翼弦與前進方向俯仰之夾角



3. 攻角 (Angle of attack, AOA, 常用 α 表示)：定義為機翼之翼弦與自由流 (或是相對風流的方向) 之夾角。此時是種子的圓錐角 (coning angle)
4. 上反角：機翼平面與機身平面所夾的角度。機翼平面位於機身平面之上時稱之為上反角，反之為下反角。



5. 前進比 (advance ratio)：前進速度 v 與葉片線速度 (圓盤轉速 ω 乘以半徑 r) 之比值 ($e = v / \omega r$)
6. 升阻比 (L/D)：在同一攻角下 升力 與 阻力 的比值。

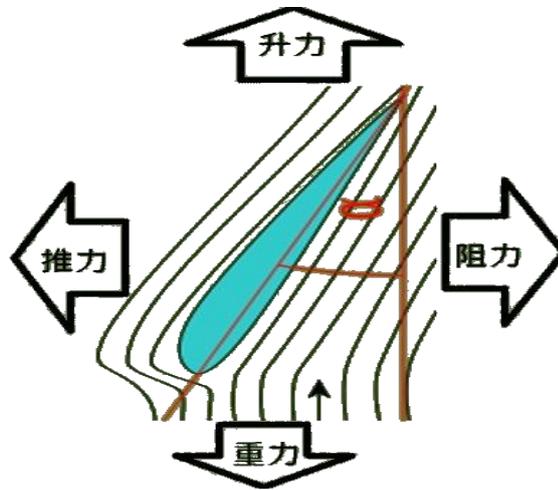
升阻比的最大值可以用下式來估算：

$$(L/D)_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi A e}{C_{D,0}}}$$

(A 為展弦比， E 為飛機的效率因數， $C_{D,0}$ 為零升力的阻力係數)

升阻比的最大值不隨飛機重量及機翼面積而改變。

7. 阻力：主要可分為：誘導阻力及寄生阻力二種。誘導阻力是指當立體的機翼產生升力時同時衍生的阻力。寄生阻力是因空氣和飛機的相對運動產生的阻力，約和速度的平方成正比。



評語

大葉桃花心木種子是大自然的奇蹟，其飛行旋轉飄落的物理令人著迷，在這方面的研究一直吸引生物與物理方面的研究師生，其過程與內容也已累積相當的成果。本作品雖以現代攝影工具作定量分析，所貢獻的創新內容相對於其他參賽作品，仍有增進豐富的空間。