

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

第三名

040101

飄飄何所似

—以單翅種子飛行原理進行飛播造林的研究

學校名稱：國立馬祖高級中學

作者： 高一 劉又瑄 高一 蔡亞婷 高一 駱宥辰	指導老師： 洪 儒 胡裕仁
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：展弦比、重心、飛播造林

摘要

本實驗以大葉桃花心木種子為材料，探討種子在飛行時，其結構與三種作用的關係：**重力**、**旋轉力矩**、**柏努利原理**。實驗中首先測量種子各部位的結構與飛行模式的關係，再以模型進行實際拋射與風洞的測試。結果我們發現大葉桃花心木種子的 7 個結構會影響它的旋轉飛行：1. **種子的重量**：提供重力造成轉動及產生升力。2. **展重心位置**：需偏向翅的一邊，使施力矩大於抗力矩而穩定旋轉。3. **弦重心位置**：需偏向翅寬度方向的一邊，提供較大的切風角度，增加旋轉推力。4. **種子與肋痕重量比**：以 0.3~3.0 的重量比例飛行高度與轉動速度最佳。5. **展弦比值**：種子翼面的展弦比在 4 至 7 可獲得較大升力。6. **上反角**：會改變翅的上、下面的實際受風面積，且上反角的翼面下凹，依白努利原理會形成水平下壓的力量。會使鉛直下墜的種子恢復水平，藉以修正種子的飛行姿態。7. **截角面積**：適當剪除重心以外之翼面面積可以使載具更容易旋轉，但是截角長度不要超過全長的一半，否則會降低受風面積，進而使載具很快墜地。8. **載具飛播高度**：若以 6 公尺之水土保持間距來推算，10 倍載重之載具飛播高度限制約在 30 公尺；4 倍載重則限制約在 100 公尺。以飛播高度在 100 公尺時之飄移距離：10 倍載重之飄移距離約 70 公尺；4 倍載重則約 40 公尺。故 4 倍載重之單翼種子載具的使用，是可靠且簡便的飛播造林方式。

壹、 研究動機

馬祖群島屬亞熱帶海洋性氣候，平均年雨量約1048mm，集中於夏季。馬祖地區因島狹山低，土壤層淺薄貧瘠，又受季風影響，島上極為荒涼，往昔即缺林木，原生植被以低莖草類及灌木叢之混合植群為主，林木及花卉多係移植而來。在尚未經人為開發的山頂和斜坡間，高不及尺的灌木叢或散生的禾本科植物比比皆是。馬祖群島因交通不便，過去又屬軍事管制區，因此造林成效不彰（行政院環保署）。

我們曾在科學營活動中認識大葉桃花心木，它的種子會像竹蜻蜓一樣地旋轉飄落。期盼利用單翅種子的飛行模式提供適當的安全灑播方式減少種子的損傷，並增加滯空時間以提高灑播間距，提供未來飛播造林工作之參考。我們首先根據參考資料所提飛行中的三種力量：升力、重力、阻力。假設種子飛行中的升力主要是靠重力產生的氣流與種子旋轉形成的阻力所造成。其中，種子的旋轉必須考量其力矩的大小與方向，而力矩又包含作用力的大小、方向及力臂的長短。因此我們首先觀察大葉桃花心木種子旋轉所需的力矩是由哪些構造所造成？再觀察飛行過程，種子利用何種構造提升滯空時間？以及種子翼面如何以適當展弦比（翅的長寬比值）來獲得最大升力？以及翼面的上下反角在旋轉飛行的過程有何功用？

貳、 研究目的

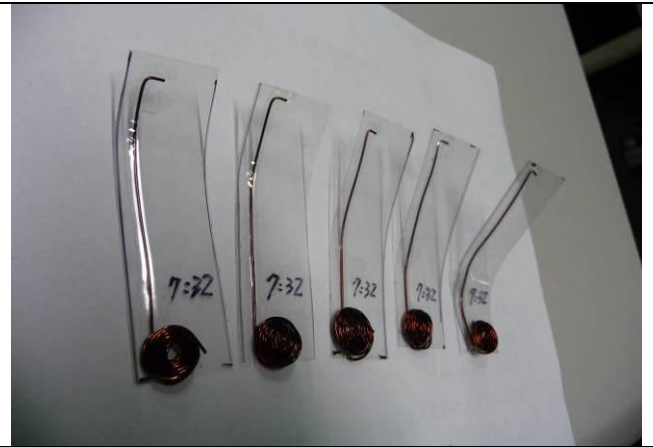
- 一、 大葉桃花心木種子造成「旋轉飛行」的構造分析 4
- 二、 飛播載具的旋轉飛行結構設計 9
- 三、 飛播高度對載具飄移距離與間距的影響 18

參、 研究設備及器材

成熟大葉桃花心木種子、風扇、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、直尺、10M 捲尺、美工刀、電子風速計、碼錶、電子秤。



大葉桃花心木種子的重心測量方式



上反角的模型試驗



直流風洞的實驗裝置



大葉桃花心木種子的風洞實驗



改良式環保材料飛播造林載具



飛播間距的測量

肆、 研究方法及結果

一、 大葉桃花心木種子造成「旋轉飛行」的構造分析

(一)、 大葉桃花心木「種子構造」的名詞解釋



圖 1：種子正面基本構造

種子：白色種子藏於種皮所形成之空腔內，是整體構造中重量最重的部分。

肋痕：是種子與果實中軸連接的構造，內有維管束，母樹可藉以提供養分給種子。

薄翅：是協助種子飛行的結構，為種子構造中最薄且重量最輕的部分。

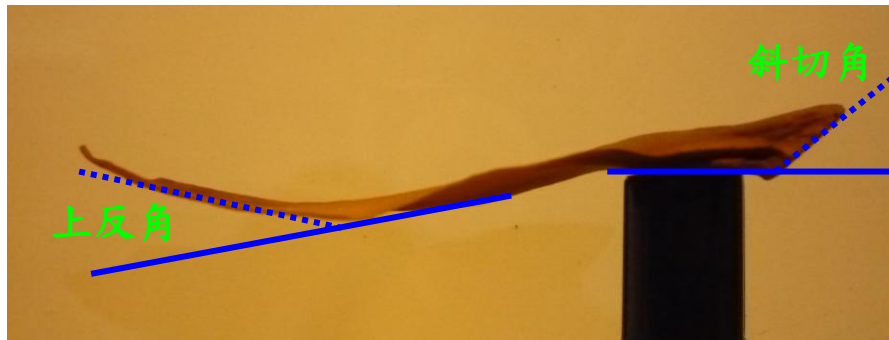


圖 2：種子側面基本構造

上反角：種子的薄翅末端均會往上彎曲形成類似機翼之上反角結構。

斜切角：種子的最前端有一平滑的斜切結構。

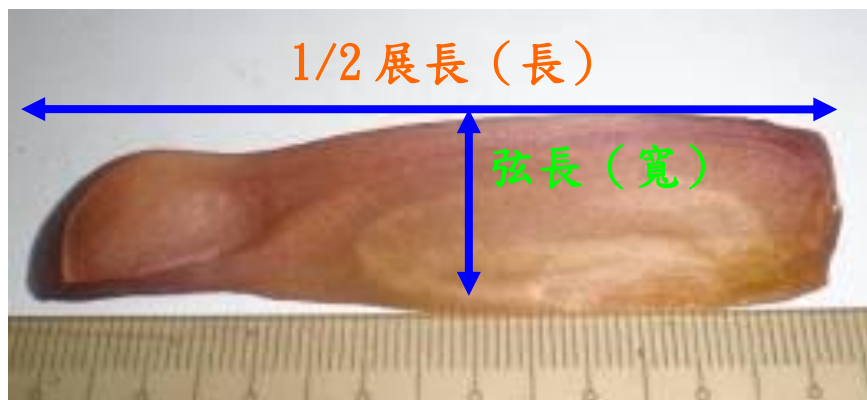


圖 3：種子之展弦比相關構造

展長：在計算**展弦比**與升力關係時，種子的全長須當成 1/2 展長計算。因為飛行過程飛機是雙翼受力，所以展長是將雙翅長度加總。但是單翅種子在旋轉飛行時，旋轉過程薄翅會在兩邊受力，所以在計算展弦比時，須將**種子全長**當成 **1/2 展長**來計算。

弦長：在計算**展弦比**時，種子的**薄翅寬度**須當成**弦長**來計算。

(二)、成熟大葉桃花心木「種子構造特性」的觀測。

1. 大葉桃花心木「種子構造」的分析：

觀察方法：取 10 片成熟種子(含種子、肋痕、翅)，測量總重量、整體重心，以及個別的長度、重量、重心、面積、上反角及翅的弧度。

觀察結果：

	總重量 (g)	整體長度 (cm)	重心的展 長位置 (由下而 上 cm)	重心的弦 長位置 (由肋痕 往翅 cm)	翅的長度 (cm)	翅的寬度 (cm)	翅膀重 (g)	種子重 (g)	肋痕重 (g)
平均	0.51	7.73	1.65	0.82	6.23	1.82	0.03	0.31	0.03

由以上觀測數據可知：

- (1). 種子、翅及肋痕的**重量比約為 10:1:1**，可見藉由翅旋轉產生的升力，所提供的載重量相當可觀。
- (2). 整片種子的重心約在種子的一邊，離邊緣約在全長 22%及寬度約 45%的位置。
- (3). 本實驗測量種子的長度約為：長 6.23cm 寬 1.82cm，展弦比(長寬的比值= $6.23 \times 2 / 1.82$)約為 6.85，符合滑翔翼的最佳展弦比 5~7(徐文達，2002)。
- (4). 種子的尾部均有斜切角，平均約 0.8cm 佔全長的 1/10，角度約 45 度。
- (5). 種子的翼面有弧形的上反角，上反角的曲率因種子而異。

2. 大葉桃花心木種子自由落下的飛行觀測：

觀察方法：取 10 片重量及形狀相近的成熟種子及等重(0.51g)的粘土，由 2.61m 的鐵架上自由掉落，測量落下至啟動旋轉所需的高度、滯空總時間、拋射黏土落地時間、旋轉方向、種子的切角位置。

觀測結果：

種子	啟動所需高度 (cm)	滯空時間 (秒)	旋轉次數 (次)	旋轉方向	自由落體 時間(秒)
平均	42.4	2.10	10.0	向肋痕	0.74

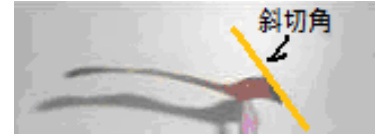
- (1). 種子平均須經過 42.4cm 自由落體的加速度，才能產生足夠的風力旋轉。根據拋射同重量的黏土與種子觀測滯空時間的差異，實驗數據顯示種子的旋轉使種子在 2.61m 的飄落過程增加 3 倍的滯空時間。並在掉落過程中，先快速旋轉再轉速變慢而掉落，可見種子旋轉可增加滯空時間。
- (2). 利用自由落體公式計算 42.4 cm 自由落體的加速度所造成的啟動旋轉所需風速約為 2.9 (m/s) ($S = \frac{1}{2}GT^2$ 、 $V = GT$ 、 $G = 9.8(m/s)$ 、 $S = 0.42(m)$ 、 $T = 0.3(s)$ 、 S ：距離、 G ：重力加速度常數、 T ：時間)
- (3). 最特殊的現象是種子不論是以正面或是背面旋轉飄落，過程中種子大都是向肋痕的方向旋轉。因此推測，**肋痕是造成種子旋轉方向重要力矩的結構**。

3. 觀察大葉桃花心木種子的「斜切角」對「風洞飛行」的影響：

觀察方法：

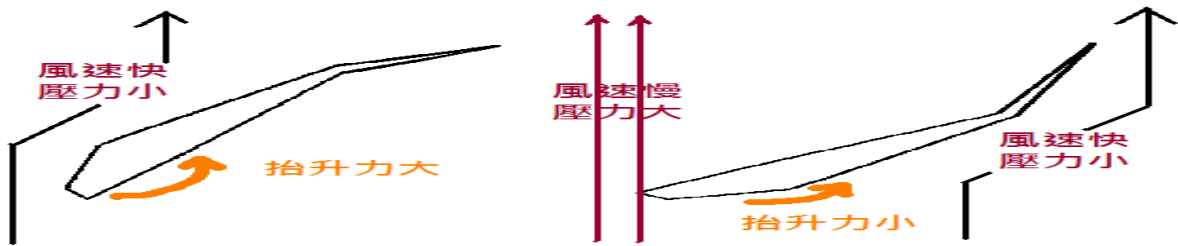
取重量及形狀相近的成熟種子 10 片，各以 5 片斜切角在上方與在下方飛行測試。在重心位置打洞，放置在垂直風洞中測試。

觀察結果：

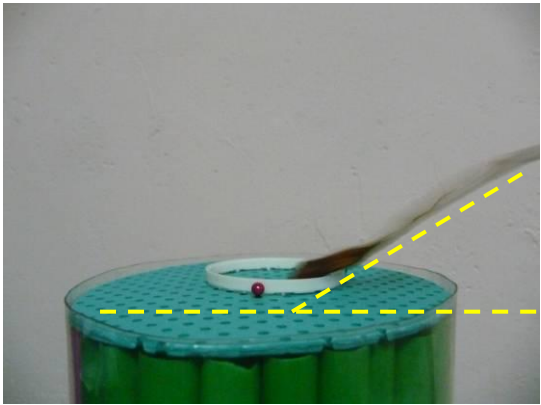
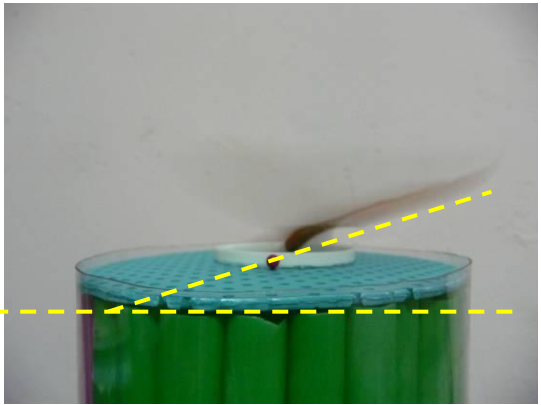


斜切角	平均啟動風速 (m/s)	固定風速 (0.7m/s) 之平均轉速(Hz)	旋轉方向
在下	0.3	2.2	向肋痕
在上	0.5	2.5	向肋痕

- (1). 種子在風洞中的飛行方向不論正面或反面飛行，大部分種子都是往肋痕方向切風旋轉，因此推測，肋痕是影響種子旋轉力矩與方向的重要結構。
- (2). 由同一片種子不同斜切角位置的飛行角度中發現：斜切角在下的飛行比較水平（大約 15 度角），但是在上的飛行角度卻將近有 45 度角，轉速則影響不大，但是下反角所需的啟動風速較大（不易啟動）且常造成種子翻轉為上反角。根據這一現象推測：應是在旋轉飛行過程，由於柏努利原理造成上反角兩邊氣流的壓力差，使得種子抬升的力量不同，凹面朝下的種子抬升力量比較大，但是抬升力量過大時，則會使種子翻轉變成凹面朝上。



- (3). 由於種子的斜切角與上下反角彎曲的朝向相反，因此推測：上反角是種子飛行過程平衡力量的來源。種子切面並不影響旋轉面的方向。

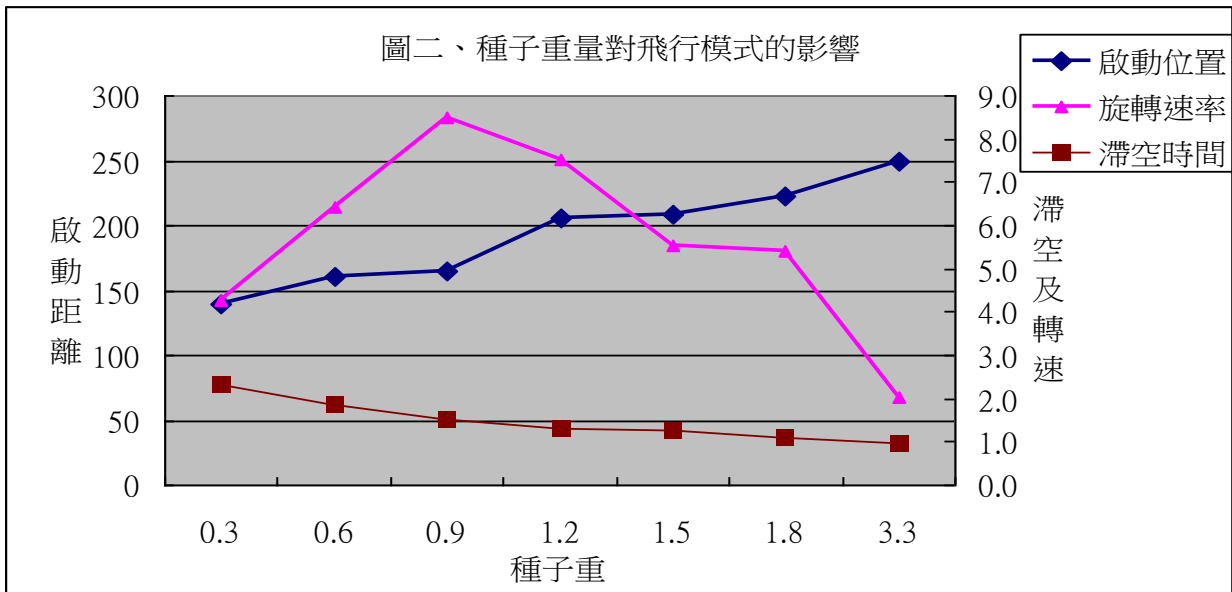
	
風洞中下反角的傾斜角度較大、啟動風速需求較大	風洞中上反角的傾斜角度較低且、啟動風速需求較小

(三)、增加「種子重量」對旋轉飛行的影響。

觀察方法：藉由黏附黏土增加種子的重量，觀察種子的重量對鉛直墜落飛行的影響。

觀察結果：

種子重量 (g)	旋轉啟動位置 (cm)	平均旋轉速率 (Hz)	平均旋轉次數 (次)	平均滯空時間 (秒)
0.3(原重)	140	4.3	10	2.34
0.6	161	6.4	12	1.87
0.9	165	8.5	13	1.53
1.2	205	7.5	10	1.33
1.5	208	5.6	7	1.26
1.8	222	5.4	6	1.11
3.3	250	2.0	2	0.98



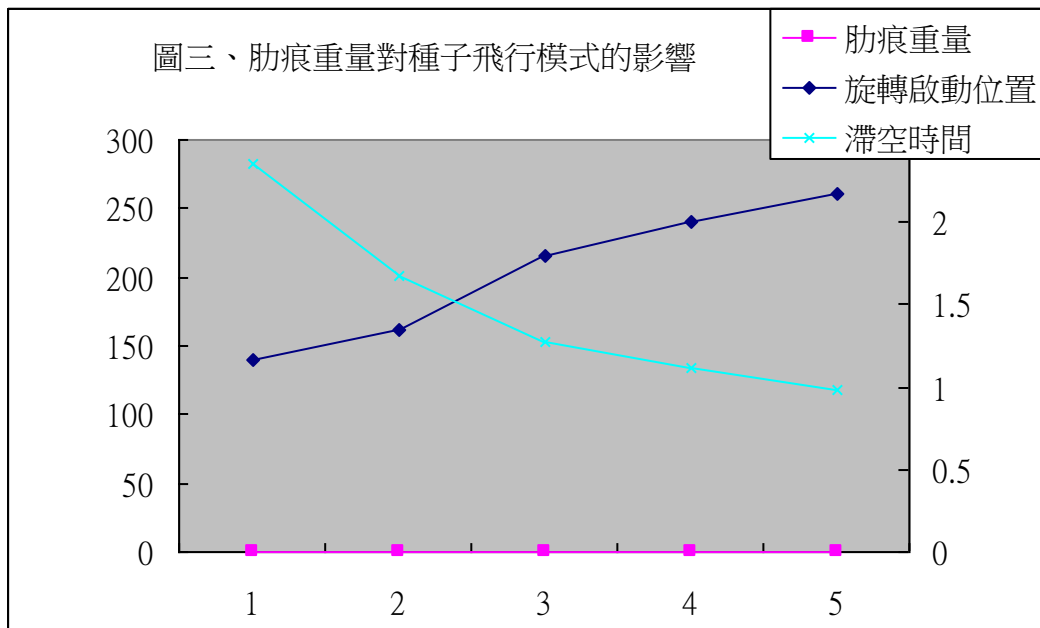
1. 總重以 0.3 到 0.9 公克之間的種子的滯空時間及旋轉速率比較好，尤其以 3 倍種子的載重量的飛行效果最佳。
2. 同一面積的種子，在載重量的範圍內，增加種子的重量可提升旋轉速率，推測是因為增加重力可使風力加大，而提升種子的旋轉推力。但是重量與面積比值越小，滯空的時間越長。
3. 在載重量的範圍內，同一面積的種子，種子的重量越重，種子啟動旋轉所需時間越長。推測是因為增加重力雖使風力加大，但是種子恢復水平的抗力矩也變大，所以種子啟動旋轉所需的距離也變大。

(四)、觀測增加「肋痕重量」對旋轉所需的力矩的影響：

觀察方法：藉由在勒痕黏貼黏土觀察增加種子肋痕的重量，分析對種子拋射飛行的影響。

觀察結果：

肋痕重量 (g)	旋轉啟動位置(cm)	平均旋轉速率 (Hz)	平均滯空時間 (秒)
0.03 (原重)	140	1.5	2.35
0.09	162	1.1	1.68
0.15	215	0.8	1.28
0.21	240	0.5	1.12
0.39	260	0.1	0.98

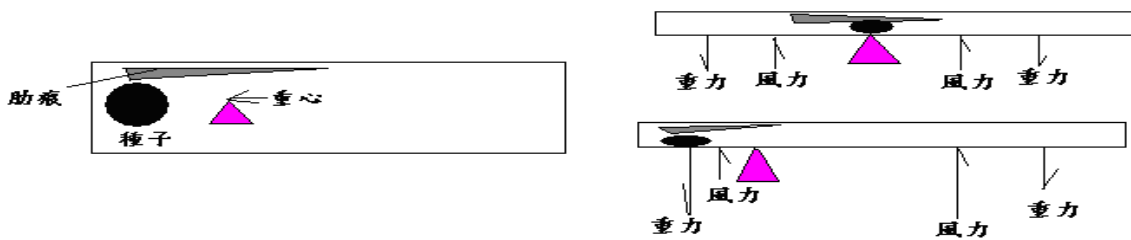


1. 肋痕的重量以 0.03 到 0.09 公克之間，恰為翅膀重量的 1~3 倍，會使種子的滯空時間及旋轉速率比較好。
2. 由肋痕的重量越大(0.03 到 0.09 公克之間)，轉速增加，推測是因為**增加肋痕的重量可增加翼面傾斜度，因而提升種子的旋轉推力**。
3. 當肋痕的重量過大時，種子會快速墜落推測是肋痕的重量影響翼面傾斜度，降低種子的受風面積，使滯空時間減少。

二、飛播造林載具的旋轉飛行結構設計

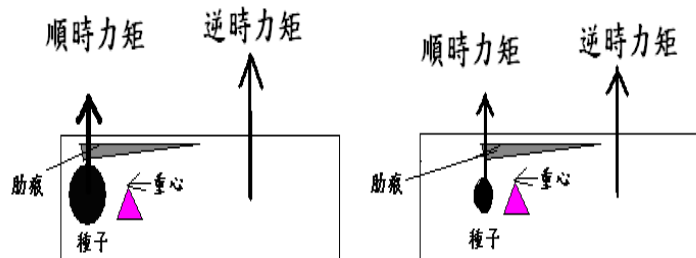
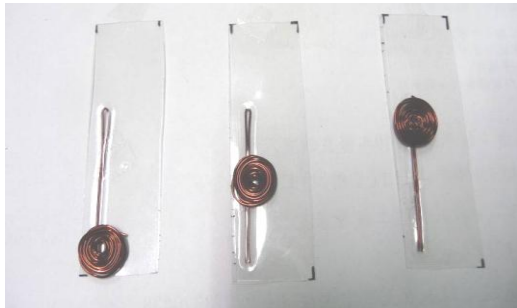
(一)、飛播載具的展重心位置對旋轉飛行的影響。

假設：飛播載具重心在翅的長度位置越離開中心點→旋轉中心的兩側受風面積大小不均等→順時針與逆時針力矩大小不均等→翅旋轉



實驗步驟：

- (1)以透明片模仿大葉桃花心木製作成 7*2 公分的飛播載具
- (2)製作翅與種子的重量比 0.26g : 1.60g，肋痕 0.10g 長度 4cm。
- (3)改變種子距離中心的位置後，在風洞（風速 1.0m/s）觀察翅的轉動。
- (4)測量 5 次的翅轉動方向和轉動速度。



實驗結果：

種子位置 (離底部 cm)	轉動方向	轉動速度 (Hz)	備註
0	往肋痕	1.0	易起動
1.0	往肋痕	1.6	易起動
2.0	往肋痕	2.3	稍慢啟動，轉速快
3.0	往肋痕	0.1	到處飄，不易轉動

1. 由數據結果可知：重心離翅的中心越遠時，逆時針力矩與順時針力矩的差距越大，越易旋轉。
2. 旋轉啟動的重心範圍在距離翅的底部 0 到 2cm 之間，越往中央轉動速率越快，但是鉛直墜落過程只有 0 到 1cm 會轉動。推測應是種子有一定的載重範圍。
3. 重心太接近翅的中心時，逆時針力矩與順時針力矩的差距越小，容易互相抵消，造成翅不易啟動旋轉，甚至會形成左右晃動的滑翔狀態。
4. 重心應在翅的中心與邊緣之間，且因載重量的不同而有不同的最佳重心位置，推測為種子越重，則重心應離中心越遠才會有足夠的旋轉力矩及升力(如上圖)。
5. 飛播載具與天然種子及肋痕的重量相同，卻無法產生天然種子自由落下時的旋轉效果。根據推測應是真實翼面的重量為 0.03g，但是相同面積的透明片卻重達 0.26g，因肋痕的重量不足以提供足夠的重心偏移(至少必須 1:1)，無法有效形成旋轉所需力矩。因此，必須靠種子的重量來協助調控重心位置的偏移，才能提供足夠的旋轉力矩。
6. 此外，種子的重量還必須提供足夠的重力，使種子在墜落過程，能達到一定的風速，之後才能產生足夠的旋轉力矩啟動翅的旋轉。故種子、肋痕及翼面三者的重量比值，是決定飛播載具旋轉飛行甚至載重量的關鍵比例。

(二)、飛播載具的「弦重心」對旋轉飛行的影響。

假設：飛播載具的重心在寬度位置中間但偏肋痕→受風面積→風力大小不平均→使薄翅傾斜→影響翅轉動面的角度→受風面積大小不相等→風力大小不平衡→造成翅的轉動推力

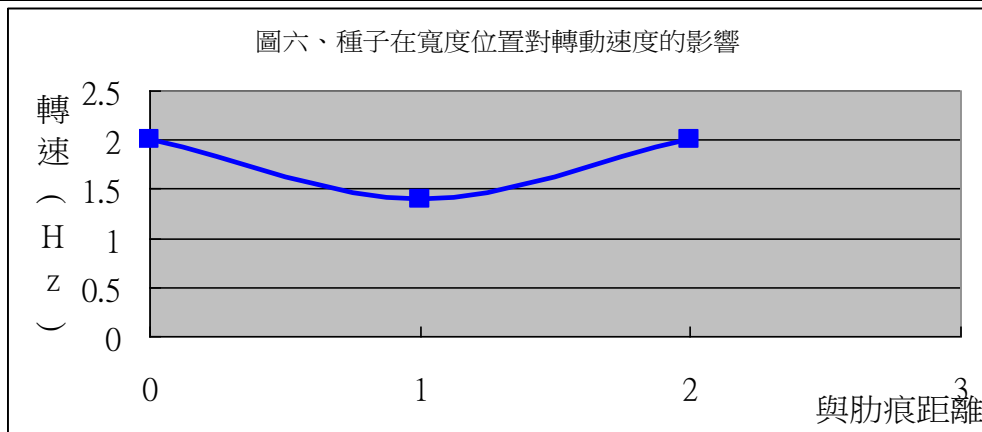


實驗步驟：

1. 在風洞（風速 1.0m/s）觀測飛播載具的最佳寬度重心位置。
2. 以透明片模仿大葉桃花心木製作成 7*2 公分的飛播載具
3. 製作翅與種子的重量比 0.26g : 1.60g，肋痕 0.10g 長度 4cm。
4. 改變種子的位置後，在風洞（風速 1.0m/s）觀察翅的轉動。
5. 測量 5 次的翅轉動方向和轉動速度。

實驗結果：

種子位置（離肋痕 cm）	轉動速度(Hz)	轉向
0	2.0	向肋痕轉動
1	1.4	向肋痕轉動
2.0	2.0	向肋痕反方向轉動



1. 由實驗發現：飛播載具的重心偏向肋痕時，會有較好的旋轉速度。
2. 當飛播載具重心在距離肋痕 1cm 處，也是重心偏離翅的中心位置，此時飛播載具會造成重心在翅寬度方向的中心位置，此時飛播載具無法順利在風洞中旋轉。
3. 當飛播載具完全偏向肋痕的另一邊時，因種子的重量比肋痕重，飛播載具重心會往種子位置偏移，故翼面朝肋痕的另一邊旋轉。推知飛播載具的重心位置偏向一邊時，飛播載具才能得到適當的旋轉力矩，飛播載具整體的重心的偏移位置即為飛播載具旋轉的方向。

(三)、飛播載具的「肋痕長度」對旋轉飛行的影響。

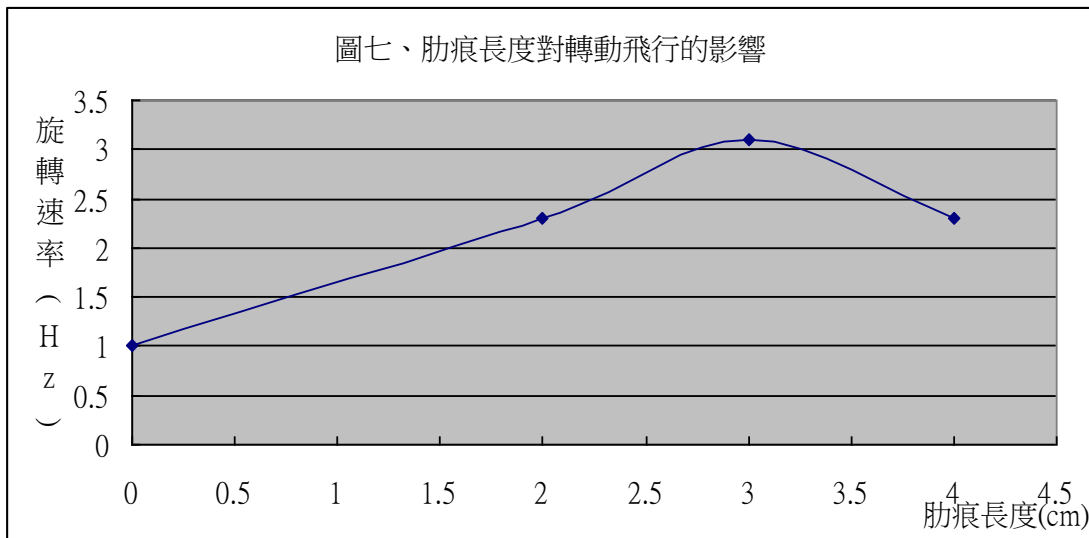
假設肋痕長度大小有二個影響：

1. 肋痕長度大小→改變重心在翅長度的位置→使翅受風面積大小不相等→翅受風力大小不平衡→影響翅轉動之推力大小及推力方向
2. 肋痕長度增加→增加旋轉力臂→增加旋轉力矩→翅容易旋轉啟動



實驗結果：(固定種子重：1.6g、風速：1.0m/s)

肋痕長度 (cm)	旋轉速率	翅轉動方向
0	1.0	左右晃動
2.0	2.3	向肋痕方向
3.0	3.1	向肋痕方向
4.0	2.3	向肋痕方向

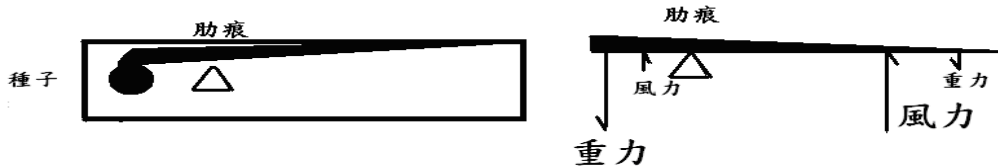


1. 由結果發現**肋痕長度對轉速之影響**只到3公分長是最佳，太長則又降低轉速，推測應是肋痕的重量對於影響翼面的重心在弦長位置改變，因此肋痕長度極重量由一定的限制。肋痕太長時重量會造成翼面往肋痕方向前傾，減少受風面積所以降低旋轉推力。
2. **有肋痕的翅**比沒有肋痕的翅較容易啟動旋轉，推測應是肋痕重量除了使翼面的展長位置重心略向肋痕方向偏移而有適當的切風角度，方便風力對翼面產生旋轉推力之外，**肋痕重量**還會使翼面的展長位置重心略遠離種子的方向偏移，會壓低翼面的轉動角度，也會使旋轉力臂增長，增加轉動力矩。

(四)、「種子與肋痕重量比」對飛播載具旋轉飛行的影響。

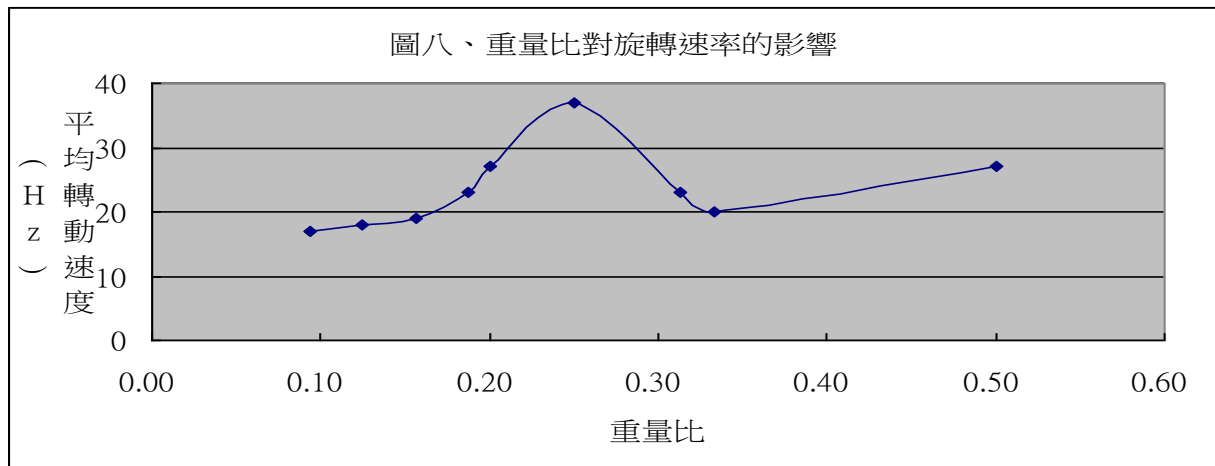
實驗步驟：

1. 改變飛播載具種子重量與肋痕重量比例。
2. 在風洞飛行中（風速 1.0m/s）紀錄 5 次旋轉速率。



肋痕對於轉動力臂之影響

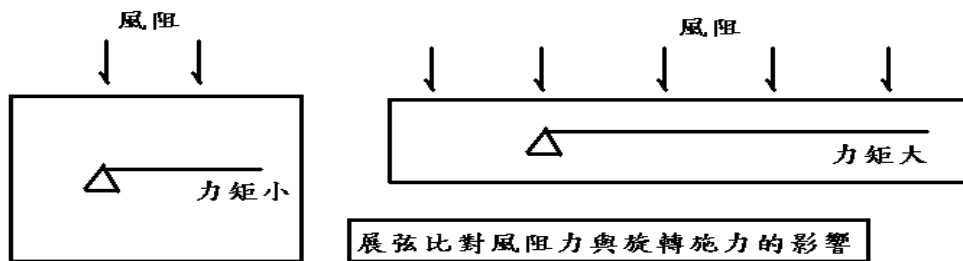
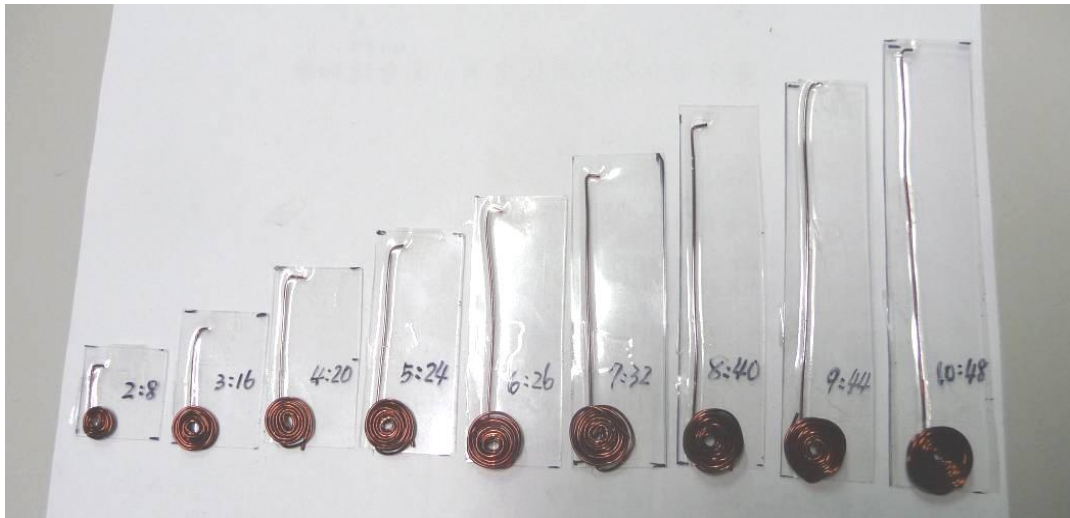
肋痕及種子重量比	肋痕及種子重量比值	平均轉動速度(Hz)	轉向
03:32	0.09	17	向另一方轉動
04:32	0.13	18	向肋痕轉動
05:32	0.16	19	向肋痕轉動
06:32	0.19	23	向肋痕轉動
08:40	0.20	27	向肋痕轉動
08:32	0.25	37	向肋痕轉動
10:32	0.31	23	向另一方轉動
08:24	0.33	20	向肋痕轉動
08:16	0.50	27	向肋痕轉動，晃動厲害



1. 實驗結果發現：種子與肋痕的重量比值太小或太高，飛播載具旋轉飛行時的轉速都變差。更發現重量比值越高，種子越不易啟動旋轉。因此更可證明適當比例的肋痕重量可提供飛播載具旋轉所需的力矩，推測應是提供適當的翼面傾斜角度，增加旋轉推力，旋轉速率因而增加。
2. 由種子與肋痕的重量比值發現：比值在 0.3 與 0.2 的飛播載具，旋轉飛行效果良好，肋痕重量可以提供對弦重心位置的影響。可見影響飛播載具旋轉飛行的構造中，肋痕的角色相當重要。因此推測：調控肋痕的重量及位置，應是調控單翼飛播載具飛行的關鍵。
3. 以 5:32 跟 6:32 為例，雖然 5:32 的肋痕長度是 6:32 的兩倍長，但是並不影響它們的啟動時間，可見肋痕重量比肋痕長度影響更大。

(五)、 「翅的展弦比」對飛播載具旋轉飛行的影響

假設：因展長主要是影響提供升力的面積，弦長則影響上下氣流流速的壓力差，由於飛播載具上下氣流流速差異不會很大，所以展長對於柏努利原理所造成的升力影響會比弦長的影響大，但是翅的展越長則風阻也跟著變大，故適當的展弦比才会有最佳的升力組合。

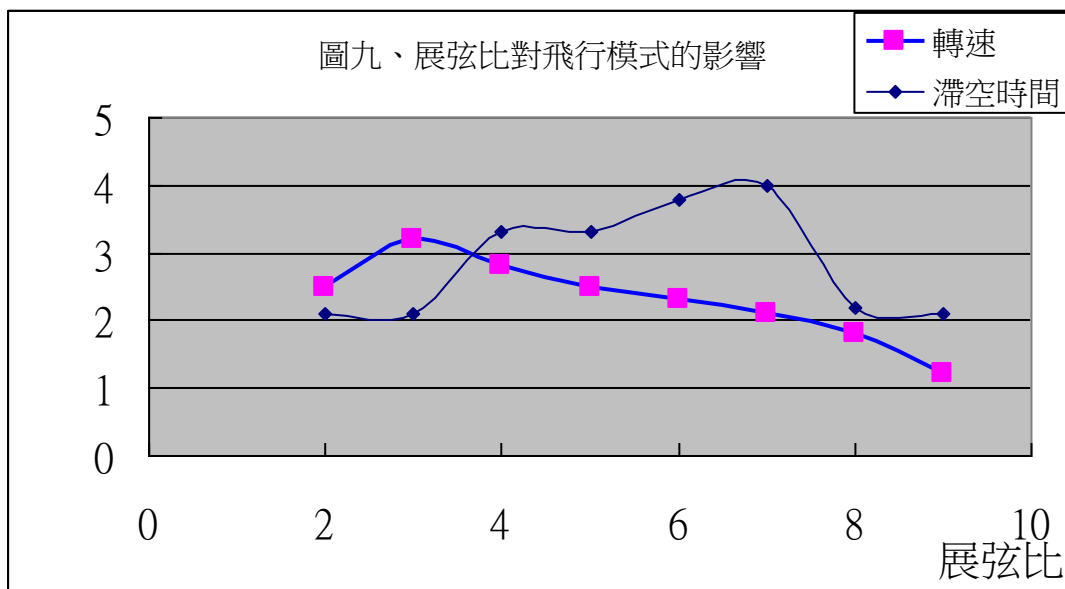


實驗步驟：

1. 依大葉桃花心木種子重、肋痕重及展長比例配置製作飛播載具：翅重=0.26g。
2. 改變飛播載具的展弦比，在風洞觀察平均轉速及3m鉛直落地滯空時間。

實驗紀錄：改變長寬比

展弦比	展長 (cm)	弦寬 (cm)	平均轉速(Hz)	滯空時間
2	2	2	2.5	2.1
3	3	2	3.2	2.1
4	4	2	2.8	3.3
5	5	2	2.5	3.3
6	6	2	2.3	3.8
7	7	2	2.1	4.0
8	8	2	1.8	2.2
9	9	2	1.2	2.1



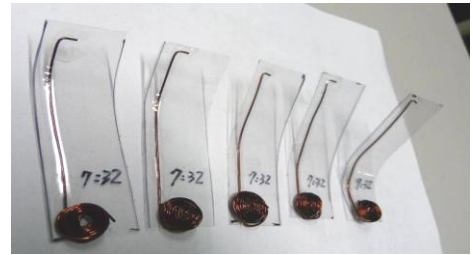
1. 滯空時間以展弦比在 4 到 7 之間都有較長的滯空時間，展弦比在 2 到 7 之間都有較快的旋轉速率。但展弦比越大越不易起動。參考文獻中說明最好的滑翔機翼在展弦比 5~7 之間，應是因為展弦比提供適當升力可延長滯空時間，本研究再次驗證展弦比對提供升力的影響。
2. 展弦比越長旋轉速率越小，推測應是展越長提供升力所需的面積越大，影響旋轉的阻力也越大，故旋轉速率因此越小。不過展弦比 2~3 卻也有快速的旋轉速度，根據推測：應是展弦比越小越容易形成左右對稱的飛行過程較容易維持水平面的平衡，穩定的受風就會避免擾動所產生的阻力，因而使轉動速率增加。

(六)、 「上反角」對飛播載具旋轉飛行的影響

1. 「上反角」對飛播載具啟動旋轉距離的影響

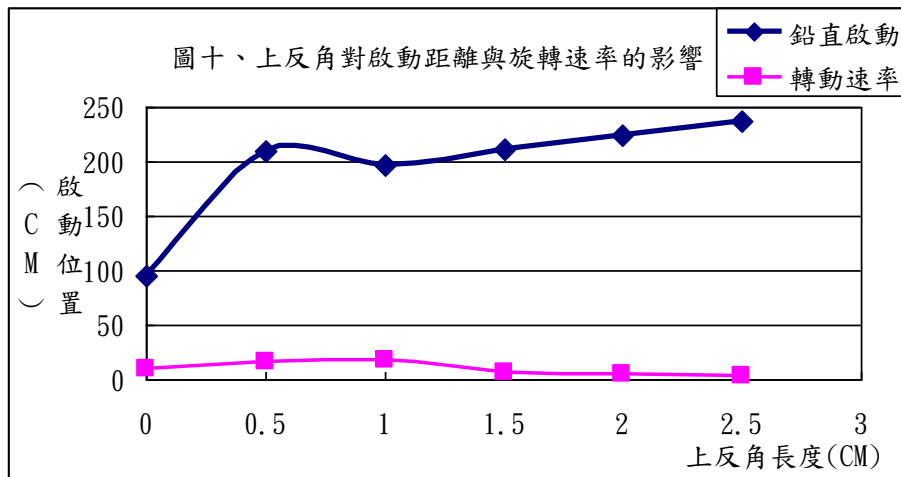
實驗步驟：

- (1) 改變飛播載具上反角的長度 (離邊緣 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5cm)。
- (2) 紀錄固定高度(216cm)鉛直拋射時，翅的旋轉啟動位置、旋轉次數。



實驗結果(種子重：1.6g；翅重：0.26g；肋痕重：0.18g)

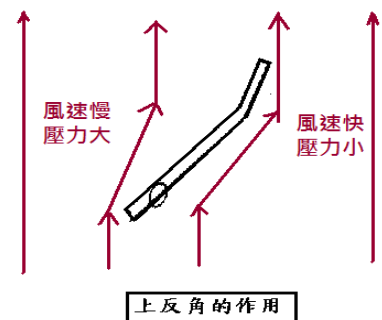
上反角長 (cm)	轉動速率	鉛直下墜啟動距離 (cm)					平均
0	10(啟動較慢)	95	88	100	92	99	95
0.5	16	222	193	210	217	207	209.8
1.0	18	197	200	189	193	204	196.6
1.5	7	217	214	210	209	207	211.4
2.0	5	230	227	218	223	226	224.8
2.5	3	249	210	253	230	240	236.4



(1). 由鉛直下墜啟動旋轉所需的高度發現：沒有上反角的載具，有時候甚至會直接墜地，無法旋轉。可見上反角提供飛播載具在鉛直下墜過程能恢復水平狀態的旋轉力矩，提早啟動載具的旋轉功能，可避免直接墜地。

(2). 上反角的長度越大，啟動旋轉所需的距離越大，旋轉的次數越少，可見過大的上反角會減少翅的正向受風面積，減少旋轉力矩及升力。

(3). 飛播載具的旋轉飛行過程，上反角除 0 及 0.5cm 以外，其於飛行時均朝上。經改變種子及肋痕位置後發現：上反角長度要超過 (含) 1cm 以上時，上反角的旋轉面的位置不會因為整體的上下重心位置改變而改變。水平恢復力矩的作用(如圖)應是翼面結構彎曲使得兩面的空氣流速不同，造成凹面流速慢壓力大而有下壓之力量。但是上反角超過 2cm 以上時，飛播載具會改變飛播載具的旋轉面方向，變成下反角飛行。



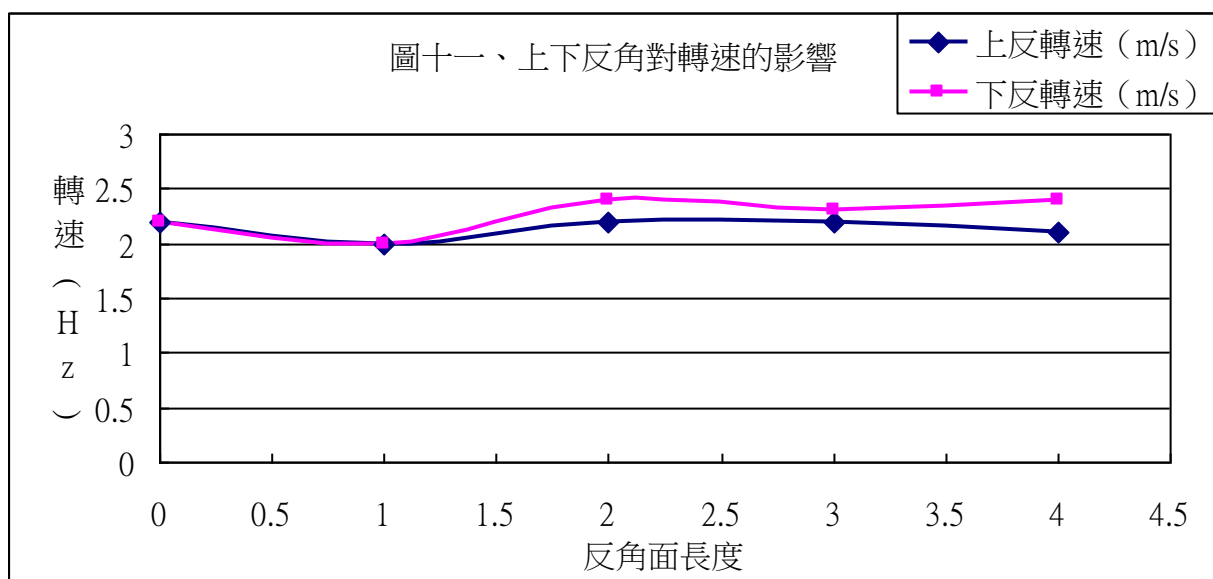
2. 「翅的上下反角」對飛播載具旋轉飛行的影響：

實驗步驟：

- (1) 飛播載具的種子重心要在下方才容易啟動。
- (2) 改變飛播載具上反角的長度（離邊緣 1~4cm）。
- (3) 紀錄固定出風口風速（1.0m/s）時，測量飛播載具 10 秒鐘的旋轉次數。

實驗紀錄：種子重=1.6g；翅重=0.26g；肋痕重=0.175g

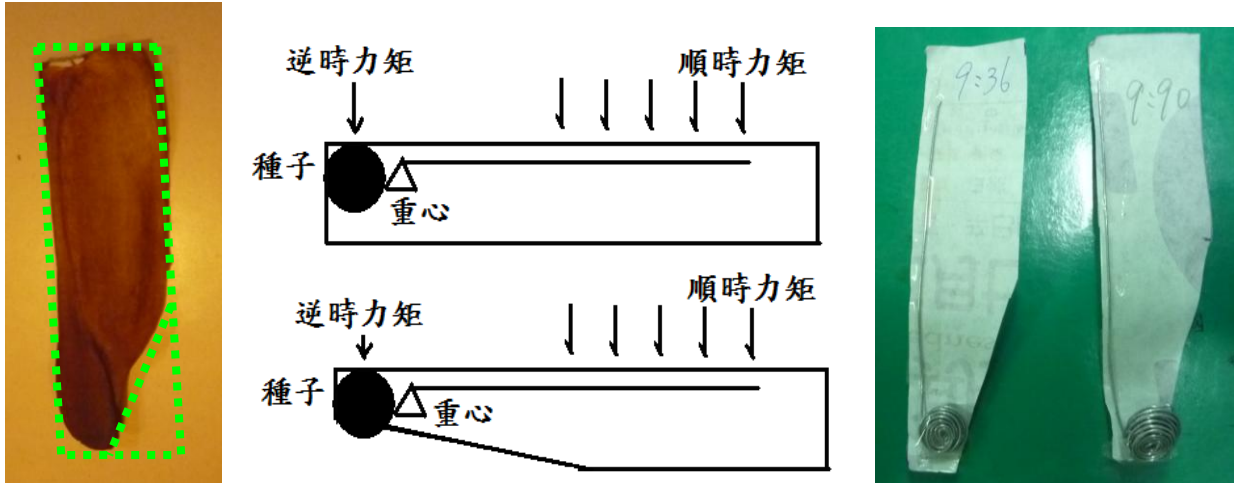
上反角長度 (cm)	上反轉速 (m/s)	下反轉速 (m/s)
0	2.2	2.2
1	2.0	2.0
2	2.2	2.4
3	2.2	2.3
4	2.1	2.4



- (1) 依柏努利原理，飛播載具上反角會產生水平下壓力量使翅維持水平，使相同的風速下，上反角的較難啟動；反之，下反角會產生水平上升力量使翅維持傾斜，因此相同的風速下，下反角的比較易啟動。但是實驗結果發現：上下反角的轉速都略大於無反轉角的翼，顯示影響不明顯。推測是飛播載具翼面的面積仍不足以提供足夠的抬升翼面重量的上舉力，尤其大葉桃花心木種子的翼僅重 0.03g，但是護貝膜相同面積的情況下，卻已重達 0.26g。故在相同面積的翼面與相同風速的情況下，飛播載具載重量相對比大葉桃花心木種子少很多。可見翼面的材質，對於載重量的提升，以及飛播載具飛行模式的操控，具有舉足輕重的影響。
- (2) 在實驗測量過程發現飛播載具上反角長度短於 1 公分時，此時上反角飛行反而優於下反角飛行，且下反角容易與風洞產生磨擦。根據觀察：應是風洞對翼面產生的升力，不足以抬升翼面，使得下反角反而容易與風洞磨擦而降低轉速。故飛播載具飛行時下方儘量以光滑平面飛行，阻力會比較小，這應該也是大部分種子以切面朝下的飛行方式的原因。

(七)、翼面截角面積對飛播載具旋轉飛行的影響

假設：因大葉桃花心木種子所在位置的種子端有翼面截角的現象(如下圖左)，根據重心位置就是旋轉中心，推測種子所在位置的面積如果縮小應該可以減少抗力矩(如下圖中之逆時力矩)，使載具的旋轉力矩較大，會更容易旋轉啟動。

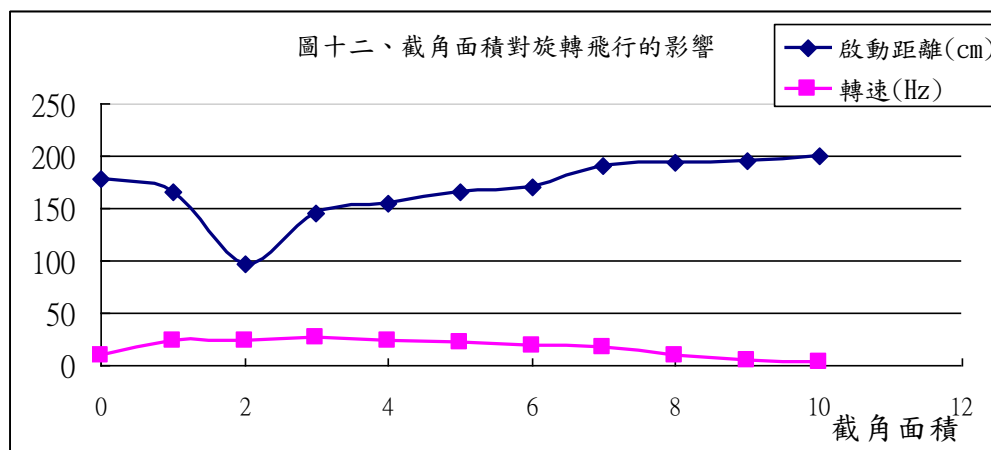


實驗步驟：

1. 為使載具更容易被環境分解，接下來載具材質改為以1號打字紙(24g/m²)及#22鐵絲(0.03g/cm)製作3*10cm之載具(鐵絲種子重：1.08g；肋痕重：0.27g；紙質翼面原重：0.072g)
2. 改變飛播載具截角的面積(截角三角形底長離邊緣0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10cm)。
3. 紀錄固定高度(216cm)鉛直拋射時，翅的旋轉啟動位置、旋轉次數。

實驗紀錄：

截角面積	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
啟動距離 (cm)	178	165	97	145	155	165	170	190	193	195	200
轉速(Hz)	1.0	2.3	2.4	2.6	2.3	2.2	1.9	1.7	1.0	0.5	0.3



根據實驗結果發現：截角面積1~5cm時(約為長度的一半)，能使載具更容易啟動旋轉，因此證實截角可以減少抗力矩。但如果截角面積過大(8~10cm)則翼面的受風面積變小，旋轉力矩也會被降低，因此載具會很快落地，而且造成旋轉啟動的距離也增長。所以適當的截角有助於載具的旋轉飛行。

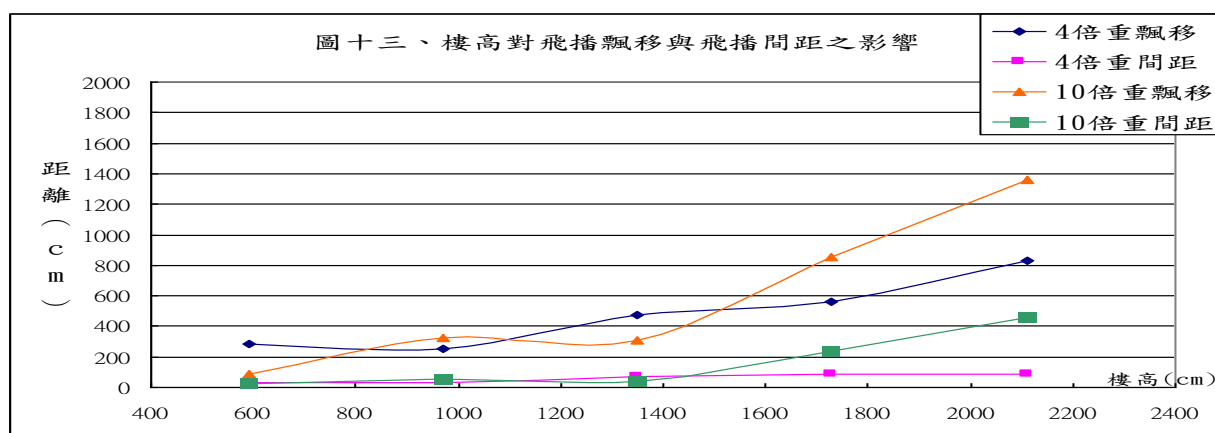
三、飛播高度對載具飄移距離與間距的影響

假設：由於植被的存在能增加邊坡整體之穩定性，相鄰根系之間的坡面表土會受到根系之侷限或束制，進而形成土拱，此土拱能減弱土壤之位移量，當根系間距越近，拱效應越能發揮擋土的作用，反之，當根系間距越寬，其植物對於邊坡安全性所能增加的影響就越有限，當植物間距大於 6m 後，安全係數增加量逐漸趨於定值(賴昇帆，2011)。因此植物飛播散布之間距以 6m 為上限，來推估可行的飛播高度與種子的載重量，應是可行的研究。

實驗步驟：於微陣風狀態的大樓中庭，高度每升高一層樓(約 3.8 公尺)自由落下 10 片種子載具，觀察及測量其散布飄移距離及間距。為符合降低環境壓力之需求，載具材料改為極易在雨季環境中分解之 1 號打字紙(24g/m²)及 #22 鐵絲(0.03g/cm)製作重量比 9cm:36cm(總重 1.38g)及 9cm:90cm(總重 3.08g)兩種載重量之飛播載具(面積為上展 5cm 下展 10cm 弦 3cm 之梯形)

結果與討論：

樓高 (cm)	4 倍載重 飄移距離	4 倍載重 間距	10 倍載重 飄移距離	10 倍載重 間距
590	287	29	87	20
970	256	35	328	55
1350	476	69	307	42
1730	560	90	854	236
2110	830	85	1356	460



- 飛播造林的效果若以 6m 的安全間距來推算，則應以 30 公尺高度(約十層樓高度)的投擲效果較佳。由載具在微陣風狀態的灑播過程發現：根據實驗數據推估，10 倍載重之載具飛播高度在 30 公尺以上時，種子間距會超出 6 公尺。4 倍載重之載具飛播高度在 100 公尺以上時，種子間距會超出 6 公尺。因此若以一般直昇機之飛播安全高度 100~200 公尺來看(王翔等，2011)，載具的設計以 4 倍載重之載具進行灑播較佳。
- 根據實驗結果，並以直升機飛播高度 100 公尺估算兩種載具之飄移距離，10 倍載重之飄移距離約 70 公尺，而 4 倍載重之飄移距離約 40 公尺。推測應是 10 倍載重之載具旋轉速率較快，滯空時間較長，因此受陣風飄移的時間增加，所以飄移的距離也比較遠。因此飛播過程陣風風速的估算也須列入考量，才能精準造林。

伍、 討論與結論

根據觀測實際種子以及人造種子模型，進行實際拋射與風洞的實驗，我們對於大葉桃花心木種子的結構如何影響旋轉飛行模式，有下列的發現：

- 一、種子的重量：種子在自由落下時，藉由重力產生相對上升風力，具有提供升力、翅的水平平衡力矩及推動翅轉動的旋轉力矩等作用。重力太小，將不易維持翅的水平平衡，除了不易穩定旋轉飛行會亂飄，也造成旋轉力矩不足，旋轉速率較慢。
- 二、種子在長度方向的重心位置：需偏向翅長度方向的一邊，有較穩定的旋轉滯空飛行。推測，可增加推動葉片旋轉的施力臂長度及推力大小。
- 三、種子在寬度方向的重心位置：需在中心略偏向翅寬度方向的一邊，才有較穩定的旋轉滯空飛行。推測，可造成翅向寬度方向的一邊傾斜，提供適當的切風角度，增加旋轉推力，延長種子的滯空時間。
- 四、種子與肋痕的重量比例：以 0.3~3.0 的重量比例範圍最佳，有較穩定的滯空旋轉飛行。推測，適當的肋痕重量可提供較大的旋轉力臂及切風角度而且不會造成翅膀增加太多的重量，此時轉速變快反而可以提高種子的載重量，這現象在生物學上屬於智慧型「模糊理論」(Fuzzy Theory)。肋痕甚至可替代種子，因為長條狀的肋痕可提供寬度方向及長度方向的重心功能，促成種子的旋轉飛行。
- 五、種子翼面必須有適當的展弦比值（翅的長寬比）：在拋射過程發現，種子翼面的展弦比在 4 至 7 的範圍內，都可獲得較大升力。推測展長影響提供升力。而在風洞測試發現，展弦比對於旋轉速率影響不大，可見旋轉速率是依賴適當的種子、肋痕與翼面重量的比值調控，也就是重心位置的調控才是旋轉速率的關鍵。
- 六、上反角：翼面末端的上反角是提供鉛直下墜的種子水平恢復力矩的構造，可修正種子的飛行姿態。拋射實驗發現上反角角度及其面積大小是主要影響因素。然而在風洞實驗中也發現下反角比上反角能提供更大升力，因此推測下反角升力大，容易造成翼面翻滾而恢復上反角狀態。在種子的風洞實驗中發現，翼面末端的上反角是提供鉛直下墜的種子水平恢復力矩的重要結構。因上反角會造成翅的上下面受風面積不同，且上反角的翅是凹面，所產生的白努利現象會造成水平下壓的力量。故上反角是提供大葉桃花心木種子水平恢復力矩的重要因素。將來翼面的上下反角也是單翼飛行器調控飛行方向的關鍵因素。
- 七、截角面積：適當剪除重心以外之翼面面積可以使載具更容易旋轉，但是截角長度不要超過全長的一半，否則會降低受風面積，進而使載具很快墜地。
- 八、由微陣風狀態之飛播實驗結果發現：載具飛播高度若以 6 公尺之水土保持間距來推算：10 倍載重之載具飛播高度限制約在 30 公尺；4 倍載重則限制約在 100 公尺。以飛播高度在 100 公尺時之飄移距離：10 倍載重之飄移距離約 70 公尺；4 倍載重則約 40 公尺。故 4 倍載重之單翼種子載具的使用，是可靠且簡便的飛播造林技術。

本研究發現模仿大葉桃花心木種子所設計之飛播造林載具，可增加滯空時間降低飛播過程種子墜地所受之損傷，進而提高飛播造林之成功率。並且載具能使飛播過程維持一定之飛播間距，尤其載具的材料選擇容易分解且便宜又方便製作的材質(打字紙及鐵絲)，故以此載具設計來改進台灣飛播造林技術是一可行之方式。

陸、 參考資料

1. 八十年來機翼的發展。盛天予。科學月刊。1980年·1月121期。節錄自：
<http://203.68.20.65/science/content/1980/00010121/0004.htm>
2. 孫銘燁，2001，告訴我一億七千萬株樹種在那，南方電子報，<http://www.esouth.org>。
3. 徐文達，2002 模型飛機的空氣動力學。節錄自：
<http://junior.cyhs.tp.edu.tw/shuwd/Aircraft%20Dynamics/chapter3-5.htm>
4. 同心協力救地球：投擲造林，2011，Discovery channel，新加坡商全球紀實有限公司。
5. 王翔，鄧依依，2011，“飛播”5天將播種造林4.7萬畝，重慶日報。節錄自：
http://big5.ifeng.com/gate/big5/biz.ifeng.com/city/chongqing/zhongqingxinwen/detail_2011_05/10/27086_0.shtml
6. 機翼的幾何參數：<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%BA%E7%BF%BC>
7. 林甫駿，飛機的構造與功能：http://public1.ntl.gov.tw/publish/sci_act/14/76.htm

【評語】 040101

本作品利用種子的結構與飛行模式的關係。其探討動機是希望透過適當並安全的播灑種子，以減少種子的傷害，相當具有實用性，其研究方法也相當完整。此實驗結果，定性的結論描述合理，唯需要做更多實驗在定量上作進一步的驗證。