

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 理化科

**第二名**

031617

撐起“一片”天---大葉桃花心木種子飛行模式的研究

學校名稱：臺中市立居仁國民中學

<p>作者：</p> <p>國一 蔡亞婷</p> <p>國一 劉錦鴻</p> <p>國一 王貞懿</p> <p>國一 鍾明叡</p>	<p>指導老師：</p> <p>蔡明致</p> <p>林傑民</p>
--	------------------------------------

關鍵詞： 重心、肋痕、上反角

# 作品名稱：撐起“一片”天-----大葉桃花心木種子飛行模式的研究

## 摘要

本試驗以大葉桃花心木種子為材料，探討種子在飛行時其結構，與三種作用力：**重力**、**升力**、**阻力**的關係，以建立種子飛行模式。

實驗中先實際觀測種子的結構與飛行模式，再以透明片與粘土模擬製作人造種子的模型，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六個結構，對於旋轉飛行模式有影響，包含：

1. **種子的重量**：提供重力**造成轉動及產生升力**。
2. **長度方向重心位置**：需偏向翅的一邊，**使施力矩大於抗力矩而穩定旋轉**。
3. **寬度方向重心位置**：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. **種子翼面需有適當的展弦比值**：**種子翼面的展弦比**在 2 至 7 可獲得較大升力。
6. **上反角**：**會改變翅的上、下面的受風面積**，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。

## 壹、 研究動機

在學校暑期科學營的觀察活動中，介紹了各種植物種子的傳播方式，其中又以大葉桃花心木的種子最令人驚艷：像是一片木造的單片螺旋槳葉，將種子拋向空中時，竟然可以像哆啦 A 夢的竹蜻蜓一樣地旋轉飄落。因此，引起我們的驚嘆與好奇，想解開到底大葉桃花心木的種子有何特殊之處？是哪些構造造成它這種飛行模式的？

首先，根據參考資料所說明種子飛行中的三種力量：**升力**、**重力**、**阻力**。假設種子飛行中的昇力主要是靠旋轉產生的氣流所造成的，而在國中自然課本中說明物體的**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的？與**重力**有何關係？再觀察飛行過程種子利用何種構造及原理來提升滯空時間？種子的翼面是否能以適當的**展弦比(翅的長寬比值)**來獲得最大升力？翼面末端的**上反角及種子切面**是否如機翼一般具有三項主要功能？(1. 轉彎。2. 修正飛行姿態。3. 增加穩定性。)。這一連串種種的疑問，對我們而言是一大挑戰！

## 貳、 研究目的

一、大葉桃花心木種子造成「旋轉所需力矩」的構造 .....	5
__ (一)、成熟大葉桃花心木「種子構造特性」的觀測。 .....	5
__ (二)、觀測「增加種子重量」對「旋轉所需的力矩」的影響。 .....	9
__ (三)、觀測增加「肋痕重量」對「旋轉所需的力矩」的影響： .....	10
二、大葉桃花心木種子「重心位置」對「飛行模式」的影響 .....	11
__ (一)、種子「重心在翅的長度位置」對「飛行模式」的影響。 .....	11
__ (二)、大葉桃花心木「種子的寬度位置」對「風洞飛行模式」的影響。 .....	14
__ (三)、大葉桃花心木種子的「肋痕長度」對「風洞飛行模式」的影響。 .....	15
__ (四)、「種子與肋痕重量比」對「風洞飛行模式」的影響。 .....	16
三、大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「飛行模式」的影響 .....	17
__ (一) 觀測大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「風洞飛行」的影響 .....	17
__ (二) 觀測大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「拋射飛行」的影響 .....	18
四、 大葉桃花心木種子的「上反角」對「飛行模式」的影響 .....	19
__ (一) 觀測大葉桃花心木種子「上反角長度」對「拋射飛行」的影響 .....	19
__ (二) 觀測大葉桃花心木種子的「上反角長度」對「旋轉啟動」之影響 .....	20
__ (三)「上反角長度」對「風洞飛行模式」的影響 .....	21
__ (四)「翅的上下反角」對「風洞飛行」的影響： .....	22
__ (五)「種子的重量」對「翅的上反角飛行模式」的影響。 .....	23

## 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、自製拋射鐵架、擺錘、油性黏土、投影片、量角器、直尺、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



大葉桃花心木種子各部結構重量的測量



水平拋射架



模擬種子的水平重心測量裝置



直流風洞實驗裝置



大葉桃花心木種子的風洞實驗



測量模擬種子的飛行高度及轉速



測量模擬種子固定高度（風速）的轉速

## 肆、 研究方法及結果

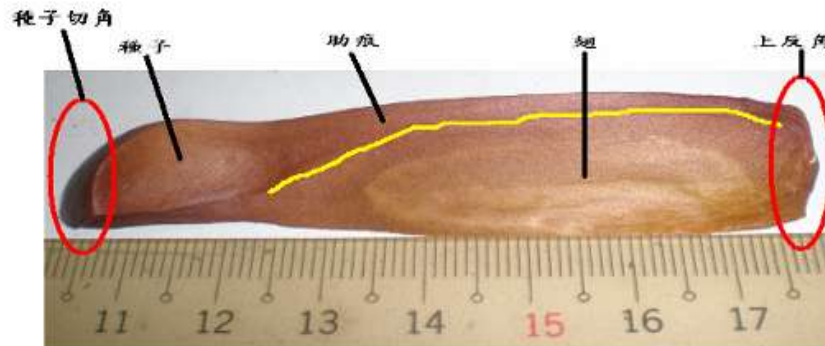
### 一、 大葉桃花心木種子造成「旋轉所需力矩」的構造

#### (一)、 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 片成熟大葉桃花心木種子，包含種子、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。

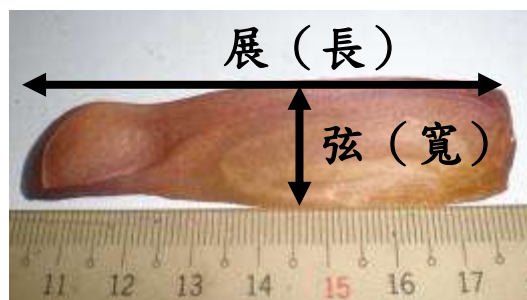
觀察結果：



	總重量(g)	整體長度(cm)	重心(cm)	翅的長寬(cm)	種子長度(cm)	種子斜切面長(cm)	種子的切角(度)	尾上反角長(cm)	尾上反角(度)	翅膀重(g)	種子重(g)	肋痕重(g)
平均	0.51	8.03	長： 1.65 寬： 0.82	長： 6.23 寬： 1.82	2.34	0.8	45.7	0.83	44.5	0.03	0.31	0.03

由以上觀測數據可知：

- A. 大葉桃花心木的種子、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。
- B. 大葉桃花心木整片種子的重心約在種子一邊離邊緣約全長 1/5 及寬度 1/2 的位置。因此，我們設計模擬實驗二，改變重心位置的模擬實驗，希望觀測重心位置對飛行模式的影響。
- C. 本實驗測量的大葉桃花心木種子的展弦比(長寬的比值)約為 5.04，符合滑翔翼的最佳展弦比。資料說明：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，由於種子上下氣流流速差異不會很大，所以展長對於白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，所以，適當的展弦比才会有最佳的升力組合。因此我們設計實驗三之一，來模擬種子的展弦比對飛行模式的影響。



- D. 大葉桃花心木種子的尾部均有上反角，平均約 0.8cm 佔全長的 1/10，上反角角度約 45 度。

## 2. 觀測大葉桃花心木種子「水平拋射」的自由飛行模式：



觀察方法：取 10 片重量及形狀相近的成熟大葉桃花心木種子。及 0.51g 重的黏土，由 2.61 公尺的鐵架上水平拋射自由掉落，測量落下至啟動旋轉所需的時間、滯空總時間、拋射黏土落地時間、旋轉方向、翅的傾斜角度、翅的旋轉角度。

觀測結果：

種子	啟動所需高度 (cm)	滯空時間 (秒)	旋轉次數	黏土拋射時 間	旋轉方 向	種子切角的水 平面向
平均	42.4	2.10	10.0	0.74	向肋痕	種子切角朝下

- A. 大葉桃花心木種子水平拋射後平均須經過 42.4 公分自由落體的加速度，才能產生足夠的風力推動翅膀，使翅維持水平受風並開始旋轉。根據拋射同重量的黏土與種子觀測制空時間的差異，實驗數據顯示種子的旋轉，能使種子在 2.61 公尺的飄落過程增加 3 倍的滯空時間。尤其種子在掉落過程，種子啟動後先快速旋轉，再轉速變慢，掉落速度也變慢，可見**種子旋轉可增加滯空時間**。
- B. 利用自由落體公式計算 42.4 公分自由落體的加速度所造成的啟動旋轉所需風速約為 2.9 公尺/秒(  $S=1/2 \times G \times T \times T$   $V^2=G \times T$   $G=9.8m/s$   $S=0.42m$   $T=0.3$   $S=$ 距離  $G$  重力加速度常數  $T$  時間)
- C. 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**。因此我們推測，**肋痕是造成種子旋轉方向重要力矩的結構**。

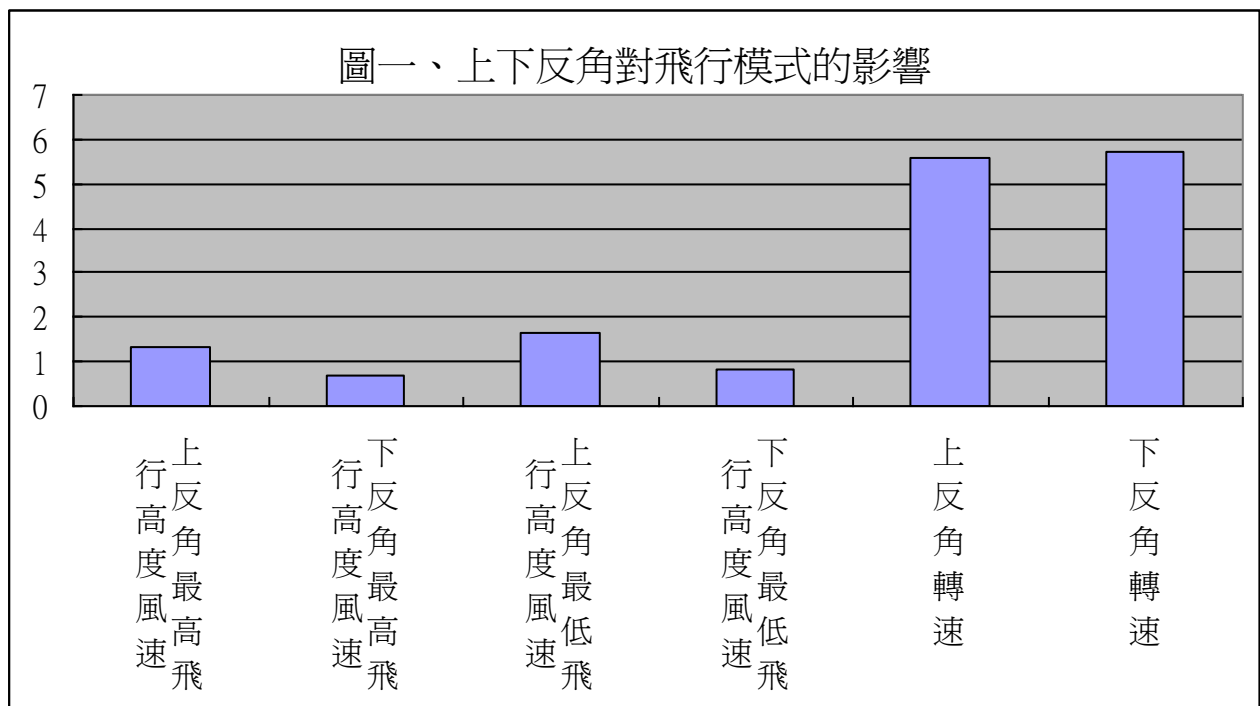
### 3. 觀察大葉桃花心木種子的「上下反角」對「風洞飛行」的影響：

觀察方法：

取重量及形狀相近的成熟大葉桃花心木種子，上反角飛行種子 5 片、下反角飛行種子 5 片，在重心位置打洞。放置在垂直風洞中測試。

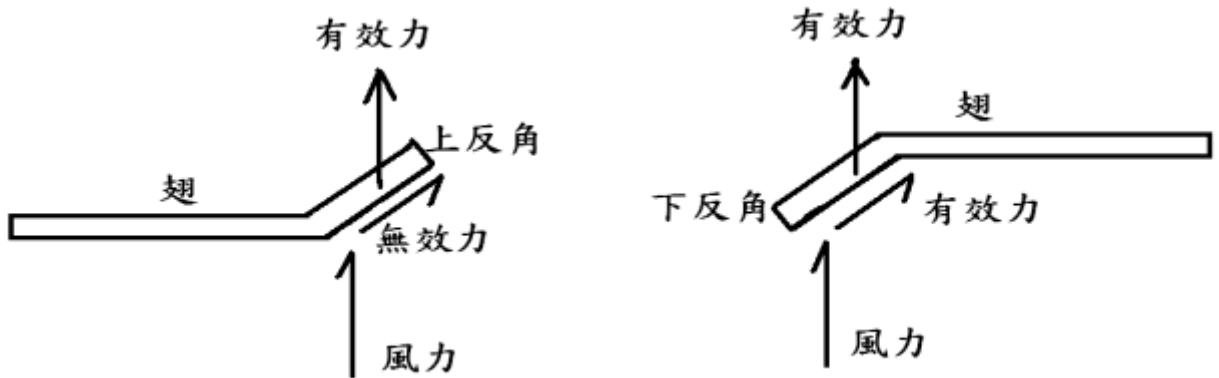
風洞中觀察結果：

編號	自然上反角旋轉面飛行				自然下反角旋轉面飛行			
	最高飛行高度風速 (m/s)	最低飛行高度風速 (m/s)	轉速 (Hz)	旋轉方向	最高飛行高度風速 (m/s)	最低飛行高度風速 (m/s)	轉速 (Hz)	旋轉方向
1.	1.6	1.7	4.63	向肋痕	0.6	0.7	5.43	向肋痕
2.	1.5	1.6	6.83	向肋痕	0.6	0.7	5.63	向肋痕
3.	1.3	1.8	4.33	向肋痕	0.7	1.0	6.33	向肋痕
4.	1.2	1.8	4.67	向肋痕	0.6	0.8	5.40	向肋痕
5.	1.1	1.3	7.50	與肋痕反向	1.0	1.0	5.80	向肋痕
平均	1.34	1.64	5.59		0.7	0.84	5.72	

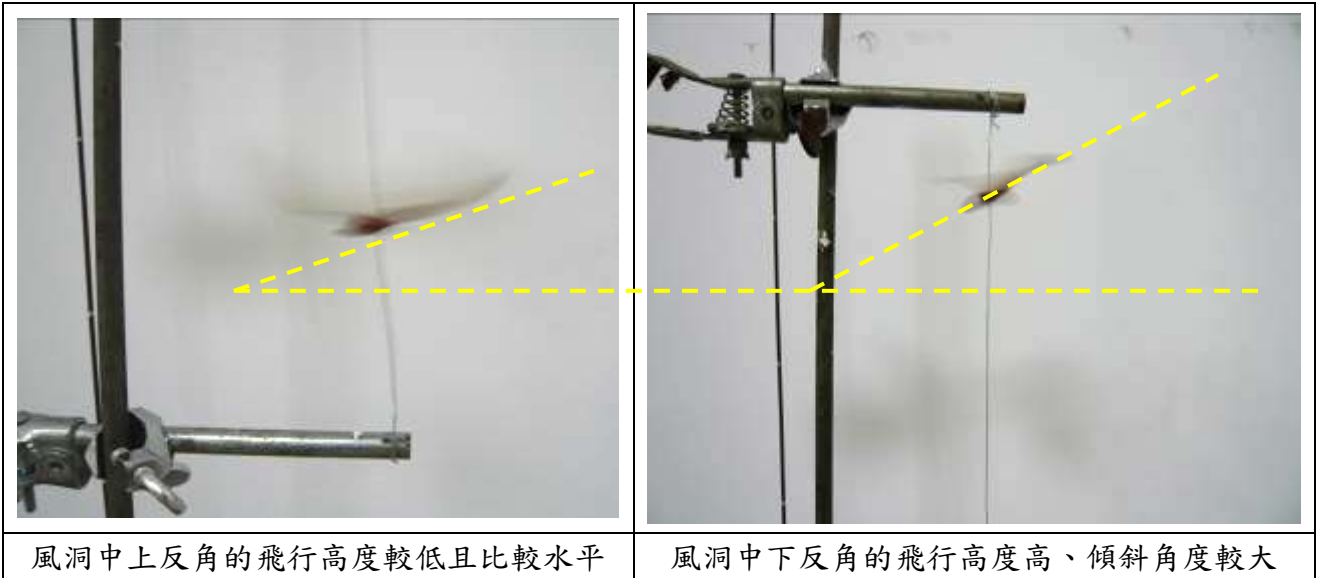


- 大葉桃花心木種子在風洞中的飛行方向不論正面或反面飛行，**大部分種子都是往肋痕方向切風旋轉**，因此我們推測，**肋痕是影響種子旋轉力矩與方向的重要結構**。
- 在風洞中，不論是最高或最低的飛行高度，上反角所需風速均大於下反角所需風速，推測上反角受風面積小於下反角的受風面積，所以需要較大的風速產生推力。
- 由同一片種子上下反角的飛行角度中發現：上反角的飛行比較水平（大約 10 度角），但是下反角的飛行角度卻將近有 45 度角。如下圖中之照片經觀察翅的飛行狀態，與翼面的構造特性，發現：**上反角的翅翼面均為下凹面，下反角的翅翼面卻是上凸面**。根據這一現象，推測下反角飛行高度較高於上反角的原因有二：應是在旋轉飛行過

程下反角部分的翼面接近水平，受風的有效力比上反角部分大（如下圖），以及下反角翅的上凹面會產生白努利原理，造成下反角飛行時的上浮力。所以根據這一現象推測：應是受受風面積及白努利原理的影響。造成下反角的飛行在轉速比上反角飛行大，下反角的飛行所需風速比上反角飛行小。



D. 由於種子切面與上下反角的朝向相反，所以種子切面並不影響旋轉面的方向。顯示種子的切面與旋轉面並無直接關係。



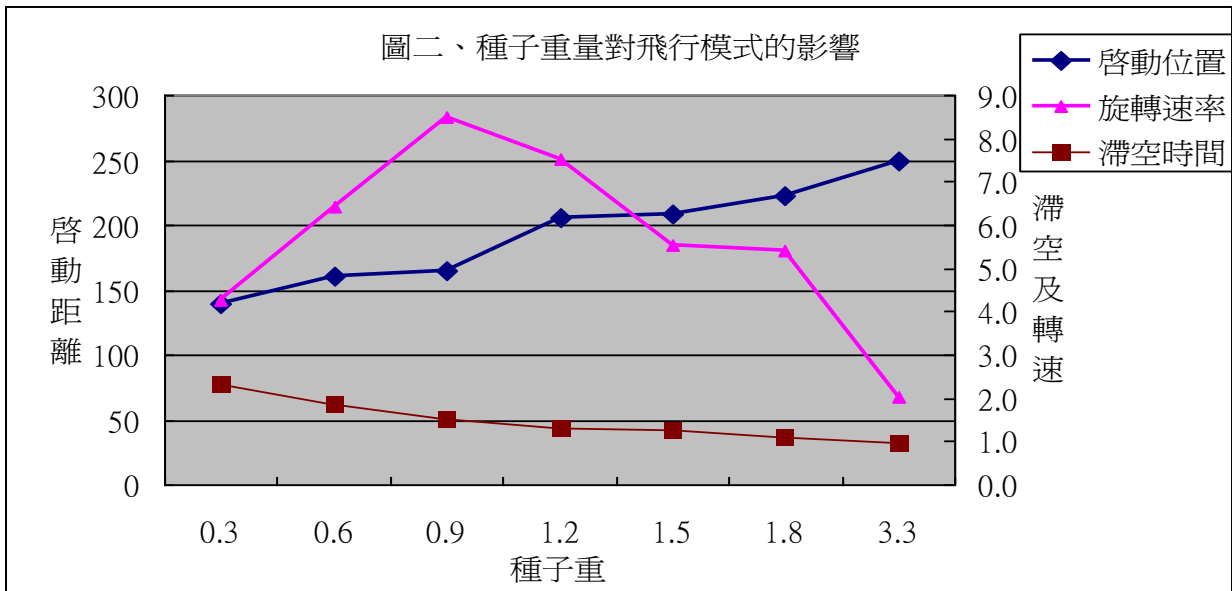


## (二)、觀測「增加種子重量」對「旋轉所需的力矩」的影響。

觀察方法：藉由觀察增加大葉桃花心木種子的重量，分析對種子拋射飛行的影響。

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	<b>8.5</b>	13	1.53
1.2	205	<b>7.5</b>	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



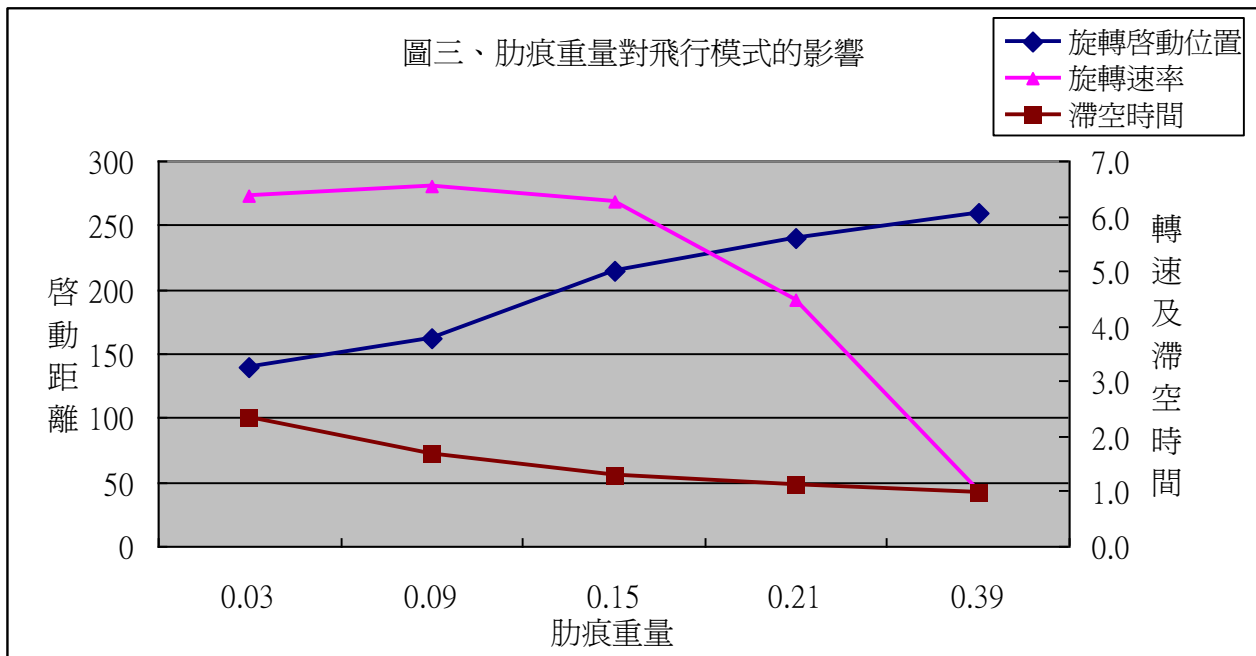
- 總重以 0.3 到 0.9 公克之間的大葉桃花心木種子的滯空時間及旋轉速率比較好，尤其以 3 倍種子的載重量的飛行效果最佳。
- 同一面積的種子，**在載重量的範圍內，增加種子的重量可提升旋轉速率，推測是因為增加重力可使風力加大，因而提升種子的旋轉推力**。但是重量越輕（重量與面積比值越小），滯空的時間越長。
- 在載重量的範圍內，同一面積的種子，種子的重量越重，種子啟動旋轉所需時間越長。推測是因為**增加重力雖使風力加大，但是種子恢復水平的抗力矩也變大，所以種子啟動旋轉所需的距離也變大**。

### (三)、觀測增加「肋痕重量」對「旋轉所需的力矩」的影響：

觀察方法：藉由觀察增加大葉桃花心木種子肋痕的重量，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)	平均旋轉次數 (次)	平均滯空時間 (秒)
0.03 (原重)	140	4.3	15	2.35
0.09	162	6.4	11	1.68
0.15	215	8.5	8	1.28
0.21	240	7.5	5	1.12
0.39	260	5.6	1	0.98



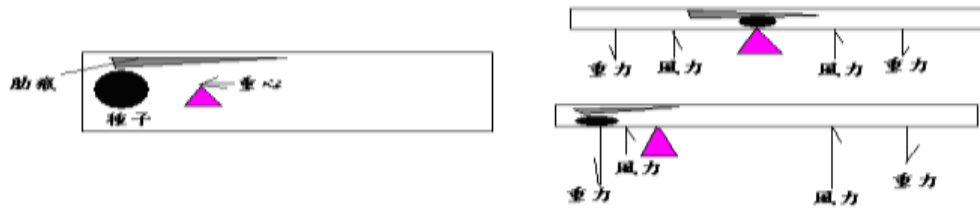
- 肋痕的重量以 0.03 到 0.09 公克之間，會使大葉桃花心木種子的滯空時間及旋轉速率比較好。
- 由肋痕的重量越大，轉速增加，推測是因為**增加肋痕的重量可增加翼面傾斜度，因而提升種子的旋轉推力**。
- 當肋痕的重量過大時，種子會快速墜落推測是肋痕的重量影響翼面傾斜度，降低種子的受風面積，使滯空時間減少。

## 二、大葉桃花心木種子「重心位置」對「飛行模式」的影響

### (一)、種子「重心在翅的長度位置」對「飛行模式」的影響。

#### 1. 觀察種子的重心位置是否會影響種子的飛行模式？

假設：種子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



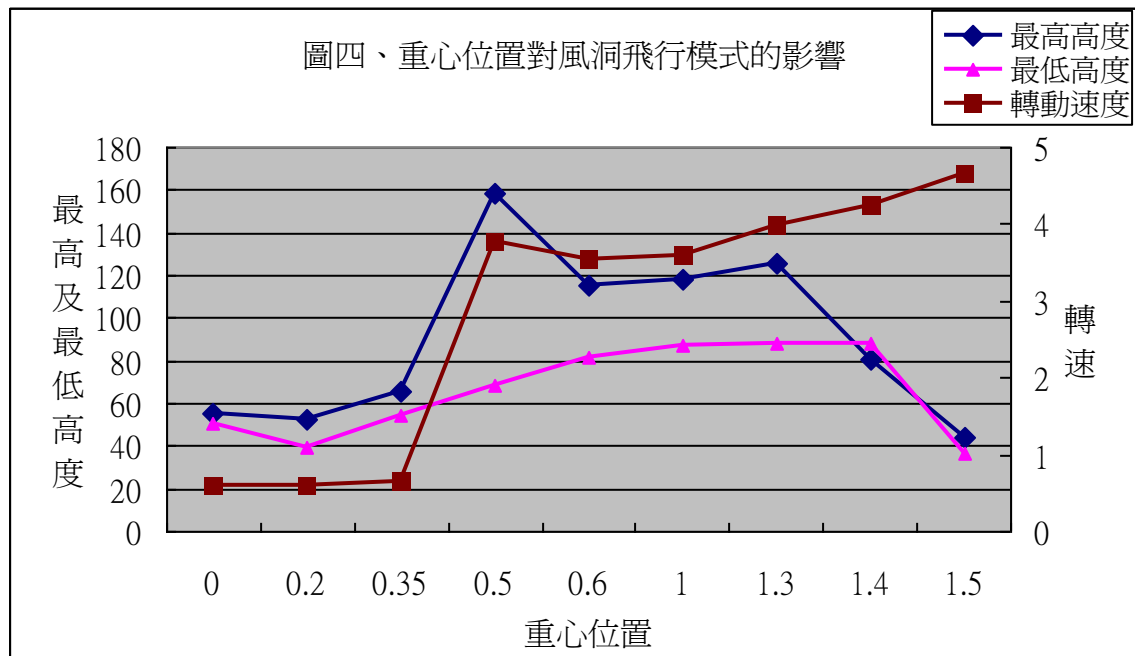
實驗步驟：

- (1)以透明片模仿大葉桃花心木製作成 2.3\*8.6 公分的翅
- (2)製作翅與種子的重量比 0.26g : 0.16g，肋痕 0.04g 長度 3cm。
- (3)改變 0.16g 種子黏土距離中心的位置後，在風洞（出口風速 2.5 m/s）觀察翅的轉動。
- (4)測量 5 次的翅轉動方向、轉動速度和飛行高度。

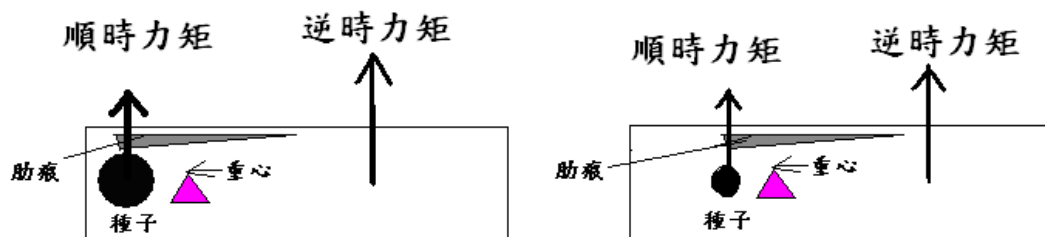


實驗結果：

種子位置 (cm)	重心位置 (cm)	轉動方向	最高高度 (cm)	最低高度 (cm)	轉動速度 (Hz)	備註
0	0	往肋痕	55.5	50.5	0.61	不易轉動
0.5	0.2	往肋痕	52.2	39.8	0.61	不易轉動
1.0	0.35	往肋痕	65.5	54.5	0.64	不易起飛
1.5	0.5	往肋痕	158.1	68.2	3.77	很會飛
2.0	0.6	往肋痕	115.5	81.2	3.55	很會飛
2.5	1.0	往肋痕	117.8	87.4	3.59	啟動慢
3.0	1.3	往肋痕	125.4	88.0	3.98	啟動慢
3.5	1.4	往肋痕	81	88.0	4.24	飛行高度不穩定
4.0	1.5	往肋痕	43.9	36.4	4.65	飛行高度不穩定

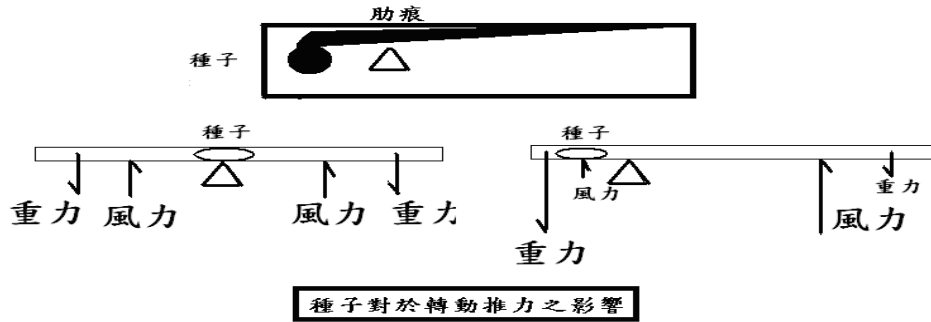


- A. **重心離翅的中心越遠時，逆時針力矩與順時針力矩的差距越大，越易旋轉。** 因此實驗證實原先的假設。
- B. 但是最好的飛行高度範圍發生在重心距離翅的中心 0.5 到 1.4cm 之間(距離中心約全長 1/16 至 3/16)有較高的飛行狀態，但卻無規律性。推測應是種子有一定的載重範圍，因為重心太接近翅的中心時，逆時針力矩與順時針力矩的差距越小，容易互相抵消形成合力矩為零，此時翅不易轉動，會形成左右晃動的滑翔狀態。所以，重心應在翅的中心與邊緣之間，而且因載重量的不同而有不同的最佳重心位置，推測為種子越重，則**重心應離中心越遠才會有足夠的旋轉力矩及升力**。如下圖：



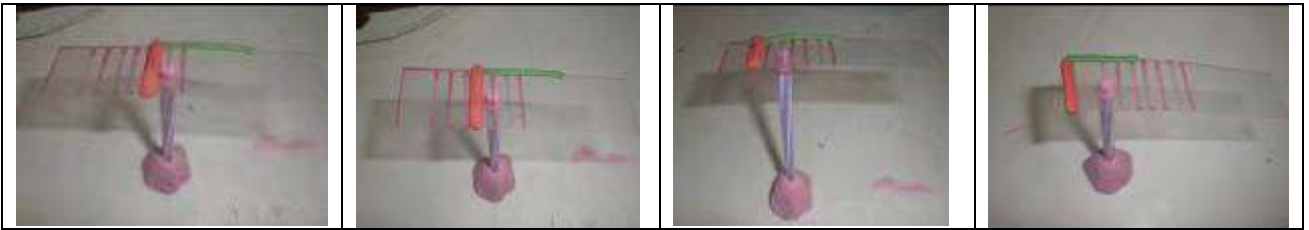
- C. 人工模擬種子與天然種子及肋痕的重量相同，卻無法產生天然種子自由落下時的旋轉效果。根據推測應是真實翅的重量為 0.03g，但是相同面積的透明片卻重達 0.26g，因此 0.16g 的粘土種子比透明片還要輕，無法提供足夠的旋轉力矩。也就是**種子的重量必須提供足夠的重力，使種子在墜落過程，能達到一定的風速，之後才能產生足夠的旋轉力矩啟動翅的旋轉。**

## 2. 增加種子重量觀測在長度方向的最佳重心位置是否遠離中心



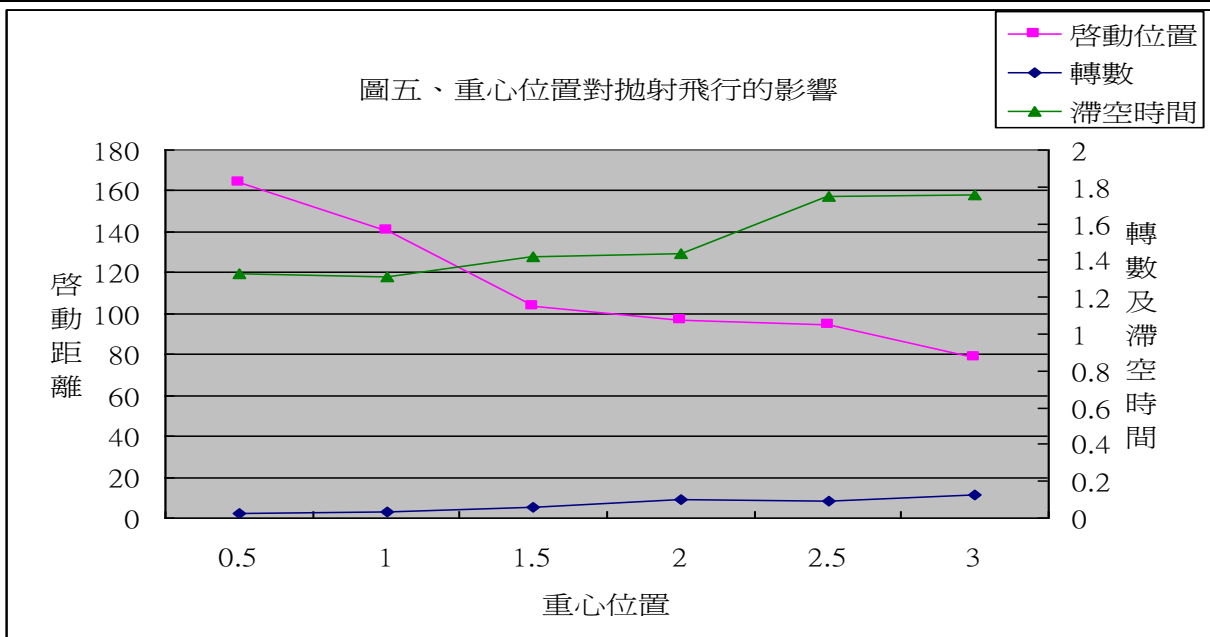
實驗步驟：

- (1) 改變種子長度方向的重心位置 (離中心 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0cm)。
- (2) 紀錄固定高度及拋射力量時，5 次翅的旋轉啟動位置、滯空時間。



實驗紀錄：種子重=0.52g；翅重=0.26g；肋痕重=0.26g

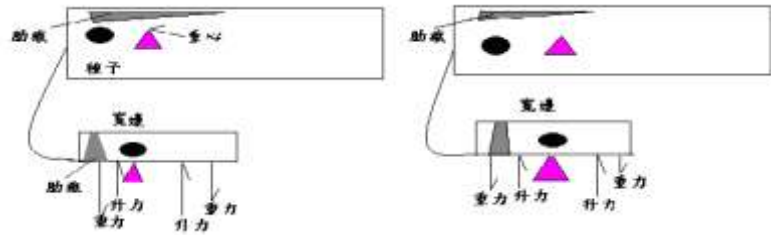
重心 (cm)	旋轉啟動位置 (cm)					平均	旋轉次數 (次)					平均	滯空時間 (秒)					平均
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0.5	169	174	164	159	174	164	2	2	3	2	2	2.2	0.97	1.08	1.06	1.11	1.22	1.33
1.0	129	129	144	144	159	141	2	2	3	4	3	2.8	1.01	1.6	1.57	1.25	1.12	1.31
1.5	101	108	108	99	101	103.4	5	6	6	5	5	5.4	1.47	1.54	1.29	1.47	1.33	1.42
2.0	100	92	98	99	95	96.8	10	9	9	9	9	9.2	1.31	1.49	1.66	1.33	1.44	1.44
2.5	87	95	94	100	97	94.6	8	8	9	9	9	8.6	1.67	1.70	1.80	1.80	1.78	1.75
3.0	80	82	79	76	78	79	11	11	10	11	11	11	1.86	1.64	1.65	1.87	1.79	1.76



- A. 將種子由 0.16g 增為 0.52g 進行改變重心位置的觀測。觀測結果發現：重心位置越離開中心，不論是轉動次數及滯空時間，都逐漸增加；旋轉啟動的時間也變短了。
- B. 由此可知，種子要旋轉需要有足夠的重量產生加速度以提供適當的風力來推動葉片。
- C. 重心越偏離長度中心，施力矩與抗力矩之差越大(施力矩大於抗力矩)，轉數越高。

## (二)、大葉桃花心木「種子的寬度位置」對「風洞飛行模式」的影響。

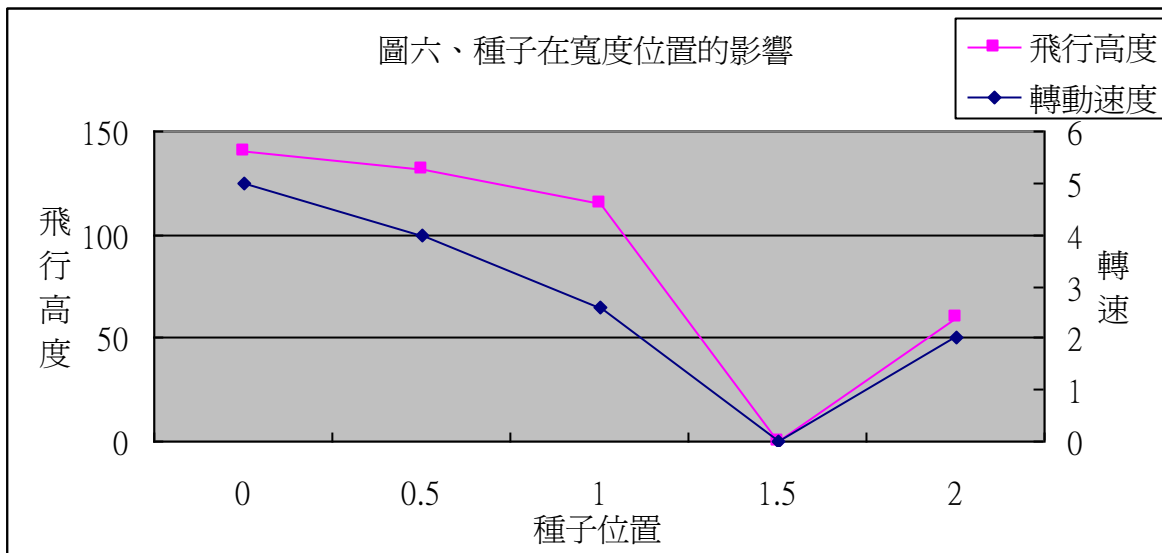
假設：種子的重心在寬度位置中間但偏肋痕→受風面積→風力大小不平均→使薄翅傾斜→影響翅轉動面的角度→受風面積大小不相等→風力大小不平衡→造成翅的轉動推力



實驗步驟：

1. 在風洞（出口風速 3.3 m/s）觀測大葉桃花心木種子的最佳寬度重心位置測
2. 改變 0.52g 黏土的寬度位置測量在風洞的飛行高度與固定高度之旋轉速度。
3. 實驗結果：

黏土位置 (cm)	飛行高度 (cm)	轉動速度(Hz)	轉向
0	140	5.0	向肋痕轉動
0.5	132	4.0	向肋痕轉動
1	115	2.6	向肋痕轉動
1.5	0	0	不轉動
2.0	60	2.0	向肋痕反方向轉動

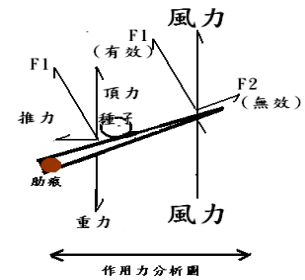
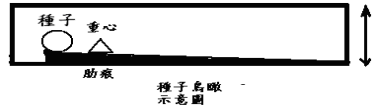


- A. 由實驗發現種子的重心偏向肋痕一方時，會有較好的旋轉速度與飛行高度。
- B. 當種子重心在距離肋痕 1.5 公分處，也就是重心偏離翅的中心位置，並在肋痕的另一邊，此時種子會造成重心在翅寬度方向的中心位置時，此時種子無法在風洞中旋轉，而直接墜落。
- C. 當種子完全偏向肋痕的另一邊時，因為種子的重量比肋痕重，所以此時翅往種子方向旋轉，由此可見重心位置偏向一邊時，種子才能得到適當的旋轉力矩，種子的重心的偏向即為種子旋轉的方向。

### (三)、大葉桃花心木種子的「肋痕長度」對「風洞飛行模式」的影響。

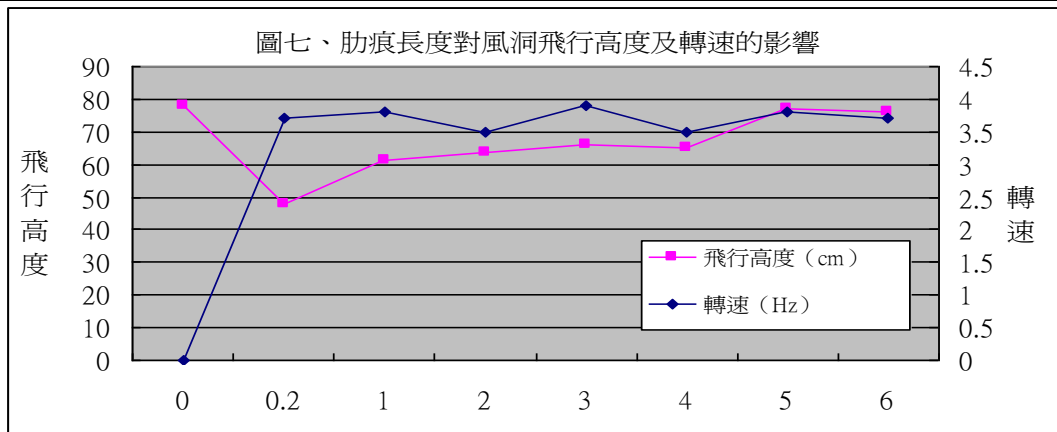
假設肋痕長度大小的影響有二：

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：固定種子黏土重=0.16g；肋痕黏土重=0.04g；出風口風速=2.5m/s

肋痕長度 (cm)	翅轉動方向	平均高度 (cm)	固定高度 (43cm) 的轉速 (Hz)
0	左右晃動	78	0
0.2 (球體)	向肋痕方向	48.0	3.7
1.0	向肋痕方向	61.3	3.8
2.0	向肋痕方向	63.8	3.5
3.0	向肋痕方向	66.3	3.9
4.0	向肋痕方向	65.3	3.5
5.0	向肋痕方向	77.3	3.8
6.0	向肋痕方向	76.0	3.7

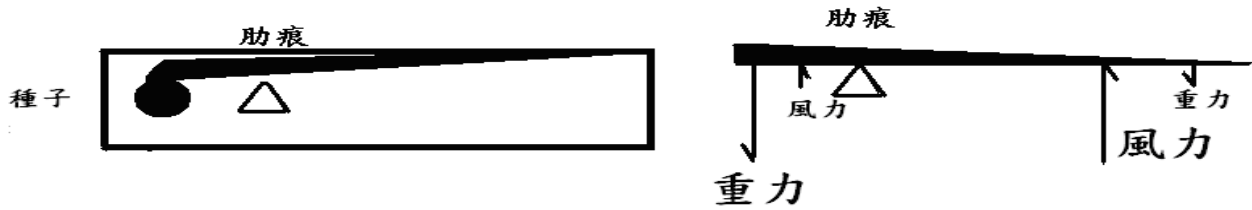


- A. 由**肋痕越長飛行高度越高**，推測應是肋痕越長會使翅的重量分布均勻，**翅在水平方向有較平的旋轉角度**。
- B. 但是由**肋痕長度對轉速之影響不大**，推測相同重量的肋痕對於重心在翅的寬度位置改變有限，因此肋痕長度對轉速之影響不大。
- C. 但是，**有助痕的翅比較沒有肋痕的翅容易啟動旋轉**，推測應是旋轉力臂增長，且肋痕使翅的重心略向肋痕方向偏移，而有適當的切風角度，方便風力對翅產生旋轉推力。

#### (四)、「種子與肋痕重量比」對「風洞飛行模式」的影響。

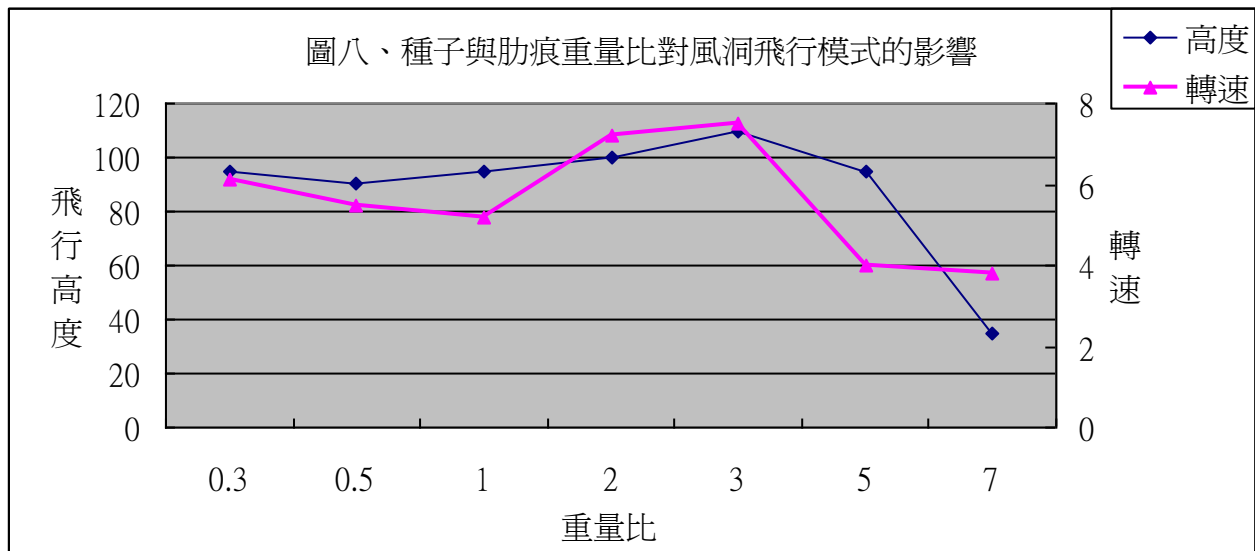
實驗步驟：

1. 改變種子重量與肋痕重量比例 (0.3、0.5、1、2、3、5、7)。
2. 在風洞飛行中 (出風口風速 3.3m/s) 紀錄 5 次，飛行高度、旋轉速率。



肋痕對於轉動力臂之影響

種子及肋痕重量比	平均飛行高度 (cm)	平均轉動速度(Hz)	轉向
0.3	95	6.1	向肋痕轉動
0.5	90	5.5	向肋痕轉動
1	95	5.2	向肋痕轉動
2	100	7.2	向肋痕轉動
3	110	7.5	向肋痕轉動
5	95	4.0	向肋痕轉動
7	35	3.8	向肋痕轉動

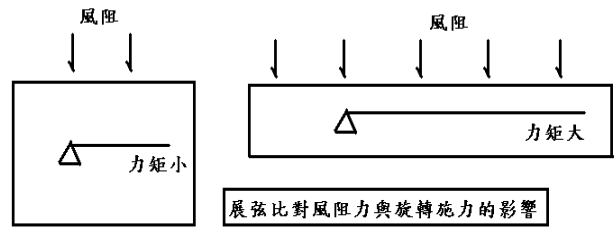
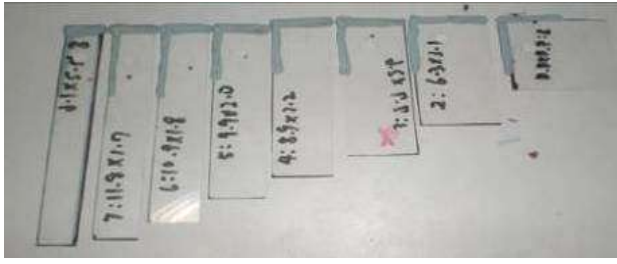


- A. 實驗結果發現：種子與肋痕的重量比值越高，旋轉飛行時的轉速及高度都變差。尤其實驗中發現重量比值越高，種子越不易啟動旋轉。因此更可以證明肋痕可提供種子旋轉所需的力矩。推測適當比例的肋痕重量可增加翼面傾斜度，增加旋轉推力，飛行高度因而增加。
- B. 由種子與肋痕的重量比值在 0.3 與 3 的旋轉飛行效果良好可以發現：肋痕可以取代種子對長度重心位置的影響。可見在影響種子旋轉飛行的構造中，肋痕的角色比種子重要。



### 三、大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「飛行模式」的影響

#### (一) 觀測大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「風洞飛行」的影響

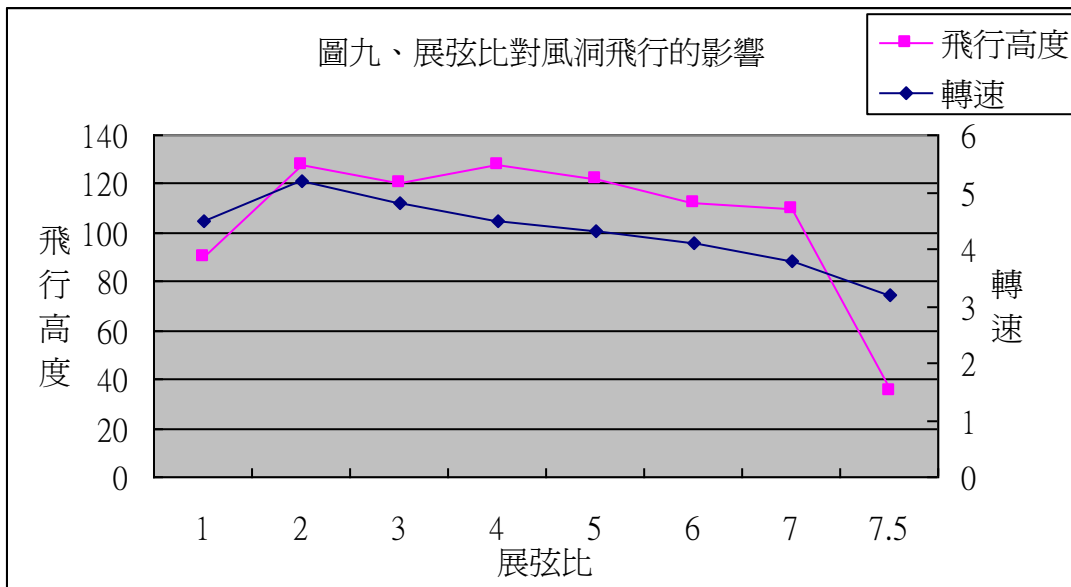


實驗步驟：

1. 測量大葉桃花心木種子、種子重=0.52g；翅重=0.26g；肋痕重=0.26g
2. 改變種子的展弦比（1、2、3、4、5、6、7），在出風口風速 3.3m/s 的風洞觀察
3. 紀錄固定風速時，測量 5 次飛行高度及旋轉速率。

實驗紀錄：固定面積（ $8.6 \times 2.3 = 19.78 \text{ cm}^2$ ）改變長寬比寬

展弦比	長 (cm)	寬 (cm)	平均飛行高度 (cm)	平均轉速 (Hz)
1	4.4	4.4	90	4.5
2	6.3	3.1	128	5.2
3	7.7	2.6	120	4.8
4	8.9	2.2	128	4.5
5	9.9	2.0	122	4.3
6	10.9	1.8	112	4.1
7	11.8	1.7	110	3.8
7.5	12.2	1.6	35	3.2



- A. 展弦比在 2 到 7 之間都有較高的飛行高度，符合滑翔機 4.5 到 5.5 最佳比例的範圍。但是展弦比越長越不易起動，必須掉落較長的距離之後才能得到足夠的旋轉力矩。
- B. 展弦比越長旋轉速率越小，推測應是展越長提供昇力所需的面積越大，但是影響旋轉的阻力也越大，所以旋轉速率因此越小。

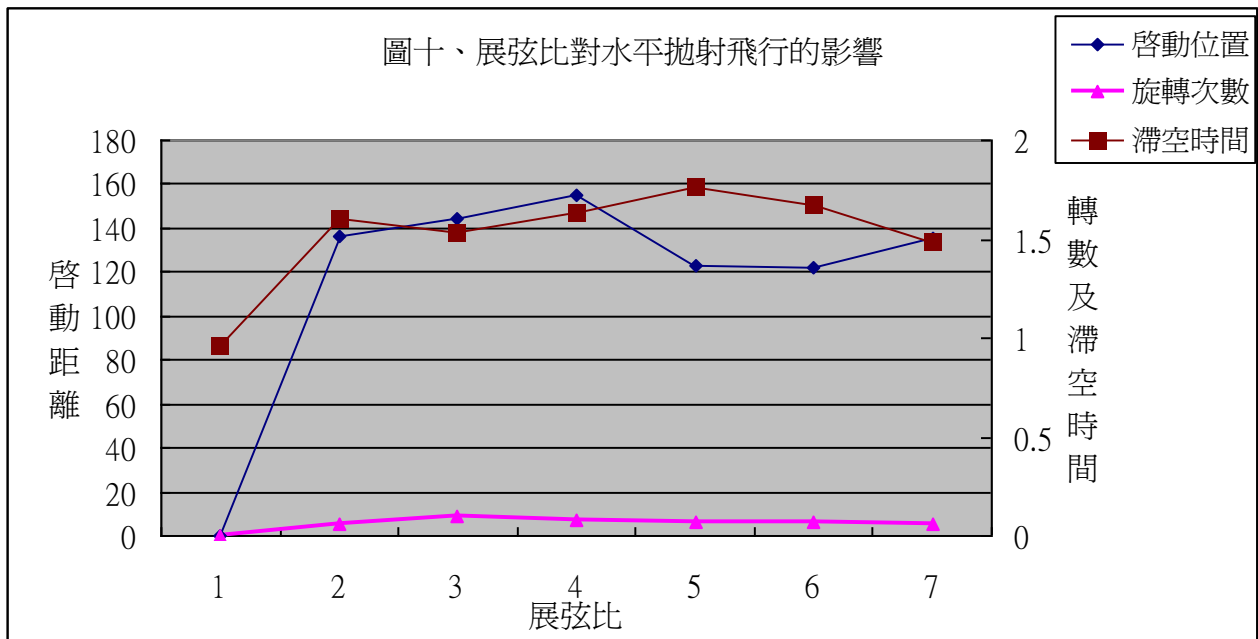
## (二) 觀測大葉桃花心木種子「翅的展弦比」對「拋射飛行」的影響

實驗步驟：

1. 改變種子的展弦比 (1、2、3、4、5、6、7)。
2. 紀錄固定高度及拋射力量時，翅的旋轉啟動位置、旋轉次數、滯空時間。

展弦比在水平拋射的觀測結果：

展弦比	旋轉啟動位置 (cm)					平均	旋轉次數 (次)					平均	滯空時間 (秒)					平均
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.04	0.88	0.98	0.92	0.99	0.962
2	149	137	136	127	131	136	5	4	6	6	6	5.4	1.31	1.57	1.78	1.59	1.76	1.602
3	147	138	149	143	145	144.4	8	9	9	8	9	8.6	1.41	1.33	1.72	1.69	1.51	1.532
4	157	158	159	148	155	155.4	6	7	7	6	8	6.8	1.63	1.33	1.75	1.68	1.79	1.636
5	128	131	129	110	119	123.4	6	6	7	6	8	6.6	1.63	1.76	1.75	1.68	1.99	1.762
6	124	119	128	119	120	122	7	7	7	6	6	6.6	1.74	1.65	1.79	1.62	1.57	1.674
7	139	149	130	129	129	135.2	5	6	5	6	4	5.2	1.17	1.62	1.61	1.62	1.4	1.484



- A. 展弦比在 2 到 7 之間都有較高的飛行高度，符合滑翔機 4.5 到 5.5 最佳比例的範圍。但是**弦越長越不易起動旋轉**。推測應是**展越長提供昇力所需的面積越大，影響旋轉的阻力越大**，所以不易啟動旋轉。
- B. 在拋射過程，展弦比為 1 的正方形非常不易旋轉，推測應是力臂變大的情況下，肋痕的重量稍有變化就會造成翼面過度傾斜，而無法旋轉飛行。因此可知，**以力矩的觀念來看：力臂越短，作用力大小（載重）的範圍越大，這現象屬於生物界的模糊理論 (Fussy theory)**。這就是**種子的位置偏向翅的一端能提高載重量的原因**。

#### 四、大葉桃花心木種子的「上反角」對「飛行模式」的影響

##### (一) 觀測大葉桃花心木種子「上反角長度」對「拋射飛行」的影響

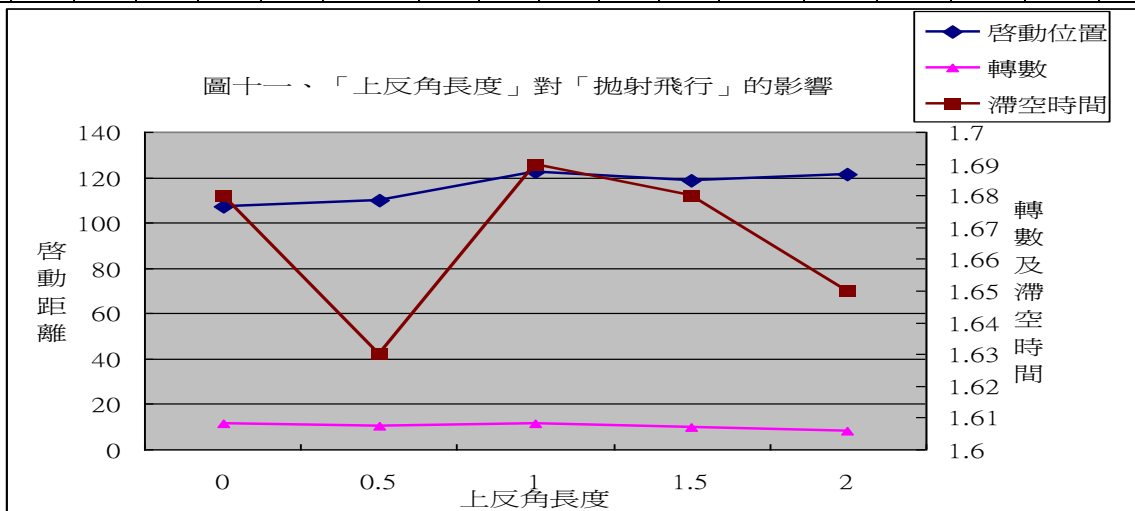


實驗步驟：

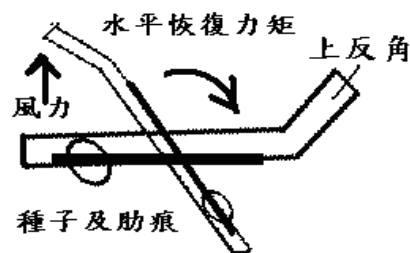
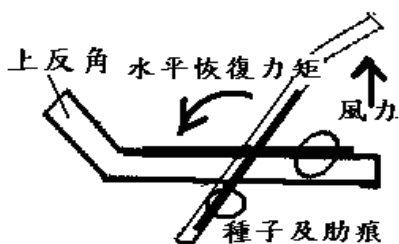
1. 改變種子上反角的長度 (離邊緣 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5cm)。
2. 紀錄固定拋射器在 216 公分高度及拋射力量時，旋轉啟動位置、旋轉次數、滯空時間。

(一) 種子上反角的長度在水平拋射觀測實驗結果：

上反角長	旋轉啟動位置 (cm)					平均	旋轉次數 (次)					平均	滯空時間 (秒)					平均
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	107	104	104	108	112	107	12	11	11	12	11	11.4	1.62	1.75	1.74	1.63	1.68	1.68
0.5	110	112	113	107	108	110	12	11	9	10	11	10.6	1.64	1.72	1.62	1.58	1.63	1.63
1.0	134	120	114	119	126	122.6	11	12	11	11	12	11.4	1.73	1.73	1.72	1.60	1.68	1.69
1.5	130	110	113	112	127	118.4	10	10	10	10	10	10	1.60	1.60	1.79	1.75	1.69	1.68
2.0	139	134	110	114	109	121.2	8	7	9	9	9	8.4	1.74	1.61	1.57	1.64	1.72	1.65



- A. 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。
- B. 在水平拋射過程，上反角的長度大小，對於滯空時間的影響並不大。
- C. 種子的旋轉飛行過程，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) 1 公分以上時，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。飛行時，種子的上反角只提供種子恢復水平狀態的旋轉力矩，並不改變種子旋轉面的方向。水平恢復力矩的作用說明如下圖：



## (二) 觀測大葉桃花心木種子的「上反角長度」對「旋轉啟動」之影響

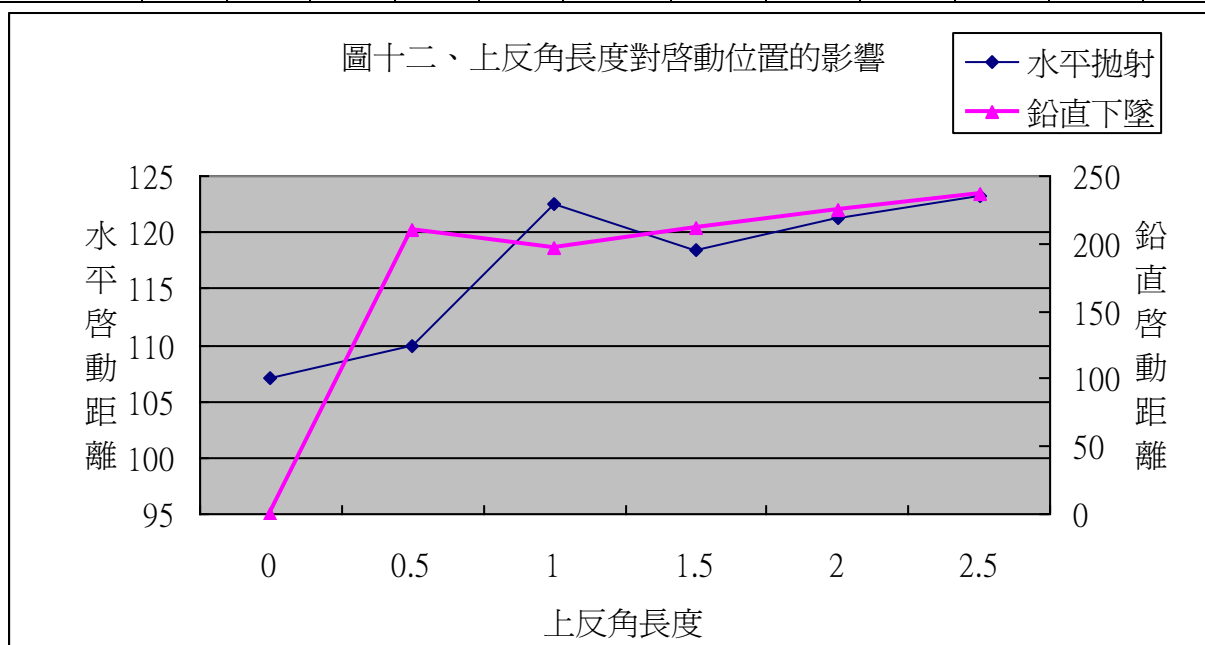
實驗步驟：

1. 改變種子上反角的長度（離邊緣 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5cm）。
2. 紀錄固定高度及拋射力量時，翅的旋轉啟動位置、旋轉次數、滯空時間。

實驗紀錄：種子重=0.52g；翅重=0.26g；肋痕重=0.26g

水平拋射及鉛直下墜的觀測實驗結果：

上反角長 (cm)	水平拋射啟動距離 (cm)					平均	鉛直下墜啟動距離 (cm)					平均
0	107	104	104	108	112	107	0	0	0	0	0	0
0.5	110	112	113	107	108	110	222	193	210	217	207	209.8
1.0	134	120	114	119	126	122.6	197	200	189	193	204	196.6
1.5	130	110	113	112	127	118.4	217	214	210	209	207	211.4
2.0	139	134	110	114	109	121.2	230	227	218	223	226	224.8
2.5	125	121	134	114	122	123.2	249	210	253	230	240	236.4



- A. 比較種子水平拋射及鉛直下墜啟動旋轉所需的高度，**上反角的長度對於水平拋射影響不大，只略為增加啟動所需的距離。**
- B. 但是在鉛直下墜的觀察實驗中時，有時候沒有上反角的翅，會直接墜地，無法旋轉。可見**上反角提供種子在鉛直下墜過程能恢復水平狀態的旋轉力矩**，避免種子直接墜地。

### (三)「上反角長度」對「風洞飛行模式」的影響

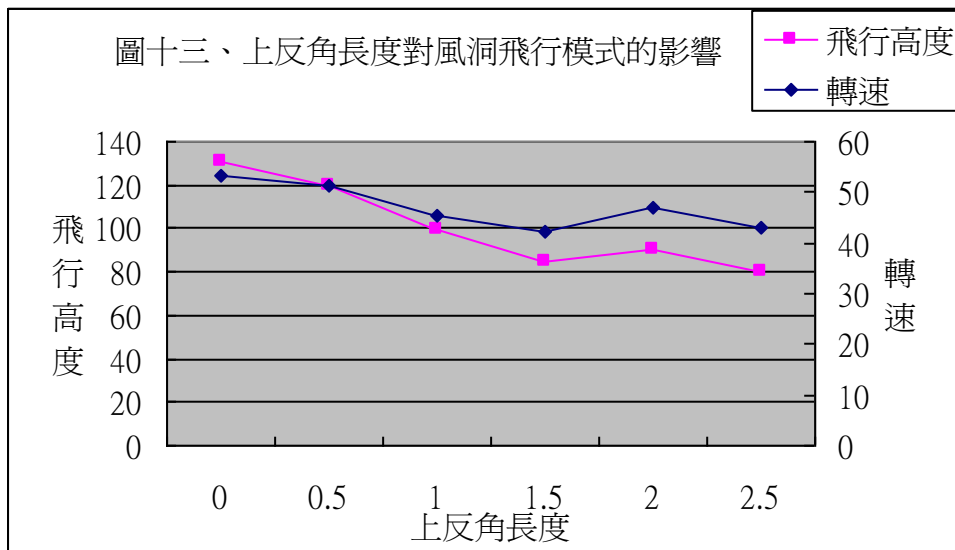
實驗步驟：

1. 改變種子上反角的長度（離邊緣 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5cm）。

2. 紀錄固定出風口風速（3.3m/s）時，種子的飛行高度與旋轉次數。

實驗紀錄：種子重=0.52g；翅重=0.26g；肋痕重=0.26g

上反角長 (cm)	飛行高度 (cm)					平均	轉速(每 10 秒次數)					平均
0	130	125	135	132	130	130.4	53	54	50	57	52	53.2
0.5	120	122	118	124	115	119.8	53	49	50	51	53	51.2
1.0	105	98	92	102	100	99.4	45	46	43	45	47	45.2
1.5	85	82	83	85	87	84.4	42	43	44	42	41	42.4
2.0	90	91	95	85	89	90	46	46	48	49	45	46.8
2.5	80	78	79	82	80	79.8	42	43	45	44	42	43.2



- A. 45 度角的上反角越長，飛行高度越低，可見上反角雖然提供恢復水平旋轉的力矩，但是卻減少提供升力的受風面積。
- B. 45 度角的上反角越長，旋轉的轉速越低，應是上反角佔的面積越長則減少提供旋轉力矩的切風面積，因而減少風的推力，進而降低翅的轉動力矩。
- C. 以目前觀測結果，45 度角的上反角要提供適當的水平恢復力矩並且能維持原有的飛行模式，上反角長度需長 1 公分以上（含），才能提供足夠的水平恢復力矩。不過，根據推測，上反角所需的長度要提供水平恢復力矩，應與種子重量所造成的抗力矩成一定比例，所以種子不需固定的上反角長度。

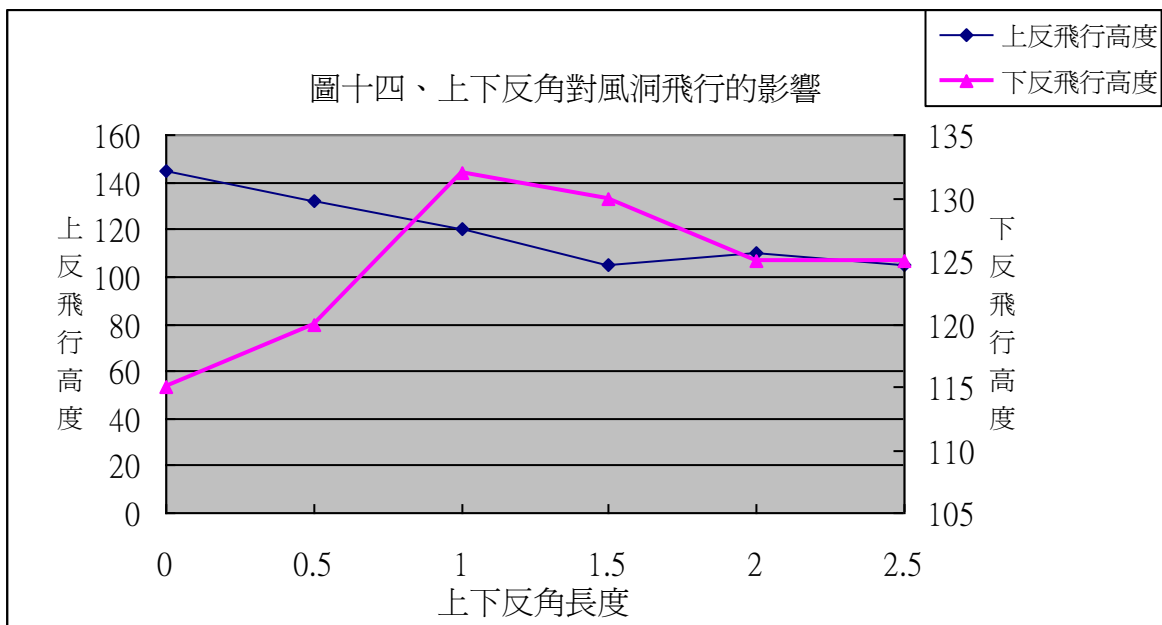
#### (四)「翅的上下反角」對「風洞飛行」的影響：

實驗步驟：

1. 改變種子上反角的長度（離邊緣 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5cm）。
2. 紀錄固定出風口風速（3.3m/s）時，種子的飛行高度與旋轉次數。

實驗紀錄：種子重=0.52g；翅重=0.26g；肋痕重=0.26g

上反角長度 (cm)	上反飛行高度 (cm)	下反飛行高度 (cm)
0	145	115
0.5	132	120
1	120	132
1.5	105	130
2	110	125
2.5	105	125



- A. 上反角越長，則下反角飛行的高度會高於上反角飛行的現象越明顯。
- B. 依照白努利原理，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，上反角的飛行高度較低。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，下反角的飛行高度較高。
- C. 上反角長度短於 1 公分時，此時上反飛行反而優於下反飛行，推測應是：種子的位置及突出的形狀會阻礙飛行，所以，種子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。

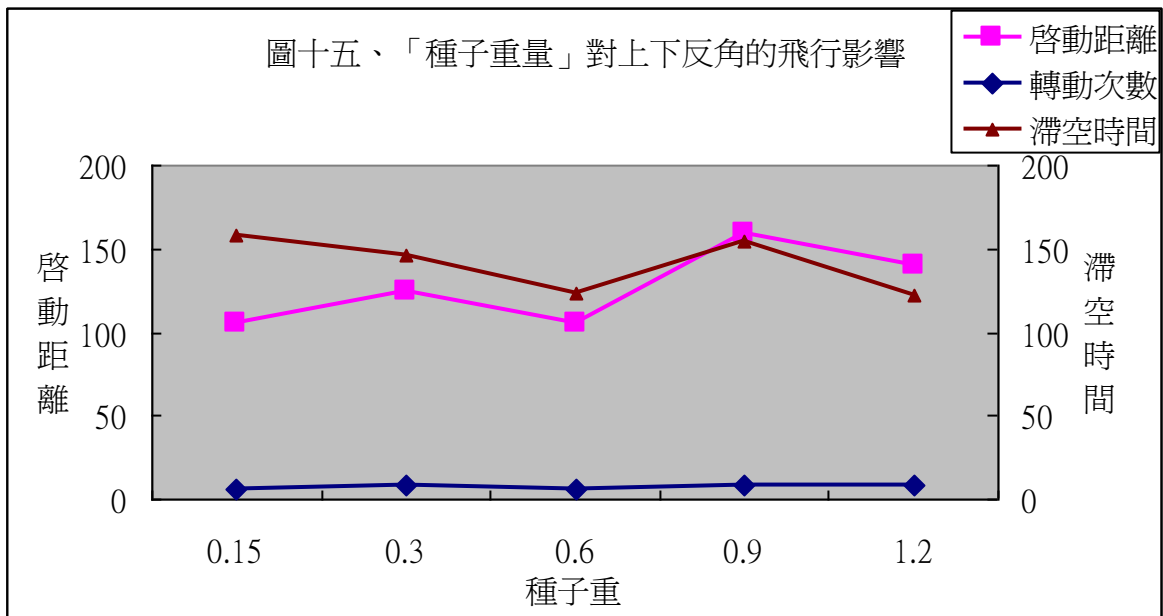
### (五)「種子的重量」對「翅的上反角飛行模式」的影響。

實驗步驟：

1. 改變種子的重量 (0.15、0.3、0.6、0.9、1.2g)。
2. 紀錄固定高度及拋射力量時，翅的旋轉啟動距離、旋轉次數、滯空時間、及旋轉面方向。

水平拋射的觀測實驗結果：翅重=0.26g；肋痕重=0.26g

黏土重量 (cg)	啟動距離 (cm)	轉動次數	滯空時間 (秒)	旋轉面方向
0.15	105.7	5.7	157.7	上反角
0.3	125.0	8.3	146.3	上反角
0.6	105.3	6.3	123.7	下反角
0.9	159.0	8.3	154.0	下反角
1.2	140.7	8.3	122.3	下反角



- A. 種子越重旋轉飛行的啟動距離越大，推測應是抗力矩越大則啟動旋轉所需力矩越大，所以必須較大風速才能啟動。但是當種子重量超過平均重量兩倍時，飛行方式變成下反角旋轉時，受有效風力的風面積變大，而且因白努利原理產生上升力量，因而使旋轉啟動所需風速變小，故啟動的距離變短。
- B. 上下反角的飛行對於轉動次數似乎沒有明確的影響。這一現象與前面實驗中發現影響轉動次數的變因，應以「種子重心在長度的位置」以及「肋痕造成翅在寬度方向的傾斜」有關。

## 伍、 討論與結論

根據觀測實際種子以及投影片與粘土模擬製作的人造種子模型，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)**：在風洞測試發現，**種子翼面的展弦比**在 2 至 7 的範圍內，都可獲得較大升力。推測**展長影響提供升力的面積**，**弦長影響上下風速流速的差異**，所以對於提升升力而言，展長的影響會比弦長大。而拋射過程亦發現**展越長提供升力越大**。此外，**展弦比為 1 的正方形最不易旋轉**，推測應是肋痕的力臂過大，寬度的重心位置不易控制適當的會使翼面傾斜度過大而直接墜落。此外**種子的位置偏向翅的一端能提高載重量的原因**
- 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**。因為**上反角會造成翅的上下面受風面積不同**，而且**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**。因此**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**。

根據本次的研究，我們未來將規劃：**肋痕影響翼面傾斜角度的觀測方法及調控方式**，以及**傾斜角度以及上反角的白努利原理對飛行浮力影響的計算**。並且希望能**利用大葉桃花心木種子的飛行原理，精準控制單翅飛行器**，進而**應用於小型單翅飛行器及微型滯空遙測技術**。



## 陸、 參考資料

機翼的幾何參數：<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%BA%E7%BF%BC>

飛機的構造與功能，林甫駿，

[http://publicl.ntl.gov.tw/publish/sci\\_act/14/76.htm](http://publicl.ntl.gov.tw/publish/sci_act/14/76.htm)

賽嘉飛行展：

<http://library.taiwanschoolnet.org/cyberfair2005/efs94/page-2/page-2-2-4.htm>

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>

深藍航空暨太空總署：

<http://www.student.tw/db/archive/index.php?f-494.html>

桃園縣建國國小飛行小常識：

[http://163.30.84.1/~playgame/theme\\_25.html](http://163.30.84.1/~playgame/theme_25.html)

**【評語】** 031617

1. 主題採用鄉土植物之種子，且建立合理之理論模型，加以嚴格之驗證及歸納，深具科學精神及態度。所獲結論具學術性，對於瞭解其種子之散播機制可增加深入之了解。
2. 表達能力甚佳，且與鄉土教材相切合，團隊合作佳，分工分明，實驗記錄完整，作品完整性佳。殊屬不易。