

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第三名

030107

花飛蝶舞－探討蝴蝶拍翅渦流與升力之關係

學校名稱：桃園縣立桃園國民中學

作者： 國一 陳子安 國二 劉鎮葳	指導老師： 黃教銓 陳文盛
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：渦流、升力、展弦比

花飛蝶舞—探討蝴蝶拍翅渦流與升力之關係

摘要

為了解蝴蝶飛行的原理，自製風洞及不同展弦比的蝴蝶翅膀模型，在模型中通入濃煙並以數位相機拍攝蝴蝶翅膀上的渦流變化。發現主要有前緣渦流、翼端渦流及與翼身相交接處的根部渦流等，進一步分析拍翅頻率和攻角改變對渦流的影響，發現拍翅不但會強化根部渦流也會使前緣渦流向後滾，就像是一串向後移動的微型龍捲風，形成翼面有一股向上的力量，即所謂的渦流升力。最後，把蝴蝶模型固定在自製振動座上，再將整個基座黏在電子秤上，測量拍翅時模型所受的最大升力，結果發現當模型的拍翅頻率慢慢增高時升力會突然消失，而頻率更快些升力又會再度出現。針對這個奇特的現象，我們運用 Buckingham π 理論分析最大升力及渦流的關連性。

壹、研究動機

曾在小學暑假參加台大「昆蟲營」的活動，當介紹到蝴蝶飛翔與飛機飛行的原理不同時，腦中突然閃過一個想法—是否可以先做一隻「機器蝴蝶」就像「機器人」一樣，來找出蝴蝶的飛行奧秘。經過與老師討論後，決定製作一風洞並以數位相機拍攝，進一步探索蝴蝶飛翔的原理。

貳、研究目的

自古以來，人類就夢想能自由自在地於空中飛翔。由於科技的精進，人們現在可以建造巨型的客機、超音速戰機等各式各樣的飛機。可是蝴蝶並不像飛機是靠引擎產生推力助其前進，因此我們模仿蝴蝶翅膀形狀製作一放大的中空蝴蝶翅膀，把濃煙通入其中並藉由數位相機拍攝，來探索蝴蝶拍翅時翅上的渦流與升力之關係。

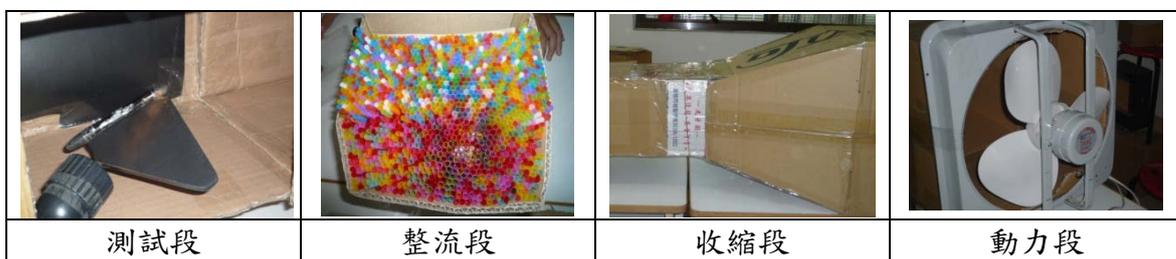
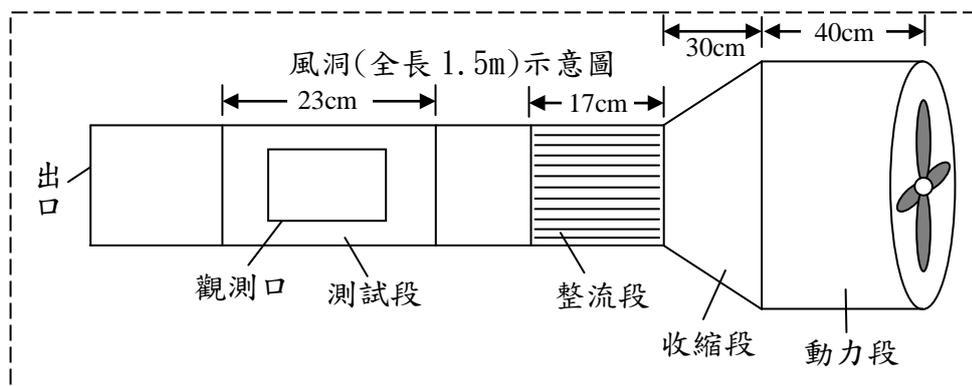
- 一、利用紙箱、排煙扇、吸管及細鐵網自製第一代簡易風洞。
- 二、改良第一代風洞，以確保風速穩定及擴大測試空間。
- 三、以風速計測量第二代風洞測試段不同位置的風速，探討改良後風洞的穩定性。
- 四、用黑色塑膠板自製放大中空的中空蝴蝶翅膀。
- 五、探討拍翅頻率對翅膀上渦流及升力的影響。
- 六、探討不同攻角對翅膀上渦流及升力的影響。
- 七、改變翅膀的形狀(展弦比)重複五、六項之探討、分析。

參、研究設備及器材

- 一、自製風洞
 - (一) 第一代簡易風洞

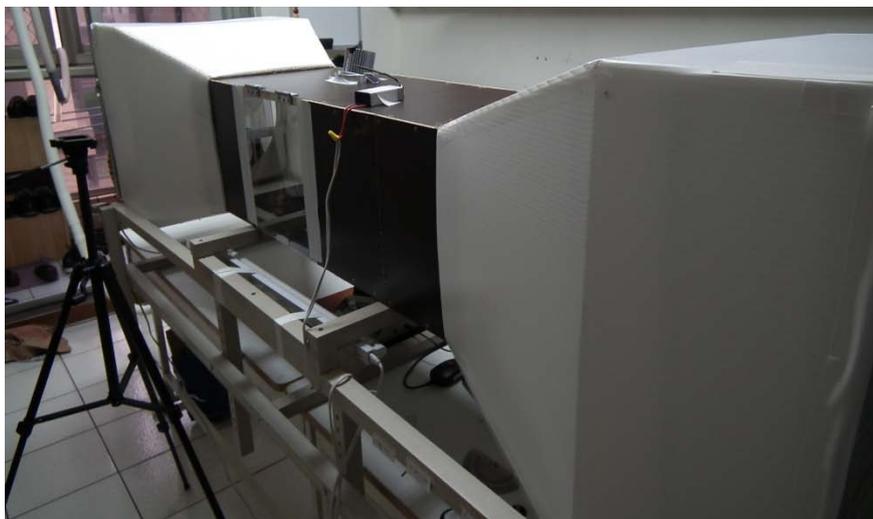
吸管	20 包	排煙風扇(9W)	1 台	大透明膠帶	2 卷
透明塑膠板	2 片	大紙箱	2 個	調光器(150W)	1 個

利用紙箱和吸管製作，分為動力段、收縮段、整流段和測試段。



(二) 第二代改良風洞

4mm 薄木板	2 大片	瓦楞紙	6 大片	透明壓克力	1 片
白色強光 LED 燈	1 盞	排煙風扇(9W)	1 台	調光器(150W)	1 個



二、發煙機組 1 套：

發煙機	1 台	PVC 塑膠管	1 段	排水管	6 條	排水閥	2 個
-----	-----	---------	-----	-----	-----	-----	-----

三、攝影器材：

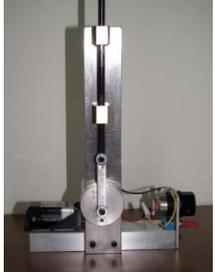
數位錄放影機 1 台	同步攝影機 4 台	電視螢幕 1 台	數位相機(FUJIFILM)
			

四、自製蝴蝶翅膀：

黑色塑膠片	可彎曲塑膠管(底座)	量角器(自製斜角測量儀)
-------	------------	--------------

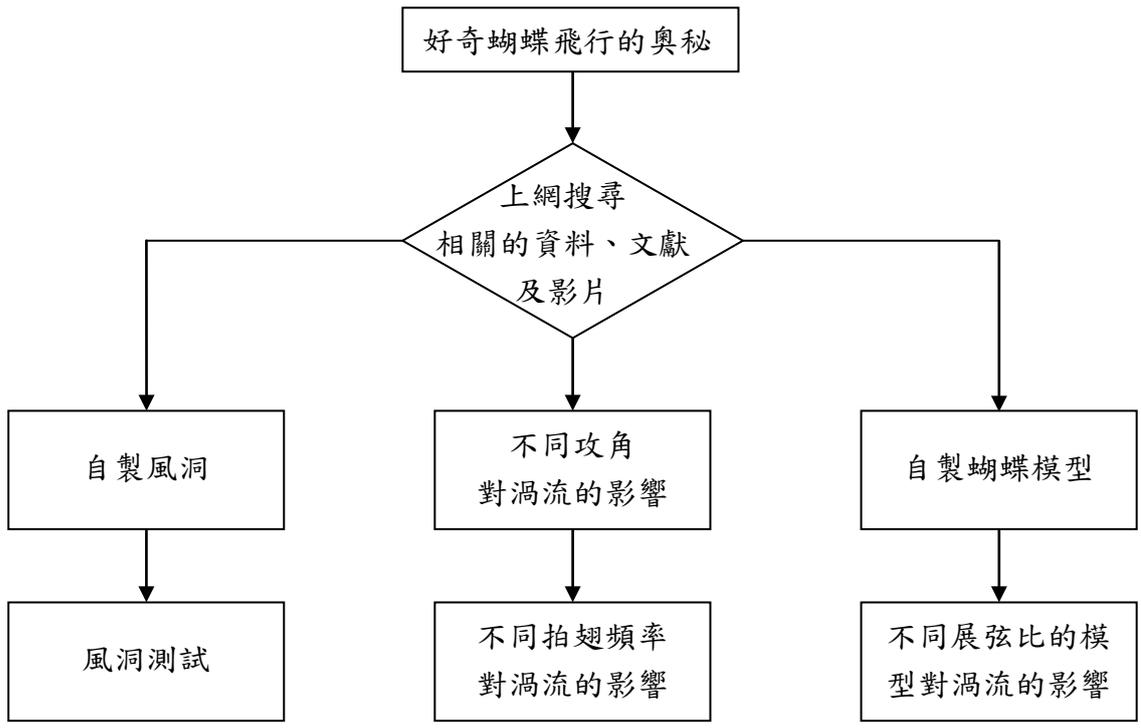
五、

六、其他儀器：

風速針	玩具振盪器	自製振盪器
		

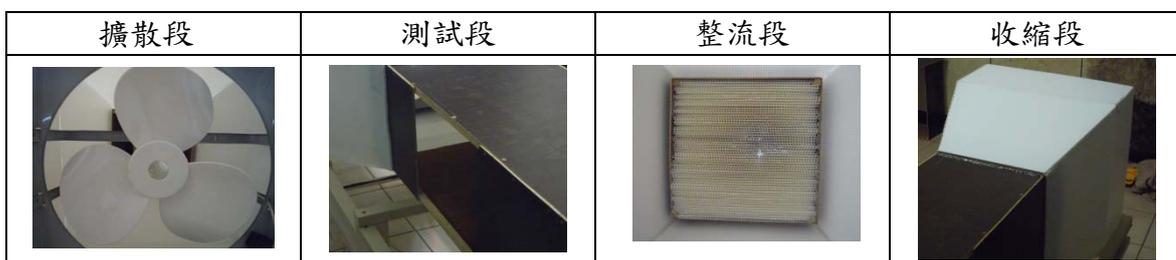
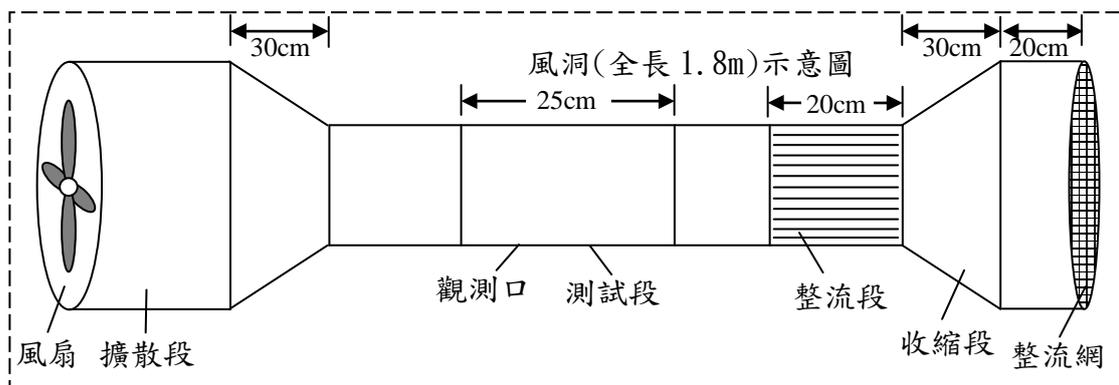
肆、研究過程或方法

一、研究流程圖



二、改良第一代風洞

為提高風洞的穩定性，依據成大航太系之低速風洞結構，在收縮段加裝三層整流網，於風洞的尾端增設擴散段，並把風力來源由送風改成抽風，如下圖。



三、

(一) 風洞測試

利用風速計測量「測試段」迎風截面各點的風速，以確保風洞內氣流的穩定，避免實驗誤差，以下是測得的風速。

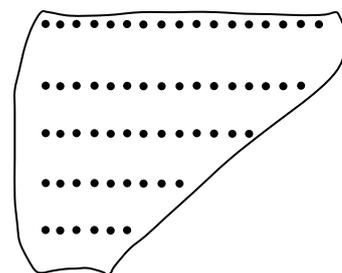
位置	左上	左中	左下	中上	中中	中下	右上	右中	右下
風速(m/s)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

四、自製人工蝴蝶翅膀

(一) 蝴蝶的前、後翅在飛行中一般都是重疊在一起，很少分開，所以把前、後翅當成一個翅來模擬真實拍動的情形，如圖(1)所示。

(二) 利用黑色塑膠片做成不同展弦比的蝴蝶翅膀，其展弦比為 1.25、1.43、1.67、2、2.5 共 5 支，分別命名為 A、B、C、D、E。

(三) 最後在中空蝴蝶的翅膀上鑽孔，每隔 10mm 鑽一排共 5 排，而每個小孔之孔徑約為 0.2mm。

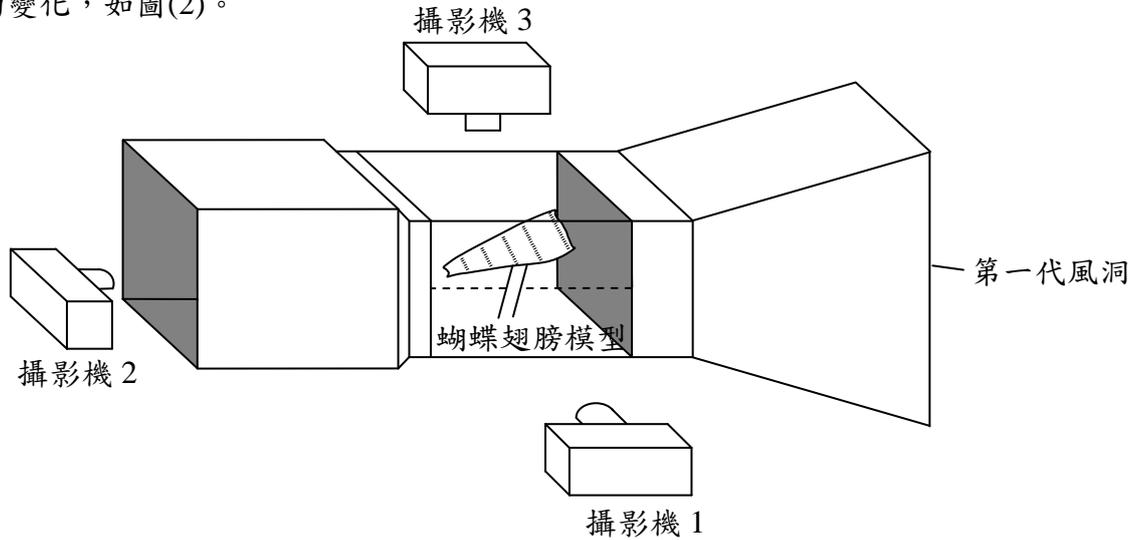


圖(1) 蝴蝶翅膀模型



五、改變翅膀攻角觀測渦流變化

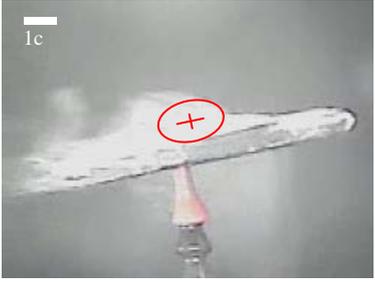
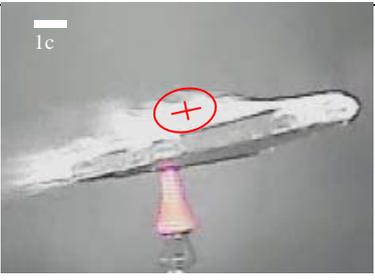
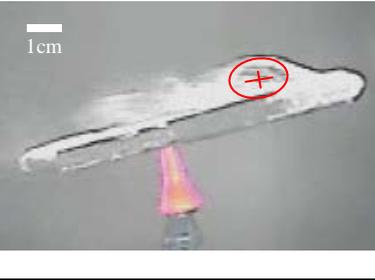
(一) 把蝴蝶模型採腹撐方式放入第一代風洞中，實驗中風速保持 0.8m/s，模型展長為 10cm 其雷諾數 $Re \approx 9000$ ，與真實蝴蝶飛行的雷諾數接近。改變模型的攻角 α ($5^\circ \sim 30^\circ$) 通入濃煙數秒後，關掉發煙機讓煙流自動上升，並分別以三支攝影機同步拍攝渦流的變化，如圖(2)。

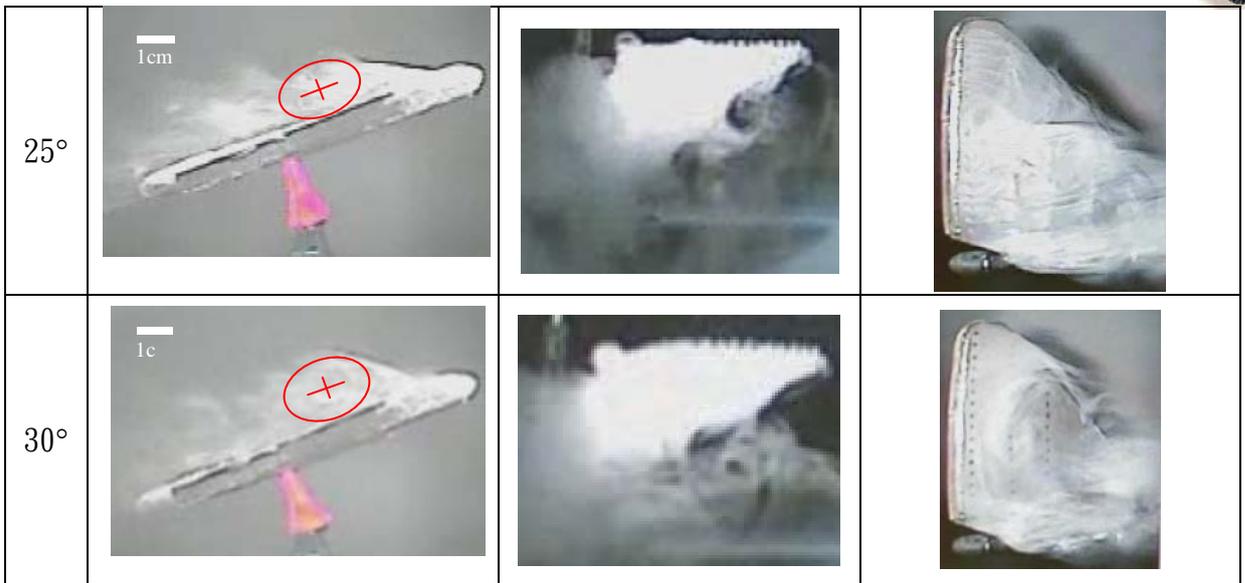


圖(2)實驗裝置示意圖

觀測結果如下：

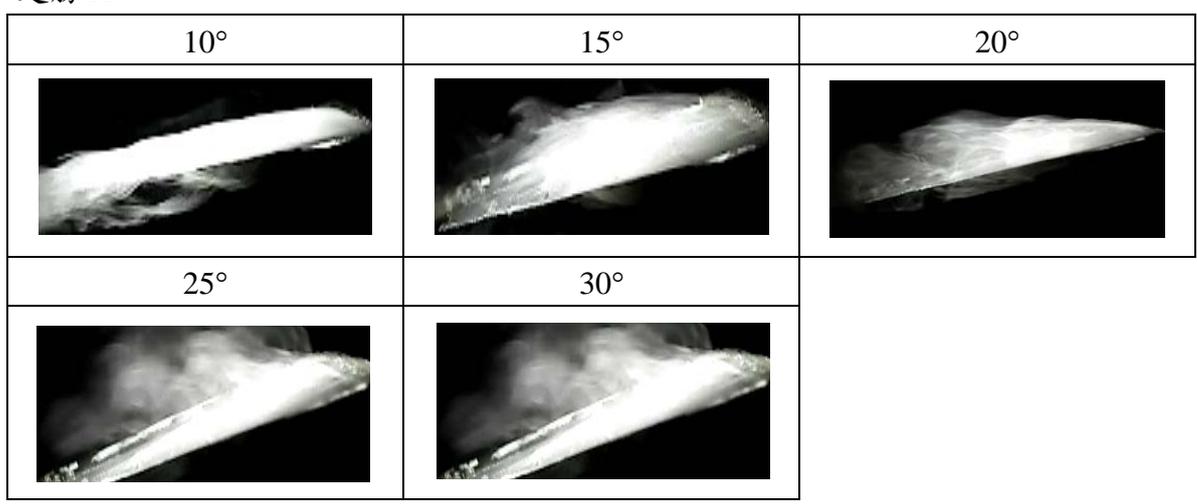
1. 攻角 5° ，沒有觀測到翅膀上有任何渦核產生。
2. 攻角 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 渦流的變化。

10°			
15°			
20°			

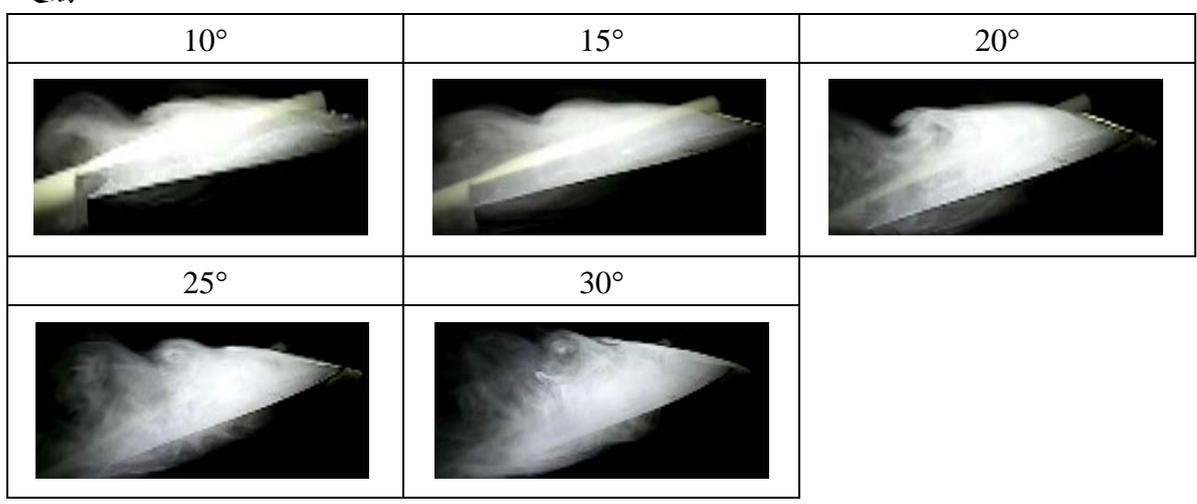


(二) 原先以一般閉錄系統攝影機，無法清楚拍攝煙流隨攻角的變化，改用 FUJIFILM HS10 數位相機高速錄影模式(240fps)拍攝，其結果如下：

1. 翅膀 A



2. 翅膀 C



3. 翅膀 E

10°	15°	20°
		
25°	30°	
		

六、改變翅膀的形狀(展弦比)對翅膀上渦流的影響

(一) 攻角 $\alpha=15^\circ$

1.25	1.43	1.67	2.00	2.50
				

(二) 攻角 $\alpha=30^\circ$

1.25	1.43	1.67	2.00	2.50
				

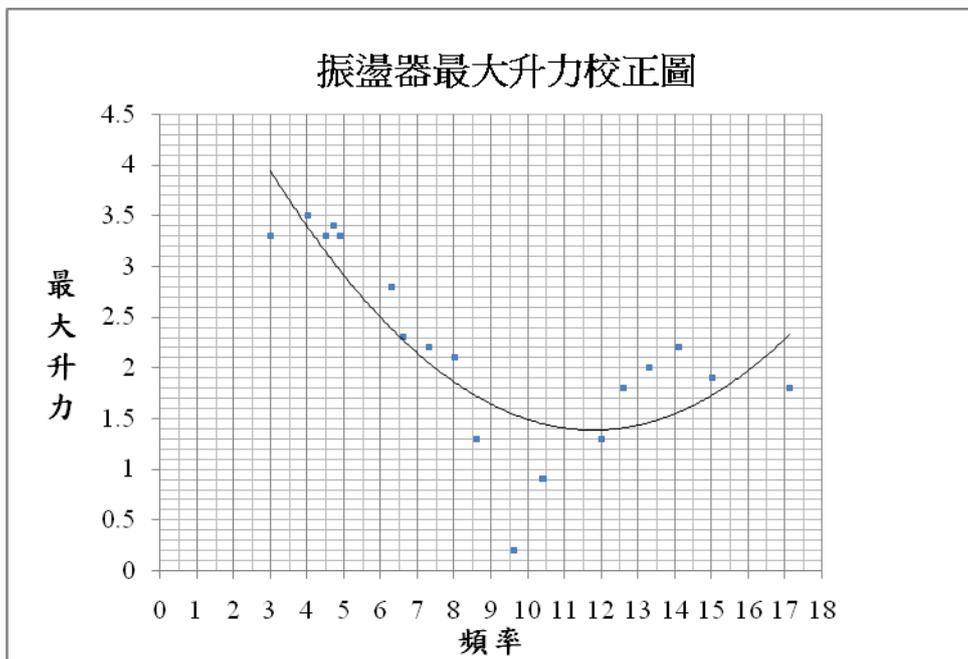
七、改變拍翅頻率，觀測渦流及升力的變化。

(一) 我們嘗試用各種不同方法，希望能測量出渦流與升力的關係。經過一連串失敗後，終於以市售玩具改裝自製一個振盪器，模仿蝴蝶拍翅的動作，並把它黏貼在電子秤上，從秤的重量讀數量到升力的大小。

攻角	10°	20°	30°
照片 1			
照片 2			
最大升力 (gw)			

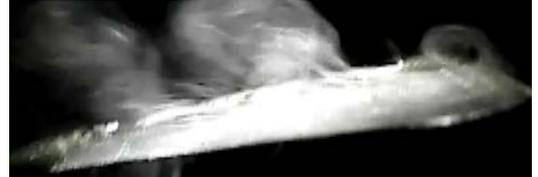
(二) 由於玩具振盪器無法改變振動頻率，於是自行設計一個振盪器，利用調整可變電阻改變拍翅頻率。

1. 校正曲線圖

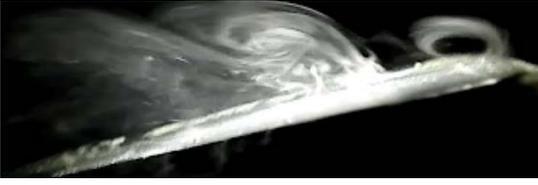
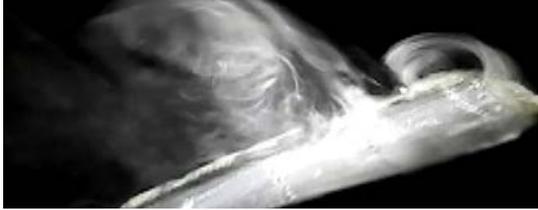
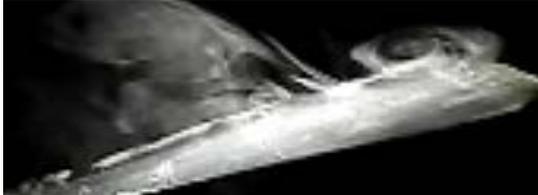


2. A 翅膀

攻角(°)	照片	頻率(Hz)	升力(gw)
10		4.7	2.1
10		6.9	2.6
10		9.6	0
10		12.0	0.6
10		14.12	1.2
15		5.6	2.1

15		8.6	0
15		10.9	0.3
15		16.0	1.0
15		17.1	0.7
20		3.7	1.9
20		6.9	3.0

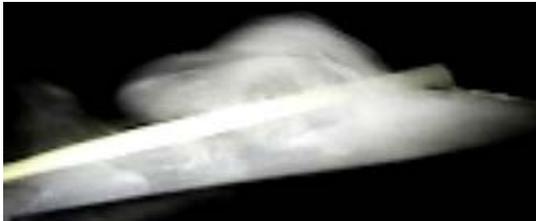
20		9.6	0
20		12.0	0.7
20		14.1	1.6
25		5.3	2.6
25		6.9	0
25		10.9	0

25		14.1	1.3
25		18.5	0
30		5.0	2.3
30		6.9	0
30		10.9	0
30		12.0	1.4

30		15.0	1.3
----	---	------	-----

3. C 翅膀

攻角(°)	照片	頻率(Hz)	升力(gw)
10		3.2	1.8
10		6.3	3.0
10		9.6	0
10		10.4	0.4

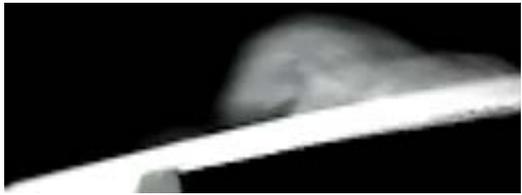
10		16	1.1
15		4.9	2.2
15		8	0.1
15		10	0
15		12.6	1.1
15		16	0

20		5.5	2.8
20		6.3	0
20		10	0
20		12.6	0
20		15	1.3
25		4.8	2.1

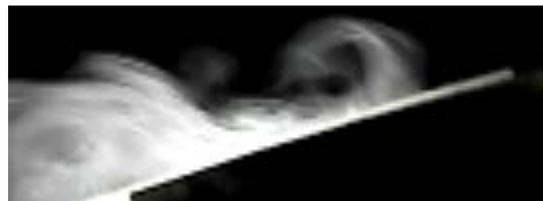
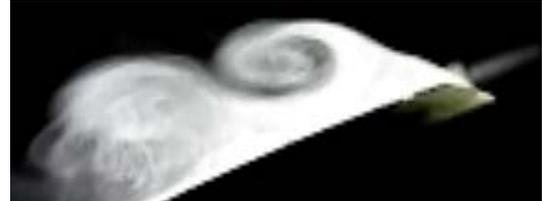
25		8	0.1
25		9.2	0
25		12.6	1.5
25		15	1.6
30		4.6	1.8
30		8.6	0.5

30		10.4	0
30		12	1.2
30		16	0.6

4. E 翅膀

攻角(°)	照片	頻率(Hz)	升力(gw)
10		5.2	2.5
10		6.5	2.9
10		10	0

10		10.9	0
10		17.1	1
15		5.6	2.2
15		8	0
15		10.4	0
15		10.9	0.2

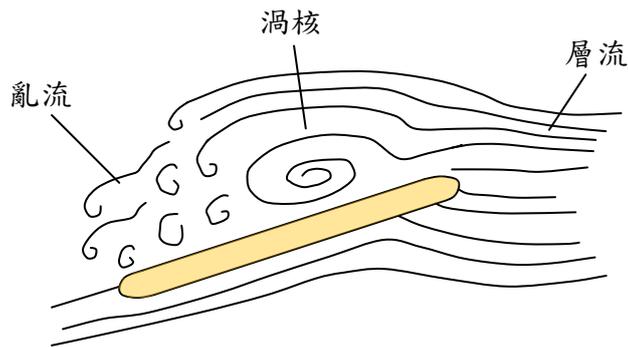
15		16	1.5
20		4.5	1.8
20		6.7	0
20		9.6	0.7
20		16.0	0.8
20		17.1	0.9

25		5.2	0.9
25		6.7	1.2
25		8.9	0.2
25		10	0
25		15	1.3
30		5.5	2.8

30		6.7	2.8
30		8.2	0.3
30		10	0
30		14.1	0.8

伍、 研究結果

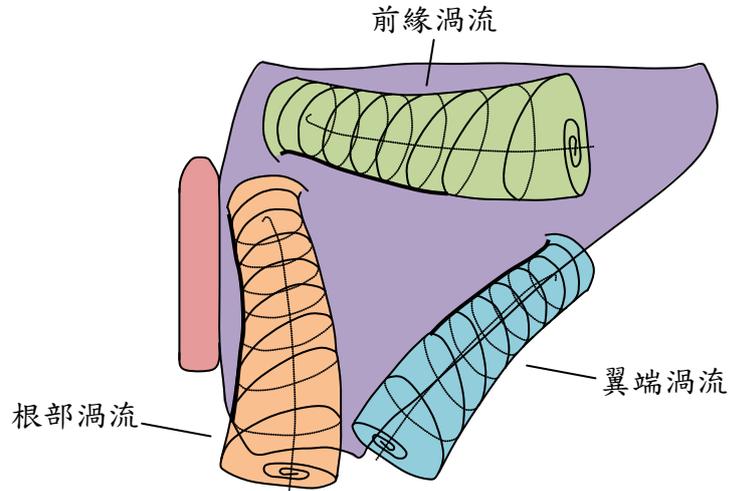
- 一、 由於空氣具有黏性，使得層層間的分子互相拖拉，逐漸地耗蝕它們的動能。如果氣流所流過的路程很長(例如：從前緣走向後緣很長或攻角太大)，以致接近邊界的空氣分子，在流動途中的某點起，動能消耗殆盡而走不動，只好滯留在那兒。於是層流(laminar)便從這點開始形成渦流(vortex)最後變成亂流，如圖(3)渦流是介於有序流動與無序流動間的狀態。



圖(3)渦核示意圖

從研究結果一我們很容易發現隨攻角增加，渦核愈容易形成；渦核愈大 且高度愈高，且往翅膀最前緣移動。後面的亂流相對愈強。

二、一遍又一遍地觀看錄到的影片，當攻角愈大時，發現除了已被發現的前緣渦流之外，翅膀根部及末端還有二道渦流，如圖(4)，我們依照位置直接稱它們為前緣渦流、根部渦流及翼端渦流。

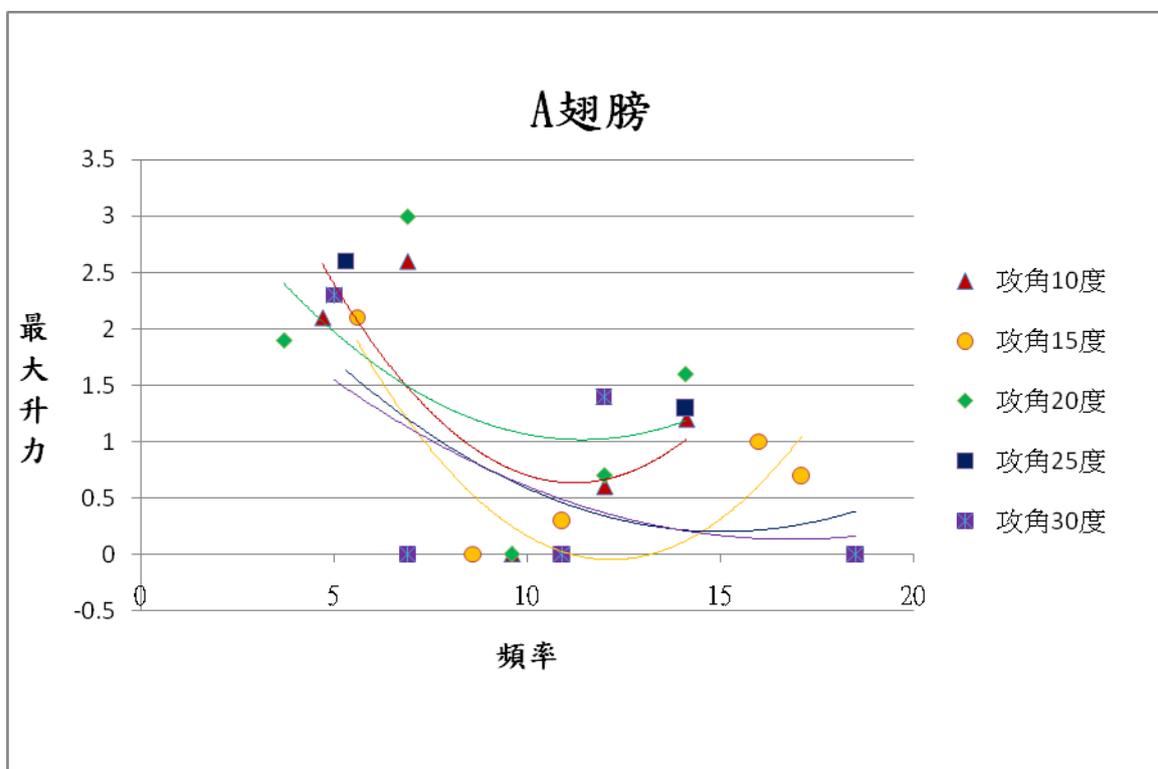


圖(4)

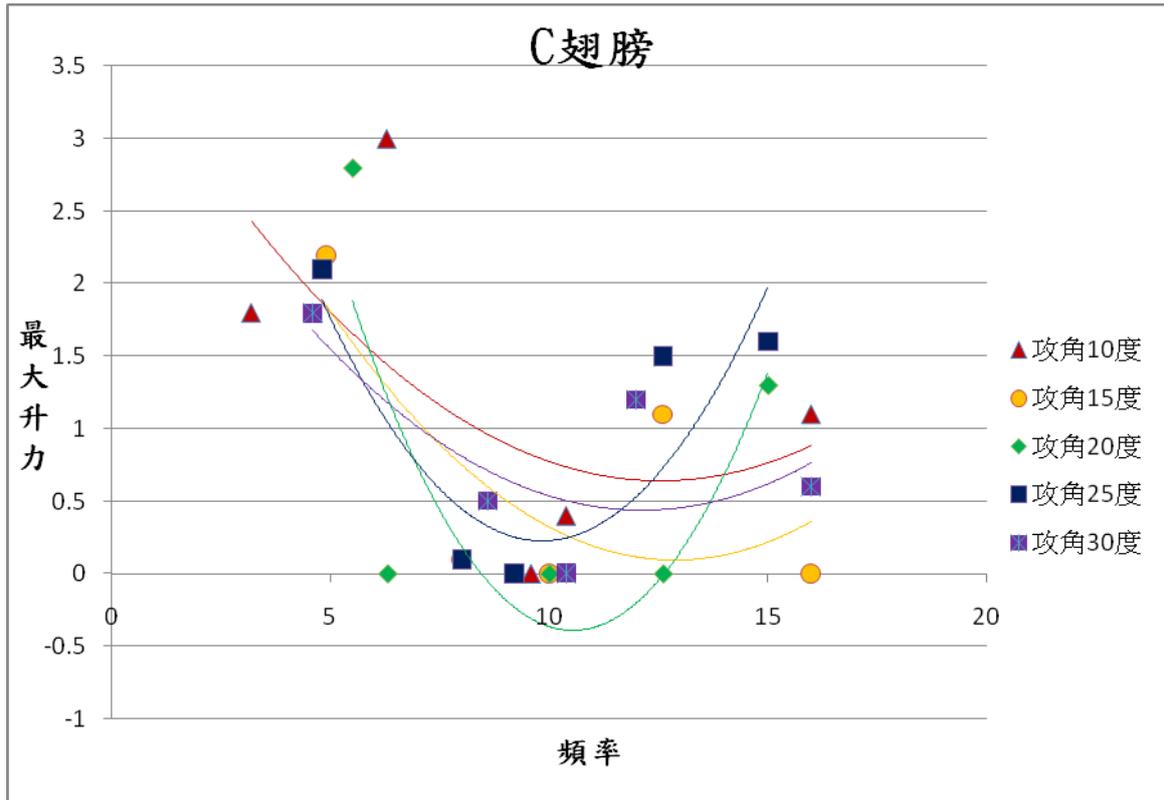
隨著攻角變大，三道渦流也愈強，彼此會交互作用，讓翅膀上的煙流呈現略有週期性的變化，十分有趣。

三、改變拍翅頻率，最大升力隨頻率的變化

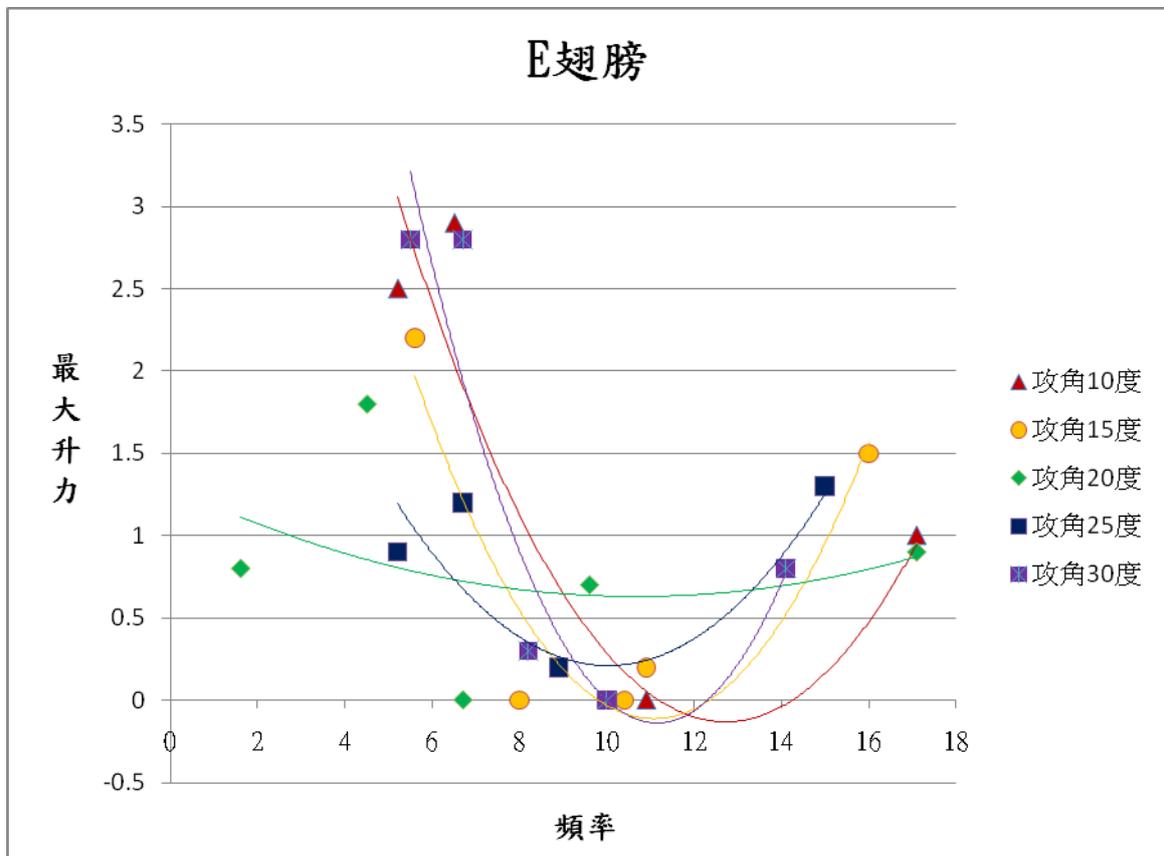
(一) A 翅膀



(二) C 翅膀



(三) E 翅膀



四、我們從影片發現當攻角及拍翅頻率愈高時，根部渦流會愈強而把翼端渦流給吸過去，有如大吃小一樣，最後在翅膀表面上形成二個旋轉方向相反的小型龍捲風。



陸、討論

一、把蝴蝶模型固定在自製振動座上，再將整個基座黏在電子秤上，測量拍翅時模型所受的最大升力，結果發現當模型的拍翅頻率慢慢增高時升力會突然消失，而頻率更快些，升力又會再度出現。針對這個奇特的現象，我們決定運用 Buckingham π 理論分析最大升力及渦流的關連性。

二、Buckingham π 理論-因次分析

為了分析各種變數的實驗數據並將其表示成一個簡潔的函數式，運用因次分析將許多相關物理變數組成數個無因次的參數群。然後帶入實驗值來分析這些無因次參數群之間的關連性。

根據 Buckingham π 理論，將物理量做無因次化的步驟如下：

(一) 我們的目的只是希望藉由實驗數據推導出一個蝴蝶振翅最大升力的概略數學關係式，過多的變數將大大的增加分析的困難度。因此，列出與蝴蝶拍翅所產生的最大升力 F ，有直接相關的重要物理量列出。即拍翅頻率 f 、空氣的密度 ρ 、渦流的速率 v 、渦核的半徑 r — 共 5 個變數。

(二) 將 5 個物理量的因次表示出來：

$$F = \left\{ \frac{ML}{T^2} \right\}, \quad f = \left\{ \frac{1}{T} \right\}, \quad \rho = \left\{ \frac{M}{L^3} \right\}, \quad v = \left\{ \frac{L}{T} \right\}, \quad r = \{L\}$$

大括號內為該物理量的因次。基本上，描述力學系統的基本因次只有 3 個：M 代表質量因次，L 為長度因次，T 為時間因次。

(三) 在上述 5 個變數中選定 ρ 、 v 、 r 3 個為重複變數，則剩下 2 個變數 F 、 f 必定可與 ρ 、 v 、 r 組成不具因次的變數群，我們一定可以找到適當的 a, b, c, i, j, h ，使得變數組合 $F\rho^a v^b r^c$ ， $\rho^i v^j r^k$ 不具因次。由以下聯立方程式，可求出 a, b, c, i, j, h, k 之值。

$$M^0 L^0 T^0 = (MLT^{-2}) (ML^{-3})^a (LT^{-1})^b (L)^c$$

$$\begin{cases} 0 = a+1 \\ 0 = -3a+b+c+1 \\ 0 = -b-2 \end{cases}$$

$$a = -1, \quad b = -2, \quad c = -2$$

$$M^0 L^0 T^0 = (T^{-1}) (ML^{-3})^i (LT^{-1})^j (L)^k$$

$$\begin{cases} 0 = i \\ 0 = -3i + j + k \\ 0 = -j - 1 \end{cases}$$

$$i = 0, j = -1, k = 1$$

得知 2 個無因次的變數群分別是

$$F' = \frac{F}{\rho v^2 r^2}, \quad f' = \frac{fr}{v}$$

其中 F' 為無因次的最大升力， f' 為無因次的拍翅頻率。Buckingham π 理論告訴我們蝴蝶振翅升力與其相關物理參數之間的關係必定可表達為如下的無因次函數：

$$F' = G(f')$$

如此一來，我們將原先總計 5 個變數的函數式化簡成只剩 2 個(無因次)變數 F' ， f' 的函數式，因此可簡化實驗的設計，實驗的時間以及減少所需要記錄的實驗數據資料。同時，借助實驗結果來求得函數 G 亦較原式來得簡單而且可行。當然，成功與否端視原先我們所設定的 5 個變數是否適切。

三、接下來，我們須從電腦影片中量出渦流繞核旋轉的速率 v ，只有在大攻角的條件下，渦核才夠明顯，因此只取攻角 25° 、 30° 的數據分析。

	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
A-25°	1	113	0.3	5.3	2.6	0.0141	1.8854
	2	113	0.3	6.9	0		
	3	75	0.5	10.9	0		
	4	150	0.3	14.1	1.3	0.0282	0.5350
	5	225	0.5	18.5	0		

	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
A-30°	1	113	0.5	5.0	2.3	0.0221	0.6004
	2	113	0.5	6.9	0		
	3	188	0.5	10.9	0		
	4	226	0.5	12.0	1.4	0.0265	0.0914
	5	271	1.0	15.0	1.3	0.0554	0.0148

	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
C-25°	1	113	0.5	4.8	2.1	0.0212	0.5482
	2	113	0.6	8.0	0.1	0.0425	0.0181
	3	113	0.6	9.2	0		
	4	188	1.0	12.6	1.5	0.0670	0.0354
	5	94	0.6	15	1.6	0.0957	0.4192

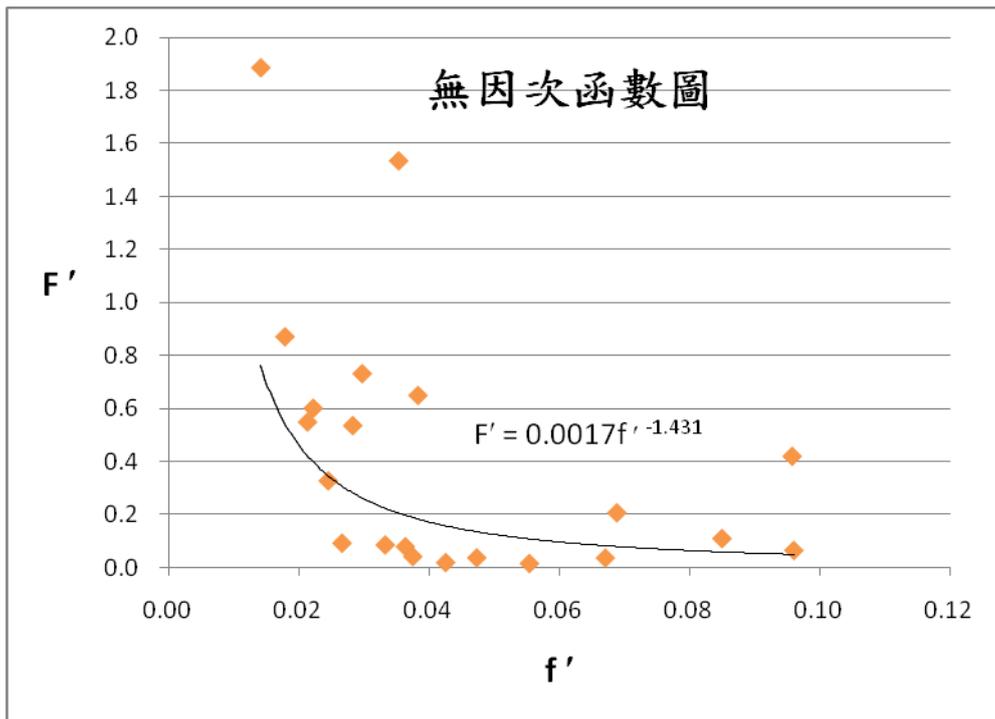
	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
C-30°	1	113	0.6	4.6	1.8	0.0244	0.3263
	2	75	0.6	8.6	0.5	0.0688	0.2058
	3	113	0.6	10.4	0		
	4	125	1.0	12.0	1.2	0.0960	0.0640
	5	113	0.6	16.0	0.6	0.0850	0.1088

	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
E-25°	1	68	0.5	5.2	0.9	0.0382	0.6488
	2	113	0.3	6.7	1.2	0.0178	0.8702
	3	113	0.6	8.9	0.2	0.0473	0.0363
	4	188	0.6	10.0	0		
	5	226	0.5	15.0	1.3	0.0332	0.0848

	次數	v(cm/s)	r(cm)	f(1/s)	F(gw)	f'	F'
E-30°	1	78	0.5	5.5	2.8	0.0353	1.5341
	2	113	0.5	6.7	2.8	0.0296	0.7309
	3	113	0.5	8.2	0.3	0.0363	0.0783
	4	168	0.5	10.0	0		
	5	226	0.6	14.1	0.9	0.0374	0.0408

以上的數據提供了我們推導無因次函數所需之 F' 、 f' ，將這些數據畫在橫軸為 f' 、縱軸

為 F' 圖上，再利用迴歸分析找出模擬的 $F' = G(f')$ 。



我們採乘冪迴歸的模式，得到最佳的擬擬曲線為：

$$F' = 0.0017 f'^{-1.431}$$

我們的目的主要是提出一個與蝴蝶振翅升力相關之物理量，此關聯式越簡潔則越好，因

此只保留關聯式物理量的因次。把 $F' = \frac{F}{\rho v^2 r^2}$ ， $f' = \frac{fr}{v}$ 代入上式

$$\left(\frac{F}{\rho v^2 r^2}\right) \propto \left(\frac{fr}{v}\right)^{-1.4} \quad \Rightarrow \quad F \propto \rho v^{3.4} r^{0.6} f^{-1.4}$$

- 四、從拍攝實驗影片中，我們發現當拍翅頻率愈高，渦流繞核旋轉的速率愈快，所以直覺上升力也愈大。但是從 $F \propto \rho v^{3.4} r^{0.6} f^{-1.4}$ 數學式中得知：f 頻率愈高升力反而也愈小，也就是這兩個因素導致，拍翅頻率慢慢增高時，升力會突然消失，而頻率更快一些，升力又會再度出現。

柒、結論

- 一、攻角愈大，前緣渦流、根部渦流及翼端渦流三者愈加明顯，但是亂流也愈大，所以一般飛機在高攻角飛行時，都會因升力不足而發生可怕的失速。
- 二、當蝴蝶模型拍動，會在前緣激起一串渦流向後滾，就像是一串向後移動的微型龍捲風。因而有源源不斷的吸力產生，把翼面往上吸，造成有別於飛機升力的渦流升力。這也說明了蝴蝶為什麼可以滯空、瞬間急遽的竄升、在行進間急速改變飛行方向。
- 三、改變模型的展弦比，展弦比愈大，激起前緣渦核的位置會往後移動，這是因為翼尾也有一個反方向旋轉的渦流，把它向後吸所造成的結果。

- 四、如果讓蝴蝶翅膀像飛機機翼一樣，改變攻角大小可以測得升力，例如：A 翅膀在風速 0.8 m/s、攻角為 30° 的情況下升力為 0.3gw，如果翅膀拍動後升力最大可達 2.3gw，足足提高了 8 倍之多。
- 五、經過這次的實驗，我們不得不佩服造物者的奧妙。或許取法蝴蝶飛行的原理，利用這種渦流的特性，有朝一日可製造出更高性能的飛機。

捌、參考資料

- 一、林英智(主編)(2009)。國中自然與生活科技第四冊。台北縣：康軒文教。
- 二、王懷柱(2001)。揭開飛行的奧秘。台北市：全華科技圖書股份有限公司。
- 三、伍庭曄(2009)。昆蟲振翅最大垂直升力及相關參數研究。2010 年 1 月 23 日，取自 <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/040113.pdf>
- 四、尹浚翰、李季勳、黃振宇、黃致豪(2008)。翹首振翼—再次得力。2010 年 1 月 27 日，取自 <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/48/high/031610.pdf>
- 五、Ellington C P, van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, **384**: 626-630 (1996)

【評語】 030107

利用翅膀冒出煙霧來觀察擺動所產生的氣流、渦流，製造多種擺動工具來進行實驗，態度認真，擺動、搖動及冒煙的問題需再澄清與渦流之關係。