

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 物理科

佳作

040110

裏海怪物之謎—地面效應

學校名稱：臺北市立西松高級中學

作者： 高二 蔣佳蓉 高二 劉宇桐	指導老師： 林元祥 吳建毅
-------------------------	---------------------

關鍵詞：地面效應、升力、機翼

## 摘要

本實驗係架設風洞製造穩氣流，將平板和機翼模型置於風洞前，改變其攻角，並調整移動地面來觀察兩模型在風扇開啟前後於電子秤所顯示出的數值變化，再算出所受升力，以探討「地面效應 (Ground effect)」發生的高度，並且和無地面效應時之升力比較。

實驗發現，在靠近地面時，機翼及平板模型升力皆增大，平板及機翼模型發生地面效應的高度相近，而且在機翼攻角愈小，愈接近地面時，相對升力就愈大。

另一方面，實驗結果也表明：在地面效應發生的情況下，平板模型所受升力，會超過無地面效應時的機翼模型，顯示出地面效應驚人的效果，未來若能應用於日常的交通工具上，便可提高能源使用的效益，而達到節能的目的。

## 壹、研究動機

基礎物理第二章提及大氣壓力與氣體壓力的相關概念，同時在第三章提到空氣對流可以提供滑翔翼一個上升力，使其在天空飛翔。另外，物理老師在上課時提到一種很有趣的現象：當紙張掉落到接近地面時，會快速地水平移動，延長著地時間，這是因為紙張下的空氣在此時會產生高壓氣墊，因而減少摩擦力，這種現象稱為「地面效應 (Ground effect) 或翼地效應 (Wing-In-Ground effect)」。

我們覺得這是個很有趣且新奇的現象，上網搜尋資料，同時也向老師請教，發現地面效應被利用在飛機機翼時，可以提供一個更大的升力，具有相當好的能源效益。據文獻顯示，前蘇聯是應用此效應最先進的國家，到 1980 年，西方國家透過衛星才發現此種飛行器，因為其體積龐大，又在裏海航行，所以稱為裏海怪物(Kaspian Sea Monster)，如圖 1。過去地面效應機主要用於軍事用途，現已逐步改為民間用途，例如日本東北大學流體科學研究所研發的地面效應車，如圖 2。再加上高二物理也有提到伯努利原理在機翼上的應用，於是我們好奇地面效應對飛機飛行的影響，而展開了一系列的研究。



圖 1



圖 2

## 貳、研究目的

- 一、探討平板在不同高度的情況下，攻角對升力的影響。
- 二、比較平板於高空與地面效應下的升力差異。
- 三、探討機翼在不同高度的情況下，攻角對升力的影響。

四、比較機翼於高空與地面效應下的升力差異。

五、比較平板與機翼升力差異。

六、地面效應發生的高度。

註：攻角即機翼側面前後端連線與水平的夾角。高度即待測物與珍珠板之間的距離。

## 參、研究設備及器材

### 一、實驗器材

- (一)電子秤(最大值 1400 克，精確到 0.1 克)一台
- (二)水平儀一個
- (三)金屬墊片 60 個(每個約 0.8 克，厚度 1mm)
- (四)細鐵釘一盒
- (五)化學粘土兩盒
- (六)珍珠板兩片(長 40cm，寬 29cm)
- (七)細膠帶一卷
- (八)珍奶吸管四包
- (九)工業用電風扇(260W)一台
- (十)巴沙木的木條四支(長 84cm)
- (十一)巴沙木的木板一塊(長 27cm，寬 25cm，厚度 0.8cm)



圖 3

### 二、實驗設備製作

#### (一) 風洞製作

1. 將珍奶吸管剪成兩半，並剪去尖突處，使其兩邊皆成平口。然後擺放置開口長 48cm，寬 40cm 的紙箱裡，作蜂窩式堆疊並以膠水黏著，直到將紙箱開口填滿，如圖 3。
2. 將電扇放置於紙箱一端，使其盡量接近吸管，並讓電扇盡量被紙箱包覆，以加強氣流效果，如圖 4。
3. 在紙箱另一端（之後我們稱為**實驗端**）紙板上標記刻度，以便了解機翼離地之相對高度，如圖 5。



圖 4



圖 5

## (二) 待測物製作

### 1. 平板模型

- (1)使用巴沙木割製出長 27 cm、寬 7 cm、厚度 0.8 cm、重 22.3 gw 的平板模型，如圖 6。
- (2)在平板的側邊釘上長 42cm 的木條，每邊兩根，且兩釘的間距為 6.2cm，如圖 7。

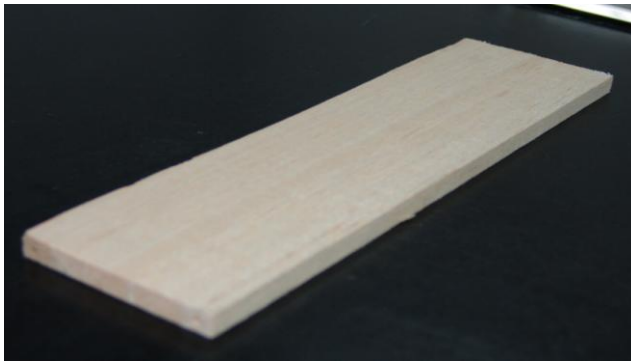


圖 6

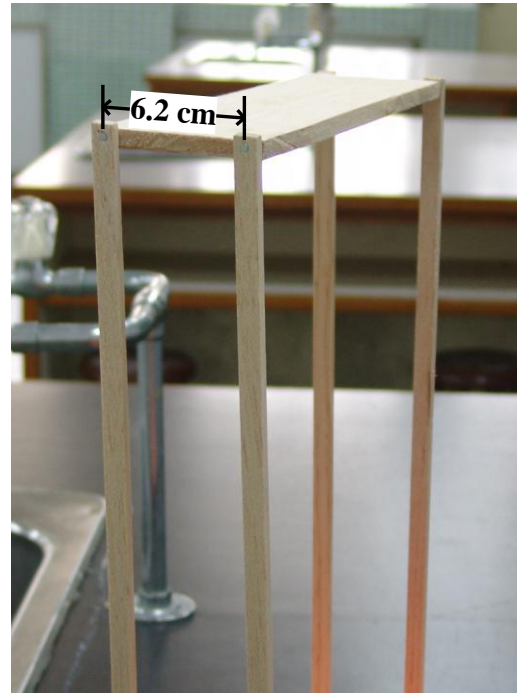


圖 7

### 2. 機翼模型

- (1)使用巴沙木割製出俯視面為翼展長 27cm、翼弦長 7cm、厚度 0.8cm、重 14gw 的機翼模型，如圖 8 及圖 9。
- (2)先在機翼模型底部割出四條凹痕，接著將鐵釘釘入木條，鐵釘穿出木條部分再嵌入機翼模型底部凹痕，最後用膠帶緊黏固定住，釘與釘也是相距 6.2 cm，如圖 10、11。

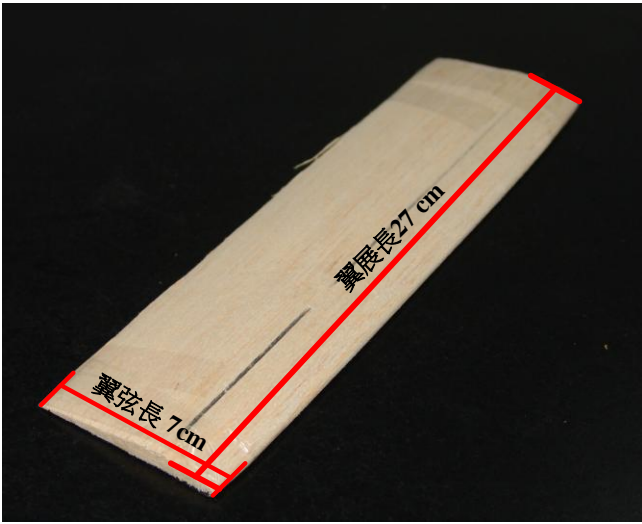


圖 8

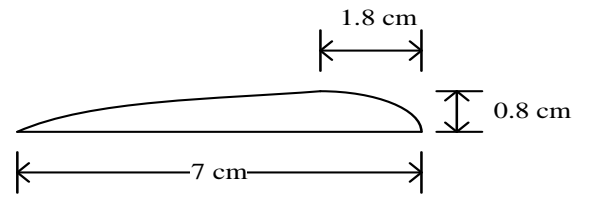


圖 9

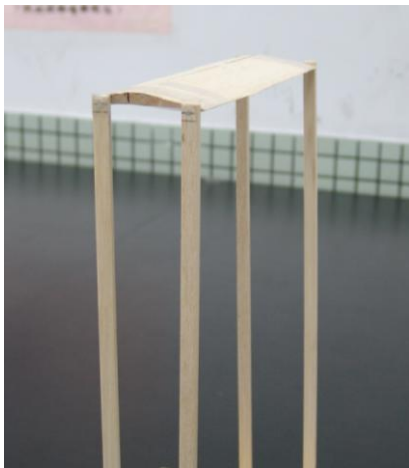
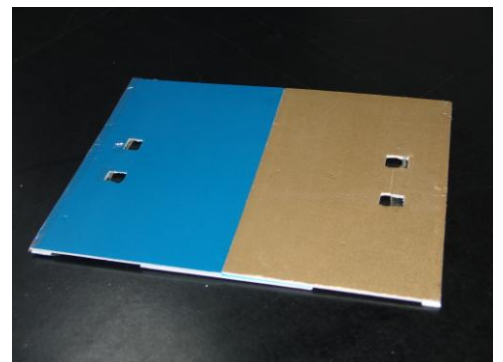


圖 10



圖 11

(三) 移動式地面製作：以珍珠板黏拼成一長 40 cm、寬 29 cm 的水平板子，用刀子割出四個適當大小之孔，如圖 12。



#### (四) 實驗架設

1. 將待測物(平板或機翼模型)、風洞、移動式地面、與電子秤接觸部分以黏土包住，如圖 13 所示。
2. 先用鐵釘將移動式地面暫時固定於實驗端紙板，珍珠板前緣緊圖 12，此時待測物前緣距吸管 12 cm，而電扇與待測物前緣距離為 50 cm。

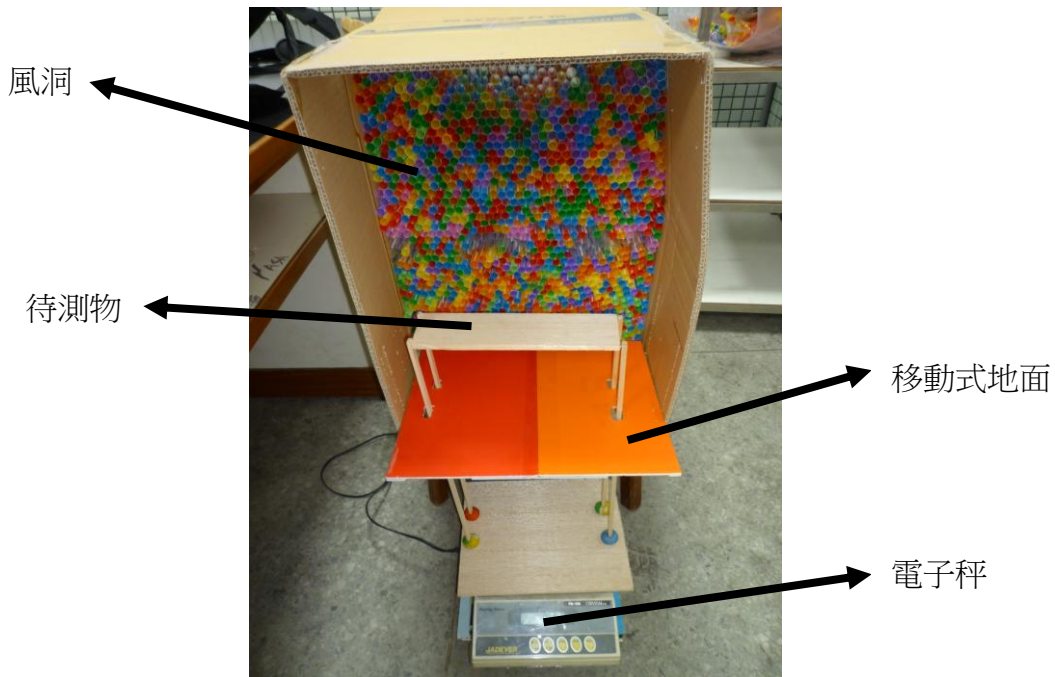


圖 13

(五)改變攻角的方法

1. 以金屬墊片墊高的方式改變機翼之攻角，如圖 14、15。
2. 經三角函數推算，如表 1，得知攻角每增加 1 度約需墊高 0.1 cm，所以我們採用厚度 0.1 cm 的金屬墊片來堆疊以改變攻角。

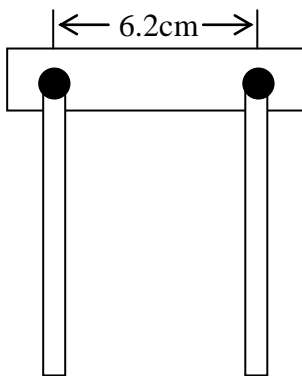


圖 14

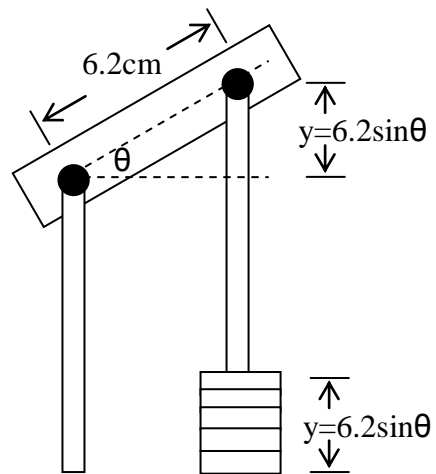


圖 15

表 1

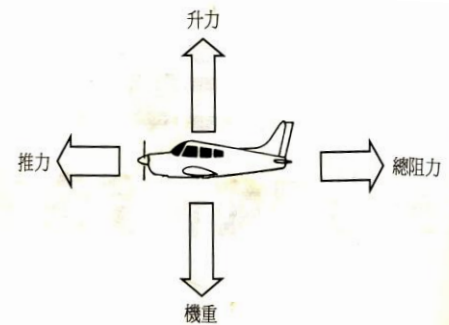
$\theta$ (度)	$\sin \theta$	$y = 6.2 \sin \theta$ (cm)	$\theta$ (度)	$\sin \theta$	$y = 6.2 \sin \theta$ (cm)	$\theta$ (度)	$\sin \theta$	$y = 6.2 \sin \theta$ (cm)
1	0.017452	0.108205	11	0.190809	1.183016	21	0.358368	2.221881
2	0.034899	0.216377	12	0.207912	1.289052	22	0.374607	2.322561
3	0.052336	0.324483	13	0.224951	1.394697	23	0.390731	2.422533
4	0.069756	0.43249	14	0.241922	1.499916	24	0.406737	2.521767
5	0.087156	0.540366	15	0.258819	1.604678	25	0.422618	2.620233
6	0.104528	0.648076	16	0.275637	1.708952	26	0.438371	2.717901
7	0.121869	0.75559	17	0.292372	1.812705	27	0.45399	2.814741
8	0.139173	0.862873	18	0.309017	1.915905	28	0.469472	2.910724
9	0.156434	0.969894	19	0.325568	2.018523	29	0.48481	3.00582
10	0.173648	1.076619	20	0.34202	2.120525	30	0.5	3.1

## 肆、研究過程或方法

### 一、實驗理論

(一)飛機飛行四個基本作用力，如圖 16。

1. 推力：由引擎產生，可讓飛機前進。
2. 阻力：飛機的表面並非光滑，也不是完全的流線型，因此空氣會造成阻力，其方向與飛行方向相反。
3. 升力：由機翼產生，與機翼面積、機翼形狀、機翼攻角、空氣相對於機翼的流速、空氣密度等有關。



(1)平板

將一塊平板迎風的一邊傾斜，即平板攻角大於零度，當空氣分子衝向平板底面時，空氣「被迫折向」，所以空氣動量改變而獲得衝力，根據牛頓第三運動定律，空氣也會給平板一個反作用力，此力可分解為向右阻力及向上升力，如圖 17，這是平板升力主要來源。當攻角由 0 度增至 45 度，平板對空氣造成的衝量會跟著變大，所以空氣對平板所造成的升力也隨著變大。

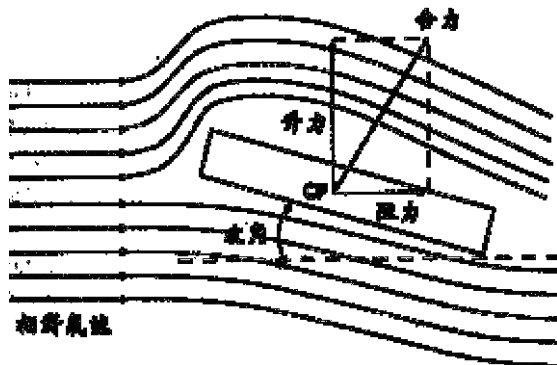


圖 17

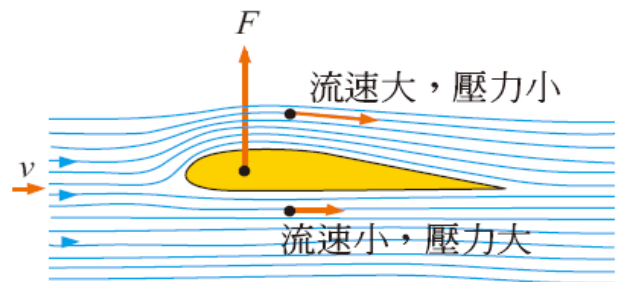


圖 18

## (2) 機翼

一般機翼的形狀為上曲下平，當機翼攻角等於零度時，空氣分別由機翼上、下方流過，並在機翼後方重新會合，因此，流過機翼上方的空氣流速必大於流過機翼下方的空氣。根據白努利原理

$$P_{\text{上}} + \frac{\rho v_{\text{上}}^2}{2} + \rho g y_{\text{上}} = P_{\text{下}} + \frac{\rho v_{\text{下}}^2}{2} + \rho g y_{\text{下}} \quad (P \text{ 為壓力, } \rho \text{ 為空氣密度})$$

因為機翼上下表面高度差可忽略，即  $y_{\text{上}} \approx y_{\text{下}}$ ，且  $v_{\text{上}} > v_{\text{下}}$ ，則可知機翼上方  $P_{\text{上}}$  小於下方壓力  $P_{\text{下}}$ ，上下壓差作用在機翼的俯視面積上，可使機翼獲得一向上升力，如圖 18。

當機翼攻角大於零度時，機翼除了受上下兩面壓差所造成的升力外，下翼面一樣有前面所提「空氣被迫折向」所造成的升力，而這才是機翼的升力主要來源。兩種升力加在一起，造成機翼有比平板更好的飛行效果。

### 4. 重力：因地球質量所產生的力。

綜合以上，飛機在跑道上準備起飛時，引擎產生推力增加速度，飛機相對於空氣速度亦增加，此時機翼產生升力，抵抗飛機重力，而向上起飛，但阻力同時產生，所以飛機的速度與爬升高度都有一定的極限。

(二) 翼尖渦流：機翼上下翼面有壓力差的存在，所以在機翼兩末端，下翼面的空氣會往上翼面流動，而產生渦流，如圖 19，上下翼面的壓力差因此減小，導致升力跟著減小。

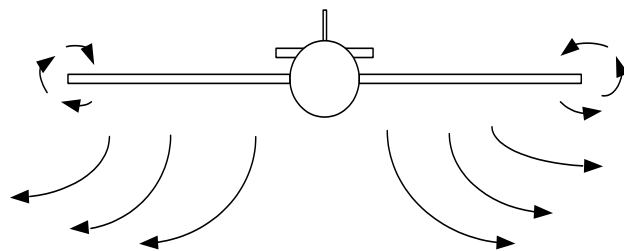


圖 19

(三) 地面效應：當飛機很靠近地面飛行時，機翼的下層氣流會受到阻礙，原本流經機翼下方的氣流轉而從翼面上流過。翼面下的氣流流速緩慢而開始壓力上升，翼面上的氣流流速增加而壓力降低，使得升力變得更大，這就是所謂的地面效應。地面效應包含了兩種現象：翼展和翼弦的地面效應。



1. 與翼展有關的地面效應：當機翼接近地面時，翼尖渦流形成的空間變小而減弱，使得升力增大，如圖 20。
2. 與翼弦有關的地面效應：當機翼接近地面時，翼面下方的空氣受阻礙而產生高壓空氣氣墊，產生向上支撐力，如圖 21。

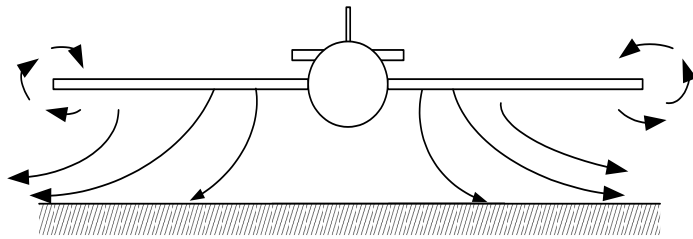


圖 20

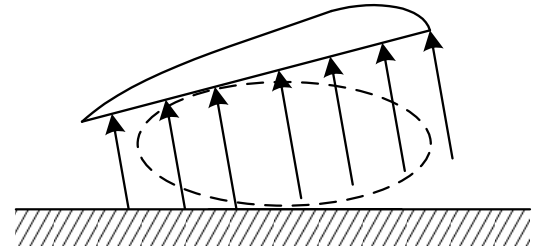


圖 21

## 二、實驗步驟

### (一)平板模型升力的測量

1. 調整移動式地面，使其與平板下緣相距 13.5 cm。
2. 關閉電扇，測量待測物之總重量(平板、木條及黏土等)。
3. 開啟風扇至最強風速，待天平所顯示之讀數穩定後，紀錄待測物之總重量。
4. 關閉電扇，以金屬墊片墊於前端兩木條下，增加平板攻角 1 度，測量待測物之總重量(平板、木條、黏土及金屬墊片)。
5. 開啟風扇至最強風速，待天平所顯示之讀數穩定後，紀錄待測物之總重量。
6. 重複步驟 4 與 5，直到平板攻角增加至 29 度。
7. 取出疊於前端兩木條下的墊片，重複步驟 4 與 5，但將墊片墊於後端兩木條下，直至 -3.7 度。
8. 依次調整移動式地面與機翼下緣間距離為 11.5cm、9.5cm、9cm、8cm、7.5cm、5.5cm、3cm、2.5cm、2cm、1.5cm、1cm，重複步驟 3 至步驟 7。
9. 將所得數據紀錄於電腦中，並計算風扇開啟前後的重量差，此即平板所受氣流之「升力值」。

### (二)機翼模型升力的測量

1. 調整移動式地面，使其與機翼下緣相距 13.5 cm。
2. 關閉電扇，測量待測物之總重量(機翼、木條、黏土等)。
3. 開啟風扇至最強風速，待天平所顯示之讀數穩定後，紀錄待測物之總重量。
4. 關閉電扇，以金屬墊片墊於前端兩木條下，增加機翼攻角 1 度，測量待測物之總重量(機翼、木條、黏土及金屬墊片等)。
5. 開啟風扇至最強風速，待天平所顯示之讀數穩定後，紀錄待測物之總重量。
6. 重複步驟 4 與 5，直到機翼攻角增加至 29 度。

7. 取出疊於前端兩木條下的墊片，重複步驟 4 與 5，但將墊片墊於後端兩木條下，直至  $-3.7$  度。
8. 依次調整移動式地面與機翼下緣間距離為 11.5cm、9.5cm、8.5cm、7.5cm、6.5cm、5.5cm、4.5cm、4.cm、3.5cm、3cm、2.5cm、2cm、1.5cm、1cm、0.5cm、0.2cm，重複步驟 3 至步驟 7。
9. 將所得數據紀錄於電腦中，並計算風扇開啟前後的重量差，此即機翼所受氣流之「升力值」。

## 伍、研究結果

### 一、平板模型之攻角與高度對應的升力值(gw)

與珍珠板距離 攻角(度)	13.5cm	11.5cm	9.5cm	9cm	8cm	7.5cm	5.5cm	3cm	2.5cm	2cm	1.5cm	1cm
0	-2.2	-2.4	-0.7	-1	-3.1	-2.3	-3.9	1.2	3.1	4	3.1	4.3
1	-2	-2.2	0.2	-0.1	-2.5	-1.9	-2.3	2.4	4	4.9	3.5	7
2	-1.3	-1.1	1.5	1.9	-0.9	0.1	-0.4	4.5	5.5	6.6	7.1	8.5
3	0.4	0.2	2.3	2.8	0.2	2.5	0.9	6.4	6.8	8.8	8.8	11.7
3.7	1.17	0.5	3.5	4	1.8	3.7	1.9	7.9	9.1	11	7.2	14.1
4.5	2	2.3	4.8	5.6	2.9	4.8	3.4	9.5	11	12.1	10.8	16.3
5.5	3.67	3.8	6.3	7.1	3.9	7.3	5.1	10.4	12	12.3	9.5	17.7
6.5	4.5	4.3	7.2	8	5	9.1	6.8	11.8	13.3	13.8	12.2	18.8
7.4	5.25	4.6	8.4	9	6.1	9.2	8.7	12.7	13	14.9	11.6	19.9
8.3	5.92	5.4	9.5	10	7.3	10.9	10	13.2	14.1	15.1	11.2	20.2
9.3	7	7.2	10.2	10.9	9.7	12.1	10.6	14.2	14.5	15.7	12.2	19.1
10	7.3	7.5	11.4	11.4	11.5	12.3	12.3	14.8	14.8	15.5	13.3	20.5
11	8.17	7.8	12	12	10.7	12.6	11.7	14.9	16.2	16.9	13.4	21.8
12	8.7	8.9	11.8	12.3	11.1	12.7	13	15.2	14.9	18.1	15	21.3
13	9.4	9.3	13	12.6	13.1	13.2	13.4	16.9	16	17.8	15.5	23
14	9.1	9.4	13.5	12.9	13.3	13.3	13.3	16.6	17.1	18.2	16.1	22.4
15	9.8	9.9	13.6	14.3	13.6	13.2	14.5	16.2	17.3	19.7	15.5	23.6
16	10.1	10.2	13.4	13.7	14.2	14.7	14.5	16.5	16.2	18.7	16.7	24.7
17	10.75	9.8	13.1	14.8	14.8	14.5	15.2	17	17.4	19.3	16.2	25.1
18	10.9	11.1	13.9	14	14.8	15.9	15.5	18.1	19.1	19.6	16.5	25.1
19	10.8	11.1	14.8	14.8	16	14.9	15.8	18.1	18.3	21.4	17.2	25
20	10.75	10.1	14.3	14.6	16.1	15.9	16.6	18.3	18	20.1	18.8	26.1
21	11.17	11.4	14.9	15.6	16.1	17.5	17.1	19	18.7	21.7	18.7	25.2
22	12	10.7	15.3	15.9	16.2	17	17.6	19.2	20.1	21.6	19	25.8
23	11.5	11.4	14.9	16	16.2	16.7	18.1	19.3	20	21	19.5	26.4
24	10.9	11.6	13.8	16.3	16.5	17	18.7	20.2	19.4	21.8	20.4	26.2
25	11.3	12	14.4	15.2	16.5	17.2	19.7	20.9	19.9	22.14	21.9	26.7
26	11.9	12.1	14.7	15.4	17.6	17.9	19.9	20.3	19.5	21.1	22.1	27.2
27	12.3	10.6	14.2	14.4	17.9	18.2	20.8	21	21.8	23	21.3	28.7
28	12.5	10.4	13.3	15.2	18.1	18.5	21.6	22.1	21.4	22.3	21.8	27.2
29	12.2	12.2	14.1	15.4	17.3	18.8	21.8	21.6	21.6	22.7	20.5	27.8
-1	-3	-3.3	-2.4	-1.7	-2.5	-2.9	-4.7	1.7	1.1	4.3	-0.2	-3.3
-2	-4.9	-4.2	-3.3	-2.5	-3.8	-4.6	-6.2	-0.1	-0.5	0.8	-1	-5.6
-3	-5.5	-5.1	-4.8	-4.1	-5.4	-5.5	-7.1	-2.5	-1.9	-0.9	-2.5	-7.4
-3.7	-5.9	-6.3	-5.2	-5.5	-6.1	-6.8	-8.4	-3.3	-3.7	-2.3	-4.5	-9.3

二、機翼模型之攻角與高度對應的升力值(gw)

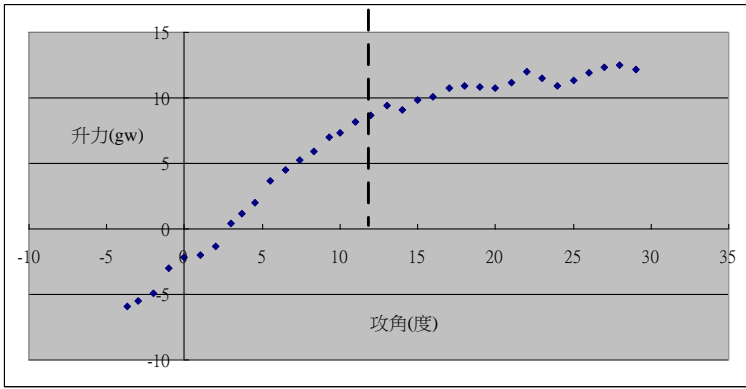
與珍珠板距離 攻角(度)	13.5cm	11.5cm	9.5cm	8.5cm	7.5cm	6.5cm	5.5cm	4.5cm	4cm	3.5cm	3cm
0	-2.3	-2.1	-1.4	-0.2	1.1	2.8	3.8	4.3	4.2	4.2	8.2
1	-1.2	-1.4	1.1	0.2	1.5	3.2	4.8	5.3	5.7	5.6	9
2	0.6	0.4	2.3	1.6	3.3	5.6	6.7	6.9	6.5	8.2	11.7
3	1.6	1	3.7	3.3	5.3	7	8.2	8.2	10	10.9	13.3
3.7	1.7	3.5	5.2	4.5	6.6	8.7	9.5	10.3	10.7	13.1	15.4
4.5	2.5	2.6	7.4	6.2	7.3	10.3	12.1	12.3	13.6	15.1	16.9
5.5	7.7	6.1	8.9	7.6	9.4	11.8	13.6	13.5	14.5	16.5	19.4
6.5	9.6	7.4	9.7	8.7	11.4	13.2	15.7	15.8	17.2	18.9	20.5
7.4	11	6.3	10.8	10.5	13.4	14.8	17.1	16.7	18.5	20.7	22.3
8.3	11.4	8.5	13	11.8	15	16.7	18	17.3	20.8	22.5	22.7
9.3	14.4	12.1	14.4	13.6	15.9	18.3	19.7	18.1	23.1	23	24.1
10	13.7	13.1	15.4	15.3	17.2	19.3	21.2	19.5	23.6	24.5	25.7
11	16.4	14.2	16.8	16.5	18.4	20.9	21.8	21.2	23.5	25.3	27
12	17.4	15.7	17.8	17.4	19.2	21.5	23.2	21.6	24.4	26.8	26.5
13	19.2	16.2	18.7	18.9	20.7	21.7	23.7	22	23.3	26.2	26.5
14	20.3	18	19.8	19.9	21.8	23.8	24.1	22.7	24.2	27.3	27.5
15	20.2	18.4	21.3	21	22.6	23.9	24.4	23.5	23.6	26.2	26.4
16	21.9	19.6	22.4	21.9	22.6	23.5	24.1	23.4	24.1	26.7	27
17	22.2	20.1	23.3	22.3	22	23.9	24.9	23.3	23.6	26.1	28.5
18	23.7	21.9	22.2	22.1	22.8	23	23.8	22.5	23.5	27.6	27.4
19	23.9	21.8	22.6	22.5	22.2	23.1	24.9	23.1	23.6	27.6	27.3
20	24.9	22.7	22.9	22.8	21.5	22.5	23.8	22.6	23.7	27.9	28
21	22.7	21.5	22.3	21.6	22.1	23	23.9	23	24.2	28.5	28.2
22	22.7	21.7	21.9	20.9	21.5	22.9	24.6	24.1	24.6	28.6	28.6
23	20.1	21	20.8	20.3	22	23	24.8	24.7	24.6	28	29
24	19	20	21.6	20.2	21.4	22.9	24.5	25.6	25.5	27.5	28.5
25	20.6	20.6	21.5	21.3	22.2	23.4	24.3	25.1	25.6	28.2	28.7
26	20	19.1	21.1	21.7	22.2	20.9	23.4	25.6	26	28	29.4
27	16.4	18.6	20.6	22	22.1	21	23.8	25	25.2	29	30.7
28	17.8	19.1	18.1	21.4	21.3	20.5	22.3	25.4	25.1	28.8	30.7
29	16.3	19.1	17.7	21	22.3	21	22.5	25.2	24.4	29.9	31.1
-1	-4.6	-3.5	-2.7	-1.8	-0.8	-0.3	2.4	3.3	3.4	3.2	4
-2	-4	-4.6	-4.2	-3.4	-2.3	-1.4	0.1	1.7	2	0.2	1
-3	-5.9	-6.2	-4.9	-5.2	-3.8	-3.9	-1.3	-0.3	-0.4	-1.8	-1.4
-3.7	-8.5	-7	-7.5	-6.4	-5.5	-5.4	-4.7	-1.2	-1	-3.8	-3

與珍珠板距離 攻角(度)	2.5cm	2cm	1.5cm	1cm	0.5cm	0.2cm
0	9.3	9.5	9.5	8.3	8.8	10.3
1	10.7	11.7	11.2	10.3	9.5	10.8
2	13.7	13.5	14	12.4	13.4	13.7
3	14.8	16.3	16.9	16	16.8	16.5
3.7	17.6	18.9	18.3	18.4	19.1	18.1
4.5	18.3	20.8	20.5	22	20.3	15.5
5.5	18.9	21.4	22.1	24.2	22.7	17.2
6.5	23.2	24.8	23.3	25.8	24.9	17.7
7.4	23.6	26	26	26.5	26.7	21
8.3	26.2	27.3	26.2	29.3	27.5	19.8
9.3	26.6	28.5	29	32.6	28.9	22
10	28	29.4	29.7	32	29.2	22.6
11	26.4	29.7	31.3	32.8	30.6	25.4
12	27.2	28.3	30.9	32.3	30.5	25.7
13	28.5	28.2	30.1	33.7	29.8	26.3
14	27.9	29.6	30.4	33.9	32	26.8
15	26.9	29.6	32.7	35.1	33.5	27.2
16	28.8	30.3	32.1	33.8	32.7	27.7
17	29.2	29.5	31.6	34.9	33.5	28.4
18	28.8	29.4	30.5	35.2	33	28.6
19	28.9	29.6	31.2	34.8	32.2	27.8
20	29.8	31.4	30.7	35.2	33.2	28.6
21	29.9	29.7	32.6	35.8	32.6	29.6
22	29.8	30.8	32.8	36.6	34.2	29.9
23	29.4	30.8	33.6	37.4	34.2	30.4
24	29.7	31.7	34.1	35.6	36.2	32.8
25	31	32.4	33.7	36.1	33.7	33.6
26	29.4	32.9	34	35.8	35.7	34.8
27	31.2	32.3	32.5	36.4	35.9	34.1
28	31.2	30.8	33.8	36.6	35	32.7
29	31.3	32.5	34.1	34.5	34.8	35.5
-1	7.1	7.7	5.8	8.9	2.8	3
-2	4.8	5.2	2.8	4.7	0.5	-0.8
-3	2	2.7	-0.2	2.1	-2.5	-2.6
-3.7	-0.2	0.1	-2.7	-1.6	-6.3	-3.9

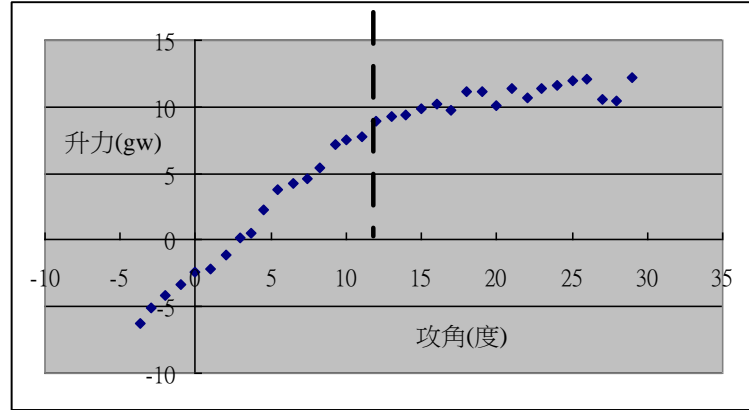
## 陸、討論

一、 平板(長 27 cm、寬 7 cm、厚度 0.8 cm)

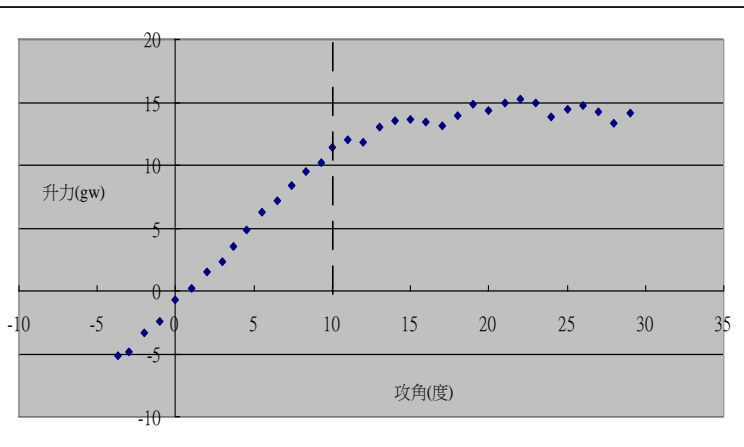
(一)不同高度下升力-攻角變化圖



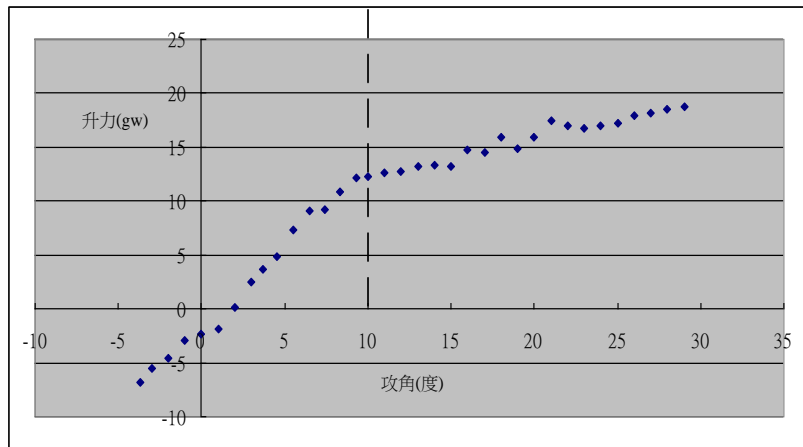
13.5 cm 圖 22



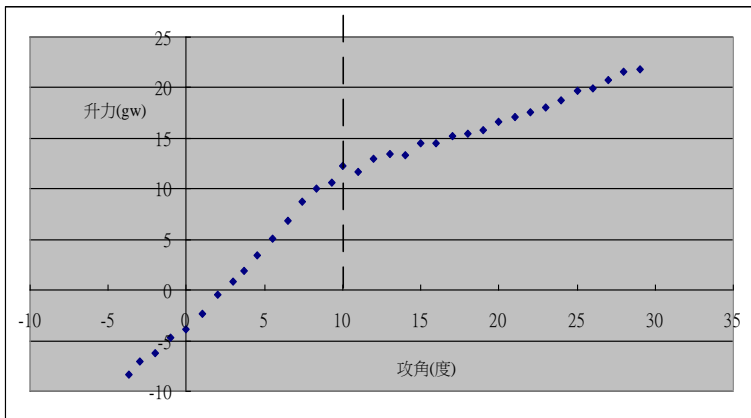
11.5 cm 圖 23



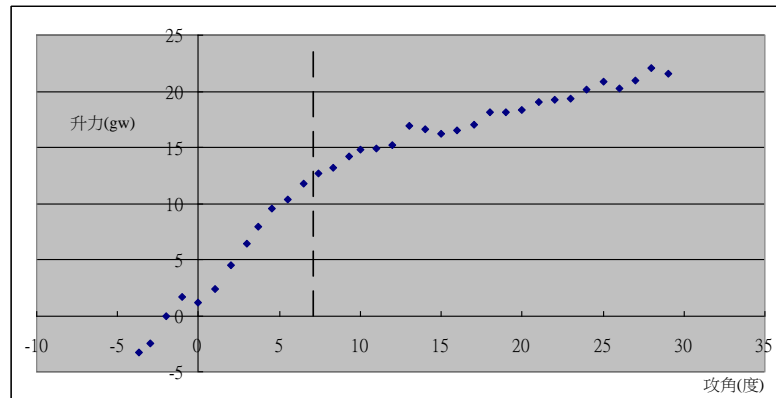
9.5 cm 圖 24



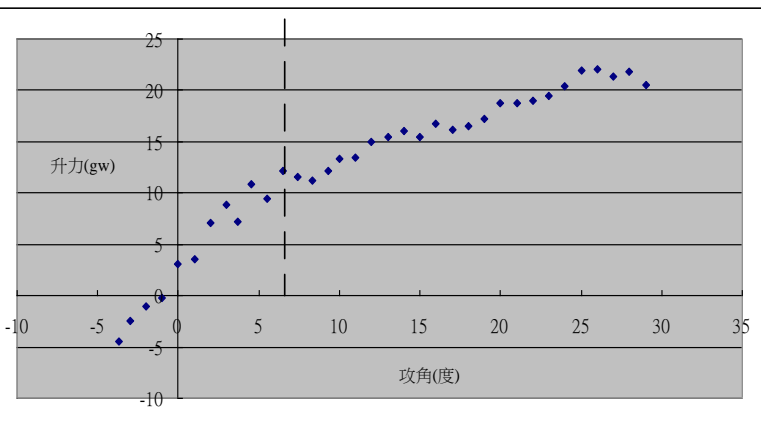
7.5 cm 圖 25



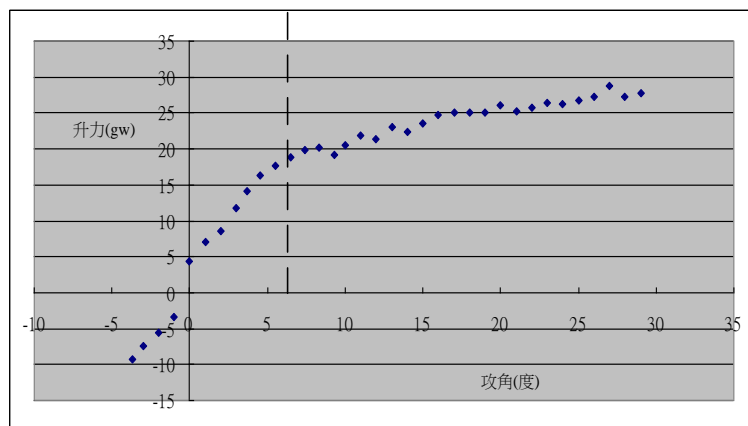
5.5 cm 圖 26



3 cm 圖 27



1.5 cm 圖 28



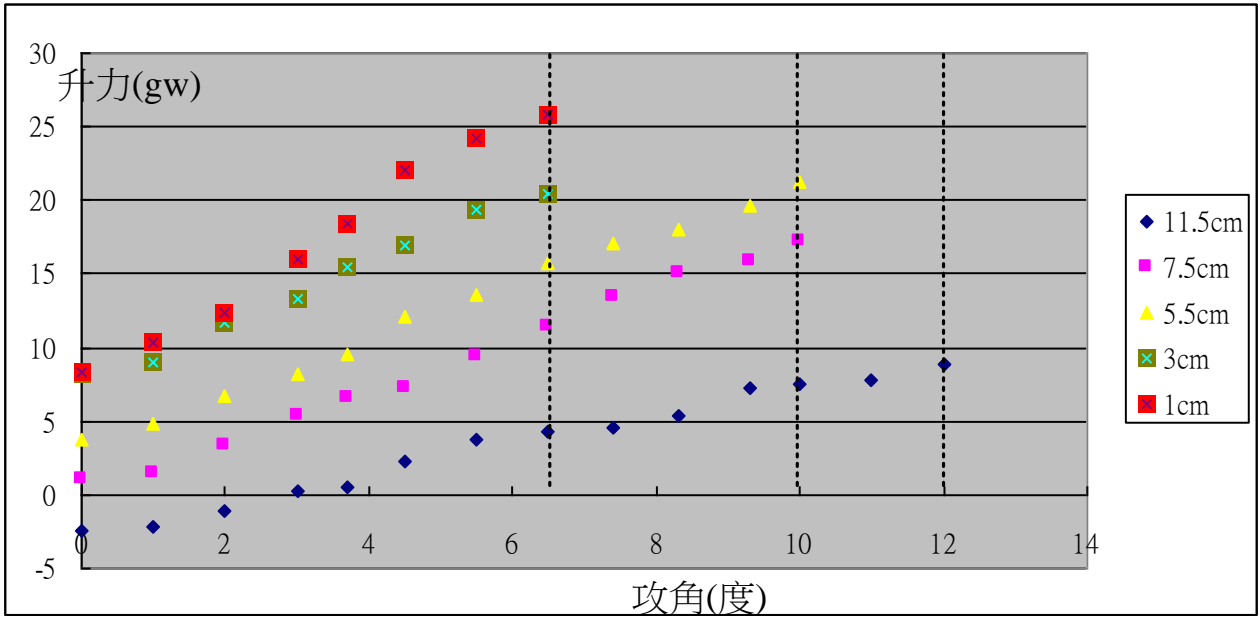
1 cm 圖 29

- (二)每一個高度下的攻角—升力圖都有一個「轉折點」，使得圖形斜率改變。
- (三)我們認為斜率改變是因為平板上表面發生了「紊流」，導致升力無法跟原來一樣有效率地增加。斜率改變的角稱為「失速角」。
- (四)圖 30 及表 2 可看到隨高度減小，失速角會變小，而且失速前斜率愈來愈大。
- (五)從表 2 的失速角及失速前斜率來看，因為 13.5 cm 及 11.5 cm 數值的相似性，及 9.5 cm 的失速角變小和失速前圖形斜率的變大，可推估高度 9.5 cm 甚至之前即發生地面效應(平板長邊的 0.35 倍)。
- (六)愈接近地面失速角愈小，失速角的升力愈大，失速前的斜率也愈大，顯示愈接近地面，升力隨攻角增加愈快且升力愈大，我們認為這是地面效應所導致。
- (七)失速角隨高度減小而變小是因為平板下方壓力過大，所以原本流經平板下方的氣流轉而從平板上方流過，而當流量過多時，上方即產生紊流。當愈接近地面時，氣墊效果愈強，就愈容易會有這種情形，所以失速角會隨高度減小而變小。

表 2

高度(cm)	13.5	11.5	9.5	7.5	5.5	3	1.5	1
失速角(度)	12	12	10	10	10	6.5	6.5	6.5
當下升力(gw)	8.7	8.9	11.4	12.3	12.3	11.8	12.2	18.8
失速前斜率	0.991	1.000	1.237	1.713	1.801	2.039	1.362	2.916

失速前升力-攻角比較圖



畫上趨勢線

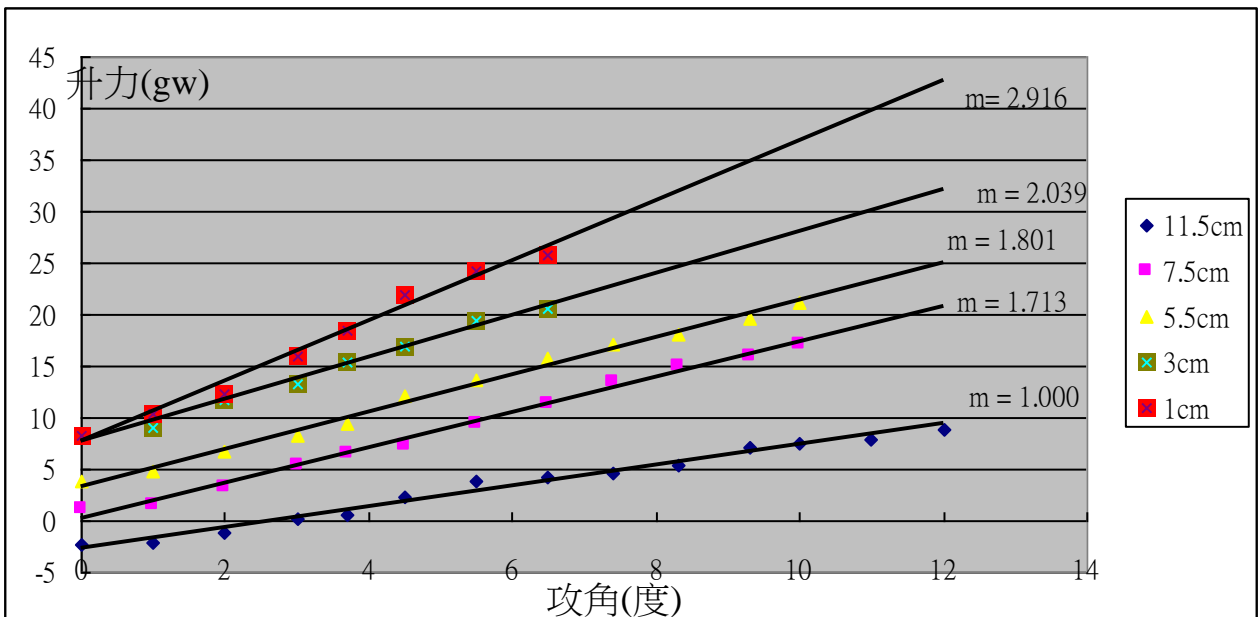
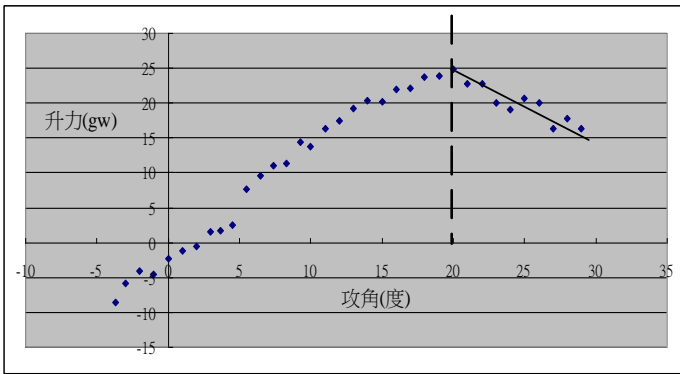


圖 30

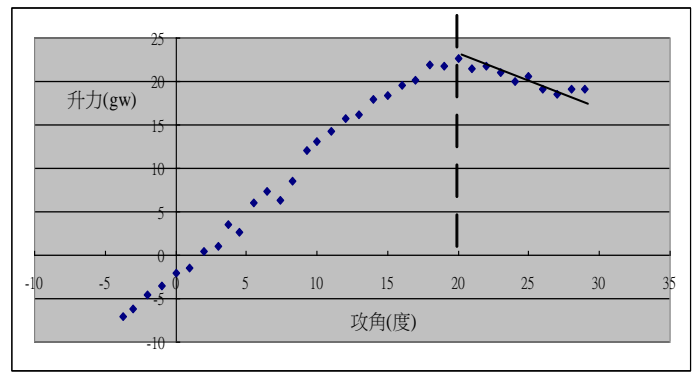


二、機翼(翼展長 27cm、翼弦長 7cm、厚度 0.8cm)

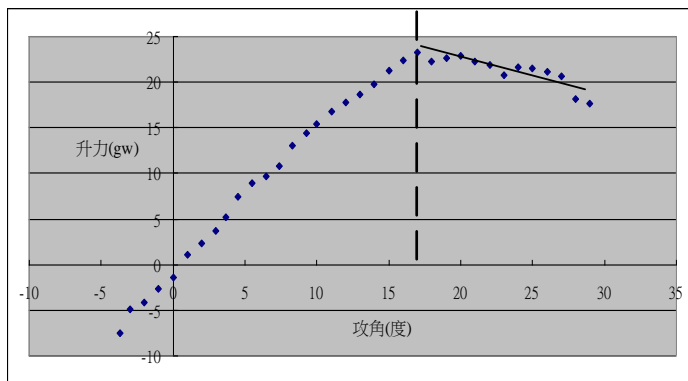
(一)不同高度下升力-攻角變化圖



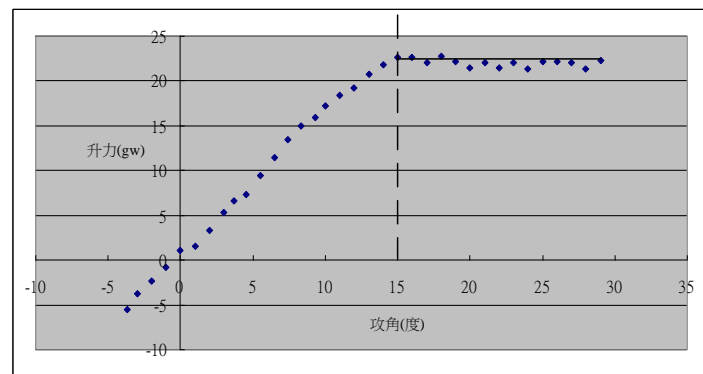
13.5 cm 圖 31



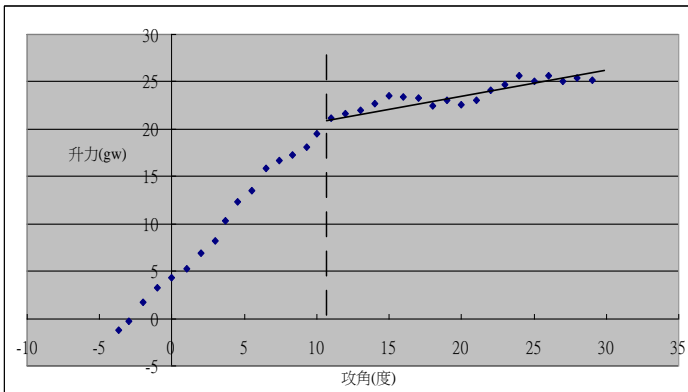
11.5 cm 圖 32



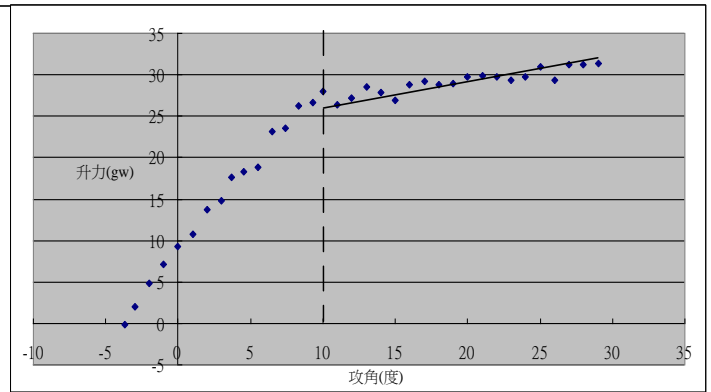
9.5 cm 圖 33



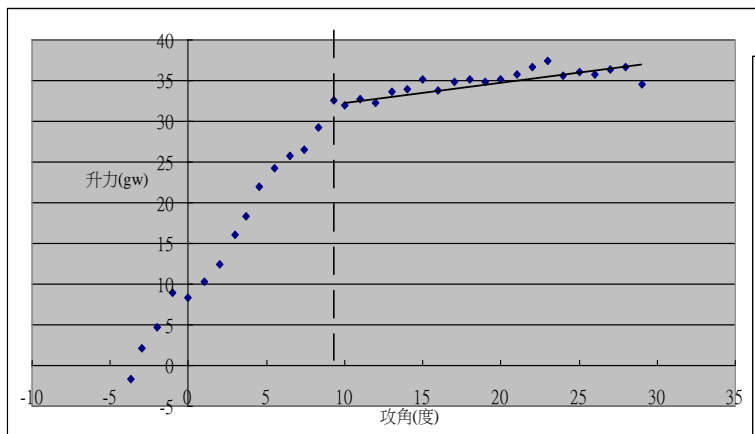
7.5 cm 圖 34



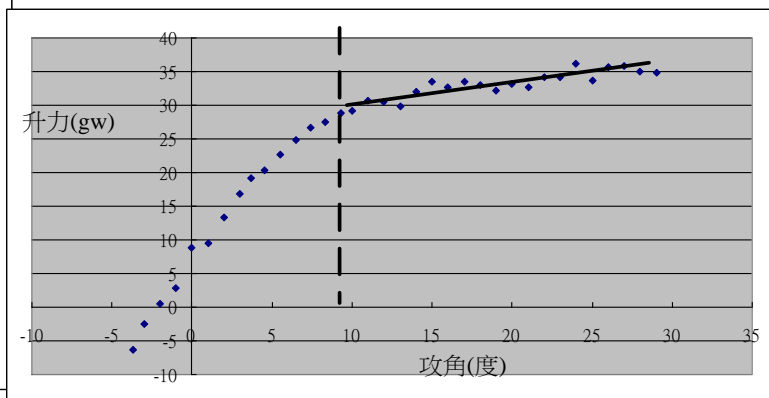
4.5 cm 圖 35



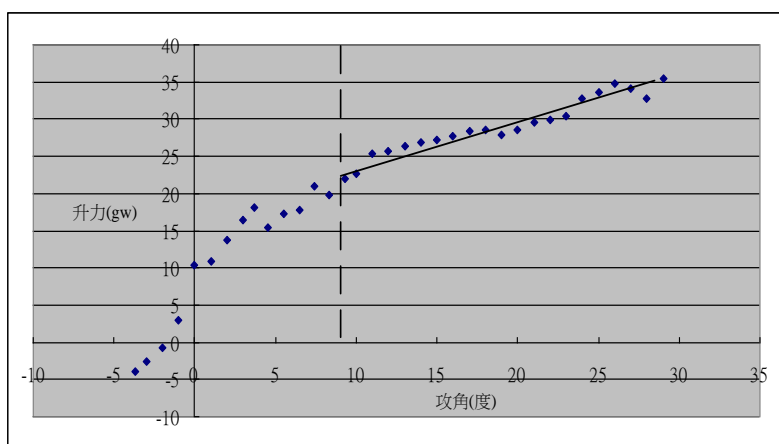
2.5 cm 圖 36



1 cm 圖 37



0.5 cm 圖 38



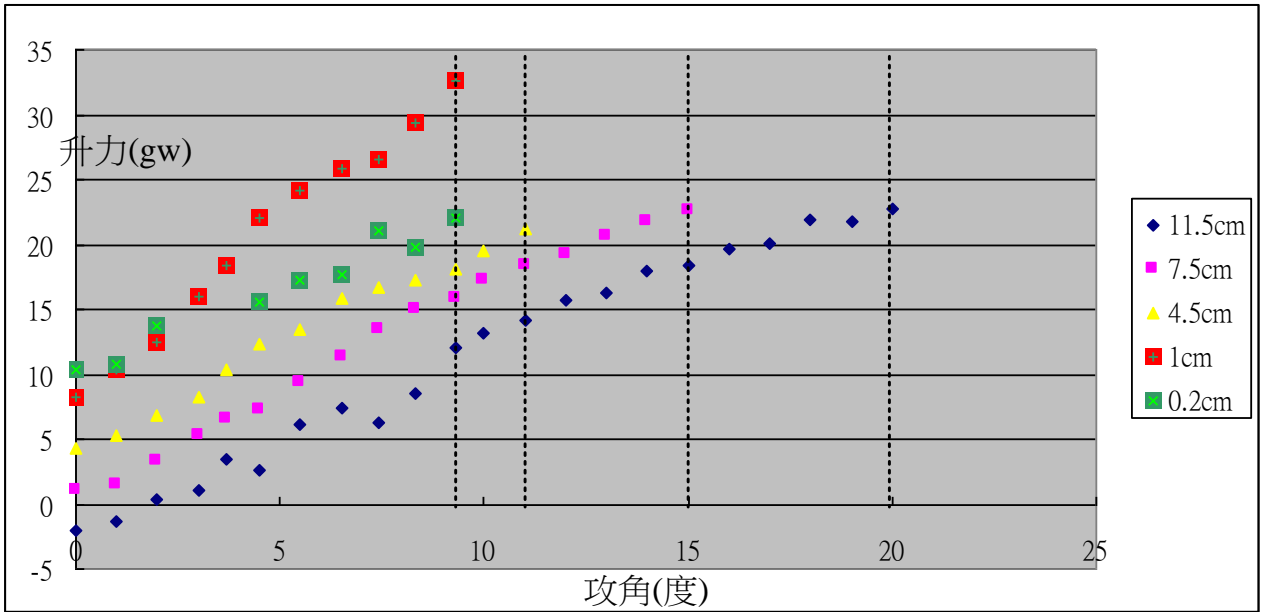
0.2 cm 圖 39

(二)機翼同樣也是每一個高度下的攻角—升力圖都有一個「轉折點」，使得圖形斜率改變。  
 (三)斜率改變也是因為機翼上表面發生了「紊流」，導致升力無法跟原來一樣有效率地增加。  
 (四)表 3 為對以上圖形特點做的整理。隨著高度減小，失速角變小，失速角升力變大，而且失速前的斜率也有變大的趨勢(高度 1cm 之前)，表示愈接近地面，升力隨攻角增加愈快且升力愈大。而失速角後的升力圖從下掉到水平，甚至後來上揚等等都是地面效應的影響。

表 3

高度(cm)	13.5	11.5	9.5	7.5	4.5	2.5	1	0.5	0.2
失速角(度)	20	20	17	15	11	10	9.3	9.3	9.3
當下升力(gw)	24.9	22.7	23.3	22.6	21.2	28	32.6	28.9	22
失速前斜率	1.450	1.3301	1.445	1.540	1.574	1.949	2.628	2.304	1.254
失速後圖形趨勢	下掉	下掉	下掉	水平	上揚	上揚	上揚	上揚	上揚

失速前升力-攻角比較圖



加上趨勢線

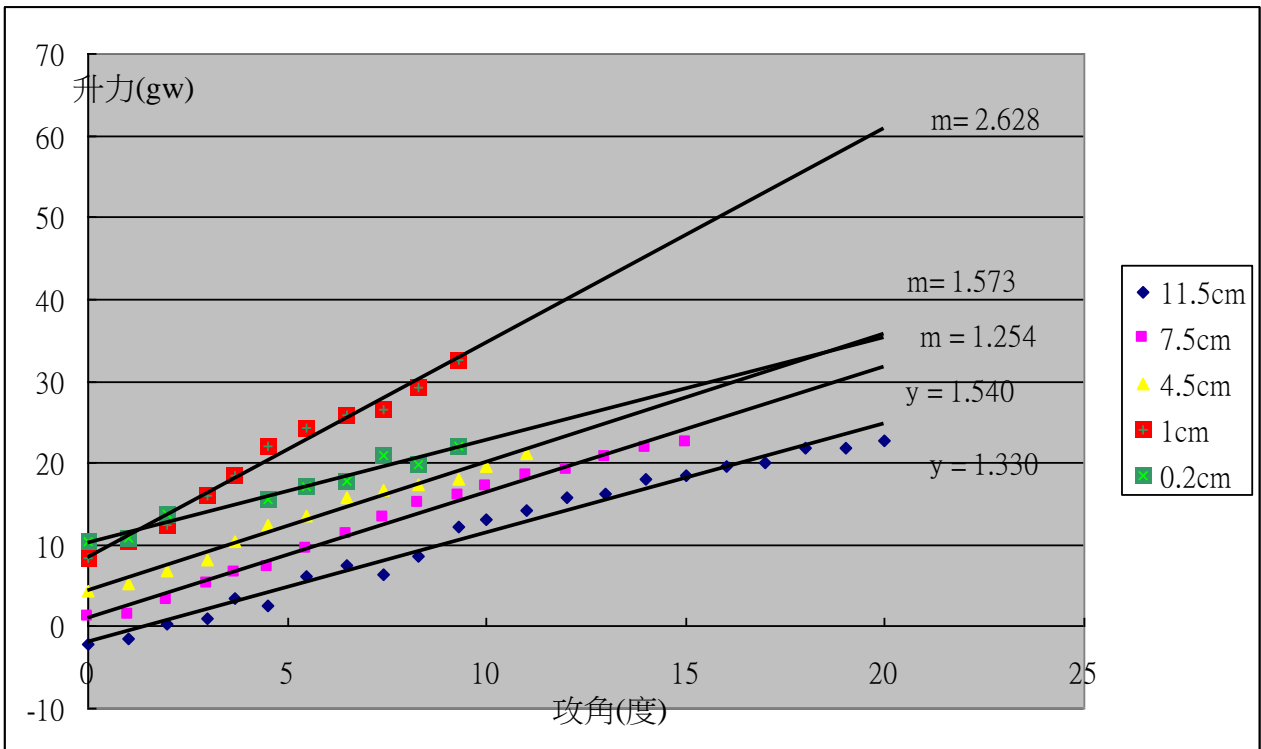


圖 40

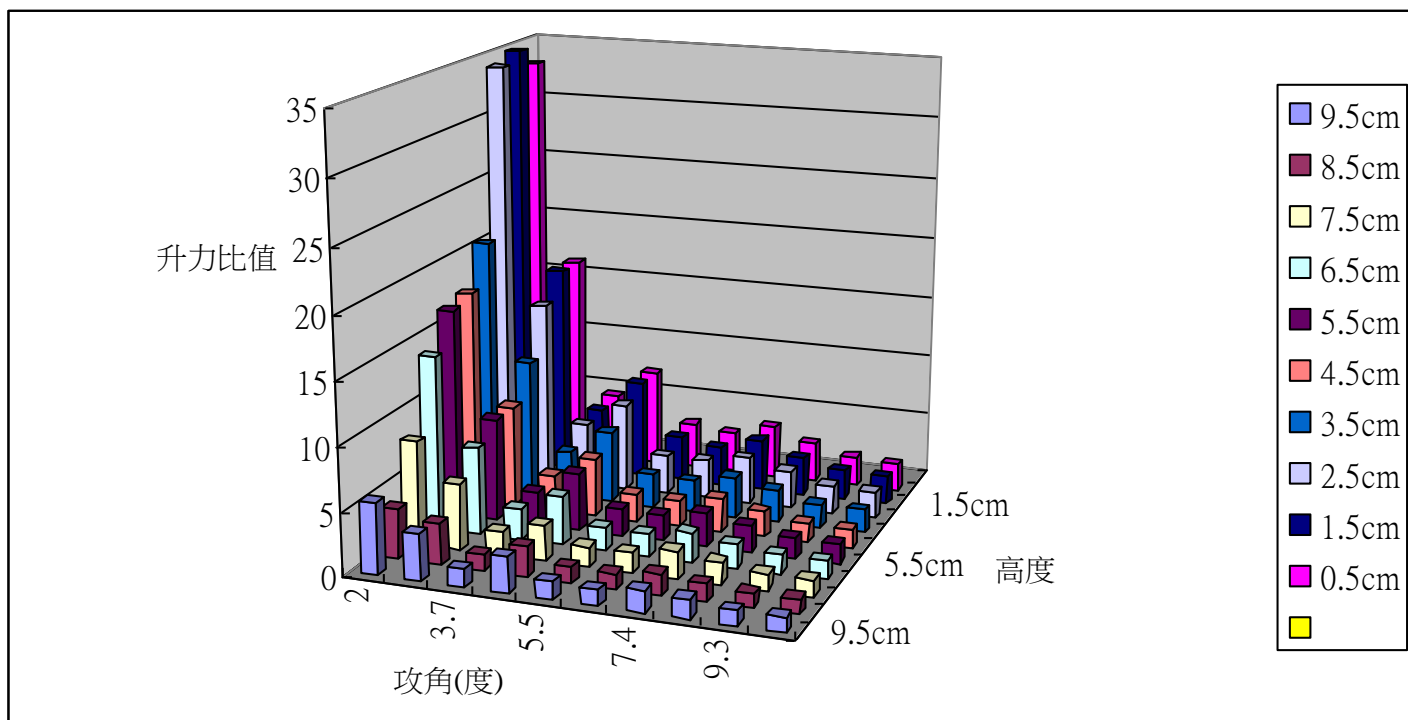
- (五)失速角隨高度減小而變小也是因為機翼下方壓力過大，所以原本流經機翼下方的氣流轉而從機翼上方流過，而當流量過多時，上方即產生紊流。當愈接近地面時，氣墊效果愈強，就愈容易會有這種情形，所以失速角會隨高度減小而變小。
- (六)距地面 1 cm、0.5 cm、0.2 cm 的失速角同樣是 9.3 度，但是 0.5 cm、0.2 cm 的失速前斜率及升力卻小於 1 cm，應是下翼面與地面過於接近，氣流不容易流進其空間產生氣墊。

(七)表 4 為同攻角升力比值表(即  $\frac{x'}{x}$  , 攻角從 2 度到 9.3 度)

$x$  : 高度 11.5 cm 的升力,  $x'$  : 其他高度的升力

表 4

與珍珠板距離 攻角(度)	11.5cm	9.5cm	8.5cm	7.5cm	6.5cm	5.5cm	4.5cm	3.5cm	2.5cm	1.5cm	0.5cm
2	1	5.75	4	8.25	14	16.75	17.25	20.5	34.25	35	33.5
3	1	3.7	3.3	5.3	7	8.2	8.2	10.9	14.8	16.9	16.8
3.7	1	1.49	1.29	1.89	2.49	2.71	2.94	3.74	5.03	5.23	5.46
4.5	1	2.85	2.38	2.81	3.96	4.65	4.73	5.81	7.04	7.88	7.81
5.5	1	1.46	1.25	1.54	1.93	2.23	2.21	2.7	3.1	3.62	3.72
6.5	1	1.31	1.18	1.54	1.78	2.12	2.14	2.55	3.14	3.15	3.36
7.4	1	1.71	1.67	2.13	2.35	2.71	2.65	3.29	3.75	4.13	4.24
8.3	1	1.53	1.39	1.76	1.96	2.12	2.04	2.65	3.08	3.08	3.24
9.3	1	1.19	1.12	1.31	1.51	1.63	1.5	1.9	2.2	2.4	2.39



升力比值附圖 圖 41

(八)圖 31~39、表 3、表 4 其規律性讓人相信發生地面效應的高度，為 11.5~9.5 cm 之間，接近 0.4 倍的翼展長。而真正有極為顯著效果的高度，在 3.5~0.5 cm 之內，約 0.13 倍翼展長。

(九)將表 4 畫出長條圖圖 41，可明顯看出攻角愈低，高度愈小，升力比值就愈大。

(十)攻角 9.3 度為高度 1 cm 的失速角。藉此角來細看升力比值，發現 3.5 cm 內升力可為無地面效應時的 1.9~2.4 倍之間，見圖 42。

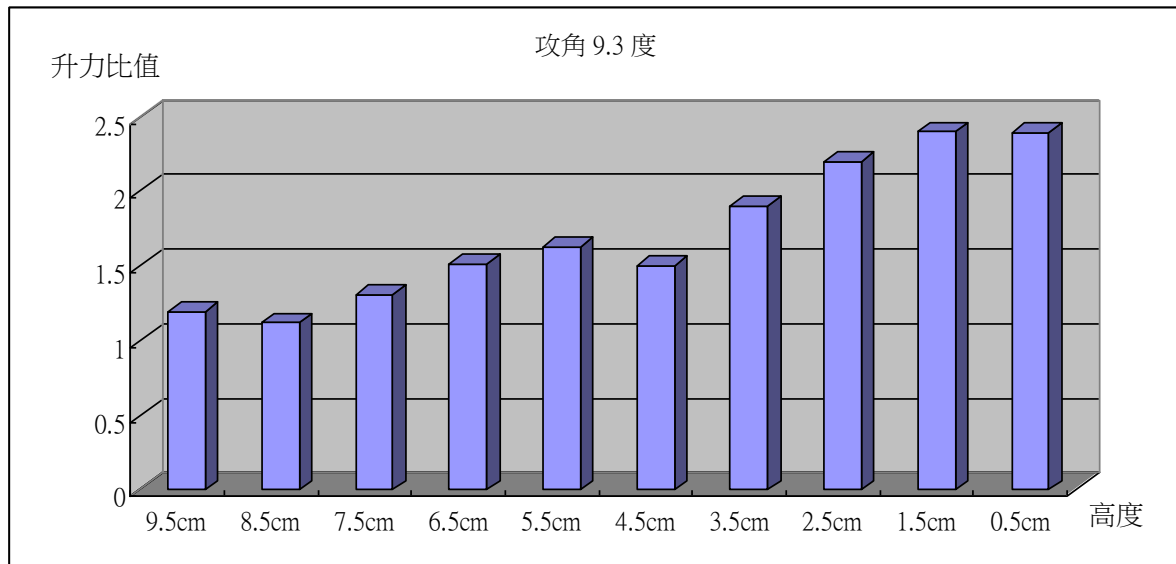


圖 42

(十一)攻角 2 度時有其十分誇張的倍率，2.5 cm 內可達 34 倍以上的升力，足見其飛行的輕快，見圖 43。

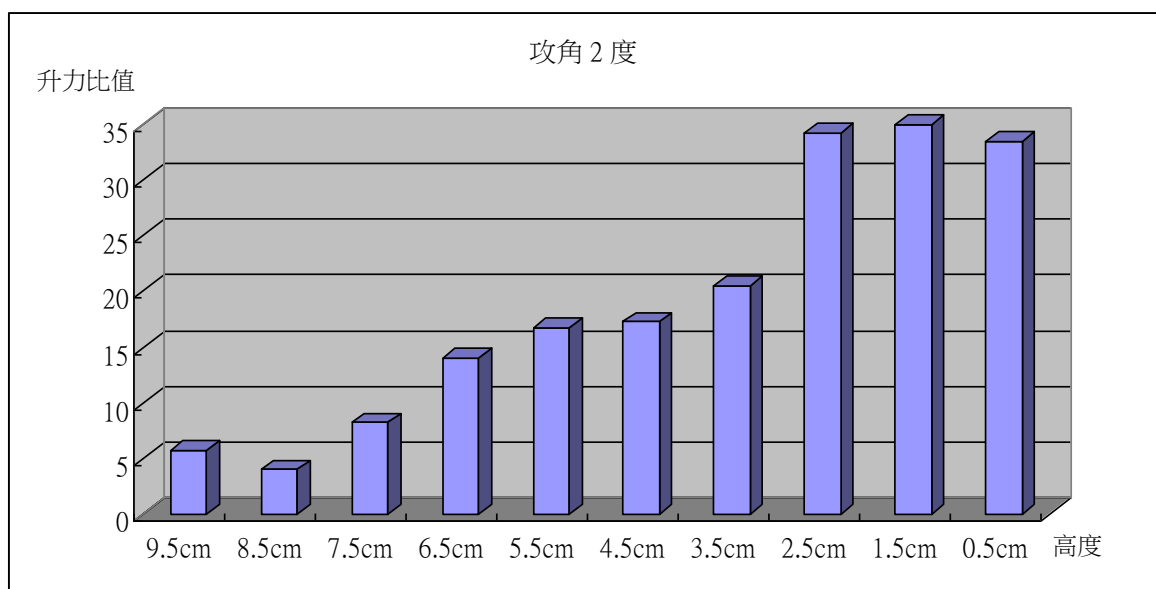


圖 43

(十二)表 5 為「同樣攻角 6.5 度」時， $y'/7.4$  與  $z'/7.4$  對照表

7.4gw：無地面效應機翼的升力(高度 11.5 cm)

$y'$ ：平板於不同高度的升力

$z'$ ：機翼於不同高度的升力

表 5

種類 \ 與珍珠板距離	11.5cm	9.5cm	7.5cm	5.5cm	3cm	1.5cm	1cm
平板( $y'/7.4$ )	0.58	0.97	1.23	0.92	1.59	1.65	2.54
機翼( $z'/7.4$ )	1	1.31	1.54	2.12	2.77	3.15	3.49

表5的附圖

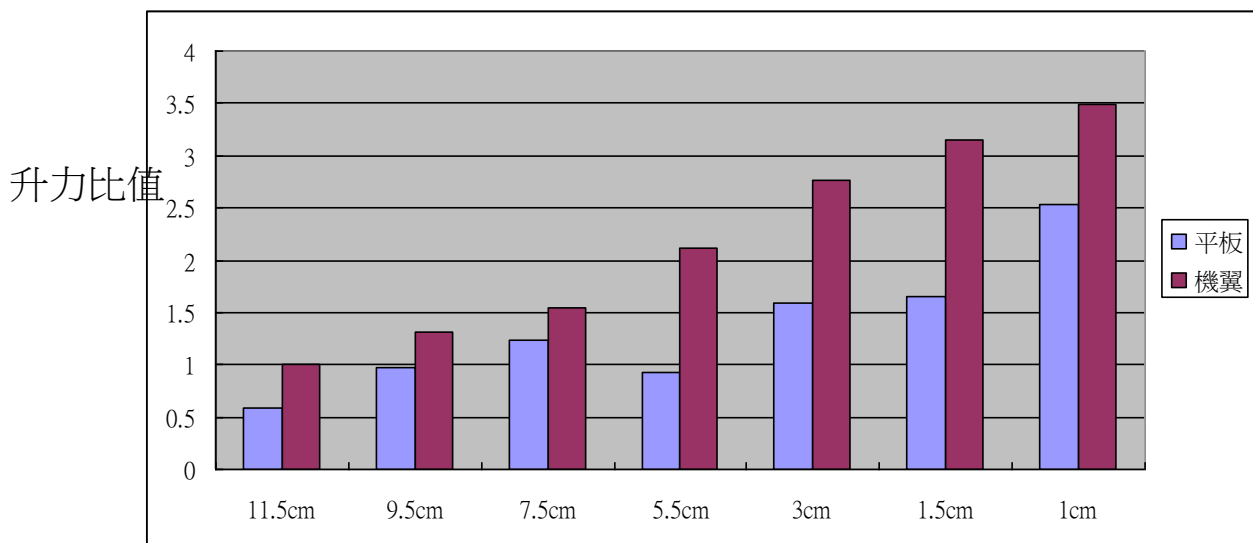


圖 44

(十三)「攻角 6.5 度時」，平板高度 11.5cm 升力小於無地面效應時的機翼(7.4gw)，平板 9.5 cm 時升力約等於無地面效應時的機翼升力(比值接近 1)，配合機翼的圖形數據，我們相信平板與機翼發生地面效應的高度皆為 11.5~9.5cm 之間，接近 0.4 倍的翼展長。

(十四)平板於圖 44 的升力比值也是像機翼一樣，高度愈小其值愈大，但是都不及機翼。我們認為是因為機翼上翼面有特殊形狀，且翼尖渦流機翼較為明顯，其加上珍珠板後自然有效提升升力。

## 柒、結論

- 一、長 27 cm、寬 7 cm、厚度 0.8 cm 的平板與翼展長 27cm、翼弦長 7cm、厚度 0.8cm 的機翼同樣在約 0.4 倍的翼展長高度下即開始發生地面效應，愈接近地面，效應愈明顯。
- 二、平板於攻角 6.5 度，0.35 倍「長」的高度下升力即接近無地面效應時的機翼，可看出此高度有地面效應。
- 三、平板升力不及機翼，是因為機翼上翼面特殊形狀所致。
- 四、機翼與平板，無論有無地面效應，攻角大時上表面都會產生紊流。有地面效應時失速角會變小，也就是會在較小攻角產生紊流。提前產生紊流與下表面壓力過大，所以原本流經下表面的氣流轉而從機翼(平板)上方流過有關。
- 五、機翼在有地面效應時，攻角比失速角大升力仍能持續上升而無崩毀與地面效應有關。
- 六、機翼在 0.13 倍翼展長高度下，地面效應極為顯著且穩定。
- 七、機翼過於接近地面時(約 0.019 倍翼展長)，地面效應效果不好，是因氣流不容易進入下翼面形成氣墊。
- 八、機翼在攻角 9.3 度，0.13 倍翼展長的高度下，升力可為無地面效應時的 1.9~2.4 倍之間。
- 九、機翼在攻角 2 度，0.1 倍翼展長的高度下，升力可為無地面效應時的 34 倍以上。
- 十、機翼攻角愈低，高度愈小，相對升力就愈大。

## 捌、參考資料及其他

### 一、實驗誤差及改善：

- (一)因為木條與珍珠板有些微接觸，所以在吹風時會產生摩擦力，而影響數據值。往後若還要進行類似的實驗，可將珍珠板與木條接觸的地方塗上油，必可形成近似光滑平面。
- (二)機翼表面較為粗糙，會增加氣體黏滯力，影響升力效果。若要增強效果可在表面塗上化學塗料來增加其光滑程度。
- (三)我們發現平板及機翼模型在  $0^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$  時會出現負升力的不合理情形，由於每個圖形點皆成連續排列，所以我們相信必有某種因素在影響數據。針對這點我們回頭仔細觀察我們的實驗架設，發現風扇軸對水平有俯角，而珍奶吸管的粗口徑對於風向的修正效果有限，所以造成此情形。我們也有把風扇軸調至水平，發現  $0^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$  負升力的情況馬上消失，顯示負升力的出現確實與風扇吹風的角度有關。也就是說經由風洞吹出的相對風其流線並不是完全水平，造成了測量角度的誤差，如果考慮這點，則以上的數據必須做平移  $2^\circ$  的修正(也就是  $2^\circ$  實際上是  $0^\circ$ ， $3^\circ$  實際上是  $1^\circ$ )。當我們做了這樣的修正時，無地面效應的機翼其失速角則為  $18^\circ$ ，此結果與文獻完全符合，顯示了本實驗的高度可信度。

### 二、未來展望

- (一)可用線香來觀察氣流動態
- (二)其實機翼不是只有我們這種翼切型，還有許多其他特殊形狀。而且我們的機翼是屬於長



方型機翼，另外還有許多不一樣的機翼，像是三角形機翼、橢圓型機翼。當這些特殊機翼及翼切型搭配在一起時，地面效應的效果會如何，很值得再繼續探討。

(三)地面效應的特點是有極高的升阻比，但是阻力隨著攻角及高度的變化是如何，也許和一般正常飛機相比有些微的差異。如果能知道阻力與升力的關係，必能了解地面效應機其最有效率的使用範圍。但若是探討阻力就需要更高難度的器材架設，有待我們再思考其實驗細節。

(四)賽車也曾使用反翼面的地面效應來增加下壓力，其相關設計也值得研究。

### 三、參考文獻

(一)王懷柱 揭開飛行的奧祕 修定二版 全華科技圖書股份有限公司印行  
p2-2~2-11 2-18~2-20 2-32~2-35 2-56~2-58

(二)黃嘉彥 飛行的奧祕 徐氏基金會出版 p67~77

(三)黃啟峰 96年 翼地效應下主翼對水平尾翼的影響研究 國立屏東科技大學機械工程系  
碩士學位論文 p5~25

(四)褚德三、蔣亨進、蔡尚芳、沈青嵩教授等著 物理(下) 龍騰文化出版 p122~127

(五)維基百科 地面效應

<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%9C%B0%E9%9D%A2%E6%95%88%E5%BA%94>

(六)維基百科 裏海怪物

<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%87%8C%E6%B5%B7%E6%80%AA%E7%89%A9>

(七)維基百科 翼地效應機

<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%9C%B0%E6%95%88%E9%A3%9E%E8%A1%8C%E5%99%A8>

(八)網路航空 太空 科學新聞搜集 <http://www.wretch.cc/blog/ivanova/12604404>

(九)engadget 中文版 回到過去：飛機篇

<http://chinese.engadget.com/2009/07/17/back-to-the-future-airplanes/>

## 【評語】 040110

- 1.本作品製作風洞探討機翼飛昇現象，系統化改變控制變因，整理結果並分析探討，有科學探究精神。
- 2.本作品強調兩項結論，其中有為己悉白努力原理可得，另一為地面效應，建議應將後者加強探究，並從事相關應用製作，鼓勵持續努力。