

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第三名

051816

魚你翼鰭飛—探討飛魚腹鰭對飛行穩定度的作用

學校名稱：國立花蓮高級中學

作者： 高二 莊濟謙 高二 張立欣 高二 劉翊丞	指導老師： 胡育豪 吳旻
-----------------------------------	--------------------

關鍵詞：飛魚腹鰭、穩定度、風洞

摘要

在飛魚飛行時的影片發現，飛魚調整腹鰭來改變飛行狀態，可見在大家認為胸鰭為改變飛行主要原因之下，腹鰭在飛行時仍具作用，因此，我們測量斑鰭飛魚標本、製作仿生飛魚和針對影片中的現象規劃兩項實驗：「運動行為實驗」、「風洞穩定度實驗」，發現在攻角為 35~45 度時，飛魚的穩定度最大。其中以 A_5 、 A_7 在外擴角 θ_5 時，是最適合飛魚飛行的狀態，但又以腹鰭面積 A_7 為最佳。

壹、前言

一、研究動機與文獻探討

動物的飛行方式可分為：1.動力飛行，例如：鳥類、昆蟲、蝙蝠…等，和 2.無動力飛行，例如：飛鼠、飛蛇、飛魚…等。無動力飛行模式往往是依靠高處落下與空氣動力學特性，轉換重力位能為向前飛行動能，並利用擴張身體截面積產生升力而提升滑翔距離，如：飛蛇控制肋骨張開始身體呈現扁平狀（圖 1 所示）。然而飛魚不同其他無動力飛行動物，其在滑翔之初有較大的初速度，且其飛行是由海面上升至一高度滑翔，再下降入海面，因此其升力應大於或等於魚本身重量，其他滑降的動物則升力小於本身重量；又飛魚滑翔目的是為了逃避狩獵者，因此會產生較為複雜的飛行現象，這讓我們思考是否有更多飛魚飛行研究的方向？

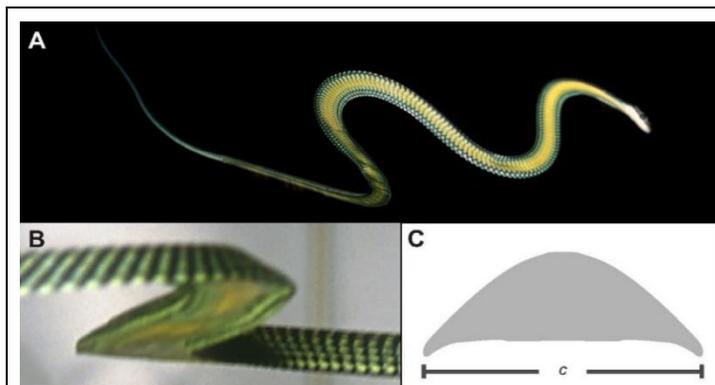


圖 1：飛蛇飛行身體 (A)腹面觀看空中飛蛇 (B) 側視圖/腹視圖，顯示三角形背表面和兩個腹側突出的側邊緣 (C) 橫截面幾何形狀 資料來源：” Aerodynamics of the flying snake *Chrysopelea paradisi*: how a bluff body cross-sectional shape contributes to gliding performance” Daniel Holden , John J. Socha (2014)

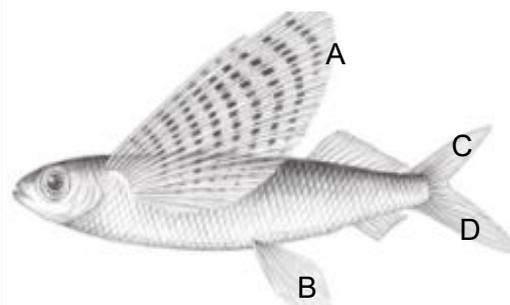


圖 2：斑鰭飛魚繪製圖

(A)胸鰭 (B) 腹鰭 (C) 尾鰭上葉 (D)尾鰭下葉 資料來源：” 《臺灣魚類資料庫》

欲探討飛魚前，先觀察飛魚身體構造和其飛行過程：根據中研院《臺灣魚類資料庫》，台灣記載中的飛魚有四亞科、七屬共二十五種，其中較常見的飛魚是「斑鰭飛魚」（圖 2 所

示)，其體態修長，稍稍扁平，長度一般為 45cm。胸鰭、腹鰭發達如翼，但胸鰭比腹鰭大得多；尾鰭似剪刀形，分上下兩葉，其中下葉要比上葉長些。觀看 BBC 拍攝飛魚飛行之影片，發現其飛行是：先躍出水面稍稍張開胸鰭，以 S 型姿態擺動尾部，達到速度後，完整張開胸鰭與腹鰭而向上滑翔，且我們發現：

1. 飛魚正常下降入水時，會將腹鰭夾角縮小。
2. 飛魚為了躲避會透過轉動身軀使魚頭朝下，直衝水面，同時將胸鰭與腹鰭收起。
3. 飛魚有時會因過大的攻角，使之飛的過高且有翻覆的可能。
4. 飛魚於水面下不張開腹鰭，但飛行時會改變腹鰭對魚身夾角來調整飛行狀態。

由以上觀察，我們注意到飛魚飛行除了胸鰭外，腹鰭對飛行行為也會產生影響，我們發現腹鰭面積小於胸鰭許多，認為對升力幫助不大，所以推測腹鰭影響飛行時的穩定性。

因此我們查詢了有關飛魚腹鰭的相關研究資料，根據 (Hyungmin Park and Haecheon Choi, 2010) 研究中顯示，若俯仰力矩系數越低飛行之穩定度則越高，而在魚身攻角為 40~45 度，俯仰力矩系數最低，且該篇研究認為腹鰭的升力力矩是造成此俯仰系數與穩定的關鍵。然而該研究並未進一步探討腹鰭改變會造成穩定度或力矩如何變化，因此本研究希冀。透過改變腹鰭面積大小與外擴角，使用風洞和自由下落的模擬飛魚的飛行狀態並分析其力學和運動學，找出改變腹鰭對飛魚飛行之穩定度的影響。

二、研究目的

(一)、運動行為實驗

1. 改變腹鰭面積，研究腹鰭面積和飛行狀態之關係
2. 改變不同腹鰭與魚身之間的夾角（本研究稱為外擴角），研究腹鰭外擴角和飛行狀態之關係

(二)、風洞穩定度實驗

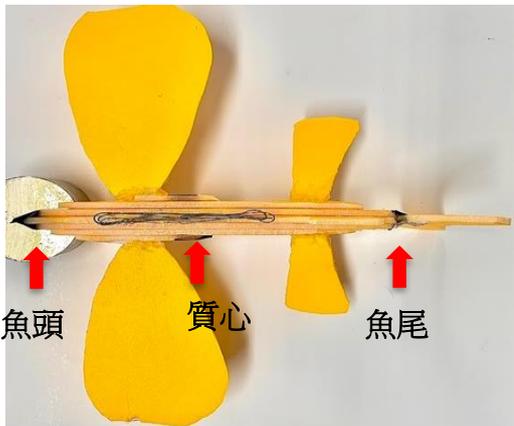
1. 改變腹鰭面積，研究在不同魚身攻角下，胸鰭升力和腹鰭升力和力矩之關係
2. 結合胸鰭升力和腹鰭升力之關係，找出在該模型中，風速為一定值時，該飛魚的穩定飛行攻角範圍為何
3. 改變外擴角，探討不同腹鰭面積與不同外擴角搭配時，飛魚升力與力矩的關係

貳、研究設備及器材

一、研究設備

<p>品名：直流電源供應器 規格：Vmax=32V、Amax=3.2A</p>	<p>品名：自製風洞 規格：抽風扇區(125V 15A)、電腦風扇區(12V 0.16A)</p>
	
<p>品名：電磁鐵</p>	<p>品名：電子磅秤 規格：最大秤重 200gw，最小單位 0.01gw</p>

二、實驗器材

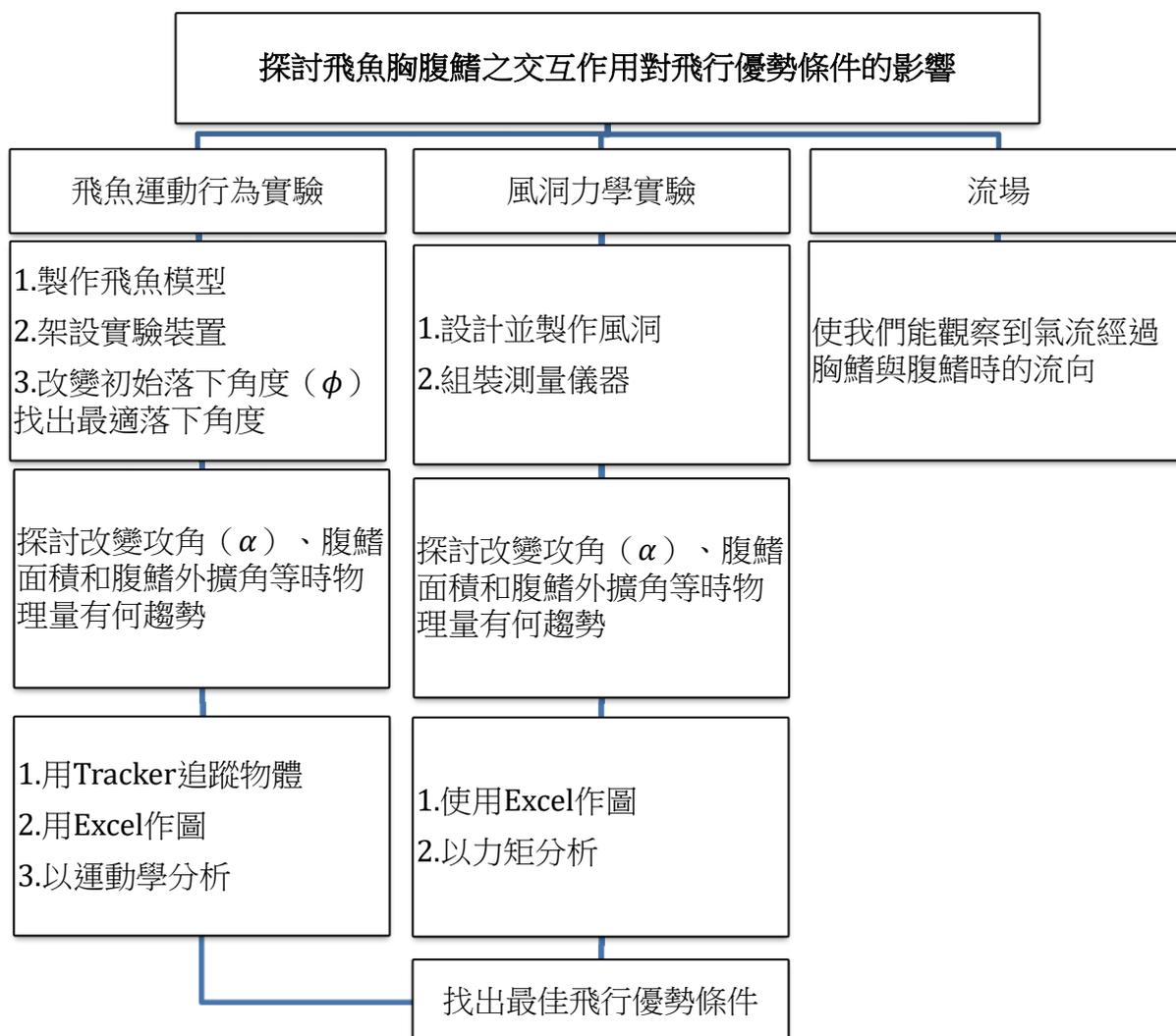
<p>飛魚模型（使用 3mm 珍珠版製作）</p>		
 <p style="text-align: center;">仿製飛魚側視圖</p>	 <p style="text-align: center;">仿製飛魚俯視圖</p>	
<p>魚頭：魚頭運動追蹤點</p>	<p>質心：質心運動追蹤點</p>	<p>魚尾：魚尾運動追蹤點</p>

三、實驗軟體

<p>Tracker：追蹤物件</p>	<p>Excel：統整數據、繪製科學圖像</p>
---------------------	--------------------------

參、研究過程或方法

一、實驗流程圖



二、實驗相關原理

1. 由普通物理學中的流體力學可以得到飛行物體之升力方程式如下：

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A v_y^2}$$

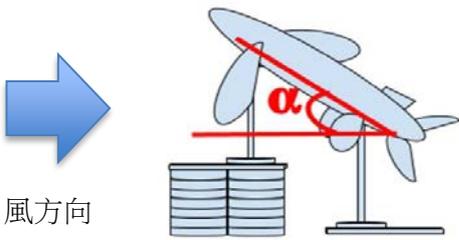
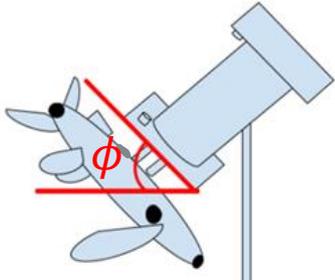
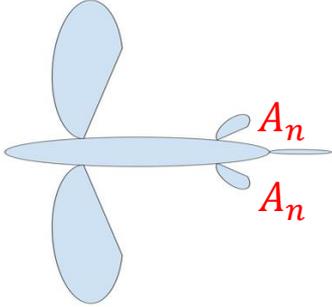
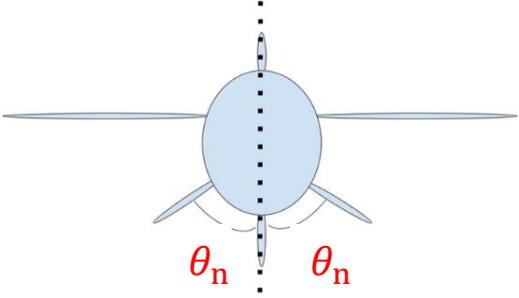
其中 C_L 為升力係數； F_L 為升力； ρ 為空氣密度； A 為迎風面之截面積； v_y^2 為鉛直速度

2. 由普通物理學中的力矩概念可以得到方程式如下：

$$\tau = r \times F$$

其中 τ 為力矩（牛頓·公尺）； r 為力臂（公尺）； F 為施力點上的力（牛頓）。此式表示了力矩的定義，以及力臂、施力對力矩的影響。

三、實驗各項條件及物理量

	
<p>α (攻角) : 魚身線與風來向之夾角，本次實驗操縱變因。 固定風洞風速 v 為 5.7 m/s</p>	<p>ϕ (落下角度) : 為魚身線 (質心、魚頭、魚尾連線) 與水平面夾角。魚身上仰 ϕ 角為正，下俯為負。</p>
	
<p>$A_1 \sim A_9$: 腹鰭面積</p>	<p>$\theta_1 \sim \theta_8$: 外擴角—腹鰭與中垂線之夾角</p>

符號	意義	符號	意義
α	攻角	v_x (m/s)	飛魚水平速度
$A_1 \sim 9$ (cm^2)	腹鰭面積 (操作變因)	v_y (m/s)	飛魚鉛直速度
$\theta_1 \sim 8$	腹鰭外擴角 (操作變因)	x(m)	飛魚 x 軸方向位置
ϕ	飛魚運動行為實驗中，飛魚落下的角度	y(m)	飛魚 y 軸方向位置
τ (Nm)	飛魚腹鰭位置升力力矩		

其中上表之 $A_1 \sim 9$ 之面積意義是以 A_5 為基本面積為 9.3 (cm^2)，再依下表倍率完成之面積：

$A_1=0.88$ 倍腹鰭面積	$A_2=0.91$ 倍腹鰭面積	$A_3=0.94$ 倍腹鰭面積
$A_4=0.97$ 倍腹鰭面積	$A_5=1.00$ 倍腹鰭面積	$A_6=1.03$ 倍腹鰭面積
$A_7=1.06$ 倍腹鰭面積	$A_8=1.09$ 倍腹鰭面積	$A_9=1.12$ 倍腹鰭面積

其中上表之 $\theta_1 \sim 8$ 之角度分別標記如下：

θ_1 =外擴角 30 度	θ_2 =外擴角 40 度	θ_3 =外擴角 45 度
θ_4 =外擴角 50 度	θ_5 =外擴角 60 度	θ_6 =外擴角 70 度
θ_7 =外擴角 80 度	θ_8 =外擴角 90 度	

四、實驗前置作業

(一)、風洞製作

1. 設計

我們依照連續方程式設計風洞，其設計側視圖如圖 2-1，規劃實驗區有 $40*40*23$ (cm^3)。抽風端風扇為 18 吋的抽風扇；進風端使用 25 個電腦散熱風扇，其規格為 $12*12*2.5$ (cm^3) 組合一平面進風區，目的為能透過調整散熱風扇之電壓來細微調整實驗區風速。為了方便操作實驗，我們於風洞上方做了可開閉式的閘門。

2. 製作材料：木板、抽風扇、電腦小風扇、角鋼、基本電器開關

3. 製作方式：組裝外殼時，主要以「複合式木材」為主，外殼組裝(利用螺絲)後，將風扇分別鎖在兩側。

4. 基礎測量：為確認風洞實驗區間風速大小固定，故測量相關位置風速，顯示實驗區間風速大小穩定。(如圖 2-2、2-3 所示)

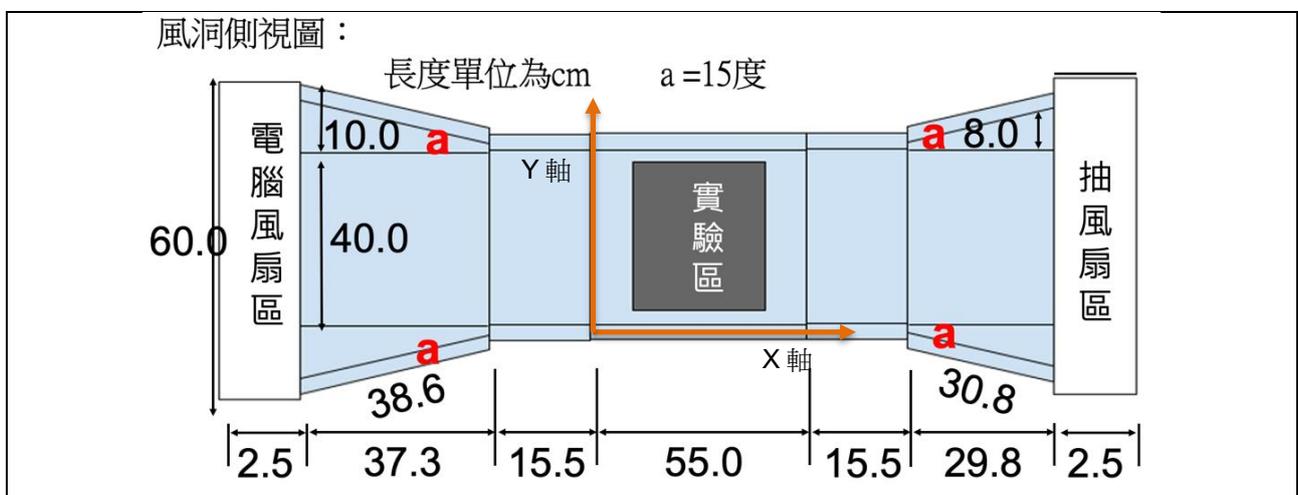


圖 2-1 風洞側視圖

*備註：1. $a=15$ 度 2. 木板厚度為 2cm，圖示長度皆不包含外板厚度。

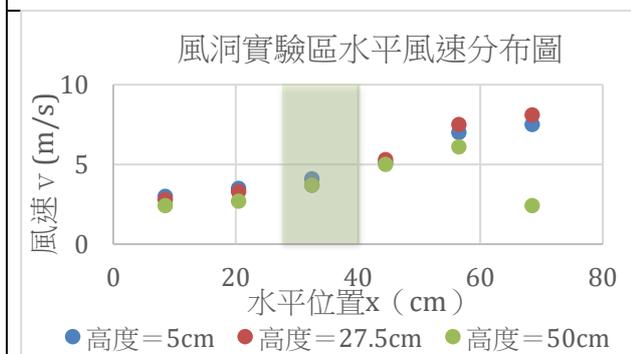


圖 2-2 風洞水平位置風速分布

分別測量不同高度下，實驗區不同水平位置風速分布，可見飛魚模型（淺綠色區域）不同高度下風速均相同，視為穩定風源

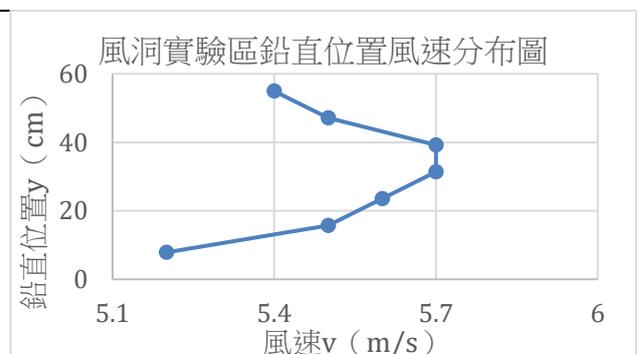


圖 2-3 風洞鉛直位置風速分布

由此圖可看出本風洞內部風速分布中央較高，兩側較低，屬於層流分布

(二)、仿製飛魚模型製作

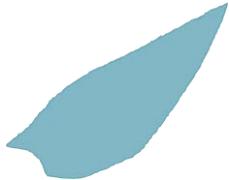
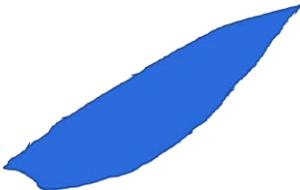
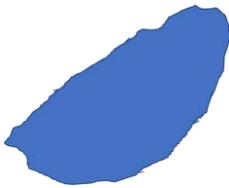
1. 真實飛魚標本測量

經查詢後得知「斑鰭飛魚」為台灣飛魚整體的優勢種，較易取得個體，故本研究就以「斑鰭飛魚」為仿製對象。為得到相關參數，我們量測了六隻真實斑鰭飛魚標本，整理資料如下表

平均體長 L (cm)	20.0	平均體寬 (cm)	3.4
平均胸鰭長 S1 (cm)	11.2	平均胸鰭面積 (cm^2)	51.9
平均體高 (cm)	4.1		

2. 飛魚相關資料比對與檢索

為了瞭解不同種類飛魚間的差異，以利未來實驗模型的適用性，我們利用所測量真實斑鰭飛魚相關數據，與「台灣魚類資料庫」統計出來的資料作整理和比對（共 23 種），我們發現在台灣周圍海域中的幾種飛魚其胸鰭形狀可粗略分成三大類，分別為：「半葉型」、「瓜子型」與「貝型」；其腹鰭形狀大致相同，皆成類似「梯形」。（形狀說明如下表所示，形狀分類的名稱為本文研究者自行定義）。

形狀名稱	胸鰭圖片	說明	品種比率 (共 23 種)
半葉形		細長，其一邊邊緣較為彎曲，寬度中，尖角，可隨骨架伸展或收縮	8/23
瓜子形		細長，兩邊邊緣皆平直延伸，寬度小，尖角，可隨骨架伸展或收縮	14/23
貝形		邊緣較為圓潤，寬度大，非尖角，可隨骨架伸展或收縮	1/23 (本研究種類)
形狀名稱	腹鰭圖片	說明	品種比率
梯形		以一支點連接魚身，類似梯形，可隨骨架伸展或收縮	各品種飛魚皆相似

3. 製作仿製飛魚模型

以上述資料，將比例設定為魚身僅為 20 公分，其餘參數隨著比例做調整，此外，為了模擬飛魚本身既能抵抗強風又輕薄的魚鰭構造，我們選擇「珍珠板」來製作飛魚。

(1) 材料：珍珠板

(2) 製作方式：

- a. 將仿生飛魚模型之魚身和胸鰭、腹鰭、背鰭和尾鰭繪製在同一張紙上。
- b. 在珍珠版上描繪所需部件之輪廓，並使用保麗龍切割器割下。
- c. 使用保麗龍膠將切下來的部件裝黏。

4. 飛魚質心調整、重量配置、追蹤位置標示

(1) 定位質心：

- a. 在飛魚模型背部上方裝鐵絲（為在運動行為實驗中使模型能吸附電磁鐵上）。
- b. 接者使用棉線將飛魚魚身吊起，至少吊起三次，並點出吊起時各棉線之延長線交點，該點即為質心。

(2) 重量配置：

- a. 將小螺絲（每個 1.10g）鎖至魚身的位置，使每個飛魚模型控制在 15.71g

(3) 追蹤位置標示：

- a. 分別在質心位置、魚頭位置以及魚尾位置貼上黑色絕緣膠帶標示。

5. 不同腹鰭面積之腹鰭

(1) 選擇面積大小：

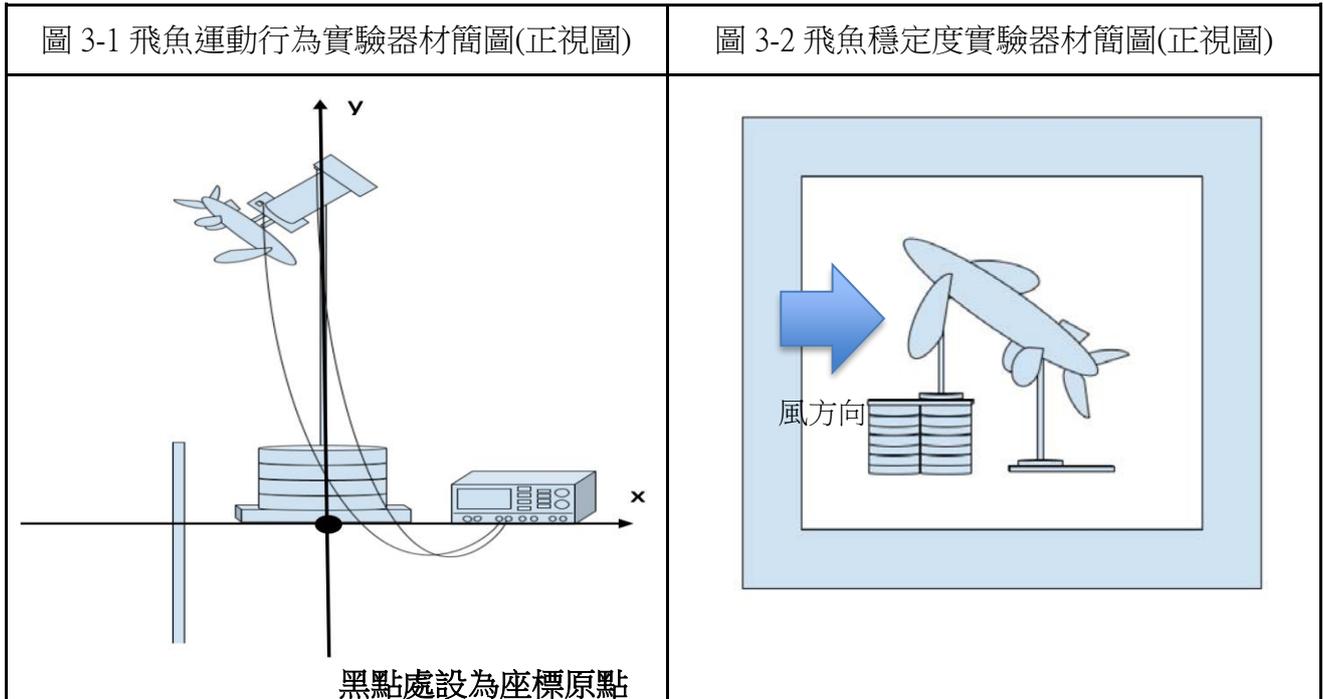
由數個真實飛魚和統整資料得知：不同個體腹鰭面積倍率介於 1.11 倍與 0.90 倍，因此，為貼近真實飛魚個體腹鰭差異比較，我們選擇 0.88、0.91、0.94、0.97、1.00、1.03……1.12 倍

(2) 製作腹鰭：

- a. 推算原模型之腹鰭面積=9.3 (cm^2)，依照倍率乘上分別得到各自倍率之面積
- b. 將各自腹鰭面積依照倍率依序定義為 $A_1 \sim A_9$

定義	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
腹鰭面積倍率	0.88	0.91	0.94	0.97	1	1.03	1.06	1.09	1.12
面積 (cm^2)	8.18	8.46	8.74	9.02	9.30	9.58	9.86	10.14	10.42

五、實驗裝置架設



六、實驗方法

(一) 實驗一：飛魚運動行為實驗

實驗 1-1：探討飛魚在不同初始放下 ϕ 角時的物理量

1. 飛魚模型固定為腹鰭與魚身夾角(θ)為 60 度，使用原面積腹鰭。
2. 調整電磁鐵角度(ϕ)，進而使吸附飛魚時初始角度可以改變，分別調整角度為 10 度、20 度、30 度、40 度、50 度(操作變因)。

實驗 1-2：探討飛魚在不同腹鰭面積時的物理量

1. 飛魚模型固定為腹鰭與魚身外擴角為 60 度，放下初始放下 ϕ 角為 40 度。
2. 更換飛魚腹鰭面積，分別為 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 、 A_7 、 A_8 、 A_9 。

實驗 1-3：探討飛魚腹鰭在不同外擴角時的物理量

1. 固定飛魚模型放下初始放下 ϕ 角為 40 度，使用原面積腹鰭(A_5)、 A_7 腹鰭面積。
2. 更換飛魚腹鰭外擴角(θ)，分別為 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 、 θ_8 。

實驗 1-4：探討飛魚在沒有腹鰭時的物理量

1. 固定飛魚模型初始放下 ϕ 角為 40 度。

實驗 1-5：探討飛魚在沒有胸鰭時的物理量

1. 固定飛魚模型初始放下 ϕ 角為 40 度，使用外擴角 θ_5 、腹鰭面積 A_5 。

實驗 1-6：探討在只有魚身時的物理量

1. 固定飛魚模型初始放下 ϕ 角為 40 度

實驗數據分析：

1. 利用 Tracker 飛魚質心的物理量 (t 、 x 、 y 、 v_x 、 v_y)。
2. 利用 Excel 分析作 x - t 圖、 y - x 圖、 v_x - t 圖、 v_y - t 圖。

* 備註：上述實驗我們每個操作變因都會重複做五次，使用 Tracker 求得飛魚質心的物理量，使用 Excel 分析作 y - x 圖、 v_y - t 圖，並進一步分析升力係數、阻力係數、升阻比。

目的：找出最適合飛魚飛行的狀態。

(二) 實驗二：飛魚穩定度實驗

本實驗在風洞中進行，飛魚放置於風洞中段 40cm*55cm 的實驗區，圖示如裝置圖。由於飛魚在飛行時胸鰭、腹鰭皆會產生力矩，若有一方力矩差距過大，飛魚便會翻覆，而力矩則由磅秤所測得之讀值計算。

實驗 2-1：探討飛魚攻角、腹鰭面積和腹鰭外擴角與胸、腹鰭力矩之關係

1. 分別更換不同放大、縮小倍率之腹鰭： $A_1 \sim A_9$ 。
2. 更換飛魚腹鰭外擴角，分別為 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 、 θ_8
3. 更換砝碼墊片改變高度，得到不同的目標攻角。

實驗 2-2：探討只有胸鰭時提供之力矩與攻角關係

1. 拆下腹鰭。
2. 更換砝碼墊片改變高度，得到不同的目標攻角。

實驗 2-3：探討只有腹鰭時提供之力矩與攻角關係

1. 拆下胸鰭。
2. 更換砝碼墊片改變高度，得到不同的目標攻角。

實驗 2-4：探討只有魚身時提供之力矩與攻角關係

1. 拆下胸鰭、腹鰭。
2. 更換砝碼墊片改變高度，得到不同的目標攻角。

實驗 2-5：探討只有磅秤時讀值有何變化

1. 將飛魚模型整個拆下，只剩下磅秤及支柱。
2. 更換砝碼墊片改變高度，得到不同的目標攻角。

* 備註：上述實驗的目標攻角為 0 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度、35 度、40 度、45 度、50 度，在磅秤穩定歸零後啟動風洞並記錄其讀值，每個操作變因紀錄 5 個讀值，並用 Excel 計算並討論不同情況的升力、升力係數、力矩。

目的：找出飛魚最穩定時的狀態。

肆、實驗結果

腹鰭面積代號	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
腹鰭面積放大縮小倍率	0.88	0.91	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12
腹鰭面積大小(cm ²)	8.18	8.46	8.74	9.02	9.30	9.58	9.86	10.14	10.42
外擴角代號	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	~
外擴角角度(°)	30	40	45	50	60	70	80	90	~

一、實驗一

(一)、實驗 1-1：探討飛魚在不同初始 ϕ 角時的物理量

詳細圖表請見【附錄三】

結論：角度 ϕ 為 40 度時，飛行穩定度和水平位移最為理想。

(二)、實驗 1-2：探討不同腹鰭面積對飛魚飛行穩定度的影響

- 首先先對影片做分析，並將裝有不同腹鰭面積之飛魚飛行時翻覆的機率分別計算出來並互相做比較：
 - 翻覆機率的定義：凡在影片中翻過 90 度以上（ $\phi \geq 90$ 度）者，即沒有辦法回到穩定狀態，即一般飛行時的攻角範圍。
 - 與實驗影片相比：左圖為未翻覆、右圖為翻覆



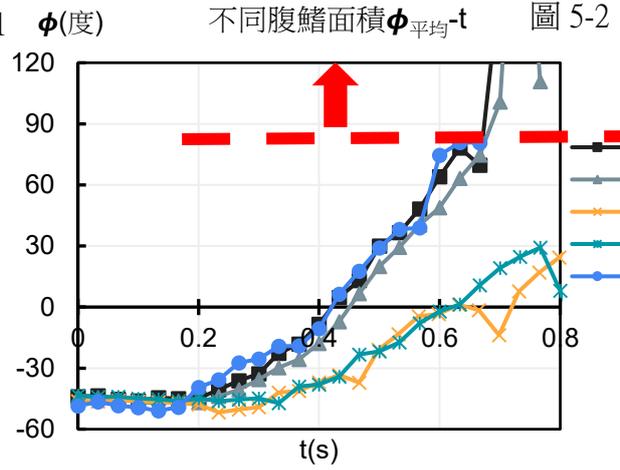
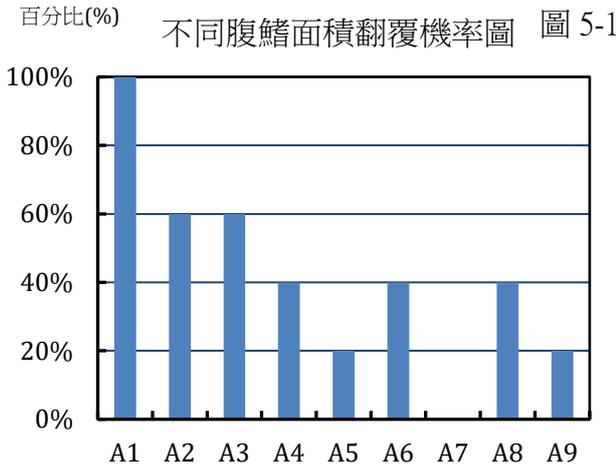
圖 4-1



圖 4-2

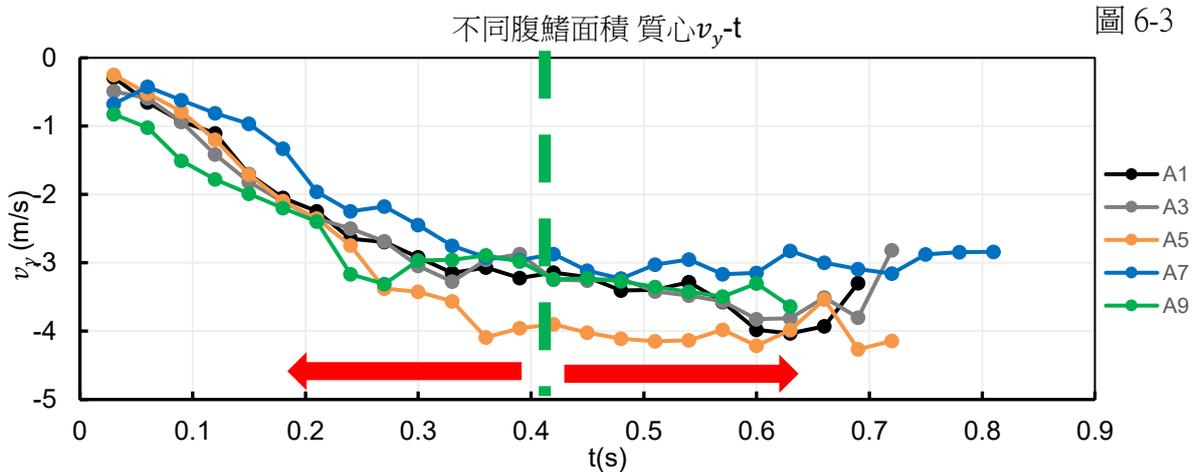
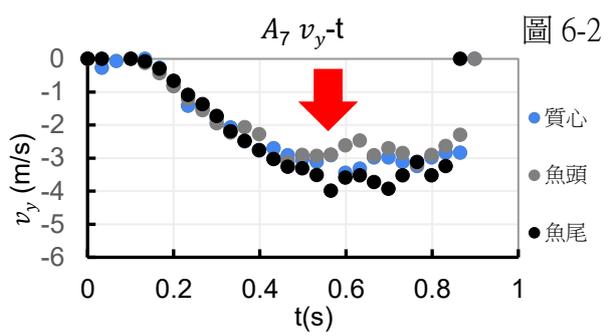
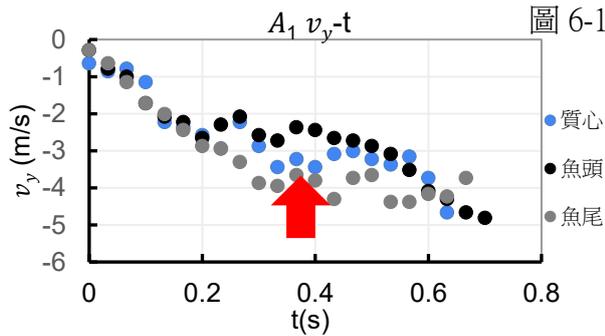
接著將利用影片中不同時間點的 Δ_y （魚頭質心距離、魚頭魚尾距離）和 Δ_x （魚頭質心距離、魚頭魚尾距離）透過三角函數的正切值（ $\tan \phi$ ），最後將各個腹鰭面積的 ϕ 值平均，並對時間作圖。

翻覆機率圖、 $\phi_{\text{平均}}-t$ 圖



• 結果：

- (1) 端看圖 5-1 中可發現， A_1 、 A_3 皆超過 90 度，與圖 8-2 相對應。
 - (2) 圖 5-1 中 A_7 翻覆機率為 0%， A_1 的翻覆機率為 100%，整體隨著面積的增加翻覆機率有減少的趨勢。
2. 將各個影片匯入 Tracker 內去做追蹤，並再把同種腹鰭面積各影片中同時時間點的 v_y 值做平均，另外，將翻覆機率最高和最低的腹鰭面積 A_1 和 A_7 的平均 $v_y - t$ 圖做比對，最後，再把各腹鰭面積的平均 v_y 求出後，做全部腹鰭面積的平均 $v_y - t$ 圖。



• 結果：

(1) 由圖 6-1、6-2，可發現兩者都有出現「先等加速度，再維持等速」的情況，且翻覆次數高 (A_1) 的轉折點較不明顯 (紅色箭頭處)， A_7 明顯在約莫 0.5 秒處出現轉折。

(2) 由圖 6-3，可看出各腹鰭面積皆有「先等加速度，再維持等速」的趨勢，且大略在 0.3~0.4 秒間會出現轉折點。

(3) 承上，端看綠虛線左方飛魚模型做等加速運動，綠線右方做等速運動，可將二者的運動狀況分別分成，「穩定但不平衡」、「穩定且平衡」。

(三)、實驗 1-3：不同腹鰭外擴角 (θ) 對飛魚飛行穩定度的影響

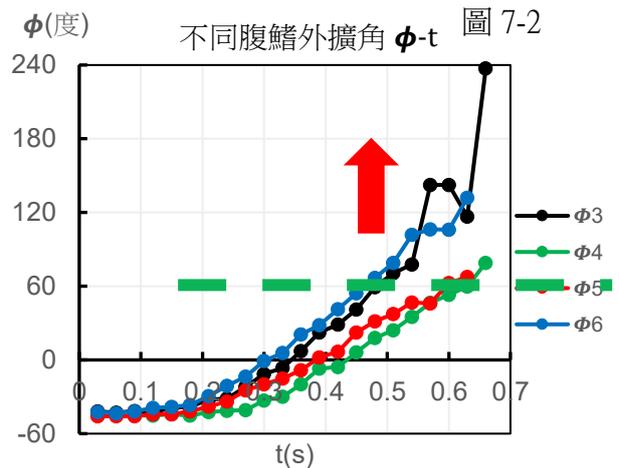
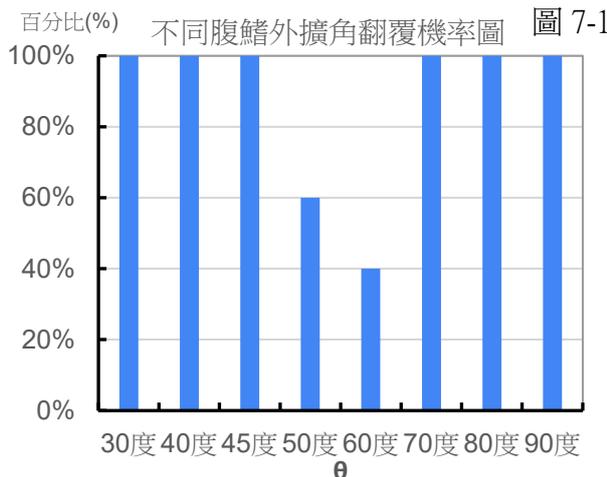
由實驗 1-2 可知，翻覆機率最低的腹鰭面積為 A_5 原腹鰭面積、 A_7 腹鰭面積

1. A_5 原腹鰭面積

首先先對影片做分析，並將裝有不同腹鰭外擴角 (θ) 之飛魚飛行時翻覆的機率分別計算出來並互相做比較：

接著將利用影片中不同時間點的 Δ_y (魚頭質心距離、魚頭魚尾距離) 和 Δ_x (魚頭質心距離、魚頭魚尾距離) 透過三角函數的正切值 ($\tan \phi$)，最後將各個腹鰭面積的 ϕ 值平均，並對時間作圖，並以翻覆機率過渡期為主 (θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6)

翻覆機率圖、 $\phi_{平均}-t$ 圖



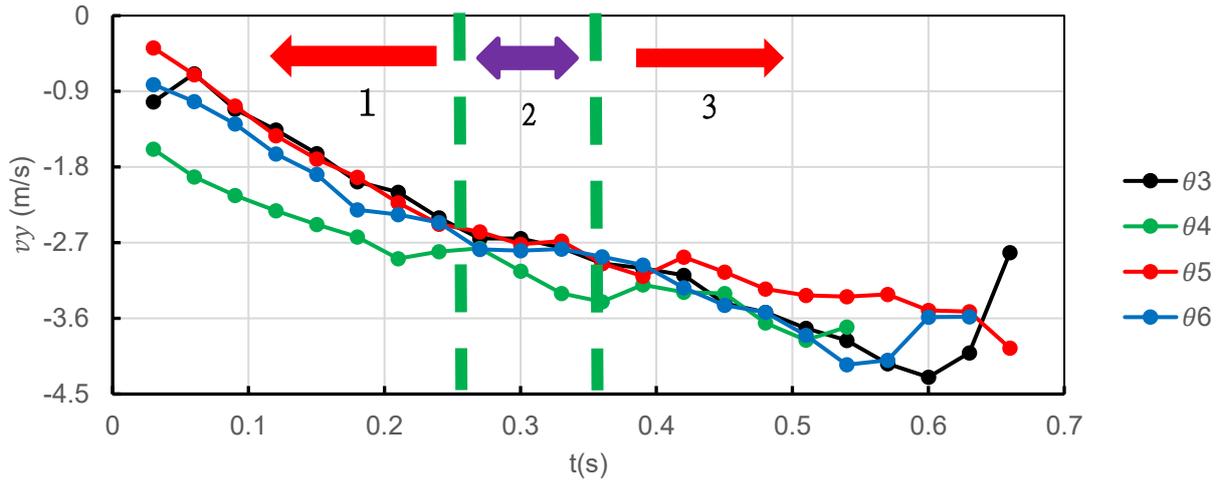
(1) 圖 7-1 中除 θ_5 翻覆機率為 40%， θ_4 為 60%，其他外擴角機率皆為 100%。

(2) 端看圖 7-2 中，可發現在 θ_3 、 θ_6 皆超過 90 度，與翻覆機率圖相對應。

各個影片匯入 Tracker 內去做追蹤，並再把同種腹鰭面積各影片中同一時間點的 v_y 值做平均，另外，將翻覆機率最高和最低的腹鰭面積 θ_1 和 θ_5 的平均 $v_y - t$ 圖做比對，最後，再把各腹鰭面積的平均 v_y 求出後，做全部腹鰭面積的平均 $v_y - t$ 圖。

不同腹鰭外擴角 平均質心 $v_y - t$

圖 7-3



• 結果：

- (1) 取翻覆機率較有變化趨勢的 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 ，可發現圖 7-3 的趨勢可分為三段（綠虛線分隔）：第一段為「等加速運動」；第二段為「等速運動」；第三段為「等加速運動」，且可發現四種外擴角皆有此趨勢。
- (2) 「等加速運動」、「等速運動」、「等加速運動」，可依其運動狀態分為「穩定但不平衡」、「既穩定且平衡」、「穩定但不平衡」。

2. A_7 腹鰭面積

將其影片分析並比較，並分析其翻覆機率，因翻覆角度和平均 $v_y - t$ 圖與 A_5 腹鰭面積雷同，皆具有相似趨勢，故省略平均角度-時間圖與平均 $v_y - t$ 圖

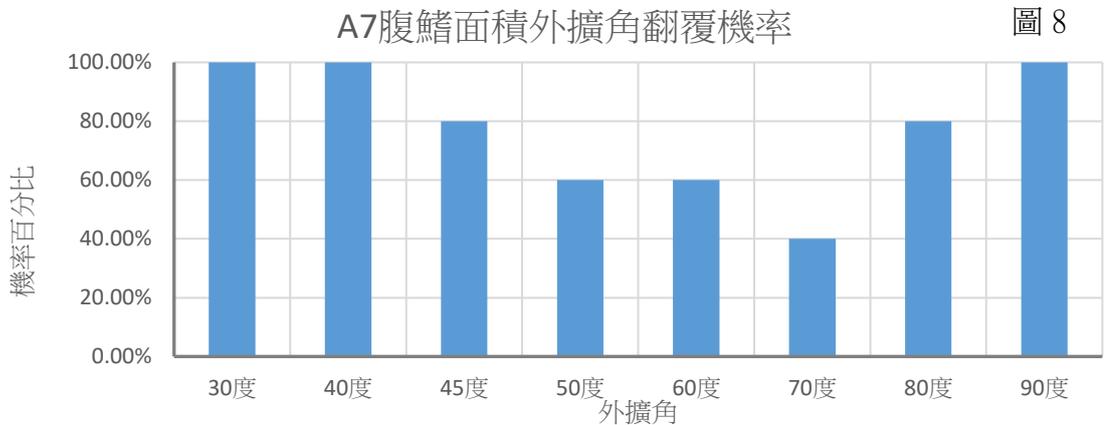


圖 8

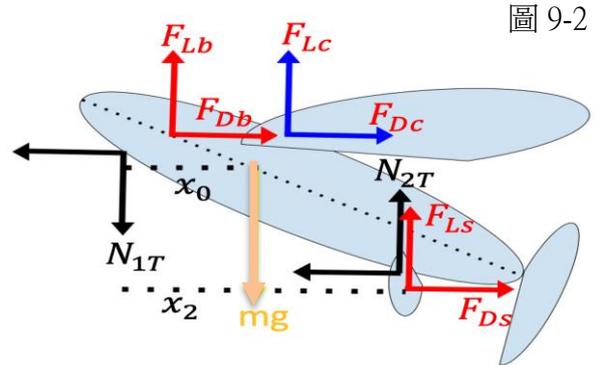
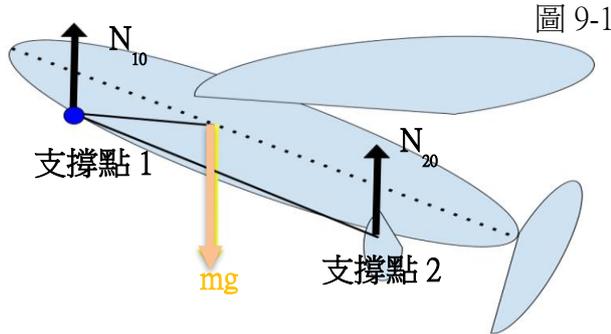
• 結果：

- (1) 由翻覆機率圖 8 可知，翻覆機率較有變化趨勢的為 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 ，與 A_5 原腹鰭面積相同，且翻覆機率最低為 θ_6

二、實驗二結果

我們將實驗二中測得的數值換算成升力，並計算出升力係數及力矩作分析，討論腹鰭造成的影響與穩定度的關係。

風洞力學實驗力圖（以胸腹鰭皆裝為例）：



以胸腹鰭皆裝的模型為例，開啟風洞後，系統的力圖成上圖的模式。經推導，在計算有風後升力及力矩時，將依照以下公式：

1. 只有魚身 (body)

$$\vec{F}_{Lb} = - (m\vec{g} + \vec{N}_{1b} + \vec{N}_{2b})$$

$$\vec{\tau}_{Fb} + \vec{\tau}_{f_{2b}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2b}})$$

2. 只有胸鰭 (chest)

$$\vec{F}_{Lc} = - (m\vec{g} + \vec{N}_{1c} + \vec{N}_{2c} + \vec{F}_{Lb})$$

$$\vec{\tau}_{Fc} + \vec{\tau}_{f_{2c}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2c}} + \vec{\tau}_{Fb})$$

3. 只有腹鰭 (stomach)

$$\vec{F}_{Ls} = - (m\vec{g} + \vec{N}_{1s} + \vec{N}_{2s} + \vec{F}_{Lb})$$

$$\vec{\tau}_{Fs} + \vec{\tau}_{f_{2s}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2s}} + \vec{\tau}_{Fb})$$

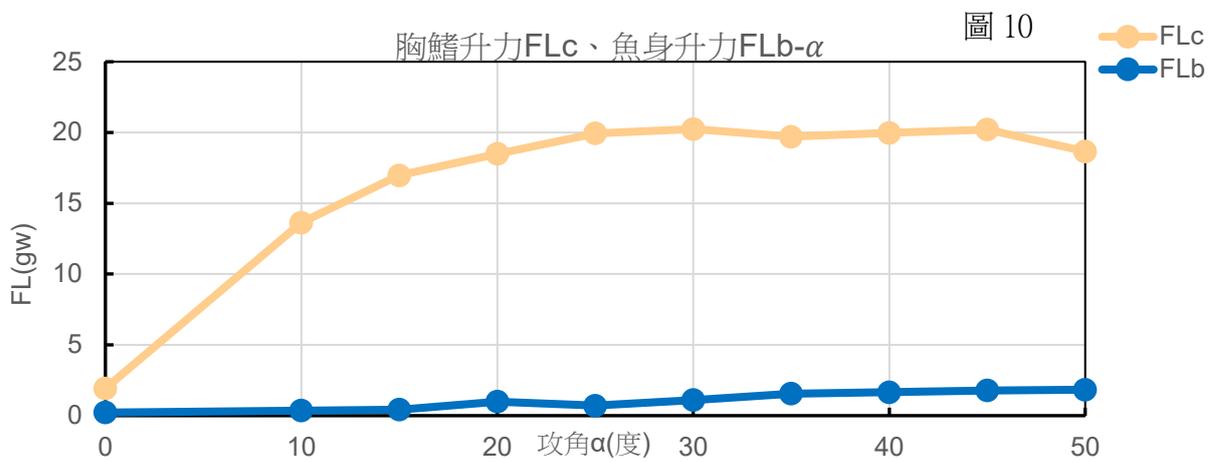
1. 胸腹鰭皆裝 (Total)

$$\vec{F}_{LT} = - (m\vec{g} + \vec{N}_{1T} + \vec{N}_{2T} + \vec{F}_{Lb})$$

$$\vec{\tau}_{FT} + \vec{\tau}_{f_{2T}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2T}} + \vec{\tau}_{Fb})$$

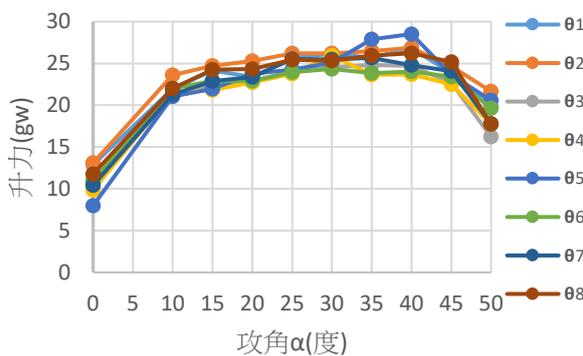
其中，FL 代表升力，b 代表純魚身模型，c 代表模型只裝胸鰭，s 代表只裝腹鰭，T 胸、腹鰭皆安裝。在計算力矩時，以支撐點 1 做支點計算。

為了解釋實驗器材中各部件的對實驗結果的影響，以下我們將計算出的升力製成圖表：

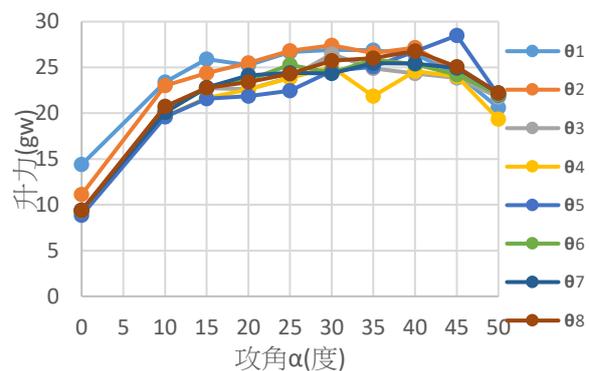


上圖為計算出的胸鰭、魚身升力，可以發現單純魚身的升力與胸鰭相比極小，且隨攻角改變的趨勢不明顯，意即當我們改變攻角進行實驗時，魚身提供的升力幾乎不變。

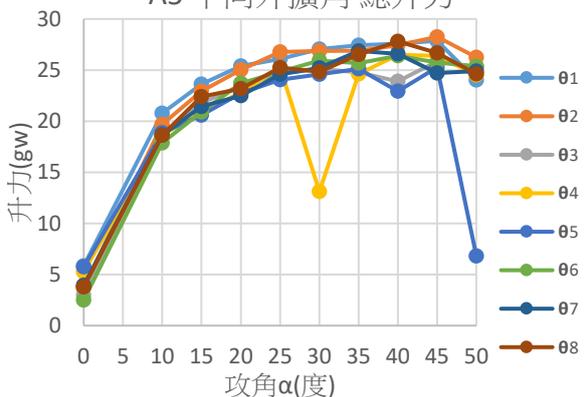
A1 不同外擴角 總升力 圖 10-1



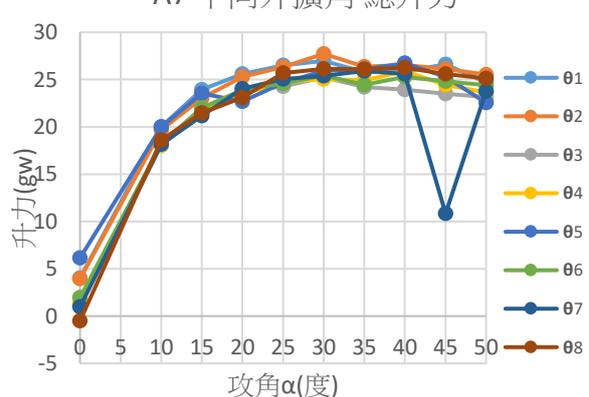
A3 不同外擴角 總升力 圖 10-2



A5 不同外擴角 總升力 圖 10-3



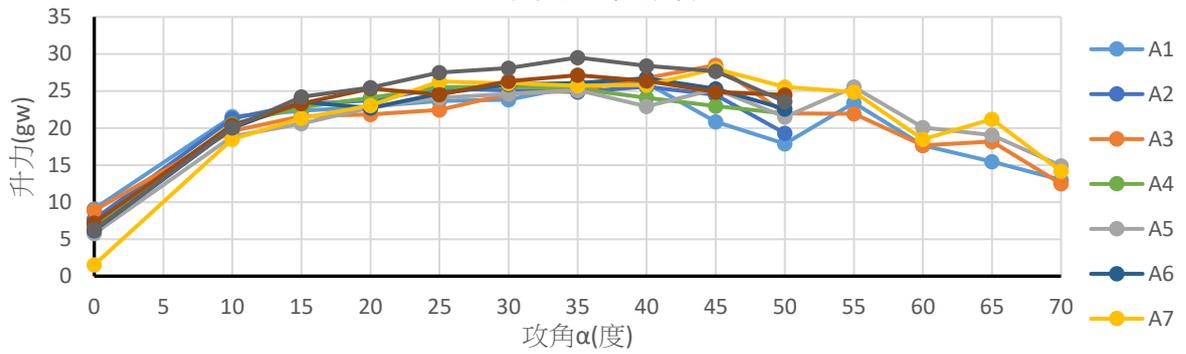
A7 不同外擴角 總升力 圖 10-4



比較安裝各面積腹鰭時，各外擴角的升力，發現升力隨攻角增大而上升，並在攻角 35~45 度間達最大值，且不同腹鰭面積，不管外擴角為何時，在升力的改變上微乎其微

05 不同面積升力

圖 11



- a 此時比較單一外擴角為 05 時，各腹鰭面積的升力，可發現固定外擴角的情況下，升力確實隨著攻角增加而上升，攻角為 $35\sim 45$ 度時，升力達到最大值，此外，面積的變化對於升力的影響不明顯，可說是微乎其微。
- b 在 A_1 、 A_3 、 A_5 、 A_7 的腹鰭面積，由於升力的趨勢表現雷同推測為攻角過低的情況，因此我們抓取這些面積變因做到大攻角的情況，發現即使到了極大的攻角 55 度 ~ 70 度，面積對升力的表現依然極為相似。

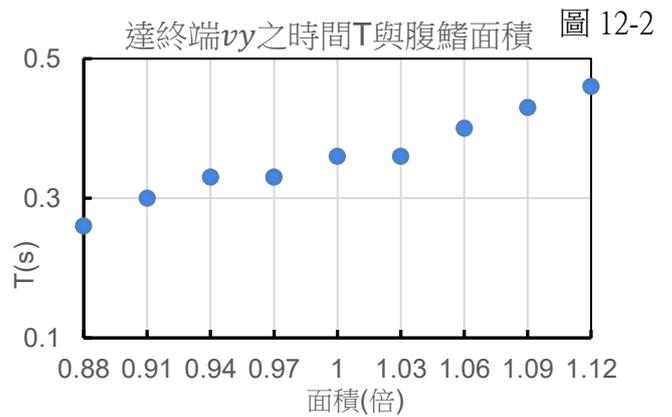
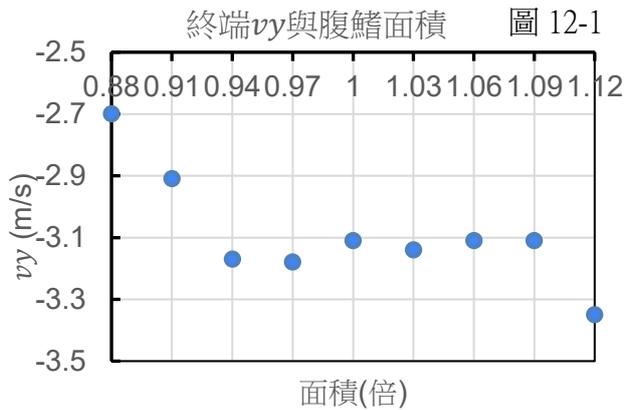
因此，由實驗二結果可知，腹鰭不管在面積還是外擴角的改變下，對於升力的影響都是微乎其微的。

伍、 討論

一、 實驗一討論

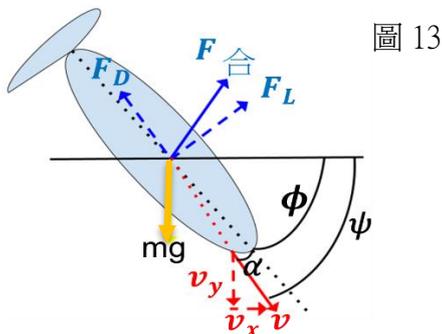
(一)、 終端速度與腹鰭面積、時間之關係

由圖可發現，皆會出現「等速運動」，因此將其分類為「既穩定且平衡」的運動狀態，即鉛直方向合力為零，將其終端速度和達終端速度時間與相關操縱變因作圖：終端速度隨著腹鰭面積的增加而增大，但於 $A_3 \sim A_8$ 幾乎不變，推論因腹鰭面積實質上差距甚小，達終端速度時的時間點也隨腹鰭面積增加而增加，推測為腹鰭面積的增加，導致腹鰭升力增大，進而導致飛魚模型的攻角較慢轉至合力為零時的攻角。



(二)、 升阻比、升力係數討論

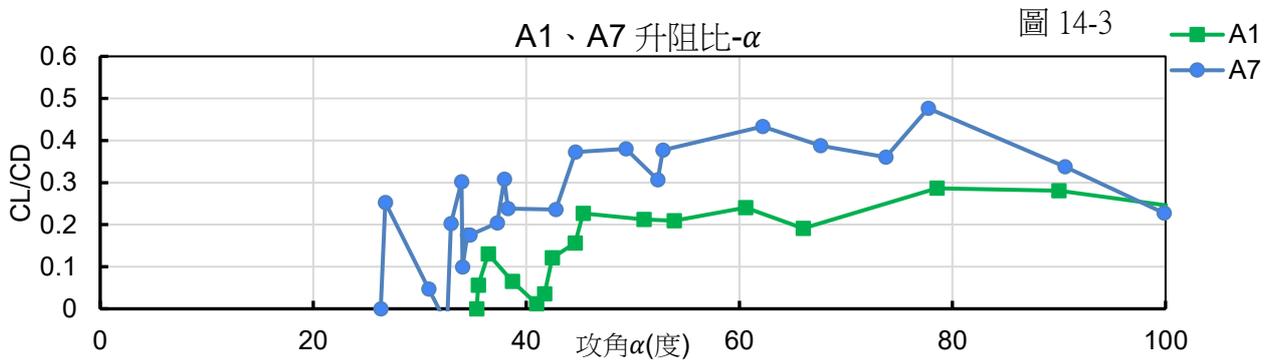
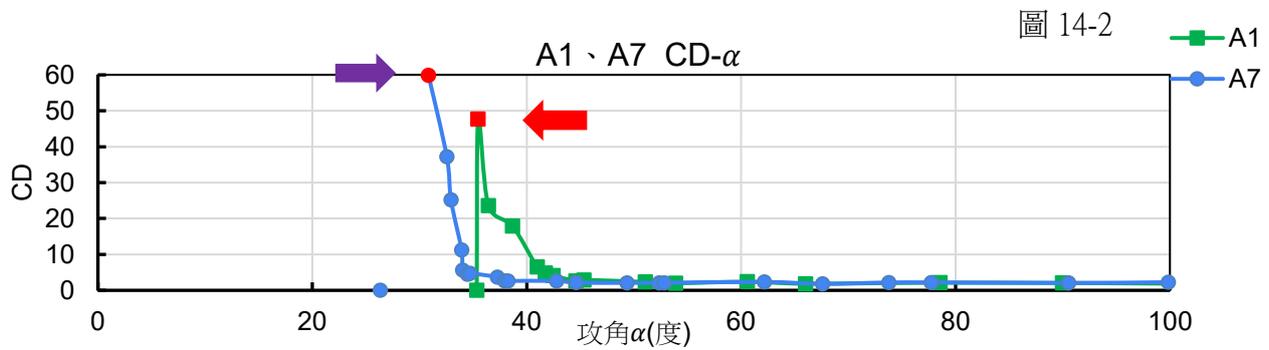
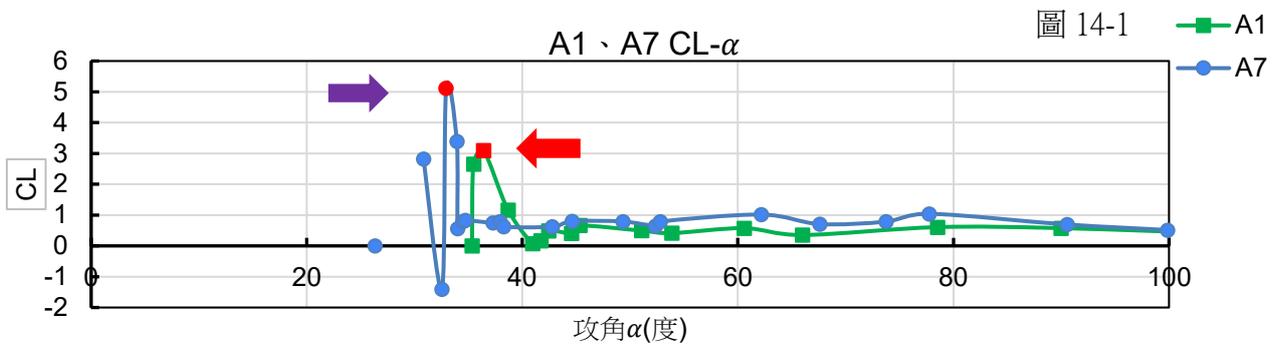
「升阻比」為升力係數、阻力係數的比值，文獻得知升阻比較高者，越適合飛行。因此，由 1-2、1-3 實驗中的實驗影片分析得到 v_x 、 v_y ，分別將二者對時間微分後得水平和鉛直得加速度，接者乘上飛魚重量，可推得 F_x 、 F_y 。然而，升力、阻力分別為垂直於運動方向和平行於運動方向的力，故須將 F_x 、 F_y 透過角度轉換成 F_L （升力）、 F_D （阻力）。



$$\begin{aligned} \overline{F_L} &= \overline{F_y} \cos\psi + \overline{F_x} \sin\psi \\ \overline{F_D} &= \overline{F_y} \sin\psi + \overline{F_x} \cos\psi \\ C_L &= \frac{2F_L}{\rho A v^2}, \quad C_D = \frac{2F_D}{\rho A v^2} \\ \frac{C_L}{C_D} &= \text{升阻比} \end{aligned}$$

2. 討論 1-2、 A_1 、 A_7 $C_L - \alpha$ 、 $C_D - \alpha$ 、升阻比 $-\alpha$

首先，我們先將翻覆機率最高的腹鰭面積 A_1 （0.88 倍腹鰭面積），以及翻覆機率最低的腹鰭面積 A_7 （1.06 倍腹鰭面積），將二者的升力係數、阻力係數和升阻比對攻角作圖，以此來判斷翻覆機率高低在升阻比之間的不同，並判斷翻覆機率低是否即代表適合飛行。

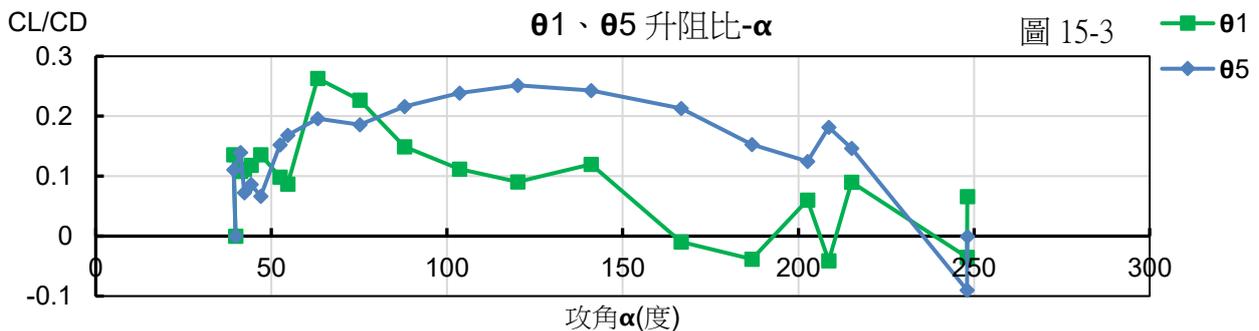
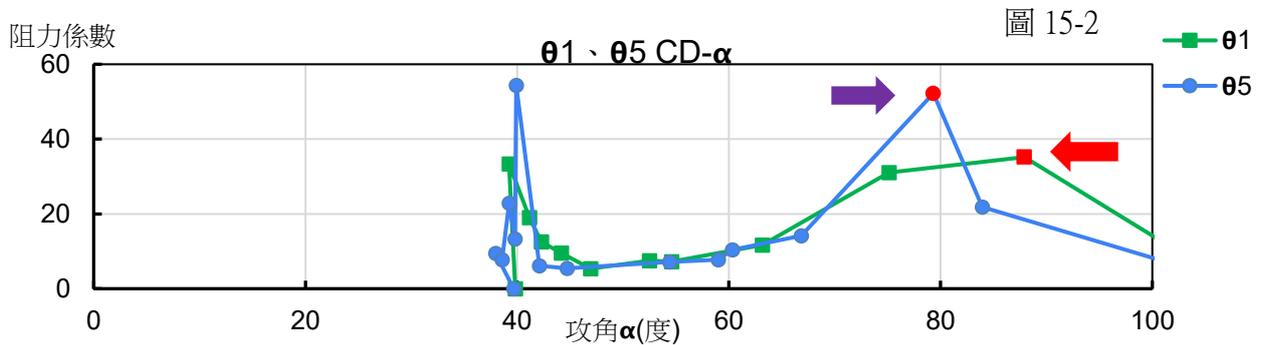
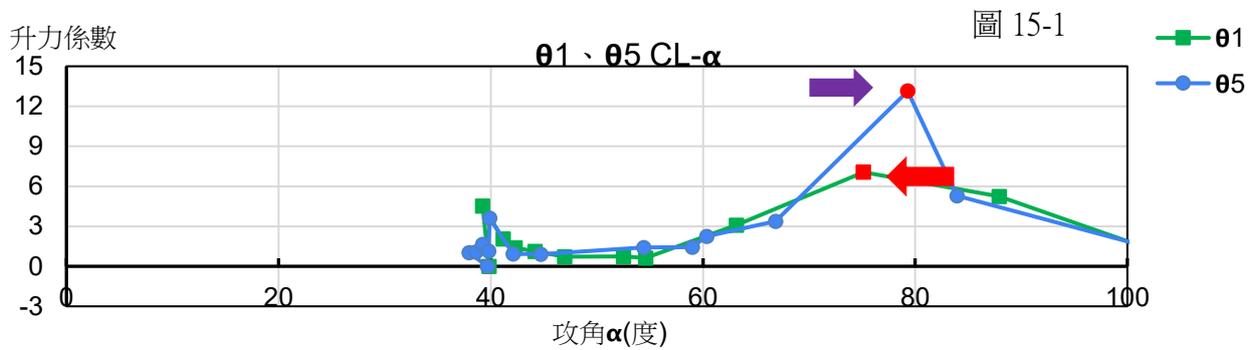


- a 由圖14-1，翻覆機率較高者（ A_1 ） C_L 最大值發生時的 α 角（紅色箭頭處）與翻覆機率較低者（ A_7 ） C_L 最大值發生時的攻角 α 相似（見紫色箭頭處）， $\alpha_{A_1(C_{Lmax})} \cong 35^\circ$ 、 $\alpha_{A_7(C_{Lmax})} \cong 34^\circ$ ，發現從 $A_1 \sim A_9$ 的腹鰭面積變化小，因此，反應在升力和升力係數的影響非常微小，因此， A_1 、 $A_7 C_L$ 達到最大值時的攻角相似。
- b 由圖14-2，翻覆機率較高者（ A_1 ） C_D 最大值發生時的 α 角（紅色箭頭處）與翻覆機率較低者（ A_7 ） C_D 最大值發生時的 α 角相似（見紫色箭頭處）， $\alpha_{A_1(C_{Dmax})} \cong 41^\circ$ 、 $\alpha_{A_7(C_{Dmax})} \cong 42^\circ$ ，原因與討論 2-2-1 相同。
- c 由上述兩點可知兩者達到升阻比最大值時的攻角（ α ）也應大略相似 $\alpha_{\frac{C_L}{C_D A_1 MAX}} \cong 78^\circ$ 、 $\alpha_{\frac{C_L}{C_D A_7 MAX}} \cong 78^\circ$ ，推測原因與討論 2-2-1 相同。
- d 綜觀而言， A_7 的升阻比皆大於 A_1 的升阻比，因此 A_7 較 A_1 適合飛行。

3. 討論 1-3、 A_5 原腹鰭面積、 A_7 1.06 倍腹鰭面積 θ_1 、 θ_5 $C_L - \alpha$ 、 $C_D - \alpha$ 、升阻比 $-\alpha$

(1) A_5 原腹鰭面積 θ_1 、 θ_5 $C_L - \alpha$ 、 $C_D - \alpha$ 、升阻比 $-\alpha$

同理，我們也在實驗 1-2 的討論中將 A_5 原腹鰭面積翻覆機率最高的外擴角 θ_1 （30 度腹鰭外擴角），以及翻覆機率最低的外擴角 θ_5 （60 度腹鰭外擴角），將二者的升力係數、阻力係數和升阻比對攻角作圖，以此來判斷翻覆機率高低在升阻比之間的不同，並判斷翻覆機率低是否即代表適合飛行。

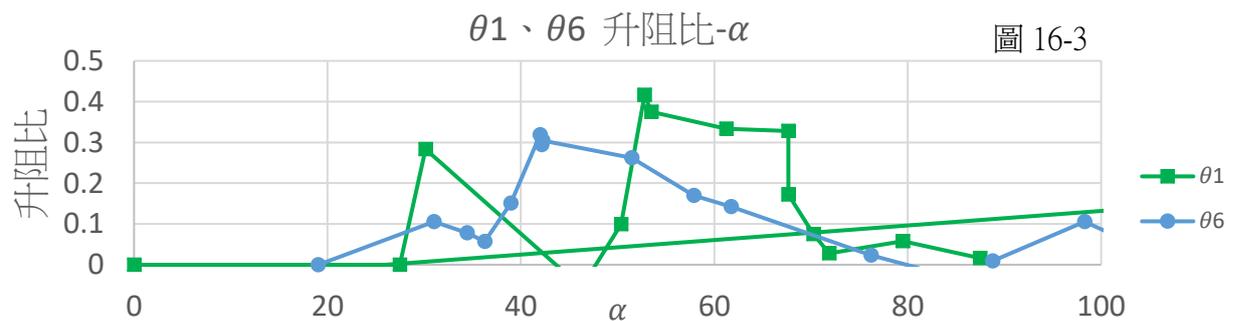
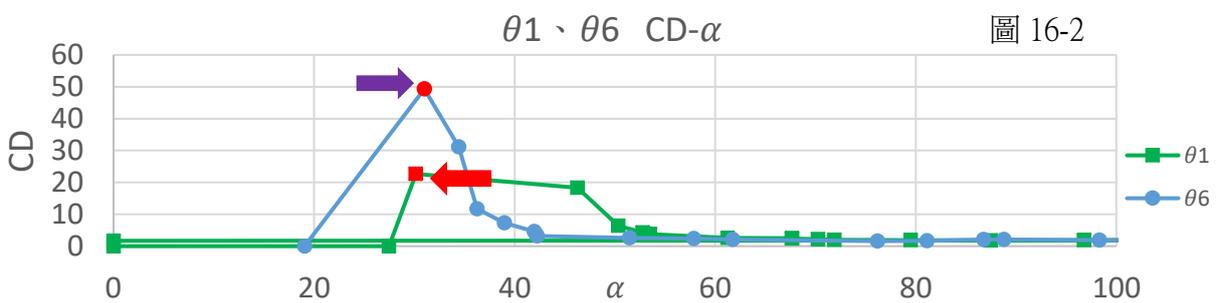
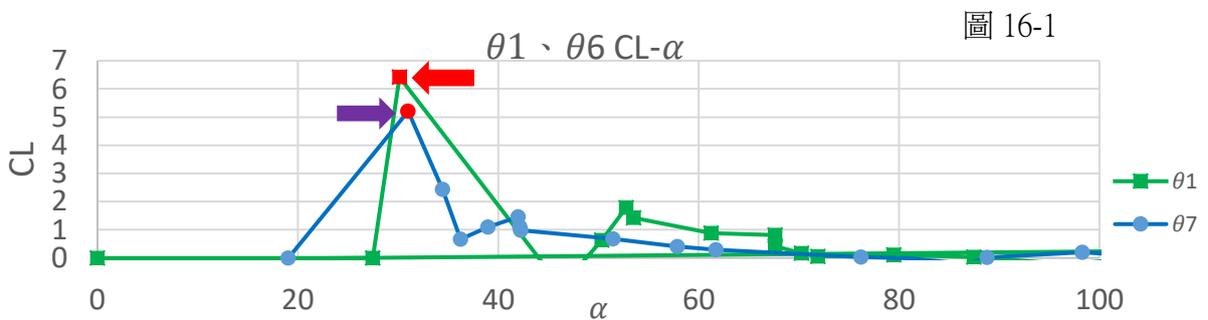


a 由圖15-1，翻覆機率較高者（ θ_1 ） C_L 最大值發生時的 α 角（紅色箭頭處）比翻覆機率較低者（ θ_5 ） C_L 最大值發生時的 α 角小（見紫色箭頭處）， $\alpha_{A_1(C_{Lmax})} \cong 75^\circ$ 、 $\alpha_{A_7(C_{Lmax})} \cong 79^\circ$ ，發現由 $\theta_1 \sim \theta_8$ 的外擴角變化所致投影面面積的改變甚小，理應相似，但受此影響對於飛行的改變而言，改變較大，因此兩者仍有些微差距。

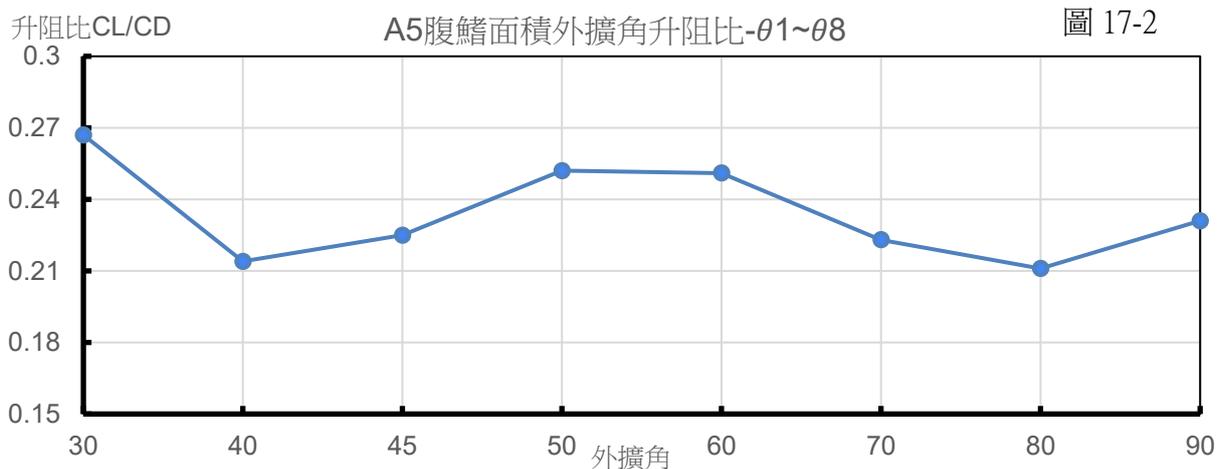
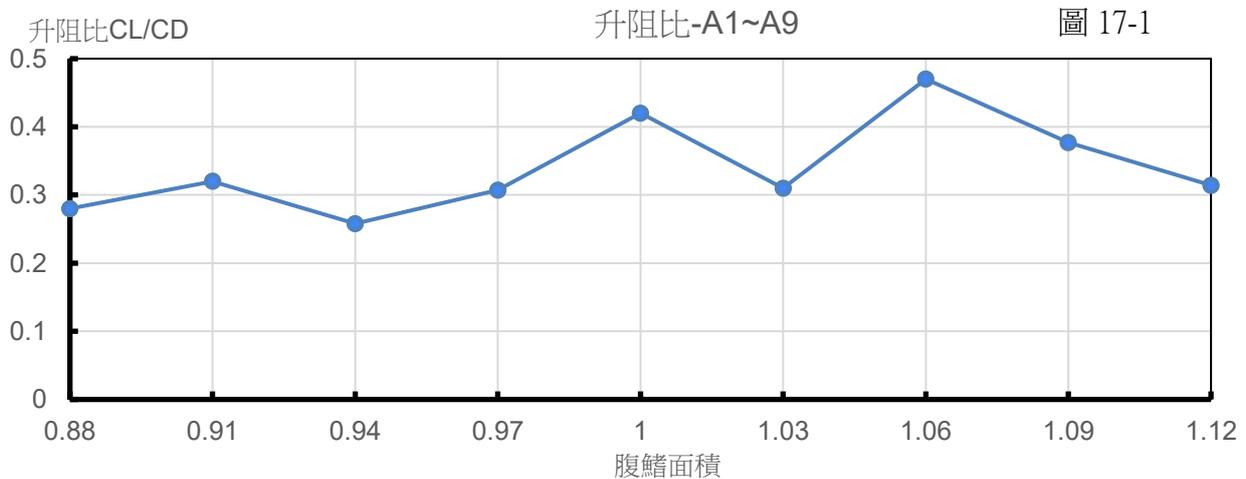
- b 由圖15-2，翻覆機率較高者 (θ_1) C_D 最大值發生時的 α 角 (紅色箭頭處) 比翻覆機率較低者 (θ_5) C_D 最大值發生時的 α 角大 (見紫色箭頭處)， $\alpha_{\theta_1(C_D \max)} \cong 87^\circ$ 、 $\alpha_{\theta_7(C_D \max)} \cong 79^\circ$ ，原因與討論 1-2-1 相同。
- c 由上述兩點，兩者升阻比最大值的攻角 α 相差甚鉅 $\alpha_{\frac{C_L}{C_D \theta_1 \max}} \cong 63^\circ$ 、 $\alpha_{\frac{C_L}{C_D \theta_7 \max}} \cong 120^\circ$ 。
- d 藍色方塊內為一般飛行攻角範圍 ($\alpha < 90^\circ$)，端看兩者比較可知 θ_1 較 θ_5 適合飛行。
- e 雖然 θ_5 升阻比高峰橫跨的攻角幅度較大，但攻角超過 90 度，所以該高峰範圍是飛魚模型以魚腹朝上模型進行的，推測在該模型下仍值得探討。

(2) A_7 1.06 倍腹鰭面積 θ_1 、 θ_5 $C_L - \alpha$ 、 $C_D - \alpha$ 、升阻比 $-\alpha$

同理，我們也在實驗 1-2 的討論中將 A_7 1.06 倍腹鰭面積翻覆機率最高的外擴角 θ_1 (30 度腹鰭外擴角)，以及翻覆機率最低的外擴角 θ_6 (70 度腹鰭外擴角)，將二者的升力係數、阻力係數和升阻比對攻角作圖，以此來判斷翻覆機率高低在升阻比之間的不同，並判斷翻覆機率低是否即代表適合飛行。

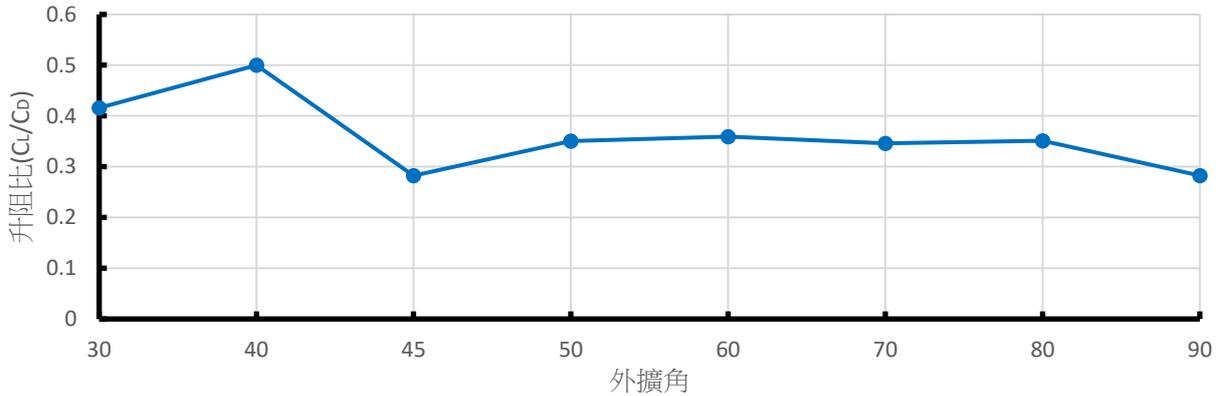


- a 見圖 16-1，翻覆機率較高者 (θ_1) C_L 最大值發生時的 α 角（紅色箭頭處）比翻覆機率較低者 (θ_7) C_L 最大值發生時的 α 角小（見紫色箭頭處）， $\alpha_{\theta_1(C_L\max)} \cong 30^\circ$ 、 $\alpha_{\theta_7(C_L\max)} \cong 31^\circ$ ，發現由 $\theta_1 \sim \theta_8$ 的外擴角變化所致投影面面積的改變甚小，理應相似，但受此影響對於飛行的改變而言，改變較大，因此兩者仍有些微差距。
- b 見圖 16-2，翻覆機率較高者 (θ_1) C_D 最大值發生時的 α 角（紅色箭頭處）比翻覆機率較低者 (θ_7) C_D 最大值發生時的 α 角大（見紫色箭頭處）， $\alpha_{\theta_1(C_D\max)} \cong 30^\circ$ 、 $\alpha_{\theta_7(C_D\max)} \cong 31^\circ$ ，原因與討論 1-2-1 相同。
- c 見圖 16-3，由上述兩點，兩者升阻比最大值的攻角 α 相差甚鉅 $\frac{\alpha_{C_L}}{C_{D\theta 1MAX}} \cong 52^\circ$ 、 $\frac{\alpha_{C_L}}{C_{D\theta 7MAX}} \cong 41^\circ$ 。
- d 藍色方塊內為一般飛行攻角範圍 ($\alpha < 90^\circ$)，端看兩者比較可知 θ_1 較 θ_5 大，理應推測 θ_1 較 θ_5 適合飛行，但 θ_5 更為穩定，故因此推論為 θ_5 較適合飛行。
4. 升阻比討論



A7腹鰭面積外擴角升阻比- $\theta_1 \sim \theta_8$

圖 17-3



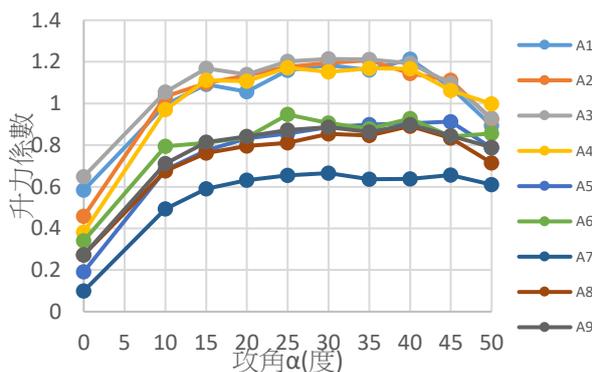
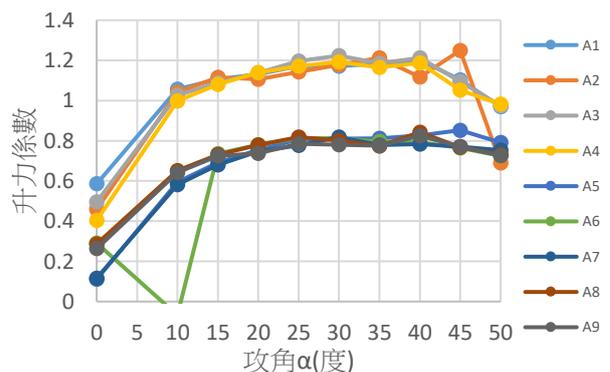
藉由討論二的計算將實驗 1-2、實驗 1-3 的升阻比分別與其變因作圖，由於升阻比的定義中即表示，當升阻比較高者，越不容易失速，甚至可說越適合飛行的條件，因此端看兩張圖可知：

- 由圖 17-1 可知A₇的升阻比(見紅色箭頭處)是各腹鰭面積中升阻比最高的，A₅次之。
- 由圖 17-2 可知， θ_1 、 θ_4 、 θ_5 在不同外擴角中升阻比表現是最高的，且 θ_1 最高，若考慮到翻覆機率，故推論 θ_4 、 θ_5 為最適合飛行的外擴角。
- 由圖 17-3 可知， θ_2 在不同外擴角中升阻比表現是最高的，且 $\theta_4 \sim \theta_7$ 皆在穩定且相對不低的情況下，在考慮翻覆機率後，故推論 $\theta_4 \sim \theta_6$ 應為最適合飛行之外擴角範圍（A₇腹鰭面積下）

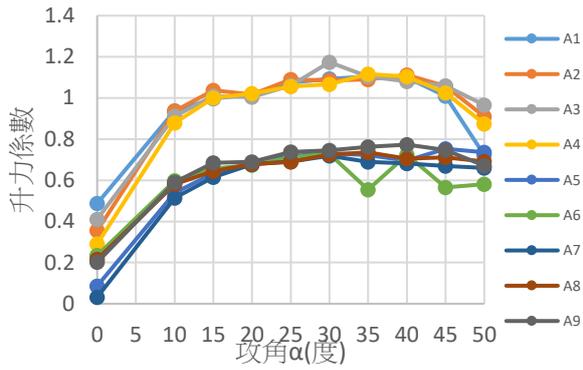
二、 實驗二討論

(一)、 升力係數討論

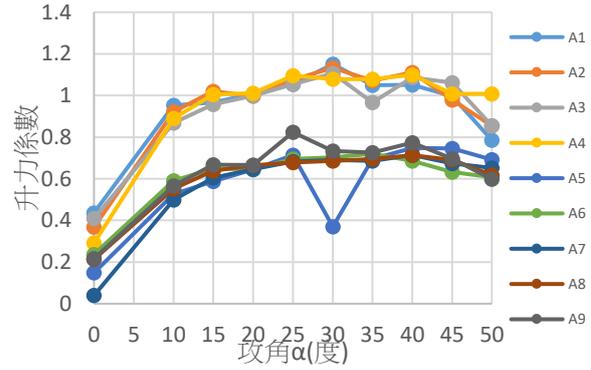
我們在判斷飛魚裝置否利於飛行時，以飛魚整體（胸腹鰭皆安裝）的升力係數來判定，根據文獻，升力係數越高者代表裝置越有利飛行，我們將單一外擴角時總升力係數對攻角作圖，並將不同腹鰭面積做疊圖，找尋外擴角和腹鰭面積在微觀角度上的關係。

 θ_1 不同腹鰭面積總升力係數- α 圖 圖 18-1 θ_2 不同腹鰭面積總升力係數- α 圖 圖 18-2

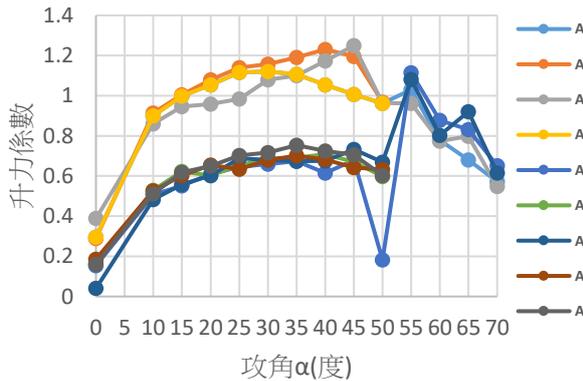
θ3 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-3



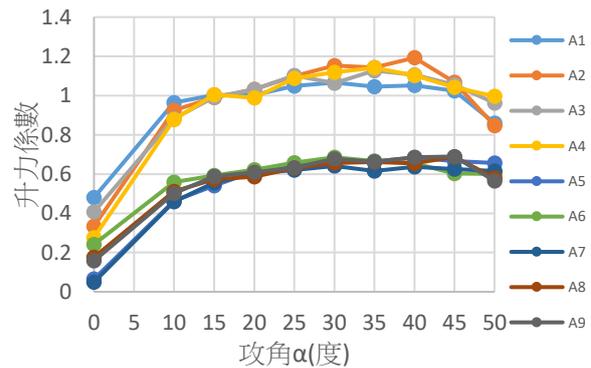
θ4 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-4



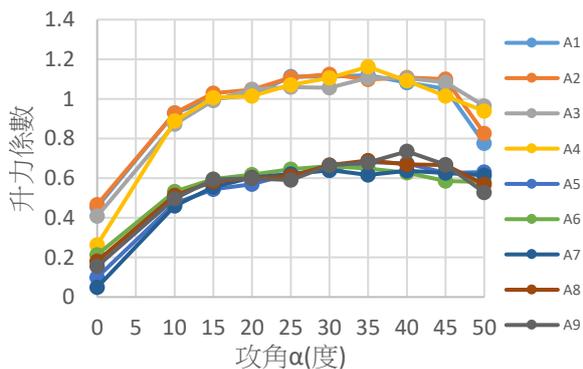
θ5 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-5



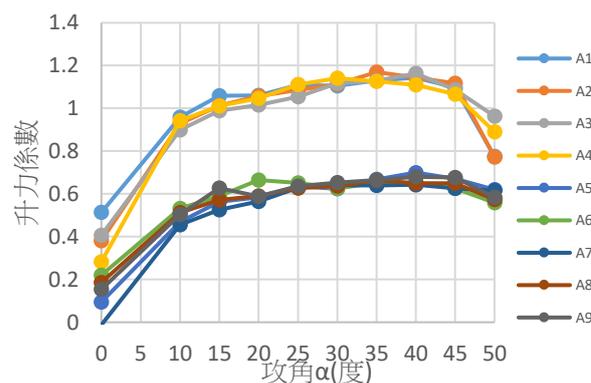
θ6 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-6



θ7 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-7



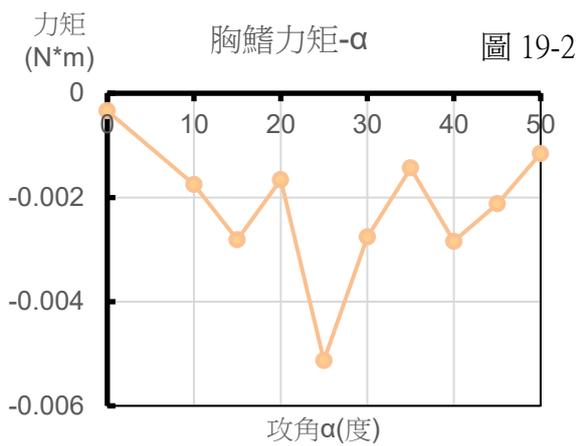
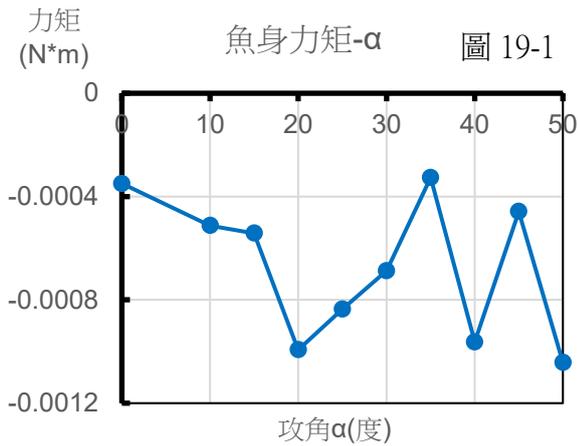
θ8 不同腹鰭面積總升力係數-α圖 圖 18-8



- a 首先，我們觀察到無論外擴角， $\theta_1 \sim \theta_9$ 在總升力上依照面積做區分可發現升力係數大致分為兩組區域： A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 等較高者，以及 A_5 、 A_6 、 A_7 、 A_8 、 A_9 等較低者。
- b 上述兩組區域不管外擴角的變化皆出現同樣趨勢，可見兩點：1.升力係數的最高點皆出現於攻角為35~45度之間。2.升力係數依照腹鰭面積可做區分。
- c 推測兩區域間有著類似量子現象中「能階」的情況出現，又因為此實驗關乎流體力學，故推測之。

(二)、 力矩初步計算結果

另一方面，我們以力矩作穩定度的判斷依據，此處我們先初步計算魚身和胸鰭力矩。



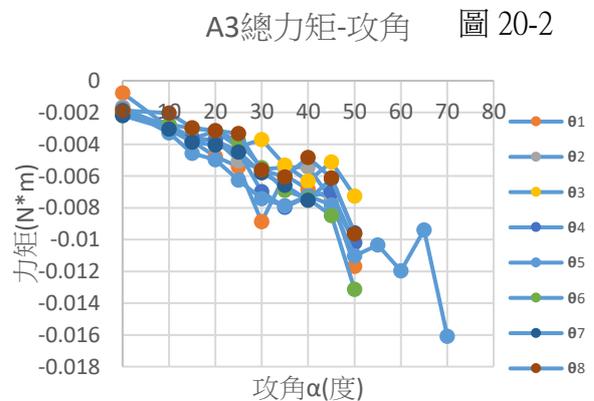
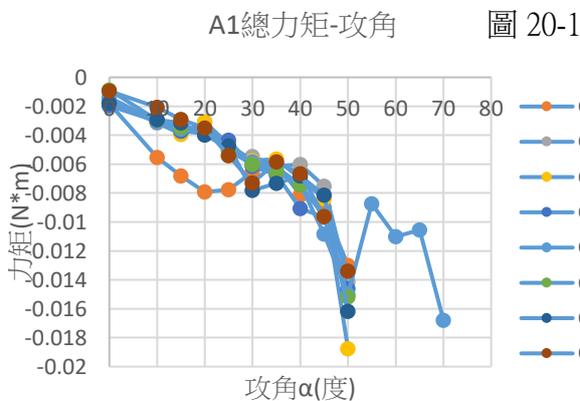
以上兩圖為計算所得的純魚身力矩以及安裝胸鰭時的力矩，發現魚身力矩相較胸鰭力矩，影響甚小。因此當我們改變攻角時，魚身的力矩的改變極小。

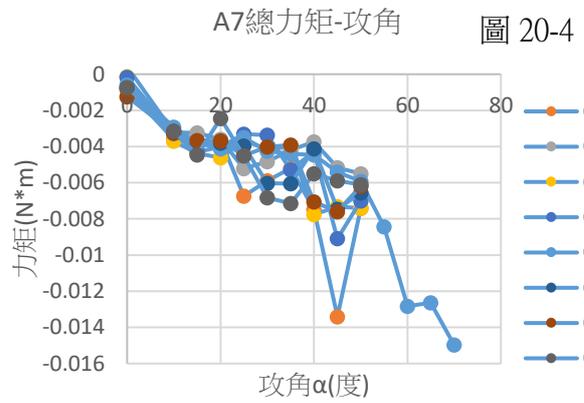
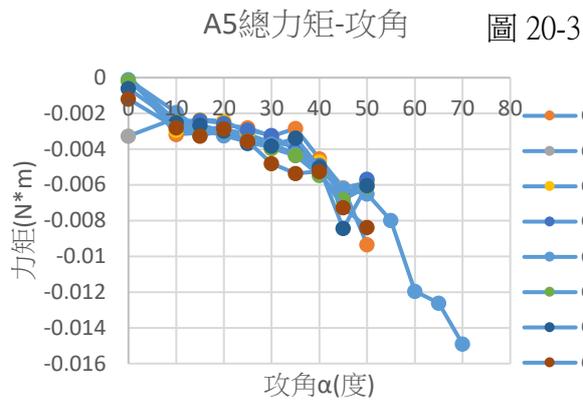
(三)、 不同腹鰭對飛魚飛行時的穩定度影響-1

再來我們分析不同腹鰭面積的情況，改變外擴角對力矩的影響。其判斷依據為：

- 飛魚在飛行時，為了維持穩定而不翻覆，當攻角越大時，就要有相應越大的力矩將其校正，因此，我們定當飛魚的攻角越大，負力矩增大的趨勢越大，即數列的斜率數值越大，其穩定性越好。

腹鰭面積為 A_1 、 A_3 、 A_5 、 A_7 分析，由於腹鰭面積變化大可看出更多的差距，對應到實驗 1-2、1-3 中翻覆機率的現象，我們也能透過穩定度的討論對此翻覆機率高或做詮釋，並找出翻覆機率高 (A_1 、 A_3) 和低 (A_5 、 A_7) 之間的差異性。

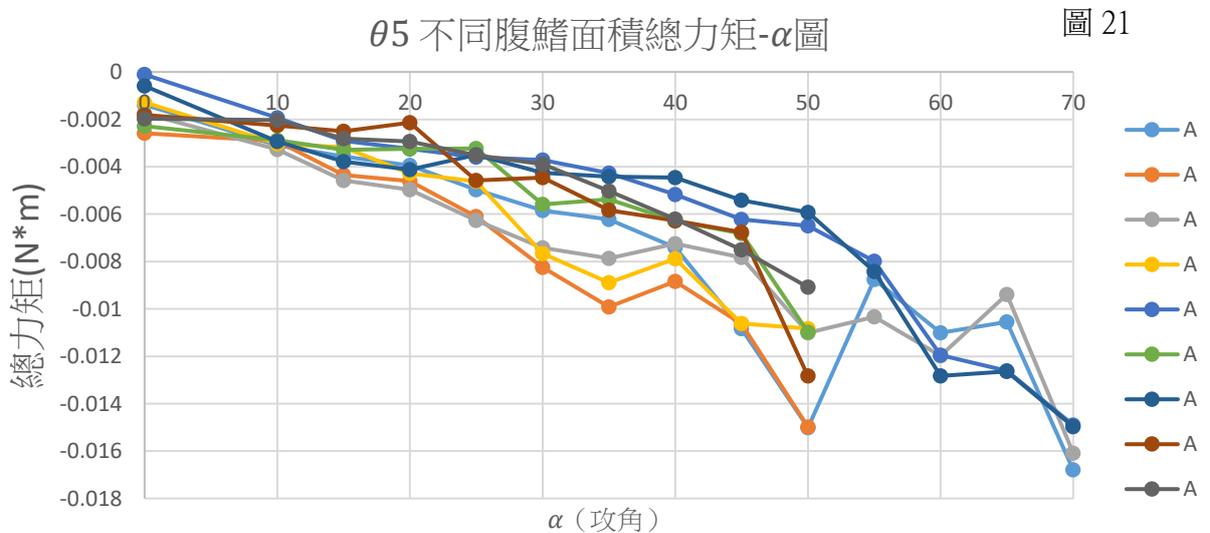




- a 可發現 A_1 、 A_3 、 A_5 、 A_7 各別總力矩在攻角為 50 度之前，其向下趨勢（負力矩斜率數值）皆雷同。
- b 各腹鰭面積改變外擴角對其穩定度的影響不大（皆很穩定）。
- c 端看攻角大於 50 度時，可發現翻覆機率高的 A_1 、 A_3 ，總俯仰力矩的斜率始轉為正數值，反觀 A_5 、 A_7 可發現即使攻角越過 50 度時，總俯仰力矩的斜率依然為負值，且是越來越負，故 A_5 、 A_7 最為穩定。

(四)、 不同腹鰭對飛魚飛行時的穩定度影響-2

飛魚在飛行時，為了維持穩定而不翻覆，當攻角越大時，就要有相應越大的力矩將其校正，因此，我們訂定：當飛魚的攻角越大，負力矩增大的趨勢越劇烈，即數列的斜率數值越大，其穩定性越好。由於不同外擴角的情況皆雷同，故以下只專論外擴角 60 度時的狀況。

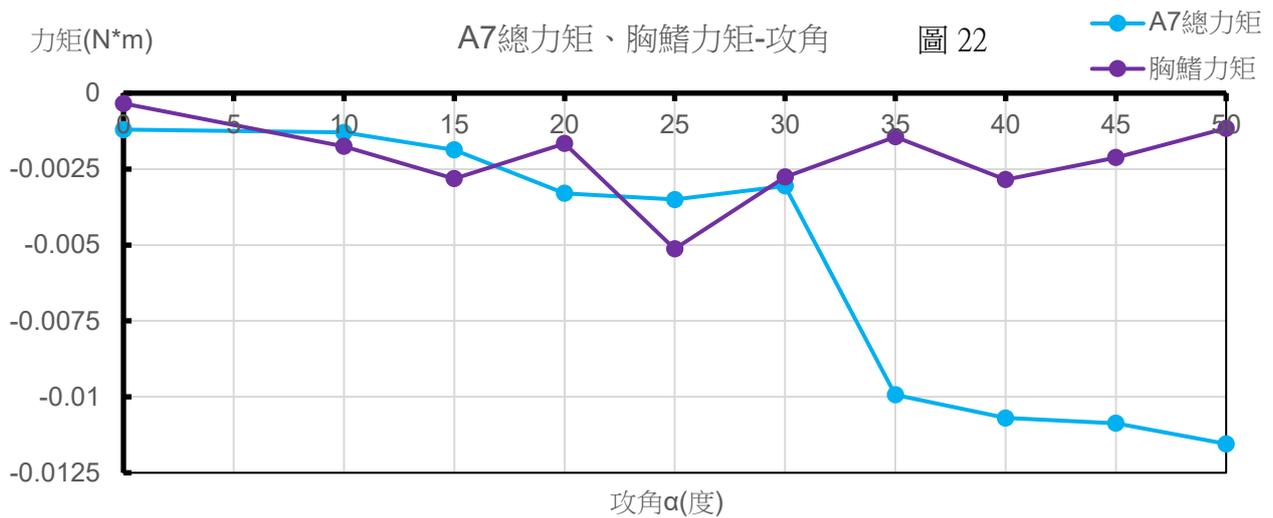


a 上圖為固定外擴角為 60 度（升阻比表現最佳的外擴角）各腹鰭面積，飛魚整體力矩隨攻角的變化。發現在攻角 40 度~70 度後，以 A7 腹鰭的數列整體斜率最大，且整體趨勢穩定，因此判斷其穩定度最高。

b 且各腹鰭面積的總俯仰力矩皆在攻角為 40 度時，斜率的數值驟升，因此推論，攻角 40 度對於以不同面積而言應為最穩定的攻角。

(五)、 比較只有胸鰭的飛魚與胸腹鰭兼具的飛魚穩定性

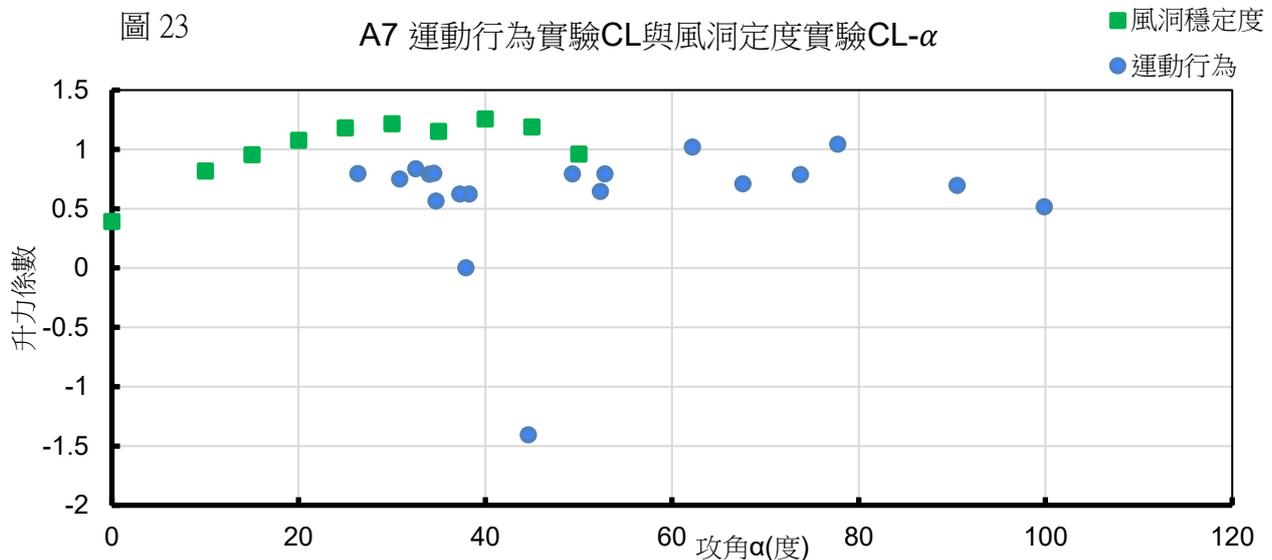
我們探討單有胸鰭的飛魚，與胸腹鰭兼具的飛魚，兩者的穩定性差異，並討論腹鰭存在有無對飛魚整體的影響。



由上圖中的數列斜率得知，飛魚在胸腹鰭同時存在時的穩定度，會比只有胸鰭的飛魚穩定度佳。

(六)、 運動學實驗與風洞力學實驗綜合討論

1. 我們這時將實驗一和實驗二計算出的升力係數做比較，找出兩者是否有相似之處。



由A₇腹鰭運動行為實驗與力學實驗的升力係數對照，得知兩者升力係數範圍相近，而且有類似趨勢，因此我們認為兩實驗的結果可互相對應。

2. 實驗一與實驗二 最穩定攻角之合併探討：

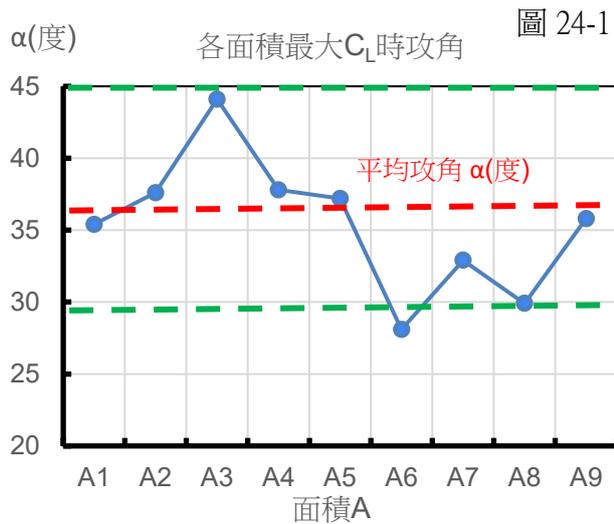


圖 24-1

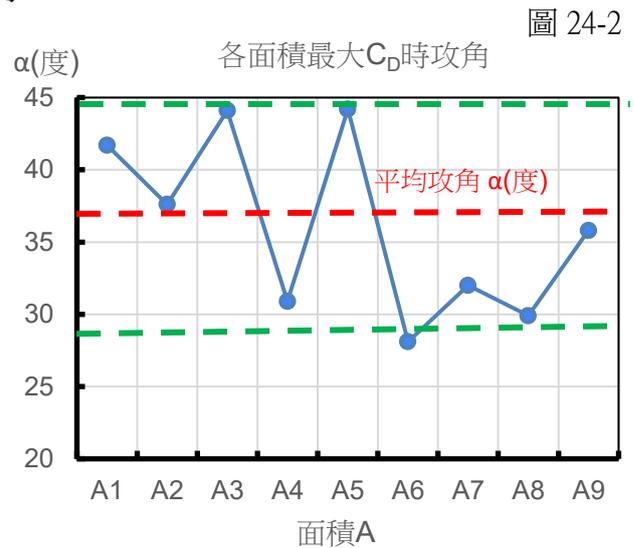


圖 24-2

- a 由運動學討論得出各腹鰭面積 $C_{L(max)}$ 、 $C_{D(max)}$ 時的攻角分別為 $\alpha(C_{L(max)}) = 36^\circ$ 、 $\alpha(C_{D(max)}) = 36^\circ$ ，力學實驗中升力係數達到最大值時為 $\alpha(C_{L(max)}) = 40^\circ$ ，兩項實驗得出的最有利於飛行之攻角在宏觀下十分相似。

3. 實驗一與實驗二結論之討論：

搭配升阻比與俯仰力矩係數，可對應到最適合飛行以及最穩定的飛行狀態，若將兩者搭配，可分成以下情況，並依照最適合飛行之腹鰭面積之專論：

升阻比 \ 穩定度	高	低
高	最佳飛行優勢條件 A ₅ ：外擴角 θ_5 、攻角 40 度~70 度 A ₇ ：外擴角 $\theta_4 \sim \theta_5$ 、攻角 40 度~70 度	推測為：高速上升的條件 A ₅ ：外擴角為 θ_7 A ₇ ：外擴角為 θ_8
低	推測為：穩定下降的條件 A ₅ ：外擴角為 θ_4 A ₇ ：外擴角為 θ_2	最不佳飛行優勢條件 A ₅ ：外擴角為 θ_2 A ₇ ：外擴角為 θ_3

陸、 結論

一、基本飛行要素

- (一)、 由本實驗，可知 A_5 （原腹鰭面積）、 A_7 （1.06 腹鰭）是最適合飛行腹鰭面積、40 度是最適合飛行攻角。
- (二)、 由力矩可知 A_5 （原腹鰭面積）、 A_7 （1.06 腹鰭）是最穩定腹鰭面積，且對各腹鰭面積而言當攻角約莫在 35~45 度之間是最有利於飛行且最穩定的攻角範圍，其中，又以攻角是 40 度為最穩定。

二、氣動條件

- (一)、 由本實驗可知，胸腹鰭兼備的飛魚穩定度比只有胸鰭的飛魚來的好，推論皆安裝時，腹鰭能增加飛魚整體的穩定度。
- (二)、 我們推測，就不同飛魚種類或個體而言，胸腹鰭兼備的飛魚會比無腹鰭或腹鰭破損的飛魚飛行更加穩定。

三、飛行條件專論

- (一)、 不管腹鰭面積為何，飛魚腹鰭外擴角的影響對於穩定度影響甚小，對升阻比影響較大。
- (二)、 飛行時飛魚可透過調整外擴角進而調整飛行時的升阻比，同時又可維持穩定（調整外擴角對穩定度影響甚小），故可推測飛行時所需條件：

升阻比 穩定度	高	低
高	最佳飛行優勢條件 A_5 ：外擴角 θ_5 、攻角 40 度~70 度 A_7 ：外擴角 $\theta_4 \sim \theta_5$ 、攻角 40 度~70 度	推測為：高速上升的條件 A_5 ：外擴角為 θ_7 A_7 ：外擴角為 θ_8
低	推測為：穩定下降的條件 A_5 ：外擴角為 θ_4 A_7 ：外擴角為 θ_2	最不佳飛行優勢條件 A_5 ：外擴角為 θ_2 A_7 ：外擴角為 θ_3

柒、 未來展望

- 一、流場實驗，透過流場實驗能讓我們能更加清楚確認風的流向。
- 二、增加討論 2-1 的升力係數與腹鰭面積之間類似「能階」之關係。
- 三、改良風洞穩定度實驗的實驗裝置，以測得阻力。
- 四、在實驗裝置中加裝扭力計，以便直接測得力矩。

捌、 參考文獻

- 一、 沈海軍、余翼（2021 年 6 月）。型態仿生飛行器研製進展及關鍵技術。航空工程進展。第 12 卷第 3 期。
- 二、 Hyungmin Park and Haecheon Choi（2010）。Aerodynamic characteristics of flying fish in gliding flight. The Journal of Experimental Biology 213
- 三、 M.R.Ahmed and S.D.Sharma（2003）。An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoilin ground effect. Experimental Thermal and Fluid Science29
- 四、 Amy Gao（2013）。Design Considerations for a Robotic Flying Fish. Cambridge, Massachusetts 02139
- 五、 Jian Deng, Lingxin Zhang, Zhiyou Liu and Xuerui Mao（2018）Numerical prediction of aerodynamic performance for a flying fish duringgliding flight. Bioinspiration & Biomimetics
- 六、 Keiji Kawachi, Yoshinobu Inada and Akira Azuma（1993）Optimal Flight Path of Flying Fish.J.theor.Biol163
- 七、 Jian Deng, Shuhong Wang and Lingxin Zhang（2019）Why does a flying fish taxi on sea surface before take-off? A hydrodynamic interpretation. Department of Mechanics
- 八、 F.E.FISH（1989）Wing design and scaling of flying fish with regard to flight performance. Department of Biology
- 九、 David Halliday、Robert Resnick、Jearl Walker 2016 年 08 月 Halliday 物理（力學與熱學篇）第十版 全華出版

【評語】 051816

飛魚一直是個有趣的研究主題，其出水滯空時確實是以滑翔為主要行為，雖然在文獻上已有不少比本作品更詳盡的研究，但本作品利用自製的設備、認真的探索精神及方法，也獲得了具參考價值的結果。若能再改進飛魚模型的擬真性及實驗的精確度，包括飛魚的流線身形及薄魚翅、風動的精密度等，將可獲得更好的結果，算是有潛力可以繼續改進的作品。

作品簡報

魚你翼鰭飛

探討飛魚腹鰭對飛行穩定度的作用

組別：高級中等學校組

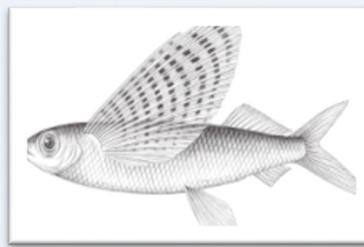
科別：物理與天文學科

編號：051816

前言

飛魚行為觀察

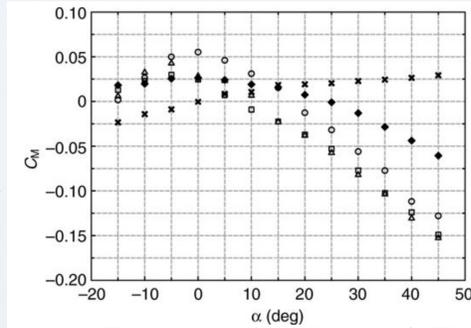
1. 將腹鰭夾起
2. 頭朝下直衝水面，並將胸腹鰭夾起
3. 攻角過大時可能會翻覆
4. 只在飛行時張開腹鰭



圖一、斑鰭飛魚繪製圖
(台灣魚類資料庫)

影響飛魚飛行的關鍵

在Hyungmin Park and Haecheon Choi, 2010 的研究中得知，飛魚腹鰭的升力力矩是影響飛行穩定的關鍵

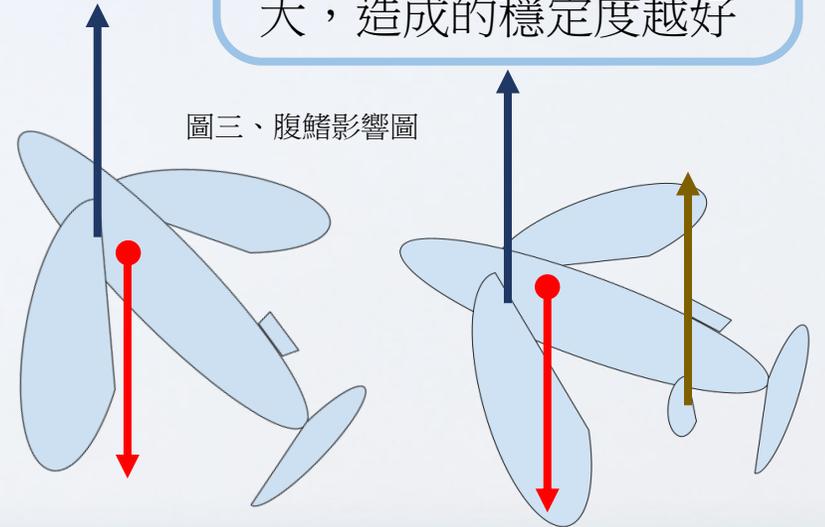


圖二、俯仰力矩係數-攻角圖
(取自上述之文獻)

實驗假設

1. 腹鰭面積越大造成的穩定度越好
2. 腹鰭與魚身的夾角越大，造成的穩定度越好

圖三、腹鰭影響圖



運動行為實驗

改變腹鰭面積 A_n

固定腹鰭面積 A_n
改變腹鰭外擴角 θ

使用Tracker分析，得出 t 、 x 、 y 、 v_x 、 v_y

帶入升力係數、阻力係數、升阻比公式

找出最適合飛魚飛行的狀態

風洞穩定度實驗

改變腹鰭外擴角 θ

固定腹鰭面積 A_n 和腹鰭外擴角 θ ，改變攻角 α

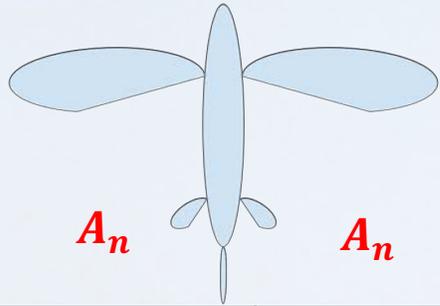
利用磅秤測得力

帶入力矩公式算得 τ

找出飛魚穩定飛行的狀態

實驗方法

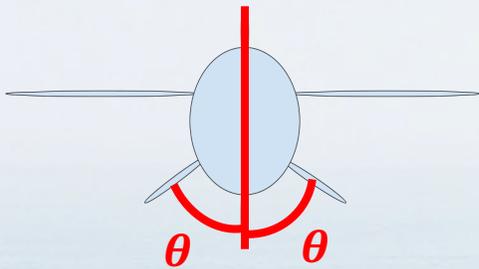
實驗模型



腹鰭面積 A_n 代號從 $A_1 \sim A_9$

圖四、腹鰭面積定義圖

$A_1=0.88$	$A_2=0.91$	$A_3=0.94$
$A_4=0.97$	$A_5=1.00$	$A_6=1.03$
$A_7=1.06$	$A_8=1.09$	$A_9=1.12$



腹鰭外擴角 θ 為魚身中垂線和腹鰭之間的夾角，代號從 $\theta_1 \sim \theta_8$

圖五、外擴角定義圖

$\theta_1=30$ 度	$\theta_2=40$ 度	$\theta_3=45$ 度
$\theta_4=50$ 度	$\theta_5=60$ 度	$\theta_6=70$ 度
$\theta_7=80$ 度	$\theta_8=90$ 度	*

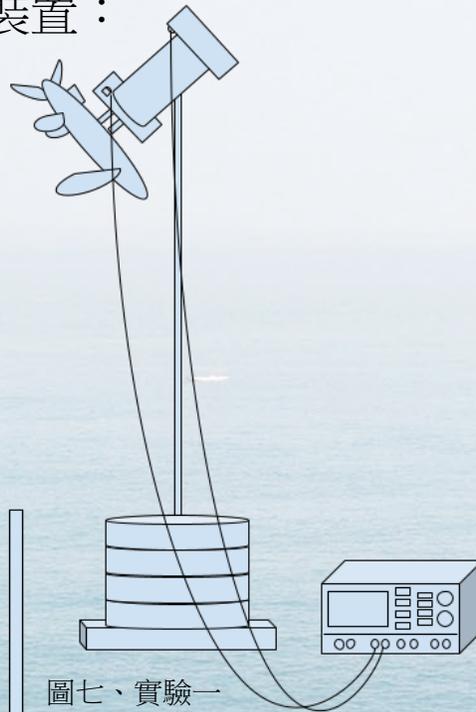
實驗裝置



圖六、飛魚模型圖

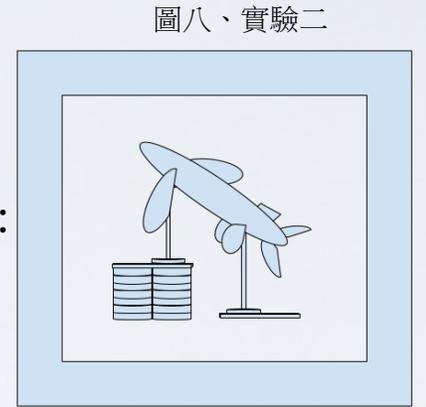
黑點處為Tracker追蹤點

實驗一裝置：



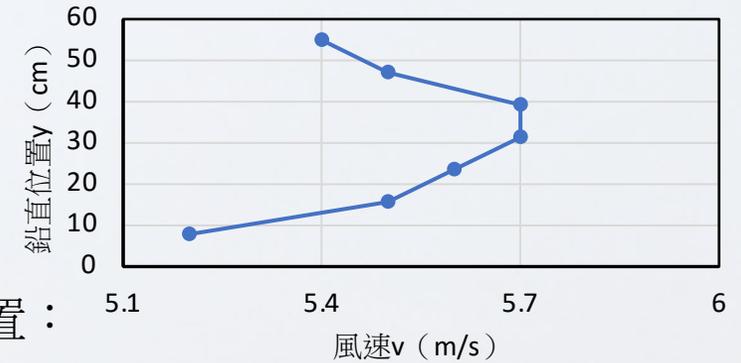
圖七、實驗一

飛魚模型於實驗區：

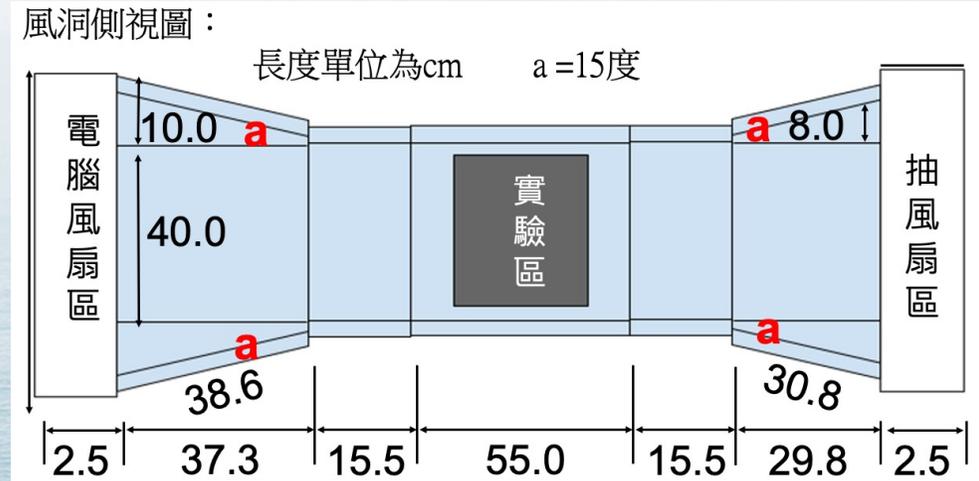


圖八、實驗二

風洞實驗區鉛直位置風速分布圖



實驗二裝置：

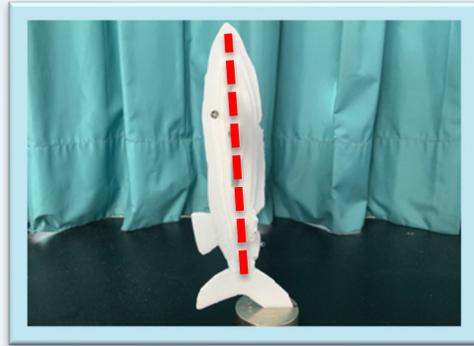


研究結果&討論

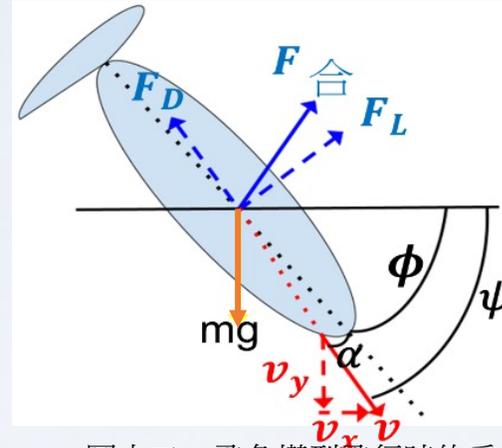
探討不同腹鰭面積對應不同外擴角於飛行條件的影響



圖九、飛魚模型翻未翻覆圖



圖十、飛魚模型翻覆圖



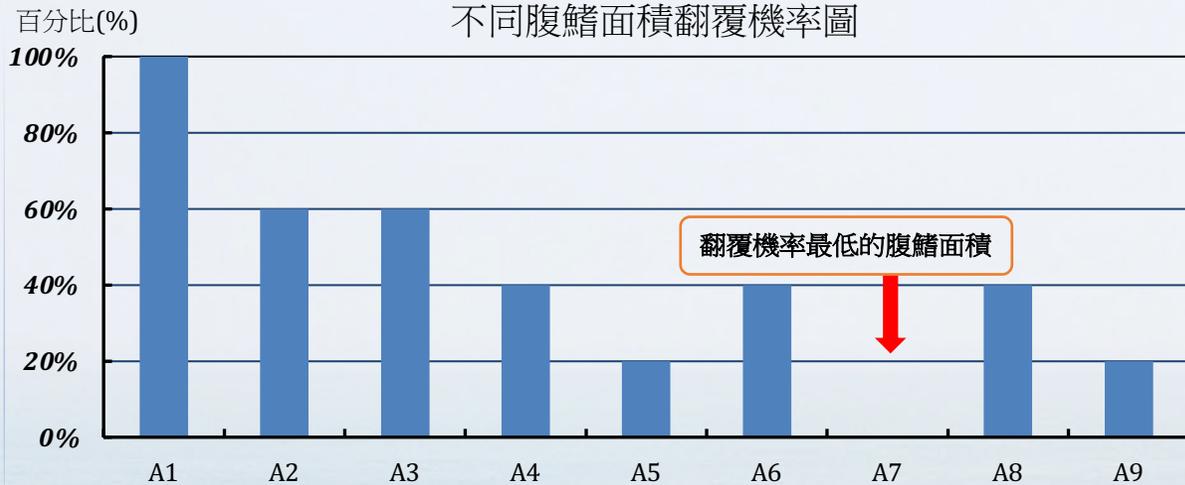
圖十二、飛魚模型飛行時的受力圖

$$\vec{F}_L = \vec{F}_y \cos\psi + \vec{F}_x \sin\psi$$

$$\vec{F}_D = \vec{F}_y \sin\psi + \vec{F}_x \cos\psi$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho A v^2}, \quad C_D = \frac{2F_D}{\rho A v^2}$$

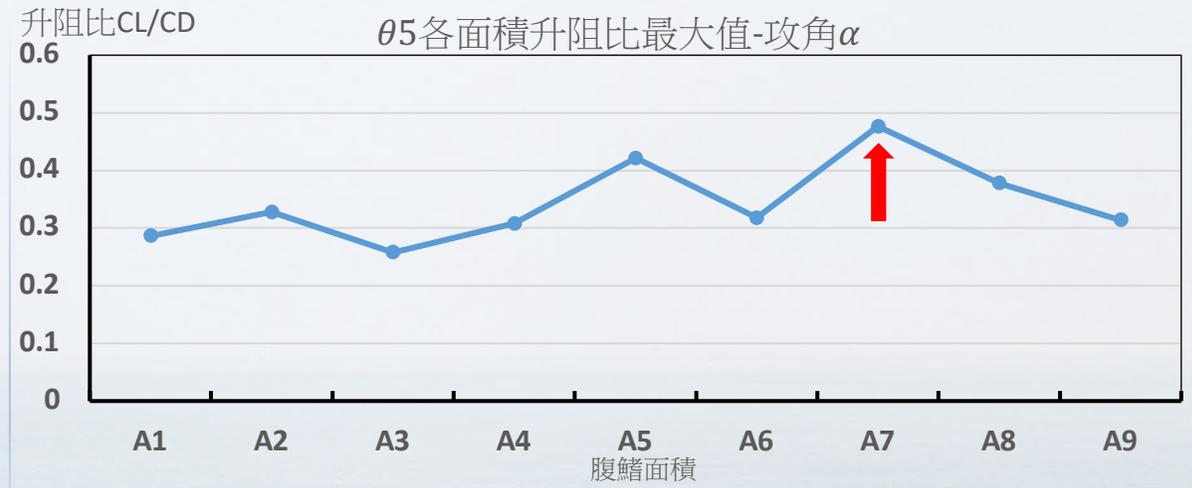
$$\frac{C_L}{C_D} = \text{升阻比}$$



圖十一、以現象觀察統整不同腹鰭面積翻覆機率

- 翻覆機率定義：影片中翻過90度以上 ($\phi \geq 90$ 度) 者，即沒有辦法回到穩定狀態。

由圖一可知A7翻覆機率为0%，A1的翻覆機率为100%，整體隨著面積的增加翻覆機率有減少的趨勢。

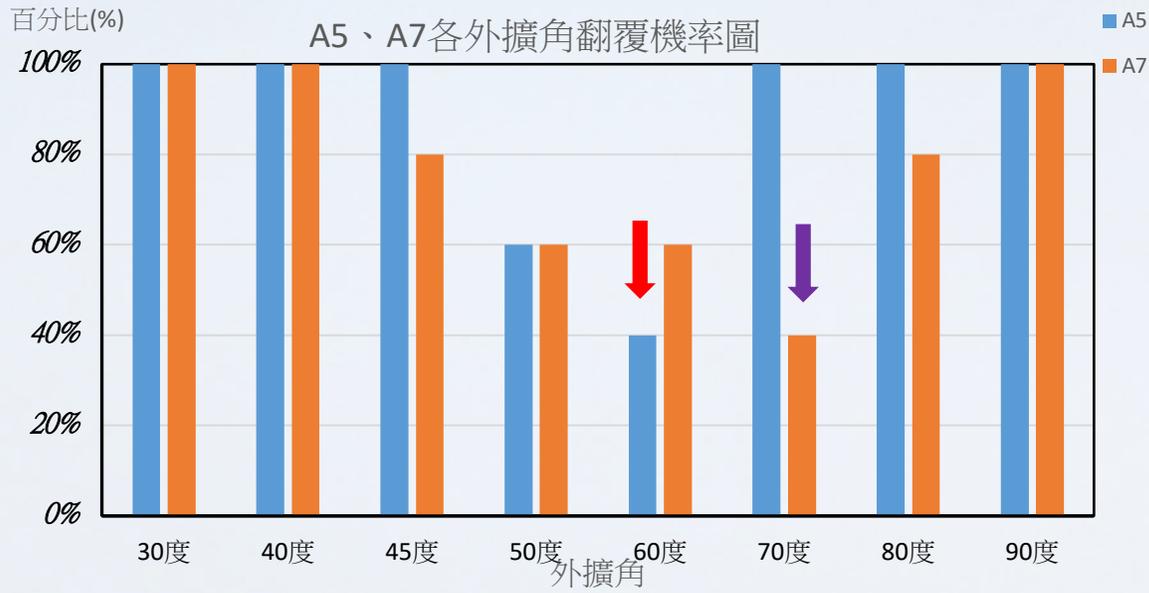


圖十三、統整不同腹鰭面積的最大升阻比值

- 升阻比的定義中即表示，當「升阻比較高者，越不容易失速，甚至可說是越適合飛行的條件」。

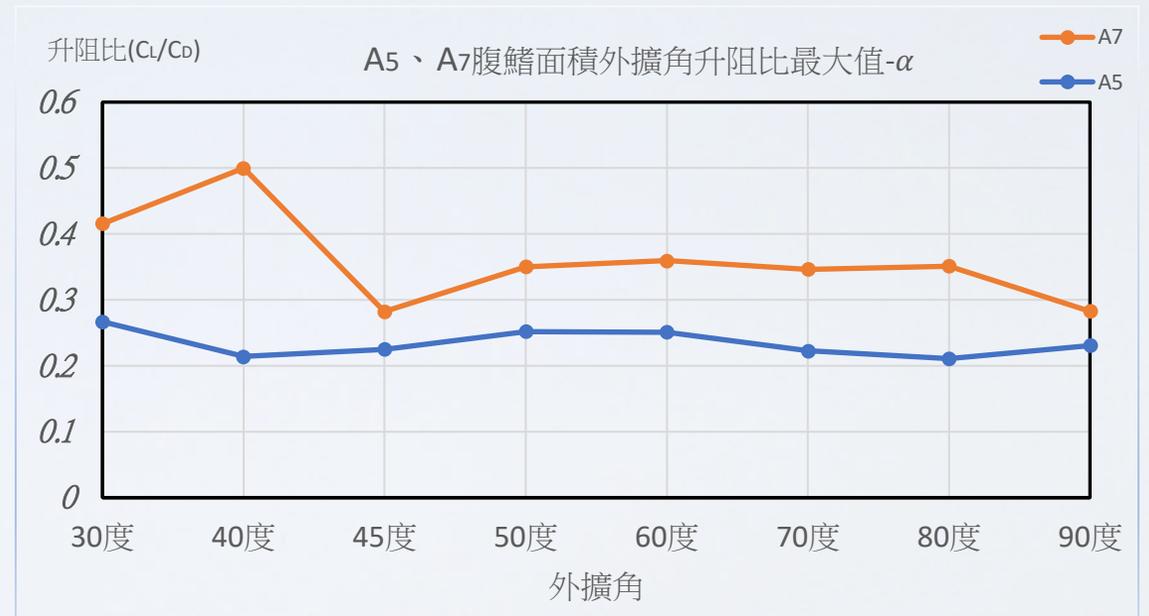
A7的升阻比(見紅色箭頭處)是各腹鰭面積中升阻比最高的，A5次之，故A7是最適合飛行的腹鰭面積。

探討不同腹鰭面積對應不同外擴角於飛行條件的影響



圖十四、不同外擴角 (A₅、A₇) 翻覆機率

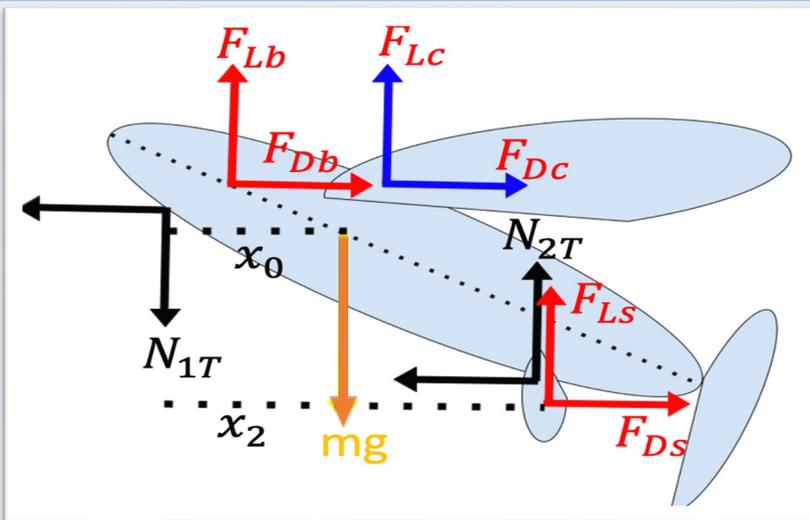
1. A₅腹鰭面積 θ_5 (紅色箭頭) 翻覆機率為40%， θ_4 為60%，其他外擴角機率皆為100%。
2. A₇腹鰭面積 θ_6 (紫色箭頭) 翻覆機率為40%。



圖十五、不同外擴角 (A₅、A₇) 升阻比最大值

1. 由圖七可知，A₅腹鰭面積 θ_1 、 θ_4 、 θ_5 在不同外擴角中升阻比表現是最高的，且 θ_1 最高，若考慮到翻覆機率，故推論 θ_4 、 θ_5 為最適合飛行的外擴角 (A₅腹鰭面積下)
2. 由圖七可知，A₇腹鰭面積 θ_2 在不同外擴角中升阻比表現是最高的，且 $\theta_4 \sim \theta_7$ 皆在穩定且相對不低的情況下，在考慮翻覆機率後，故推論 $\theta_4 \sim \theta_6$ 應為最適合飛行之外擴角範圍 (A₇腹鰭面積下)

探討不同腹鰭面積對應不同外擴角於穩定度的影響



圖十六、開啟風洞後的系統力圖

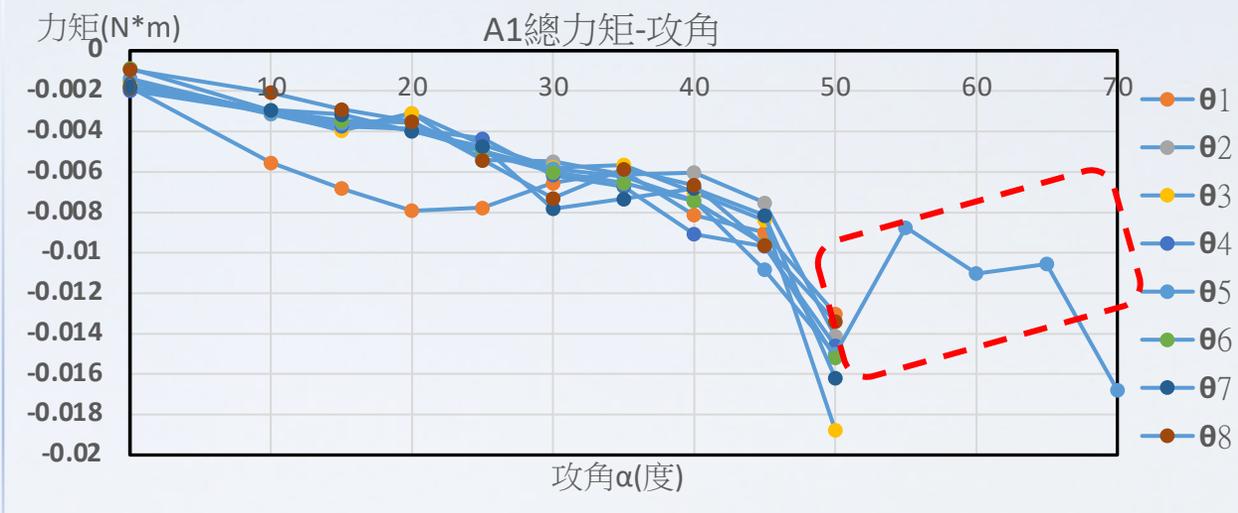
穩定度定義：以負力矩的斜率判斷穩定度。負斜率越大，穩定性越高。

只有腹鰭：
$$\vec{F}_{LS} = -(m\vec{g} + \vec{N}_{1s} + \vec{N}_{2s} + \vec{F}_{Lb})$$

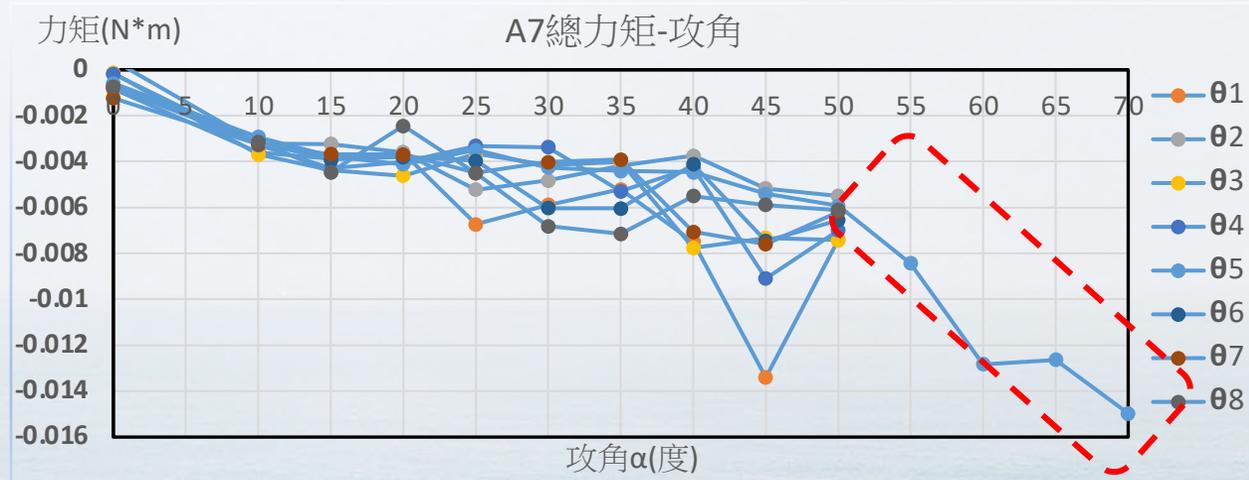
$$\vec{\tau}_{F_s} + \vec{\tau}_{f_{2s}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2s}} + \vec{\tau}_{F_b})$$

胸腹鰭皆裝：
$$\vec{F}_{LT} = -(m\vec{g} + \vec{N}_{1T} + \vec{N}_{2T} + \vec{F}_{Lb})$$

$$\vec{\tau}_{F_T} + \vec{\tau}_{f_{2T}} = -(\vec{\tau}_g + \vec{\tau}_{N_{2T}} + \vec{\tau}_{F_b})$$



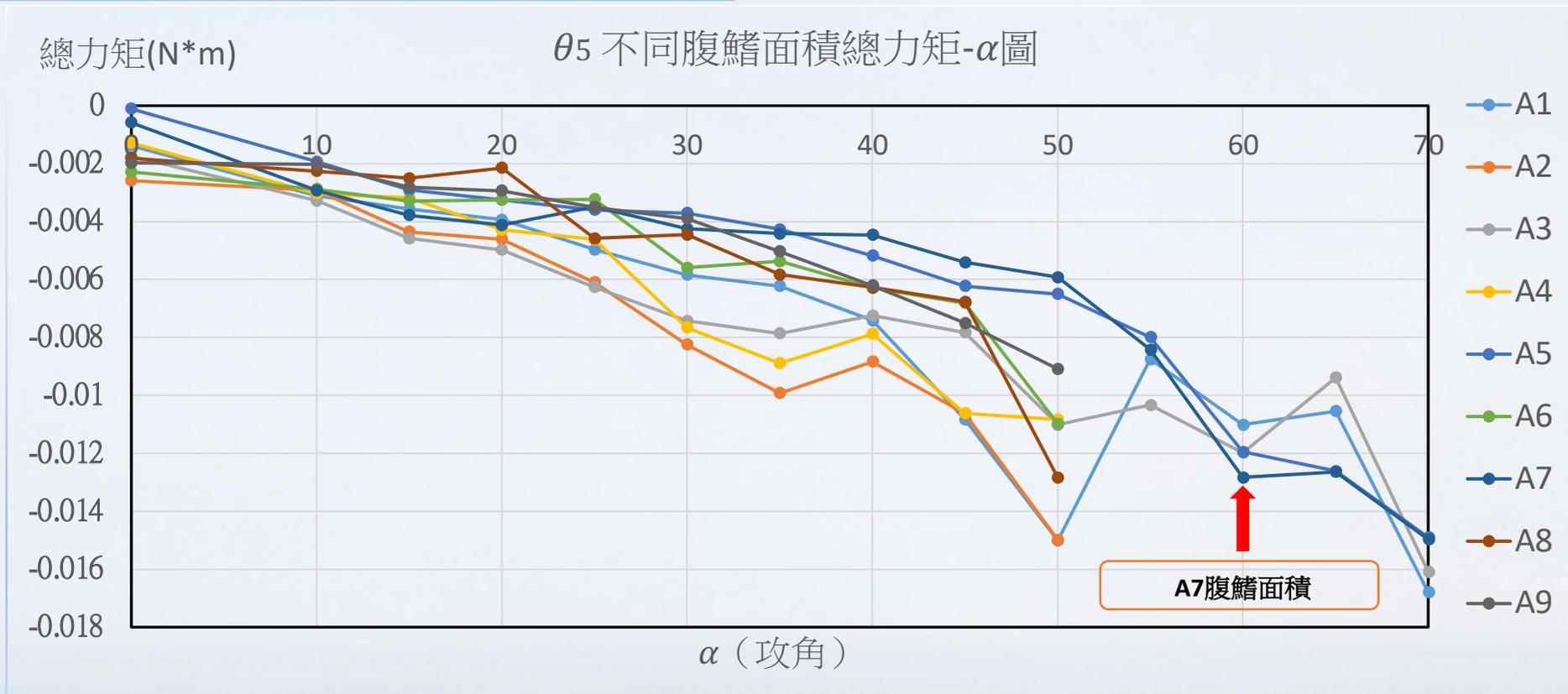
圖十七、不同腹鰭面積，不同外擴角力矩- α 圖



圖十八、不同腹鰭面積，不同外擴角力矩- α 圖

1. 固定腹鰭面積時，改變外擴角對其穩定度的影響不大。
2. 翻覆機率高的A₁在攻角 $\alpha=50$ 度後斜率轉正（見紅框處），A₇則保持負斜率，因此較為穩定。

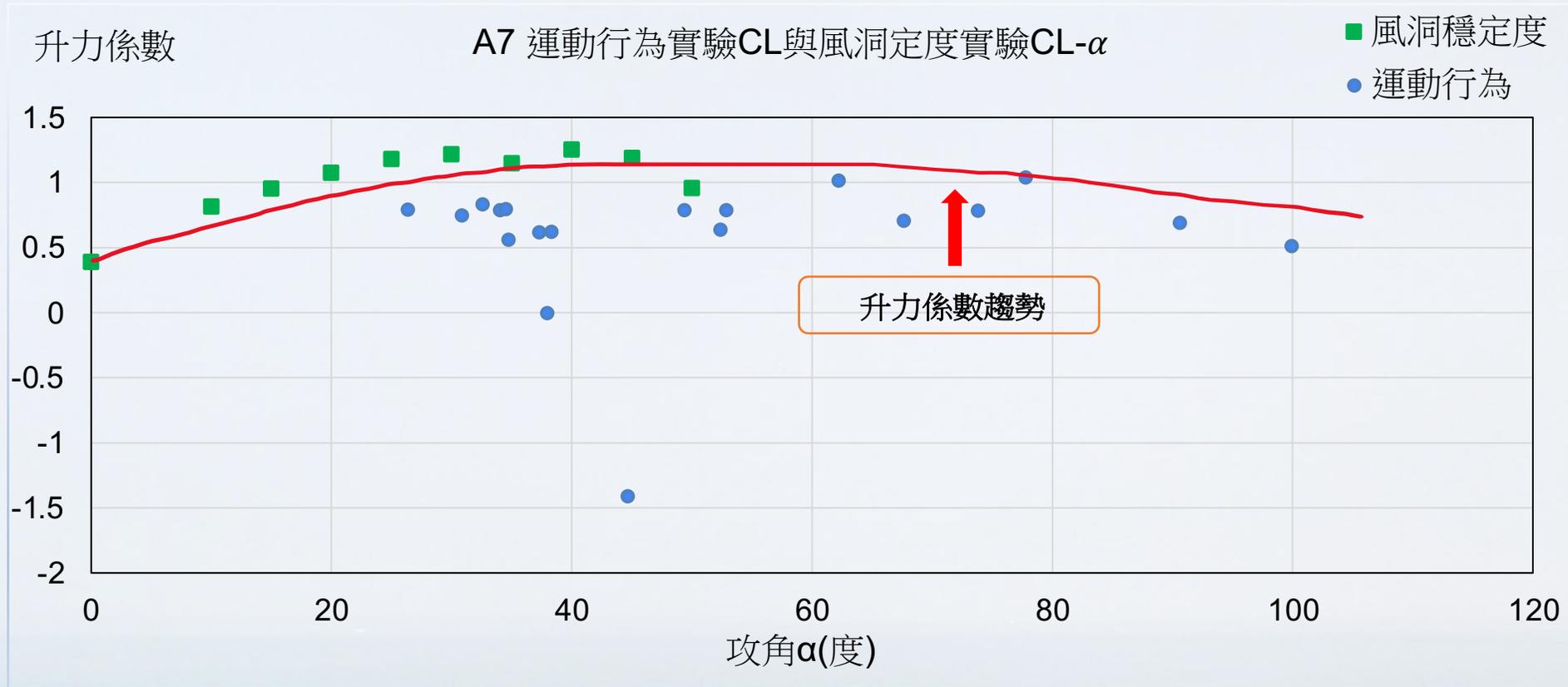
探討不同腹鰭面積對應不同外擴角於**穩定度**的影響



圖十九、固定外擴角不同腹鰭面積力矩- α 圖

1. 發現在攻角40度~70度後，以A7腹鰭的數列整體斜率最大，且整體趨勢穩定，因此判斷其穩定度最高。
2. 各腹鰭面積的總俯仰力矩皆在攻角為40度時，斜率的數值驟升，因此推論，攻角40度對於以不同面積而言應為最穩定的攻角。

實驗一、實驗二結論整合討論

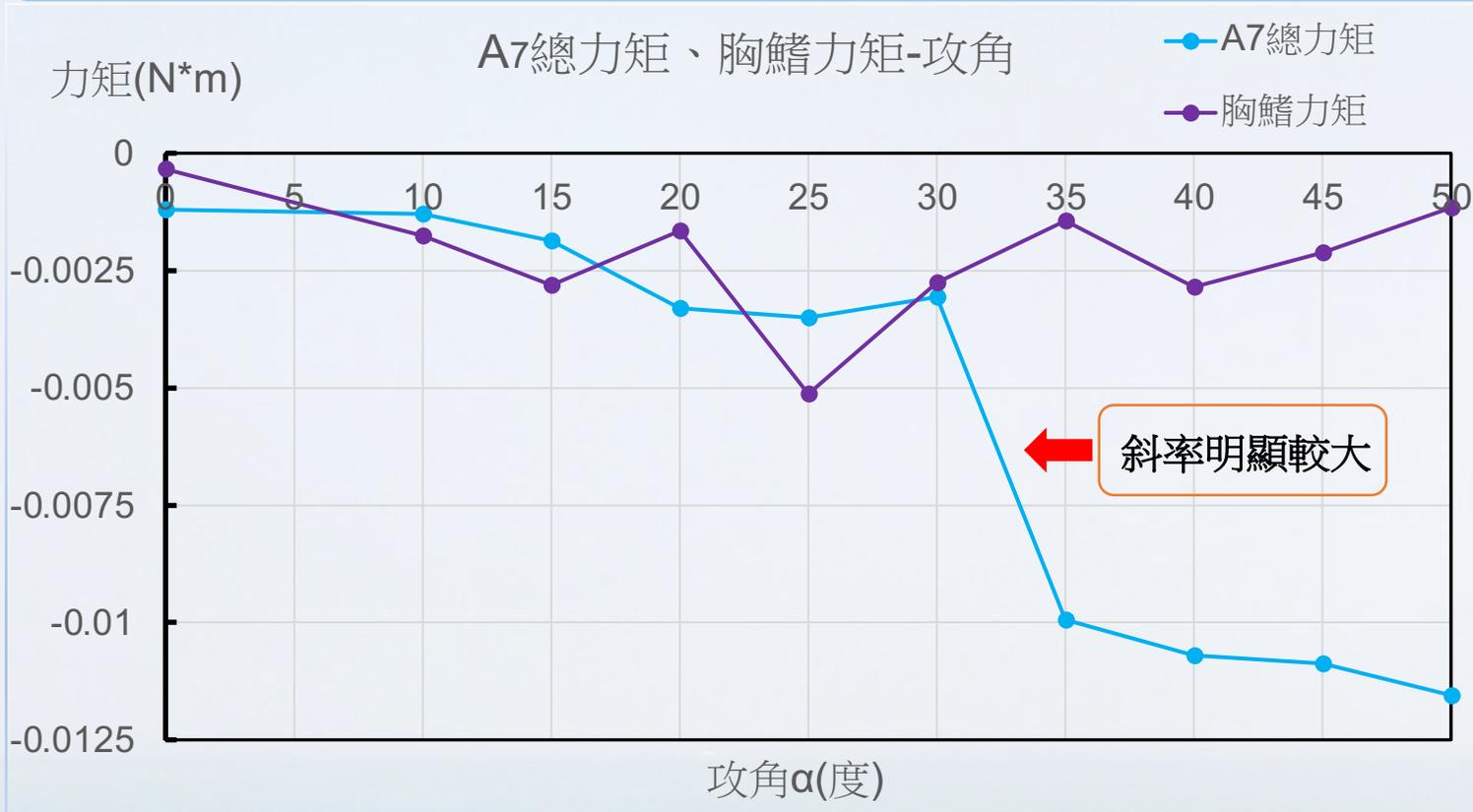


圖二十、實驗一和實驗二升力係數結合比對

- 實驗一與實驗二之升力係數對照

由A₇腹鰭運動行為實驗與力學實驗的升力係數對照，得知兩者升力係數範圍相近，而且有類似趨勢，因此我們認為兩實驗的結果可互相對應。

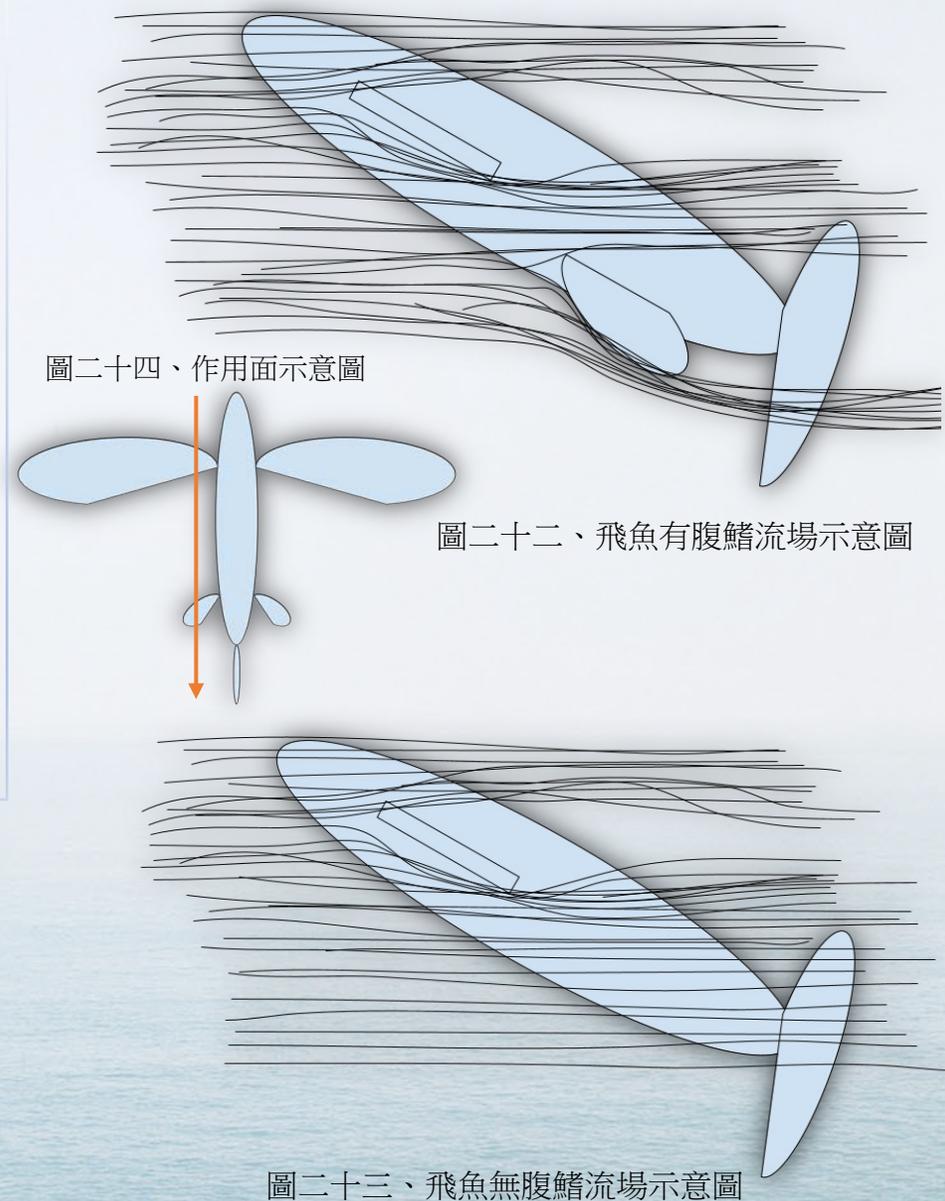
探討飛魚腹鰭有無對飛行的影響



圖二十一、飛魚無腹鰭（即只有胸鰭）、整隻飛魚力矩比對圖

- 探討若飛魚無腹鰭(即只有胸鰭)，則其力矩與正常飛魚之差別由圖十二得知，擁有完整胸、腹鰭的飛魚，其穩定性比無腹鰭之飛魚高。其差距可在攻角30度後明顯看到。其流場示意如右兩圖。

飛魚流場示意圖



結論

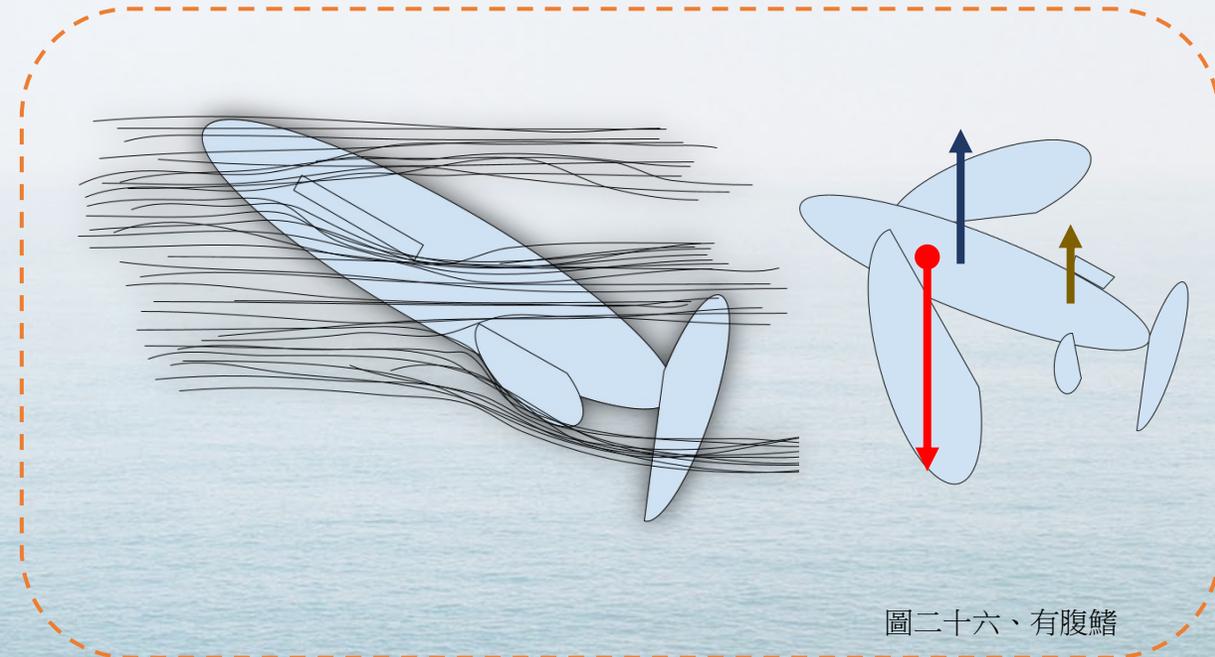
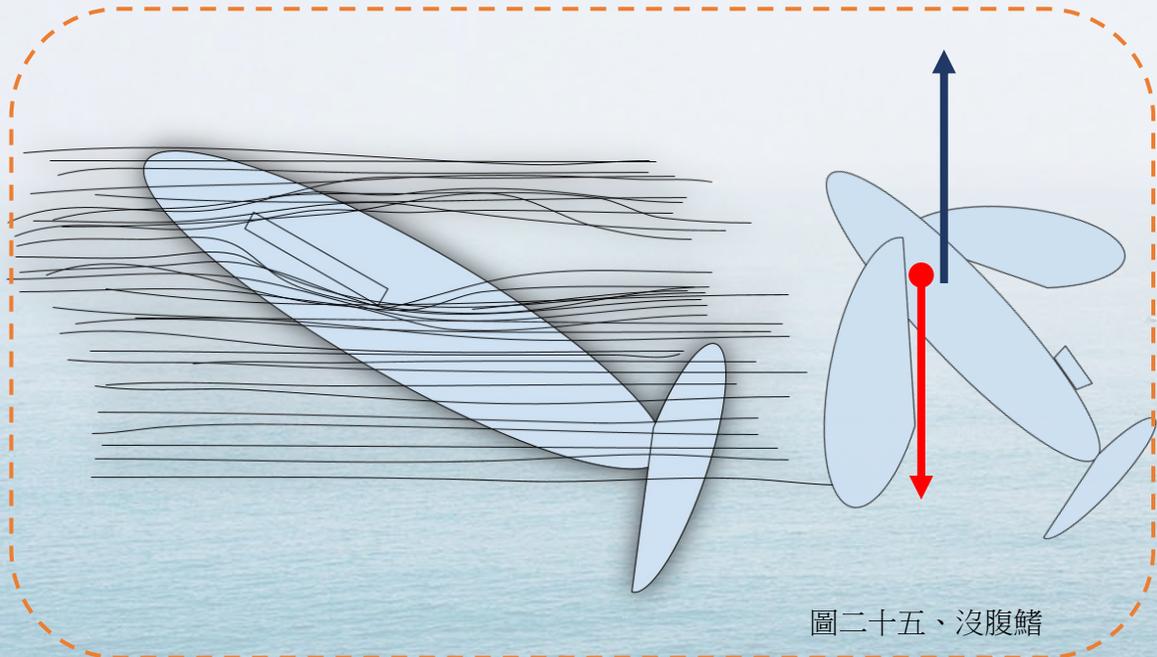
一、基本要素

(一) 由本實驗，可知 A_5 （原腹鰭面積）、 A_7 （1.06腹鰭）是最適合飛行腹鰭面積、 40° 是最適合飛行攻角。

(二) 由力矩可知 A_5 （原腹鰭面積）、 A_7 （1.06腹鰭）是最穩定腹鰭面積，且對各腹鰭面積而言當攻角約莫在 $35\sim 45^\circ$ 之間是最有利於飛行且最穩定的攻角範圍，其中，又以攻角是 40° 為最穩定。

二、氣動條件

(一) 我們推測，就不同飛魚種類或個體而言，胸腹鰭兼備的飛魚會比無腹鰭或腹鰭破損的飛魚飛行更加穩定。



結論

三、飛行條件專論

- (一) 不管腹鰭面積為何，飛魚腹鰭外擴角的影響對於穩定度影響甚小，對升阻比影響較大。
- (二) 飛行時飛魚可透過調整外擴角進而調整飛行時的升阻比，同時又可維持穩定（調整外擴角對穩定度影響甚小），故可推測飛行時所需條件：

升阻比 \ 穩定度	高	低
高	最佳飛行優勢條件 A_5 ：外擴角 θ_5 、攻角40度~70度 A_7 ：外擴角 $\theta_4 \sim \theta_5$ 、攻角40度~70度	推測為：穩定下降的條件 A_5 ：外擴角為 θ_7 A_7 ：外擴角為 θ_8
低	推測為：高速上升的條件 A_5 ：外擴角為 θ_4 A_7 ：外擴角為 θ_2	最不佳飛行優勢條件 A_5 ：外擴角為 θ_2 A_7 ：外擴角為 θ_3

參考資料

- Hyungmin Park and Haecheon Choi (2010). Aerodynamic characteristics of flying fish in gliding flight. The Journal of Experimental Biology 213
- M.R.Ahmed and S.D.Sharma (2003). An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoilin ground effect. Experimental Thermal and Fluid Science29
- Amy Gao (2013). Design Considerations for a Robotic Flying Fish. Cambridge, Massachusetts 02139
- Jian Deng, Lingxin Zhang, Zhiyou Liu and Xuerui Mao (2018) Numerical prediction of aerodynamic performance for a flying fish duringgliding flight. Bioinspiration & Biomimetics
- Keiji Kawachi, Yoshinobu Inada and Akira Azuma (1993) Optimal Flight Path of Flying Fish.J.theor.Biol163
- Jian Deng, Shuhong Wang and Lingxin Zhang (2019) Why does a flying fish taxi on sea surface before take-off? A hydrodynamic interpretation. Department of Mechanics
- F.E.FISH (1989) Wing design and scaling of flying fish with regard to flight performance. Department of Biology