

新竹市第三十七屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：如何成為水中蛟龍？卡門渦街的應用探討

關 鍵 詞：卡門渦街、渦流脫落頻率、蝶腳擺動振幅

編 號：

摘要

我們是一群喜愛游泳運動的朋友，但是總是有的人游得比較快、有的人游得比較慢，老師說：「從你們喜愛的事物進行科學探究，你們會發現更多有趣的事情。」我們思考：如果能夠解開影響游泳速度的祕密，這樣人人都可以是水中蛟龍了！我們透過風洞的實驗，觀察到流體流經物體後，會在物體的尾端形成特定的流場，並且我們歸納出流場型態和雷諾數的相關性，其中對稱交替的渦流便是「卡門渦街」現象。接著，又進行了人體仿真模型的風洞實驗，發現模型後段上揚角度越大的時候，尾端的渦街脫落頻率越快，但是當上揚角度介在30~60度之間，渦街移動速度皆幾乎相等，代表不同的後段上揚角度對流體所施加的力量皆相等，因此我們推論游泳時蝶腳擺動振幅達到30度，就可以利用渦街的動能作有效的推進。隨後進行人體水下實驗，發現蝶腳踢水時腳部後方會出現特定的渦流型態，為「逆卡門渦街」現象，當我們改變蝶腳踢水頻率和擺動振幅時，腳部後方的渦街移動速度皆變化不大，這個水下實驗的結論和人體仿真模型的實驗結論相同。我們再次進行人體水下實驗，控制蝶腳擺動振幅在30度左右，在此蝶腳擺動振幅的情況下，確實達到游泳速度進步的效果。

壹、研究動機

上游泳課的時候，有個問號會跑出來跟我們說Hello，「為什麼體能條件跟我差不多的同學會游得比我快？」於是我們幾個熱愛游泳運動的朋友們，腦力激盪下初步推論：五年級上學期我們學了「力與運動」，游泳過程應該是一連串“作用力與反作用力的”過程。接著我們看了「Discovery鯊魚週30週年特輯：菲爾普斯與鯊魚」，影片中探討人類游泳速度是否可能贏過鯊魚，製作團隊為菲爾普斯穿上特製的鯊魚裝與尾鰭，穿上特製鯊魚裝的目的在減少身體的阻力，穿上特製尾鰭的目的在加強推進力，這樣的設計竟然讓人類游泳速度可以接近鯊魚的速度。後來閱讀文獻時又發現：鮪魚、鯖魚、旗魚等是海中生物移動速度最快的，他們利用尾鰭的擺動，改變身體附近的流場，造成適當的渦流提升推進力量，在快速運動中非常效率。流體力學家也發現，任何在流場裡的物體，無論是一根長線，還是一隻游行的旗魚，都會造成一連串尾隨的旋轉渦流，渦流有特定的排列型態，是著名的「卡門渦街 (Karman Vortex Street)」。然而，人類是否可能像魚類一樣利用「卡門渦街」的動能，在游泳的過程中對人體造成推進力，這些神祕的現象，是我們想要探究的問題。

貳、研究目的

- 一、自組風洞設備以觀測流場
 - (一) 設計可控制風速之電路迴路。
 - (二) 優化風扇出風速度均勻度。
 - (三) 設計流場可視化裝置。
- 二、探討卡門渦街現象與歸納形成條件
 - (一) 觀測圓柱體於風洞設備中的尾端渦流型態。
 - (二) 歸納圓柱體實驗其尾端卡門渦街形成條件。

- (三) 觀察渦街分離角度並歸納數據。
- (四) 探討卡門渦街脫落頻率、移動距離、移動速度。

三、探討人類游泳過程中逆卡門渦街現象

- (一) 嘗試簡化問題：只探討蝶腳踢水效應。
- (二) 進行人體仿真模型實驗，觀測尾端渦流型態。
- (三) 歸納人體仿真模型實驗其尾端卡門渦街形成條件。
- (四) 探討人體仿真模型中卡門渦街脫落頻率、移動距離、移動速度。
- (五) 進行人體水下實驗，觀測腳部尾端渦流型態。
- (六) 探討人體水下實驗中逆卡門渦街脫落頻率、移動距離、移動速度。
- (七) 比對人體仿真模型實驗與人體水下實驗結果。





四、歸納最佳化游泳參數與實驗驗證

- (一) 尋找最佳化的蝶腳擺動振幅。
- (二) 人體水下實驗驗證與游泳速度比較。

參、研究設備及器材

一、研究設備

我們參考了其他有關於風洞設計的資料，在學習了別人的方法後，也請老師協助我們蒐集一些材料，自行組裝出風洞設備。

設備名稱：(自組)風洞設備 功能：觀察流體流經待測物體後的渦流現象		
	風洞設備包含 進風口、出風口、水霧產生器、整流網、風速調節器 等各部組件，分別於下方做說明。風洞設備之觀察區側面以及底部鋪有黑布，讓肉眼觀測以及錄影效果更清晰；骨架外殼以活動式透明塑膠布包覆，方便對水霧產生器的盛水盤加水。	
風洞各部組件說明		
		
名稱：電腦風扇 功能：送風	名稱：調光器 功能：控制風速與風量	名稱：霧化器 功能：製造水霧觀測流場



名稱：整流網
功能：將風扇送出來的風整流



名稱：LED燈
功能：打光讓水霧更明顯



名稱：固定架
功能：將待測物體固定在流場

二、研究器材



名稱：熱線式風速計
功能：量測整流後的風速



名稱：游標卡尺
功能：量測待測物體直徑



名稱：水下攝影機
功能：拍攝游泳過程水下渦流



名稱：碼表
功能：游泳速度計時

三、待測物體



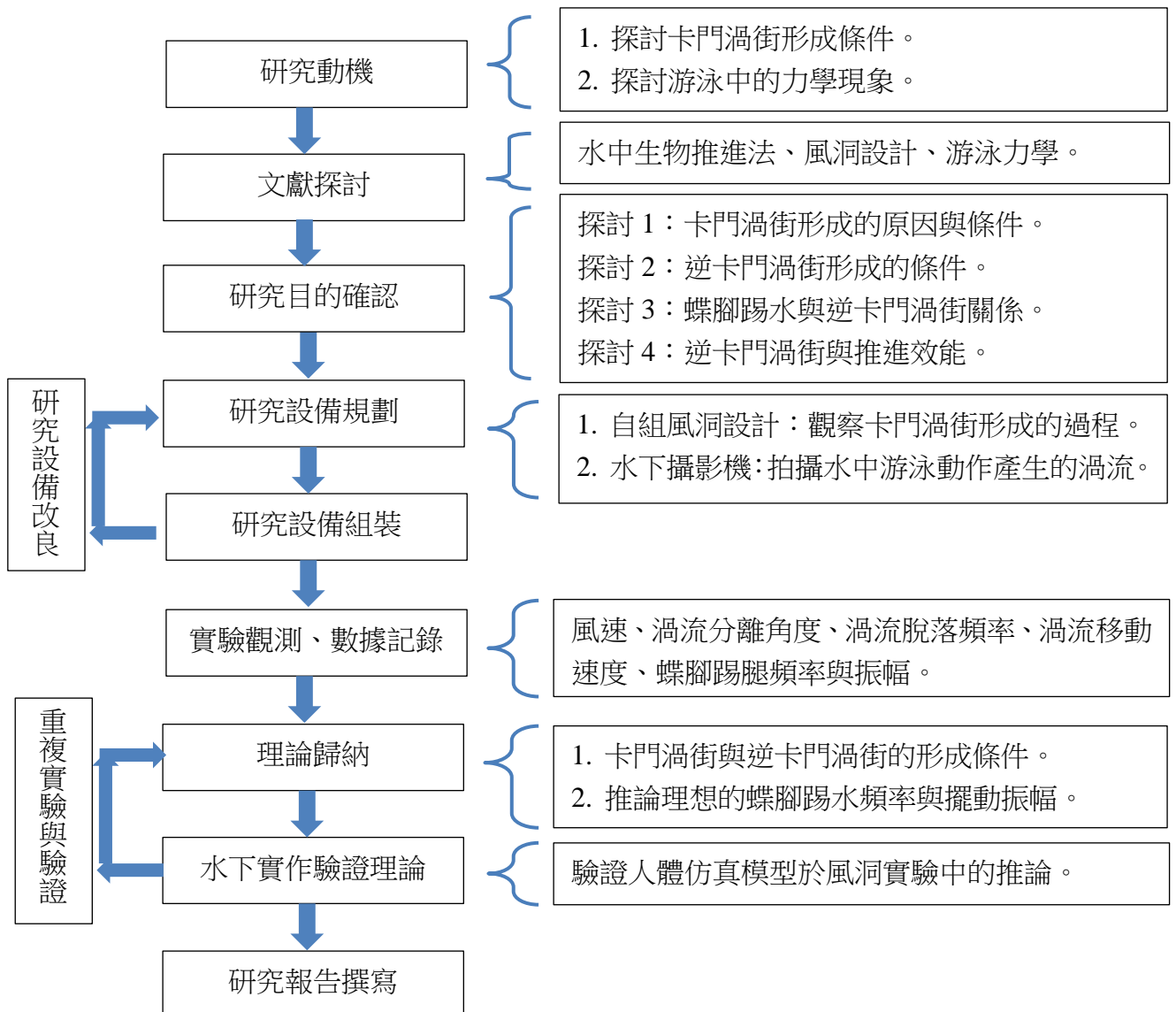
名稱：不同直徑的水管
功能：放置於風洞中觀察渦流現象



名稱：人體仿真模型
功能：模仿人體腳擺動振幅的模型，放置於風洞中觀察尾端渦流現象

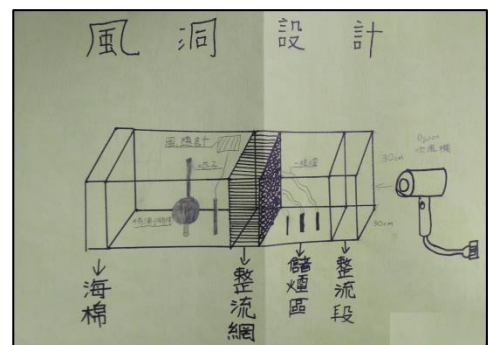
肆、研究過程或方法

一、研究流程圖



二、風洞設備功用

我們上網查閱風洞的功能與設計，繪製了我們第一代的風洞設備設計圖。並且瞭解了風洞運用在許多的領域，是空氣動力學的研究工具。風洞是一種產生人造氣流的通道，用於研究空氣流經物體所產生的氣動效應。風洞除了主要應用於汽車、飛行器、導彈設計領域，也適用於建築物、高速列車、船艦的空氣阻力、耐熱與抗壓試驗等。1903年萊特兄弟的動力飛機試飛成功，在研製飛機的過程中，他們就曾使用自製的風洞測試所設計飛機的機翼。風洞技術具有下列功能：



我們繪製的第一代風洞設備設計圖。

- (一) 空氣動力量測—風洞測試主要提供測試模型之空氣動力數據。
- (二) 流速量測—量測流場的速度分佈。
- (三) 壓力量測—量測壓力值有助於空氣動力特性的瞭解，亦可間接瞭解運動現象。
- (四) 可視化實驗技術—協助實驗者以視覺感受流場之物理運動現象。

參考資料：維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A3%8E%E6%B4%9E>

參考資料：苗君易。風洞實驗技術之應用，取自

<http://www.iaa.ncku.edu.tw/~jjmiao/paper/r8.PDF>

三、風洞組裝過程說明

以下說明我們在自組風洞設備過程中，其材料選用、以及組裝測試過程。

(一) 我們在五金百貨行購買到適合的三層格架，拆除不必要的隔板後改裝為風洞的骨架，並參考文獻資料，運用吸管製作為整流網。

(二) 實驗中需要有能讓我們看清楚流場的煙霧，煙霧的產生曾經嘗試過線香，但是線香的煙霧量太少，也嘗試過使用太白粉，但是風扇無法將太白粉吹起，後來改為使用霧化器。

(三) 使用霧化器可以成功產生煙霧，煙霧也可以順利通過整流網，但是1顆霧化器產生的煙霧量太少，後來總共購買了4顆，實驗過程中調整霧化器的數量與擺放位置，以3顆產生出來的煙霧量最理想，讓渦流的觀測非常清晰。

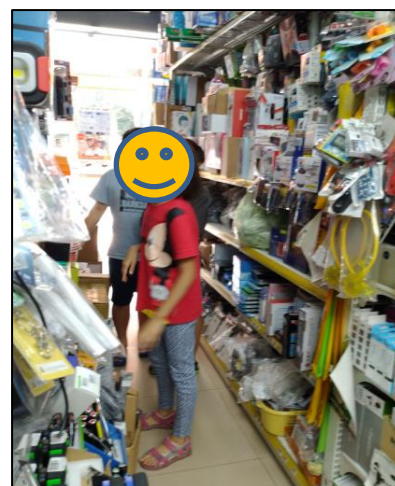
(四) 進風口的風扇原本使用家用小型電風扇，但是發現電風扇吹出來的風，在整流網後方風速仍然變化很大，後來到電子材料行尋找合適的風扇，電子材料行老闆說我們可以利用電腦風扇做組裝，但是電腦風扇的驅動電壓為12V，一般室內的電源電壓是110V。

(五) 電子材料行老闆建議我們使用降壓器，將110V降為12V，即可以驅動電腦風扇。

(六) 我們需要控制電腦風扇的轉速以便能夠調整風速，參考文獻資料，使用調光器來控制風扇轉速。

(七) 我們分別將降壓器的電線正、負極，以及風扇的正、負極，接到調光器的正、負接點，並用螺絲起子鎖緊，但是發現我們自己鎖的電線很容易脫落，因此後來請同學的爸爸幫我們將電線焊接。

(八) 參考文獻中的風扇、整流網、與煙霧產生器的擺放位置為：風扇→整流網1→煙霧產生器→整流網2，原先我們也依據這樣的擺放方式，但是發現風速在整流網後方仍然不均勻，因此我們改變整流網擺放的位置，讓兩個整流網都放在煙霧產生器的後面，各部組件的擺放位置為：風扇→煙霧產生器→整流網1→整流網2。



前往電子材料行，請教老闆關於進風風扇組裝與電源設計等問題。

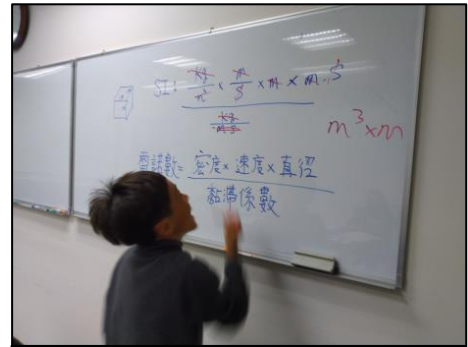


我們將降壓器、電腦風扇、與調光器連接。

		
<p>步驟1：將三層格架零件拆解，改裝為風洞骨架</p>	<p>步驟2：裁切吸管，使用吸管作為整流網</p>	<p>步驟3：製作整流網外框並將吸管黏上</p>
		
<p>步驟4：將整流網與骨架結合，使用家用風扇作為進風</p>	<p>步驟5：測量整流網後方風速，發現風速並不平均</p>	<p>步驟6：使用線香產生煙霧觀察流場，但是效果不佳</p>
		
<p>步驟7：改為使用霧化器產生煙霧以觀察流場，3顆霧化器的效果最佳</p>	<p>步驟8：請同學的爸爸將降壓器與調光器焊接，讓室內電源從110V降為12V</p>	<p>步驟9：將電腦風扇與調光器連接，確認風扇轉動</p>
		
<p>步驟10：將調光器、風扇安裝在骨架上，並測試風扇順利轉動</p>	<p>步驟11：骨架外層鋪上活動式透明塑膠布</p>	<p>步驟12：實體完成，關閉環境燈，打開待測區域LED燈</p>

四、專有名詞解釋

老師告訴我們，我們做的實驗是在空氣中，但是游泳卻是在水中，兩個地方的流體環境不一樣，科學探究經常運用無因次參數的概念做數據整理。若我們要能夠讓實驗結果更能夠歸納出結論，必需要能夠運用「無因次參數」，因此我們上網查閱「因次」、以及相關之「無因次參數」定義，同學之間並做相互討論與相互教學。



團隊同學分別上網查詢相關之無因次參數，並互相討論、教學。

(一) 雷諾數定義

雷諾數的定義是慣性力與黏滯力的比值，當雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中的擾動會較小，流體流動穩定；當雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，容易變為流動不規則的紊流。管內流體的雷諾數定義為：

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

其中

ρ = 流體密度(kg/m³)

V = 流體平均流速(m/s)

D = 直徑(m)

μ = 流體動力黏度(Pa*s)

參考資料: 維基百科

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B7%E8%AF%BA%E6%95%B0>

(二) 卡門渦街(Karman Vortex Street)

由匈牙利裔美國空氣動力學家西奧多·馮·卡門發現，在流體中安置物體，在特定條件下物體下游的兩側，會產生兩道非對稱地排列的渦流，其中一側的渦流循時針方向轉動，另一側渦流則反方向旋轉，這兩排渦流相互交錯排列，各個渦流和對面兩個渦流的中間點對齊，如街道兩邊的街燈般，命名卡門渦街。卡門渦街是一種流體動力學現象，由流過圓柱體後的不穩定流體分離引起。

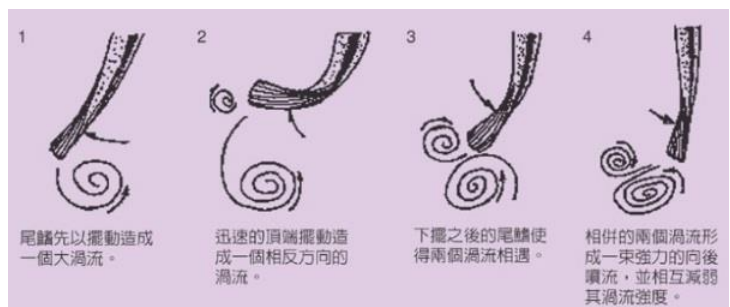


參考資料: 維基百科

https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rman_vortex_street

(三) 魚類游泳型態與逆卡門渦街 (Reverse Karman Vortex Street)

鮭魚溯溪而上回產卵地時，利用河流裡石塊後的渦流，來增加牠們向上游的速度，牠們用了許多外來的能量，幫助牠們游泳或跳躍，當產生適當的渦流來改變身形周圍的壓力分布，可以大幅降低前進的阻力，進而提高推進效率。尾鰭可以製造出兩個渦流方向相反的對等渦流，當這兩種渦流合併並相互減弱其強度時，尾鰭趁此重新吸收動能，可



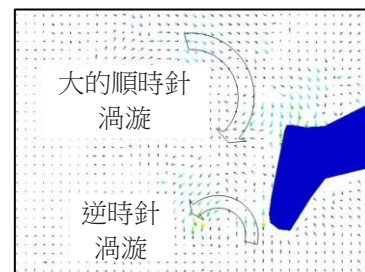
圖片來源/參考資料: 陳政宏。鯉魚如何躍龍門--水中生物的推進法。

大大增加本身的推進效率。科學家觀察到這種渦流旋轉的方向，與卡門渦街中渦流的旋轉方向剛好相反，因此尾鰭後方的跡流的型態稱為**逆卡門渦街**。

(四) 人類游泳型態說明

我們也嘗試閱讀英文文獻並理解，以右圖為例，當蝶腳向上踢水時，在身體下方將產生逆時針渦流，蝶式腳部向下踢水之後，將產生大的順時針渦流，兩個渦流平行於腳部並往後方移動，渦流將會合併並消散。

圖片來源/參考資料: Custers, G., Experiments on human swimming : passive drag experiments and visualization of water flow, 2013.



伍、研究結果

在我們進行研究的過程中，首先進行風洞設備的風速校正，校正完畢後才進行研究目的中的實驗，實驗過程中我們逐步將風洞的實驗結果連結到水下的實驗結果，兩個不同環境的實驗結果交互比對，並進行一系列的探討。

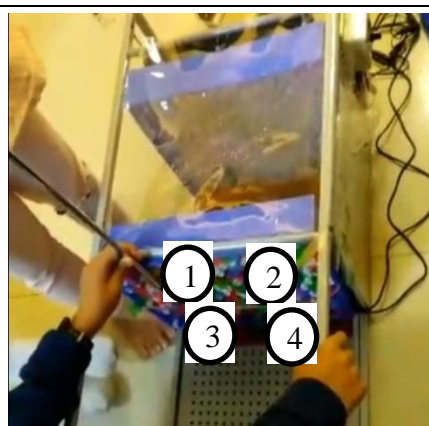
一、調光器段數與風洞風速校正

我們運用調光器改變風扇轉速以改變出風量，我們將調光器從OFF到ON之間平均分成六個段數，並用簽字筆在調光器上做記號(圖一)。整流網後方分成四個區域，實驗過程中依序轉動調光器的段數，並使用風速計量測整流網後方四格區域在不同段數的風速(圖二)，記錄於(表一)，畫出調光器段數對平均風速的折線圖(圖三)，並利用EXCEL加上趨勢線功能，找出調光器段數v.s.風速的公式，為 $Y=0.2071X+0.2167$ ，其中X代表調光器的段數，Y代表風速。

獲得調光器每個段數的平均風速後，之後的實驗只需要記錄調光器段數，就可以查對出實驗當下的風速值。我們進一步利用此公式推測段數0.5的風速為0.32 m/s，段數1.5的風速為0.53 m/s。



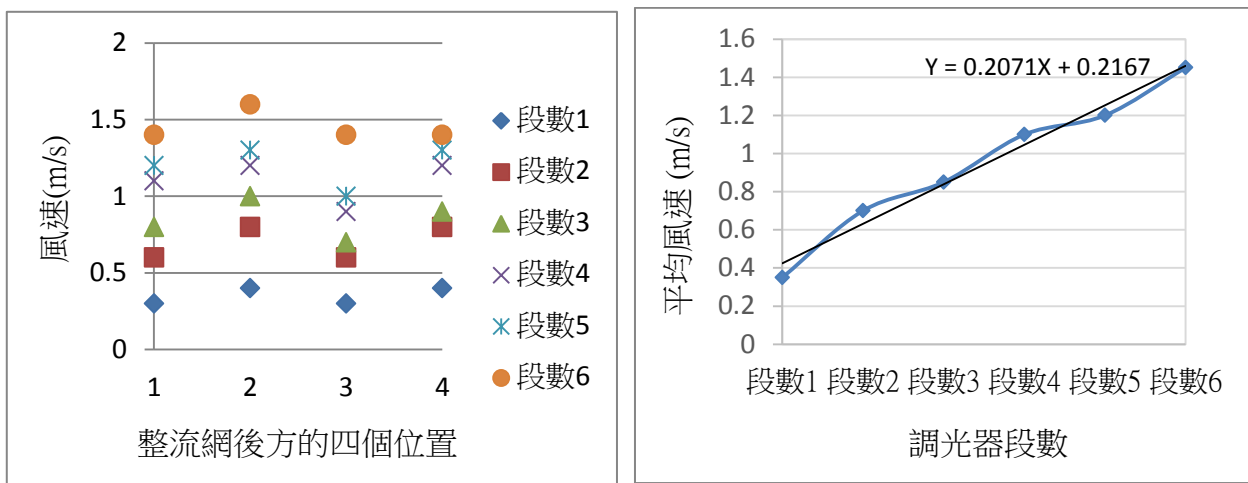
圖一 調光器段數標記



圖二 測量整流網後方四個區域的風速

表一 調光器段數對風速表

	整流網後方				平均風速 (m/s)
	第一格	第二格	第三格	第四格	
	風速 (m/s)				
段數1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.35
段數2	0.6	0.8	0.6	0.8	0.70
段數3	0.8	1.0	0.7	0.9	0.85
段數4	1.1	1.2	0.9	1.2	1.10
段數5	1.2	1.3	1.0	1.3	1.20
段數6	1.4	1.6	1.4	1.4	1.45

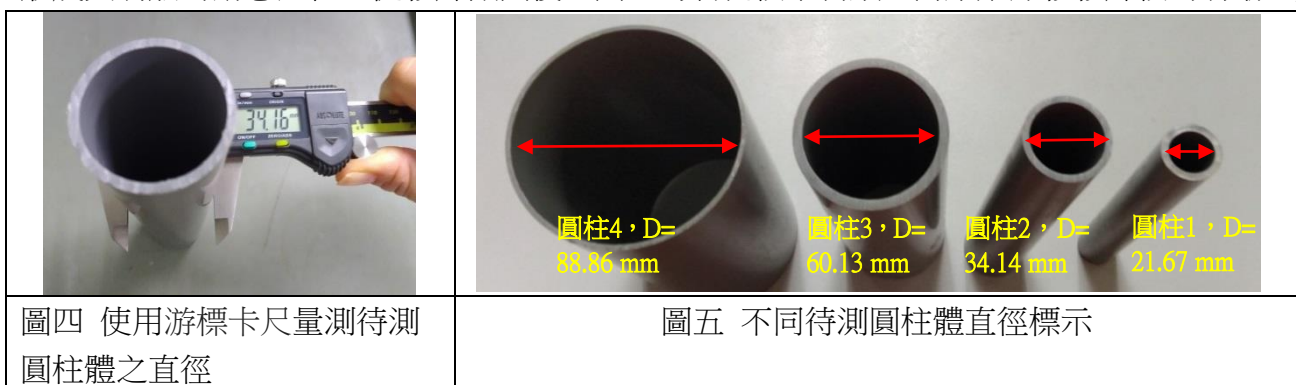


圖三 調光器段數v.s平均風速折線圖(圖上顯示趨勢線)

二、卡門渦街之錄影與參數整理

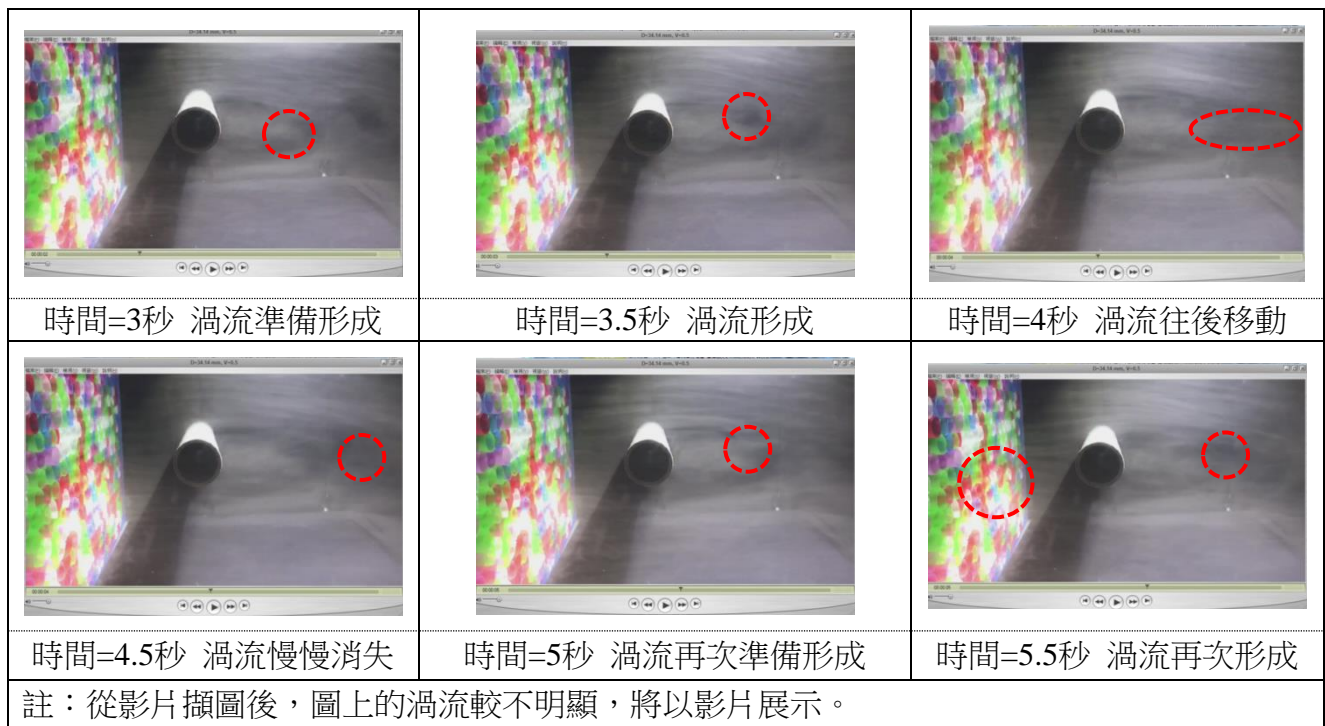
(一) 卡門渦街實測錄影

開始進行實驗時，我們首先使用游標卡尺量測四個圓柱體之直徑(圖四)，直徑從小到大分別為21.67 mm、34.14 mm、60.13 mm、88.86 mm (圖五)，然後將不同直徑的圓柱體架設於風洞中，觀察風經過圓柱體後的流場。其中我們看到直徑=34.14 mm的圓柱體產生的卡門渦街非常明顯，渦流呈現相互交錯排列的現象，其中一側的渦流循時針方向轉動，另一側渦流則反方向旋轉，因此將該次錄影結果擷圖，來說明渦流的形成與消散過程(圖六)。(註：因為渦流的形成與消散為動態過程，從影片擷圖後，圖上的渦流較不明顯，而原始錄影影片較為清晰。)



圖四 使用游標卡尺量測待測圓柱體之直徑

圖五 不同待測圓柱體直徑標示



圖六 觀察圓柱體後方的卡門渦街形成與消散

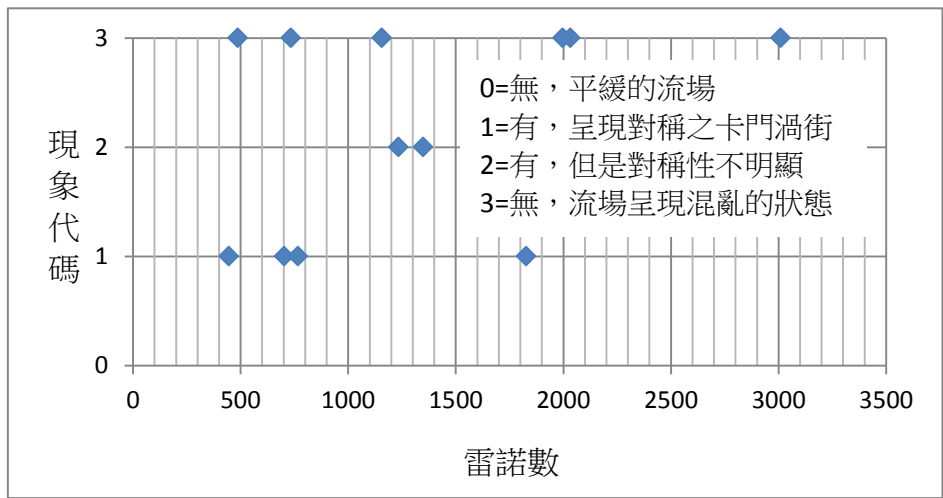
(二) 圓柱體實驗過程卡門渦街出現歸納

我們將每個待測圓柱體放置到風洞設備中，並調整調光器的段數從0.5→1→1.5，並對每個實驗錄影，事後我們再次觀察錄影影片，將流場有無出現卡門渦街以現象代碼分類：0=無，平緩的流場；1=有，呈現對稱之卡門渦街；2=有，但是對稱性不明顯；3=無，流場呈現混亂的狀態(表二)。我們同時計算每個圓柱體實驗下的雷諾數，並將雷諾數和現象代碼作圖(圖七)。

表二 圓柱體實驗中雷諾數計算與流場狀況分類

	風扇段數	密度	風速	直徑	黏滯係數	雷諾數	有無出現卡門渦流	代碼
		kg/m ³	m/s	m	Pa*s			
圓柱體1	段數0.5	1.1845	0.32	0.02167	1.84E-05	446	有，呈現對稱之卡門渦街	1
	段數1.0		0.35			487	有，呈現對稱之卡門渦流	1
	段數1.5		0.53			734	無，流場呈現混亂的狀態	3
圓柱體2	段數0.5		0.32	0.03414		702	有，呈現對稱之卡門渦街	1
	段數1.0		0.35			767	有，呈現對稱之卡門渦街	1
	段數1.5		0.53			1156	無，流場呈現混亂的狀態	3
圓柱體3	段數0.5		0.32	0.06002		1234	有，但是對稱性不明顯	2
	段數1.0		0.35			1349	有，但是對稱性不明顯	2
	段數1.5		0.53			2033	無，流場呈現混亂的狀態	3
圓柱體4	段數0.5		0.32	0.08886		1828	有，呈現對稱之卡門渦街	1
	段數1.0		0.35			1997	無，流場呈現混亂的狀態	3
	段數1.5		0.53			3009	無，流場呈現混亂的狀態	3

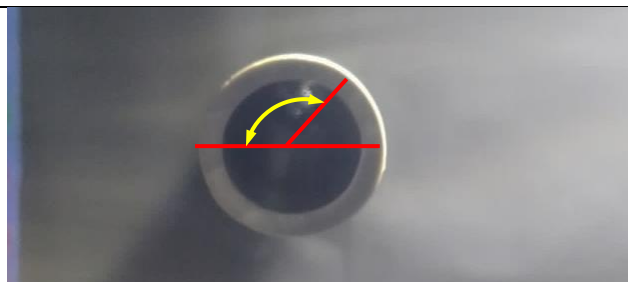
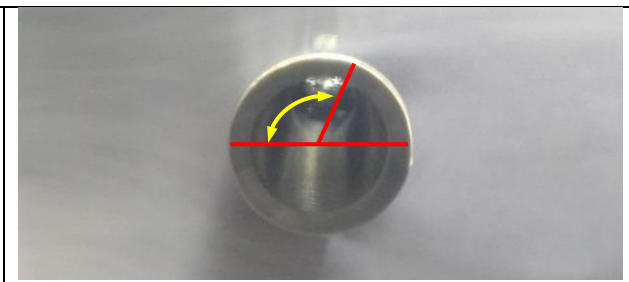
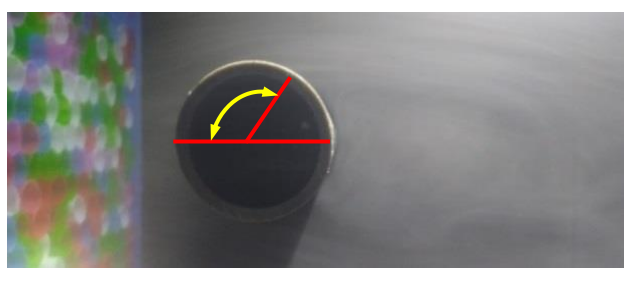
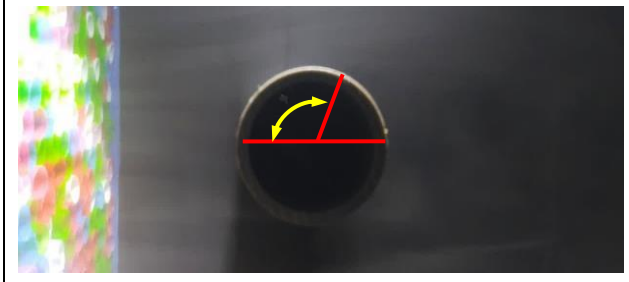
在我們的實驗系統中，可以歸納獲得從雷諾數446到1828出現對稱性的卡門渦街；而從雷諾數487到3009則流場有機會出現混亂的狀態。

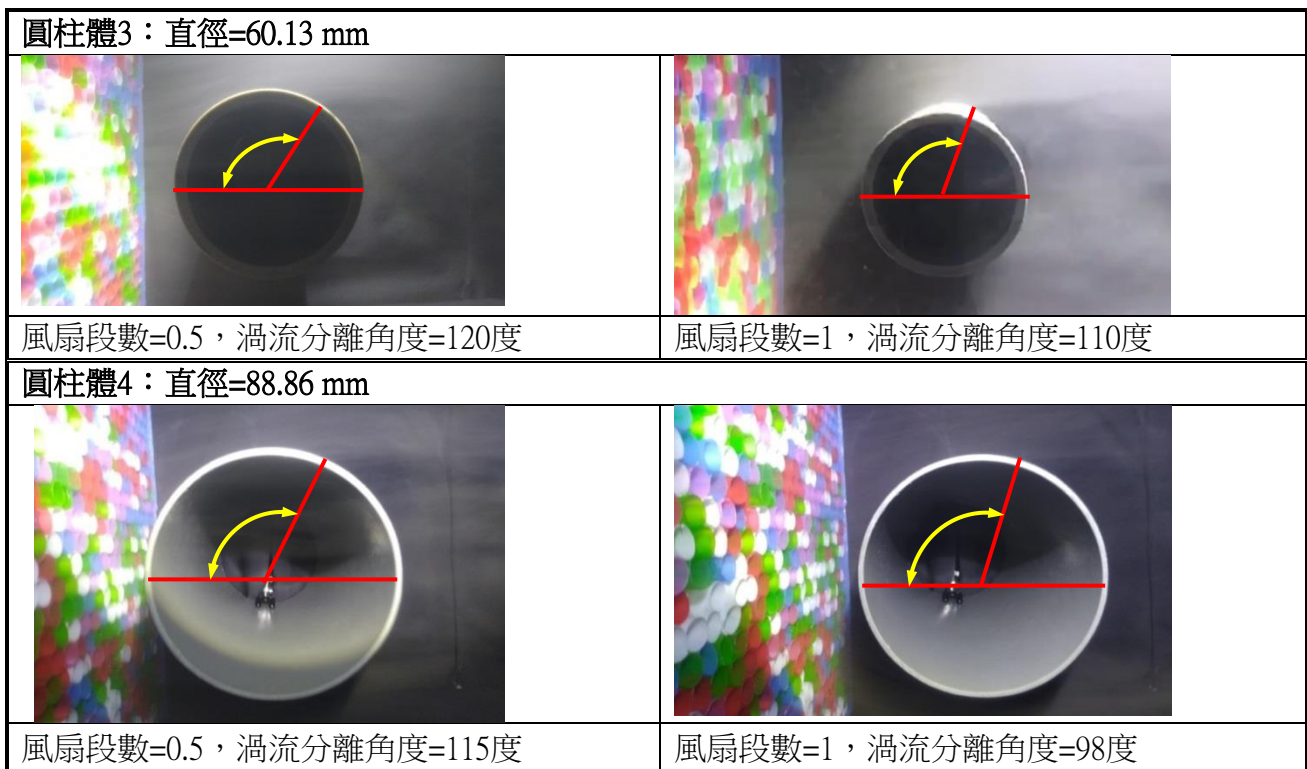


圖七 圓柱體實驗中雷諾數與卡門渦街出現之關係

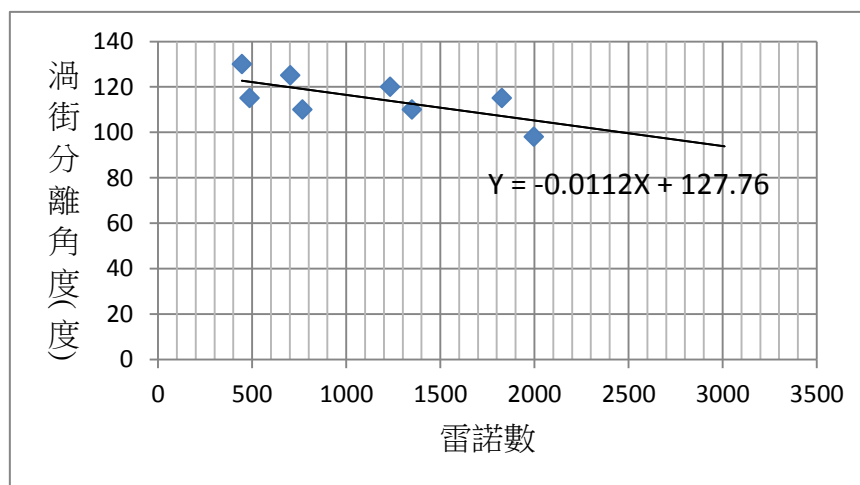
(三) 圓柱體實驗渦街分離角度觀察

利用錄影到的影片擷圖，我們同步統計渦街開始脫離圓柱體表面的角度，這個角度定義為渦街分離角度，進風方向設定為0度，出風方向設定為180度，於圖上標示出渦街分離角度數值(圖八)。將雷諾數對渦街分離角度作圖(圖九)，同時標註趨勢線以及趨勢線公式為 $Y = -0.0112X + 127.76$ ，其中X代表雷諾數，Y代表渦流分離角度。從這一部份的分析結果可以看出，雷諾數越大的時候，渦流分離角度越小，代表渦流有機會越早脫離圓柱體表面。我們找到每個圓柱體實驗中的渦街分離點，利於我們在下個章節中對渦街移動距離的擷取。

圓柱體1：直徑=21.67 mm	
	
風扇段數=0.5，渦流分離角度=130度	風扇段數=1，渦流分離角度=115度
圓柱體2：直徑=34.14 mm	
	
風扇段數=0.5，渦流分離角度=125度	風扇段數=1，渦流分離角度=110度



圖八 圓柱體實驗中渦街分離角度標示



圖九 圓柱體實驗雷諾數對渦街分離角度作圖

(四) 渦街脫落頻率、渦街移動距離、與渦街移動速度分析

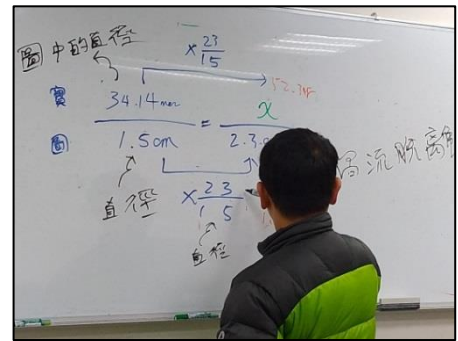
對於每一種實驗條件，我們都將錄影的時間設定為10秒鐘，實驗結束後我們觀察這些影片中產生的渦街個數，並記錄於表格中，因此可以換算出渦街的脫落頻率，因為：

$$\begin{aligned} \text{渦街脫落頻率} &= \text{每秒出現的渦街個數} \\ &= \text{10秒鐘出現的渦街個數} / \text{10秒} \end{aligned}$$

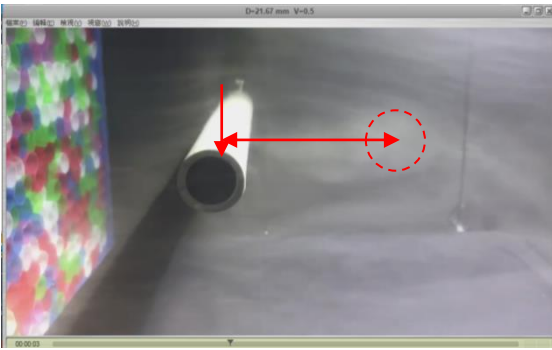

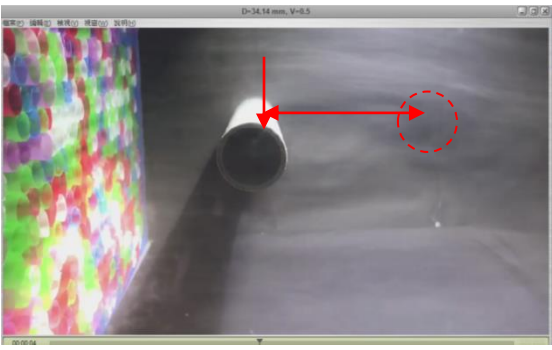
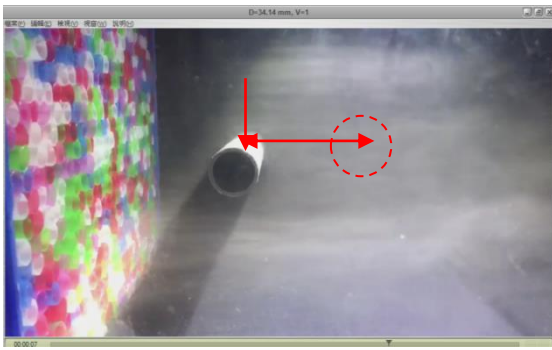
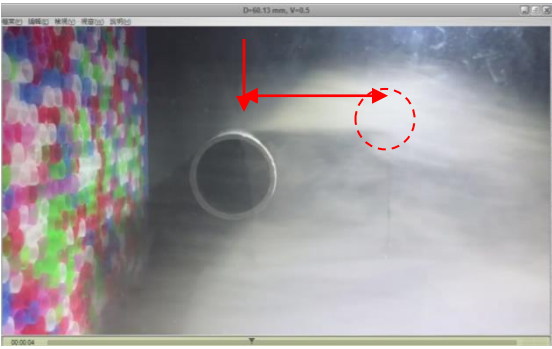
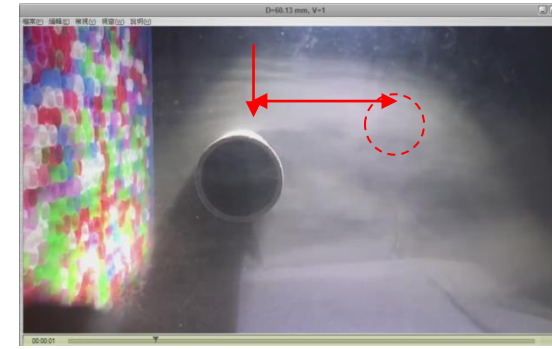
而後我們從影片中擷圖，圈出渦街所在位置，其中因為每個圓柱的直徑都已經知道，可以運用比例尺的概念，計算出渦街和分離點間的距離(圖十)。之後再運用：


$$\begin{aligned} \text{移動速度} &= \text{移動距離} / \text{時間} \\ &= \text{移動距離} * \text{頻率} \end{aligned}$$

的觀念，可以計算獲得渦街移動速度(表三)，並將雷諾數對渦街移動速度作圖(圖十一)，可以發現渦街移動速度和雷諾數相關，雷諾數越大的時候，渦街移動速度越快。



我們運用比例尺的概念，計算出渦街移動距離。

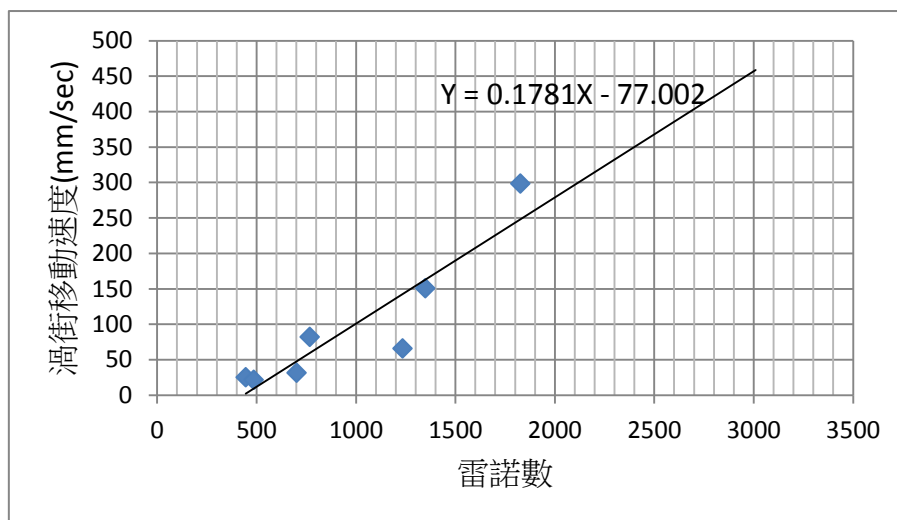
圓柱體1，直徑=21.67 mm	
	
風扇段數=0.5，渦街移動距離=50.0 mm	風扇段數=1，渦街移動距離=35.6 mm
圓柱體2，直徑=34.14 mm	
	
風扇段數=0.5，渦街移動距離=52.4 mm	風扇段數=1，渦街移動距離=81.9 mm
圓柱體3，直徑=60.13 mm	
	
風扇段數=0.5，渦街移動距離=94.0 mm	風扇段數=1，渦流移動距離=94.0 mm

圓柱體4，直徑=88.86 mm	
	渦流呈現混亂狀態，無法判斷移動距離。
風扇段數=0.5，渦街移動距離=198.9 mm	風扇段數=1

圖十 運用比例尺概念計算圓柱體實驗中渦街移動距離

表三 圓柱體實驗渦街脫落頻率、渦街移動速度計算

	風扇段數	雷諾數	10秒鐘出現 渦街個數 (從影片得知)	渦街脫離 頻率 (計算獲得)	移動距離 (從影片得知)	移動速度 (計算獲得)
				1/sec	mm	mm/sec
圓柱體1	段數0.5	445	5	0.5	50.00	25.00
	段數1.0	487	6	0.6	35.60	21.36
圓柱體2	段數0.5	702	6	0.6	52.35	31.41
	段數1.0	767	12	1.2	68.28	81.94
圓柱體3	段數0.5	1234	7	0.7	94.00	65.80
	段數1.0	1349	16	1.6	94.00	150.40
圓柱體4	段數0.5	1828	15	1.5	198.87	298.31
	段數1.0	1997	--	--	--	--



圖十一 圓柱體實驗中雷諾數對渦街移動速度作圖

三、人體仿真模型實驗

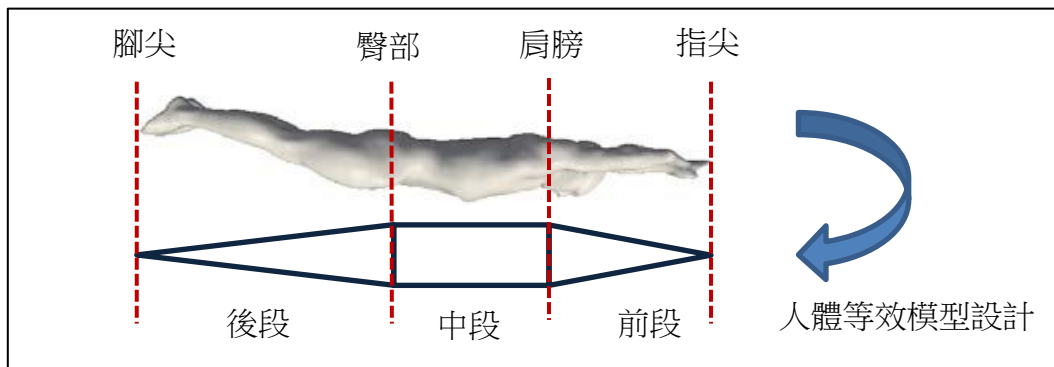
(一) 人體仿真模型設計

參考文獻4中說明游泳者的側面形狀類似於翼型，其厚度沿其身長變化先增加然後減小(圖十二)。因此我們製作人體仿真模型放進風洞進行流場實驗，為了簡化問題並且能夠歸納出結果，我們不將划手動作的影響性納入探討，而只探討蝶式游泳過程中踢水動作的影響性，當四位同學擺出蝶式游泳踢水時手背與腳掌向前後延伸的姿勢，並量測四位同學的身長比例，發現四位同學雖然身高與體格不同，但是當手背與腳掌向前後延伸的時候，指尖到肩膀、肩膀到臀部、臀部到腳尖的長度都差不多(表四)，因此我們將人體仿真模型的比例設定為前段：中段：後段=60:50:90=6:5:9，在仿真模型中我們使用「上揚角度」來代表蝶式游泳踢水時腳部的擺動振幅。因此設計出人體仿真模型實驗的控制、操縱、應變變因如下，其中操縱變因的定義表示於圖十三。

控制變因：我們發現組員的人體前中後段長度比例差異不大，約是6:5:9。故設計了6:5:9的模型，此部分即為控制變因。

操縱變因：相同比例下，厚度跟後段上揚角度會影響水流，故設計了在相同長度比例下，厚度與後段上揚角度變化的模型，厚度與上揚角度即為操縱變因。厚度的變化有2、4、6公分，上揚角度的變化範圍為0~60度，每15度變化一次。

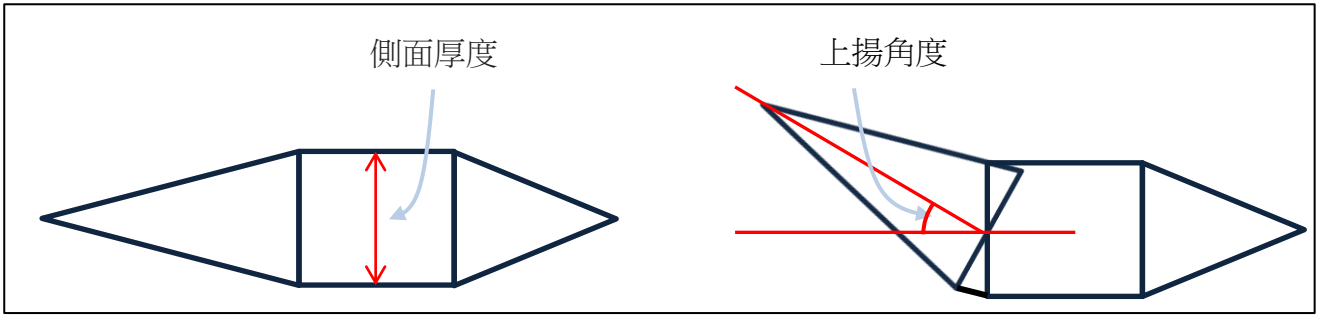
應變變因：在上述的模型下，放入水中觀察渦流脫落頻率、渦流移動距離、渦流移動速度，此即為應變變因。



圖十二 人體等效模型設計(側面類似於翼型)

表四 同學伸展後的身長統計

	同學 A	同學 B	同學 C	同學 D	
	指尖-肩膀長度 (cm)	60	60	60	61
	肩膀-臀部長度 (cm)	50	50	54	51
	臀部-腳尖長度 (cm)	90	87	87	85



圖十三 人體仿真模型的實驗操縱變因定義

(二) 人體仿真模型渦街脫落頻率、渦街移動距離、與渦街脫落速度分析

人體仿真模型的實驗錄影仍然維持10秒，我們並從影片中觀察各個模型實驗是否有出現渦街，若有出現渦街則計數有幾個並記錄於表格中，從10秒鐘出現的渦街個數換算出渦街脫落頻率；針對有出現渦街的實驗影片，老師協助我們擷圖後，我們運用比例尺的概念計算出渦街之間的距離(圖十四)，再同樣運用「速度=距離*頻率」，計算獲得渦街移動速度(表五)。

①有無渦流			
6592 角度0度 沒有渦流	6594 角度0度 沒有渦流	6596 角度0度 有1個渦流	6594 角度15度 沒有渦流
6594 角度30度 有5個渦流	6594 角度45度 有8個渦流	6594 角度60度 有9個渦流	

我們透過觀察影片，統計各個人體仿真模型實驗有沒有出現尾端渦流。

人體仿真模型--側面厚度=6 cm、上揚角度=0度	
無明顯渦流	
風扇段數=0.5	風扇段數=1，渦街移動距離= 8.2 cm
人體仿真模型--側面厚度=4 cm、上揚角度=30度	
風扇段數=0.5，渦街移動距離= 10.1 cm	風扇段數=1，渦街移動距離=5.6 cm

人體仿真模型--側面厚度=4 cm、上揚角度=45度



風扇段數=0.5，渦街移動距離=9 cm



風扇段數=1，渦街移動距離=5.4 cm

人體仿真模型--側面厚度=4 cm、上揚角度=60度



風扇段數=0.5，渦街移動距離=9 cm



風扇段數=1，渦街移動距離=5.2 cm

註：從影片擷圖後，圖上的渦街較不明顯，將以影片展示。

圖十四 人體仿真模型實驗中的渦街移動距離

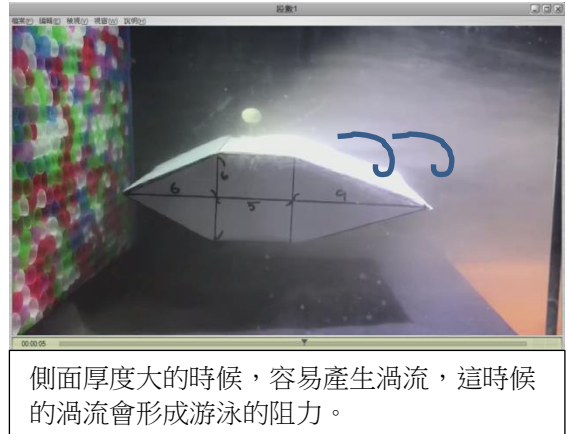
表五 人體仿真實驗渦街脫落頻率、渦街移動速度計算

人體仿真模型			風扇段數	雷諾數	10秒鐘出現渦街個數	渦街脫離頻率	移動距離	移動速度
長度 (cm)	側面厚度 (cm)	上揚角度 (度)				1/s	cm	cm/s
6:5:9	2	0	段數0.5	41	0	0	0	0
			段數1.0	45	0	0	0	0
6:5:9	4	0	段數0.5	82	0	0	0	0
			段數1.0	90	0	0	0	0
6:5:9	6	0	段數0.5	123	0	0	0	0
			段數1.0	135	8	0.8	8.2	6.56
6:5:9	4	15	段數0.5	89	0	0	0	0
			段數1.0	97	0	0	0	0
6:5:9	4	30	段數0.5	134	11	1.1	10.1	11.11
			段數1.0	146	14	1.4	5.7	7.98

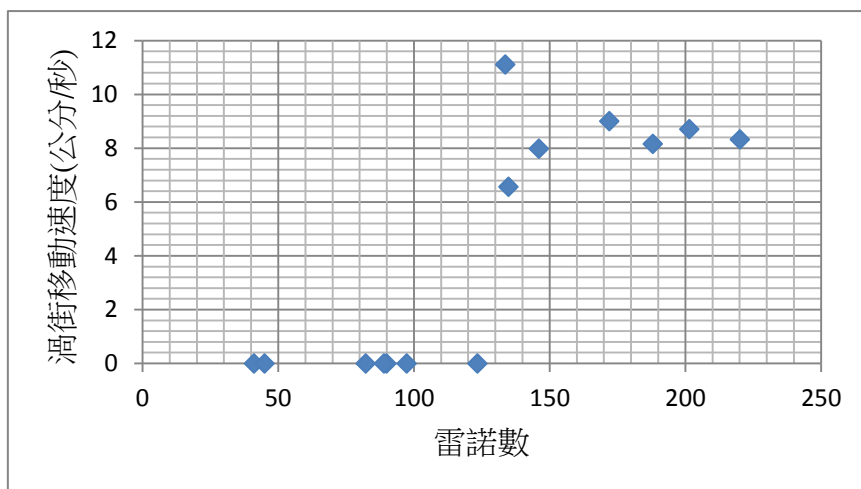
6:5:9	4	45	段數0.5	172	10	1.0	9.0	9.00
			段數1.0	188	16	1.6	5.1	8.16
6:5:9	4	60	段數0.5	201	9	0.9	9.7	8.73
			段數1.0	220	16	1.6	5.2	8.32

將人體仿真模型實驗中的雷諾數與渦街移動速度作圖(圖十五),從表五以及圖十五的結果可以看出:

- (1) 人體仿真模型側面厚度小的時候,不容易產生渦流;側面厚度大的時候,容易產生渦流,但是這時候渦流產生的位置,出現在模型後段的上方,依據游泳力學的基本概念,這時候出現的渦流沒有辦法幫助推進,反而是一種阻力。
- (2) 人體仿真模型實驗中,當上揚角度到達30度的時候,開始出現尾端渦流。
- (3) 人體仿真模型的上揚角度越大,尾端渦流脫落頻率有越快的趨勢。
- (4) 對於同一個上揚角度的模型,進行多次的實驗,渦街脫落頻率都相同,發現此尾端渦流有固定的出現頻率,是為卡門渦街現象。
- (5) **當上揚角度介於30~60度之間,持續有尾端渦街出現。**目前觀察到上揚角度會影響渦街脫落頻率,考慮不同的上揚角度具有不同的特徵長度,並計算出雷諾數,發現雷諾數對渦街移動速度沒有明顯影響,實驗中渦街的平均移動速度為8.55 cm/s。


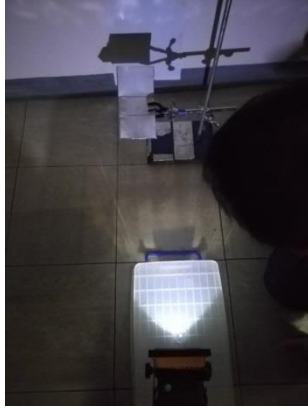


其中在對人體仿真模型實驗計算雷諾數的時候,我們需要尋找出人體仿真模型的特徵長度(類似於圓柱體的直徑),我們用實驗腳架將已知長度的直尺固定,開啟LED燈投影到牆壁的白紙上,在白紙上記錄直尺投影後的長度,然後再把人體仿真模型用實驗腳架固定在同一個地方,記錄投影後的長度,因為直尺原本的長度已知,所以可以換算出人體仿真模型的特徵長度(表六)。



圖十五 人體仿真模型實驗中雷諾數與渦街移動速度的關係

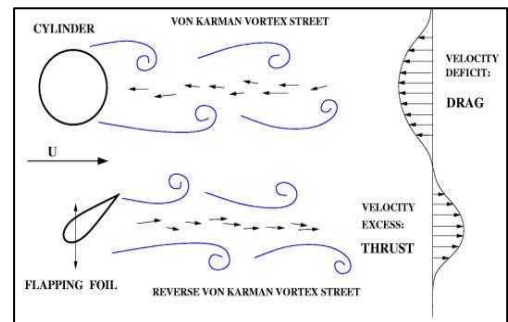
表六 人體仿真模型特徵長度實驗

		物品名稱	投影長度 (cm)	實際長度 (cm)
		直尺	21.5	16 (已知)
		人體仿真模型3 側面厚度=6 cm 上揚角度=0度	8.6	6.4
		人體仿真模型5 側面厚度=4 cm 上揚角度=30度	8.7	6.5
步驟一：將已知長度的直尺投影在牆壁上，並標註投影出的長度。	步驟二：記錄人體仿真模型投影在牆壁的長度，進一步換算出模型的特徵長度。	人體仿真模型6 側面厚度=4 cm 上揚角度=45度	11.3	8.4
		人體仿真模型7 側面厚度=4 cm 上揚角度=60度	13.2	9.8

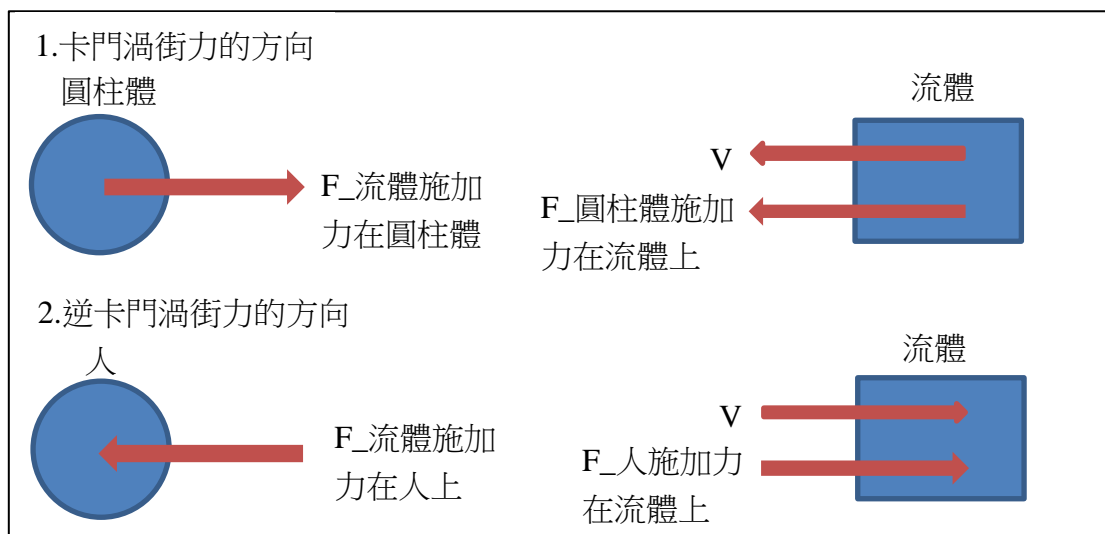
四、人體水下實驗

(一) 游泳過程中渦流的作用力與反作用力

我們在圓柱體實驗中觀察到卡門渦街，卡門渦街的形成將對物體形成阻力，以右圖為例，因為在物體中心線上渦街的速度方向向左，代表流體被施予一向左的作用力，依據作用力與反作用力原理，流體便會對鄰近的物體施加一方向向右的作用力。游泳過程中必須要形成逆卡門渦街才有可能形成推進力，也就是要讓流體的移動方向和人體的移動方向相反，依據作用力與反作用力原理，流體會對游泳者施加一作用力，幫助游泳者前進。我們用我們能夠理解的方式，畫出卡門渦街與逆卡門渦街力的方向(圖十六)。



圖片來源：
<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/isaR.htm>

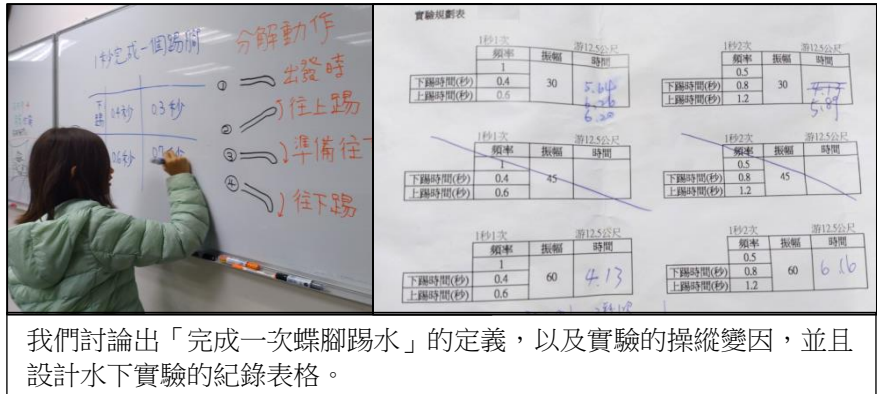


圖十六 卡門渦街與逆卡門渦街力的方向

(二) 水下實驗

1. 變因討論與設計

為了驗證人體仿真模型於風洞中的實驗結果，我們進一步進行水下實驗，首先同學彼此討論出「完成一次蝶腳踢水」的定義，我們訂定從這一次腿部到達最高點位置→向下踢水→向上踢水→下一次腿部到達最高點位置，稱為「完成一次蝶腳踢水」。



我們並討論水下實驗時可以變化的操縱變因，討論的結果我們以改變蝶腳踢水時的頻率與振幅，來觀察是否出現逆卡門渦街現象，同時記錄我們游泳的秒數，我們設計實驗表格，請老師協助我們於岸上記錄游泳秒數，請會游泳的家長協助我們水下錄影。

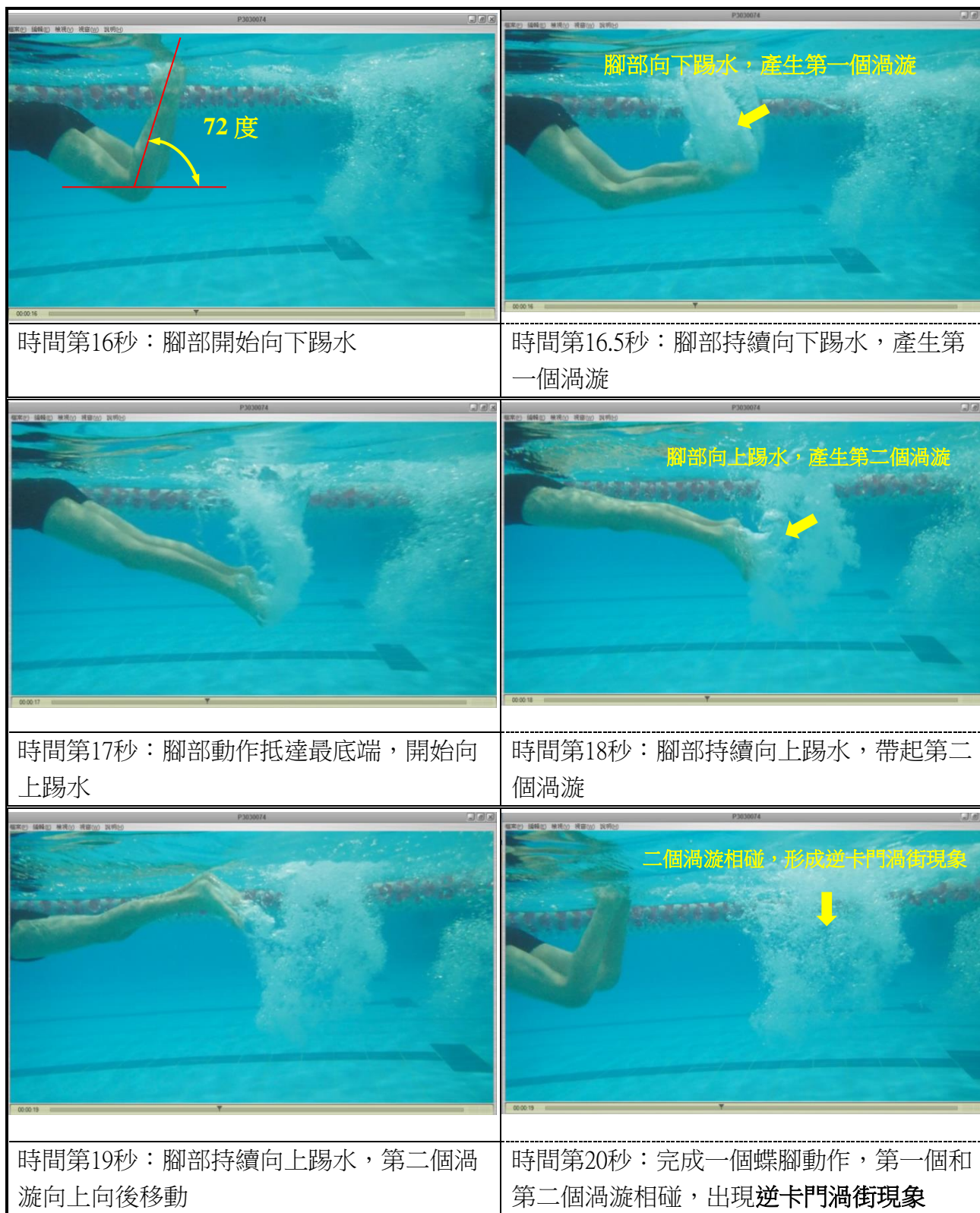
2. 逆卡門渦街的觀察

我們依據實驗設計進行水下實驗，包含設定蝶腳擺動頻率有：一秒一次、兩秒一次；蝶腳擺動振幅有：30度、60度；游泳的距離設定為5公尺。完成水下實驗後檢視錄影影片，我們從錄影結果挑選出較為可以分析的影像，為同學A和同學C的錄影結果，觀察同學C的蝶腳踢水錄影結果，可以發現當腳部向下踢水時，因為腳部的動作而產生第一個渦旋，當腳部開始向上踢水時會產生第二個渦旋，兩個渦旋會於腳部後方一定距離相碰後消散，這是我們於水下實驗中觀察到的逆卡門渦街現象(圖十七)。對於同學B和同學D的水下實驗結果，因為游泳動作的因素，無法明確分辨出逆卡門渦街現象，這部份將待後面章節做討論。

依據之前渦街脫落頻率、渦街移動距離、與渦街移動速度的分析流程，我們對同學A和同學C的錄影結果進行數據分析與整理，發現同學A和同學C雖然蝶腳踢水的頻率和振幅有變化，但是個人產生出的尾端渦街移動速度都差不多，同學A產生出的渦街移動速度落在11.64 cm/s左右，同學C產生出的渦街移動速度落在26.38 cm/s左右(表七)，我們進一步推論，蝶腳踢水的過程對水施加了一作用力，而水也將會對人體施加一反作用力形成推進力，從個人產生的渦街其移動速度都非常固定的現象，代表同學A和同學C踢水動作中頻率和振幅的改變，個人對水所施加的有效力量都差異不大。這個水下實驗的結論和人體仿真模型的實驗結論相同，我們綜合兩者的結論：

- (1) 水下實驗中發現不同的蝶腳擺動頻率與振幅，對流體施加的有效作用力皆差異不大。
- (2) 運用人體仿真模型實驗中的結論(5)：當上揚角度介於30~60度之間，持續有尾端渦街出現，而上揚角度對渦街移動速度沒有明顯影響，亦即不同的上揚角度，對流體施加的有效作用力沒有明顯差異。
- (3) 綜合前面兩點，我們進一步推論游泳過程中，當蝶腳擺動振幅達30度，就會開始出現對推進力有效的尾端渦街。
- (4) 如果我們可以将蝶腳擺動振幅控制在30度，並且做一個快速擺動的模式，形成快速且多次的有效推進，將可以提升游泳速度。

運用前述的結論(4)，我們請同學A再次進行水下實驗，在游泳距離5公尺的實驗當中，同學A的游泳速度確實從原本的5~6秒，進步為4秒。



圖十七 人體水下實驗之渦流觀察與逆卡門渦街現象確認

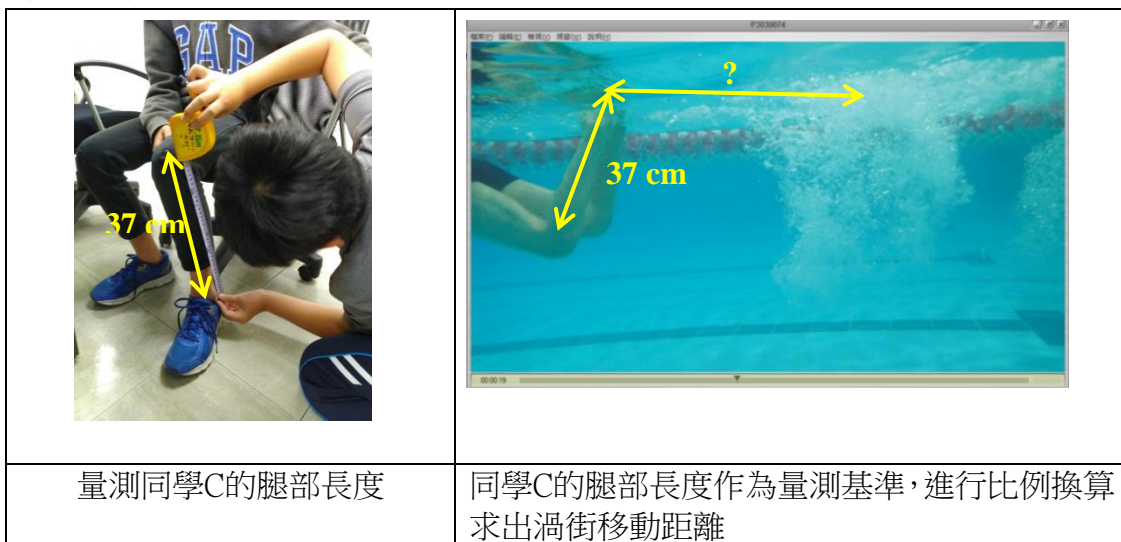
表七 人體水下實驗中的渦街移動速度分析

	原始操縱變因設計		實際踢水	渦街脫落	渦街移動	渦街移動	渦街平均
			振幅	頻率	距離	速度	移動速度
			度	1/sec	cm	cm/s	cm/s
同學 A	踢水頻率 =2 秒 1 次	踢水振幅 =60 度	70	0.143	68.96	9.85	11.64
	踢水頻率 =2 秒 1 次	踢水振幅 =30 度	60	0.167	77.90	12.98	
	踢水頻率 =1 秒 1 次	踢水振幅 =60 度	55	0.250	48.36	12.09	
	踢水頻率 =1 秒 1 次	踢水振幅 =30 度	渦街無法清楚辨識				
同學 C	踢水頻率 =2 秒 1 次	踢水振幅 =60 度	72	0.333	85.33	28.44	26.38
	踢水頻率 =2 秒 1 次	踢水振幅 =30 度	82	0.250	103.53	25.88	
	踢水頻率 =1 秒 1 次	踢水振幅 =60 度	75	0.333	75.85	25.28	
	踢水頻率 =1 秒 1 次	踢水振幅 =30 度	60	0.333	77.70	25.90	

陸、討論

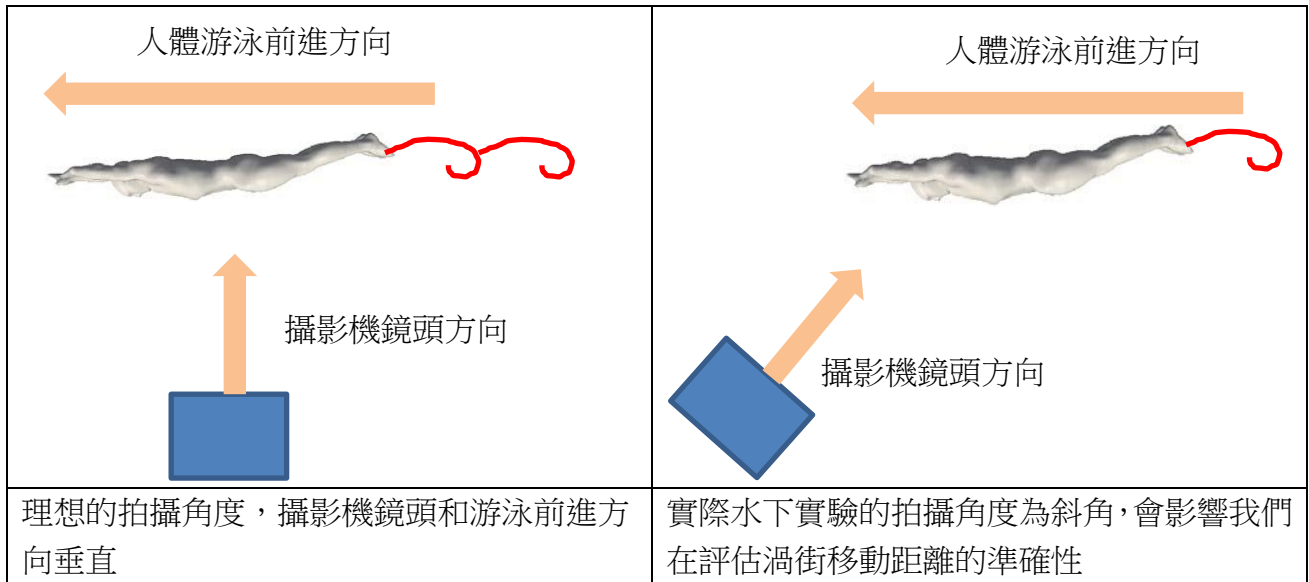
討論一：生活中的比例尺概念應用

在我們的科展研究中，運用了多次的比例尺概念，我們發現生活中的東西都可以幫助我們做量測的工作，圓柱體實驗中已知的圓柱直徑、人體仿真模型中已知的後段長度，都幫助了我們對於渦街移動距離的計算，甚至我們在進行水下實驗影片分析的時候，也量測了同學A和同學C的腿部長度，這個長度作為距離測量上的基準，幫助了我們對於水下實驗結果的分析工作(圖十八)。



圖十八 生活中的比例尺概念應用

同學D進一步提出對於錄影影像上渦街移動距離分析的想法，認為我們的水下攝影機的鏡頭與人體游泳前進的方向，並不一定每次都是呈現垂直，這樣可能對於渦街移動距離的分析造成誤差，這一部份應該要進行修正，這個修正長度計算的想法，值得我們未來將進一步探討(圖十九)。



圖十九 水下攝影渦街移動距離分析應進行修正

討論二：卡門渦街的形成條件探討

我們透過文獻資料的查閱，瞭解風洞設備的功能與基本架構，隨後團隊同學便動手實作出一個可以觀測流場的風洞系統。在圓柱體的實驗中，歸納出卡門渦街的出現與雷諾數有關，在我們的實驗系統中，從雷諾數446到1828出現對稱性的卡門渦街；而從雷諾數487到3009則流場有機會出現混亂的狀態。

進一步探討我們實驗系統的可靠度，參考資料5中說明圓柱體尾端卡門渦街出現的條件為從雷諾數40到400之間。而在我們的實驗系統中，卡門渦街出現的雷諾數範圍和參考資料5中的雷諾數範圍有落差，探究原因可能為設備精密度不足，未來我們可以從幾個方向進行改善。

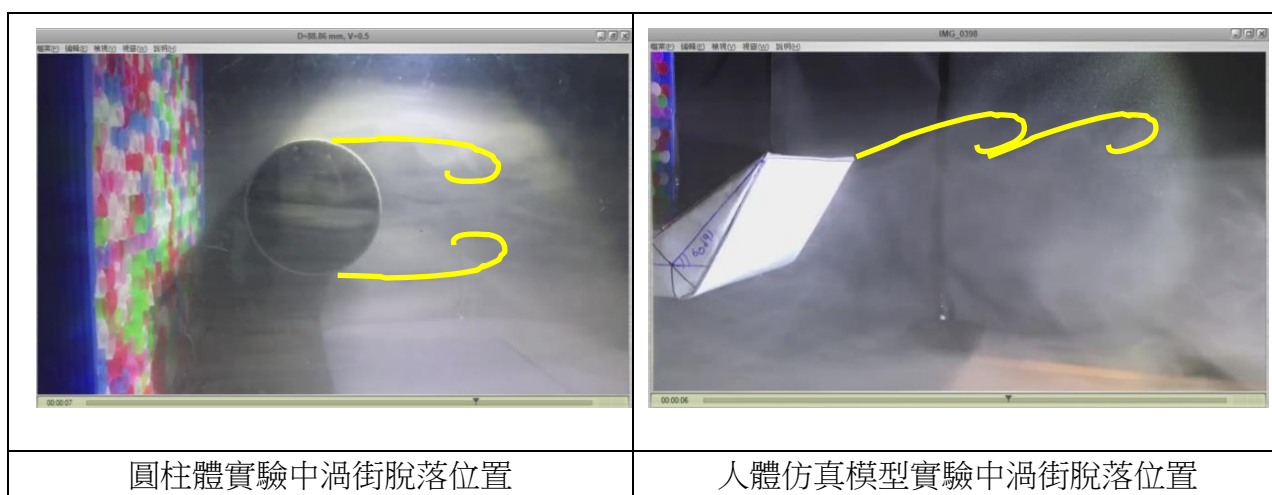
- (一) 改善電腦風扇的風速控制器：目前我們運用調光器來控制風扇轉速，從段數1轉動到段數2的時候，風扇的風速將會變化0.35 m/s，在實驗的過程中無法做到風速的精密控制，導致實驗結果的雷諾數沒有連續性，未來可以改用更精密的風扇控制系統，逐步調整風速來進行實驗。
- (二) 改善煙霧產生裝置：風洞的實驗系統處於空氣的環境中，電腦風扇帶動空氣流動，而我們為了觀測流場現象，使用了霧化器來產生小水滴，空氣和水滴的密度相差很大，利用空氣帶動水滴移動，水滴出現沉降現象，容易造成流場型態的誤判。另外一方面，我們在計算雷諾數的時候，使用的是空氣的密度，沒有考慮到在我們的風洞系統中，應該是空氣與水滴混和的情況，應該要對密度做修正。

在本項實驗中所獲得的結論範圍雖然與參考資料所說的範圍不同，但是我們仍然成功的看到流場中一系列的現象，當風速和圓柱體直徑較小的時候，出現平緩的流場、以及對稱之卡門渦街；當風速和圓柱體直徑較大的時候，出現對稱性不明顯之渦街、以及混亂的流場。

討論三：圓柱體實驗與人體仿真模型實驗的差異探討

在圓柱體實驗中，我們發現渦街移動速度和雷諾數相關，雷諾數越大的時候，渦街移動速度越快。在人體仿真模型實驗中，我們發現當上揚角度介於30~60度之間，持續有尾端渦街出現，將不同的上揚角度模型實驗結果計算出雷諾數，發現雷諾數對渦街移動速度沒有明顯影響。

圓柱體實驗的結論和人體仿真模型的實驗結果非常不同，我們進一步討論應該是圓柱體和人體仿真模型不同的立體幾何型態造成之效應，圓柱體實驗中渦街從圓柱體表面上98~130度間的位置開始脫落，而人體仿真模型實驗中渦街從尾部的尖端開始脫落，兩者的渦街脫落位置明顯不同(圖二十)。

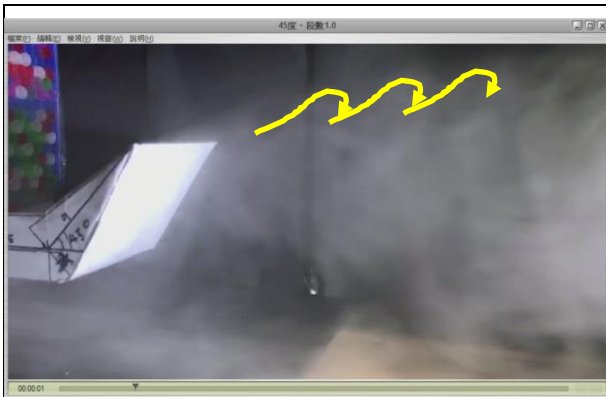


圖二十 圓柱體實驗與人體仿真模型實驗渦街脫落位置比較

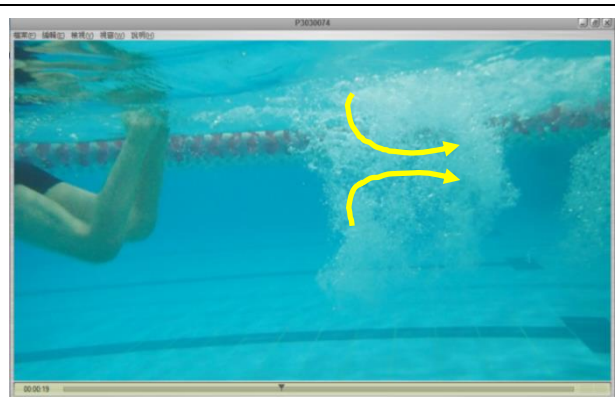
討論四：人體仿真模型實驗與水下實驗的關聯性探討

蝶腳踢水的過程中，透過腿部主動式的踢水產生推進力，腿部的動態包含擺動頻率與擺動振幅。我們透過人體仿真模型實驗，解釋游泳動態過程中力的現象，然而我們發現人體仿真模型實驗中的模型物體是靜止於流場中，但是蝶腳踢水卻是一連串往復的動態過程，兩者的行為有明顯差異性，造成的渦流旋轉方向也明顯不同(圖二十一)。我們曾經嘗試解決這個在實驗條件上的差異，想要製作一個可以做後段擺動的人體仿真模型，並利用齒輪、馬達等機械，將齒輪的圓周運動改變為直線運動，牽動人體仿真模型做擺動的動作，但是這一部份的機構設計並未能順利成功，因此在我們的人體仿真模型實驗中，沒有包含動態的操縱變因。

這也促使我們進一步思考，靜止的人體仿真模型實驗是否對游泳過程中的力學研究具有意義。回到作用力與反作用的觀點，當人體仿真模型後段的上揚角度達到30度，尾端開始出現渦流分離現象，代表上揚角度這樣的形狀效應將會對流體產生一作用力，促使渦流離開尾部尖端並出現卡門渦街，這樣的形狀效應，在游泳過程中也是存在的，因此當我們只探討蝶腳擺動振幅側面形狀效應時，不納入複雜的動態變因，則人體仿真模型的實驗具有參考意義。



人體仿真模型實驗中卡門渦街移動方向



人體水下實驗中逆卡門渦街移動方向

圖二十一 卡門渦街與逆卡門渦街移動方向比較

討論五：人體仿真模型實驗與水下實驗的交互驗證

在我們的實驗系統與流程中，人體仿真模型實驗和水下實驗的結論獲得交互驗證，人體仿真模型實驗中說明當上揚角度介於30~60度之間，持續有尾端渦街出現，而雷諾數不會顯著影響尾端渦街移動速度，因此推論游泳過程中蝶腳擺動振幅達30度即可以做有效推進，當我們再次進行水下實驗，獲得這個結論的驗證，同學A的游泳速度提升。

我們發現利用在空氣中的實驗結果，可以連結到水中的現象，空氣中的風洞實驗發現渦街的移動速度為8.55 cm/s左右，同學A造成的水下渦街移動速度為11.64 cm/s左右，同學C造成的水下渦街移動速度為26.38 cm/s左右，水中的渦街移動速度和空氣中的渦街移動速度有比例關係，同學A造成的水下渦街速度為空氣中的渦街速度的1.36倍，同學C造成的水下渦街速度為空氣中的渦街速度的3.09倍(圖二十二)，若能夠找出這部分的影響因子與相關性，則未來可以進一步利用空氣中的風洞實驗有效的進行水下游泳過程的研究，未來我們想要進一步探討游泳過程中手部動作、以及手部和腳部交互動作後的效應。

因此我們進一步探討，這一部份的差異可能來自於同學A和同學C不同的阻力面積，因此量測同學A和同學C的肩寬和身體側面厚度：

同學A肩寬=40 公分

同學A側面厚度=22 公分

$$\begin{aligned} &\longrightarrow \text{阻力面積} = 40 * 22 \text{ cm}^2 \\ &= 880 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

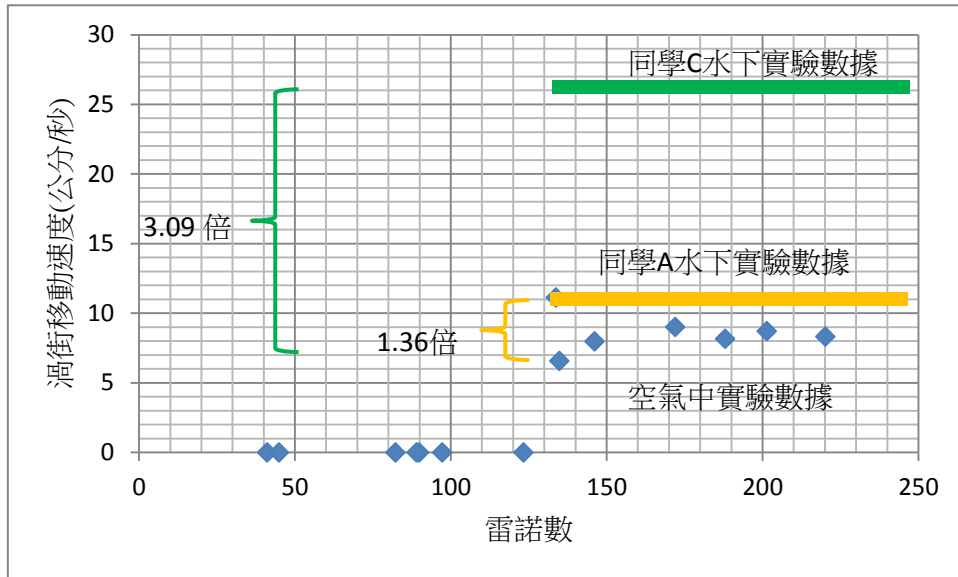
同學C肩寬=33 公分

同學C側面厚度=19 公分

$$\begin{aligned} &\longrightarrow \text{阻力面積} = 33 * 19 \text{ cm}^2 \\ &= 627 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$



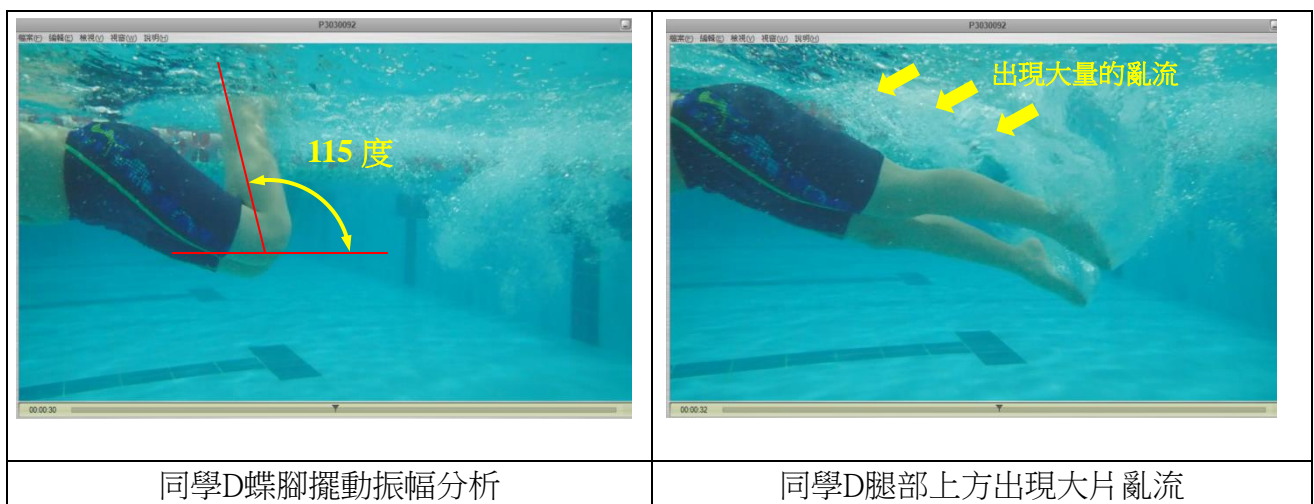
若以阻力面積的觀點，當阻力面積越小則移動速度越快，所以同學C有機會讓尾端渦街移動速度比同學A快1.4倍 (880/627=1.4倍)，但是實際水下實驗的數據同學C的尾端渦街比同學A的快2.3倍 (26.38/11.64=2.3倍)，這一部份我們尚未找到渦街移動速度比例的關聯性，值得未來進一步研究探討。



圖二十二 水下實驗與風洞實驗結論中的比例關係

討論六：部份同學水下實驗失效原因分析

觀察水下實驗的錄影結果，同學B與同學D的踢水動作無法進行有效的分析，起因為兩位同學的蝶腳動作造成過多的混亂渦流，以同學D為例，蝶腳擺動振幅達到115度，這樣的擺動振幅在腿部上方產生大量的亂流，而這種亂流將會對游泳者造成阻力，不利於游泳的推進。同學D在水下實驗中的蝶腳擺動振幅，超出了我們對於人體仿真模型設計的上揚角度範圍。我們推論，若我們進行人體仿真模型上揚角度90~115度的實驗，應該會在模型的後段上方同樣發現混亂的渦流，因此我們開始著手製作上揚角度90度的仿真模型，而這部份的實驗將會持續完成用以觀察渦流現象，並且再次驗證人體仿真模型於風洞實驗系統中的參考價值。



圖二十三 部份同學水下實驗失效原因分析

柒、結論

- 一、本研究自行組裝風洞設備，進行流體流經物體後尾端渦流型態的觀測，設計風洞設備的風速控制電路迴路、優化出風速度均勻度、以及設計流場可視化裝置，在本系統中觀測出不同的流場形態，其中包含卡門渦街現象。
- 二、將不同直徑的圓柱體放置在風洞系統中進行實驗，歸納出雷諾數從446到1828會出現對稱性的卡門渦街；而雷諾數從487到3009則流場有機會出現混亂的狀態，本項實驗結果就出現卡門渦街的雷諾數範圍與文獻資料中的範圍略有出入，可以進一步透過實驗系統的改良提升實驗的準確性。圓柱體實驗中獲得的結論：
 - (1) 在特定的雷諾數範圍內，雷諾數越大，渦街分離角度越小。
 - (2) 在特定的雷諾數範圍內，雷諾數越大，渦街移動速度越快。
 - (3) 雷諾數持續增大，將不再出現卡門渦街現象，流場呈現出混亂狀態。
- 三、運用等比例縮小的概念，設計不同厚度與後段上揚角度的人體仿真模型進行實驗，解析蝶腳踢水在不同擺動振幅下的效應，模型後段上揚角度的變化範圍為0~60度，獲得下列結論：
 - (1) 人體仿真模型側面厚度小的時候，不容易產生渦流；側面厚度大的時候，容易產生渦流，但是這時候渦流出現在模型後段的上方，是一種阻力現象。
 - (2) 人體仿真模型實驗中，當上揚角度到達30度的時候，開始出現尾端渦流；上揚角度越大，尾端渦流脫落頻率有越快的趨勢。
 - (3) 對於同一個上揚角度的模型，進行多次的實驗，渦街脫落頻率都相同，發現此尾端渦流有固定的出現頻率，是為卡門渦街現象。
 - (4) 當上揚角度介於30~60度之間，持續有尾端渦街出現，雷諾數對渦街移動速度沒有明顯影響，實驗中渦街的移動速度平均值為8.55 cm/s。
- 四、團隊同學實際進行水下實驗，觀測蝶腳踢水後的尾端渦流現象，發現當腳部向下踢水時，產生第一個渦流，腳部向上踢水時，帶起第二個渦流，兩個渦流將會於一定距離之後相碰並消散，這是游泳過程中的逆卡門渦街現象。我們透過人體仿真實驗與水下實驗交互驗證，獲得下列結論：
 - (1) 水下實驗中發現不同的蝶腳擺動頻率與振幅，對流體施加的有效作用力皆差異不大。結合人體仿真模型實驗中的結論：上揚角度對渦街移動速度沒有明顯影響，不同的上揚角度對流體施加的有效作用力沒有明顯差異。
 - (2) 進一步推論游泳過程中，當蝶腳擺動振幅達30度，就會開始出現對推進力有效的尾端渦街。如果將蝶腳擺動振幅控制在30度，並且做一個快速擺動的模式，形成快速且多次的有效推進，將可以提升游泳速度。
 - (3) 請同學A控制蝶腳擺動振幅在30度，在游泳距離5公尺的實驗當中，同學A的游泳速度確實從原本的5~6秒，進步為4秒。

捌、參考資料

1. Discovery頻道。「鯊魚週：菲爾普斯與鯊魚」。2017年7月28日，取自：
<https://www.youtube.com/watch?v=VEMzEbrYhbo>
2. 陳政宏。鯉魚如何躍龍門－水中生物的推進法。科技大觀園。2002年12月18日，取自
<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/s9oH.htm>
3. 莊自得等人。球有情、風無意，煙消雲不散--觀察風通過物體表面的行徑路線。中華民國第49屆中小學科學展覽會參展作品專輯。2009年，取自
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/high01.htm>
4. Takagi H., Nakashima M., Sato Y., Matsuuchi K. (2016). Numerical and experimental investigations of human swimming motions. *Journal of Sports Sciences*, 34 (16) 1564 - 1580.
5. 周士傑 (2003)。圓柱下游之卡門渦街流場數值模擬[摘要]。逢甲大學土木及水利工程所碩士論文。2003年，取自「全國博碩士論文資訊網」：
<https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22091FCU05017024%22.&search>