

# 中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 物理科

030101

「卡最電」——運用卡門渦街共振進行發電的研究

學校名稱：臺中市立居仁國民中學

作者：  國一 廖子甯  國一 林湘芸	指導老師：  潘瑾卿  蔡明致
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：卡門渦街、射流(Jet flow)、電磁感應

## 摘要

1. 彈性體彈力係數在卡門渦街效應中會變化，代表受力相同下，形變量改變，利用卡門渦街共振發電有節能效果。
2. 系統渦街頻率為0.76Hz，測量阻流體後方1倍球體直徑處頻率為0.86Hz，2倍直徑得 $f=0.79\text{Hz}$ ，與理論計算相近，證明有卡門渦街效應存在。最佳的組合直徑4cm、弦切角度30度半球形阻流體，有風時 $k$ (彈性係數)=6.61N/m，無風時 $k=11.46\text{N/m}$ 。在6.5cm的彈簧座上，放置射流完全發展階段，距離出風口縱向距離15cm橫向距離3cm(15cm/s)處，共振晃動軌跡為橢圓形。
4. 阻流體模組在卡門渦街共振下頻率變小，共振效應有穩定阻流體運動穩定性。
3. 卡門渦街發電裝置的發電功率為較課內實驗的發電功率穩定，其體積與質量都較輕巧化，有發展潛力。

# 壹、前言

我在查詢資料時，看到了一個影片，有關卡門渦街這個現象把一座橋吹斷。深入了解後我查詢到了一些有關於卡門渦街的科展資料，讓我對於卡門渦街抱持著強烈的興趣，其實卡門渦街在生活中很常見，只是我們不知道而已。又看到無葉風扇也有利用此原理，如果卡門渦街能夠發電，那就不會有風力發電機葉片斷裂的現象，使我研究使卡門渦街發電的可行性。








圖1-1-1卡門渦街把一座橋吹斷      圖1-1-2無葉風扇

(圖1-1-1Youtube:微風吹倒大橋背後的原理卡們渦街和共振)  
 (圖1-1-2余宗翰, 2016, 沒有扇葉的風力發電機是綠能救星！)

## 一 研究目的

- (一)、噴流距離對風速的影響。
- (二)、阻流體與出風口的橫向距離對振動(頻率及振幅)的影響。
- (三)、阻流體與出風口的縱向距離對振動(頻率及振幅)的影響。
- (四)、阻流體直徑長短對振動頻率及振幅的影響。
- (五)、阻流體運動與否，其卡門渦街頻率的偵測與探究。
- (六)、阻流體在出風口正前方的弦切角度對振動(頻率及振幅)及晃動軌跡的影響。
- (七)、卡門渦街共振效應下，阻流體與彈簧組合之振動頻率、振幅與彈力。
- (八)、無風力下，彈簧與阻流體組合體的彈力和振動頻率及振幅。
- (九)、卡門渦街共振效應對發電效果的影響。

## 貳、研究設備及器材

研究器材與規格	照片	研究器材與規格	照片	研究器材與規格	照片
保麗龍球+彈簧		鼓風機(板擦機替代)		多匝線圈	
三用電表		風速計		強力磁鐵	

## 參、研究過程或方法

## 一、重要名詞解釋

(一) 卡門渦街:流體流經阻流體時,流體從阻流體兩側剝離,形成交替的渦流。這種交替的渦流,使阻流體兩側流體的瞬間速度不同。流體速度不同,阻流體兩側受到的瞬間壓力也不同,因此使阻流體發生振動。**振動頻率與流體速度成正比,與阻流體的正面寬度成反比**。卡門渦街頻率與流體速度和阻流體(旋渦發生體)寬度有如下關係: $f=StV/d$ ( $f$ =卡門渦街頻率) $St$ =斯特拉哈爾數( $\sim 0.2$ ),  $V$ =流體速度,  $d$ =阻流體迎面寬度)(維基百科,卡門渦街,2023)

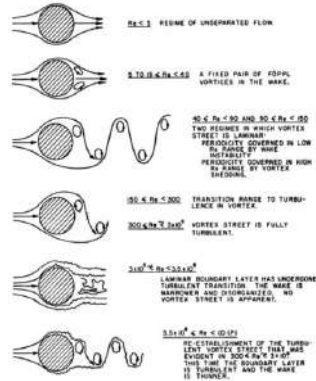


圖3-1-1卡門渦街形成

(Mohammed J.Mawat, 2018, Simulation of Cylindrical Body Structure Subjected to Flow in Different Reynolds Number Regimes) .

(二) 射流效應(jet flow):射流是指流體在受到一定壓力差的作用下,透過一個或多個出口以較高速度噴射出來的流動狀態。射流可以是氣體或液體,其速度可以高於環境中的速度。射流的發展階段通常可以分為以下階段:

1. 初始階段:射流從噴口開始噴射時,處於初始階段。在這個階段,流體在噴口附近經歷了加速過程,流速迅速增加,流動呈現非穩定性,流場特徵受到初始條件和噴口形狀的影響。
2. 混合與擴散階段:在射流初始噴射後,流體開始與環境中的空氣或其他介質混合,並擴散到周圍區域。這個階段就是噴流從初始狀態過渡到完全發展狀態的過程,在混合與擴散階段,噴流的速度逐漸減小,密度逐漸增加,流動呈現逐漸穩定的特性。
3. 穩定發展階段:當射流在一定距離內達到了穩定狀態,且流動特性不再隨距離噴口的增加而顯著變化時,進入穩定發展階段。在這個階段,噴流呈現較規律的流動特性,如速度分佈、動壓分佈等。穩定發展階段可以進一步分為完全發展區域和半發展區域,取決於噴流的特性以及所關注的特定參數。

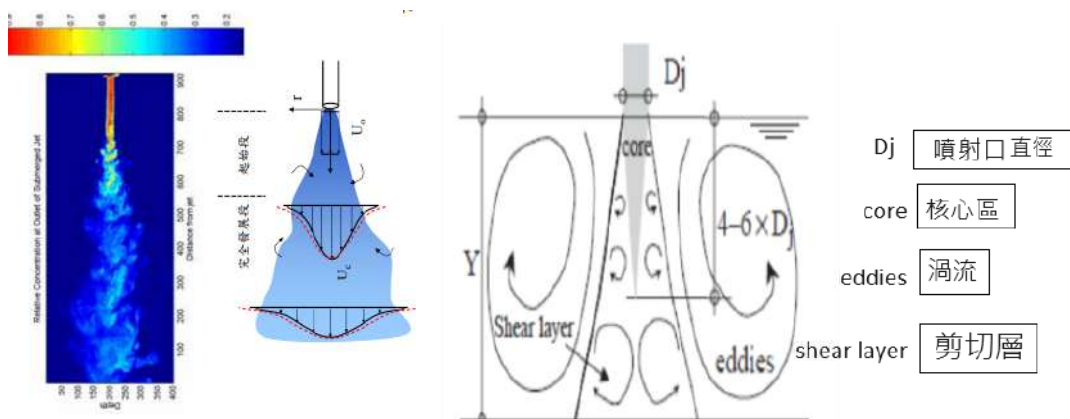


圖3-1-2 射流(jet flow)與卡門渦街環流的形成關係  
(郭炳宏, 2010, 多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立, 第一指導老師修編)

(三)電磁感應:因磁通量的改變而引起感應電流的現象,國中理化課本提到磁棒移動時,線圈內部磁力線數目會發生變化,而產生電流,這種現象稱為電磁感應,產生的電流稱為感應電流。若快速移動磁棒,使磁場變化速率增加,或使線圈匝數增加,有較多的線圈感應磁場強度變化,都會增加感應電流的大小(國中自然與生活科技課本, 2024)。

## 二、本實驗採用物理量定義

(五)弦切角度的定義:本實驗測量弦切角度用1/2的球體,圓弧形那方正對出風口正前方,及為弦切角度0度,以弦切角度10度為單位測量,逆時針向左旋轉測量。

(六)振幅的測量方式:用尺測量阻流體擺動軌跡的直徑,再減掉阻流體本身的直徑,然後除以2(單次幅度)測出平均幅度。

(七)頻率的測量方式:用手機拍測阻流體與彈簧構件的擺動情況,再以手機軟體放慢速度播放,最遠兩點的晃動軌跡稱為一次,計入次數除以時間(秒)得振動頻率(f)。

$$f \text{ (赫茲, Hz)} = \text{次/秒} \text{--- 式 3-2-1}$$

## 二、實驗架構圖

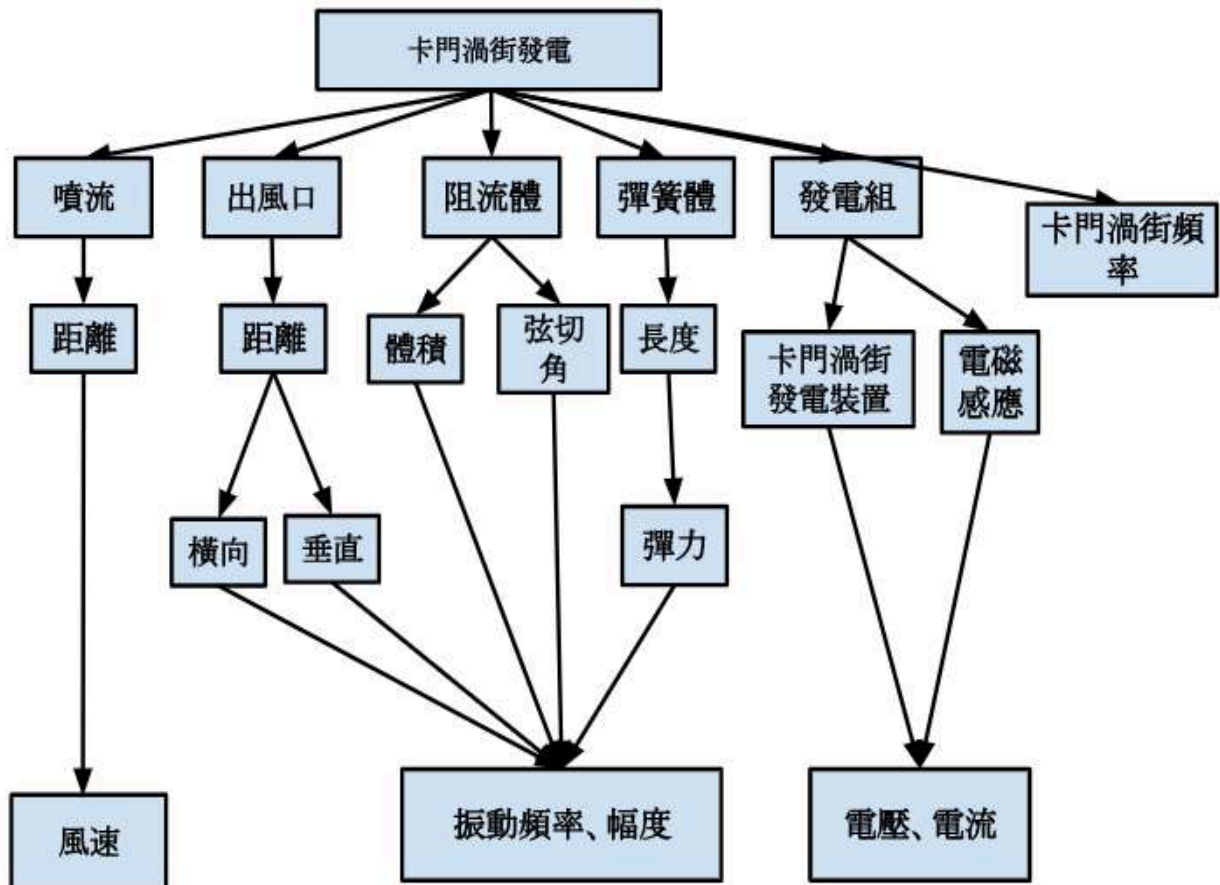


圖3-2-1 實驗研究架構圖(作者整理製作)

## 肆、研究步驟

### 一、噴流距離對風速的影響

假設:在特定的橫向和縱向距離時風速最大。

操作變因:出風口的距離(cm)。

控制變因:風量、風速計(cm/s)和高低等。

應變變因:風速大小(cm/s)。

實驗步驟:

1將皮尺固定拉直(縱向距離), 在皮尺固定點上放上直尺(橫向距離)。

2用風速計測量各縱向距離上的不同橫向距離位置上的風速數值。

3觀察在哪一縱向距離的橫向距離上, 風速最回到對照組數值, 表示到此距離已離開風的發展區。

4.繪製風場圖。

### 二、阻流體(保麗龍球)和出風口之間的橫向距離

假設:在特定的橫向距離時振動頻率及幅度最大。

操作變因:橫向距離(cm)。

控制變因:阻流體材質、重量(gw)、阻流體大小(cm<sup>3</sup>)等。

應變變因:振動頻率(1/s)及振幅(cm)。

實驗步驟:

1製作保麗龍球(直徑4cm)和彈簧(6.5公分), 置於出風口。

2調整保麗龍球與出風口的橫向距離。

3在各橫向距離用手測量阻流體碰觸手的頻率, 即振動頻率。

4用尺測量阻流體的振動幅度。

5.觀察在某公分時振動頻率最多、振動幅度最大。

### 三、阻流體與出風口距離橫向3公分下, 縱向距離對振動頻率和振動幅度影響

假設:在橫向距離振動最大公分數(3公分)下, 特定縱向距離振動頻率及幅度最大

操作變因:出風口距離橫向3公分下的縱向的距離。

控制變因:阻流體材質、重量(gw)、阻流體體積(cm<sup>3</sup>)等。

應變變因:振動頻率(1/s)及振幅。

實驗步驟:

1將保麗龍球(直徑4cm)和彈簧(6.5公分)置於距離出風口橫向3公分處。

2調整保麗龍球與出風口的縱向距離。

3在各縱向距離測量阻流體的振動頻率和振動幅度。

4.觀察在某公分時振動頻率最多、振動幅度最大。

### 四、阻流體直徑長短對振動頻率及幅度的影響

假設:阻流體(保麗龍球)適當的直徑大小, 其振動頻率及幅度最大。

操作變因:阻流體的直徑長短(cm)。

控制變因:阻流體材質、彈簧彈性係數與出風口距離(cm)等。

應變變因:振動頻率(1/s)及振幅。

實驗步驟:

1將保麗龍球和彈簧(6.5公分)置於距離出風口橫向3公分縱向距離15公分處。

2不同直徑長短的阻流體測量振動幅度及振動頻率。

3觀察不同直徑長短時振動頻率與振動幅。



## 五、阻流體運動與否，其卡門渦街頻率的偵測與探究

假設:經由實驗結果與理論計算，卡門渦街共振現象存在，所以壓電片振動圖譜應該具有週期性變化現象。

操作變因:阻流體運動與否與測量位置。

控制變因:風速、阻流體大小、測量儀器等。

應變變因:圖譜，頻率(Hz)。

實驗步驟:

1在壓電陶瓷上貼上塑膠片。

2使用程式Audacity分別在阻流體固定、阻流體運動與僅有風的三種狀況下進行測量。

3移動壓電陶瓷與出風口不同距離，進行測量。

4分析圖譜。

## 六、翼型阻流體和出風口的弦切角度對振動頻率、幅度及晃動軌跡的影響

假設:在出風口正前方處，弦切角度越大，晃動幅度越小，振動頻率越小。

操作變因:翼型的不同弦切角度

控制變因:風量、阻流體與出風口的距離(cm)等

應變變因:振動，頻率、晃動軌跡

實驗步驟:

1製作翼型阻流體(保麗龍球，直徑4cm)和彈簧(6.5公分)。

2置於出風口正前方縱向距離15公分。

3調整阻流體的弦切角度。

4觀察不同弦切角度晃動軌跡，以手機軟體放慢速度觀察記錄。

5記錄不同弦切角度的阻流體，振動頻率與振幅。

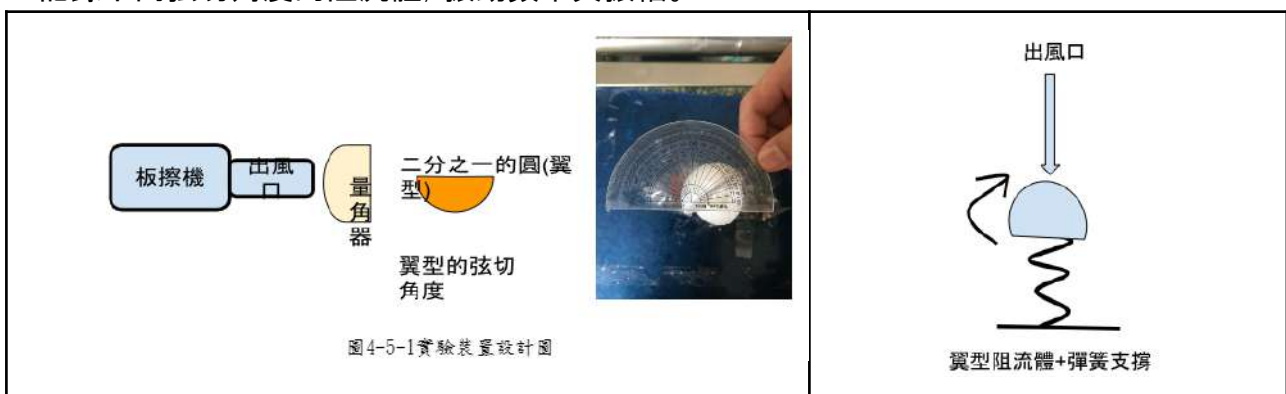


圖 4-6-1 實驗裝置，此時弦切角0度，逆時針旋轉(第一指導教師與作者親自拍攝、製作)

## 七、彈簧長度對發振動頻率，振幅與彈力的影響

7-1假設:阻流體直徑越長(體積大)，風阻力越大

操作變因:阻流體直徑長短

控制變因:阻流體材質、彈簧與出風口距離(cm)等

應變變因:風阻力大小

1將不同直徑的保麗龍球黏上繩子，一端綁上紙杯，一端懸掛再橫桿上。阻流體對齊尺刻度0的位置，用風吹。

2在紙杯中加入水(每次3公克)看加多少水時，阻流體會回到尺刻度0的位置，及此直徑阻流體的風阻力。

7-2假設:彈簧長度在合適本風場下,可以獲得最大的振動頻率及振幅。

操作變因:彈簧長度(cm)。

控制變因:阻流體表面材質、重量與出風口距離等。

應變變因:振動頻率、振幅與彈力大小。

實驗步驟:

1將長度17公分的彈簧放入阻流體(保麗龍球,直徑4cm)下面,測量振動頻率及幅度。

2用竹籤固定彈簧下方2公分,使彈簧晃動長度減少。

3其他公分皆用步驟2方式固定,觀察不同長度的振動頻率,振幅。

4由測量振動頻率和振幅的數據,用繩子將寶特瓶懸掛在彈簧下方。

5將瓶內裝入水,當彈簧縱向最大振幅(6公分)時測量水重,彈簧振幅6公分時所需拉力。



圖4-7-1彈簧彈性係數測量方法(作者親自拍攝、製作)

#### 八、彈簧與阻流體組合體在無風力下的彈力和振動頻率及振幅

假設:無風下晃動頻率與振幅均較有封場的情況下小,即本實驗阻具有卡門渦街共振效應。

操作變因:彈簧形變長度。

控制變因:阻流體大小、彈簧長度、綿線長度等。

應變變因:彈力及振幅,頻率。

實驗步驟:

1彈簧頂端用線綁著紙杯與支架水平。

2加水測量彈簧個變長度所需拉力(彈性恢復力)。

3將線剪斷,測得瞬間振動頻率及振動幅度。

4對照阻(實驗七)與實驗組(實驗六)對照

#### 九、卡門渦街共振效應與電磁感應實驗對發電效果的影響

假設:卡門渦街共振發電量比第六冊實驗2-5電磁感應的發電量為佳

操作變因:發電方式

控制變因:風量、阻流體、測量儀器等

應變變因:電壓與電流

實驗步驟:

1用線圈,在內放入磁棒。

2在弦切角度30度的阻流體上貼上磁鐵。

3使阻流體晃動,與線圈產生電磁感應,測出電流及電壓(180sec)。

4用磁棒使用固定速度,使之與線圈產生電磁感應,測出電流及電壓(180sec)。

5分析數據。



# 伍、研究結果

## 一、噴流距離對風速的影響

假設:在特定的橫向和縱向距離時, 風速最大

操作變因:風速計出風口之間的距離

控制變因:風量(m<sup>3</sup>/s)、風速計和另一方向的距離(cm)等

應變變因:風速大小(m/s)



圖5-1-1實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

數據表格及統計圖:

表5-1-1風場內各距離的平均風速

	縱向距離(cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	橫向距離(cm)
	正5平均風速(m/s)	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	5
	正4平均風速(m/s)	2.0	1.7	3.1	3.3	4.8	6.8	11.3	8.9	4
	正3平均風速(m/s)	15.5	5.4	16.2	9.8	13	8.8	11.4	10.4	3
	正2平均風速(m/s)	22.5	17.4	17.7	15.7	15.9	14	13.4	11.4	2
	正1平均風速(m/s)	20.1	19.7	17.3	16.9	16.7	14.9	12.4	12.2	1
出風口	出風口平均風速(m/s)	14.2	17.2	18.2	18.1	17.1	14.4	13.0	11.9	0
	負1平均風速(m/s)	15.8	18.1	19.2	17	16.7	15.5	13.2	12.8	-1
	負2平均風速(m/s)	21.2	16.7	19.9	16.9	13.7	14.2	13.7	9.5	-2
	負3平均風速(m/s)	19.6	18.5	15.9	15.1	9	8.4	10.4	9.6	-3
	負4平均風速(m/s)	2.2	1.8	6.6	3.9	3.4	6.2	8.6	8.4	-4
	負5平均風速(m/s)	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	-5

風場範圍建構-風速與距離

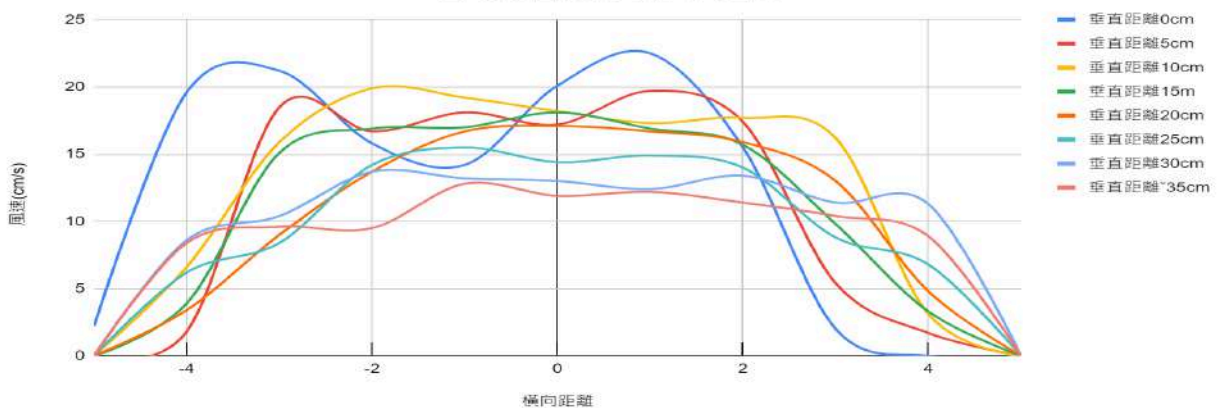
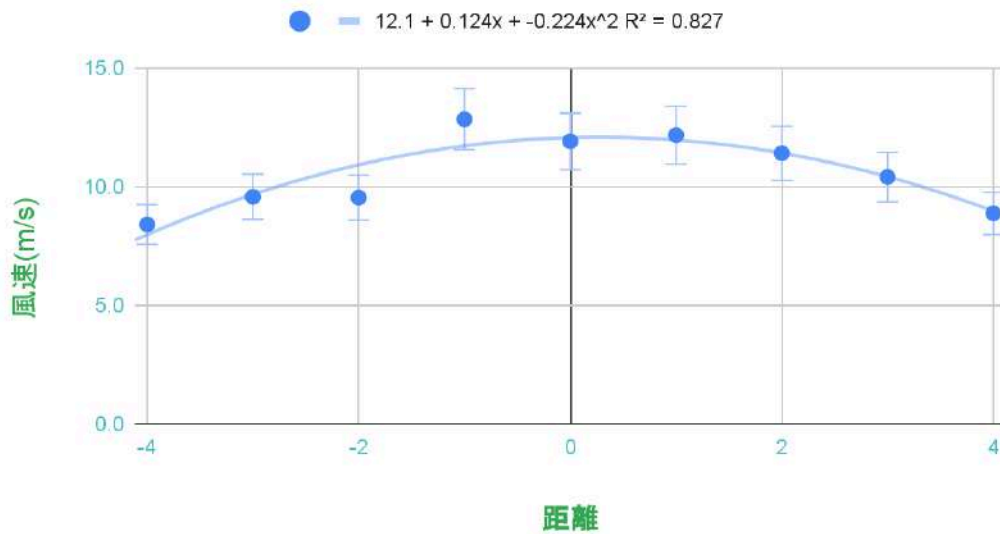


圖5-1-2 縱向距離與橫向距離對風場的影響(第一指導老師親自製作)

**圖5-1-2出風口垂直距離35公分橫向距離的風速**

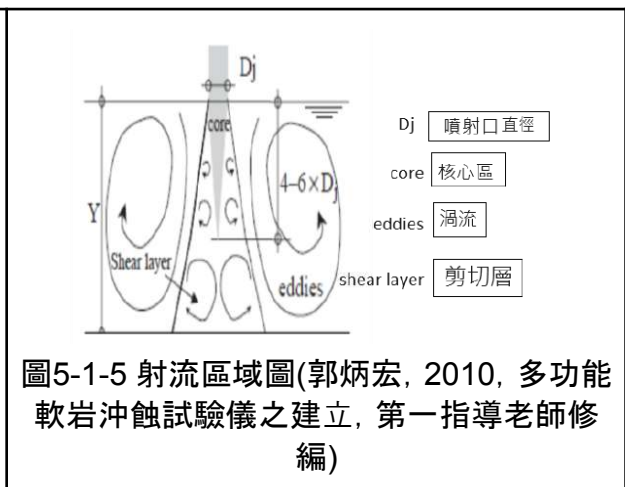
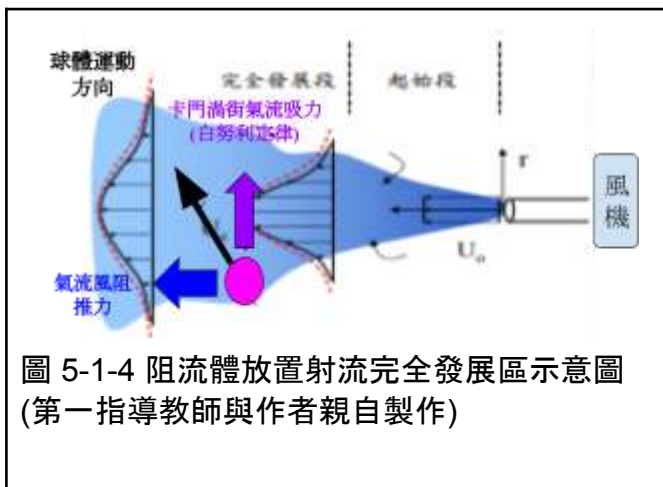


**圖 5-1-3 風場最遠範圍為縱向35cm, 橫向+4cm之內(第二作者親自製作)**

結果與討論:

1.(WHAT):由圖5-1-2發現, 橫向距離在正負4cm以上已經幾乎無風, 正負3公分以內在縱向35cm內仍有風場影響, 其風速在橫向距離正負2cm處與縱向10cm內具有放大現象(見表格中有顏色處, 風力發展區), 不論橫向距離多少, 由圖5-1-3, 縱向距離35公分時的風速接近一致。風場影響範圍是橫向正負向3公分與縱向35cm內。

2.(WHY):在風速計和出風口縱向距離超過35公分時, 與出風口距離太遠, 已經離開風力的發展區, 所以風速接近一樣。本實驗風射流的影響範圍:前10cm內有風場往兩側放大的現象, 10-20cm距離內具有與出風口縱向上較為一致的風速, 20cm-35cm的風速越小, 出風口與兩側也漸為一致, 所以令縱向距離10cm內為起始區, 10-20cm處為射流概念中的過渡區與20cm後為完全發展區(見參-1名詞解釋:射流)。本實驗出風口徑為2.8cm, 4-6倍距離為11.2cm-16.8公分(按圖5-1-5進行計算), core核心區無渦流產生, 發生渦流比較可能在16.8cm以後, 本實驗取15cm進行後續研究。



3.(HOW):在本風場的風速15cm/s, 減速為出風的75%時, 位於縱向距離15cm-20cm可能是最合適產生渦流的區域, 以下將以阻流體進入風場中測試。

## 二、阻流體(保麗龍球)和出風口之間橫向距離對振動頻率及幅度的影響

假設:在特定的橫向距離時振動頻率及幅度最大

操作變因:橫向距離

控制變因:阻流體材質、重量、縱向距離(3公分)等

應變變因:振動頻率及幅度

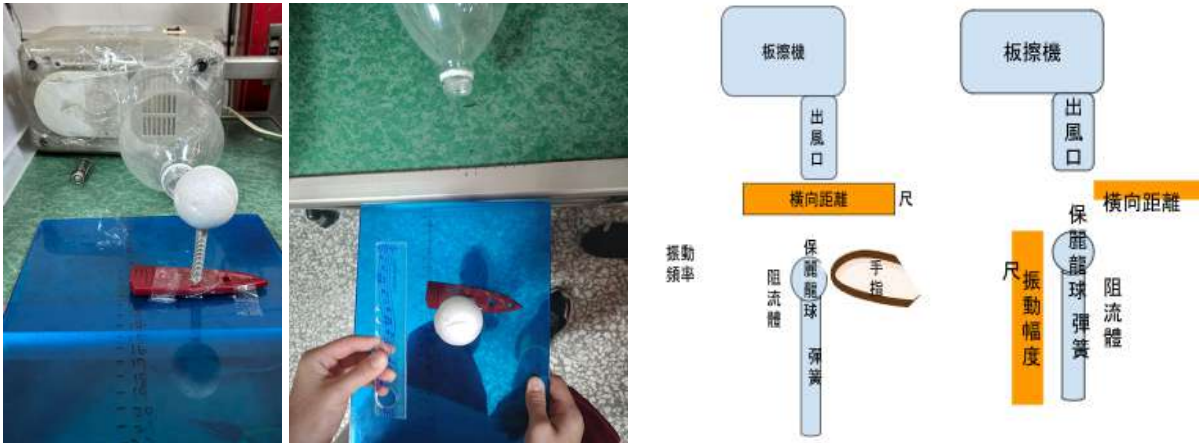


圖5-2-1實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

實驗數據表格及統計圖:

表5-2-1阻流體(保麗龍球)和出風口之間橫向距離的振動頻率(作者親自製作)

振動頻率					振幅				
橫向距離(cm)	第一次	第二次	第三次	平均	距離 (cm)	第一次	第二次	第三次	平均
-5	0	0	2	1	-5	0.2	0.1	0.3	0.2
-4	12	16	14	14	-4	0.4	0.3	0.3	0.3
-3	114	98	66	93	-3	0.5	0.7	0.8	0.7
-2	144	120	136	133	-2	4.5	4.7	4.8	4.7
-1	162	158	166	162	-1	3.8	3.7	3.6	3.7
0	138	149	154	147	0	0.5	0.6	0.5	0.5
1	110	118	110	113	1	0.7	0.9	0.8	0.8
2	102	149	132	128	2	1.5	1.3	1.2	1.3
<b>3</b>	120	149	132	<b>134</b>	3	4.3	4	4.2	<b>4.2</b>
4	92	124	98	105	4	0.3	0.2	0.4	0.3
5	152	122	122	132	5	0.2	0.3	0.2	0.2

註:紅框為後續實驗的選擇。

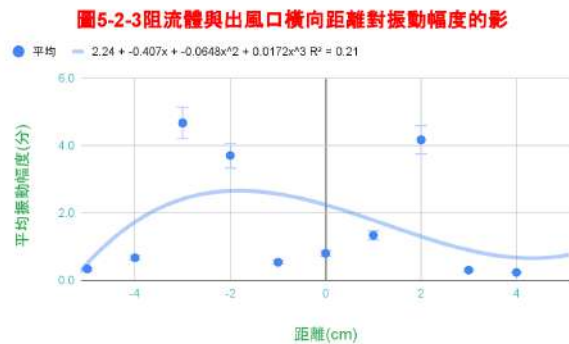
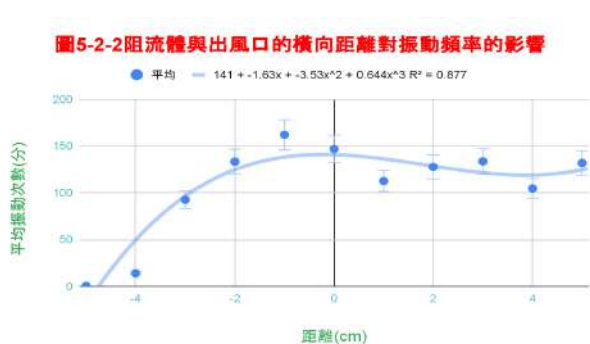


圖 5-2-2、5-2-3 阻流體在風場下的振福與頻率(作者親自製作)

### 結果與討論:

1.(WHAT):阻流體(保麗龍球)和出風口之間橫向距離對振動頻率及幅度的影響,以距離出風口橫向距離-1公分的振動頻率最多,-2公分的振動幅度最大(見表格中標示)。

2.(WHY):由理論發現,阻流體**振動頻率與流體速度成正比,與阻流體的正面寬度成反比**( $f=StV/d$ )。本實驗亦發現橫向距離正負3cm內風速快,阻流體振動頻率大的現象;推測阻流體(保麗龍球)和出風口之間橫向距離-1公分和-2公分時,阻流體(保麗龍球)兩側的渦流交替形成,且一大一小,造成壓力不均勻,所以對振動頻率及幅度的影響會最多。實驗者比較-2公分與3公分的數據,對於發電效應應首先考量振幅再配合滿意的頻率,故後續實驗採用橫向3公分(134次/分;4.2cm)處進行測量。

3.(HOW):振動頻率因為是用手測量,所以正負兩邊的數據不同,推測手有擾流,本實驗誤差,建議以後可用遠紅外線感測。

### 三、阻流體與出風口距離橫向3公分的縱向振動頻率及幅度的影響

假設:在橫向距離振幅最大(3公分)下, 特定縱向距離振動頻率及幅度最大

操作變因:出風口距離橫向3公分縱向的距離(cm)

控制變因:阻流體材質、重量、阻流體體積等

應變變因:振動頻率及振幅

實驗數據表格及統計圖:

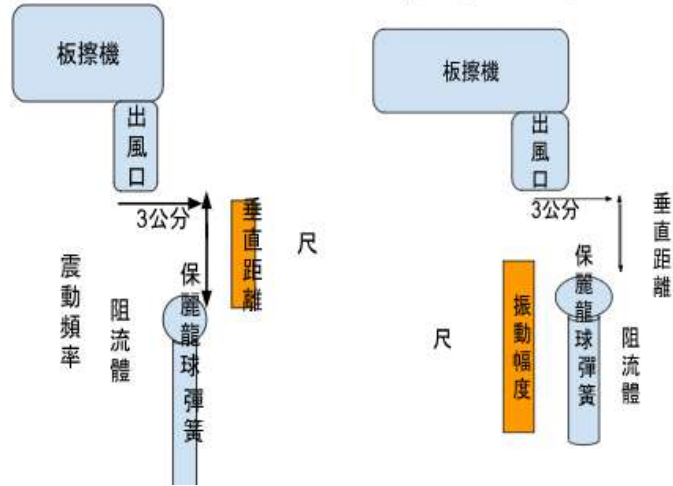


圖5-3-1 實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

表5-3-1阻流體與出風口距離橫向3公分縱向的振動頻率

振動頻率 (Hz)					振動幅度 (cm)				
距離(cm)	第一次	第二次	第三次	平均振動 頻率(Hz)	距離(cm)	第一次	第二次	第三次	平均振動 幅度(cm)
5	3.67	4.03	2.73	3.48	5	3.2	3.6	4.0	3.6
10	4.60	4.67	4.23	4.50	10	4.5	4.7	5.0	4.7
15	4.83	5.07	5.07	4.99	15	5.7	6.2	6.3	6.1
20	3.00	3.73	3.50	3.41	20	6.0	5.5	5.7	5.7
25	2.50	3.27	3.33	3.03	25	2.1	1.8	1.4	1.8
30	3.13	2.50	2.80	2.81	30	1.1	1.3	1.3	1.2
35	3.00	2.50	2.40	2.63	35	0.8	1.0	0.7	0.8
40	2.20	2.50	2.47	2.39	40	0.6	0.4	0.5	0.5
45	1.97	1.70	1.80	1.82	45	0.4	0.5	0.3	0.4
50	0.00	0.00	0.00	0.00	50	0.2	0.4	0.4	0.3

註:表格中黃框為振動頻率與振幅最大處, 綠框為為振動頻率與振幅最次大處。



圖5-3-2阻流體與出風口距離橫向3公分垂直的振動頻率

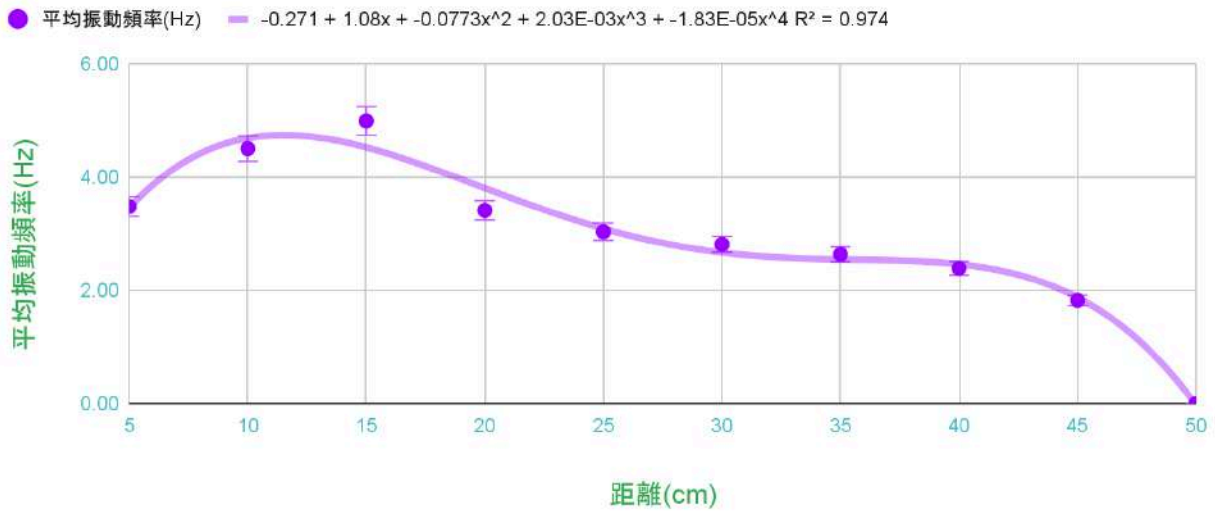


圖5-3-3阻流體與出風口距離橫向3公分垂直的振動幅度

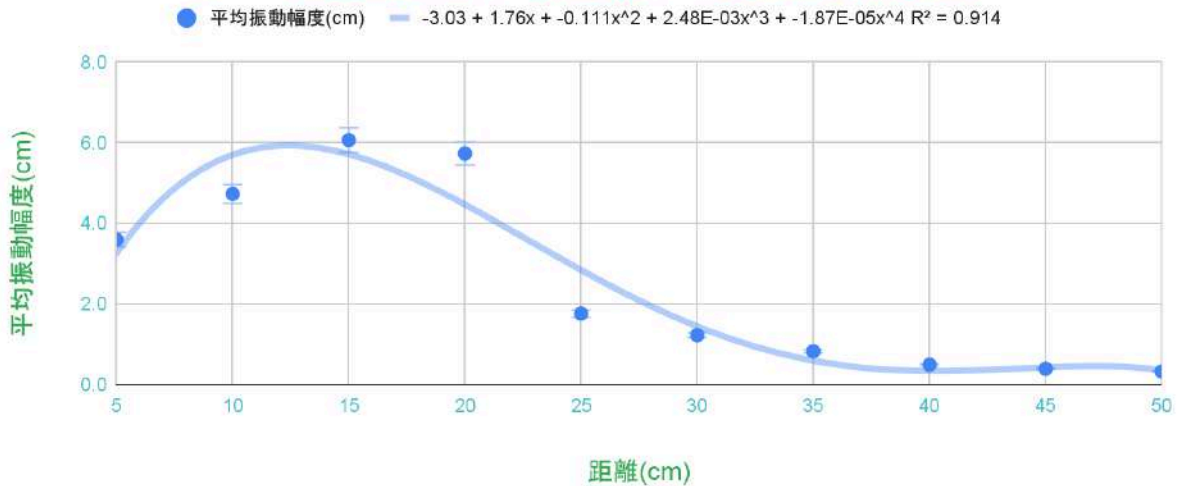


圖 5-3-2、5-3-3 橫向距離3cm處，不同鉛直距離的頻率與振幅(作者親自製作)

結果與討論：

- 1.(WHAT):阻流體(保麗龍球)和出風口之間距離對振動頻率及幅度的影響，以距離出風口橫向距離3公分縱向距離15公分的振動頻率及幅度最多。
- 2.(WHY):本實驗風場，在射流理論下，10cm後為氣流穩定可以形成渦流的區域，所以實驗做出15cm為最佳頻率(4.99Hz);第二大的頻率為20cm處， $f=3.41\text{Hz}$ 為符合理論，在15-20cm處的振幅也能最大與次大，分別為6.1cm與5.7cm。
- 3.(HOW):卡門渦街頻率與流體速度和阻流體(旋渦發生體)寬度有如下關係：

$$f=StV/d \text{---式 5-3-1}$$

$f$ =卡門渦街頻率， $St$ =斯特拉哈爾數， $V$ =流體速度， $d$ =阻流體迎面寬度)(維基百科，卡門渦街，2023)，探討如何在固定風速下，選擇合適大小的阻流體使其達到振幅與頻率均最大。



#### 四、阻流體直徑對振動頻率及振幅的影響

假設:假設:阻流體(保麗龍球)的直徑在適當下, 振動頻率及振幅最大

操作變因:阻流體的直徑長短(cm)

控制變因:阻流體材質、彈簧與出風口距離(cm)等

應變變因:振動頻率及振幅

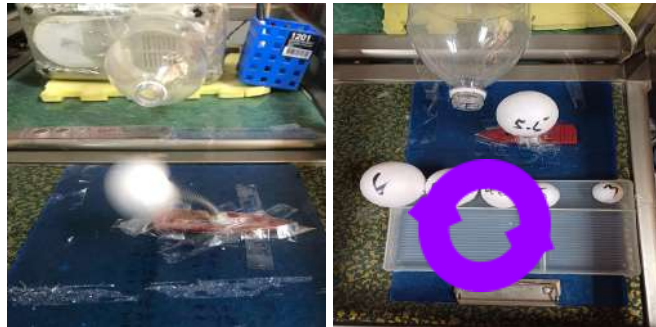


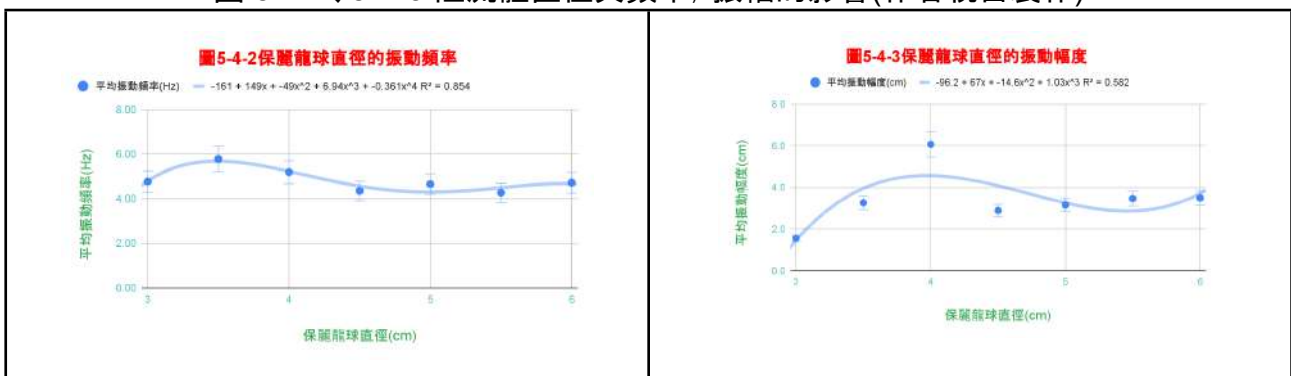
圖5-4-1實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

表5-4-1阻流體直徑對振動頻率及幅度的影響

振動頻率(Hz)					振動幅度(cm)				
保麗龍球直徑 (cm)	第一次	第二次	第三次	平均振動頻率(Hz)	保麗龍球直徑 (cm)	第一次	第二次	第三次	平均振動幅度(cm)
3	5.07	5.00	4.23	4.77	3	1.7	1.4	1.6	1.6
3.5	5.67	6.00	5.67	5.78	3.5	3.2	3.2	3.4	3.3
4	4.83	5.07	5.67	5.19	4	5.7	6.2	6.3	6.1
4.5	4.47	3.9	4.67	4.35	4.5	3.1	2.6	3	2.9
5	4.93	4.4	4.63	4.65	5	3	3.2	3.3	3.2
5.5	4.40	4.23	4.17	4.27	5.5	3.6	3.3	3.5	3.5
6	5.00	4.82	4.33	4.72	6	3.6	3.5	3.4	3.5

註:藍框為振動頻率與振幅最大時, 直徑4cm, 圓形球體。

圖 5-4-2、5-4-3 阻流體直徑與頻率, 振幅的影響(作者親自製作)



#### 結果與討論

1.(WHAT):由圖5-4-2與圖5-4-3發現, 阻流體(保麗龍球)直徑3.5公分時振動頻率最多, 直徑4公分時振幅最大, 但3cm-6cm的直徑設計下, 整體趨勢變化不大。

2.(WHY):振動幅度在直徑3、3.5公分時因為球體太小, 推論風阻力+卡門渦街現象<彈性恢復力, 此時在中間震盪但振幅較小, 也就是說用力的角度來看, 風阻力無法推動彈簧帶動球體去往復運動。在直徑4公分時大小適中下, 風阻力+卡門渦街現象=彈性恢復力, 此時球體振幅最大, 觀察球體的振動方向也越一致規律。其餘因為球體太大, 風阻力+卡門渦街現象>彈性恢復力, 則使彈簧恢復力無法精準控制阻流體方向, 而使阻流體產生偏移震盪。所以直徑4公分球體是最佳的選擇。

3.(HOW):探討球體的形狀, 使阻流體後方渦流可以使阻流體發生最大的共振頻率與振幅。

## 五、阻流體運動與否，其卡門渦街頻率的偵測與探究。

假設：經由實驗結果與理論計算，卡門渦街共振現象存在，所以壓電片振動圖譜應該具有週期性變化現象。

操作變因：阻流體運動與否與測量位置

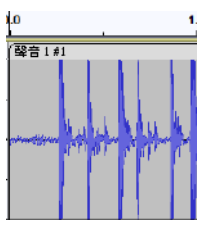
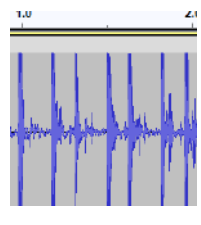
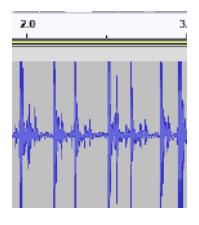
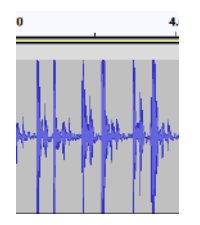
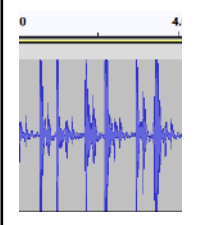
控制變因：風速、阻流體大小、測量儀器等

應變變因：圖譜，頻率(Hz)

實驗操作：

實際上以3.63Hz的頻率手動敲打壓電片上懸掛的塑膠片(40次/10.50秒)，得以下圖譜(時間長度均為1秒)：

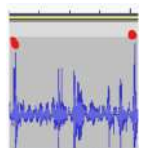
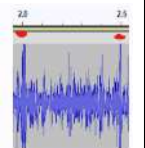
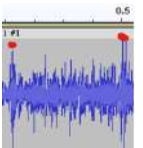
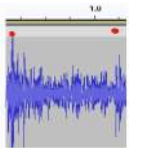
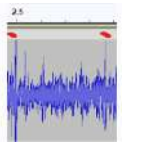
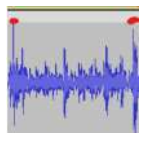
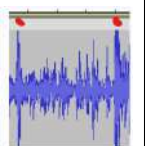
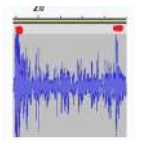
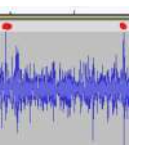
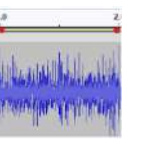
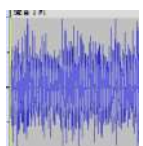
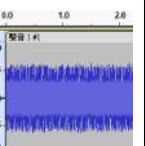
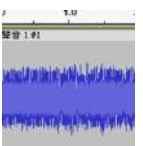
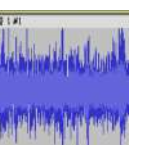
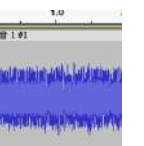
表5-5-1 壓電片振動頻率圖譜 (由作者親自測量，程式畫面)

圖譜					
波峰數目	6	7	7	6	6
次數	3.0	3.5	3.5	3.0	3.0

平均值**6.4個/1秒**，所以大致上兩個波峰為**0.5次振動**，進行以下分析：

表5-5-2 實驗圖譜列表 (由作者親自測量，程式畫面)

以下為標記為**0.5次**所需時間t(秒)：

運動方式	測量位置	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均頻率(Hz) 標準差
阻流體不動	4cm 時間(秒) 頻率(Hz)	 t=0.40 f=0.8	 t=0.50 f=1.0	 t=0.38 f=0.76	 t=0.49 f=0.98	 t=0.39 f=0.78	0.86 SD=0.116
	8cm 時間(秒) 頻率(Hz)	 t=0.39 f=0.78	 t=0.33 f=0.66	 t=0.47 f=0.94	 t=0.90 f=1.80	 t=1.0 f=2.00	1.23 SD=0.618
	12cm 時間(秒)						無明顯波峰判讀

	頻率 (Hz)						
阻流體晃動	4cm 時間(秒) 頻率(Hz)						0.70 SD=0.22 4
	8cm 時間(秒) 頻率(Hz)						1.14 SD=0.30
	12cm 時間(秒) 頻率(Hz)						0.766 SD=0.53
只有風 無阻流體 (對照組)	4cm						0
	8cm						0
	12cm						0

結果與討論:

1.(WHAT):由表5-5-1知道,兩個峰值為0.5次端點間振動,由表5-5-2知道當阻流體不動時,距離阻流體直徑3倍(4\*3=12)以上測不到渦街頻率,1倍直徑處的頻率約為0.86Hz,SD=0.116,2倍直徑處的頻率約為1.26Hz,SD=0.618,但刪除2d處第四次,第五次數據,誤差太大,得到

f=0.79, 由以下計算發現1倍與兩倍直徑處頻率都很接近0.76Hz, 但2d處的數據標準差太大, 1d處的數據較為穩定(d=阻流體直徑), 當阻流體晃動時, 卡門渦街頻率不變, 1d下為0.74Hz, SD=0.224, 2倍直徑下, f=1.14Hz, SD=0.30, 只有風場沒有阻流體的情況下, 不論距離, 壓電片的圖譜均沒有明顯鋒值。

2.(WHY):風力推動阻流模組為簡諧運動, 峰值與峰值間的距離應為0.5次, 可能是平衡位置-單邊移動-平衡位置, 可能是圖5-5-1中速度最大處(=頻率最大處)。



圖 5-5-1 蔡坤憲(2022), 從「物理感」來理解簡諧運動的數學公式, 物理雙月刊

查閱文獻周駿穎(2017)計算雷諾數(Reynolds number)公式, 空氣密度為1.2kg/m<sup>3</sup>, 動力空氣黏滯係數為1.81\*10<sup>-5</sup>, 本實驗參數V=0.15m/s, d=0.04m, 得Re<sub>D</sub>=397.79, 介於47<Re<10<sup>5</sup>, 理論上可以形成卡門渦街(維基百科, 卡門渦街, 2023)。當漩渦不斷增長, 擺動加強, 不穩定的對稱旋渦破碎時, 會形成周期性的交替脫落的卡門渦街。研究表明, 卡門渦街大多數情況下是不穩定的, 通過計算, 卡門渦街的穩定條件是Re=150, 所以本實驗提供不穩定型的渦街(中文百科, 卡門渦街, 無年代), 所以圖譜上具有不穩定性。

$$Re_D = \frac{\rho V d}{\mu} \quad \text{---式5-5-1}$$

$$Re_D = (1.2 * 0.15 * 0.04) / 0.0000181 = 397.79$$

再參考維基百科, 卡門渦街(2023), 提供公式5-5-2, 斯特勞哈爾數(Strouhal number) St=0.2, 帶入公式得渦街頻率約為0.76Hz。

$$f = St * V / d \quad \text{---式5-5-2}$$

3.(HOW):阻流體運動會影響渦街頻率, 渦街頻率與振幅與發電量的關係可以再進一步研究。



圖5-5-2卡門渦街觀測照片(作者親自拍攝)



## 六、翼型的弦切角度阻流體對振動頻率及幅度的影響

假設:如果阻流體左右兩側的長度不同,在阻流體後方更容易形成大小不一的反向渦旋,卡門渦街共振效應越大,並假設弦切角度越大,晃動幅度越小,振動頻率越小。

操作變因:翼型的不同弦切角度

控制變因:風量、位置與直徑與弧長比例等

應變變因:振動頻率及幅度、晃動軌跡

圖 5-6-1實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

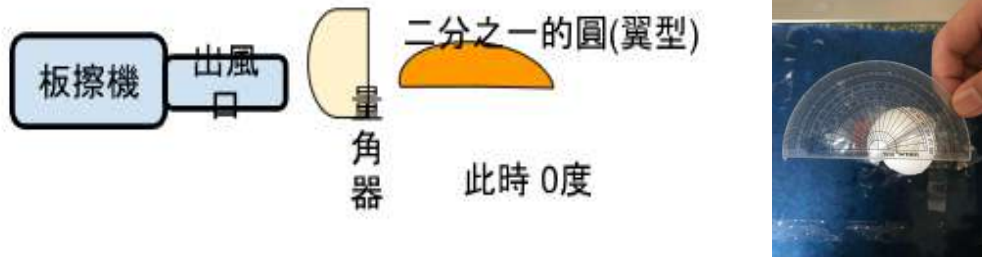


表5-6-1翼型弦切角度的阻流體晃動形狀、振動頻率及振動幅度

振動頻率(Hz)					晃動軌跡	振動幅度(cm)				
弦切角度(度)	第一次	第二次	第三次	平均振動頻率(Hz)		弦切角度(度)	第一次	第二次	第三次	平均振動幅度(cm)
0	2.00	2.30	2.20	2.17	左右輕微晃動	0	0.4	0.5	0.4	0.4
10	2.63	2.60	2.57	2.60	左右較大晃動	10	0.6	0.7	0.7	0.7
20	4.83	5.40	5.23	5.16	劇烈旋轉	20	3.7	4	4.2	4.0
30	5.07	5.03	6.30	5.47	劇烈旋轉,很快且規則向逆時鐘旋轉	30	4.3	4.2	4.3	4.3
40	4.03	4.83	4.50	4.46	旋轉	40	2.5	2.8	3.3	2.9
50	2.60	3.07	3.70	3.12	前後較大晃動	50	1.2	1.1	2.1	1.5
60	2.97	3.83	3.47	3.42	不穩定的隨意振動	60	1.5	1.3	1.5	1.4
70	3.53	3.50	3.00	3.34	左右輕微快速晃動	70	1.4	1.3	1.5	1.4
80	3.97	2.93	3.73	3.54	前後輕微晃動	80	1.0	0.8	1.3	1.0
90	3.23	3.87	3.47	3.52	不穩定的隨意振動	90	0.7	0.8	0.8	0.8
100	3.43	2.33	2.72	2.83	輕微晃動	100	1.2	1.5	1.4	1.4
110	2.87	2.50	2.67	2.68	較輕微大晃動	110	1.8	2	2	1.9
120	5.60	4.30	4.40	4.77	前後較大晃動	120	3	3.2	3.3	3.2
130	2.60	2.67	2.77	2.68	輕微晃動	130	0.8	1	0.7	0.8
140	2.25	2.33	2.43	2.34	輕微晃動	140	1.4	1.3	1.3	1.3
150	2.90	3.07	2.87	2.94	較輕微大晃動	150	0.6	0.5	0.7	0.6
160	4.67	4.80	4.77	4.74	劇烈旋轉,很快且規則向逆時鐘旋轉	160	4.1	4.4	4.2	4.2
170	4.03	4.83	4.50	4.46	劇烈旋轉	170	3.8	3.5	3.7	3.7
180	0.38	4.07	1.97	2.14	不穩定的隨意振動	180	0.4	0.7	0.6	0.6

註:顏色標示為頻率與振幅較大處。

圖5-6-2翼型弦切角度的振動頻率

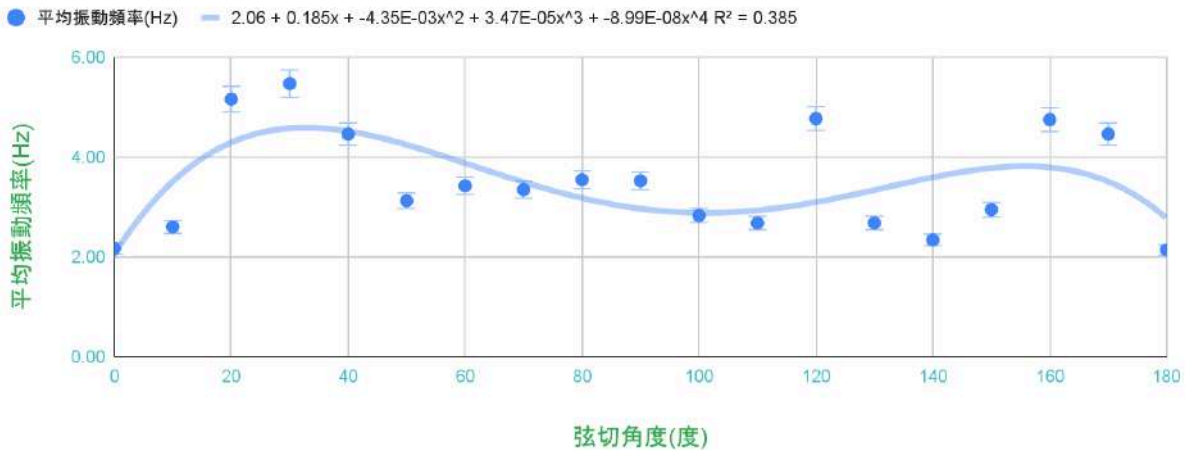


圖5-6-3翼行弦切角度的振動幅度

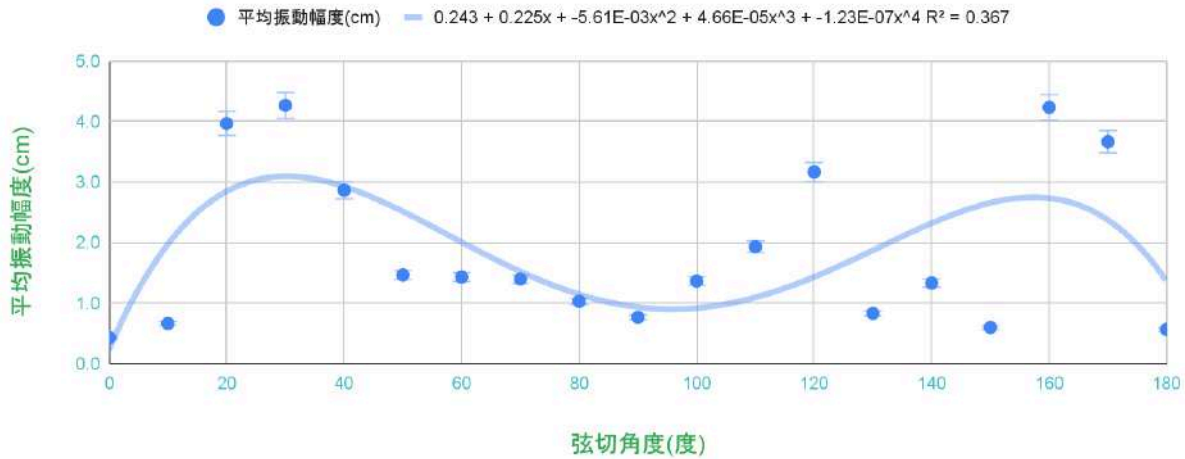


圖 5-6-2、圖5-6-3 弦切角度對頻率及振幅的影響(作者親自製作)

#### 結果與討論:

- 1.(WHAT):阻流體(保麗龍球)的弦切角度對振動頻率及幅度的影響，以角度30度時振動頻率及幅度最大。晃動軌跡為劇烈旋轉，在90度以上以160度時振動頻率及幅度最大，晃動軌跡為劇烈旋轉。由表格標示可以知道，頻率與振幅表現最佳範圍分別為角度20-40度(頻率分別為5.16Hz、5.47Hz、4.46Hz與振幅分別為4.0, 4.3, 2.9公分)與150-170度(頻率分別為2.94、4.74、4/46Hz與振幅分別為0.6, 4.2, 3.7)，略呈對稱效果。
- 2.(WHY):弦切角度對頻率與振幅影響以90度為軸呈對稱分佈，本實驗發現弦切角影響晃動規律強度與是否規律。推測不同的弦切角擺放，在球體兩側造成的渦流情況大不相同:沒有穩動的渦街現象或渦流的大小比例不同。阻流體和出風口之間弦切角度20-40度時，卡門渦街共振效應強，所以振動皆越多。150度到170度時亦然，參考文獻(劉詠豐、蔡文翔、韓佳策, 2021)不離不棄的保麗龍箱-模擬高速行駛下小貨車後-斗空氣流動的變化及應用與教授指導說法，推測卡門渦街具有增加共振頻率與增加振幅的效果。
- 3.(HOW):阻流體的造型不對稱，有助於振動頻率，若無法改變阻流體的造型，使阻流體在封場外圍，受以側風，也有利於卡門渦街共振系統發生。接下來探討彈簧的彈力在阻流體晃動中的造成的影響。



## 七、卡門渦街共振效應下，阻流體大小與彈簧彈性係數對振動頻率與振幅的影響

### 1.阻流體大小的風阻力測量

假設:阻流體直徑越長(體積大), 風阻力越大

操作變因:阻流體直徑長短

控制變因:阻流體材質、彈簧與出風口距離(cm)等

應變變因:風阻力大小



圖5-7-1實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

實驗數據表格及統計圖:

表5-7-1不同阻流體的風阻力大小

阻流體直徑 <sup>2</sup>	風阻力大小			平均風阻力(gw)
	第一次	第二次	第三次	
9	3.62	3.58	3.52	3.57
12.25	4.74	5.78	4.62	5.05
16	6.84	6.84	5.8	6.49
20.25	11.26	10.38	10.92	10.85
25	10.16	9.16	12.5	10.61
30.25	12.92	11.46	11.42	11.93
36	18.54	18.40	16.08	17.67

圖5-7-2不同阻流體的風阻力大小

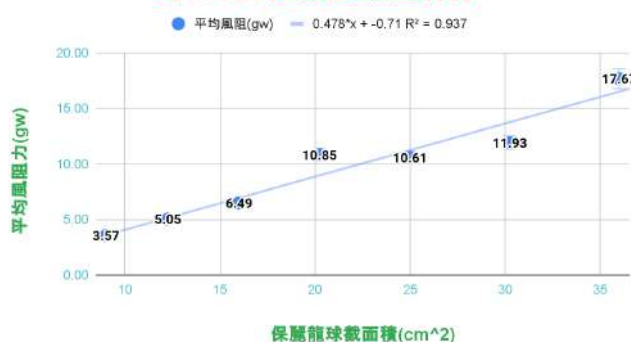


圖5-7-2 阻流體直徑對風阻力的影響(作者親自製作)

結果與討論:

1.(WHAT)在阻流體直徑6公分時風阻力最大。

2.(WHY)因為截面積越大, 風阻力越大, 所以最大直徑6公分時風阻力最大。

3.(HOW)雖然球體越大風阻越大, 但視需要配合彈簧彈力才能得到最大振動幅度與頻率。改變阻流體形狀再出風口振動達到最大/多。

## 2. 彈簧長度對振動頻率及振幅的影響

假設:彈簧長度在某公分及振動頻率及幅度最大

操作變因:彈簧長度

控制變因:阻流體材質、重量與出風口距離等

應變變因:振動頻率及幅度大小

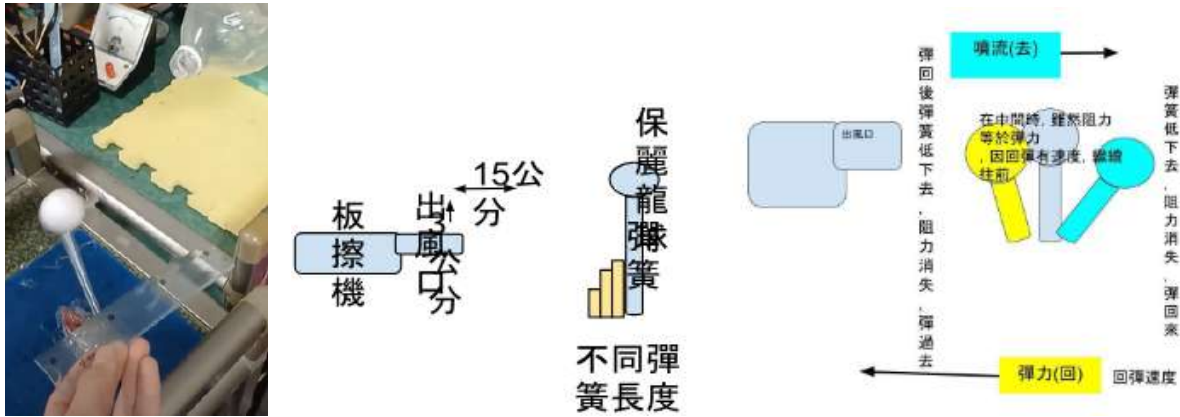


圖5-7-3實驗裝置照片(作者親自拍攝、製作)

表5-7-2 不同彈簧長度的振動頻率及幅度

彈簧長短 (cm)	振動頻率 (Hz)				彈簧長短 (cm)	振動幅度 (cm)			
	第一次	第二次	第三次	平均振動頻率(Hz)		第一次	第二次	第三次	平均振動幅度(cm)
17	2.97	3.00	3.03	3.00	17	5.9	5.9	5.8	5.9
15	3.03	3.07	2.97	3.02	15	5.3	5.6	5.6	5.5
13	3.93	4.00	3.80	3.91	13	6.0	5.3	6.6	6.0
11	4.83	5.53	5.33	5.23	11	3.9	4.5	4.3	4.2
9	0.00	0.00	0.00	0.00	9	0	0	0	0

圖5-7-4彈簧長度與振動頻率關係

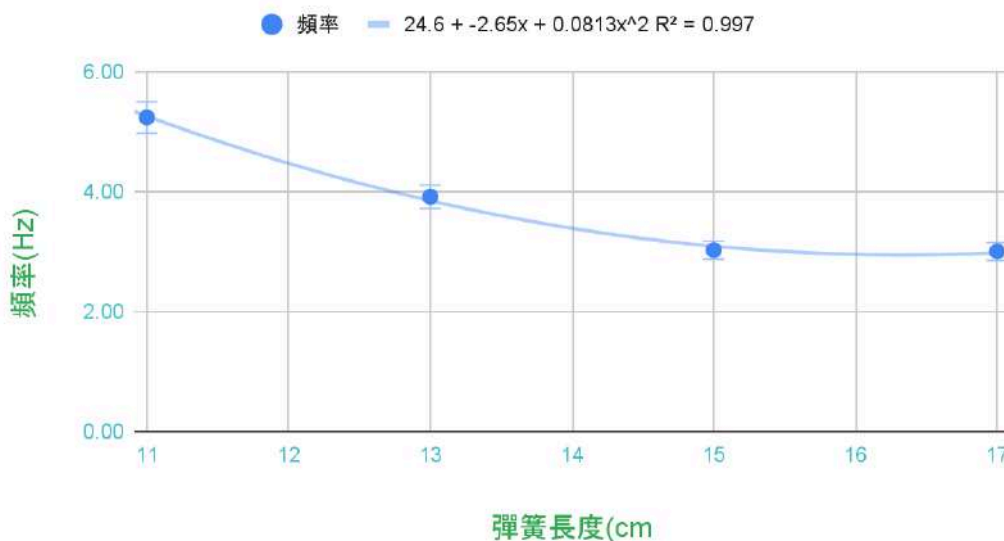


圖5-7-4彈簧長度與振動頻率關係 (作者親自製作)

結果與討論:

1.(WHAT):相同性質的彈簧長度與頻率成二次方正比( $y=24.6 + -2.65x + 0.0813x^2$ ,  $R^2=0.997$ )

2.(WHY):, 長度變化, 看作將相同彈性係數(k)的彈簧串聯, 彈簧串聯下, 總彈簧的彈性係數變

化為由  $\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots + \frac{1}{K_n}$ , 所以總彈簧係數與個別係數為多項式關係。而簡諧運動中, 頻率(f)與彈性係數(k)之關係為式 5-7-1

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{---式 5-7-1}$$

所以綜合以上足夠類推的條件, 計算本實驗彈簧在風場下的震盪頻率與彈性係數

1. 由實驗三數據, 15cm縱向距離時,  $f=4.99\text{Hz}$  (頁12)。由式子5-7-1,  $f=4.99\text{Hz}$ ,  $m=6.74\text{gw}$ , 帶入得 $k=6.61\text{N/m}$ 。
2. 由實驗四數據, 15cm縱向距離時,  $f=5.19\text{Hz}$  (頁14)。由式子5-7-1,  $f=5.19\text{Hz}$ ,  $m=6.74\text{gw}$ , 帶入得 $k=7.16\text{N/m}$ 。

在實驗中, 也觀察到彈簧體振幅越大, 頻率越小的大概現象。

3.(HOW):挑選合適的彈簧, 並測量彈簧在風場下的彈力。

**3.本實驗下。彈簧達最大振幅6.0cm下, 所受彈力測量。**

表5-7-3 實驗彈簧在6.5公分下, 極大振幅6cm下的所需彈力(恢復力)與頻率(Hz)

彈簧長度	第一次	第二次	第三次	平均彈簧彈力	頻率1	頻率2	頻率3	平均頻率
6.5	143.18	143.98	154.12	147.1	5.70	6.10	5.60	5.80

## 八、無風力下，彈簧與阻流體組合體的彈力，頻率與振幅測量

假設：彈簧的彈性係數為定值，並且可以經過本實驗設計測量。

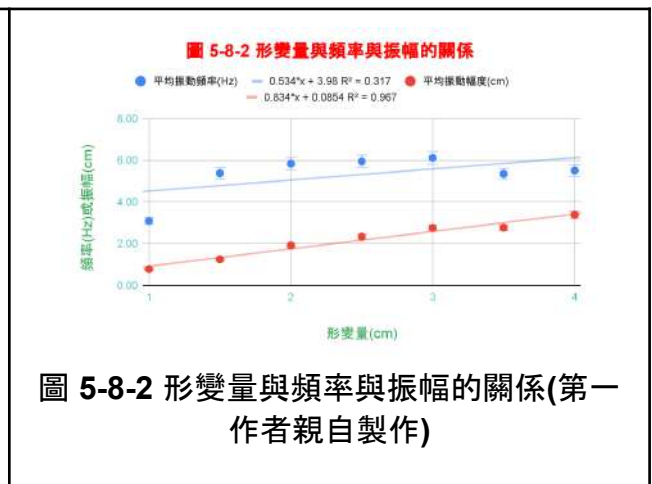
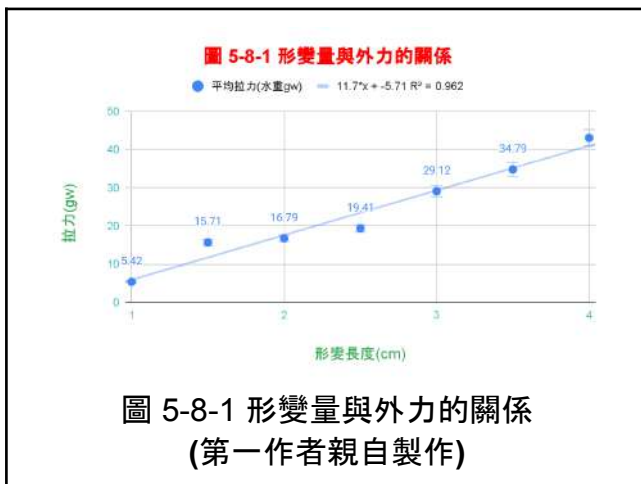
操作變因：形變量(cm)

控制變因：彈簧種類、摩擦係數、連接材料等

應變變因：拉力大小(gw)

表5-8-1 彈簧形變量對拉力，頻率與振幅(cm)

形變長度 (cm)	拉力(水重gw)				振動頻率(Hz)				振動幅度(cm)			
	第一次	第二次	第三次	平均拉力 (水重gw)	第一次	第二次	第三次	平均振動 頻率(Hz)	第一次	第二次	第三次	平均振動 幅度 (cm)
1	5.38	5.54	5.34	5.42	3.14	2.67	3.46	3.09	0.90	0.75	0.70	0.78
1.5	16.72	16.5	13.92	15.71	5.20	5.50	5.44	5.38	1.25	1.50	1.00	1.25
2	15.36	18.8	16.2	16.79	6.63	5.60	5.27	5.83	1.75	2.00	2.00	1.92
2.5	19.26	18.92	20.06	19.41	6.20	5.64	6.00	5.95	2.25	2.25	2.50	2.33
3	29.44	30	27.92	29.12	5.90	5.70	6.75	6.12	2.90	2.88	2.50	2.76
3.5	32.28	25.2	46.88	34.79	5.85	5.42	4.77	5.34	2.55	2.85	2.90	2.77
4	36.04	45.04	48.14	43.07	5.55	5.90	5.09	5.51	3.60	3.45	3.10	3.38



### 結果與討論：

- (WHAT):由虎克定律外力與形變量的比例即為彈性係數K, 再由圖5-8-1 知道線性關係下的斜率為11.7(gw/cm), 所以本彈簧的彈性係數為11.7(gw/cm), 轉換單位彈性係數 $k$ 為11.46 N/m。由圖5-8-2知道形變量與頻率無關(線性,  $R^2=0.317$ ), 形變量與振幅成正比(線性  $y=0.834X+0.0854$ ,  $R^2=0.967$ )
- (WHY):虎克定律是虎克發現彈簧受到的力與彈簧伸長量有著正比關係, 受力越大, 伸長量就越長。後來也發現虎克定律能應用在各式固體的物體上。本實驗中的彈性體會影響阻流球體的搖晃情況, 所以需要了解該彈簧的彈性係數, 本實驗結果在無風下, 彈簧的 $k=11.46N/m$ , 共振頻率大約在5.32Hz。
- (HOW):由實驗四結果發現, 直徑4cm的阻流體在振幅6cm下(也是最大振幅), 共振頻率5.19Hz, 實驗三中在縱向距離15cm且橫向距離3cm下, 阻流體共振頻率4.99Hz, 由實驗七-3, 無風力下測量形變量與頻率的關係中, 在振幅6cm下(也是最大振幅), 彈簧共振頻率5.80Hz。比較有無卡門渦街共振的頻率數據, 發現頻率變小。在比較有風下的彈性係數分別為實驗三  $k=6.61N/m$ , 實驗四 $k=7.16N/m$ , 本實驗無風下,  $k=11.46N/m$ , 所以彈性體在卡門渦街效應下的彈性係數 $k$ 會變小, 所以可以比較省力。再由實驗七-1測得阻流體風阻力為6.49gw與實驗七-3測得無風下, 彈簧相同振幅下其恢復力為147.1gw, 亦實測發現當有卡門渦街共振時所需要的外力也會變小。

### 九、卡門渦街共振效應與電磁感應實驗對發電效果的影響

假設:卡門渦街共振發電量比第六冊實驗2-5電磁感應的發電量為佳。

操作變因:發電方式。

控制變因:風速、阻流體大小、測量儀器等。

應變變因:電壓(mV)與電流(μA)。



圖 5-9-1 卡門渦街發電實驗裝置  
(第一作者親自拍攝)



圖 5-9-2 卡門渦街發電實驗裝置  
(第一指導教師親自拍攝)



圖 5-9-3 電池感應實驗裝置  
(國中自然與生活科技課本, 2024)

表5-9-1 卡門渦街與相對運動方式對電流的影響

卡門渦街發電 時間-電流						磁棒發電 時間-電流					
時間(秒)	電流(微安培)	時間(秒)	電流(微安培)	時間(秒)	電流(微安培)	時間(秒)	電流(微安培)	時間(秒)	電流(微安培)	時間(秒)	電流(微安培)
1	1	61	0	121	0	1	1	61	2	121	0
2	0	62	3	122	2	2	0	62	0	122	2
3	0	63	2	123	3	3	2	63	3	123	3
4	1	64	0	124	1	4	3	64	0	124	0
5	2	65	1	125	0	5	1	65	3	125	2
6	0	66	3	126	1	6	2	66	1	126	3
7	2	67	2	127	2	7	4	67	3	127	0
8	0	68	3	128	2	8	0	68	0	128	8
9	1	69	0	129	1	9	3	69	2	129	1
10	3	70	1	130	2	10	1	70	2	130	0
11	2	71	2	131	1	11	0	71	0	131	1
12	1	72	0	132	0	12	2	72	3	132	0
13	0	73	1	133	1	13	4	73	5	133	2
14	1	74	0	134	2	14	5	74	0	134	0
15	2	75	1	135	1	15	0	75	3	135	1
16	0	76	2	136	3	16	1	76	0	136	2
17	2	77	0	137	3	17	2	77	5	137	0
18	1	78	2	138	4	18	1	78	1	138	0

19	0	79	1	139	2	19	2	79	0	139	1
20	1	80	0	140	2	20	0	80	3	140	3
21	0	81	3	141	3	21	1	81	3	141	0
22	1	82	2	142	0	22	2	82	4	142	1
23	2	83	1	143	1	23	5	83	0	143	0
24	3	84	3	144	2	24	1	84	1	144	4
25	1	85	2	145	3	25	2	85	0	145	6
26	1	86	1	146	2	26	1	86	2	146	1
27	2	87	0	147	3	27	0	87	0	147	1
28	0	88	1	148	1	28	2	88	2	148	2
29	2	89	2	149	0	29	0	89	0	149	0
30	1	90	0	150	2	30	2	90	4	150	2
31	2	91	1	151	3	31	1	91	0	151	0
32	1	92	2	152	4	32	0	92	2	152	1
33	3	93	0	153	1	33	1	93	6	153	0
34	2	94	1	154	2	34	2	94	2	154	1
35	1	95	2	155	1	35	0	95	0	155	3
36	0	96	2	156	2	36	1	96	1	156	4
37	2	97	1	157	1	37	6	97	2	157	2
38	0	98	0	158	3	38	0	98	3	158	0
39	1	99	1	159	2	39	1	99	4	159	5
40	2	100	0	160	0	40	0	100	0	160	8
41	1	101	1	161	3	41	2	101	1	161	1
42	2	102	2	162	1	42	3	102	2	162	2
43	0	103	1	163	3	43	2	103	3	163	0
44	1	104	3	164	2	44	0	104	1	164	4
45	2	105	3	165	1	45	1	105	0	165	6
46	0	106	2	166	3	46	2	106	1	166	0
47	1	107	3	167	1	47	2	107	0	167	2
48	2	108	2	168	0	48	3	108	3	168	1
49	2	109	0	169	4	49	5	109	0	169	2
50	1	110	2	170	3	50	2	110	1	170	0
51	3	111	3	171	2	51	1	111	2	171	1
52	2	112	2	172	5	52	0	112	6	172	2
53	1	113	0	173	3	53	2	113	5	173	0
54	2	114	2	174	4	54	0	114	1	174	1
55	3	115	1	175	1	55	1	115	3	175	2
56	1	116	0	176	0	56	2	116	2	176	4
57	2	117	1	177	2	57	1	117	0	177	0
58	0	118	3	178	1	58	4	118	1	178	0
59	2	119	2	179	3	59	1	119	3	179	1
60	1	120	4	180	1	60	0	120	2	180	3

均方根電流	1.88	均方根電流	2.40
標準差	1.11	標準差	1.69



卡門渦街共振效應與電磁感應實驗對發電效果的影響 電壓數據

卡門渦發電 時間-電壓						磁棒發電 時間-電壓					
時間(秒)	電壓(毫伏特)	時間(秒)	電壓(毫伏特)	時間(秒)	電壓(毫伏特)	時間(秒)	電壓(毫伏特)	時間(秒)	電壓(毫伏特)	時間(秒)	電壓(毫伏特)
1	1	61	0	121	2	1	1	61	3	121	0
2	2	62	4	122	2	2	2	62	2	122	1
3	1	63	3	123	0	3	2	63	4	123	1
4	2	64	1	124	2	4	0	64	8	124	0
5	3	65	2	125	0	5	3	65	0	125	2
6	2	66	0	126	3	6	6	66	2	126	1
7	1	67	2	127	2	7	2	67	1	127	3
8	2	68	4	128	3	8	1	68	6	128	1
9	1	69	2	129	1	9	2	69	1	129	2
10	0	70	4	130	2	10	0	70	1	130	0
11	3	71	2	131	4	11	1	71	2	131	1
12	2	72	3	132	2	12	2	72	4	132	1
13	0	73	0	133	3	13	7	73	0	133	0
14	1	74	1	134	1	14	5	74	1	134	1
15	0	75	3	135	2	15	6	75	3	135	0
16	1	76	1	136	1	16	0	76	4	136	2
17	0	77	0	137	0	17	1	77	5	137	0
18	1	78	4	138	3	18	2	78	1	138	2
19	3	79	1	139	2	19	3	79	0	139	5
20	0	80	2	140	3	20	5	80	2	140	1
21	1	81	0	141	2	21	1	81	4	141	2
22	3	82	2	142	4	22	4	82	0	142	0
23	1	83	1	143	2	23	0	83	1	143	1
24	2	84	0	144	3	24	1	84	3	144	0
25	1	85	3	145	3	25	3	85	4	145	2
26	1	86	0	146	1	26	0	86	0	146	5
27	3	87	3	147	2	27	2	87	3	147	2
28	2	88	0	148	3	28	1	88	0	148	3
29	0	89	1	149	2	29	3	89	2	149	0
30	2	90	3	150	1	30	4	90	4	150	4
31	1	91	1	151	0	31	3	91	2	151	0
32	2	92	0	152	3	32	2	92	4	152	3
33	1	93	1	153	0	33	0	93	5	153	7
34	2	94	0	154	3	34	5	94	4	154	0
35	1	95	3	155	3	35	1	95	0	155	1
36	2	96	0	156	4	36	0	96	1	156	2
37	0	97	3	157	3	37	4	97	2	157	1
38	1	98	4	158	1	38	6	98	5	158	0
39	0	99	2	159	0	39	1	99	4	159	1
40	1	100	1	160	2	40	0	100	1	160	3
41	0	101	0	161	0	41	2	101	0	161	0

42	0	102	3	162	2	42	3	102	2	162	1
43	1	103	2	163	1	43	6	103	5	163	5
44	2	104	0	164	3	44	0	104	1	164	1
45	0	105	2	165	2	45	4	105	0	165	0
46	4	106	1	166	3	46	0	106	1	166	1
47	3	107	3	167	0	47	1	107	2	167	2
48	1	108	0	168	2	48	2	108	3	168	4
49	2	109	2	169	4	49	3	109	5	169	2
50	0	110	0	170	2	50	2	110	2	170	1
51	2	111	1	171	4	51	1	111	0	171	3
52	4	112	3	172	0	52	6	112	1	172	2
53	2	113	1	173	2	53	3	113	2	173	0
54	4	114	2	174	0	54	1	114	6	174	1
55	2	115	4	175	2	55	2	115	1	175	1
56	3	116	2	176	1	56	3	116	2	176	2
57	0	117	3	177	3	57	6	117	0	177	4
58	1	118	4	178	1	58	3	118	3	178	2
59	3	119	2	179	2	59	0	119	2	179	1
60	1	120	1	180	1	60	4	120	0	180	1

均方根電壓(mV)	2.10	均方根電壓(mV)	2.77
標準差	1.24	標準差	1.83

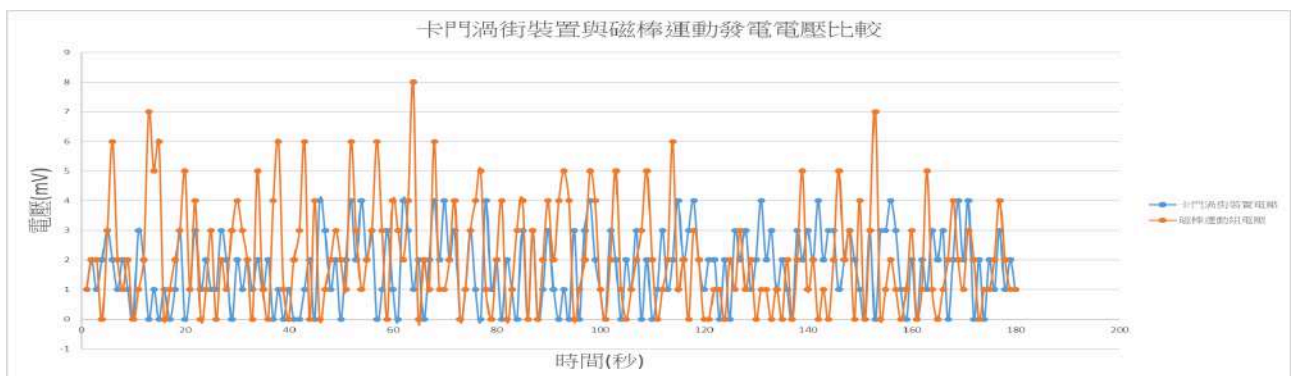


圖5-9-4 卡門渦街與相對運動方式對電壓的影響(第一作者親自製作)

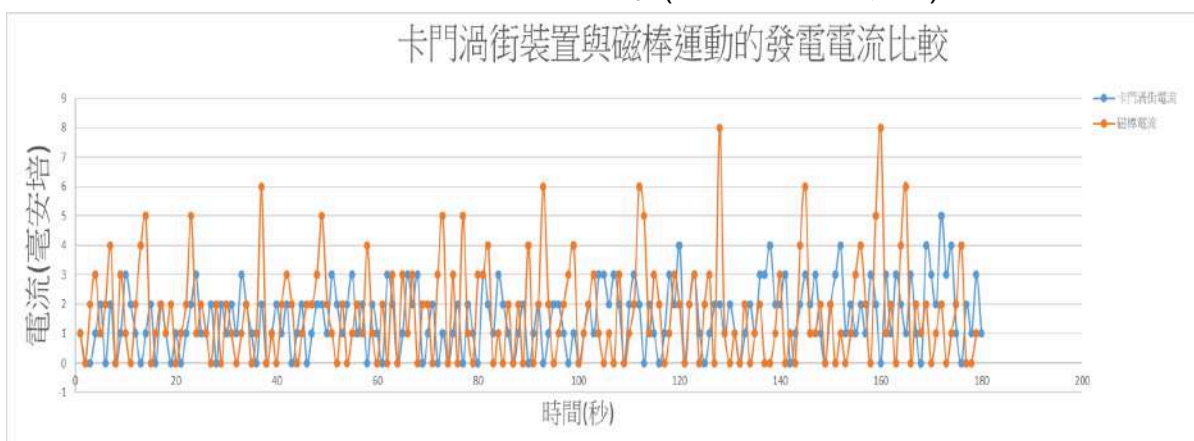


圖5-9-5 卡門渦街與相對運動方式對電流的影響(第一作者親自製作)

### 結果與討論:

- 1.(WHAT):由圖5-9-4發現,磁棒運動組的電壓最高為8mV,卡門渦街發電的電壓最高為4mV,卡門渦街發電的電壓(均方根2.10mV)磁棒運動模組(均方根2.77mV),磁棒運動標準差1.24mV,卡門渦街發電標準差1.83mV。由圖5-9-5發現,磁棒運動組的電流最高為8微安培。卡門渦街發電的電流最高為5微安培。卡門渦街發電的電流(均方根1.88微安培)低於磁棒運動模組(均方根2.40微安培),磁棒運動組標準差1.69微安培,卡門渦街發電1.11微安培。
- 2.(WHY):卡門渦街發電的電壓的均方根2.10mV,雖然低於磁棒運動模組的均方根2.77mV,但由標準差來看,磁棒運動組差異性較大(磁棒運動標準差1.24mV,卡門渦街發電標準差1.83mV)。卡門渦街發電的電流的均方根1.88微安培,雖然低於磁棒運動模組的均方根2.40微安培,但磁棒運動組差異性較大(磁棒運動組標準差1.69微安培,卡門渦街發電1.11微安培),代表卡門渦街共振模組的發電電流較為穩定輸出。

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{N}}$$

---式5-9-1均方根公式

- 3.(HOW):雖然卡門渦街發電模組的效果低於磁棒相對運動模組,但卡門渦街發電裝相較於磁棒運動發電節省人力,且較於日常風扇的風力發電機體積較小,避免風扇斷裂之現象,非常適合做輕量化設備發電。



圖5-9-6風力發電機風扇斷裂(自由時報, 2013, 台電風機葉片斷落 躺沙灘逾半年)、  
圖5-9-7卡門渦街發電裝置(第一指導教師親自拍攝)

## 陸、結論及未來展望

### (一)卡門渦街模組的放置位置:

放置於射流體論中的完全發展區或過渡區，風力起始區的风速太強，無法形成渦流，本實驗裝置為距離出風口縱向距離15cm，橫向距離3cm的側風位置。

### (二)卡門渦街阻流模組選擇:

#### 1.阻流體的直徑大小要配合風速選擇:

本實驗為直徑4cm球體，阻流球體加上彈性體整體模組在風場中的共振頻率最佳，卡門渦街模組數據最佳為5.19Hz(實驗四)與4.99Hz(實驗三)，有最穩定規則的旋轉情況，最大頻率與振幅與最好的發電量。研究發現阻流體的大小為直徑3、3.5公分球體太小，風阻力+卡門渦街效應<彈性恢復力此時在中間震盪但振幅較小。直徑4公分時，風阻力+卡門渦街效應=彈性恢復力此時振幅最大。其餘因球體太大，風阻力+卡門渦街效應>彈性恢復力則偏移震盪。在弦切角實驗，阻流體與出風口的相對角度(弦切角)設置對於頻率、振幅是對稱分佈，頻率與振幅表現最佳範圍分別為角度20-40度與150-170度。推測有角度變化的情況下，在阻流體後端兩側造成的卡門渦街氣旋大小不同，所以造成不同的晃動狀況。

### (三)卡門渦街下的物理性質變化

1.模組降低運動頻率且運動規律:彈簧進行實驗，其振幅最大6cm所需的力量為147.1gw，實驗中使用4cm直徑阻流體使其晃動6cm所需力量為6.49gw，即實驗提供風阻力不足以使彈簧晃動但可使阻流體晃動，所以過街吸力的共振效果可帶動阻流體旋轉與晃動，本實驗阻流體的晃動效應為風阻力+卡門渦街效應+彈簧形變力共同提供，且過街效應使彈簧晃動的效益大約是風阻力的20倍!



圖6-1-1 阻流體在射流口進行橢圓形震盪軌跡(作者親自拍攝)

2.彈性係數在效應下變化:適當長度的彈簧為好，研究發現，彈性體彈力係數在卡門渦街效應中會變化( $k=11.46$ 變成 $k=6.61$ )，代表形變量相同下，所需力量改變的狀況，利用卡門渦街共振發電的確有節能效果。

### (四)運用卡門渦街下的發電效益

本研究在風速15m/s下，最大產出32nW的瞬間功率( $4mV \cdot 8\mu A = 32nW$ )，平均發電功率為2nW( $2.1mV \cdot 1.88\mu A = 3.948nW$ )，優於阮海，範輝端，王東安(2013)，使用卡門渦街的微型氣動能量產生器0.59nW)。卡門渦街發電裝相較於磁棒運動發電節省人力也較為穩定輸出。

### (五)卡門渦街共振現象確定

經過理論計算得系統渦街頻率應為0.76，當阻流體不動時，用壓電片放置1倍球體直徑處測量得到頻率為0.86Hz，2倍直徑處去除誤差大的數據，得 $f=0.79Hz$ ，當阻流體晃動時，1d處的卡門渦街頻率為0.70，3d時的卡門渦街頻率為0.766Hz，均與理論計算相近，證明有卡門渦街效應存在。

### (六)未來展望

本實驗利用彈力體支撐阻流體在風場中進行發電，阻流體直徑在阻擋風場範圍2/3以上(本實驗直徑4:6)，利用射流風場的完全發展區，弦切角20-40度或150-170度的設計，可以造成有一側大小不一的卡門渦旋，彈力係數在卡門渦街效應中會變化，利用卡門渦街共振發電的確有節能效果具有輕巧性與節能性，實在可行及發展。

## 柒、參考文獻資料

- 1.劉邦彥、黃子嘉、林義傑(2016) 追風逐電-無扇葉型風力發電機 中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品說明書。20231005取自:<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/56/pdf/052606.pdf>
- 2.陳建吏、鍾善宇(2017)風場下圓柱氣孔導管抽吸對風阻係數影響, 2022年臺灣國際科學展覽會, 優勝作品專輯。20231005取自:  
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2022/pdf/TISF2022-100009.pdf>
- 3.蘇明德 (2010)壓電陶瓷及導電陶瓷, 科學發展月刊2010年2月, 446期。20230914取自:  
<https://ejournal.stpi.narl.org.tw/sd/download?source=9902/9902-10.pdf&vllid=89A6CEEA-AF6F-45B5-8C60-A1EA860B538F&nd=0&ds=0>
- 4.郭耀嶸、洪熙陽(2022) 2022年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。20231109取自:  
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2022/pdf/TISF2022-100009.pdf>
- 5.劉詠豐、蔡文翔、韓佳策(2021)不離不棄的保麗龍箱-模擬高速行駛下小貨車後 斗空氣流動的變化及應用, 中華民國第61屆中小學科學展覽會作品說明書。20231110取自:  
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-030103.pdf?0.8328885422088206>
- 6.余宗翰(2016) 沒有扇葉的風力發電機是綠能救星! 20231110取自:  
<https://news.knowing.asia/news/5d390e9e-2989-4b2a-a1ba-0fb428cf6b18>
- 7.林家湄、林翌蓁、陳麒安、施芳妤、葉宇翔、羅晨光(2008)閃電二號--水平感應發電機之研究與應用, 中華民國第四十八屆中小學科學展覽會作品說明書。20231216取自:  
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/48/elementary/080825.pdf>
- 8.郭炳宏(2010)多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立, 國立交通大學土木工程學系碩士班碩士論文。20240116取自:  
<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/42272/1/655801.pdf>
- 9.維基百科(2023), 卡門渦街, 20240306 取自<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/卡門渦街>
- 10.Endress+Hauser(2011)渦街流量測量原理, 20240306 取自:  
<https://www.youtube.com/watch?v=T0NVkP2HkTA>
- 10.國中自然與生活科技課本(2024), 2-4 電磁感應, 頁55, 出版社:翰林, 台北市。  
郭炳宏(2010)多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立,國立交通大學土木工程學系碩士班碩士論文。20240119節錄自:<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/42272/1/655801.pdf>
- 11.阮海, 範輝端, 王東安(2013), 使用卡門渦街的微型氣動能量產生器, 風工程與工業空氣動力學雜誌第116卷, 2013年5月, 第40-48頁, 20240525取自:  
[https://www-sciencedirect-com.translate.goog/science/article/abs/pii/S0167610513000524?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=zh-TW&\\_x\\_tr\\_hl=zh-TW&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-sciencedirect-com.translate.goog/science/article/abs/pii/S0167610513000524?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=zh-TW&_x_tr_hl=zh-TW&_x_tr_pto=sc)
- 12.周駿穎(2017), 具導柱之平行板摩擦起電電極與卡門渦流交互作用之研究, 國立聯合大學機械工程學系碩士班論文, 未出版, 苗栗縣, 20240530取自:<https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi/login?o=dwebmge>
- 13.中文百科(無年代), 卡門渦街, 20240602取自:  
<https://www.newton.com.tw/wiki/%E5%8D%A1%E9%96%80%E6%B8%A6%E8%A1%97%#%E8%84%AB%E8%90%BD%E9%A0%BB%E7%8E%87>
- 14.蔡坤憲(2022), 從「物理感」來理解簡諧運動的數學公式, 物理雙月刊, 20240605取自:  
<https://docs.google.com/document/d/1tr0qoit2Cgc2wpKG5gAtGAmbqd9Fq3io7BsWgBYg5Fc/edi>

## 【評語】 030101

本作品研究卡門渦街共振發電技術，使用風力計和壓電晶體分析風場與振動頻率。作品考慮各項物理變因，設計系統化實驗，並將實驗數據以圖表呈現，進行結果討論，具科學探究方法。

然而，對物理原理及公式的引用需更清楚說明，數據單位、曲線擬合、誤差分析等需符合科學表示原則，報告排版需要再加強。建議可對卡門渦街共振發電的應用效率作探討。



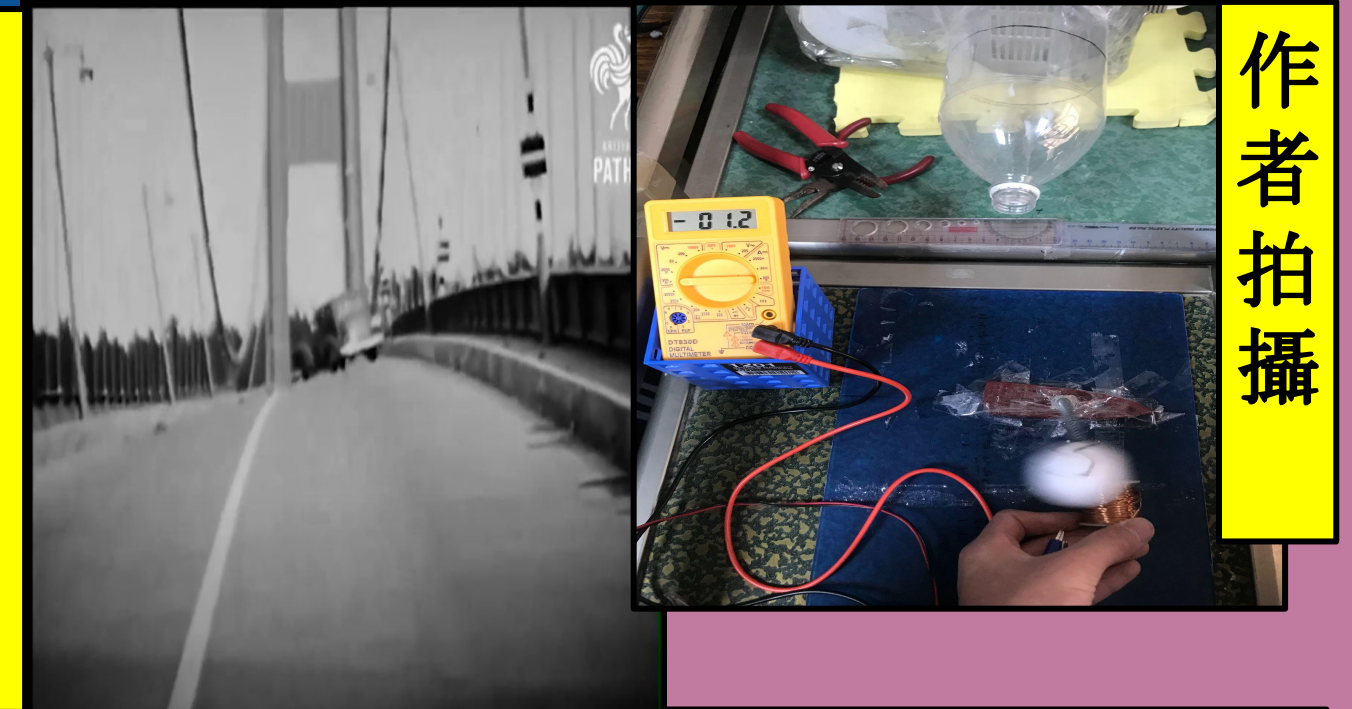
## 作品簡報



# 壹、研究動機

有關一座橋被風吹斷的「卡門渦街」現象影片引起震撼。而「無葉風扇」也利用此原理，因此如果可以運用「卡門渦街」進行發電，那風力發電機就不會有葉片斷裂的危險了，所以決定研究卡門渦街發電的可行性。

(Youtube: 微風吹倒大橋背後的原理卡門渦街和共振)



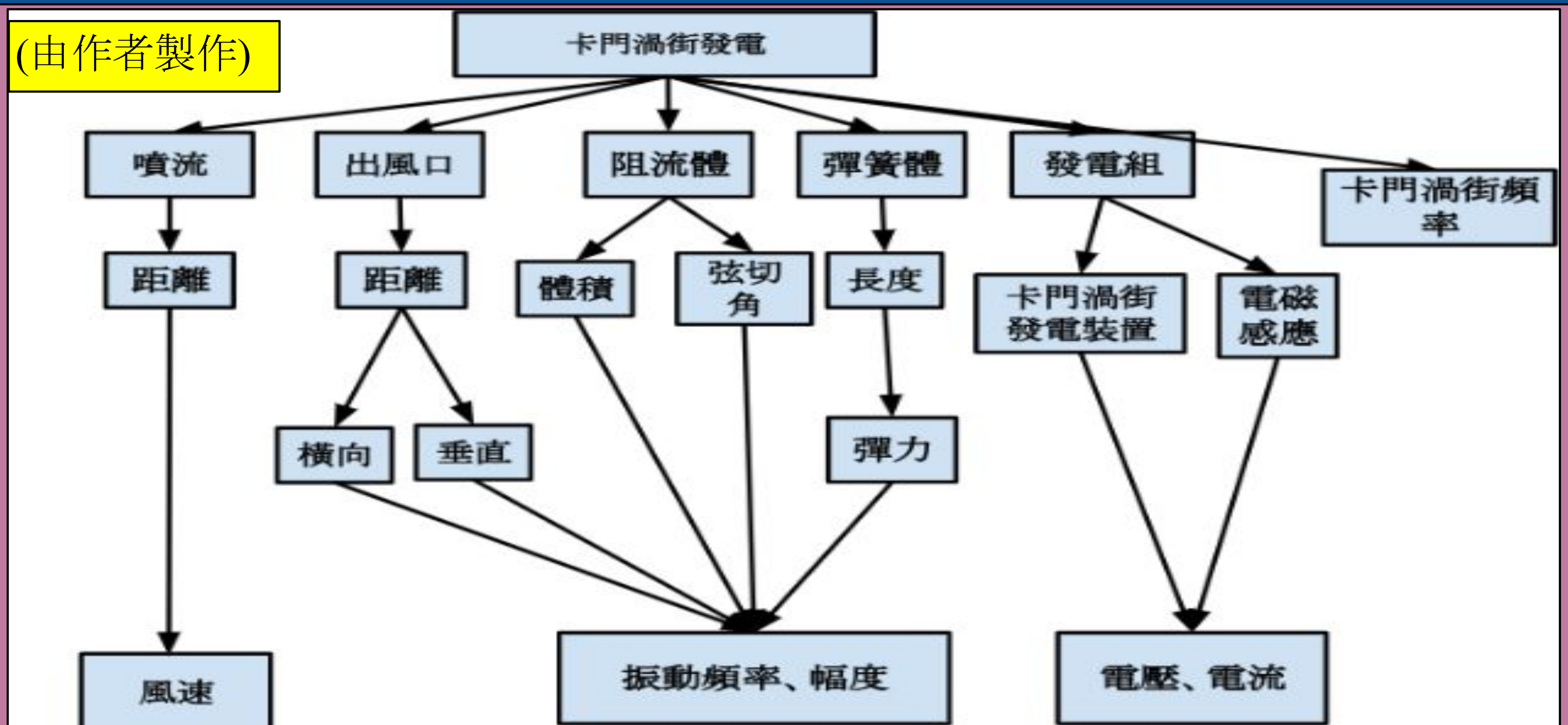
作者拍攝

# 貳、研究目的

- 一、噴流距離對風速的影響
- 二、阻流體與出風口距離橫向 3公分縱向距離對振動頻率及幅度的影響
- 三、阻流體直徑對振動頻率、幅度的影響
- 四、阻流體運動與否，其卡門渦街頻率的偵測與探究
- 五、卡門渦街共振效應下，阻流體直徑對風阻力的影響與彈簧恢復力的探究
- 六、無風力下，彈簧與阻流體組合體的彈力、頻率與振幅測量
- 七、卡門渦街共振效應發電與電磁感應發電效果的比較

# 參、研究方法

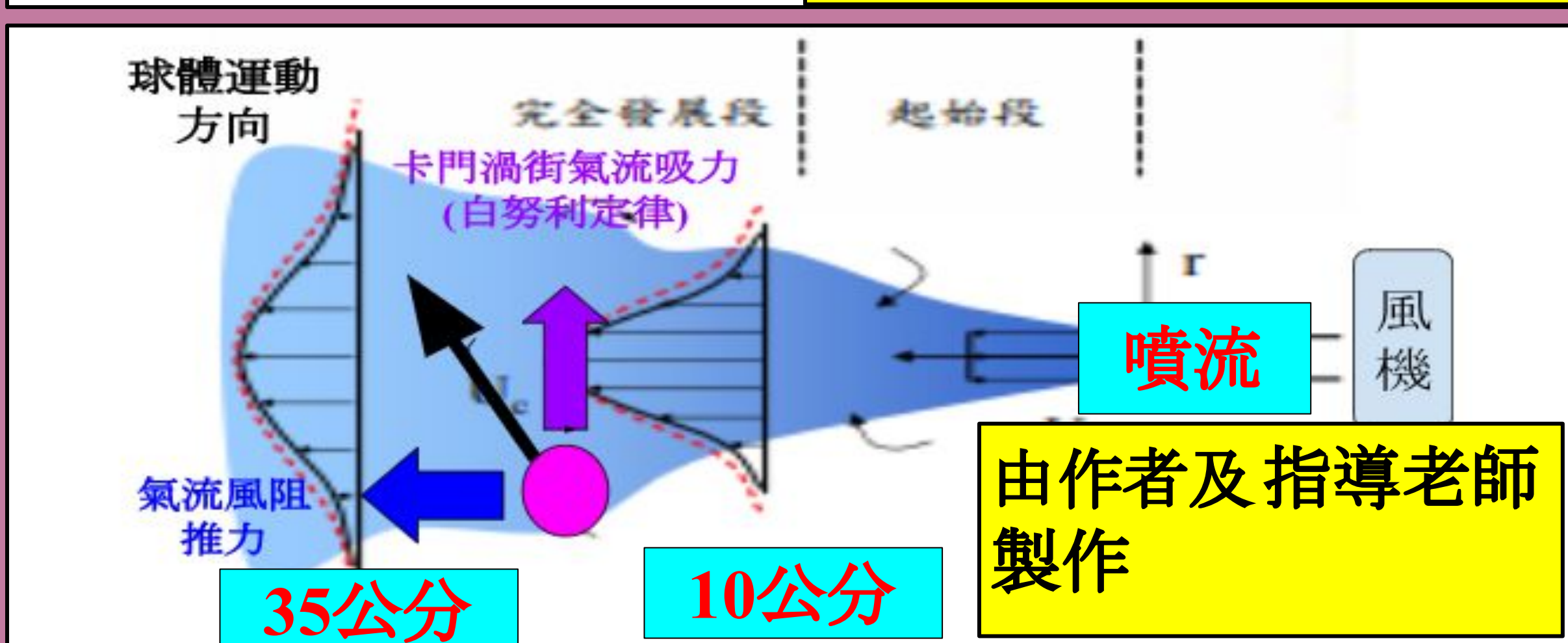
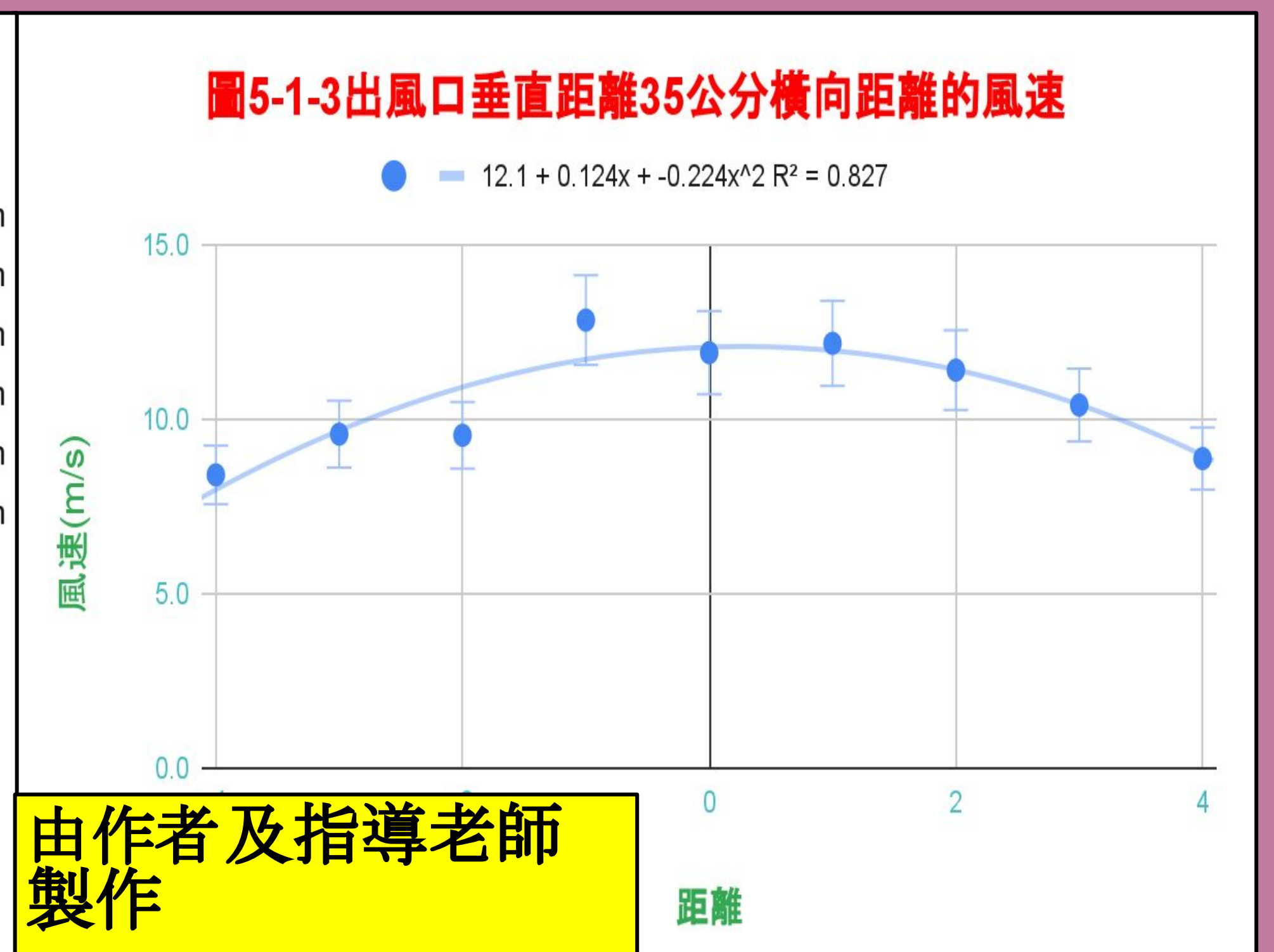
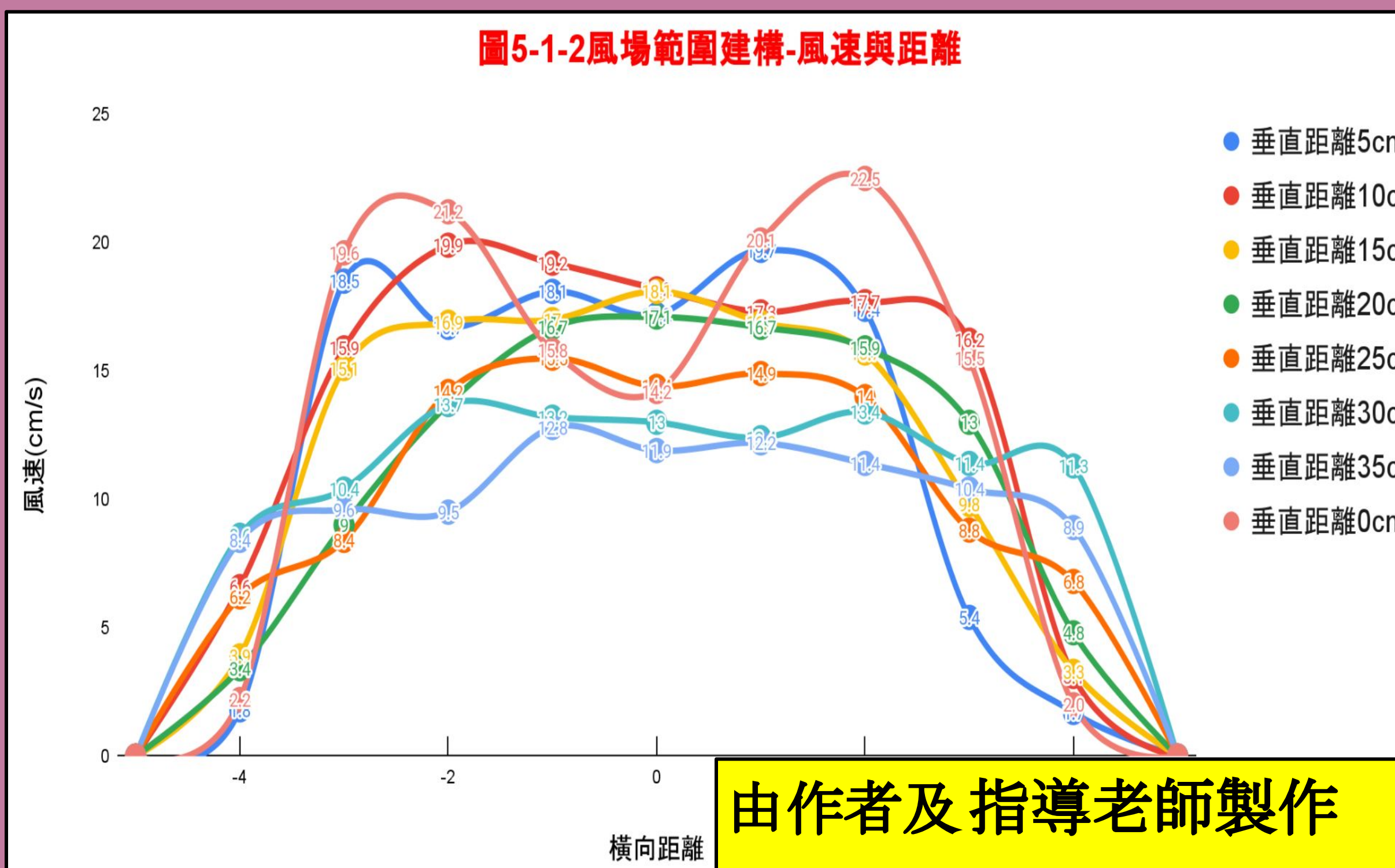
(由作者製作)



# 肆、研究結果與討論

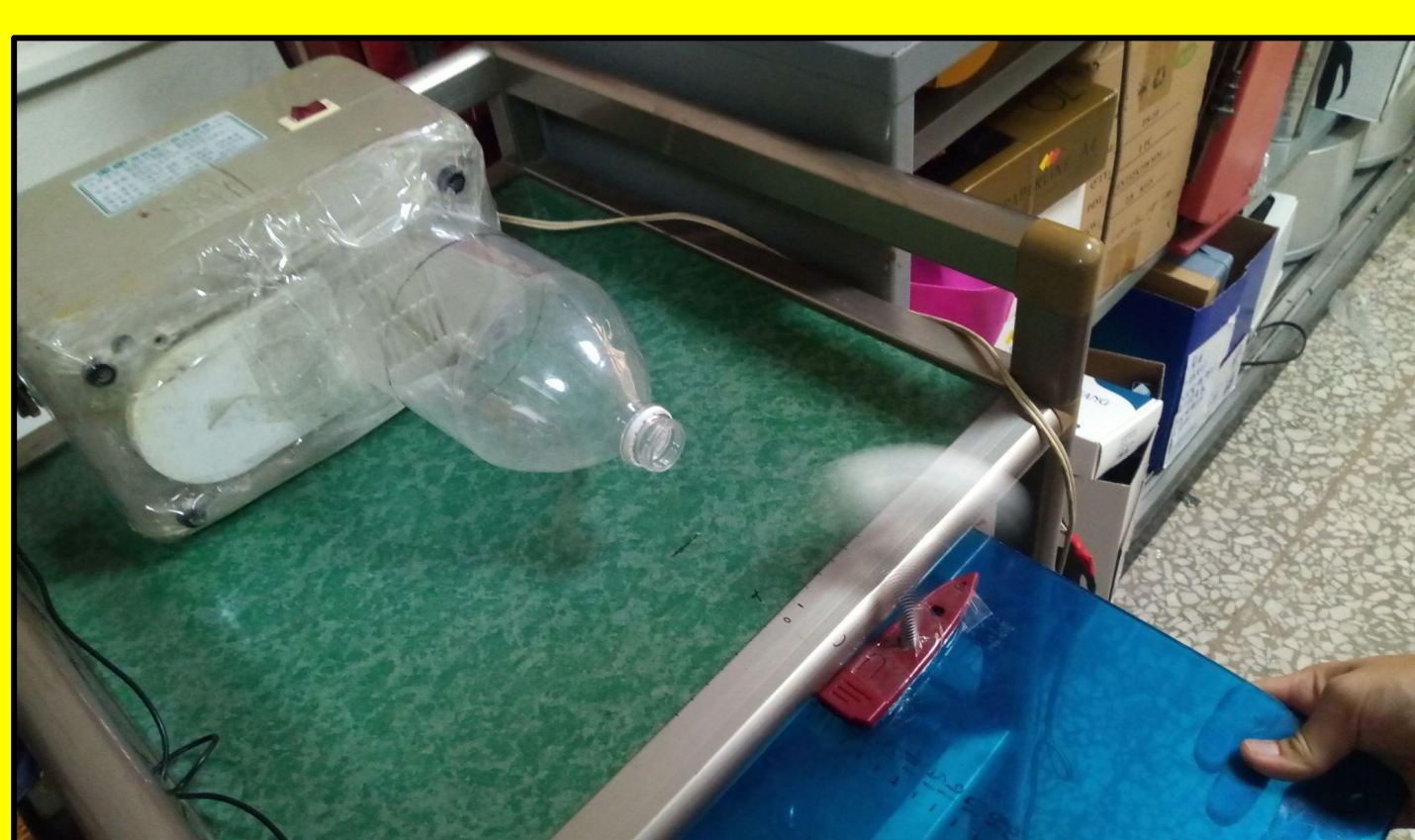
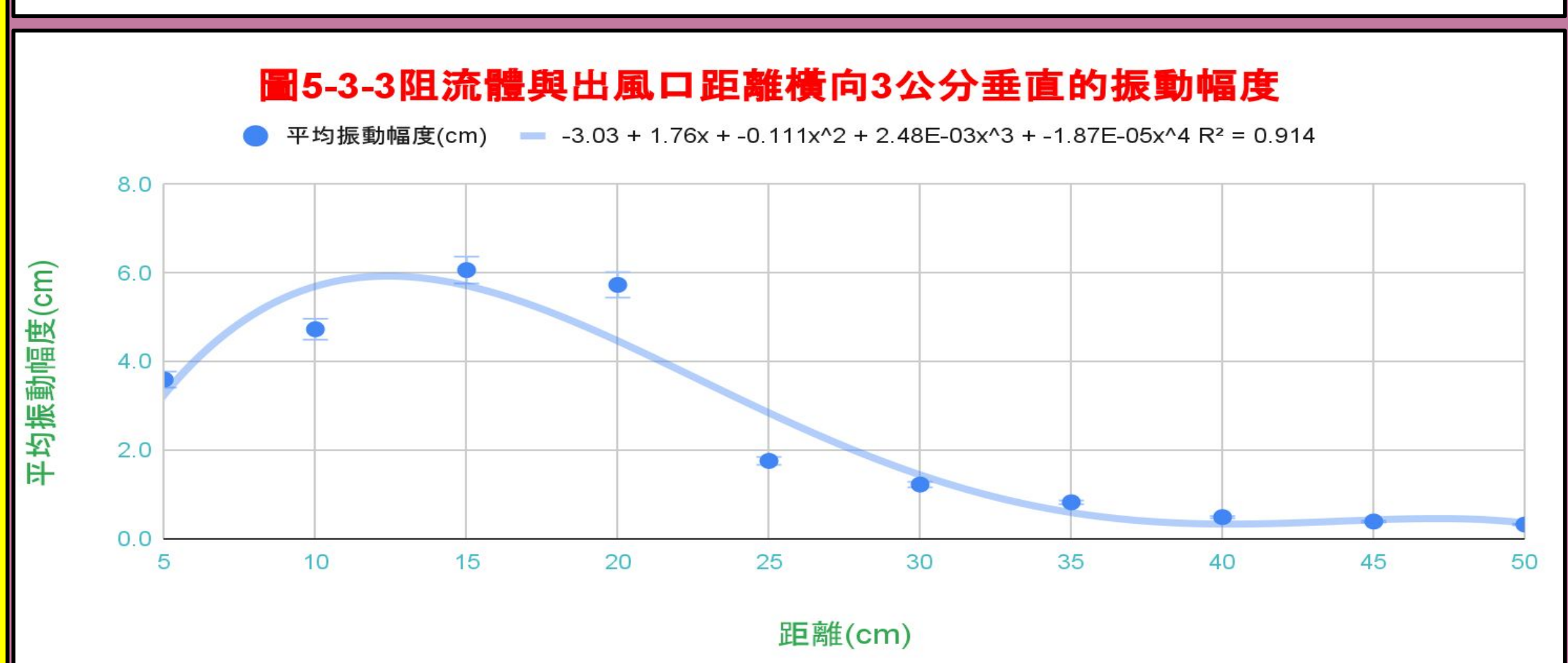
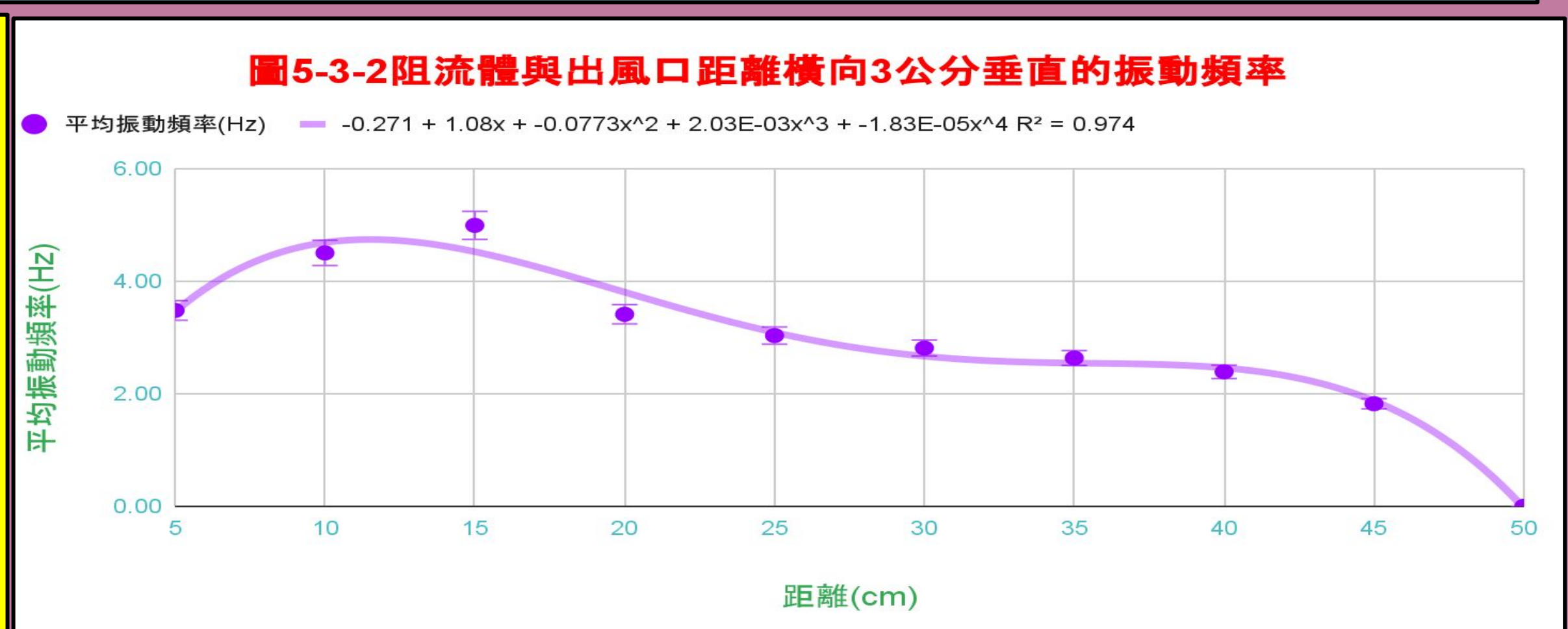
## 一、噴流距離對風速的影響

- 1.(WHAT):縱向35公分的橫向距離風速差異不大。本風場範圍是橫向正負3公分與縱向35cm內。
- 2.(WHY):在出風口縱向距離超過35公分時，已經離開噴流的發展區，所以風速接近差異不大。
- 3.(HOW):用直徑4cm球形阻流體及6.5cm直立式彈簧座，在出風口觀察振動頻率及振幅表現。



## 二、阻流體與出風口距離橫向 3公分縱向距離對振動頻率及幅度的影響

- 1.(WHAT):以距離出風口橫向距離3公分縱向距離15公分的振動頻率及幅度最大。
- 2.(WHY):本實驗風場10cm後為氣流穩定可以形成渦流的區域(射流完全發展段)，所以縱向距離15cm可得最佳頻率與振幅。
- 3.(HOW):如何使阻流體在出風口正前方振動頻率達到最多才能加以應用。(圖片皆由作者親自拍攝及製作)



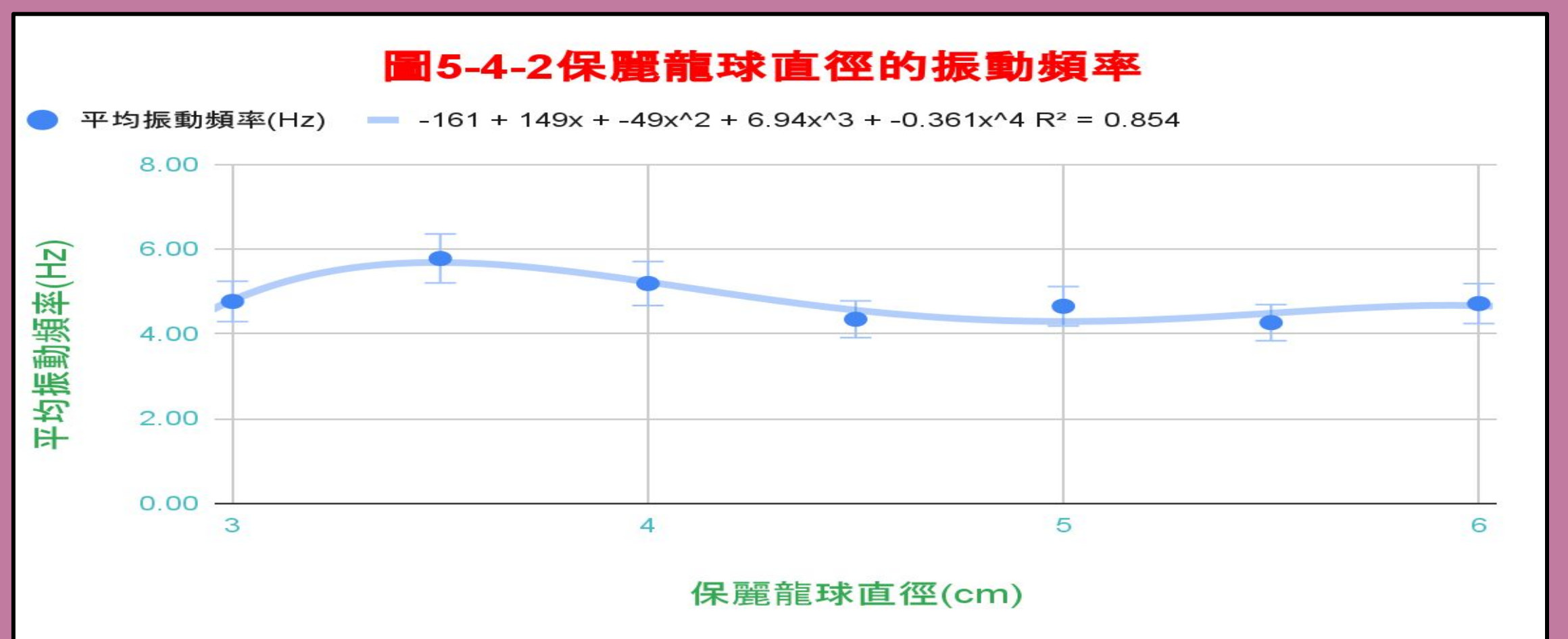
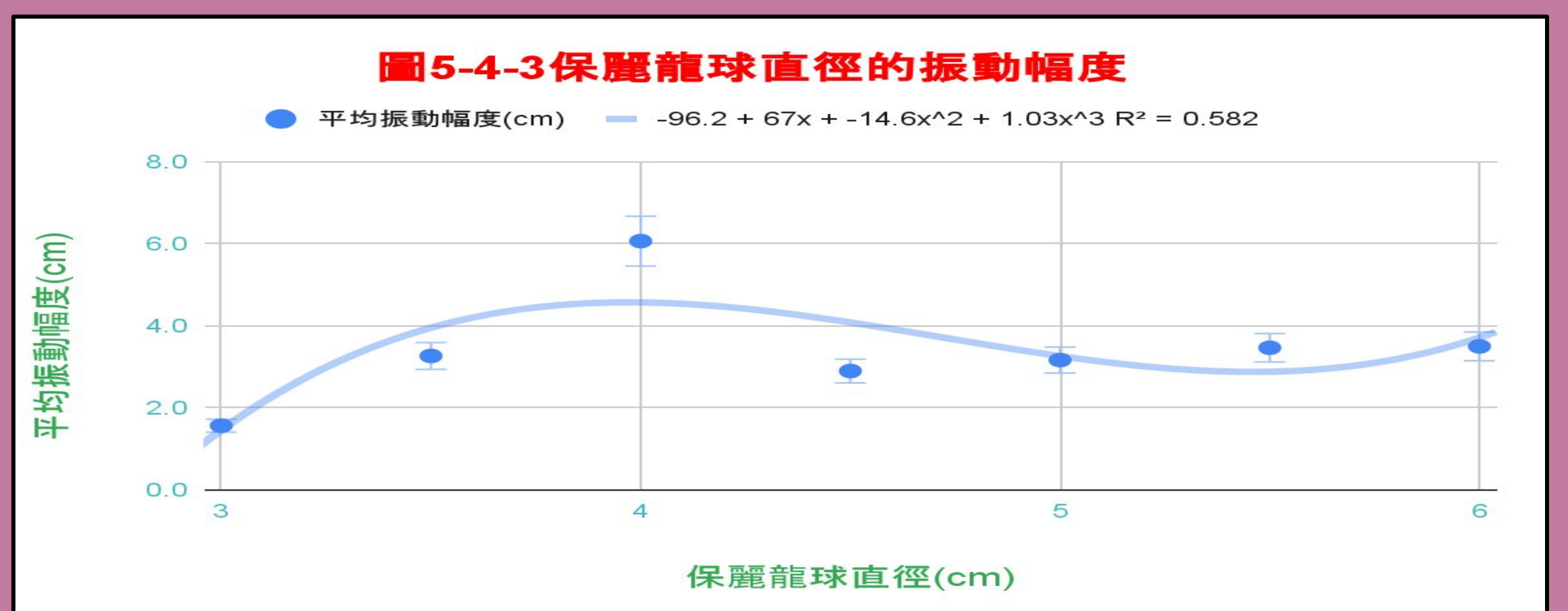


# 「卡最電」

## 運用卡門渦街共振進行發電的研究

### 三、阻流體直徑對振動頻率、幅度的影響

- (WHAT):阻流體直徑 3.5公分時振動頻率最多,直徑 4公分振動幅度最大。
- (WHY):阻流體不同直徑對振動頻率影響不大。在直徑 4公分時,風阻力+卡門渦街現象=彈性恢復力,此時振幅最大,方向也規律。
- (HOW):探討風阻力及彈簧長度的配合,使阻流體發生最大的共振頻率與振幅。(圖片皆由作者親自拍攝及製作)



### 四、阻流體運動與否,其卡門渦街頻率的偵測與探究

- (WHAT):兩個峰值為0.5次端點間振動。在阻流體固定時,1倍直徑處的頻率約為 0.86Hz,2倍直徑處的頻率約為 1.23Hz,刪除誤差後為 0.79Hz。在阻流體晃動下頻率不變,1倍直徑處  $f=0.74$ Hz,2倍直徑  $f=1.14$ Hz。只有風場無阻流體時,不論距離,圖譜均沒有明顯峰。值。
- (WHY):兩個峰值為0.5次端點間振動可能是平衡位置-單邊移動-平衡位置,可能是簡諧運動中速度最大處。由公式得出雷諾數  $Re_D=397.79$ ,介於可以形成卡門渦街的區域 ( $47 < Re < 10^5$ )且提供不穩定型的渦街,  $Re_D=397$ 時,  $st$ 數(斯特勞哈爾數 Strouhalnumber)為0.2。再帶入公式,得渦街頻率約為 0.76Hz。測出的頻率與公式算出的頻率相近。
- (HOW):阻流體運動會影響渦街頻率,渦街頻率與振幅與發電量的關係可以再進一步研究。

圖譜	1	2	3	4	5
波峰數目	6	7	7	6	6
次數	3.0	3.5	3.5	3.0	3.0

時間	彈簧-質點系統	位移(方向)	速度(方向)	加速度(方向)
1		極大(→)	零	極大(←)
2		零	極大(←)	零
3		極大(←)	零	極大(→)
4		零	極大(→)	零
5		極大(→)	零	極大(←)

(蔡坤憲(2022),從「物理感」來理解簡諧運動的數學公式,物理雙月刊)

運動方式	測量位置	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均頻率(Hz)	標準差
阻流體不動	4cm 時間(秒) 頻率(Hz)	t=0.40 f=0.8	t=0.50 f=1.0	t=0.38 f=0.76	t=0.49 f=0.98	t=0.39 f=0.78	0.86	SD=0.116
	8cm 時間(秒) 頻率(Hz)	t=0.39 f=0.78	t=0.33 f=0.66	t=0.47 f=0.94	t=0.90 f=1.80	t=1.0 f=2.00	1.23	SD=0.618
阻流體晃動	4cm 時間(秒) 頻率(Hz)	t=0.8 f=0.63	t=1.2 f=0.42	t=0.8 f=0.63	t=0.5 f=1.00	t=0.6 f=0.83	0.70	SD=0.224
	8cm 時間(秒) 頻率(Hz)	t=0.4 f=1.25	t=0.6 f=0.83	t=0.8 f=1.60	t=0.5 f=1.00	t=0.5 f=1.00	1.14	SD=0.30
	12cm 時間(秒) 頻率(Hz)	t=1.3 f=0.38	t=1.1 f=0.45	t=0.3 f=1.67	t=1 f=0.5	t=0.6 f=0.83	0.766	SD=0.53

$$Re_D = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$Re_D = (1.2 \cdot 0.15 \cdot 0.04) / 0.0000181 = 397.79$$

$$St = 0.212 \left(1 - \frac{12.7}{Re}\right), Re > 300$$

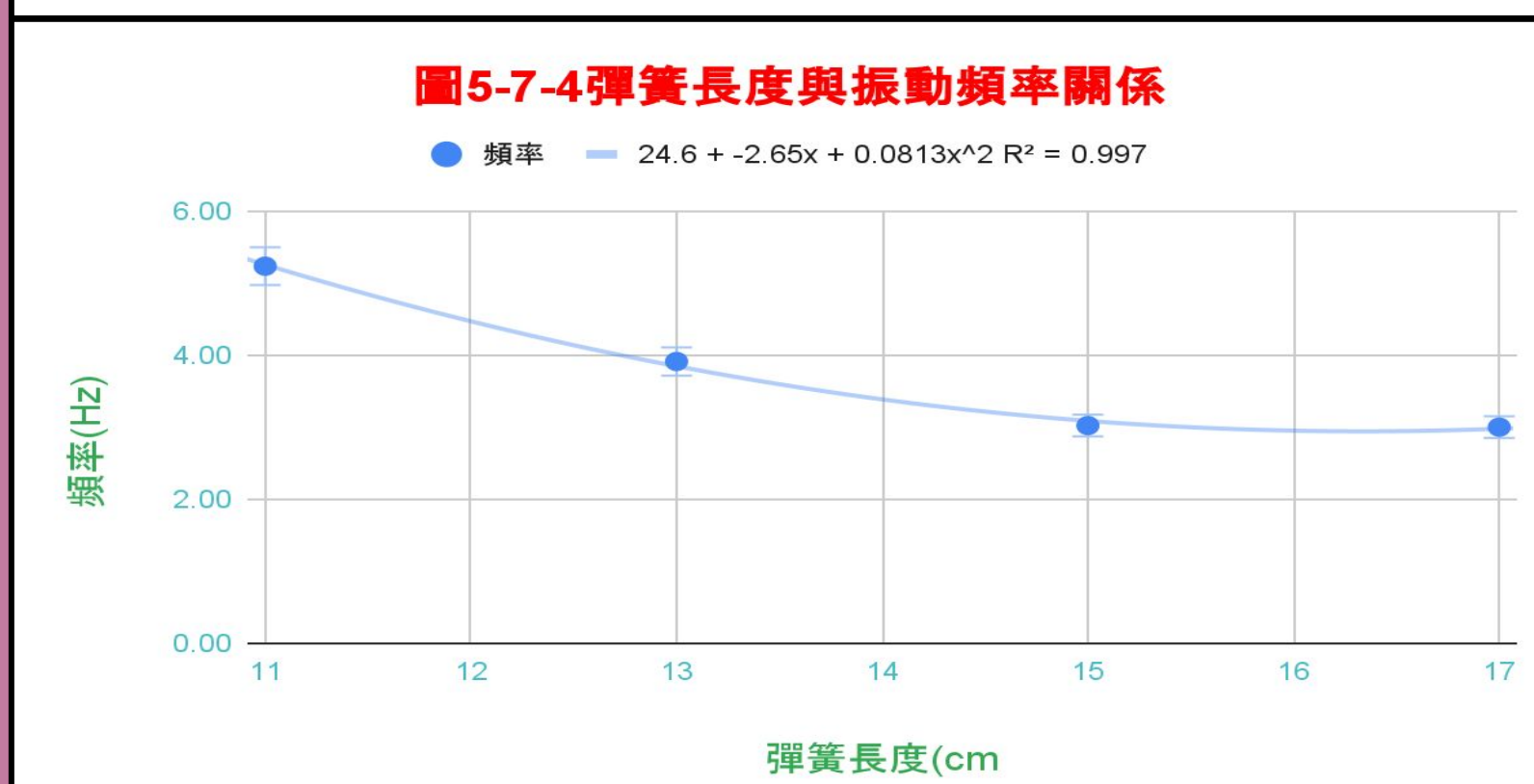
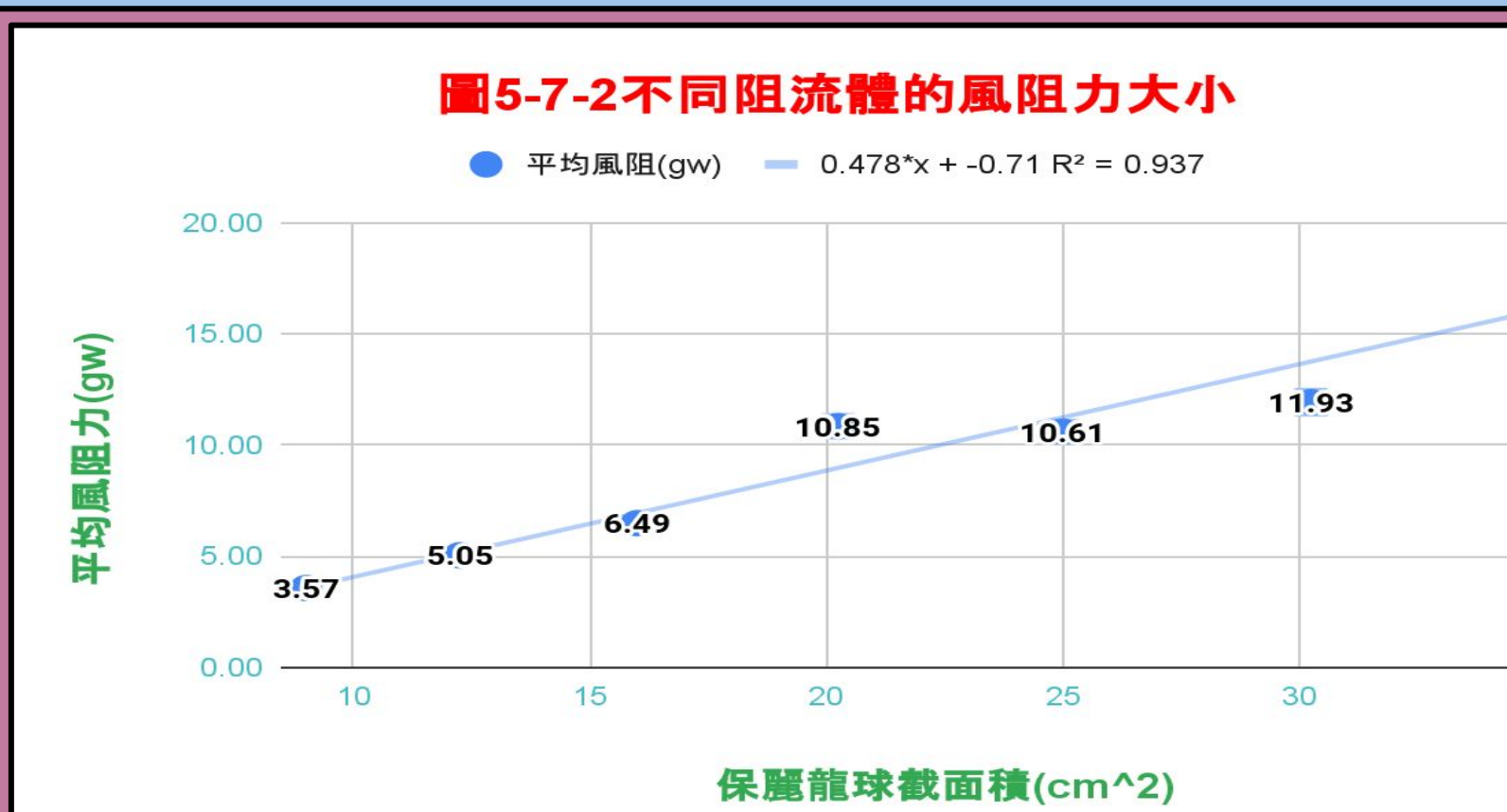
$$St = \frac{f \times d}{V}$$



以上圖表皆由作者拍攝及製作

### 五、卡門渦街共振效應下,阻流體直徑對風阻力的影響與彈簧恢復力的探究

- (WHAT):阻流體直徑 6公分時風阻力最大。本實驗選用直徑 4cm受風阻力 6.49gw,對應下圖,彈簧相同晃動振幅下受力 147.1gw,且相同彈簧的長度與頻率成二次方正比 ( $R^2=0.997$ )。
- (WHY):截面積越大,風阻力越大。由公式發現  $f \propto \sqrt{k}$  彈簧長度越長,彈力越小,符合實驗結果,由阻流體受力與彈簧恢復力關係知道,卡門渦街效應能幫助彈簧振動。
- (HOW):本實驗阻流體的晃動效應為風阻力+卡門渦街效應+彈簧形變力共同提供,且渦街效應使彈簧晃動的效益大約是風阻力的20倍!(147.1/6.49),選用自然頻率靠近阻流體的彈簧(本實驗阻流體  $f=5.19$ Hz,彈簧  $f=5.80$ Hz),能使阻流體晃動效果最佳,動能轉換為電能最大化。(圖片由作者親自拍攝及製作)



彈簧長度	第一次	第二次	第三次	平均彈簧彈力	頻率1	頻率2	頻率3	平均頻率
6.5	143.18	143.98	154.12	147.1	5.70	6.10	5.60	5.80





