

中華民國第 65 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

051804

流體力學的潛力-卡門渦街現象的探究與應用

學校名稱：臺北市立大直高級中學

作者：	指導老師：
高二 楊東霖	謝俊儀
高二 周宸漢	
高二 張芸潔	

關鍵詞：卡門渦街、最大擺角、共振發電

摘要

本實驗主要在一條整流過的水道中放置一可左右擺動的圓柱狀阻流體。當流體流經該阻流體時，其後方會形成卡門渦街，導致阻流體因漩渦剝落所產生的反作用力而左右擺動。由於此現象是受到卡門渦街剝落而強制驅動，透過觀察此擺動現象，可測得渦街的剝落頻率。

本研究進一步探討不同黏滯性液體對阻流體擺動頻率的影響。同時，我們也在阻流體前後不同距離處設置第二個圓柱體，以分析其對擺動頻率與擺幅的影響，最後我們運用我們設計的發電機，來尋找我們運用所想要找到的最佳解。

壹、前言

一、研究動機

本研究探討的「卡門渦街」現象，是指當流體流經阻流體時，其後方會交錯且周期性地產生兩排非對稱的漩渦結構。這些漩渦交替剝落，不僅使流場呈現規律的渦流模式，亦會對阻流體產生周期性的壓力差，進而誘發其振動或擺動。尤其當雷諾數介於 47 至 10^5 之間時，漩渦剝落現象更加顯著，阻流體也會出現明顯的擺動行為。

卡門渦街不僅存在於實驗中，也曾在真實世界中造成重大影響。美國歷史上著名的塔科馬吊橋倒塌事件，正是因風與橋體產生共振，而導致結構破壞，此為卡門渦街所引發的振盪效應之一。此外，世界各地亦有多起建築物因風場引起的結構振動而受損的案例，顯示卡門渦街對工程結構的潛在威脅不容忽視。

此現象啟發我們進一步思考：若能深入理解其成因與特性，是否能加以應用或控制？例如，若能透過適當設計與控制手段，抑制卡門渦街對建築結構的破壞性影響，或許能有效提升建築物在風場與水流環境中的耐久性與安全性。另一方面，隨著台灣近年面臨日益嚴峻的電力短缺問題，能源轉型與綠色發電已成為刻不容緩的議題。因此我們提出一個想法：既然卡門渦街能引發阻流體的規律擺動，是否能將這種力學能轉化為可利用的電能？因此，本研究希望透過實驗，探討不同參數（如流速、阻流體的特徵長度、擺動頻率與振幅等）對發電功率的影響，並尋找出最佳化參數組合，以提升能量轉換效率。藉由本研究，我們希望能為水資源豐沛的台灣提供一種結合了流體力學的能源發電方式，為未來永續電力的發展貢獻一份心力。

二、研究目的

(一) 阻流體尺寸和水流流速對剝落頻率的影響。

- (二) 阻流體尺寸在不同液體中對剝落頻率的影響。
- (三) 阻流體尺寸與產生最大擺幅時所對應的流速關係。
- (四) 在阻流體 (P1) 前後不同距離下，放置另一個固定圓柱阻流體 P2 對 P1 摆幅的影響，並探討不同流速對振幅的影響。
- (五) 延續上述 (四)，在固定流速的情況下，改變不同阻流體 (P1) 大小、改變阻流體 (P1、P2) 之間的距離，探討電壓的變化

三、文獻回顧

(一) 卡門渦街基本介紹

卡門渦街是一種流體力學現象，當雷諾數介於約 47 至 10^5 之間時，流體流經阻流體後，其後方會形成兩排交錯、周期性剝落的漩渦結構。其中一排渦旋呈順時針方向旋轉，另一排則逆時針旋轉，漩渦以固定頻率一個接一個剝落（如圖 1.1）。

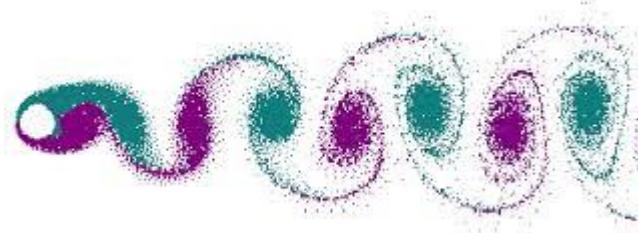


圖 1.1 本圖片引自維基百科—卡門渦街（出處詳圖片來源一）

如圖 1.2 中的紅色區域所示，漩渦在剝落時會有反作用力，使阻流體產生左右擺動。當擺動頻率與漩渦剝落頻率一致時，即產生共振現象，進而使擺動幅度顯著增加。這種現象在歷史上曾造成如橋梁與建築物倒塌等災難，顯示其背後蘊藏的能量之巨大。因此，本研究希望能將此現象轉化為發電的動力來源。

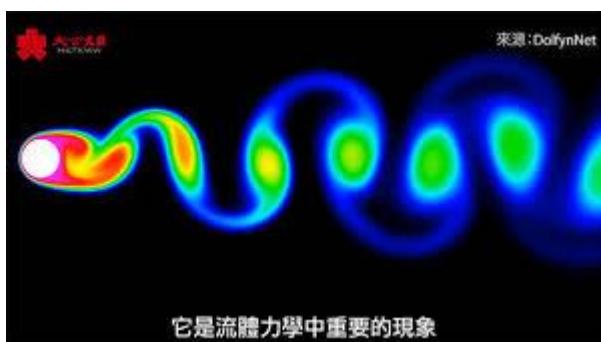


圖 1.2 本圖片引自大公網—深圳賽格大廈为何会摇动？原来是“卡门涡街” 共

振！【来点知识 EP10】(出處詳圖片來源二)

(二) 基本公式

卡門渦街這個流體動力學現象是當流體流經阻流體時，產生漩渦剝落且是交替、周期性地發生。阻流體會因流體瞬間壓力的不同與渦街剝落的反作用力擺動。其中，擺動頻率與流速成正比，與阻流體的特徵長度（阻流體截面寬度）成反比。卡門渦街頻率與流速和阻流體特徵長度的關係可以用下方的基本公式表示。

$$f = \frac{S_t V}{d}$$

f ：頻率

S_t ：斯特勞哈爾數

V ：流速

d ：阻流體接觸寬度

上述的斯特勞哈爾數（ S_t ）是流體力學中用來描述周期性非定常流動的一個無量綱數。

在流體力學中另一個非常重要的無量綱量就是雷諾數，用來表示流體速度不同所產生相對內部運動的流體內部慣性力與黏滯力的比值。

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\rho u L}{\mu}$$

ρ =流體的密度（SI 單位： kg/m^3 ）

u =流速（ m/s ）

L =特徵長度（阻流體受力截面寬度）（ m ）

μ =流體的動態黏度（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ）

ν =流體的運動黏度（ m^2/s ）。

上述的兩個無量綱量是透過列出流體力學中的各項變因的因次並經過矩陣運算後所得出的唯二解，包含頻率、流速、黏度、密度還有阻流體特徵長度。

由於兩者皆為無因次量，兩者應能呈現單一線性關係，透過代入我們的實驗數據分析兩者間關係並作圖可以驗證實驗的誤差與正確性。

例如圖 2.即是長圓柱繞流中雷諾數與斯特勞哈爾數的關係。

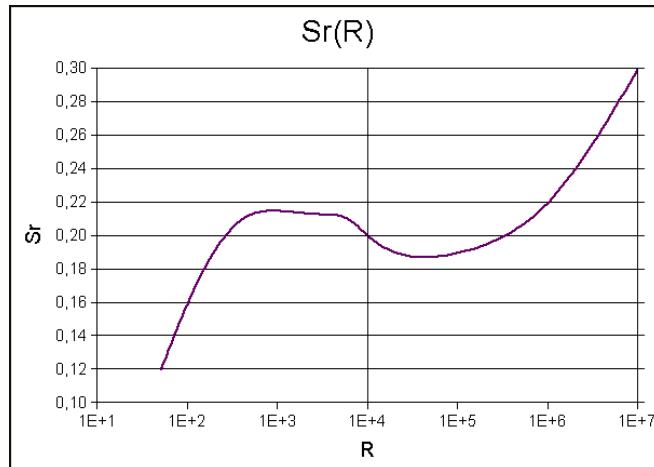
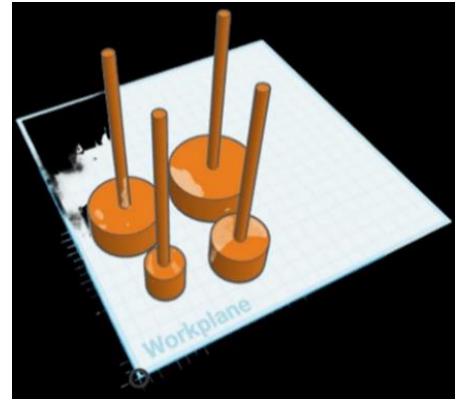


圖 2. 本圖片引自維基百科—斯特勞哈爾數（出處詳圖片來源三）

貳、研究設備及器材

- 一、用壓克力板加工後的水箱，圖 3-1. 二、抽水馬達*10，圖 3-2.。
- 三、水管*10 圖 3-3。四、尺寸不同的圓柱阻流體圖 3-4。五、電腦圖 3-5。六、3D 列印機圖 3-6。七、壓克力板圖 3-7。八、3D 列印線材圖 3-8。九、清淨海環保洗手乳圖 3-9。十、六邊形整流器圖 3-10。十一、示波器圖 3-11。十二、銅線圖 3-12。十三、強力磁鐵圖 3-13。

	
壓克力板加工後的水箱，圖 3-1（本圖片由作者自行拍攝）	抽水馬達*10，圖 3-2（本圖片由作者自行製作）



水管*10，圖 3-3（本圖片由作者自行製作）

尺寸不同的圓柱阻流體，圖 3-4（本圖片由作者自行拍攝）



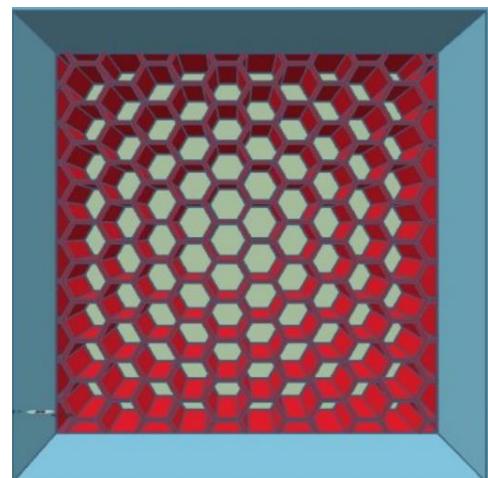
電腦，圖 3-5（本圖片由作者自行製作）

3D 列印機，圖 3-6（本圖片由作者自行製作）



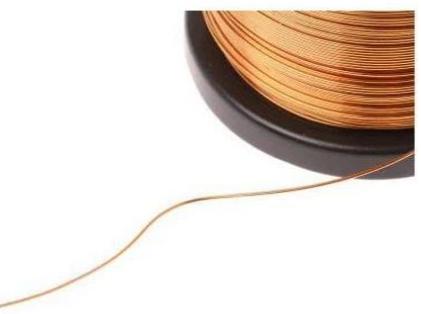
壓克力板，圖 3-7（本圖片由作者自行製作）

3D 列印線材，圖 3-8（本圖片由作者自行製作）



清淨海環保洗手乳，圖 3-9（本圖片由作者自行製作）

六邊形整流器，圖 3-10（本圖片由作者自行製作）

 <p>DSO3100E</p>	
示波器，圖 3-11（本圖片由作者自行製作）	銅線，圖 3-12（本圖片由作者自行製作）
	
強力磁鐵，圖 3-13（本圖片由作者自行製作）	

參、研究過程或方法

一、文獻回顧

文獻中，使用染料追蹤法，將圓柱穿上一個孔，並在孔內放置染料，藉由控制兩圓柱的距離、半徑大小、數量多寡，分析圓柱的停滯點與振幅變化 ($\tan \theta$)，如圖 4。

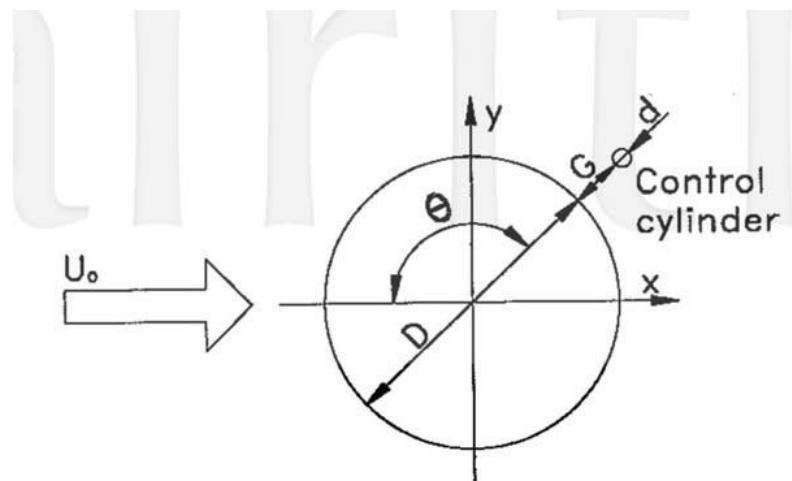


圖 4. 本圖片引自 airiti Library _ 抑制圓柱渦漩剝離之實驗研究
(出處詳圖片來源四)

二、實驗裝置製作

我們在壓克力水箱中央裝了一塊垂直檔板，將水箱的內部空間劃分成兩個部分，並設置一個水平壓克力板作為主要實驗用的水平水道。利用抽水馬達將一側的水抽到另一側製造水位差，產生水流，再透過調節數顆抽水馬達控制流速。

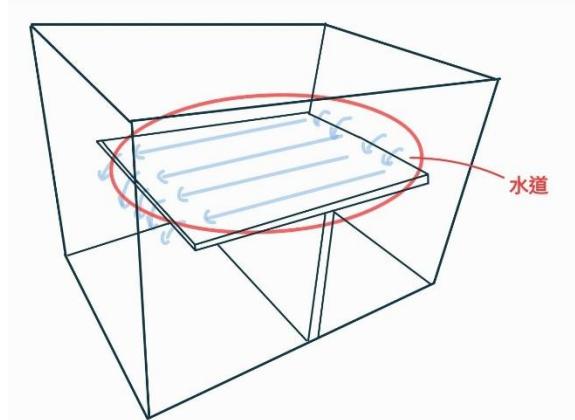


圖 5. (本圖片由作者自行製作)

水道上方安裝了一個自由左右擺動的阻流體，而卡門渦街剝落的反作用力會導致其以固定頻率左右擺動，透過錄影觀察阻流體擺動頻率得到渦街的剝落頻率（如圖 5.）。

在圖 6.中，我們運用細繩勾住擺錘進而讓它左右擺動是我們在探討實驗五時（在固定流速的情況下，改變不同阻流體(P1)大小、改變阻流體(P2)距離，探討電壓的變化）。

三、實驗步驟

實驗(一):阻流體尺寸和水流流速對渦街剝落頻率的影響

- 1.調整不同組流體特徵長度度，固定流速
- 2.錄下影像並觀察其頻率
- 3.重複步驟 1.多次
- 4.錄下影像並觀察其頻率

實驗(二):在流速固定 0.20m/s，阻流體的尺寸在不同液體下對渦街剝落頻率的影響

1. 固定流速與阻流體特徵長度，溶液為肥皂。
- 2.錄下影像並觀察其頻率
- 3.固定流速與阻流體特徵長度，溶液為水
- 4.錄下影像並觀察其頻率

實驗(三): 阻流體尺寸與產生最大擺幅時所對應的流速關係

- 1.量角器尋找阻流體特徵長度與流速在何情況下能產生最大擺幅

實驗(四): 在可自由振盪的阻流體 (P1) 前後不同距離下，放置另一個固定圓柱阻流體 (P2) 對其擺幅的影響，並探討不同流速對振幅的影響

(前、後方的定義: P1 迎向水流的方向為前方: 後 <-----P1<----水流方向--- 前)

- 1.固定流速與阻流體(P1)特徵長度
- 2.在其阻流體(P1)前放置另一個阻流體(P2)
- 3.固定距離每 1cm 將 P2 往前放置，探討阻流體(P2)在不同位置對阻流體(P1)的影響並測量角度

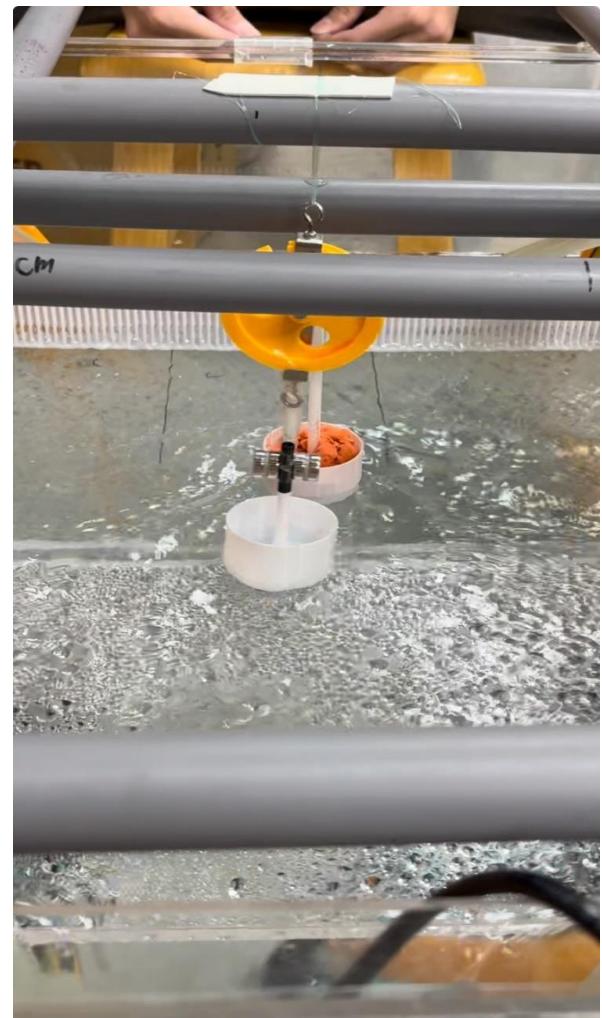


圖 6. (本圖片由作者自行拍攝)

4.在其阻流體(P1)後放置另一個阻流體(P2)

5.固定距離每 1cm 將 P2 往後方放置，探討阻流體(P2)在不同位置對阻流體(P1)的影響並測量角度

實驗(五):在固定流速的情況下，改變不同阻流體 (P1) 大小、改變阻流體(P1、P2)之間的距離，探討電壓的變化

1.固定流速，固定阻流體特徵長度，探討其發電量

2.固定流速，固定阻流體特徵長度，並新增阻流體(P2)，探討其發電量

3.將(P2)遠離(P1)，每 1cm 紀錄一組數據，探討兩者間距對阻流體(P1)的影響

4.同時改變阻流體 P1、P2 特徵長度，重複步驟 1.、2.、3.。

肆、研究結果

實驗一：阻流體尺寸和水流流速對渦街剝落頻率的影響。

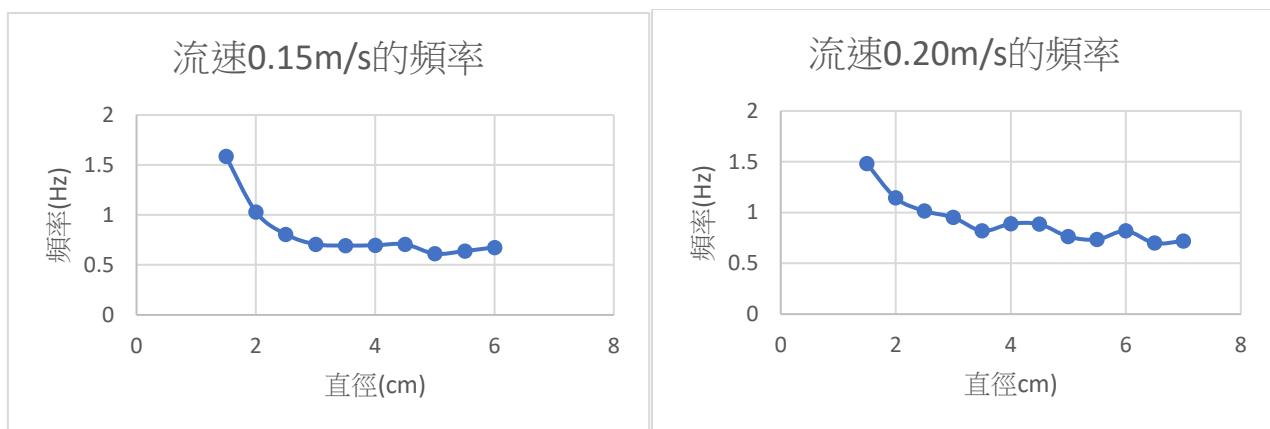


圖 7. (本圖片由作者自行製作)

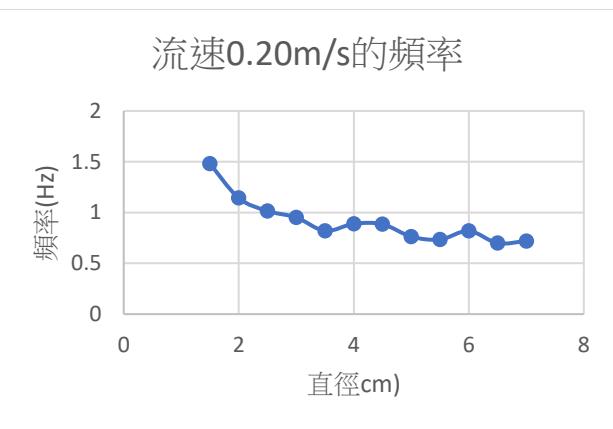


圖 8. (本圖片由作者自行製作)

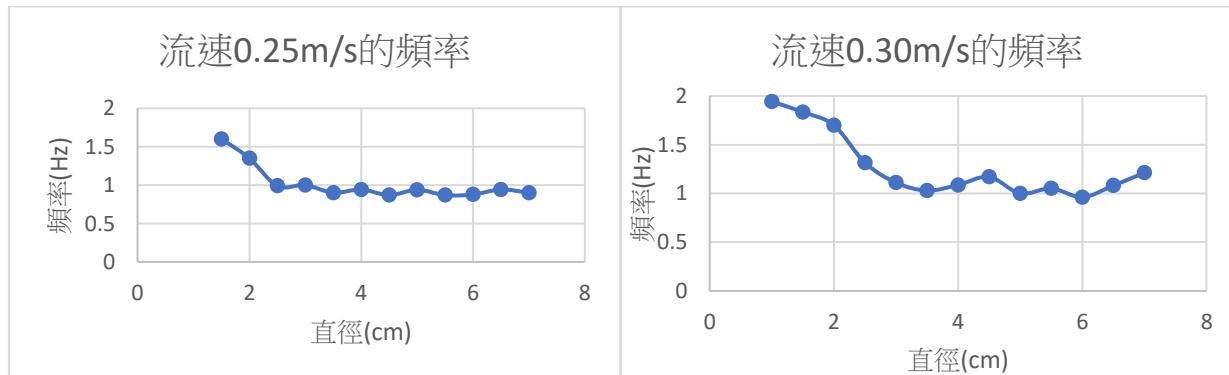


圖 9. (本圖片由作者自行製作)

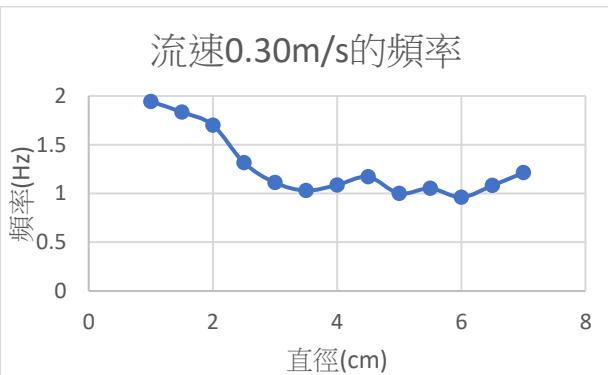


圖 10. (本圖片由作者自行製作)

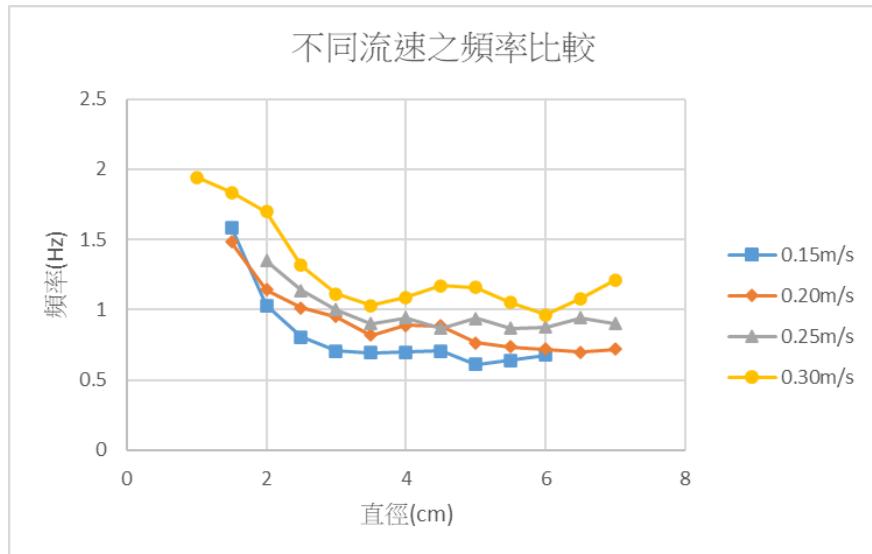


圖 11. (本圖片由作者自行製作)

實驗二：在流速固定 0.20m/s ，阻流體的尺寸在不同液體下對渦街剝落頻率的影響。

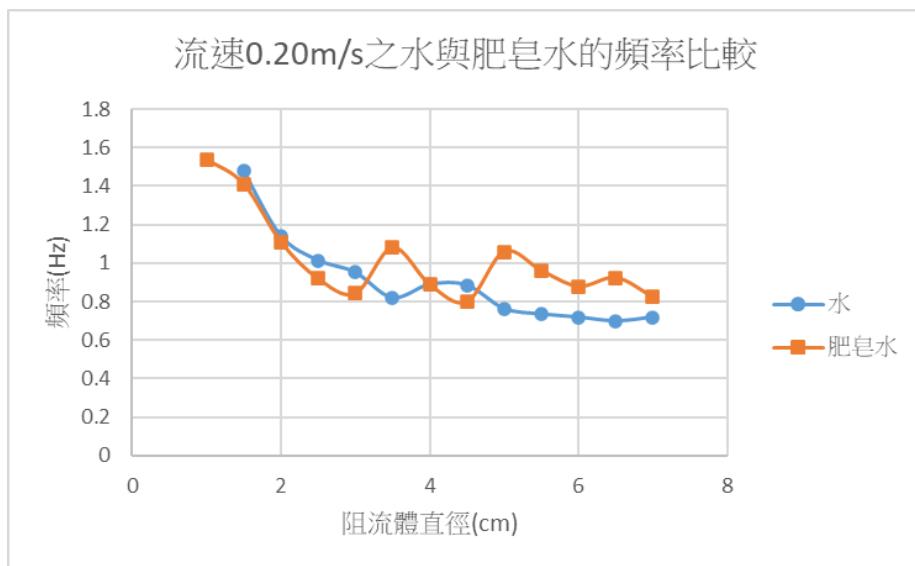


圖 12. (本圖片由作者自行製作)

實驗三：P1 阻流體直徑與產生最大擺角之流速的關係

圓柱體底面直徑	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	4.5cm	5cm
擺幅最大之流速	0.17m/s	0.18m/s	0.19m/s	0.22m/s	0.25m/s	0.34m/s	0.40m/s

表 1.

實驗四：在阻流體 (P1) 前後不同距離下，放置另一個固定圓柱阻流體 (P2)

對 P1 擺幅的影響，並探討不同流速對振幅的影響。

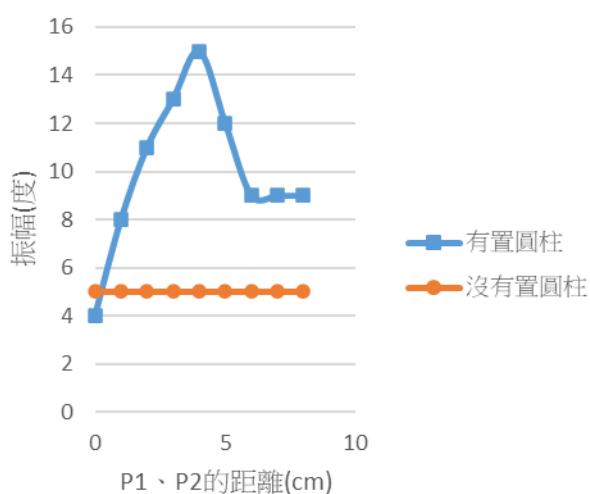
固定流速 ($V=0.20\text{m/s}$)：

一、阻流體 P1(直徑 2cm)前後不同距離處，放置一圓柱體 P2(直徑 4.3cm)，探討 P2 對 P1 振幅的影響。



圖 13. (本圖片由作者自行拍攝) 圖 14. (本圖片由作者自行拍攝)

圓柱 P2 置於阻流體 P1 前



圓柱 P2 置於阻流體 P1 後

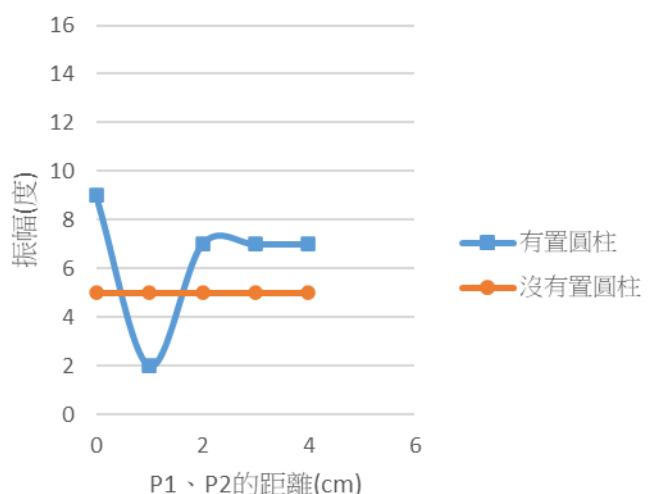


圖 15. (本圖片由作者自行製作)

圖 16. (本圖片由作者自行製作)

(備註：圖 13. 對照圖 15、圖 14. 對照圖 16.)

二、不同直徑之 P1 與最適配流速之探討：

在這裡我們使用 P1 直徑 D 分別為 1.5cm、2cm、2.5cm 的進行實驗，並且使用能造成最大擺幅之流速 (V)，在此情況下增加固定 P2 阻流體(直徑 4.5cm)並觀察 P1 摆幅之變化。實驗中令距離為正表示 P2 置於 P1 前方，距離為負表示 P2 置於 P1 後方，無使用阻流體時，3 組 P1 的最大擺角皆為 4 度)。

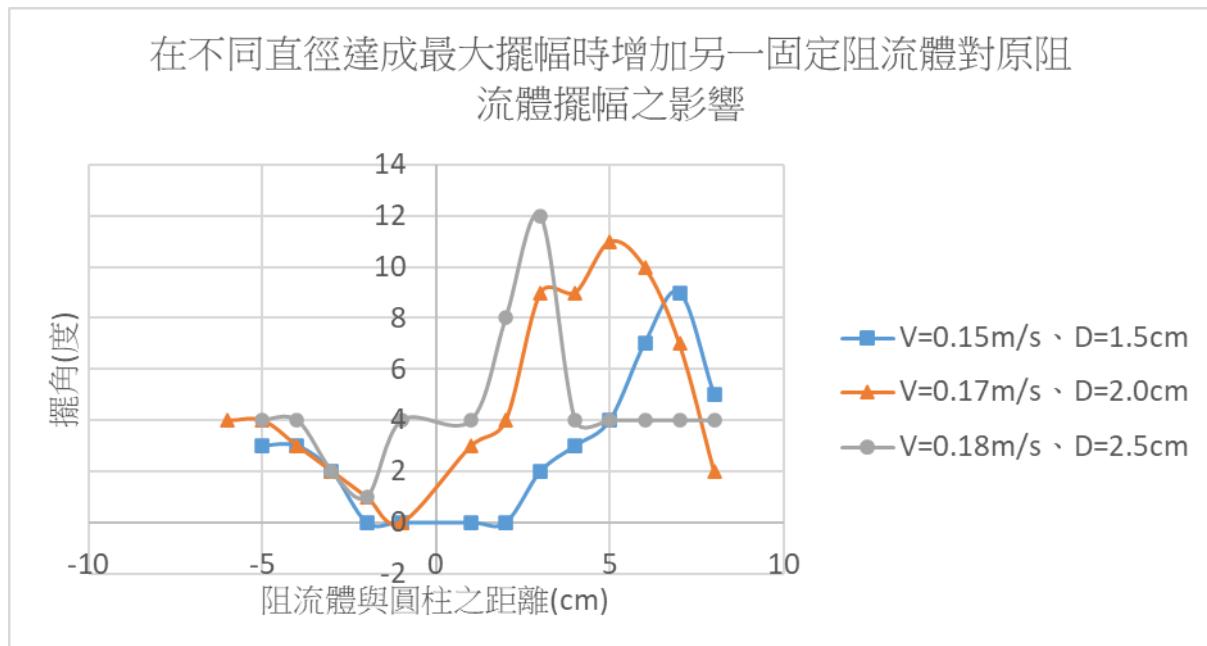


圖 16-1. (本圖片由作者自行製作)

實驗五：固定流速下 2，不同尺寸的相同大小阻流體 P1、P2，其放置間距對電壓的影響

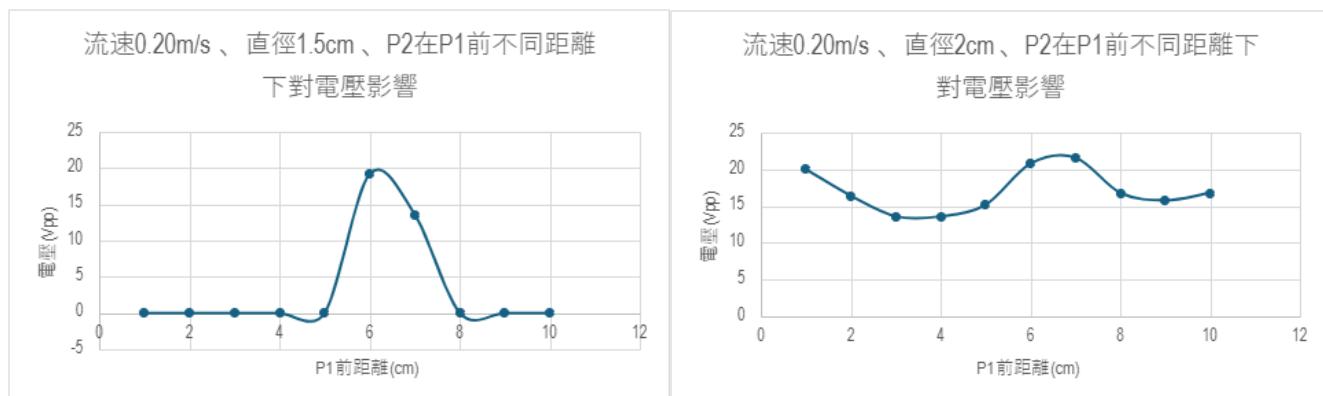


圖 17. (本圖片由作者自行製作)

圖 18. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑2.5cm、P2在P1前不同距離
下對電壓影響

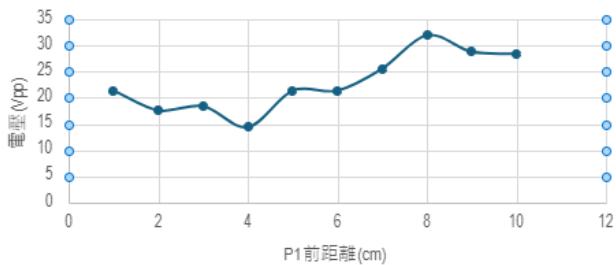


圖 19. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑3cm、P2在P1前不同距離下
對電壓影響

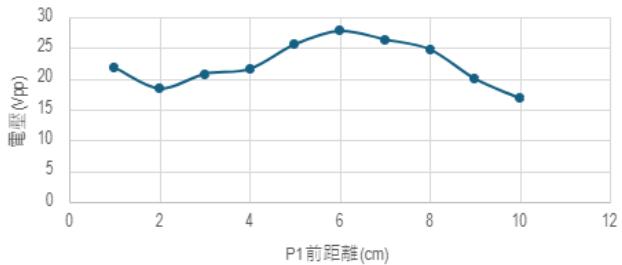


圖 20. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑3.5cm、P2在P1前不同距離
下對電壓影響

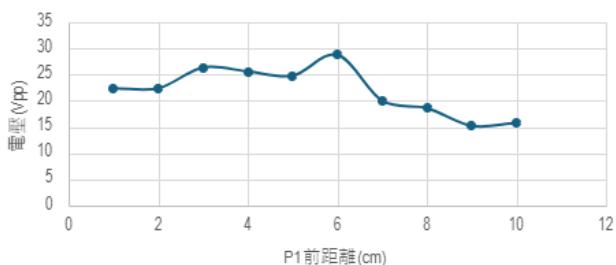


圖 21. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑4cm、P2在P1前不同距離下
對電壓影響

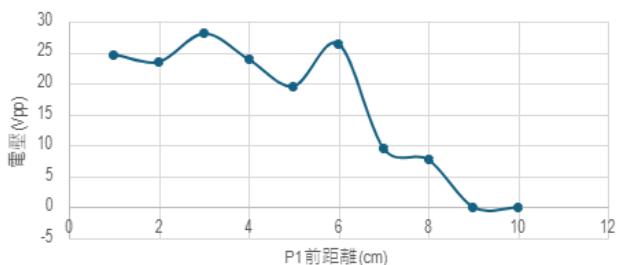


圖 22. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑4.5cm、P2在P1前不同距離
下對電壓影響

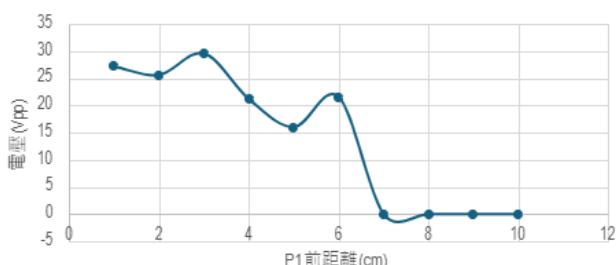


圖 23. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑5cm、P2在P1前不同距離下
對電壓影響

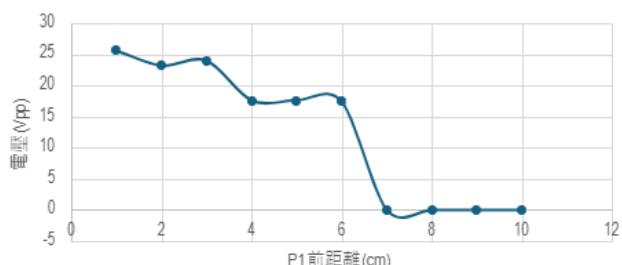
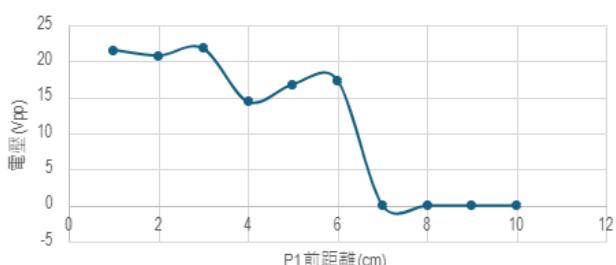


圖 24. (本圖片由作者自行製作)

流速0.20m/s、直徑5.5cm、P2在P1前不同距離
下對電壓影響



流速0.20m/s、直徑6cm、P2在P1前不同距離下
對電壓影響

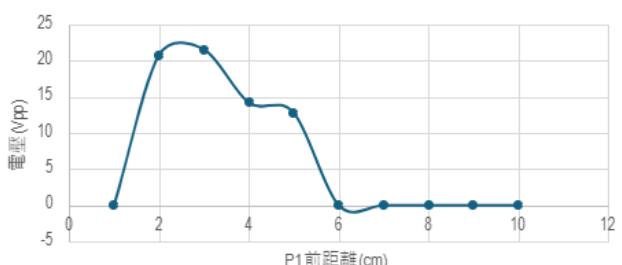


圖 25. (本圖片由作者自行製作)

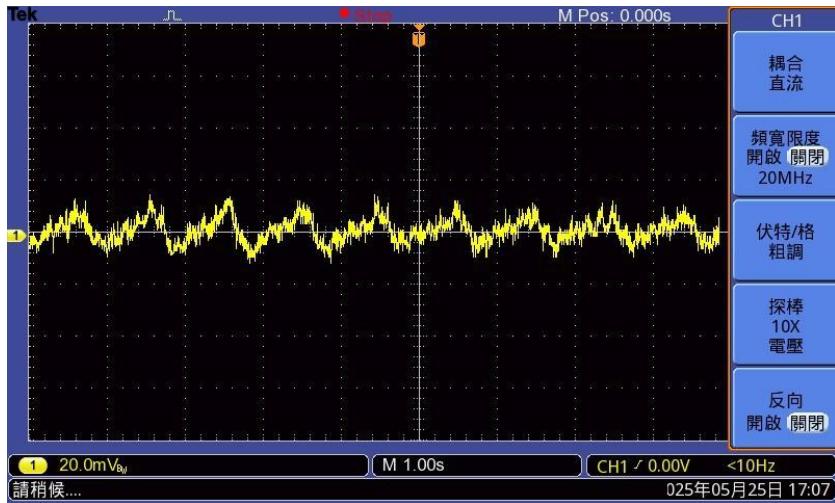


圖 26. (本圖片由作者自行製作)

圖 27. (本圖片由作者自行拍攝)

為流速 0.20m/s，阻流體直徑 2.5cm，將 P2 放在 P1 前 8cm 之最大發電效果。

伍、討論

實驗一：阻流體尺寸和水流流速對渦街剝落頻率的影響

如圖 7.、圖 8.、圖 9.、圖 10. 所示。依據原理 $f = \frac{StV}{d}$ ，在固定流速時，增加圓柱阻流體的直徑，頻率並沒有像我們預期的完全負相關，而是像是波動一樣產生斯特勞哈爾數（描述流體力學中週期性非定常流動的一種無量綱數_來源：維基百科）的形式出現，但是我們發現其中存在現象的消失點（下稱終結點），如流速 0.15m/s 的斯特勞哈爾數終結點出現在直徑尺寸 3cm 的阻流體；而流速 0.20m/s 的終結點則出現在 2.5cm 的阻流體；流速 0.25m/s 的終結點出現在 2cm；流速 0.30m/s 的終結點出現在 1cm。

當我們固定圓柱的直徑，發現當流速越快，頻率越高，流速與頻率成正相關（如圖 10.）。但我們發現當阻流體直徑變大時，對單一流速而言，頻率並不會總是隨著直徑變大而變小，而是稍微會有上下起伏樣貌，不過整體趨勢仍是變小。圖 11. 所示當流速=0.15m/s，直徑 7cm 的阻流體其頻率比 6cm 和 6.5cm 的頻率還大。

實驗二：在流速固定 0.20m/s，阻流體的尺寸在不同液體下對渦街剝落頻率的影響。

在固定流速下，我們發現黏滯性較小的肥皂水其對阻流體的振動頻率會比水還大，但頻率的變動也變大。我們推測是因為參雜了肥皂溶質造成雷諾數的改變所造成，肥皂水的黏滯性較低故雷諾數較大，造成渦流的剝落頻率較大，亦符合理論 $f = \frac{St \cdot V}{d}$ 的結果。其中肥皂水

的終結點提早出現（圖型較水往左移）。

實驗三：阻流體直徑與產生最大擺幅之流速的關係。

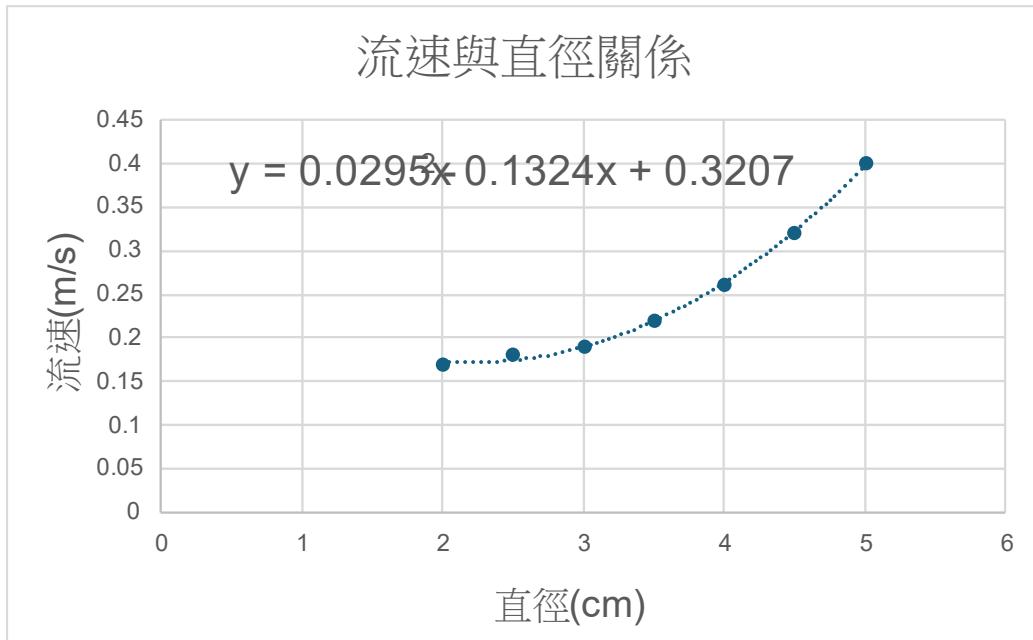


圖 28. (本圖片由作者自行製作)

如圖上所示為阻流體直徑與產生最大擺幅所對應的流速關係圖（如圖 28.）。由實驗發現當直徑愈大，所對應的最大擺幅流速也愈大。我們推測此原因是當直徑變大時，水流造成的剝落頻率會變小，但阻流體擺本身因直徑變大所產生的共振頻率幾乎不變，因此需要較大的流速讓剝落頻率達成和共振頻率一致。將此圖做最佳擬合曲線，其方程式為 $y = 0.0295x^2 - 0.1324x + 0.3207$ ，雖然我們的樣本數不多，但若此方程式也適用大尺度的阻流體，那麼我們將可預測在各種不同流速下擺放適合的阻流體來形成或避免共振的效果。

實驗四：在阻流體（P1）前後不同距離處，放置一圓柱體（P2），探討 P2 對 P1 振幅的影響。

（一）定流速（0.20m/s）

在阻流體（P1）前後不同距離下，放置另一個圓柱體（P2）會影響其擺幅。實驗結果在直徑 2cm 的 P1 後距離 1cm 處放置圓柱體 P2（如圖 14.）會導致其擺角減少 60%（如圖 16.），我們認為此現象可應用在預防建築物或是橋梁因卡門渦街造成的擺動甚至倒塌。而相反的，當我們想要增加擺幅時，在 P1 前距離 4cm 處放置 P2（如圖 13.）會導致其擺角增加 200%，變成三倍（如圖 15.）。我們也觀察到 P2 放置在 P1 後面時，若相距 2cm 以上將不會改

變其結果；相反的，P2 放置在 P1 前面時，相距 7cm 以上將不會改變其結果。

（二）若運用不同直徑與最適配流速之探討

我們發現在 P1 前放置 P2 圓柱照樣能在特定距離下使 P1 的擺幅大幅增加，且此增加幅度最大的距離會隨著流速增加而增加；在 P1 後放置 P2 圓柱也一樣能使卡門渦街現象消失。其中在直徑 2.5cm（流速較快）時我們發現一個特例，P2 在 P1 後一定距離內竟使 P1 摆幅不減反增，我們推測是因為此時流速過快使水流撞擊 P2 時產生了一股回彈的水流並且因為 P1 與 P2 距離較近使得 P1 受到此亂流的影響，讓擺幅不減反增。

實驗五：在固定流速下，不同尺寸的相同大小阻流體 P1、P2，其放置間距對電壓的影響

（一）由圖 19~28 可以發現，當我們固定流速時，在阻流體 P1 前不同距離下放置固定阻流體 P2 皆可找到能產生共振的阻流體直徑，使產生的電壓得到增幅，並可找出最適配之距離與直徑的對應關係。

陸、結論

本研究成功透過水道實驗觀察與分析卡門渦街現象，並探討了不同阻流體尺寸、流速及液體黏滯性對擺動頻率與週期的影響。根據實驗結果，我們得出以下結論：

一、流速與斯特勞哈爾數終結點的關係：

在固定流速下增加阻流體直徑時，頻率變化並非完全負相關，而是呈現波動狀態，並且產生斯特勞哈爾數的終結點。例如，流速 0.15m/s 的終結點出現在直徑 3cm 的阻流體，流速 0.20m/s 則為 2.5cm，流速 0.25m/s 則為 2cm，顯示直徑與流速之間存在特定臨界值。

二、固定直徑下的流速與頻率關係：

當圓柱直徑固定時，流速越快，頻率越高，呈現正相關。

三、液體黏滯性對擺幅與終結點的影響：

不同液體的黏滯性會改變阻流體的振幅與終結點，圖型也會往後移。例如，肥皂水因黏滯性較低，導致其造成的振幅比水造成的更大，趨勢線斜率較小並且終結點提前出現。這顯示液體性質會改變卡門渦街的形成特性，影響阻流體的擺動行為。

四、雙阻流體間距與擺幅調控：

(一)、當阻流體 (P1) 前後放置另一固定阻流體

(P2) 時，其距離對擺幅有顯著影響。例如，P2 放在 P1 後方 1cm 可減少擺幅 60%，適用於橋梁或建築物抗震設計。而若 P2 放在 P1 前方 4cm，則會放大擺幅 200%，對水力發電等能量收集裝置具潛在應用價值。流速增加時使擺幅增加幅度最大的 P1 與 P2 間距



圖 29. (本圖片由作者自行拍攝)

增加。P2 在 P1 後，流速過快、間距過短時，P1 摆幅不減反增。

(二)、由圖 16-1 發現在 P1 前放置 P2 圓柱照樣能在特定距離下使 P1 的擺幅大幅增加，且此增加幅度最大的距離會隨著流速增加而增加；在 P1 後放置 P2 圓柱也一樣能使卡門渦街現象消失。在直徑 2.5cm (流速較快) 時我們發現一個特例，P2 在 P1 後一定距離內竟使 P1 摆幅不減反增。

五、雙阻流體直徑、間距，在固定流速的情況下對電壓之影響：

(一)產生最大電壓的間距與直徑之比較

間距 (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
直徑 (cm)	4.5	4.5	4.5	3.5	3	3.5	3	2.5	2.5	2.5
電壓	27.2	25.6	29.6	25.6	25.6	28.8	26.4	32	28.8	28.4

(V _{pp})									
--------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

• 未來展望

本研究以卡門渦街現象為基礎，設計出一個簡易的電磁感應發電裝置，希望未來能運用在洋流、河川發電等，提供電力來源。

而在未來在實驗方面：

- 一、希望可以找出更多不同能使阻流體發電量變大的參數。
- 二、探討放置另一阻流體增加擺幅的電壓數據。
- 三、探討最適配（共振）之阻流體特徵長度與流速的電壓數據。
- 四、找到發電效率最佳之參數。
- 五、優化實驗，用具體的方法減少實驗誤差。
- 六、探討阻流體物重對實驗的影響。

由上述未來展望，就能把卡門渦街產生的頻率與反作用力強度放到最大，達到最高的發電效率。

柒、研究歷程

本研究主要經過四次不同量測方法的改良：

- 一、第一階段原本打算使用圖 31.的電動馬達車，在中間換上不同形狀或大小的阻流體，並在靜止的流域拖拉阻流體，形成卡門渦街的成像。但最終因無法完整觀察到清楚的卡門渦街而改以其他方法操作。

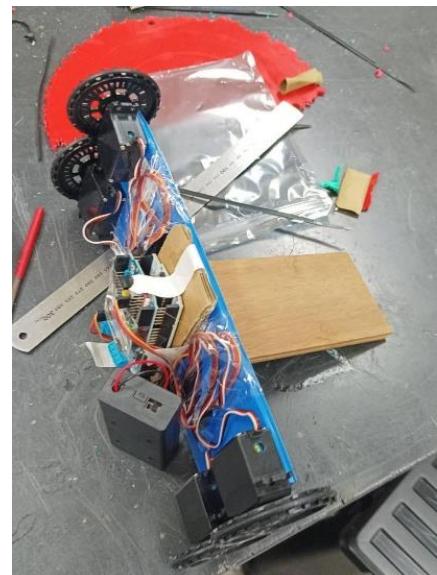


圖 30. 電動馬達車
(本圖片由作者自行拍攝)

二、第二階段以手持阻流體拖拉，並從透明壓克力水箱底部打光，在壓克力箱上方放上白色板子，使影子投影成像在上方（如圖 32.），但此方法同樣無法清除觀察到渦街成像，影響到後續計算渦街脫落的頻率等數據，因此也沒有繼續使用此方法進行研究。



圖 31.影子成像

（本圖片由作者自行拍攝）

三、第三階段我們設計出一寬度 20 公分的流動水域，透過數顆抽水馬達調節出不同流速，並把阻流體懸掛在流域上方（如圖 33.），卡門渦街脫落的反作用力會推動阻流體左右擺動，觀察阻流體擺動頻率就能推知渦街剝落頻率等數據。



圖 32.

（本圖片由作者自行拍攝）

四、第四階段我們把水道改成 12 公分寬，並加上收縮段的部分（如圖 34.），但因水道太窄，導致邊界效應出現，影響到卡門渦街現象與數據等，因此最後沒有使用這個設計。



圖 33.

（本圖片由作者自行拍攝）

五、第五階段我們將水道邊的限制都拆掉，這樣，我們就可以避免邊界效應的影響，也可以避免邊界流速比較快的影響。以 50 公分寬的水道去做實驗（如圖 35.），並加上多顆強力抽水馬達以達到目標流速。

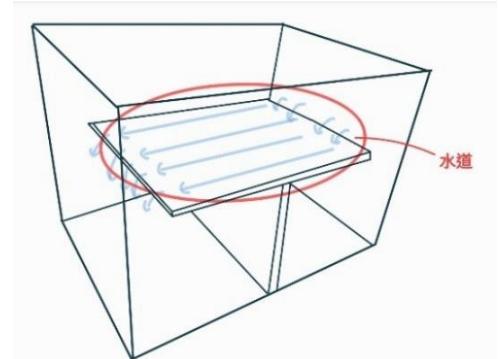


圖 34.

（本圖片由作者自行製作）

捌、參考文獻資料

王安邦、張彥中（1996）。抑制圓柱渦漩剝離之實驗研究。中國航空太空學會學刊，28(3)，249-254。取自：[https://doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28\(3\).09](https://doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28(3).09)

卡門渦街，大自然的詩意律動。網路影片。取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=0V8rUu2GPqA>

林順利 (2000)。流體通過彈性圓管排列之流場分析〔碩士論文〕。國立中山大學機械工程研究所。取自：<https://hdl.handle.net/11296/z779uv>

俄伏爾加河大橋發生離奇蛇形共振。網路影片。取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=A5QW6fjHAr0&list=PLjwXw8d827B4RVciCOJUUb3RIxiui33qN&index=1>

陳義裕 (2003-2004)。高一力學課程大要 Lectures 13-14 流體物理。國立台灣大學物理學系。取自：<https://web.phys.ntu.edu.tw/ap/YY13-14.pdf>

渦街(流)流量計的原理。取自：<https://www.dnh-tech.com.tw/upload/skill/file/20191223145210sxe.pdf>

Cesareo de la rosa siqueira. (2005, March 22). *File:Vortex-Street-Animation.Gif*.

<https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Vortex-street-animation.gif#file>

Gisling. (2008, April). *File:Karman Vortex Street.Jpg*.

https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Karman_vortex_street.jpg#mw-jump-to-license

Jürgen wagner. (2014, October 21). *Visualisation of the Von Kármán Vortex Sheet behind a Circular Cylinder in Air Flow*.

https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Karmansche_Wirbelstr_kleine_Re.JPG#mw-jump-to-license

Robert cahalan, nasa/gsfc. (1999, September 15). *File:Vortex-Street-1.Jpg*.

<https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Vortex-street-1.jpg#mw-jump-to-license>

Von Karman Street Vortex Suppression Study。網路影片。取自：

https://www.youtube.com/watch?v=24tBX_UD3fM&list=PLjwXw8d827B4RVciCOJUUb3Rlxui33qN&index=5

圖片來源：

一、維基百科_卡門渦街

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8D%A1%E9%97%A8%E6%B6%A1%E8%A1%97>

二、大公網_深圳賽格大廈为何会摇动？原来是“卡门涡街”共振！【来点知识 EP10】

<https://www.takungpao.com/lens/235128/2021/0524/588834.html>

三、維基百科_斯特勞哈爾數

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%96%AF%E7%89%B9%E5%8A%B3%E5%93%88%E5%B0%94%E6%95%B0>

四、airiti Library_抑制圓柱渦旋剝離之實驗研究

[http://dx.doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28\(3\).09](http://dx.doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28(3).09)

【評語】051804

本作品以實驗觀察流體經過阻體在後方引發的渦流現象，研究執行上設計系統化實驗變因，如阻體尺寸、流速、液體黏滯性為實驗參數，觀察在阻體兩側引發旋轉方向相反的渦流，形成渦流組，並量測擺動頻率對形成渦流組的頻率的影響。並進一步量測擺幅變動與電壓輸出關係，嘗試以理論擬合預測結果，具有實驗科學探究方法與精神。

惟數據統計處理略顯不足；雖有大量圖表，但缺乏誤差分析與統計測試，建議可重複次數實驗並作分析得到平均值、標準差或信賴區間等數據處理，提升結果精準性。另，圖表標示可更完整，如補充座標單位、標題或註解，以能更清晰理解。

此外，在應用的推論，需考量發電效率與最佳參數方案，以能有具實際應用性。

作品海報

流體力學的潛力- 卡門渦街現象的探究與應用



摘要

本實驗主要在整流過的水道中放置一可左右擺動的圓柱狀阻流體。當流體流經該阻流體時，其後方會形成卡門渦街，使阻流體因漩渦剝落所產生的反作用力而左右擺動，我們觀察擺動現象並測量不同變因下對阻流體擺動的影響，最後自行設計發電機使現象得到應用。

壹、前言

一、研究動機

卡門渦街現象能否加以應用或控制？若能抑制卡門渦街對建築的破壞，就能有效提升建築物在風場與水流中的耐久與安全性。隨著台灣電力短缺問題，能源轉型與綠色發電已成為重要議題。因此我們將卡門渦街的力學能轉化為可利用的電能。希望透過實驗，探討不同參數（如流速、阻流體的特徵長度、擺動頻率與振幅等）對發電功率的影響，並找出最佳化參數組合，以提升轉換效率。我們希望本研究能為水資源豐沛的台灣提供創新的永續發電方式。

二、研究目的

- (一) 阻流體尺寸和水流流速對剝落頻率的影響。
- (二) 阻流體尺寸在不同液體中對剝落頻率的影響。
- (三) 阻流體尺寸與產生最大擺幅時所對應的流速關係。
- (四) 在阻流體P1前後不同距離，放置固定圓阻流體P2對P1的影響，並探討不同流速對振幅的影響。
- (五) 延續(四)，在固定流速的情況下，改變阻流體P1大小與改變P1跟P2之間距離，探討電壓的變化。

三、文獻回顧

(一) 卡門渦街基本介紹

卡門渦街是一種流體力學現象，當雷諾數介於約47至 10^5 之間時，流體流經阻流體後，其後方會形成兩排交錯、周期性剝落的漩渦結構。其中一排渦旋順時針旋轉，另一排則逆時針旋轉，漩渦以固定頻率剝落。

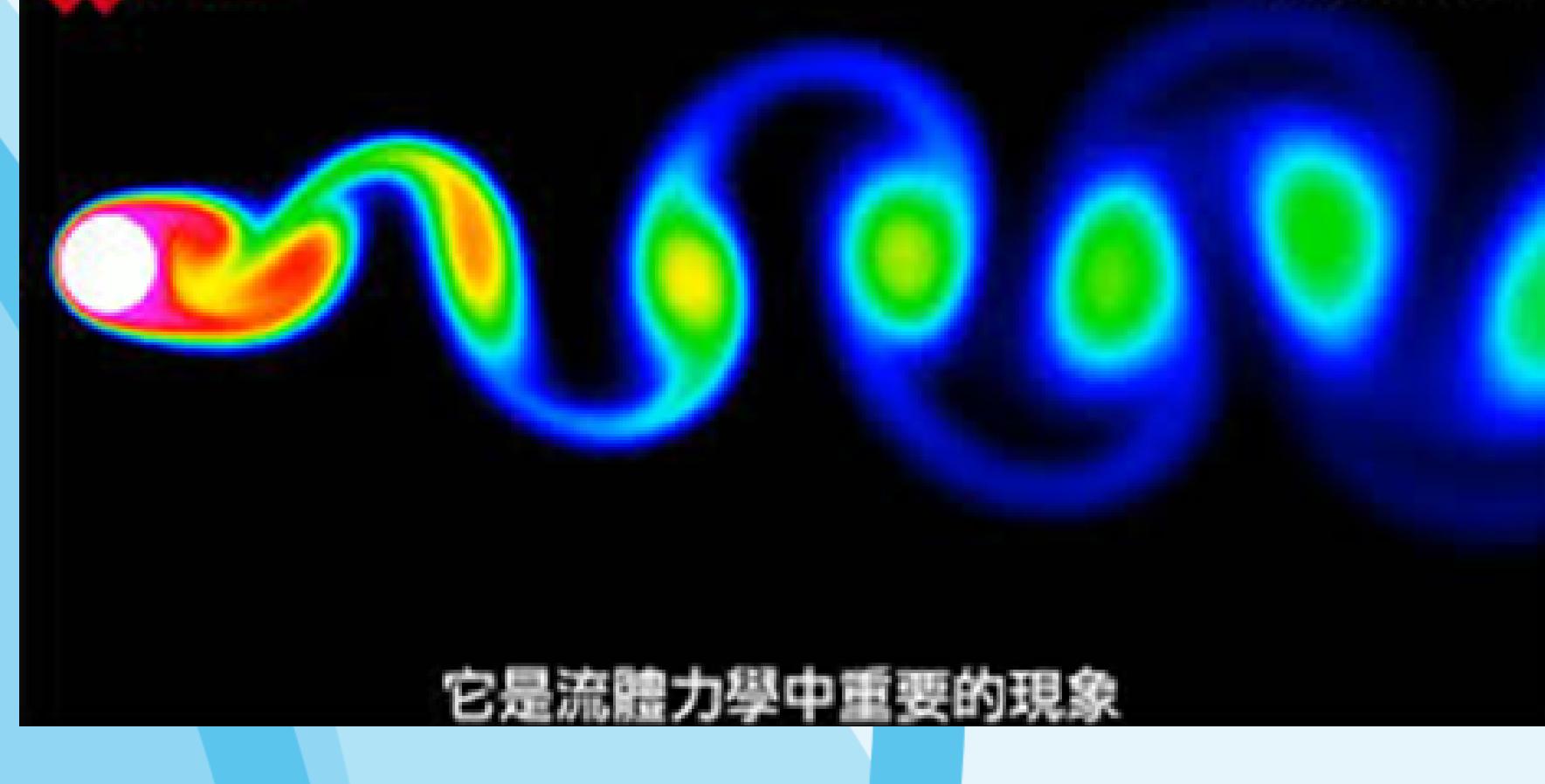


圖1.2本圖片引自大公網—深圳賽格大廈為何會搖動？原来是“卡門渦街”共振！
【來點知識EP10】
(出處詳圖片來源一)

紅色區域的漩渦在剝落時會有反作用力，使阻流體左右擺動。當擺動頻率與漩渦剝落頻率一致時，即產生共振現象，進而使擺動幅度顯著增加。

(二) 基本公式

卡門渦街這個流體動力學現象是當流體流經阻流體時，產生漩渦剝落且是交替、周期性地。阻流體會因流體瞬間壓力的不同與渦街剝落的反作用力擺動。其中，擺動頻率與流速成正比，與阻流體的特徵長度（阻流體截面寬度）成反比。卡門渦街頻率與流速和阻流體特徵長度的關係可以用下方的基本公式表示。

$$f = \frac{S_t V}{d}$$

f: 頻率 v: 流速

S_t : 斯特勞哈爾數 d: 阻流體接觸寬度

斯特勞哈爾數 (S_t) 是流體力學中用來描述周期性非定常流動的一個無量綱數。在流體力學中另一個非常重要的無量綱量就是雷諾數，用來表示流體速度不同所產生相對內部運動的流體內部慣性力與黏滯力的比值。

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu}$$

u: 特徵速度 v: 流體運動黏度

L: 特徵長度 p: 流體密度

μ : 流體動力黏度

上述的兩個無量綱量是透過列出流體力學中的各項變因的因次並經過矩陣運算後所得出的唯二解，包含頻率、流速、黏度、密度還有組流體特徵長度。由於兩者皆為無因次量，兩者應能呈現單一線性關係，透過代入我們的實驗數據分析兩者間關係並作圖可以驗證實驗的誤差與正確性。

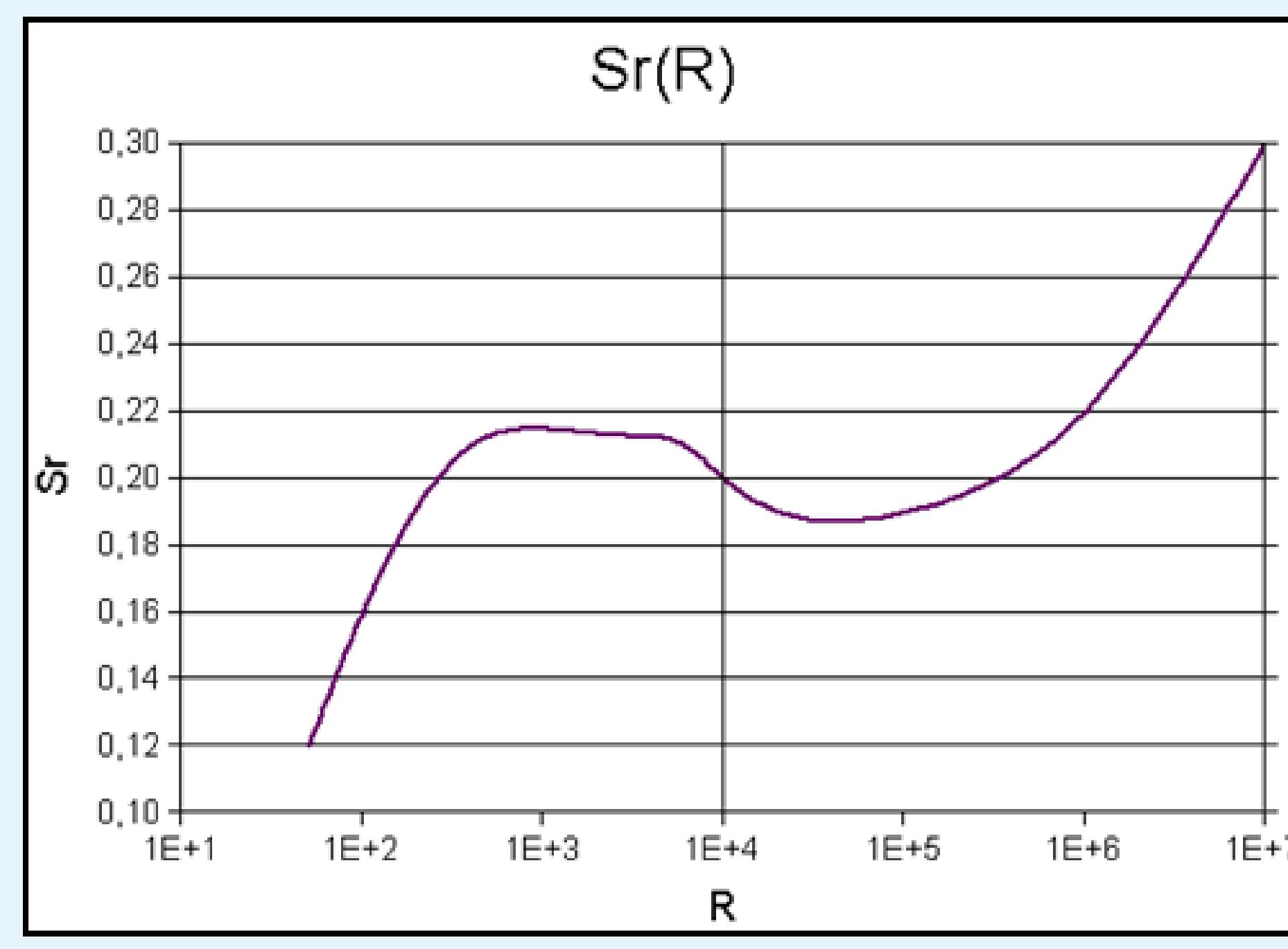


圖2.本圖片引自維基百科—斯特勞哈爾數
(出處詳圖片來源二)

貳、研究過程與方法

一、實驗裝置

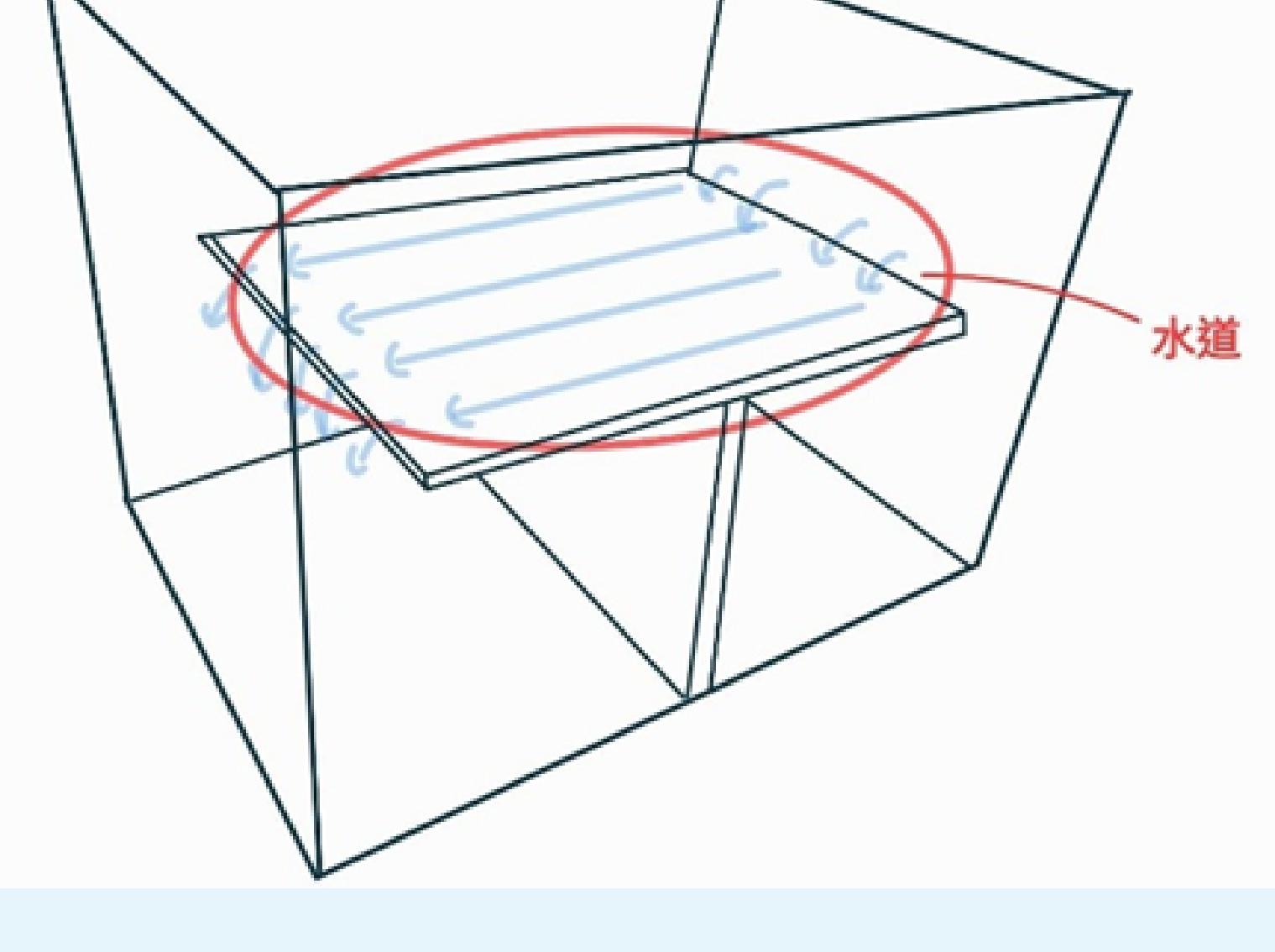


圖3. (本圖片由作者自行製作)

二、實驗步驟

實驗(一)：阻流體尺寸和水流流速對渦街剝落頻率的影響

1. 調整不同組流體特徵長度，固定流速
2. 錄下影像並觀察其頻率
3. 重複步驟1.多次
4. 錄下影像並觀察其頻率

實驗(二)：在流速固定0.20m/s，阻流體的尺寸在不同液體下對渦街剝落頻率的影響

1. 固定流速與阻流體特徵長度，溶液為肥皂。
2. 錄下影像並觀察其頻率
3. 固定流速與阻流體特徵長度，溶液為水
4. 錄下影像並觀察其頻率

實驗(三)：阻流體尺寸與產生最大擺幅時所對應的流速關係

1. 量角器尋找阻流體特徵長度與流速在何情況下能產生最大擺幅

實驗(四)：在可自由振盪的阻流體P1前後不同距離下，放置另一個固定圓柱阻流體P2對其擺幅的影響，並探討不同流速對振幅的影響

1. 固定流速與P1特徵長度
2. 在P1前放置另一個阻流體P2
3. 固定距離每1cm將P2往前放置，探討P2在不同位置對P1的影響並測量角度
4. 在P1後放置另一個阻流體P2
5. 固定距離每1cm將P2往後方放置，探討P2在不同位置對P1的影響並測量角度

實驗(五)：在固定流速的情況下，改變不同阻流體P1大小、改變阻流體P1、P2之間的距離，探討電壓的變化

1. 固定流速，固定阻流體特徵長度，探討其發電量
2. 固定流速，固定阻流體特徵長度，並新增阻流體P2探討其發電量
3. 將P2遠離P1，每1cm紀錄一組數據，探討兩者間距對阻流體(P1)的影響
4. 同時改變阻流體P1、P2特徵長度

肆、實驗結果

實驗一：阻流體尺寸和水流流速對渦街剝落頻率的影響。

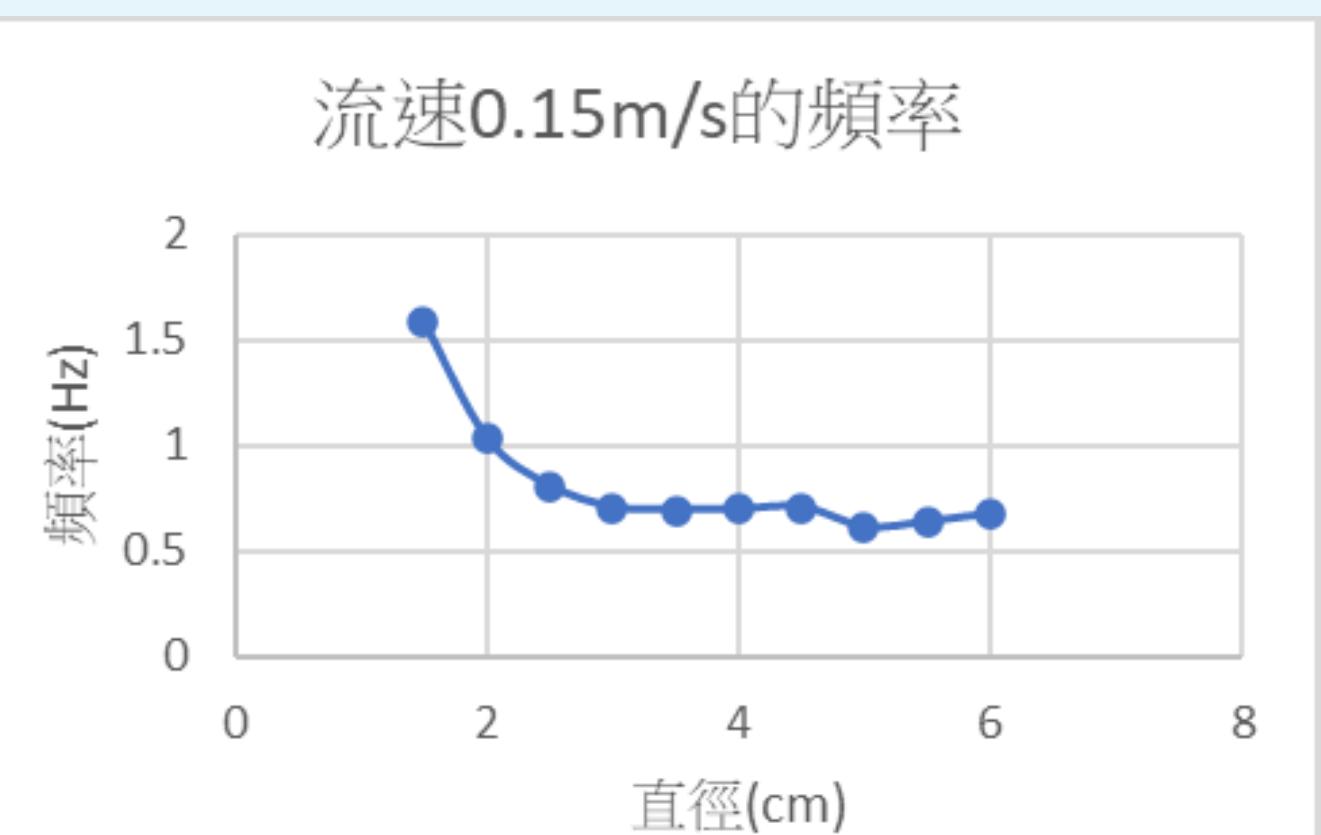


圖4. (本圖片由作者自行製作)

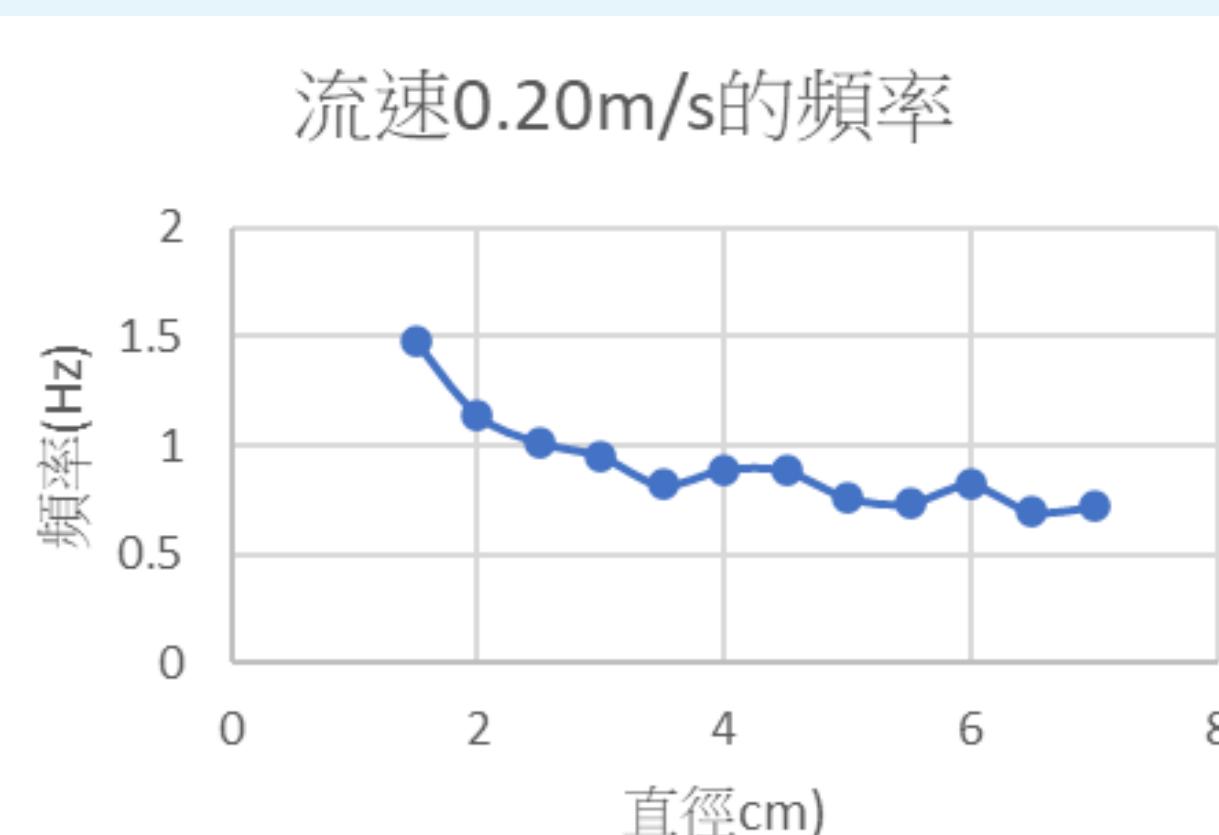


圖5. (本圖片由作者自行製作)



圖6. (本圖片由作者自行製作)



圖7. (本圖片由作者自行製作)

在固定流速時，增加圓柱阻流體的直徑，頻率並沒有像我們預期的完全負相關，而是像是波動一樣產生斯特勞哈爾數的形式出現，但是我們發現其中存在現象的消失點（下稱終點），如流速0.15m/s的斯特勞哈爾數終點出現在直徑尺寸3cm的阻流體；而流速0.20m/s的終點則出現在2.5cm的阻流體；流速0.25m/s的終點出現在2cm；流速0.30m/s的終點出現在1cm。

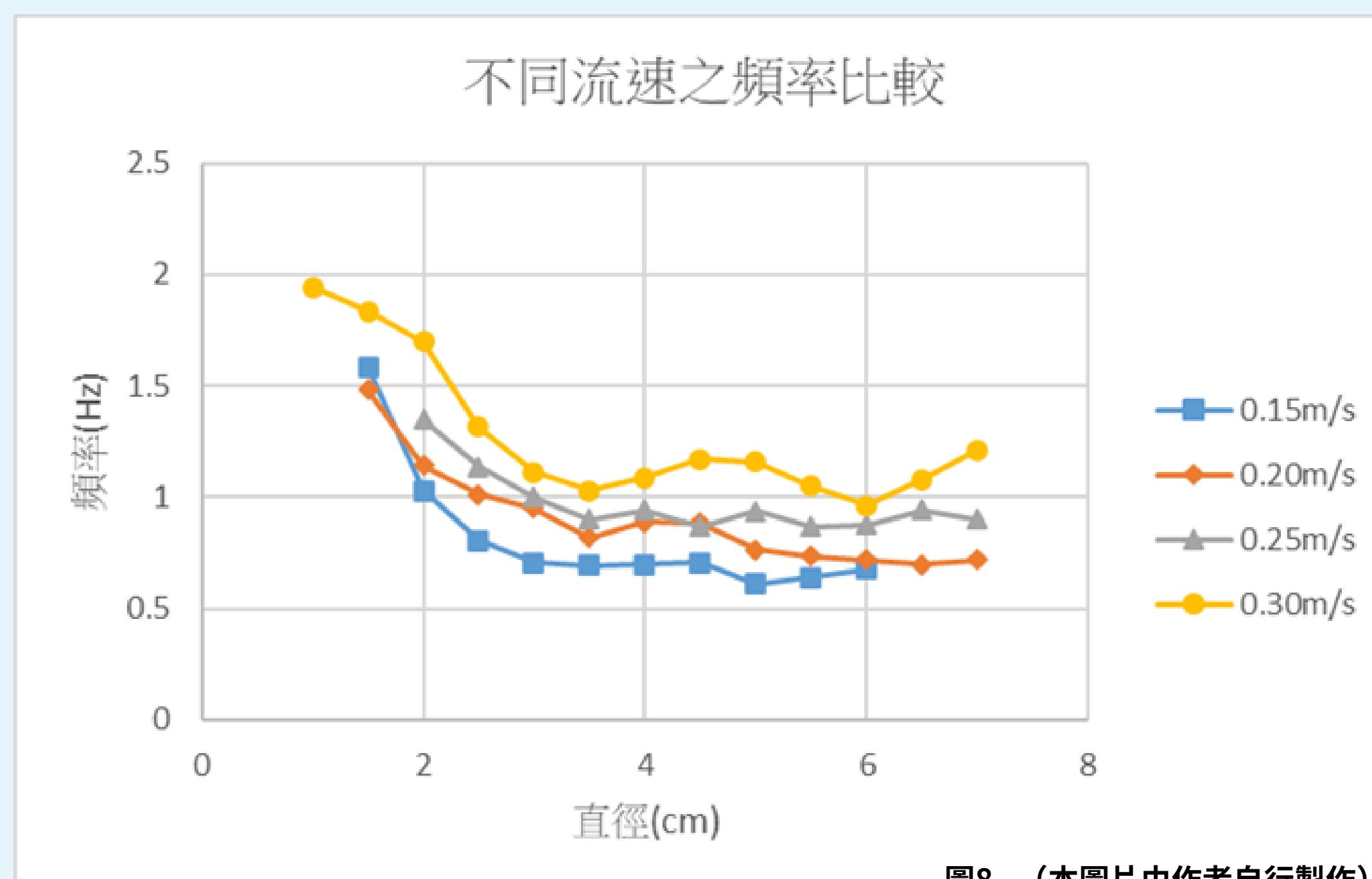


圖8. (本圖片由作者自行製作)

當固定圓柱的直徑，發現流速越快，頻率越高，流速與頻率成正相關。但當阻流體直徑變大時，對單一流速而言，頻率並不會總是隨著直徑變大而變小，而是稍微會有上下起伏，不過整體趨勢仍是變小。如圖所示，當流速=0.15m/s，直徑7cm的阻流體其頻率比6cm和6.5cm的頻率還大。

實驗二：在流速固定0.20m/s，阻流體的尺寸在不同液體下對渦街剝落頻率的影響。

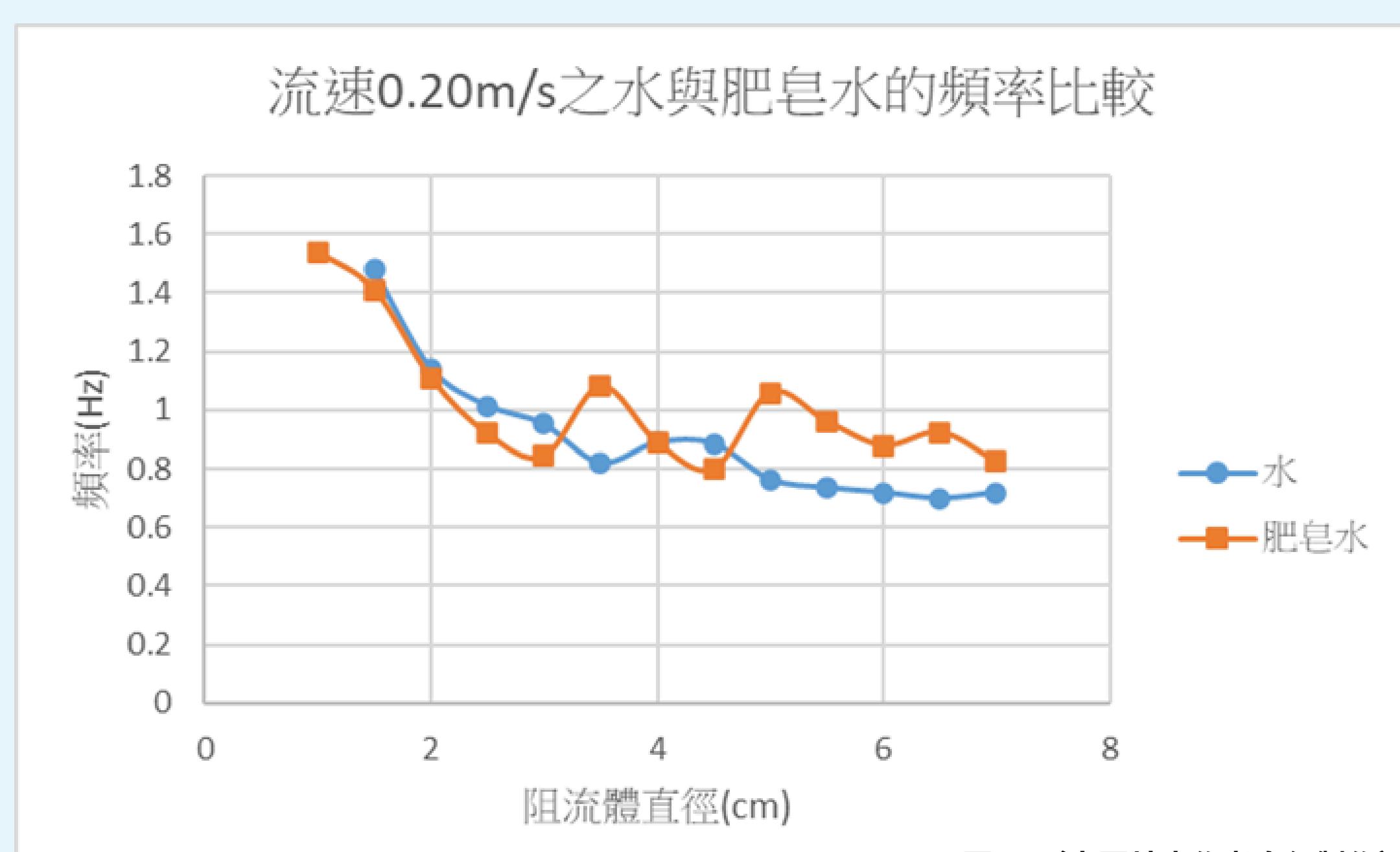


圖9. (本圖片由作者自行製作)

在固定流速下，我們發現黏滯性較小的肥皂水其對阻流體的振動頻率會比水還大，但頻率的變動也變大。我們推測是因為參雜了肥皂溶質造成雷諾數的改變所造成，肥皂水的黏滯性較低故雷諾數較大，造成渦流的剝落頻率較大，亦符合理論的結果。其中肥皂水的終點提早出現（圖型較水往左移）。

實驗三：阻流體直徑與產生最大擺幅之流速的關係。

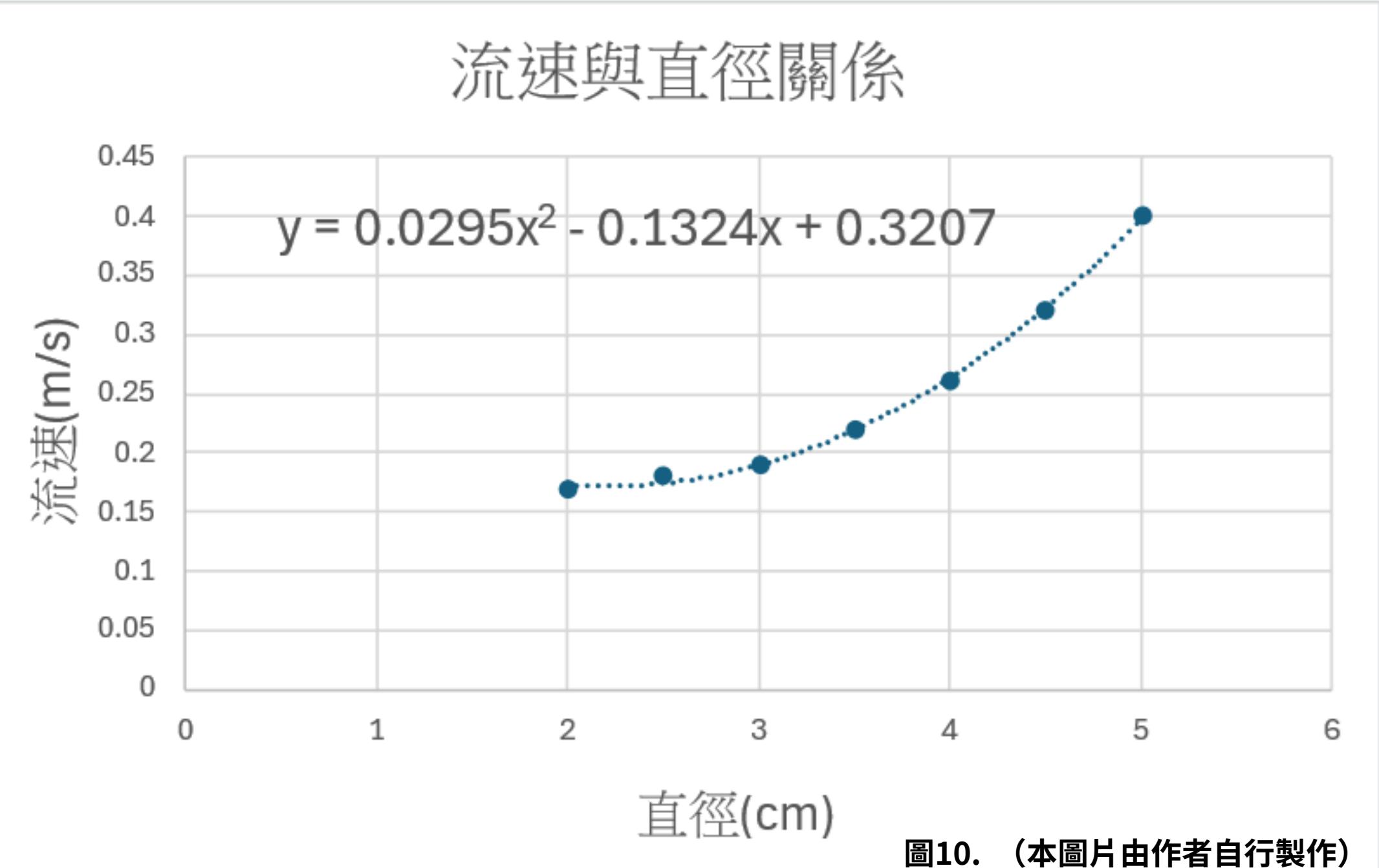


圖10. (本圖片由作者自行製作)

如圖上所示為阻流體直徑與產生最大擺幅所對應的流速關係圖。由實驗發現當直徑愈大，所對應的最大擺幅流速也愈大。我們推測此原因是當直徑變大時，水流造成的剝落頻率會變小，但阻流體擺本身因直徑變大所產生的共振頻率幾乎不變，因此需要較大的流速讓剝落頻率達成和共振頻率一致。將此圖做最佳擬合曲線，其方程式為 $y = 0.0295x^2 - 0.1324x + 0.3207$ ，雖然我們的樣本數不多，但若此方程式也適用大尺度的阻流體，那麼我們將可預測在各種不同流速下擺放適合的阻流體來形成或避免共振的效果。

圓柱體底面直徑	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	4.5cm	5cm
擺幅最大之流速	0.17 m/s	0.18 m/s	0.19 m/s	0.22 m/s	0.25 m/s	0.34 m/s	0.40 m/s

表一

實驗四：在阻流體P1前後不同距離處，放置一圓柱體P2，探討P2對P1振幅的影響。

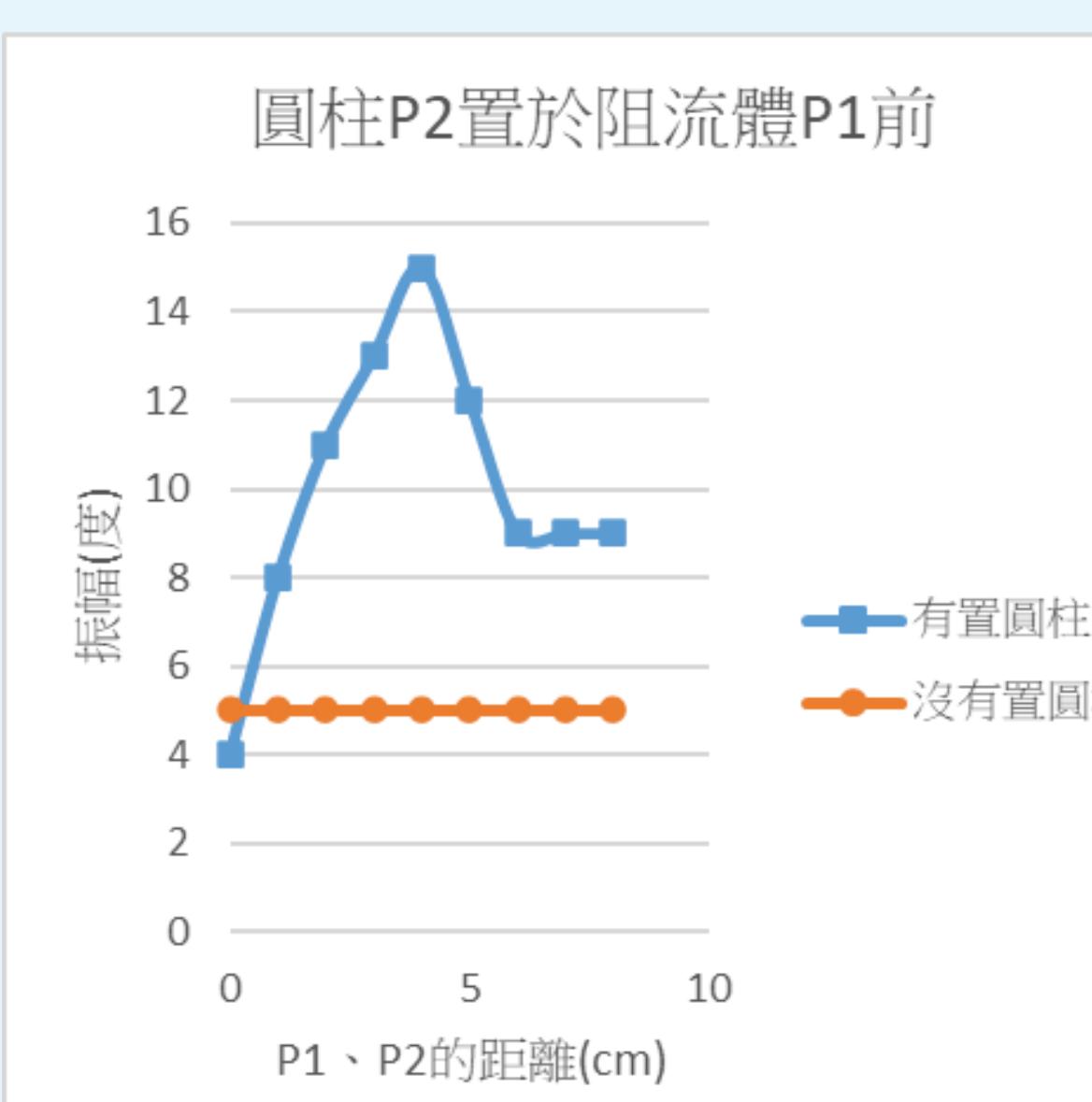


圖11. (本圖片由作者自行製作)

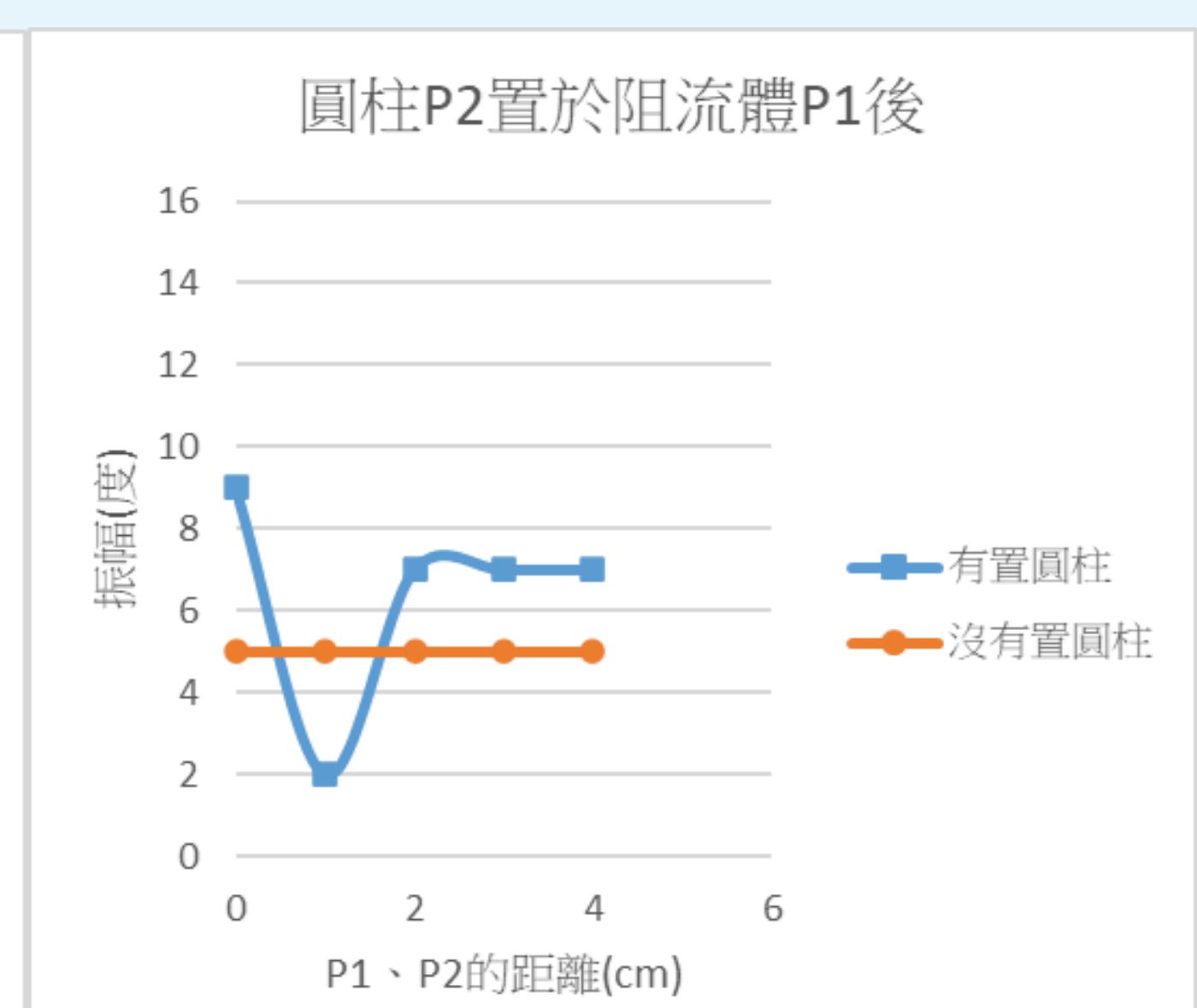


圖12. (本圖片由作者自行製作)

(一) 在定流速0.20m/s下

在阻流體P1前後不同距離下，放置另一個圓柱體P2會影響其擺幅。實驗結果在直徑2cm的P1後距離1cm處放置P2，會導致其擺角減少60%，我們認為此現象可應用在預防建築物或是橋梁因卡門渦街造成的擺動甚至倒塌。

而相反的，當我們想要增加擺幅時，在P1前距離4cm處放置P2，會導致其擺角增加200%，變成三倍。我們也觀察到P2放置在P1後面時，若相距2cm以上將不會改變其結果；相反的，P2放置在P1前面時，相距7cm以上將不會改變其結果。

在不同直徑達成最大擺幅時增加另一固定阻流體對原阻流體擺幅之影響

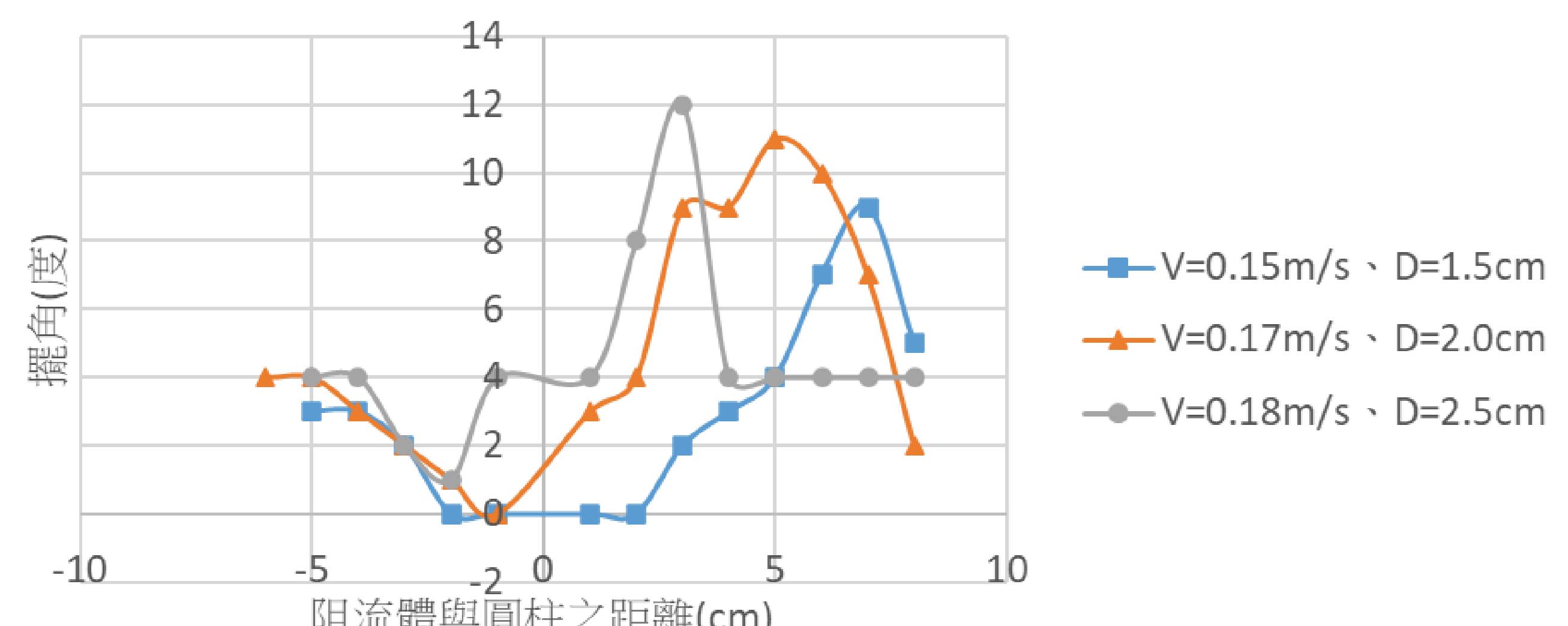


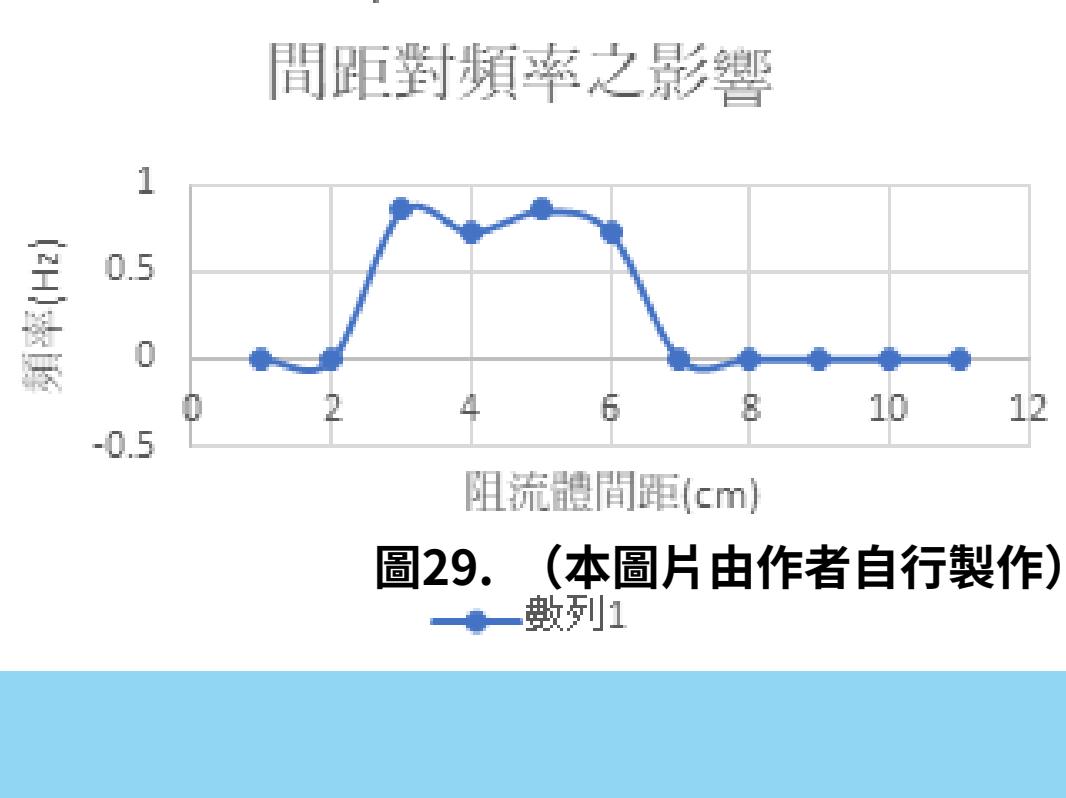
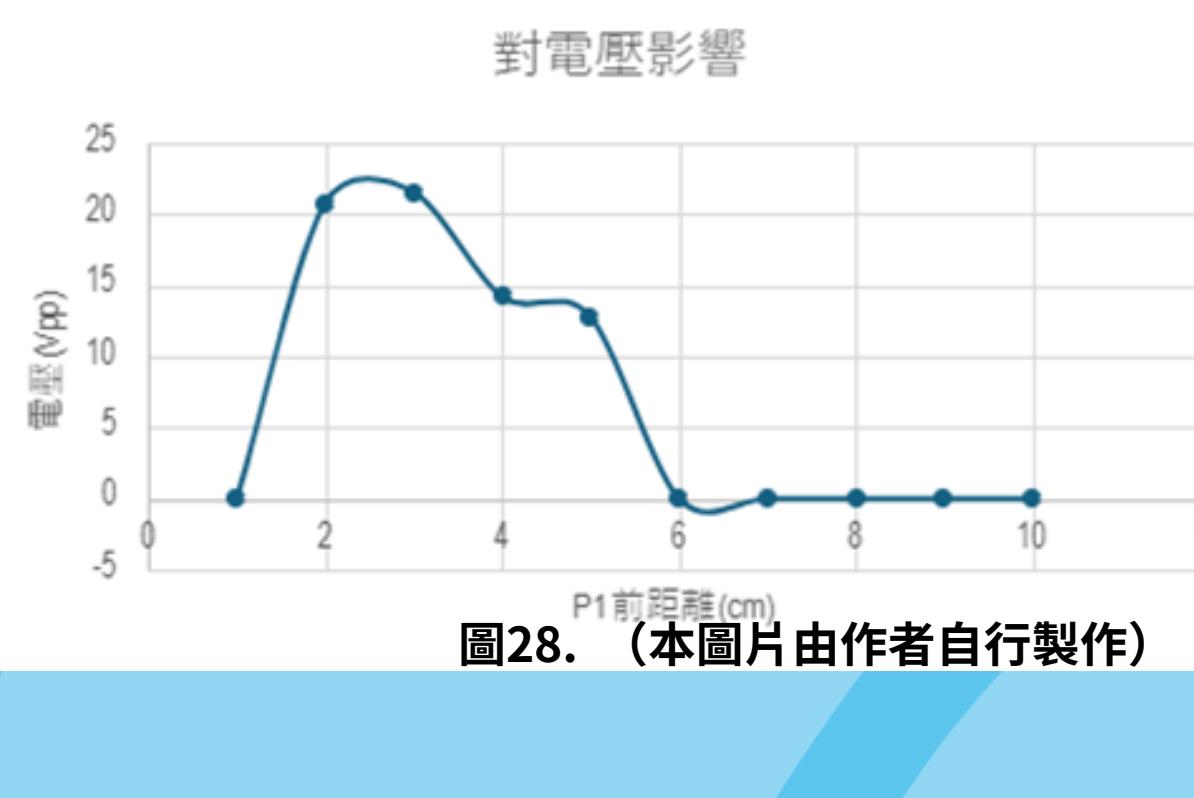
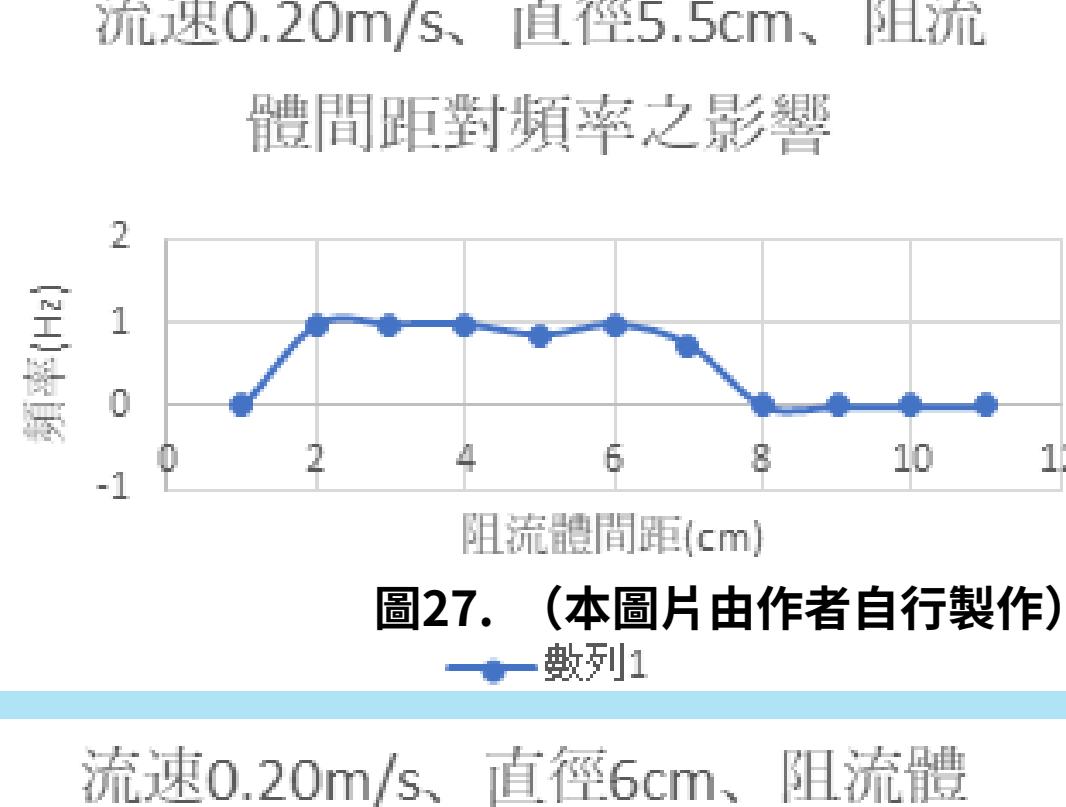
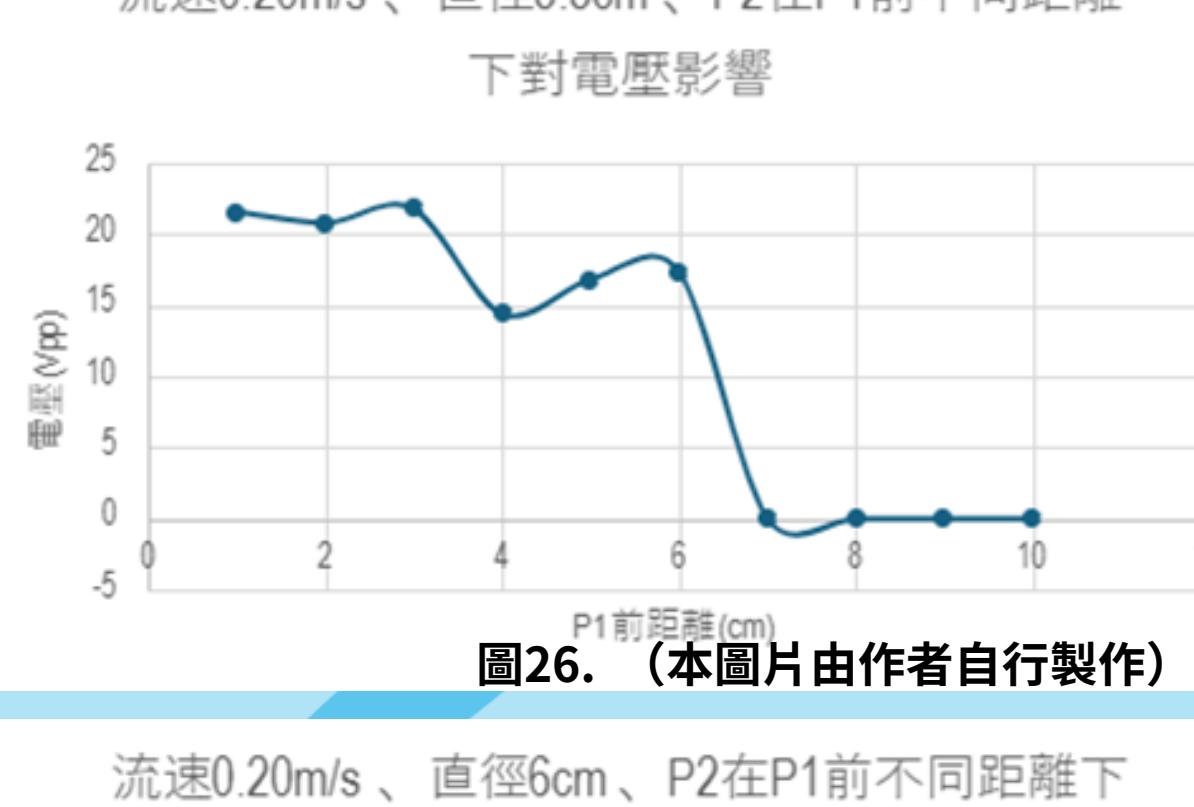
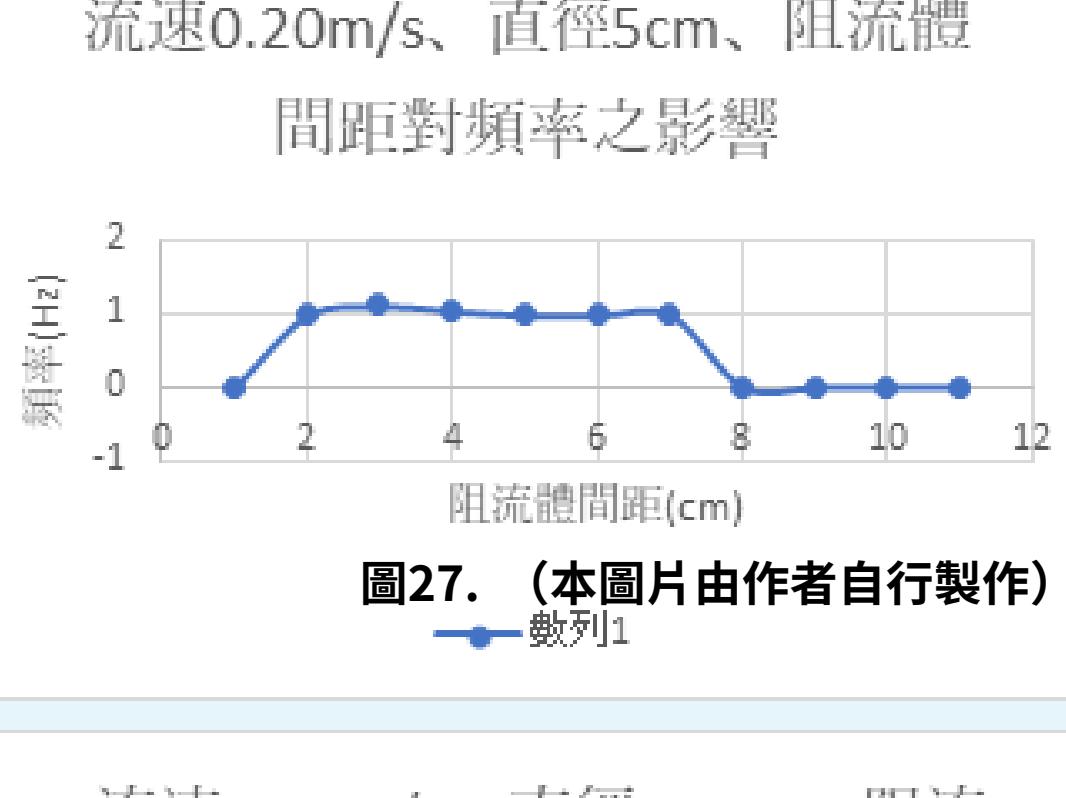
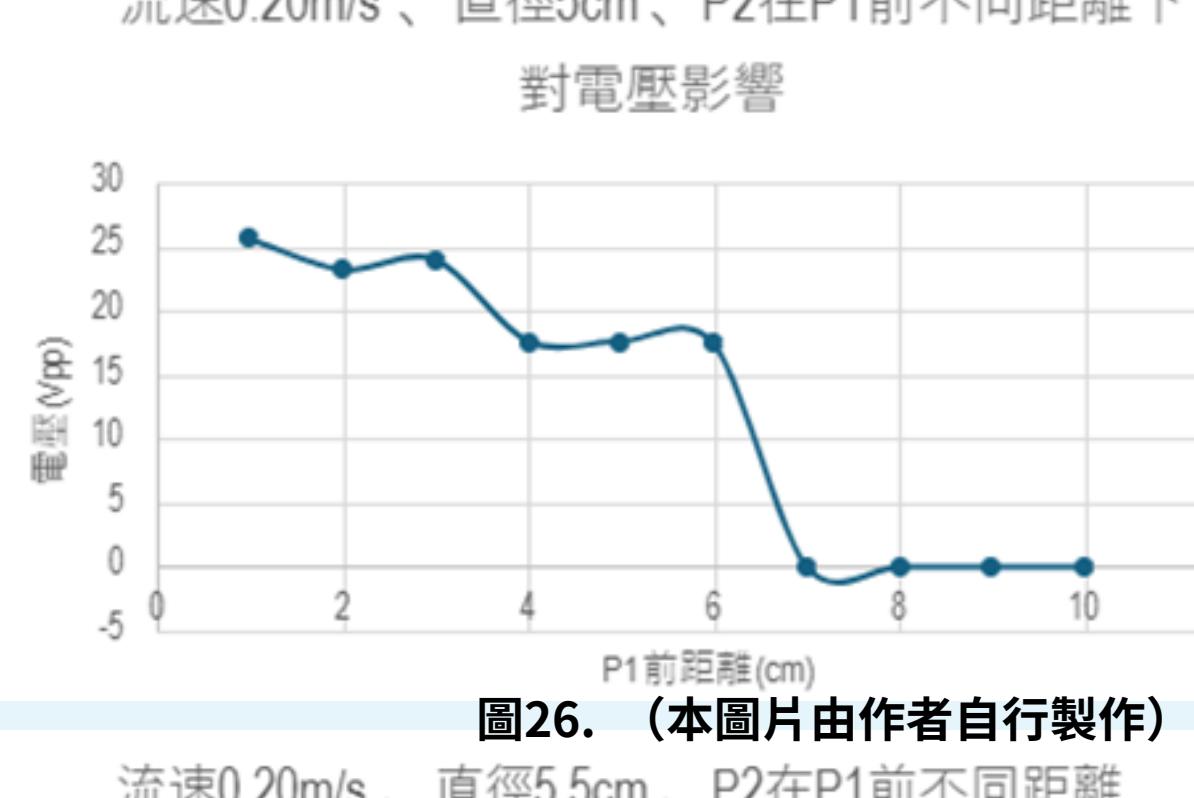
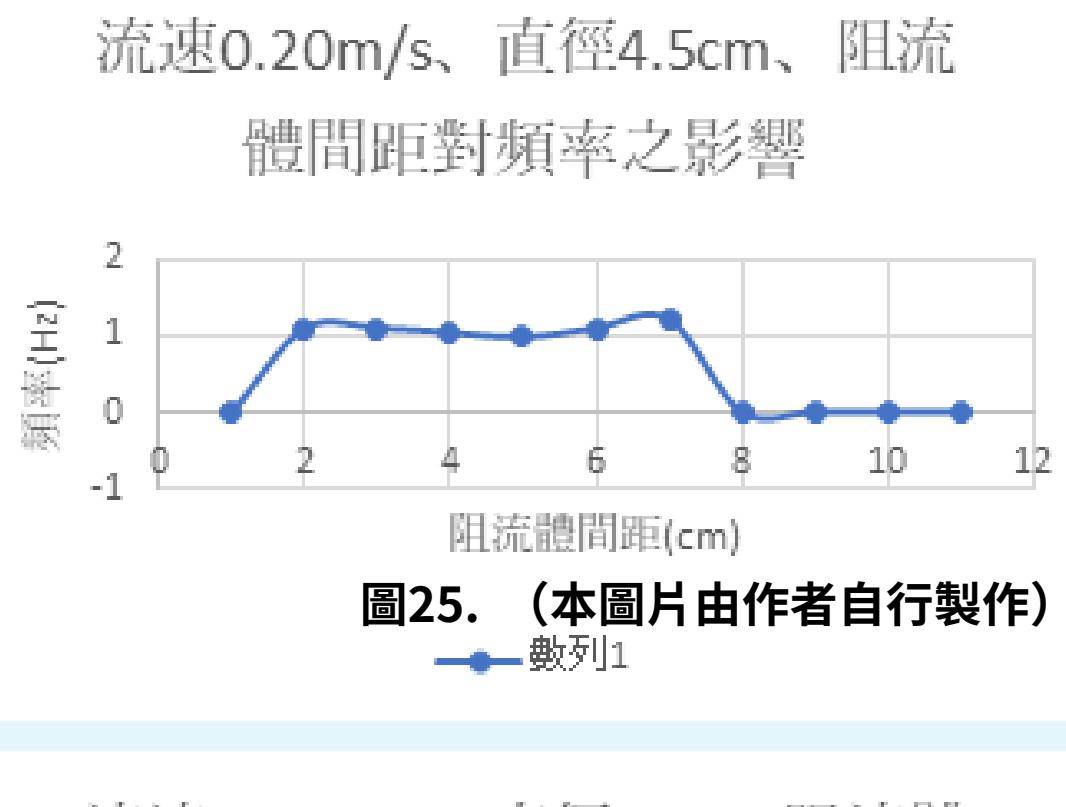
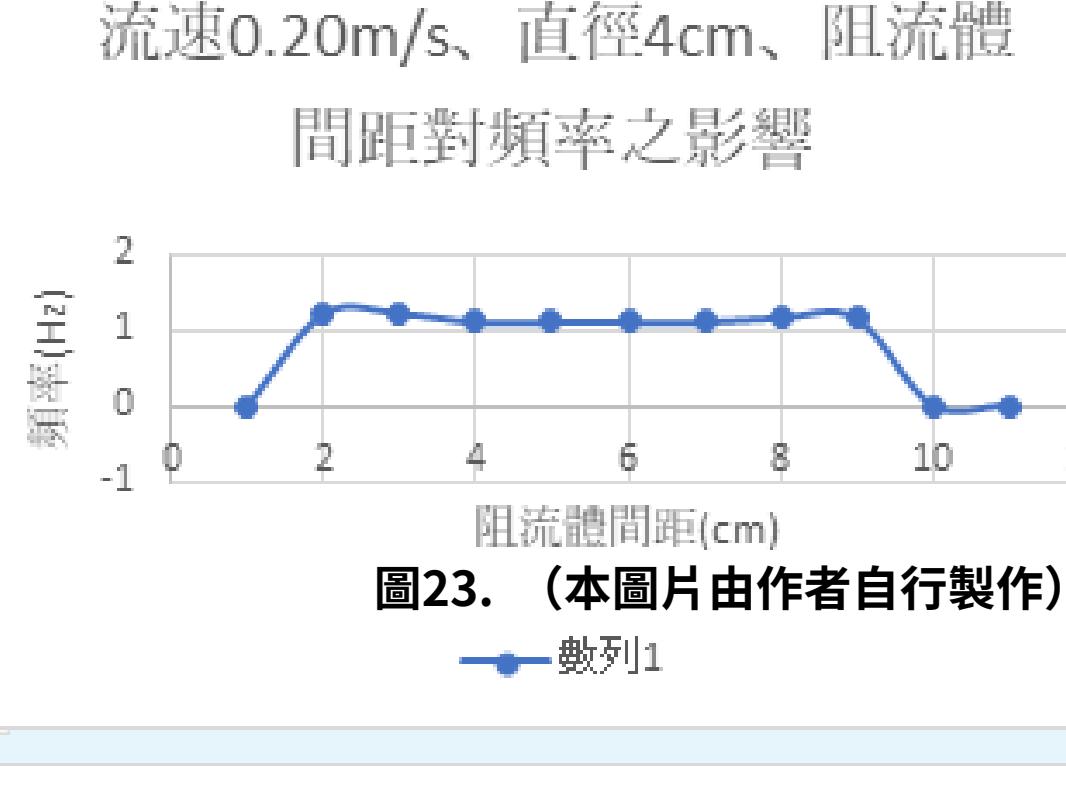
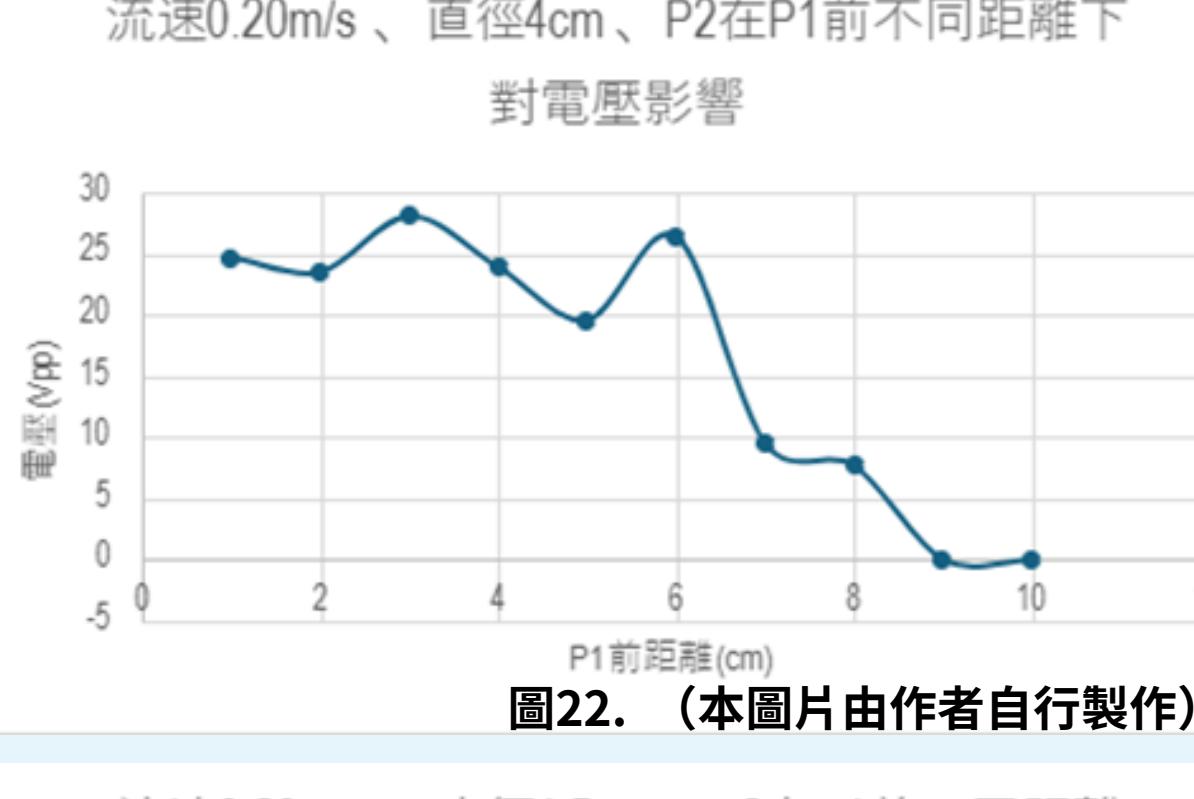
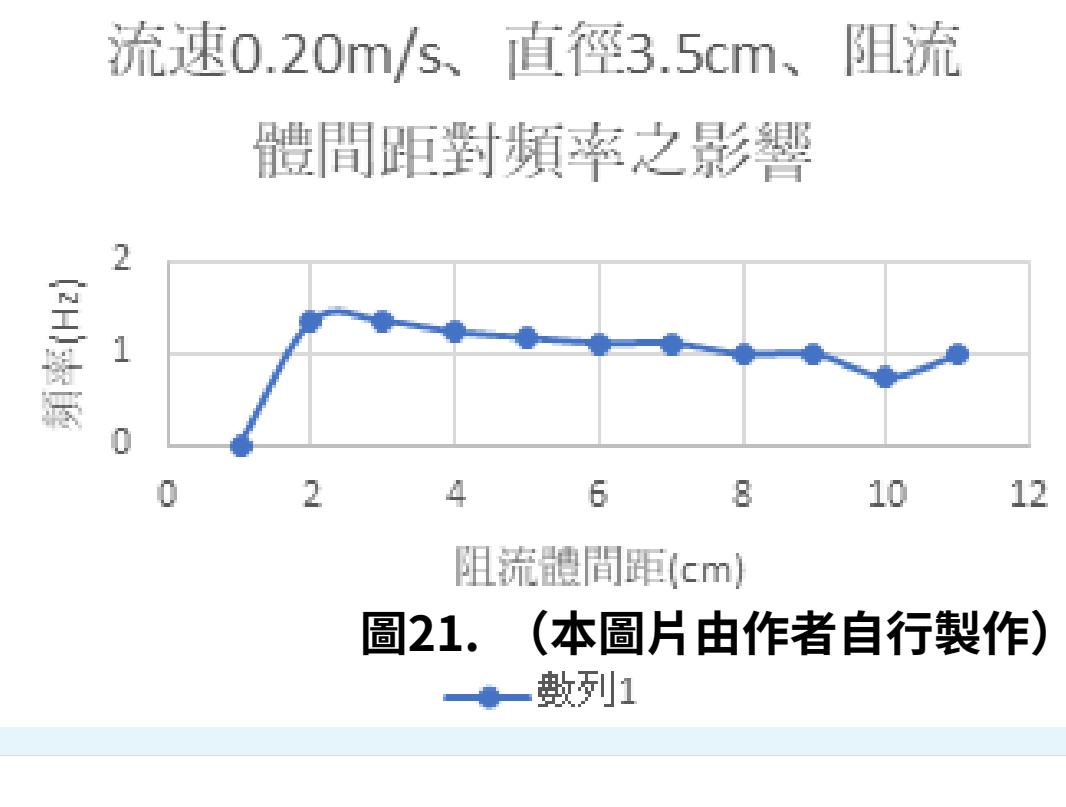
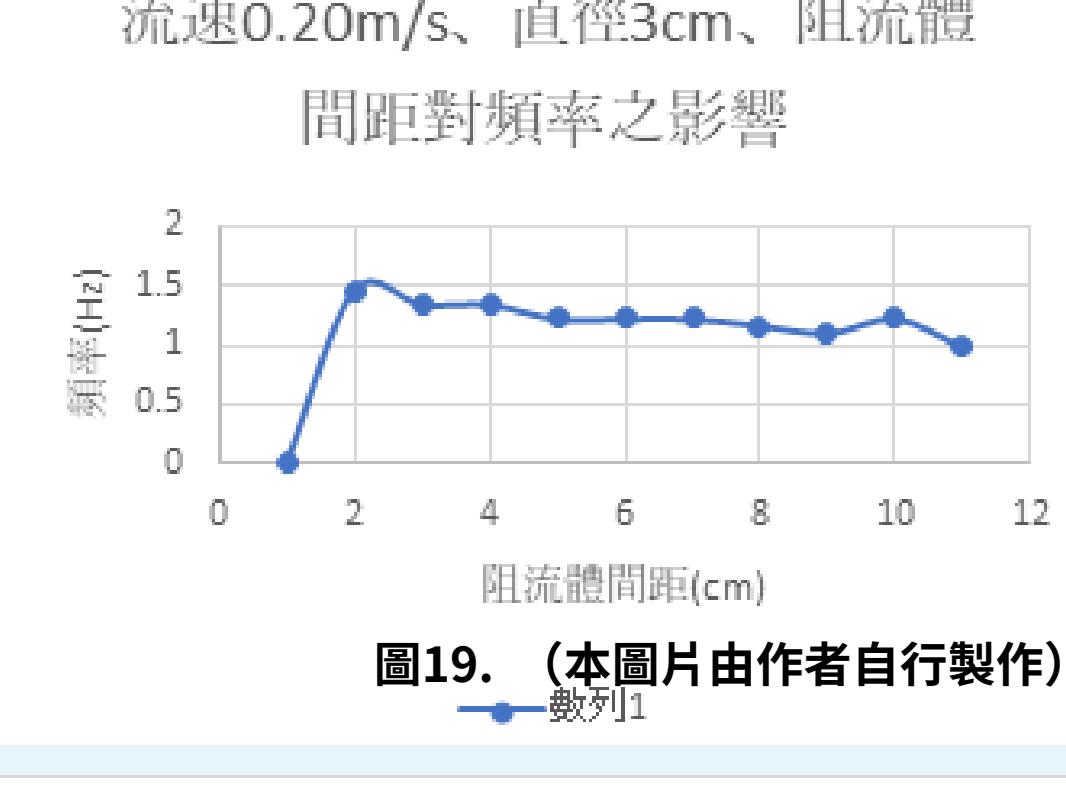
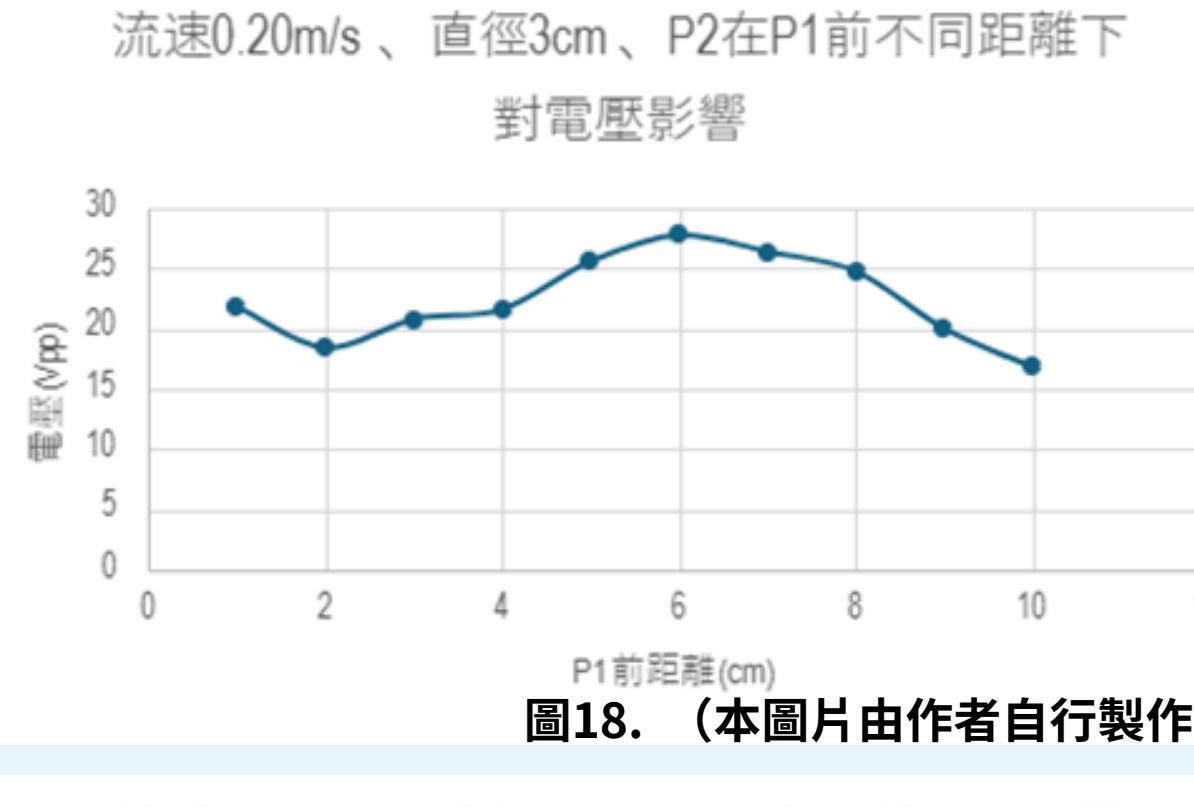
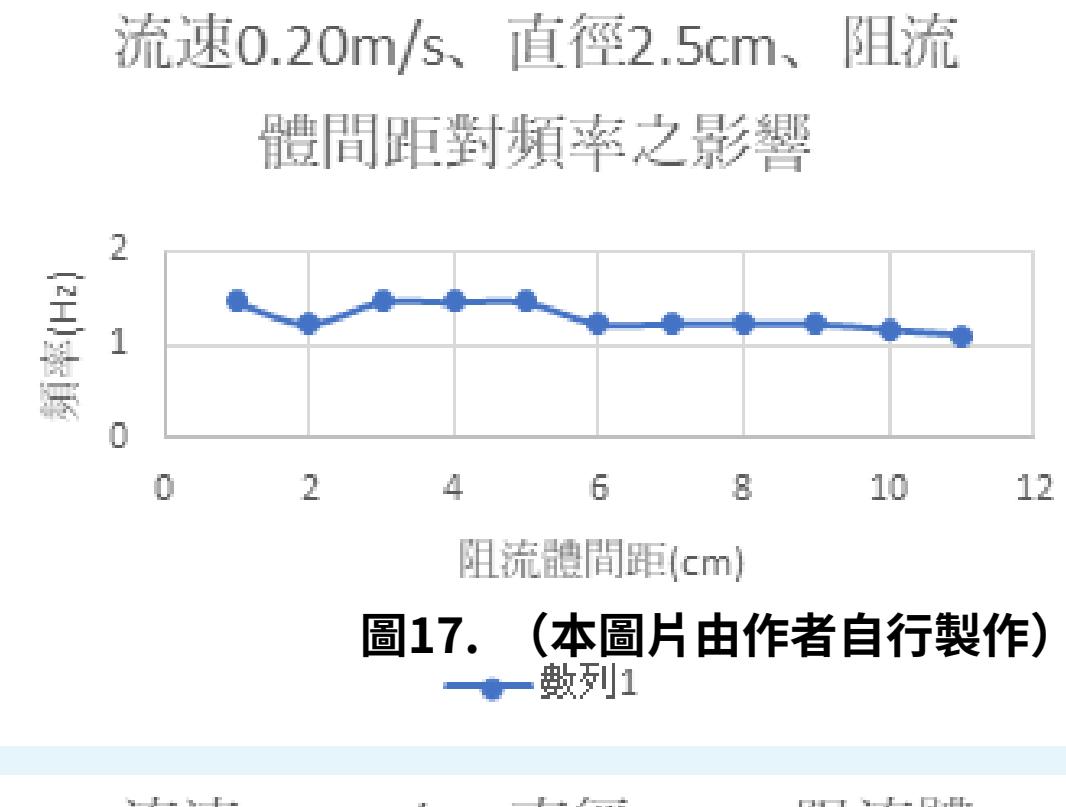
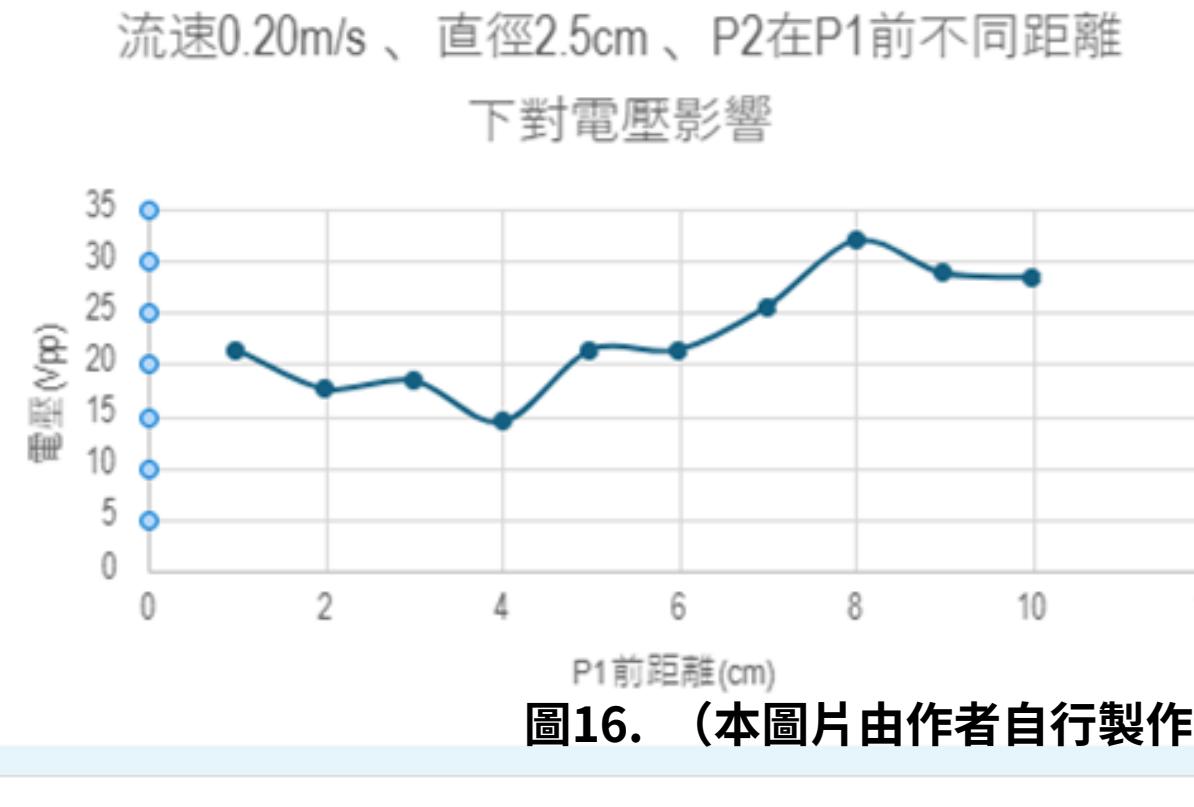
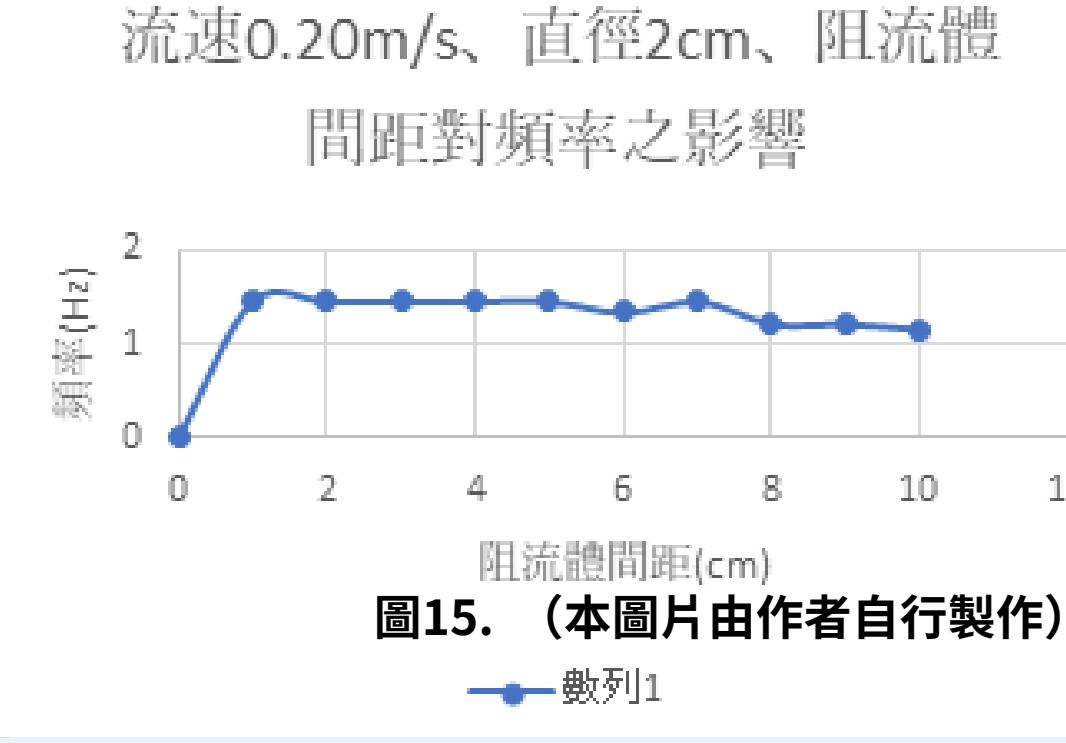
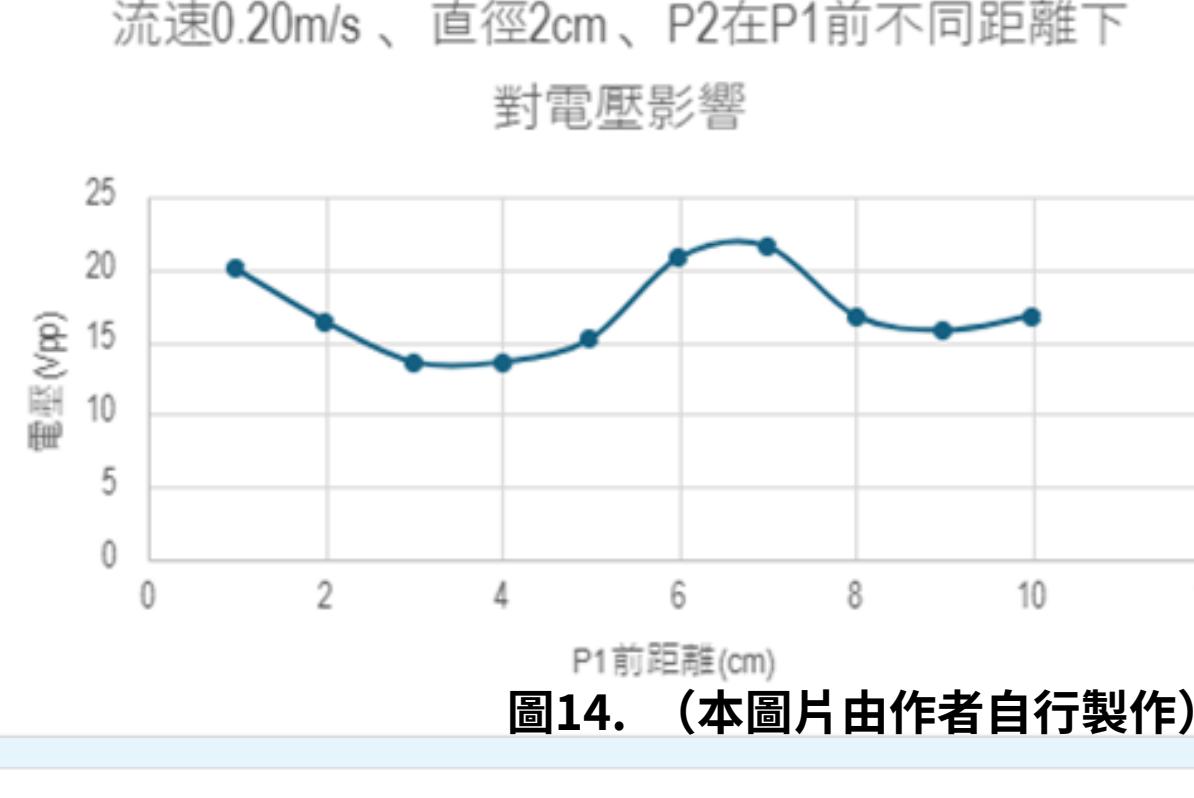
圖13. (本圖片由作者自行製作)

(二) 若運用不同直徑與最適配流速之探討

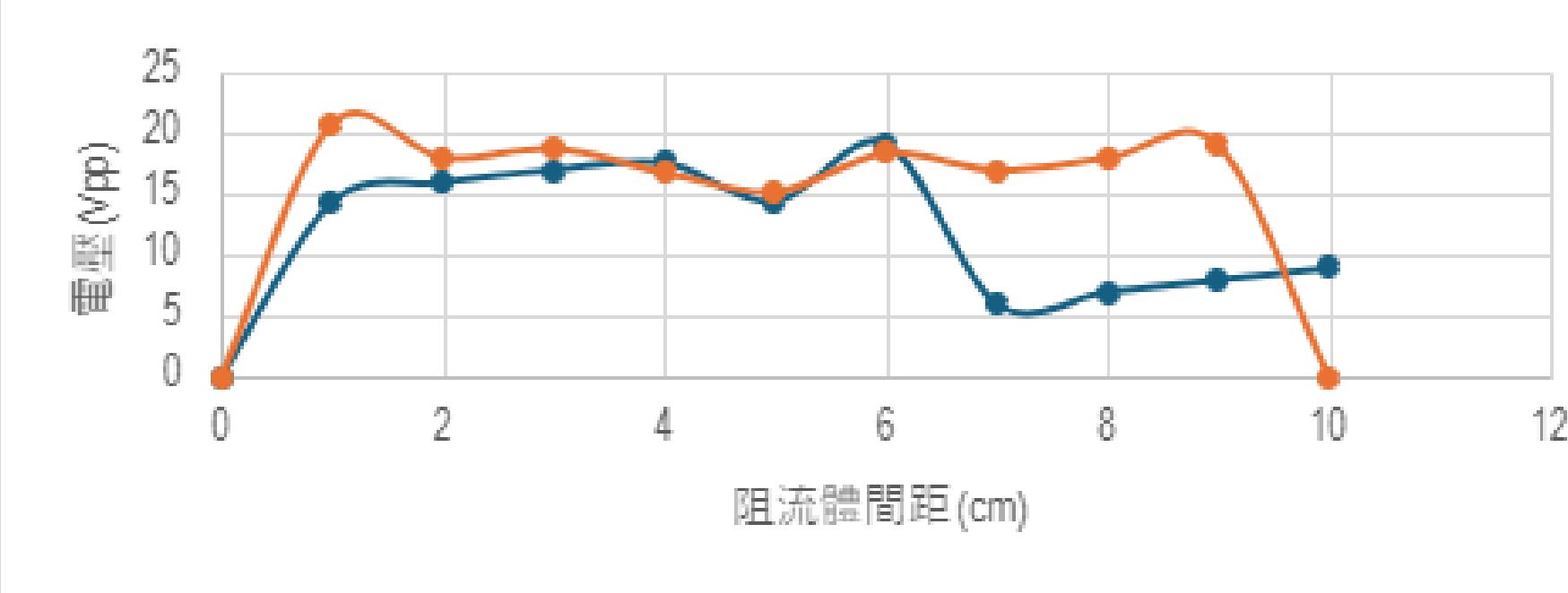
我們發現在P1前放置P2圓柱照樣能在特定距離下使P1的擺幅大幅增加，且此增加幅度最大的距離會隨著流速增加而增加；在P1後放置P2圓柱也一樣能使卡門渦街現象消失。其中在直徑2.5cm（流速較快）時我們發現一個特例，P2在P1後一定距離內竟使P1擺幅不減反增，我們推測是因為此時流速過快使水流撞擊P2時產生了一股回彈的水流並且因為P1與P2距離較近使得P1受到此亂流的影響，讓擺幅不減反增。

實驗五：固定流速下，不同尺寸的相同大小阻流體

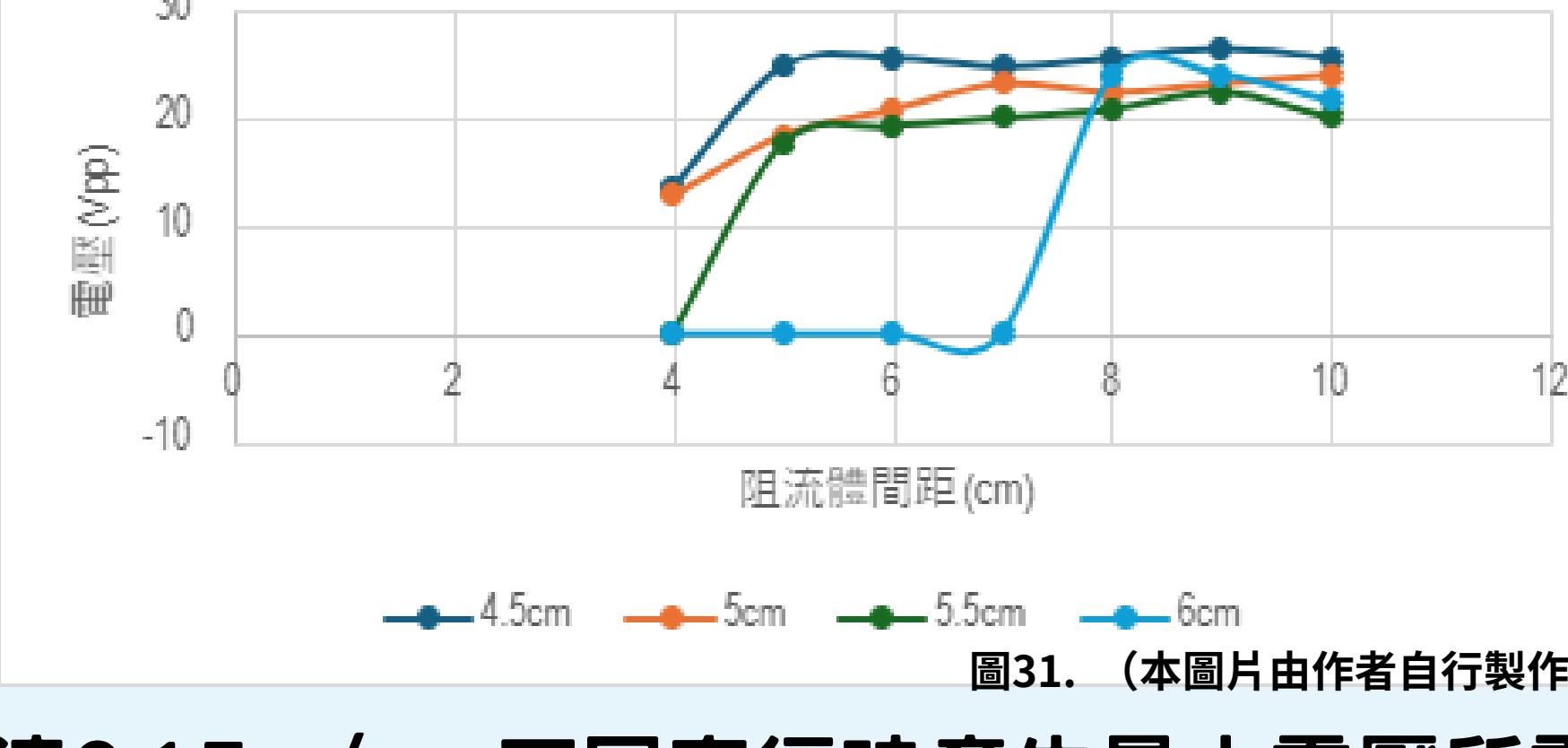
P1、P2，其放置間距對電壓的影響



流速0.15m/s、不同阻流體間距在不同直徑對電壓之影響



流速0.25m/s、不同阻流體間距在不同直徑對電壓之影響



(一) 流速0.15m/s，不同直徑時產生最大電壓所需之間距

直徑 (cm)	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
間距 (cm)	無法測量	6	1	無法測量						
電壓 (Vpp 測量)	無法測量	19.2	20.8	無法測量						

表二

(二) 流速0.20m/s，不同直徑時產生最大電壓所需之間距

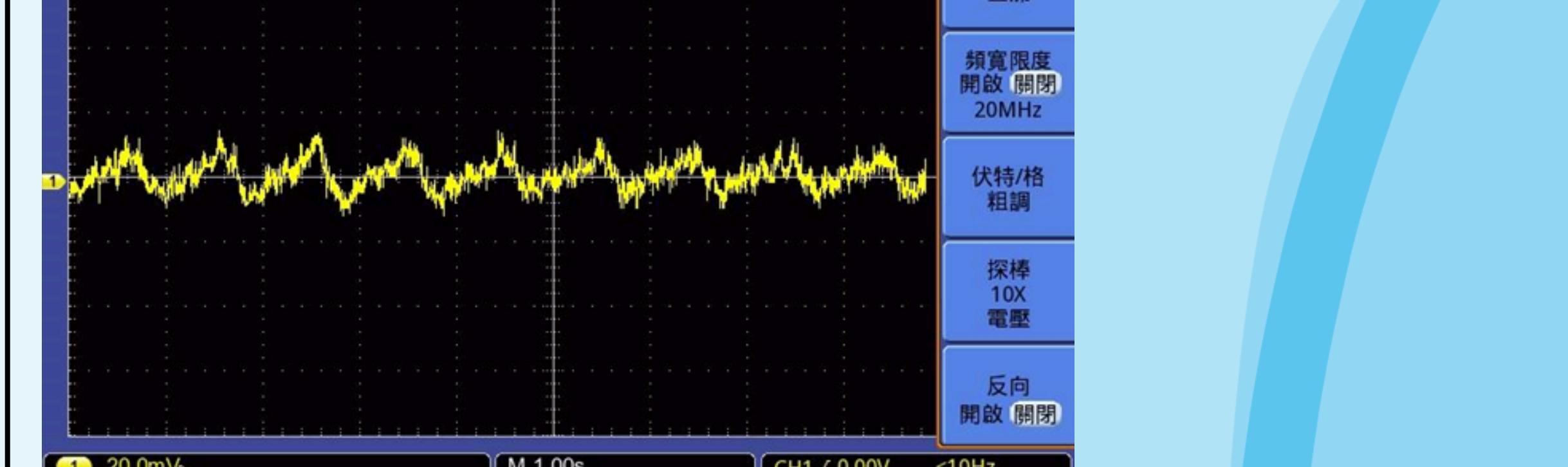
直徑 (cm)	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
間距 (cm)	6	7	8	6	6	3	3	1	3	6
電壓 (Vpp)	19.2	21.6	32	27.8	28.8	28.1	29.6	25.6	21.8	21.6

表三

(三) 流速0.25m/s，不同直徑時產生最大電壓所需之間距

直徑 (cm)	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
間距 (cm)	無法測量	8~9	9	10						
電壓 (Vpp 測量)	無法測量	無法測量	測量	測量	測量	測量	測量	24	26.4	24

表四



捌、參考文獻資料

王安邦、張彥中 (1996)。抑制圓柱渦旋剝離之實驗研究。中國航空太空學會學刊，28(3)，249-254。取自：[https://doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28\(3\).09](https://doi.org/10.6124/TAASRC.199609_28(3).09)

卡門渦街，大自然的詩意律動。網路影片。取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=0V8rUu2GPqA>

林順利 (2000)。流體通過彈性圓管排列之流場分析 (碩士論文)。國立中山大學機械工程研究所。取自：<https://hdl.handle.net/11296/z779uv>

俄伏爾加河大橋發生離奇蛇形共振。網路影片。取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=A5QW6fjHAr0&list=PLjwXw8d827B4RVciCOJUUb3Rlxui33qN&index=1>

陳義裕 (2003-2004)。高一力學課程大要 Lectures 13-14 流體物理。國立台灣大學物理學系。取自：<https://web.phys.ntu.edu.tw/ap/YY13-14.pdf>

渦街(流)流量計的原理。取自：<https://www.dnh-tech.com.tw/upload/skill/file/20191223145210sxe.pdf>

Cesareo de la rosa siqueira. (2005, March 22). File:Vortex-Street-Animation.Gif. <https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Vortex-street-animation.gif#file>

Gisling. (2008, April). File:Karman Vortex Street.Jpg. https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Karman_vortex_street.jpg#mw-jump-to-license

Jürgen wagner. (2014, October 21). Visualisation of the Von Kármán Vortex Sheet behind a Circular Cylinder in Air Flow. https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Karmansche_Wirbelstr_kleine_Re.JPG#mw-jump-to-license

Robert calahan, nasa/gsfc. (1999, September 15). File:Vortex-Street-1.Jpg. <https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Vortex-street-1.jpg#mw-jump-to-license>

Von Karman Street Vortex Suppression Study。網路影片。取自：

https://www.youtube.com/watch?v=24tBX_UD3fM&list=PLjwXw8d827B4RVciCOJUUb3Rlxui33qN&index=5

圖片來源：

一、<https://www.takungpao.com/lens/235128/2021/0524/588834.html>

二、

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%96%AF%E7%89%B9%E5%8A%B3%E5%93%88%E5%B0%94%E6%95%9C>