

# 台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：漩渦之美

得獎獎項：儲備代表

學 校：國立臺南第一高級中學

作 者：陳奕中

## 作者簡介



陳奕中，於 1985 年生於台南市。國小到國中的學程都在台南市完成，目前就讀台南一中資優班。求學過程中，善於與同學相處，並屢任幹部。在校成績卓越，常名列前茅，尤其在物理科方面有傑出的表現。主要表現如下：國中時獲得全校演講比賽第四名、國中時參加全校科學展覽獲得物理組特優以及發明組佳作、國中畢業時獲得全校第二名。

# 漩渦之美

## 摘要

我們常可以在自然界中發現漩渦的存在，但其存在的形體與性質也不盡相同，爲了研究漩渦的結構與形體，筆者分析出多種會對漩渦產生影響的因素：開始放流的水面高度、放流洞口大小、有無破壞漩渦結構的阻礙、單孔落流漩渦與雙孔落流漩渦、還有流體的黏滯度對漩渦的影響，但漩渦是一個不斷改變的流體，非常難以觀察，且自然界的漩渦也不是說出現就出現，所以必須設計一個簡易實驗器材來觀察，並用數位攝影機紀錄下來，再慢慢分析，而我們也可以在這個實驗中了解漩渦的結構，和體會到漩渦所表現出自然界的力與美的一面。

## Abstract

We can always find in nature of different swirl's forms and properties. To study the swirls, we analyzed such factors, as the beginning water level, the size of the hole, the presence of obstruction that will destroy the structure of swirls, differences between single-hole-swirls and twin-hole-swirls, and the viscosity of fluid. Because swirls change all the time, it is very difficult to observe. We designed a device .The procedure was recorded with a digital video camera and analyzed it. The study helps us understand the structure of swirls and admire the beauty of swirls.

# 漩渦之美

## 壹、研究動機

在我們的地球上，水是含量最多的物質，同時也是與我們關係最為密切的，我們需要它來延續我們的生命，也需要它來行使我們生活上的大部分行為。但俗語說：「水能載舟，亦能覆舟。」它雖帶給我們便利，但相反的，它也有其驚人的一面—漩渦！它的力量是不能忽視的—能夠再一瞬間吞噬一個人以至於一條船，也就是這點引起了我的興趣，想研究到底是為什麼會有如此大的神秘力量呢？進而能夠了解到液體的螺旋狀運動之相關知識。

## 貳、研究目的

設計一個漩渦的實體模型來探討液體的螺旋狀運動。研究項目如下：

- 一、藉由設計不同尺寸之流出洞口（不同個數、改變孔徑、形狀及位置），探討漩渦的不同變化。
- 二、藉由設計不同的水量，探討漩渦的不同變化。
- 三、設計實驗探討不同的與邊距離，探討漩渦受阻礙的情形。
- 四、設計實驗探討不同的空距的雙孔落流漩渦的互相影響。
- 五、利用電腦程式模擬，繪出漩渦的理論曲線與實際比較。

## 參、研究器材

- 一、水槽
- 二、塞子
- 三、壓克力容器
- 四、數位攝影機
- 五、電腦加掃描器
- 六、數學、繪圖軟體

## 肆、研究過程

### 一、漩渦之相關變因

#### 1. 控制變因：

容器之截面積、容器底部出洞口（單孔、雙孔、大小、在底部的位置……）。

#### 2. 應變變因：

漩渦產生高度，漩渦內直徑、外直徑的大小。

### 二、會產生漩渦的最小直徑

#### 1. 推論：

由日常生活的經驗可知，從裝滿水的容器底部開一個洞口即可產生漩渦，所以只要創造出相同的狀況必能產生漩渦。

#### 2. 驗證：

以不同口徑的壓克力板在容器底部置換，觀察是否產生漩渦。找出會產生漩渦之直徑最小值為 1.67 公分。

3. 驗證實驗-孔徑必須大於多少才能產生漩渦：
  - (1) 以一壓克力箱底下鑽一直徑 0.2cm 的洞。
  - (2) 將此孔封住，並加至 13cm。
  - (3) 放開此洞的塞子，水即往下流出。
  - (4) 觀察有無漩渦產生。
  - (5) 以一次增加直徑 0.1cm 不斷重複本實驗，直到產生漩渦為止。

### 三、會產生漩渦時與邊的最小值

1. 推論：

由於漩渦本身是一個會轉動的錐體，所以若將錐體之上作一截面，則漩渦必會受到阻礙，可能不產生漩渦，或者是漩渦本身結構受到改變（變不完整或自行縮小內外直徑）
2. 驗證：

以不同位置的壓克力板在容器底部置換，觀察是否受到邊的阻礙而不產生漩渦。找出會產生漩渦之最小與邊距離為 2.43 公分。
3. 驗證實驗：
  - (1) 以一壓克力箱底下鑽一直徑 0.2cm 的洞。
  - (2) 將此孔封住，並加至 13cm。
  - (3) 放開此洞的塞子，水即往下流出。
  - (4) 觀察有無漩渦產生。
  - (5) 以一次增加與邊距離 0.1cm 不斷重複本實驗，直到產生漩渦。

### 四、了解漩渦與不同開口大小及起始高度的關係

1. 推論：

由於流體必會受到壓力的影響，所以水的流動行為必與水壓息息相關。又由水壓公式  $p=hd$  得知水壓與高度有關。再者，口徑大小控制水的流出速率，連帶著改變壓力的變動速率。所以流出口徑的大小，是研究漩渦非常重要的一環。
2. 驗證：
  - (1) 口徑大小：

以不同口徑的壓克力板在容器底部置換，由能夠產生漩渦的最小口徑開始測量漩渦的結構。(漩渦的結構：指產生漩渦的深度、內直徑、外直徑等應變變因)
  - (2) 起始高度：

加入不同高度的水在容器中，放掉容器底部的孔，等有漩渦出現時即可開始測量漩渦的結構。

### 伍、實驗步驟與實驗結果

#### 一、單孔自由落流漩渦與起始水高的關係

1. 實驗步驟：
  - (1) 把壓克力底板（口徑 4 公分）的所有開口塞住，加水到一定高度。
  - (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
  - (3) 把中間的洞口放開，檢視漩渦產生的高度。

- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 改變開始水高，重複 1 到 4 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑。
- (7) 用電腦繪出實驗曲線。

2. 實驗結果：

- (1) 放流水口徑 3 公分時，不同起始水高放流到 5 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 1 及圖 1。
- (2) 放流水口徑 3 公分時，不同起始水高放流到 2 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 2 及圖 2。
- (3) 放流水口徑 4 公分時，不同起始水高放流到 5 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 3 及圖 3。
- (4) 放流水口徑 4 公分時，不同起始水高放流到 2 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 4 及圖 4。
- (5) 放流水口徑 5 公分時，不同起始水高放流到 5 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 5 及圖 5。
- (6) 放流水口徑 5 公分時，不同起始水高放流到 2 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 6 及圖 6。

二、單孔自由落流漩渦與口徑的關係

1. 實驗步驟：

- (1) 把壓克力底板的所有開口塞住，加水到 13 公分。
- (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
- (3) 把中間的洞口放開，檢視漩渦產生的高度。
- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 改變口徑，重複 1 到 4 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑。
- (7) 用電腦繪出實驗曲線。

2. 實驗結果：

放流水口徑不同時，起始水高由 13 公分分別放流到 5 公分及 2 公分時，測量內外直徑之實驗結果示於表 7 及圖 7-1、圖 7-2。

三、雙孔自由落流漩渦與孔距的關係

1. 實驗步驟：

- (1) 把壓克力的底端所有開口塞住，加水到 13 公分。
- (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
- (3) 把其上特定的二個洞放開，約一到二秒有漩渦產生。
- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 換成不同孔距的孔，重複 1 到 3 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑。

(7) 用電腦繪出實驗曲線。

2. 實驗結果：

- (1) 放流水口徑 3 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 8 及圖 8。
- (2) 放流水口徑 3 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 9 及圖 9。
- (3) 放流水口徑 4 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 10 及圖 10。
- (4) 放流水口徑 4 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 11 及圖 11。
- (5) 放流水口徑 5 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 12 及圖 12。
- (6) 放流水口徑 5 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同孔距下，測量內外直徑之實驗結果示於表 13 及圖 13。

四、雙孔自由落流漩渦與口徑的關係

1. 實驗步驟：

- (1) 把壓克力的底端所有開口塞住，加水到 13 公分。
- (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
- (3) 把其上孔距為 15 公分的二個洞放開，約一到二秒有漩渦產生。
- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 換成不同口徑的相同位置兩孔，重複 1 到 3 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑
- (7) 用電腦繪出實驗曲線。

2. 實驗結果：

孔距 15 公分，起始水高由 13 公分分別放流到 5 公分及 2 公分，在不同口徑下，測量內外直徑之實驗結果示於表 14 及圖 14-1、圖 14-2。

五、單孔落流渦流與邊的相距關係

1. 實驗步驟：

- (1) 把壓克力的底端所有開口塞住，加水到 13 公分。
- (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
- (3) 把其上的邊孔放開，約一到二秒有漩渦產生。
- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 換成不同位置的邊孔，重複 1 到 3 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑。
- (7) 用電腦繪出實驗曲線。

2. 實驗結果：

- (1) 放流水口徑 3 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 15。由實驗數據顯示，只有在邊孔 10 公分

時才有漩渦出現，所以無法繪圖。

- (2) 放流水口徑 3 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 16 及圖 15。
- (3) 放流水口徑 4 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 17。由實驗數據顯示，只有在邊孔 7 公分時才有漩渦出現，所以無法繪圖。
- (4) 放流水口徑 4 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 18 及圖 16。
- (5) 放流水口徑 5 公分，起始水高由 13 公分放流到 5 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 19。由實驗數據顯示，只有在邊孔 8 公分、7 公分及 6 公分時才有漩渦出現，所以無法繪圖。
- (6) 放流水口徑 5 公分，起始水高由 13 公分放流到 2 公分時，在不同邊孔下，測量內外直徑之實驗結果示於表 20 及圖 17。

## 六、邊孔與口徑的關係

### 1. 實驗步驟

- (1) 把壓克力的底端所有開口塞住，加水到 13 公分。
- (2) 攝影（用數位攝影機連續攝影，輸入電腦）。
- (3) 把其上的邊距 6 公分的邊孔放開，約一到二秒有漩渦產生。
- (4) 水位至 5 公分及 2 公分時，分別以聲音儲存在攝影機內。
- (5) 換成不同口徑的邊孔，重複 1 到 3 的步驟數次。
- (6) 攝影後將影像存入光碟，以比例尺的方法測量漩渦的 5 公分和 2 公分內外直徑
- (7) 用電腦繪出實驗曲線。

### 2. 實驗結果

邊距 6 公分，起始水高由 13 公分分別放流到 5 公分及 2 公分，在不同口徑下，測量內外直徑之實驗結果示於表 21 及圖 18。

## 陸、結果討論

### 一、不同起始高度之漩渦

由圖 1 中我們可以清楚的知道不同起始高度的漩渦在口徑 3 公分水高 5 公分時的內直徑方程式和外直徑二次方程式分別為  $-0.0086x^2 + 0.1926 - 0.426 = y$  和  $-0.0074x^2 + 0.1869x + 0.1315 = y$ ，由於其  $x^2$  趨近於零，所以視為線性函數。又兩者  $x$  項之差小於 0.01，所以我們可將其視為相同，得兩曲線經平移後幾乎完全重合之結果。圖 2 之內外直徑兩方程式  $-0.0125x^2 + 0.2969x - 0.5731 = y$  和  $-0.0122x^2 + 0.2747 - 0.674 = y$ ，更不難發現，兩方程式之  $x^2$  和  $x$  項幾乎完全相等，更可以證明以上的論點。由此可知漩渦中心的空心結構在不同起始高度的



狀況下皆是一個圓錐體，不同的只有其底面積的大小。由圖 19 可知，雖然實驗曲線成不規則上下震動，但其二次函數之  $x^2$  約為 0 所以為一次函數，可知漩渦中心圓錐體的直徑隨著起始高度的減小而變大。

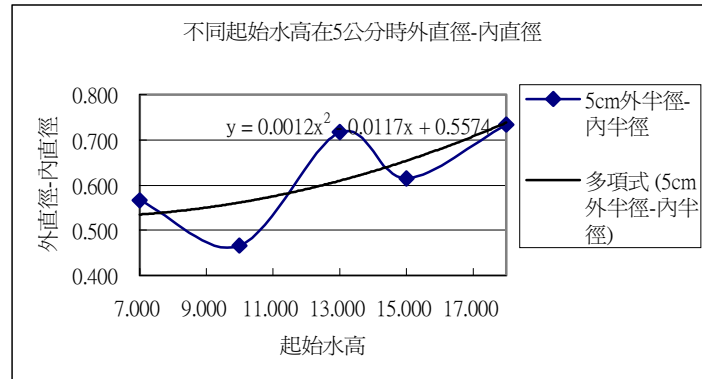


圖 19-1

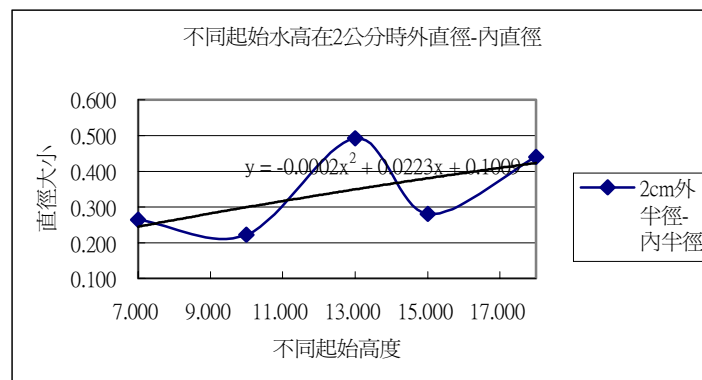


圖 19-2

## 二、不同口徑對單孔落流漩渦的影響

由圖 7-1 和圖 7-2 可知不同口徑對漩渦之外直徑影響為一二次函數曲線，而有一值會使漩渦之外直徑趨近於最大；對內半徑則無甚影響。若有更多組數據應該不難知道漩渦口徑超過了某  $x$  值（趨近於 4.5 公分），漩渦之外直徑開始縮小；而小於  $x$  值，也會縮小。綜合以上結論，推測口徑大者可能是水流流出過快，以致於其表層的水必須直接從最上層落下，造成漩渦之外直徑與內直徑差比口徑在  $x$  值時還小；而口徑小者是由於漩渦太小，無法對週遭水流產生足夠的帶動力量，所以漩渦之外直徑當然也比較小（如圖 20）。所以在口徑有  $x$  值時（趨近於 4.5 公分）漩渦之大小為最大，超過或小於都會使漩渦縮小。

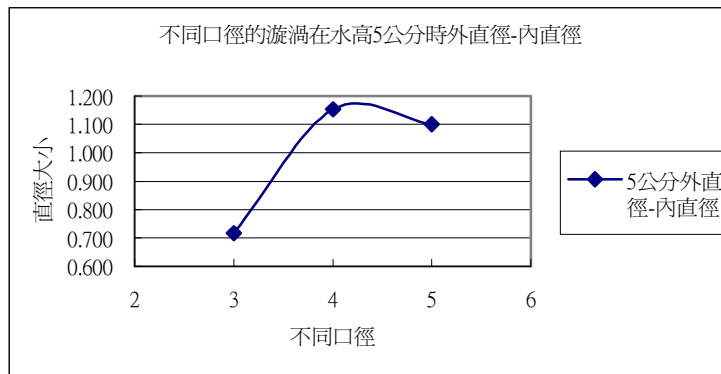


圖 20-1

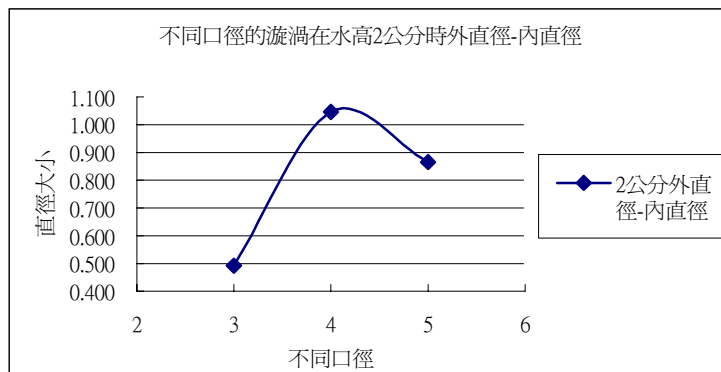


圖 20-2

### 三、不同孔距與口徑對雙孔落流漩渦的影響

由圖可知漩渦之外直徑受到孔距大小影響甚鉅。由於漩渦會帶動週遭水流一起旋轉。而且因為位於北半球，所以以逆時針旋轉。當兩相當靠近之漩渦在一起時，兩漩渦之周圍水流會因旋轉方向相同而相撞(如圖 21)，造成漩渦之結構受到破壞。所以孔距大小與雙孔落流漩渦有極大關係，當孔距太小時，干擾相當嚴重，有時漩渦非常晚才出現，而且常常出現後又消失，結構相當不穩。當孔距太大時，干擾並不嚴重，不過還是有些微的影響。其漩渦出現時間比單孔落流漩渦還晚，且較小(如圖 22)。而口徑對雙孔落流漩渦也有極深的影響，上面提過在口徑為某  $x$  值時，漩渦會最大，此時期其相撞之水流體積也比較多，所以漩渦結構也比較殘缺。而漩渦結構越小時，相對的其相撞之水流體積也比較少，所以漩渦較完整(如圖 23)。

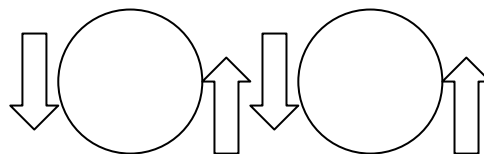


圖 21

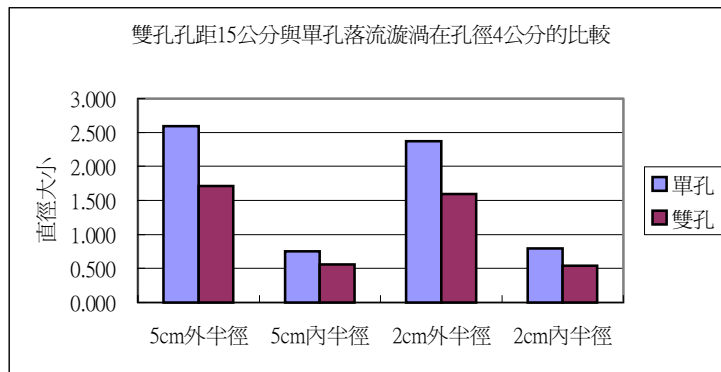


圖 22

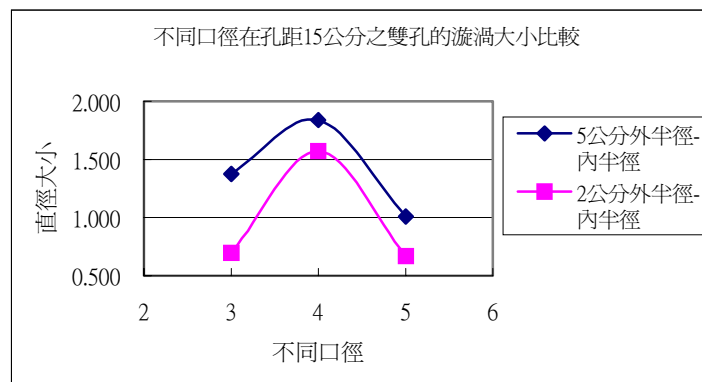


圖 23

此外本實驗也引發出一個新發現，那就是當漩渦孔距太近時，兩者各自產生的漩渦會因靠太近而相糾纏在一起，形成一個新漩渦，然後在 0.5 秒前後，新漩渦的內直徑往某一方偏去，而形成一大型漩渦；另一孔則又產生一非常小的漩渦，但受到大型漩渦的壓迫而無法擴張的太大。

#### 四、不同邊距之邊孔的討論

本實驗不同於以上未受破壞的單孔落流漩渦和兩漩渦互相撞擊之雙孔落流漩渦的實驗，是因為水流無法通過容器的邊壁而受到完全破壞，所以本實驗之漩渦在水高 5 公分時，普遍尚未出現；而即使在水高 2 公分時，出現的漩渦也非常不穩定。由圖知，漩渦之外直徑隨著趨近於邊壁而增大，且在通過某最低點後，又開始上升。我們可以說外直徑隨著趨近於邊壁而增大是因為水的內聚力將漩渦拉近邊壁，而此時，漩渦對邊的水流仍依循著原本的行進路線前進，所以漩渦錐體之地面積增大，直徑增加。至於在通過某最低點後，又開始上升是因為其水流已有部分脫離阻礙，漸漸恢復到單孔落流漩渦的模式，其外直徑漸漸加大。而內直徑不變是因為漩渦太晚產生，無法帶動水流，所以所落下之水流皆從表層的水而來並不是由旁邊注入。而漩渦產生前，水流才開始旋轉，自然無法擴張。因此所有同口徑的邊距漩渦內直徑大約相同。

#### 五、邊孔與口徑的關係

在本實驗中，口徑越大者，在越接近邊距時，其外直徑會越大是因為漩渦之錐體底面積越大，周圍水流越接近邊壁，所以產生的內聚力也越強，將漩渦的邊緣

拉的更向邊壁，所以外直徑會越大。但其內直徑之平均值則與漩渦口徑成一比例關係，是因為漩渦出現太晚，邊緣的水流想要落下時，只能依循著表層水流落下，又外直徑隨口徑增加而增大，所以內直徑隨外直徑增大而增大。

至於口徑 4 公分時出現的不尋常特例，可能可以提出說漩渦落下時周圍的水流流動並不是整體的，而是分好幾層的。會有這種說法，是因為漩渦之外直徑不自然擴大，可能代表有某一層之漩渦水流恰完全未受阻礙，所以其行跡類似於單孔落流漩渦。

## 六、實驗問題與改進

本實驗有以下幾問題需要改進：

1. 由於必須更換底板的關係，所以邊壁與底板之間無法相當密合，有漏水之虞。經膠布補強後，雖能有少許水漏出，但漏出之水量對本實驗已無甚影響。
2. 本實驗之水面無法做到完全靜止，因為拔塞子時必會影響到水面，而導致水面震盪造成底部各點水壓不均。但震盪幅度小於 0.2 公分，對實驗誤差並不大。
3. 由於本實驗實驗器材之不足，所以能測量之數據太少，無法使實驗曲線更精準。

## 柒、結論

由實驗結果本小組得到下列幾點結論：

- 一、漩渦中心圓錐體的直徑隨著起始高度的減小而變大。
- 二、漩渦錐體之底面積大小在口徑為某一  $x$  值時（趨近於 4.5 公分）達到最大，超過或太小都會使漩渦錐體之底面積變小。
- 三、雙孔落流漩渦錐體之底面積大小隨孔距變小而變小。
- 四、雙孔落流漩渦錐體之底面積大小隨口徑變大而變小。
- 五、漩渦錐體之底面積大小在邊距為某一  $x$  值時達到最小，超過或太小都會使漩渦錐體之底面積變小。
- 六、邊孔落流漩渦錐體之底面積大小隨口徑變大而變大。
- 七、漩渦周圍水流可能是由多層行徑不同的水流所構成。

## 捌、未來推廣

在這廣大的地球上，漩渦是處處可見的，只要是流體就有可能產生漩渦，從龍捲風以至於一般的水流漩渦都是一種漩渦，但礙於實驗器材的限制，所以目前只能做有關於水的漩渦類型，如果有機會，或許可以研究不同性質的流體對漩渦的影響。

由邊孔的實驗中筆者發現，如果有障礙物進入漩渦的結構當中，則漩渦的運動行為明顯的受到極大的改變。也許我們可以藉著置放障礙物的方法來阻擋自然界的漩渦產生。

在雙孔落流漩渦的實驗中發現兩個漩渦在同時落流時，會有兩種情況發生。一是其中一個漩渦先出現，而且比後出現的漩渦大上許多。另一個則是兩個一起出現且大小差不多大。筆者估計，在這兩者情況中，兩漩渦之內直徑相加、外直徑相加會呈現出一定值。不過受限於攝影機的鏡頭拍攝角度無法到達那麼寬，無法將兩者同時拍下觀察，實為遺憾。

在實驗三中，發現雙孔落流漩渦若靠的太近會相混合在一起，只不過由於實驗時間

不夠無法進一步研究，希望在以後能有時間繼續將此理論發展。

在實驗五中，推測漩渦周圍水流可能是由多層行徑不同的水流所構成，但由於實驗時間不夠無法進一步研究，希望在以後能有時間繼續探討。

#### 玖、參考資料

Robert W. Fox and Alan. T. Mcdonald，流體力學導論【INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS】，第三版，東華書局 1987，台北市， p3、p4、p24、p25、p26、p35、p36、p37、p42。

#### 拾、致謝

能完成本實驗，首先要感謝暑假兩個月來在旁指導的余青展老師，在筆者實驗遇到瓶頸時能教授專業的實驗技巧及努力的方向;也要感謝本校的設備組長鄧明聖先生提供數位攝影機供實驗時使用，最後由衷的感謝所有對於本實驗有貢獻的人員。

表 1 口徑 3 公分時不同起始水高在水高 5 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	0.995	0.261
15.000	1.087	0.472
13.000	1.365	0.648
10.000	1.116	0.650
7.000	1.056	0.490

表 2 口徑 3 公分時不同起始水高在水高 2 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	0.750	0.310
15.000	0.966	0.686
13.000	1.337	0.845
10.000	1.063	0.841
7.000	0.916	0.652

表 3 口徑 4 公分時不同起始水高在水高 5 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	1.524	0.644
15.000	1.259	0.484
13.000	1.714	0.561
10.000	1.452	0.454
7.000	1.275	0.796

表 4 口徑 4 公分時不同起始水高在水高 2 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	1.394	0.658
15.000	0.940	0.592
13.000	1.591	0.544
10.000	1.018	0.528
7.000	1.189	0.957

表 5 口徑 5 公分時不同起始水高在水高 5 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	1.508	0.610
15.000	1.342	0.420
13.000	1.404	0.304
10.000	2.201	1.206
7.000	1.908	1.050

表 6 口徑 5 公分時不同起始水高在水高 2 公分的內外直徑

起始水高（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
18.000	1.274	0.769
15.000	1.187	0.487
13.000	1.261	0.396
10.000	1.636	1.348
7.000	1.642	1.045

表 7 不同口徑之單孔落流漩渦

不同口徑	3 公分	4 公分	5 公分
5 公分外直徑	1.365	1.714	1.404
5 公分內直徑	0.648	0.561	0.304
2 公分外直徑	1.337	1.591	1.261
2 公分內直徑	0.845	0.544	0.396

表 8 口徑 3 公分時不同孔距在水高 5 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑	內直徑
18.000	1.732	0.685
15.000	1.807	0.433
9.000	2.056	0.889
7.500	1.768	0.661

表 9 口徑 3 公分時不同孔距在水高 2 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑	內直徑
18.000	1.246	0.788
15.000	1.367	0.669
9.000	1.466	0.834
7.500	1.465	0.628

表 10 口徑 4 公分時不同孔距在水高 5 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑	內直徑
15.000	2.592	0.753
13.000	1.692	0.941
10.000	2.923	1.062
7.500	*	*

<\*>代表漩渦尚未出現

表 11 口徑 4 公分時不同孔距在水高 2 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
15.000	2.368	0.794
13.000	1.344	0.967
10.000	1.923	0.906
7.500	1.203	0.446

表 12 口徑 5 公分時不同孔距在水高 5 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
20.000	1.452	0.397
15.000	1.329	0.319
10.000	1.883	0.327
7.500	*	*

表 13 口徑 5 公分時不同孔距在水高 2 公分時的內外直徑

不同孔距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
20.000	1.219	0.545
15.000	1.155	0.483
10.000	1.570	0.531
7.500	1.365	0.418

表 14 不同口徑在孔距 15 公分時的內外直徑

不同口徑	3 公分	4 公分	5 公分
5cm 外半徑	1.807	2.592	1.329
5cm 內半徑	0.433	0.753	0.319
2cm 外半徑	1.367	2.368	1.155
2cm 內半徑	0.669	0.794	0.483

表 15 口徑 3 公分時不同邊孔在水高 5 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
10.000	1.068	0.418
9.000	*	*
8.000	*	*
6.000	*	*
5.000	*	*



表 16 口徑 3 公分時不同邊孔在水高 2 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
10.000	0.899	0.255
9.000	0.428	0.149
8.000	0.902	0.225
6.000	1.181	0.459
5.000	1.139	0.735

表 17 口徑 4 公分時不同邊孔在水高 5 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
8.000	*	*
7.000	1.723	0.354
6.000	*	*
5.000	*	*
4.000	*	*

表 18 口徑 4 公分時不同邊孔在水高 2 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
8.000	0.888	0.215
7.000	1.154	0.365
6.000	1.818	0.389
5.000	0.829	0.312
4.000	1.077	0.384

表 19 口徑 5 公分時不同邊孔在水高 5 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
8.000	1.443	0.340
7.000	1.221	0.234
6.000	1.498	0.175
5.000	*	*
4.000	*	*

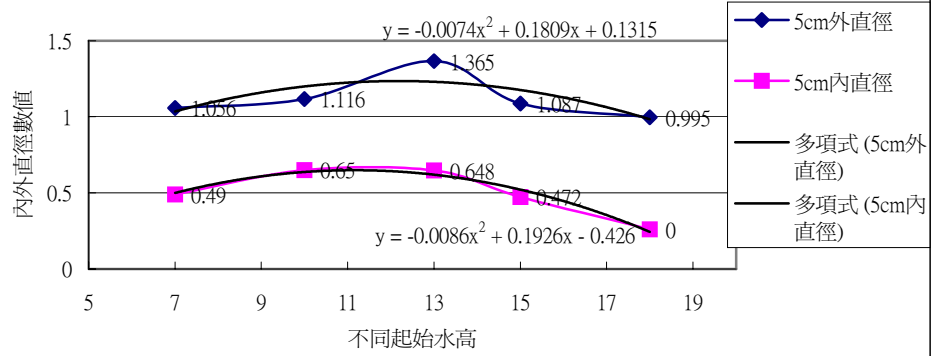
表 20 口徑 5 公分時不同邊孔在水高 2 公分時的內外直徑

不同邊距（公分）	外直徑（公分）	內直徑（公分）
8.000	1.650	0.419
7.000	1.004	0.385
6.000	1.312	0.368
5.000	1.478	0.260
4.000	*	*

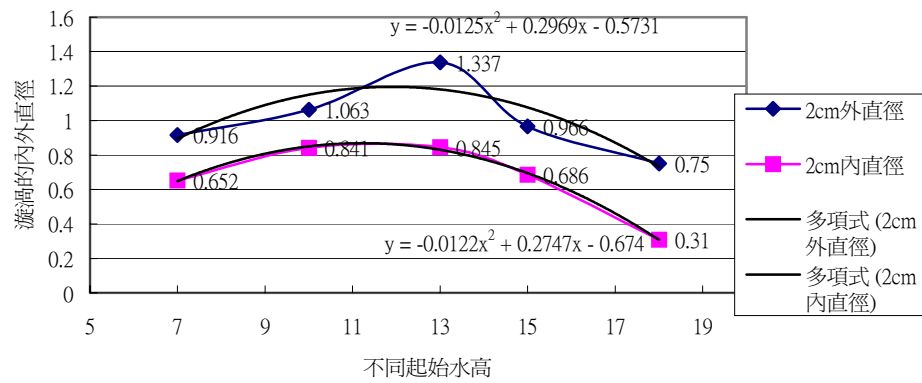
表 21 邊距 6 公分的邊孔與口徑的關係

不同口徑	3 公分	4 公分	5 公分
5cm 外直徑	*	*	1.498
5cm 內直徑	*	*	0.175
2cm 外直徑	1.181	1.818	1.312
2cm 內直徑	0.459	0.389	0.368

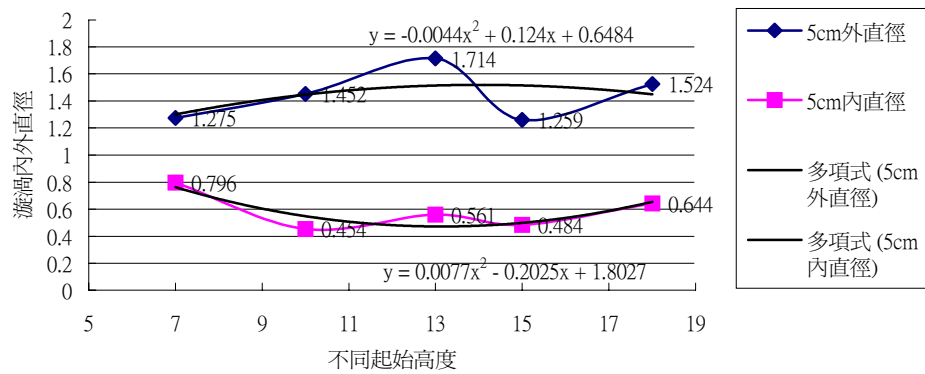
(圖1)孔徑3公分時不同起始水高在水高5公分時的內外直徑



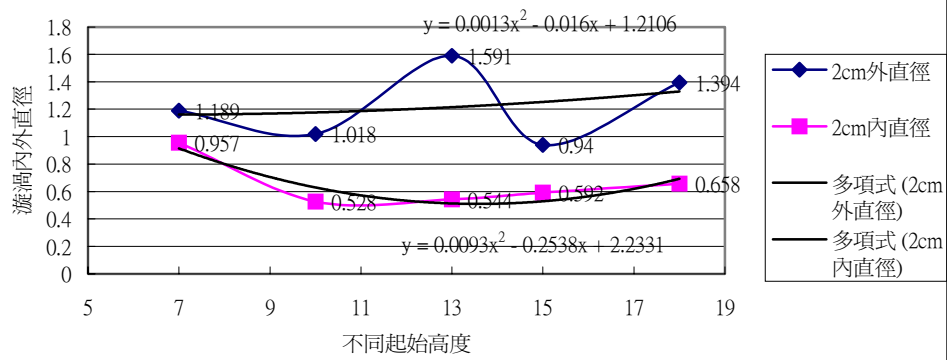
(圖2)孔徑3公分時不同起始水高在水高2公分時的內外直徑



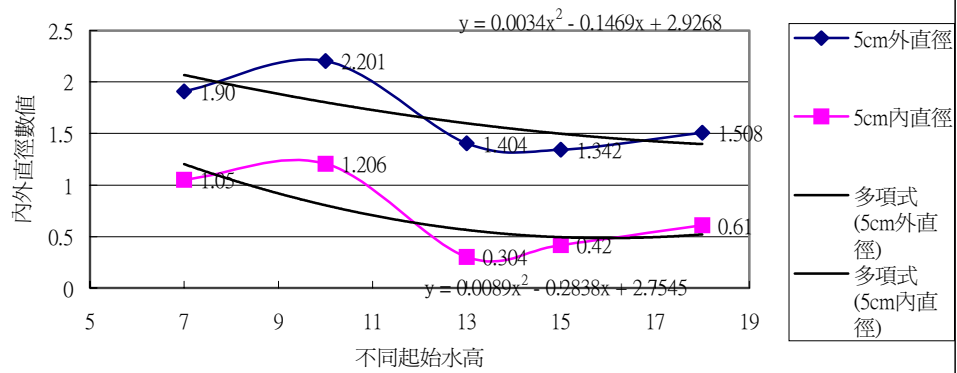
(圖3)孔徑4公分時不同起始高度在水高5公分的漩渦內外直徑



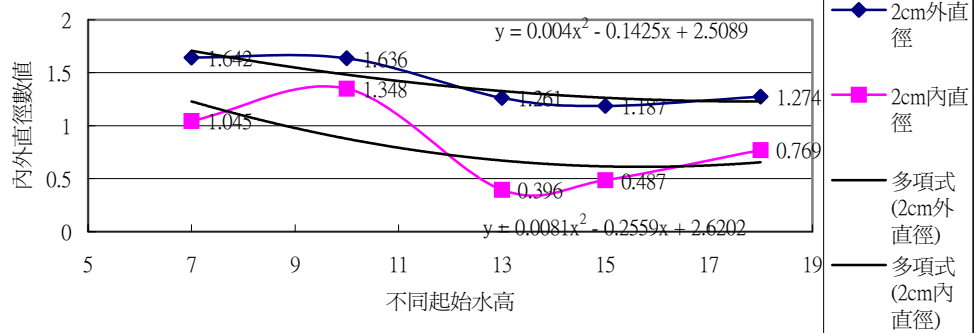
(圖4)孔徑4公分時不同起始高度在水高2公分的漩渦內外直徑



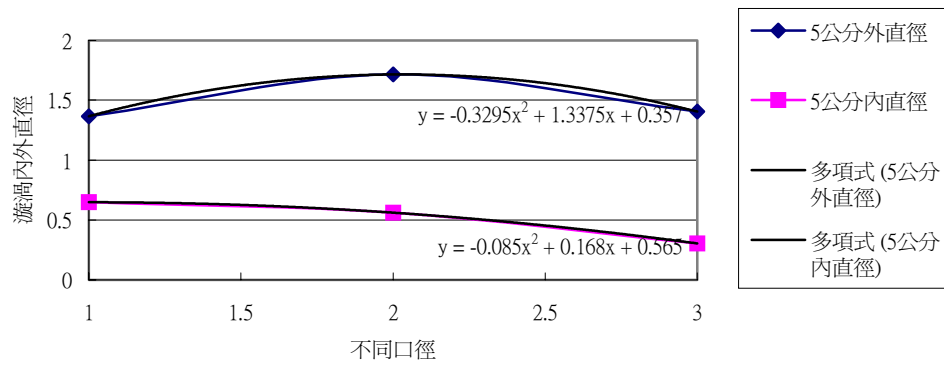
(圖5)(孔徑5cm)不同之起始水高在水高5cm時的內外直徑



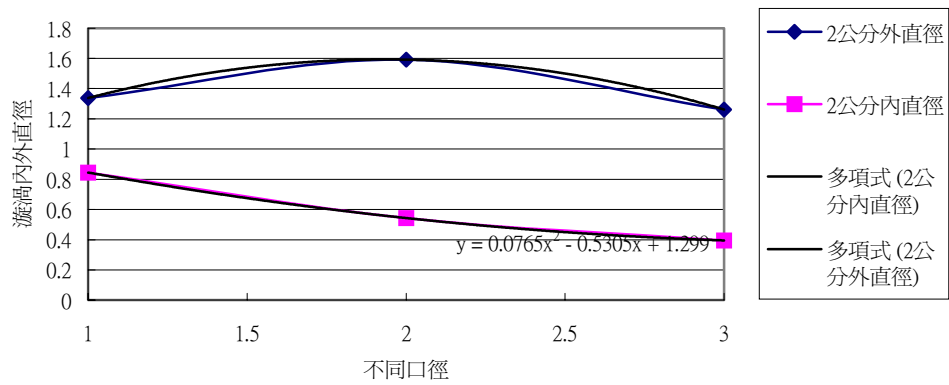
(圖6)(孔徑5cm)不同之起始水高在水高2cm時的內外直徑



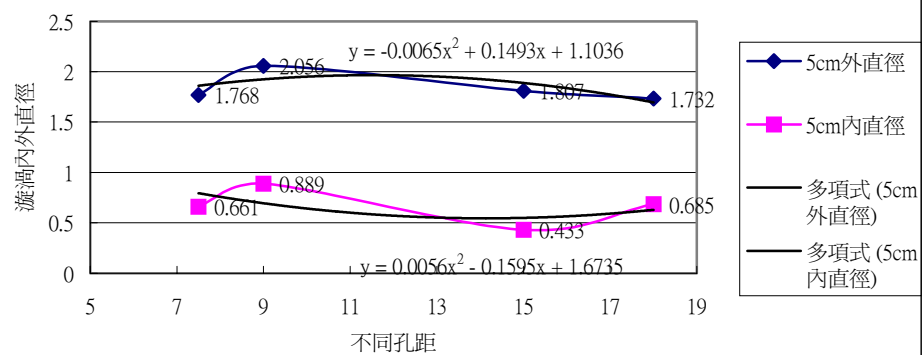
(圖7-1)不同口徑之漩渦在水高5公分的內外直徑



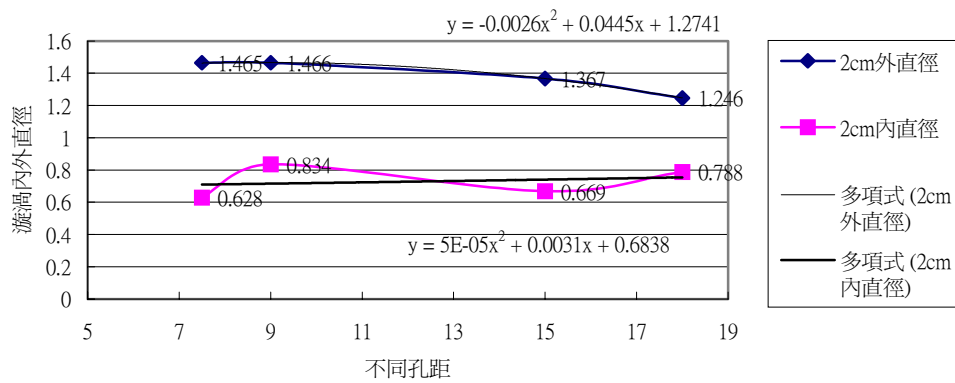
(圖7-2)不同口徑之漩渦在水高2公分的內外直徑



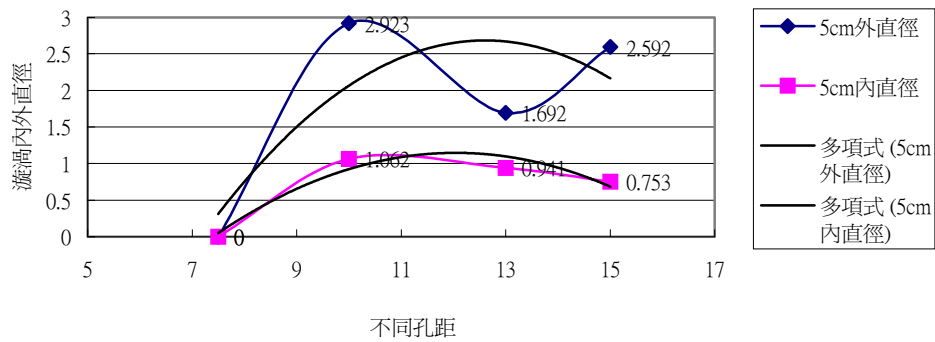
(圖8)(孔徑3公分)孔距不同之雙孔落流漩渦在5公分時的內外直徑



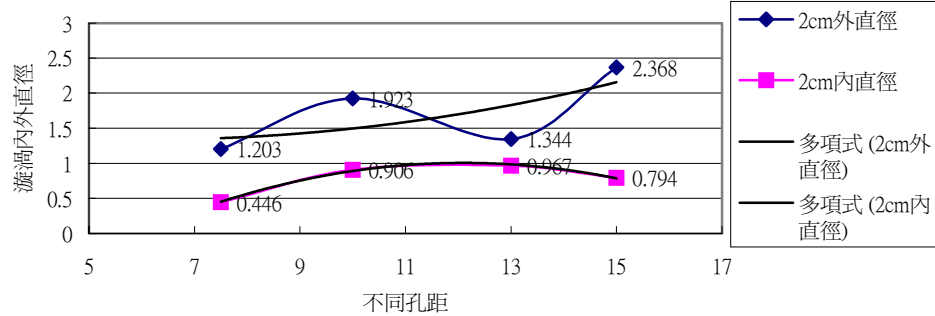
(圖9)孔徑3公分)孔距不同之雙孔落流漩渦在2公分時的漩渦內外直徑



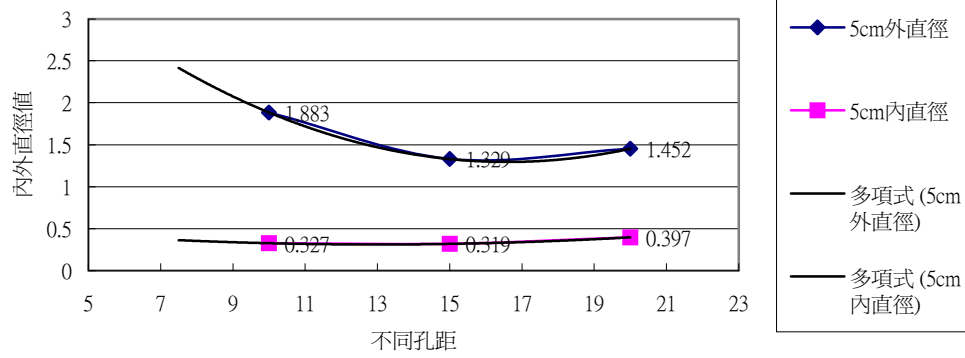
(圖10)不同孔距之雙孔落流漩渦在水高五公分時的漩渦內外直徑



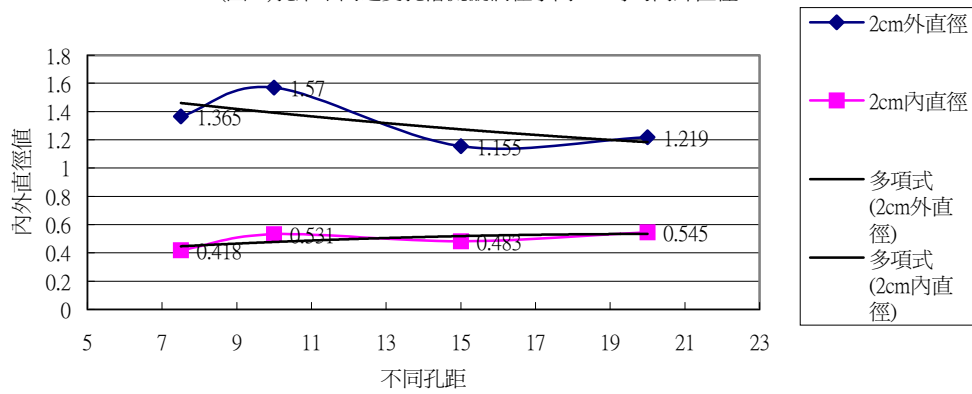
(圖11)不同孔距之雙孔落流漩渦在水高2公分時的漩渦內外直徑



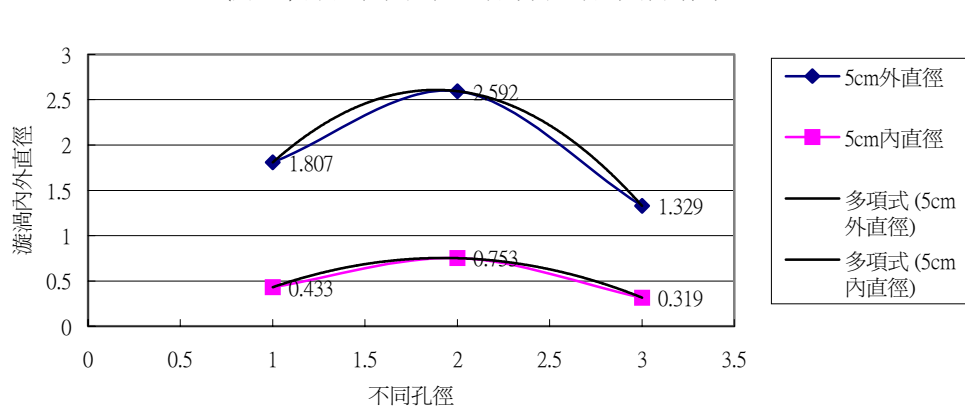
(圖12)孔距不同之雙孔落流漩渦在5cm時的內外直徑



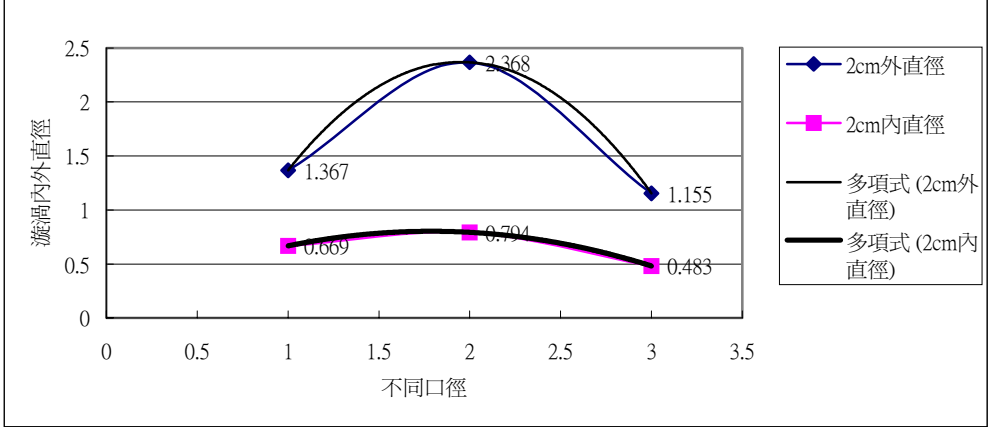
(圖13)孔距不同之雙孔落流漩渦在水高2cm時的內外直徑



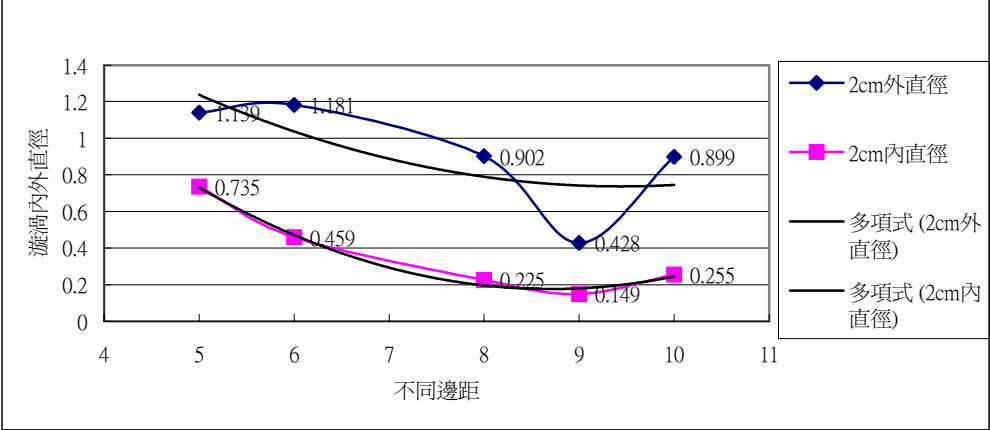
(圖14-1)不同口徑在孔距15公分水高5公分時的內外直徑



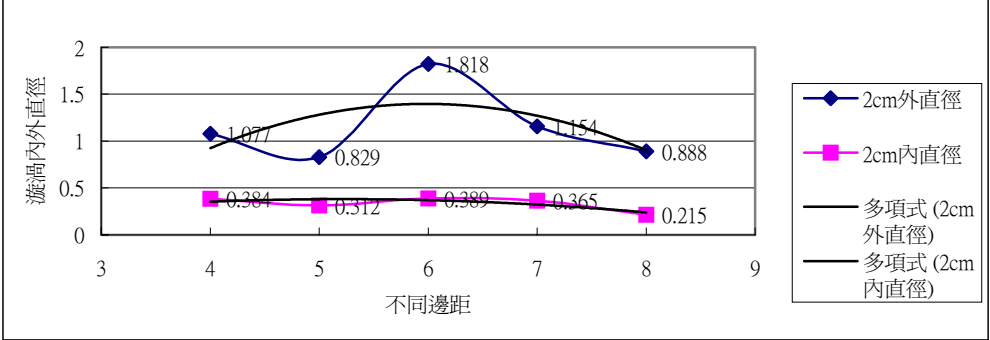
(圖14-2)不同口徑在孔距15公分水高2公分的內外直徑



(圖15)孔徑3公分不同邊距之邊孔在水高2公分時與漩渦內外直徑的關係

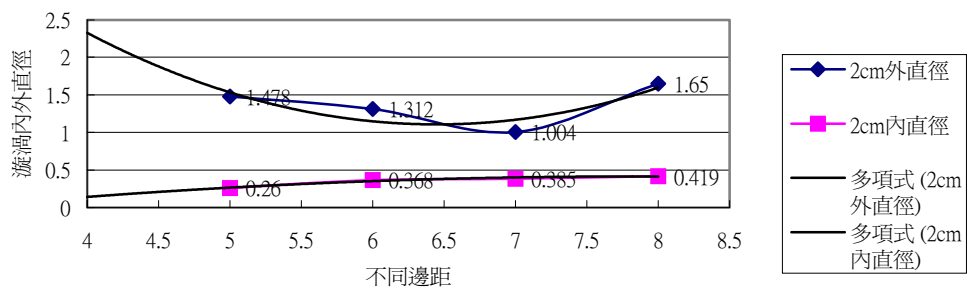


(圖16)孔徑4公分不同邊距之邊孔在水高2公分時與漩渦內外直徑的關係

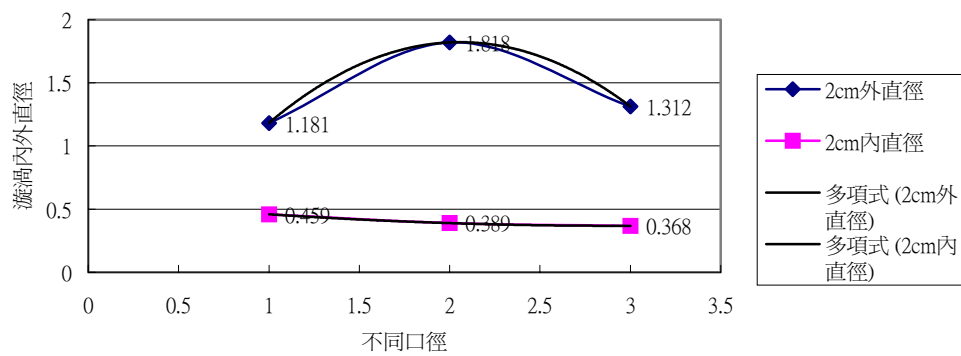




(圖17)孔徑5公分不同邊距的邊孔在水高2公分時與漩渦內外直徑的關係



(圖18)不同口徑在邊距6公分水高2公分時的內外直徑



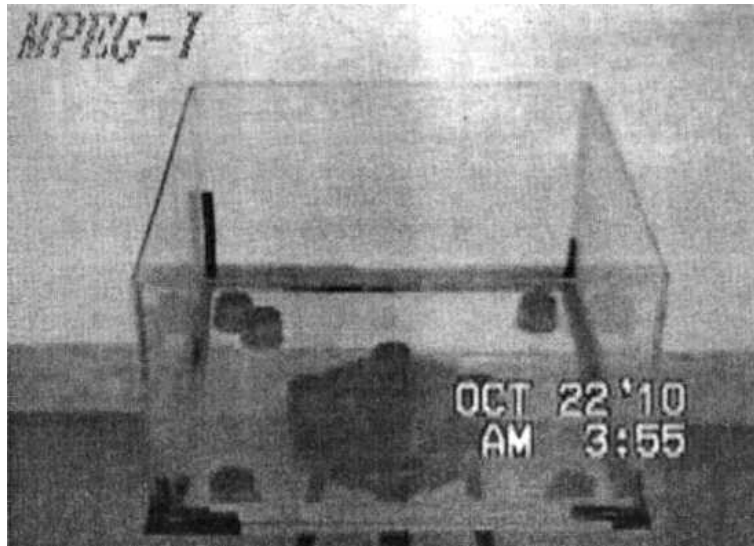


圖 23：實驗裝置圖

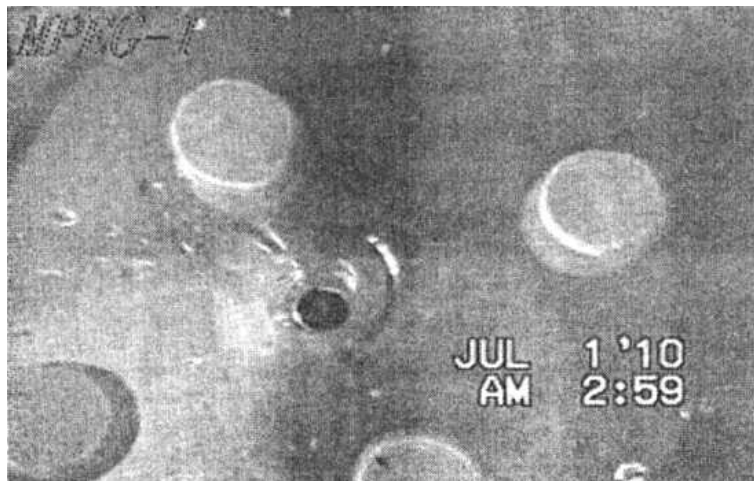


圖 24：漩渦落流圖(由上面觀察)

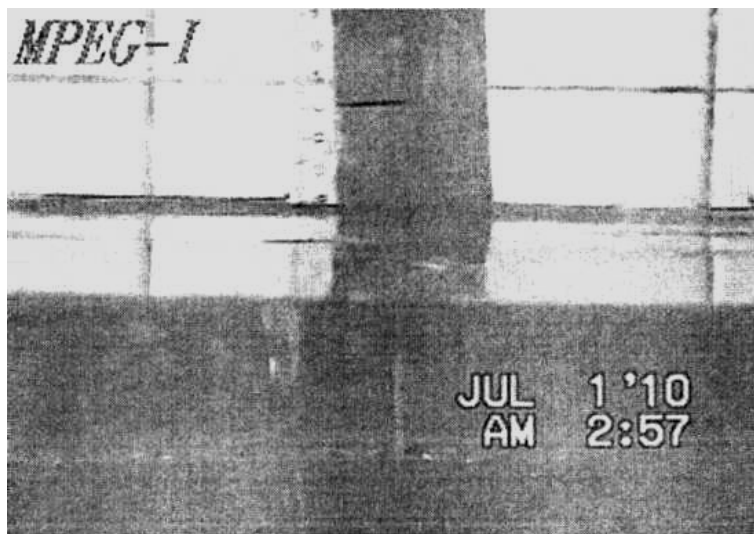


圖 25：漩渦落流圖(由側面觀察)