中華民國第52屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組　物理科

最佳(鄉土)教材獎

040101

“漩”機妙算

學校名稱：國立花蓮女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 林奕汝 高二 賴玟羽 高二 洪文心	尤聖涵

關鍵詞：液壓、漩渦、仿河道模型

摘　要

過去模擬漩渦的方法與真實漩渦多有差異，我們參考過相關書籍後，試著提出一些看法，並從實驗中加以證實或修正。首先我們製作三種模型，嘗試比較其差異，並找出較佳的模擬方式。觀測數據則是測量水中壓力，再輔以質性方式觀察真實漩渦的類型。經過多次實驗後，我們得到以下發現：

1.強制渦流模型：以攪拌石製造之漩渦屬於組合漩渦，內部的強制渦流中，愈靠近漩渦中心水壓愈大。段數越高，內外圈壓力差越大。

2. 自由渦流模型：水流從洞底流出時，無切線方向速度的水流狀況對渦流造成的影響無法忽略，所以製造自由渦流應提供切線方向水流的源頭。

3.仿河道模型：水遇到障礙物會引發渦流，且渦流型態與水源進入方式和障礙物大小有關，摩擦力亦有影響。

壹、研究動機

每年到溪邊戲水的民眾，或失足落水，或受困漩渦暗流，死傷無數，學校旁的美崙溪水流看似穩定，竟也是台灣危險水域之一，實在令人驚訝，引起我們的好奇。上網搜查相關歷屆科展作品後，發現有關漩渦的模擬實驗中，一般認為較接近真實情況的方法是在容器底部鑽孔後，使水流因重力自然流出所形成的漩渦，在 Discovery 節目「流言終結者」中模擬漩渦就是利用此方法，但我們認為溪流中的漩渦水流非因為河底破洞而讓水有機會靠重力往下流產生漩渦。因此，我們決定嘗試找出較佳的模擬方式。

貳、研究目的

一、製作三種漩渦模擬模型（強制渦流模型、自由渦流模型、仿河道模型）。

二、比較不同漩渦模擬模型，漩渦中心附近，隨距離的改變，水壓和流速的改變狀況。

三、分析真實河川渦流產生的條件與形態，設計最適合模擬河道中漩渦的方法。

參、實驗原理

一、白努利定律：

白努利定律(Bernoulli principle)，是基於穩流具有無轉動、無黏滯性且不可壓縮的典型流體系統概念，並引用功—能原理，以描述該系統的穩態所建立。(翁通楹、黃敏章，2002：155)

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h + P = \text{constant}$$

v = 流動速度

g = 地心加速度(地球)

h = 流體處於的高度(從某參考點計)

p = 流體所受的壓力大小

ρ = 流體的密度

constant = 常數

※限制條件：(1)穩定流動

(2)不可壓縮流動

(3)無摩擦流動

(4)沿著同一流線流動

(非旋性渦流)

由白努力定律可以推知：相同深度(h)時，水流速度(v)愈大，則流體所受壓力(p)愈小；而相同流速(v)時，水深(h)愈小，則流體所受壓力(p)也愈小。

二、水流分類

(一)可壓縮流與不可壓縮流

密度變化可以忽略的流體稱為 *不可壓縮*(incompressible)；當流體內密度變化不可忽略時，流體稱為 *可壓縮*(compressible)。可壓縮流體最常見的例子，有氣體流體，而液態流體常被認為是*不可壓縮*。(Robert W. Fox, Alan T. McDonald, & Philip J. Pritchard, 2005: 46)

(二)穩定流與非穩定流

依拉格朗琪(Lagrangian)的觀點，穩定流的流場中每一點的速度隨時間變化依然保持固定不變，因此流線的形狀不隨時間而改變。此外，連續不斷會有粒子通過空間中某特定點，都將會在同一流線運動，之後也會維持在這條流線上。若流場不穩定的話，流線的形狀會隨時間變動。(Robert W. Fox, Alan T. McDonald, & Philip J. Pritchard, 2005: 26)

若依尤拉(Eular)的觀點，在不穩定流中，流場中某一點的流體變數(加速度)將隨著時間改變。於穩定流中，雖然變數經常為流體空間的位置函數，流場中同一點位置的變數不會隨著時間改變。因此於尤拉觀點中，穩定流仍可有加速度。(Robert L. Street, Gary Z. Watters, & John K. Vennard, 2005:146,147)

(三)自由渦流與強制渦流

自由渦流(free vortex)，又稱「自由渦漩」。當一個流體的流場其流線成同心圓狀，流場內任意點的速度分量在圓柱座標(r, θ)為 $V_r=0$, $V_\theta=K/r$，此種流場稱為自由渦漩。其中 K 為渦漩常數(vortex constant)，表示自由渦漩強度的數值。 (翁通楹、楊德良，2002：900)

強制渦流(forced vortex)，又稱「強制渦漩」。當一個裝有流體的容器以角速度Ω旋轉時，則容器內的流體將因黏滯力之作用，在穩態後以相同角速度Ω，隨容器旋轉，此種流動稱為強制渦流。

強制渦流之流場就如同剛體旋轉一般，其速度分量在圓柱座標(r, θ)為 $V_r=0$, $V_\theta=r\Omega$。(翁通楹、張錦裕，2002：873)

也就是說：
$$\begin{cases} V_\theta \propto \dfrac{1}{r}, \text{對自由渦流而言。} \\ V_\theta \propto r, \text{對強制渦流而言。} \end{cases}$$

肆、實驗器材與裝置

一、實驗設備

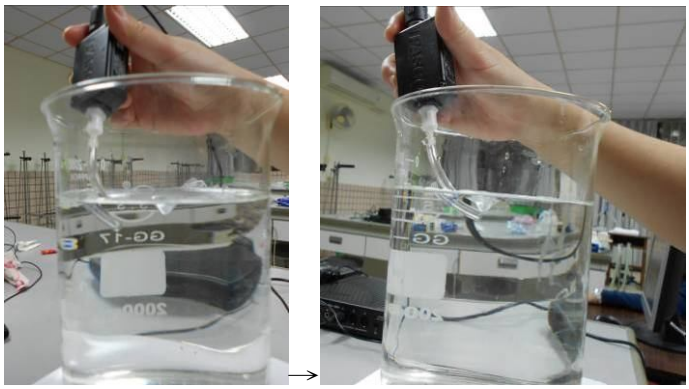
微壓感測器、Data Studio、電磁加熱攪拌器、攪拌石、燒杯、自製保麗龍水箱、大型塑膠桶（底部挖洞）、中間割有圓孔（直徑 1cm、2cm）的塑膠板、膠帶、水管、抽水馬達、長形壓克力河道、水盆、壓克力隔板、塑膠墊、壓扁的寶特瓶、鑽洞器。

二、器材架設與準備

【實驗一的裝置】強制渦流模型

圖(一) 以攪拌石製造強制渦流

實驗 1-1：測量強制渦流由外圈到內圈的液壓



圖(二) 以攪拌石製造強制渦流的測量過程

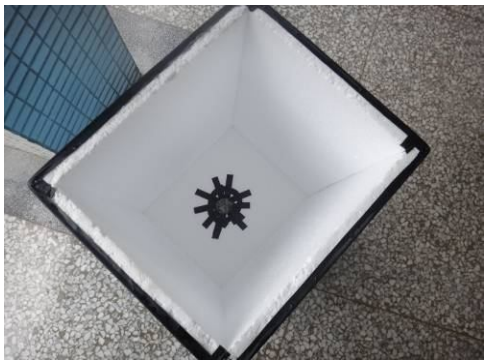
實驗 1-2：測量強制渦流各定點的液壓

圖(三) 以攪拌石製造強制渦流的測量過程

【實驗二的裝置】自由渦流模型

實驗 2-1：方形底部的水箱鑿洞

圖(四) 自製底部鑿洞的水箱



圖(五) 水箱俯視圖

實驗 2-2：圓形底部的塑膠桶鑿洞

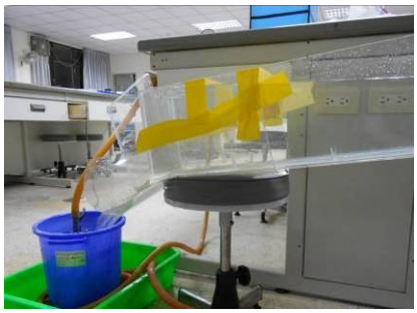
圖(六) 底部鑿洞的塑膠桶

圖(七) 塑膠桶俯視圖

【實驗三的裝置】仿河道模型

實驗 3-1：仿真實河流製造渦流之裝置

圖(八) 仿真實河流製造渦流俯視圖

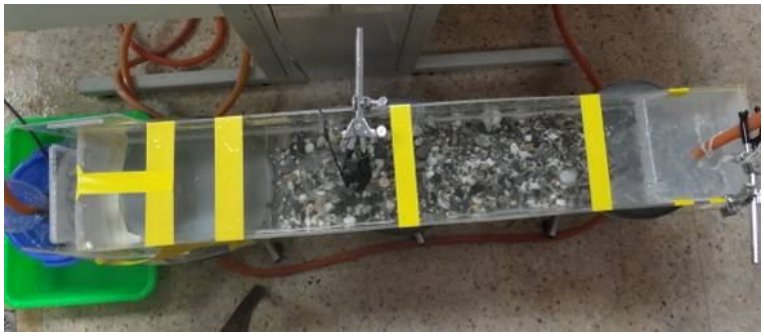


（下游）

（上游）

圖(九) 仿真實河流製造渦流側視圖

實驗 3-2：底部與出水口改良後的仿真實河流裝置



圖(十) 改良後仿真實河流俯視圖

（下游）

（上游）

圖(十一) 改良後仿真實河流側視圖

伍、實驗方法

【實驗一】強制渦流之模擬與特性分析

一、方法：以攪拌石製造強制渦流

二、實驗 1-1

1、置一燒杯於攪拌器上，並將水與攪拌石(2.5cm)放入燒杯中，製造出穩定漩渦。

2、將微壓感測器的測量管置入水中，由漩渦外圍移至漩渦內圈，並控制測量管在水面下的深度維持不變。

3、得到數據及圖表，加以整理分析。

三、實驗 1-2（改良實驗 1-1）：

1、測量方式原本是由漩渦外圍測到漩渦內圈，改成分別定點測量距漩渦中心 1cm、2cm、3cm、4cm、5cm 和 6cm 處，再用 Excel 綜合分析。

【實驗二】自由渦流之模擬與特性之分析

一、方法：以水箱底部鑿洞製造自由渦流

二、實驗 2-1

1、將微壓感測器的測量管固定於保麗龍水箱壁上，並使管口平貼於水箱底部，加入一定量的水，打開箱底出水口，讓水自然往下流出，產生漩渦於出水口時，測量水位下降時，定點壓力隨時間的變化。

2、待箱內水流盡，再次加入一定量的水，產生漩渦於出水口時，將微壓感測器的測量管置入水中，沿水底由漩渦外圍移至漩渦內圈。

3、將步驟 2 的數據扣除步驟 1 的數據，排除水位下降所造成的壓力變化。

4、得到數據及圖表，加以整理分析。

三、實驗 2-2（改良實驗 2-1）：

1、容器改用圓柱狀水桶，減低各方向摩擦力不同可能造成的影響。

2、以鑽洞器取代美工刀所鑽出的洞，增加孔洞平滑度，且減低各方向摩擦力不同可能造成的影響。

3、在加入一定量的水後，靜待流體成靜止狀態，才打開箱底出水口，減低流體進入系統時的外力對旋渦的影響。

【實驗三】仿河道模型之特性分析

一、方法：模仿真實河流製造自由渦流

二、實驗 3-1

1、將長形壓克力河道斜放(傾斜角約 8°)使水往下流，置一盆子於出水口下方接水，再利用抽水馬達將水打回河道上游，藉此形成循環系統，並製造穩定流。

2、於河道中段置放不同大小之障礙物，分析水流受障礙物阻礙的變化，分析形成漩渦的條件與漩渦類型。

3、檢測不同類型漩渦的特性：將微壓感測器的測量管置入水中，測量不同定點的壓力。

4、得到數據及圖表，加以整理分析。

三、實驗 3-2 (直接以水管沖入河道)

這個實驗主要模擬我們尚未減緩入水口（河道上游）外力影響時，即以水管直接緊靠水箱右壁出水，發現極易產生漩渦，除了說明入水口外力對流體的極大影響，也可藉測量這種狀況下所造成的漩渦，隨距漩渦中心距離的不同，壓力的變化。

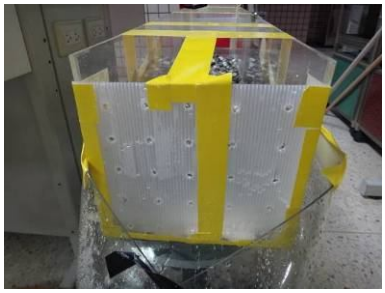
1、將障礙物緊靠水箱右壁，並以水管直接緊靠水箱右壁出水。

2、將微壓感測器的測量管置入水中，沿水面由漩渦外圍移至漩渦內圈。

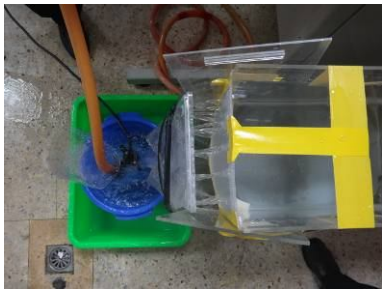
四、實驗 3-3（改良）

1、我們在底部放置一層小石子，以模擬較接近真實河道底部的粗糙表面。

2、原本下游的水要溢出水箱才能流出，為避免出水口的隆起造成水躍，進而影響較上游處水流狀況，所以我們更真實模擬流道中平穩流動的狀況，將出水口位置的隔板打洞(如下圖)。



圖(十二) 出水口側視圖



圖(十三) 出水口俯視圖

3、上游入水口所造成的外力對水流有極大影響，因此我們製造一個水庫裝置(如下圖)，提供平穩的入水方式。

圖(十四) 上游入水口側視圖

圖(十五) 上游入水口俯視圖

4、降低水道傾斜角度，由原本 8 度角改為 3 度角，模擬平緩水流所暗藏的危機。

陸、實驗過程與結果

【實驗一】以攪拌石製造強制渦流

實驗 1-1：

(1) 0~5 秒：準備狀態（測量管置於空氣中）

(2) 5~6 秒：測量管入水

(3) 6~20 秒：測量管由漩渦外圍漸移入內圈（10 秒：在 1/3 處，

15 秒：在 2/3 處，20 秒：漩渦中心處）

(4) 20 秒後：取出測量管

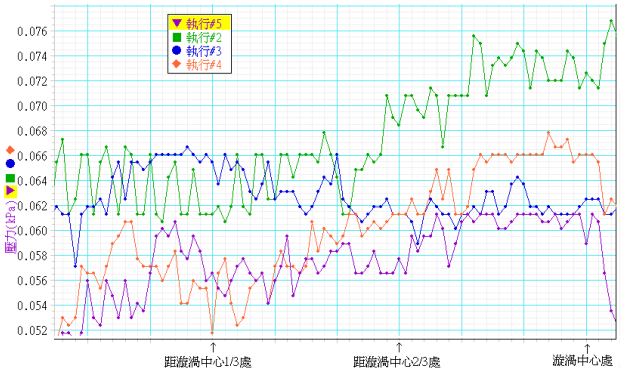
1. 轉速 2 段

圖(十六)

轉速 2 段俯視圖

圖(十七)

轉速 2 段側視圖



圖(十八)

轉速 2 段壓力量測數據

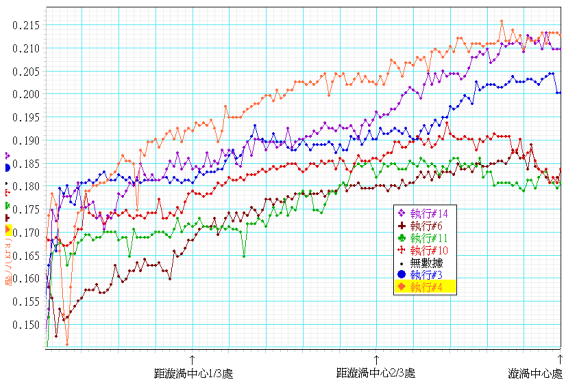
2. 轉速 3 段

圖(十九)

轉速 3 段俯視圖

圖(二十)

轉速 3 段側視圖



圖(二十一)

轉速 3 段壓力量測數據

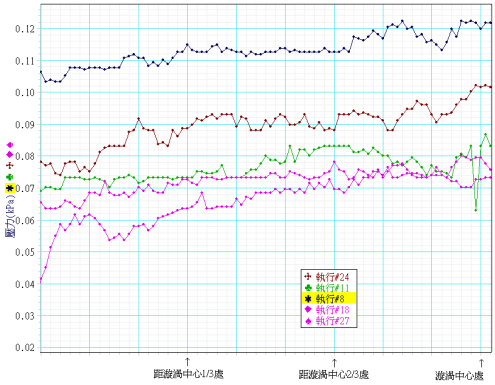
3. 轉速 4 段

圖(二十二)

轉速 4 段俯視圖

圖(二十三)

轉速 4 段側視圖



圖(二十四)

轉速 4 段壓力量測數據

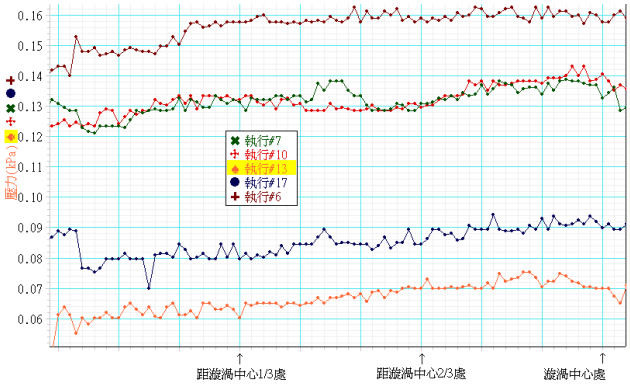
4. 轉速 5 段

圖(二十五)

轉速 5 段俯視圖

圖(二十六)

轉速 5 段側視圖



圖(二十七)

轉速 5 段壓力量測數據

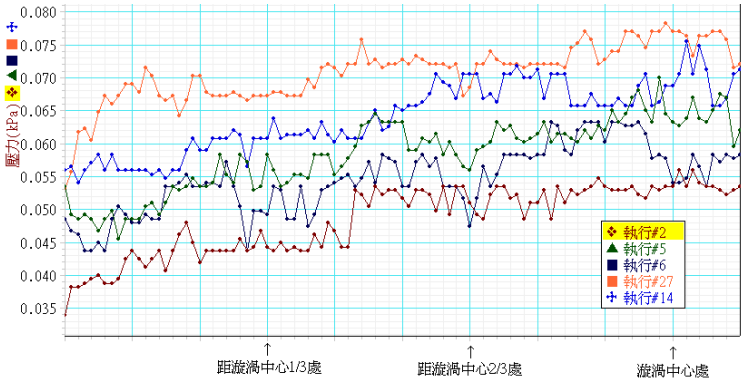
5. 轉速 6 段

圖(二十八)

轉速 6 段俯視圖

圖(二十九)

轉速 6 段側視圖



圖(三十)

轉速 6 段壓力量測數據

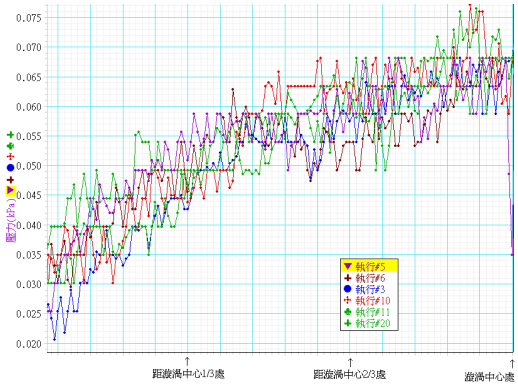
6. 轉速 7 段

圖(三十一)

轉速 7 段俯視圖

圖(三十二)

轉速 7 段側視圖



圖(三十三)

轉速 7 段壓力量測數據

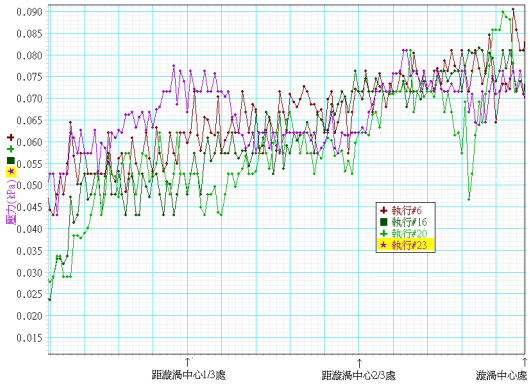
7. 轉速 8 段

圖(三十四)

轉速 8 段俯視圖

圖(三十五)

轉速 8 段側視圖

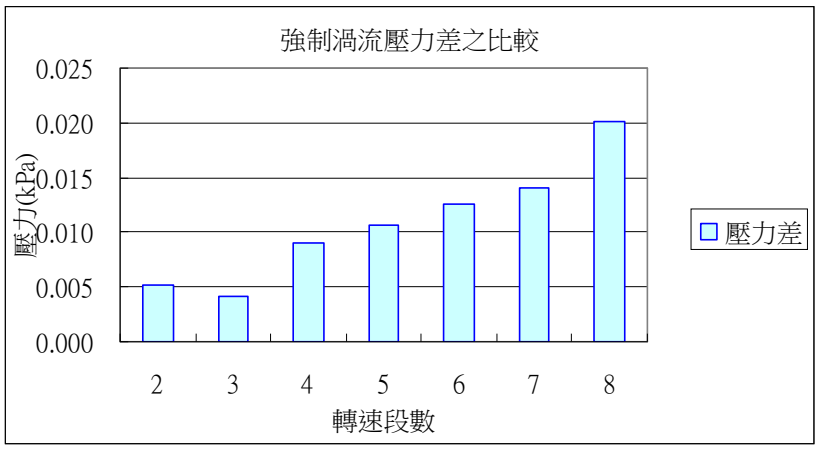


圖(三十六)

轉速 8 段壓力量測數據

表(一) 綜合比較以攪拌石製造強制渦流 2 到 8 段之數據平均值(水中時間為 6 至 12 秒)

段數	2	3	4	5	6	7	8
燒杯邊緣壓力(kPa)	0.060	0.040	0.085	-0.211	0.033	0.025	0.052
漩渦中心壓力(kPa)	0.065	0.044	0.094	-0.200	0.046	0.039	0.072
壓力差(kPa)	0.005	0.004	0.009	0.011	0.013	0.014	0.020



圖(三十七) 強制渦流不同段數漩渦內外圈壓力差之比較

實驗 1-2：

(1) 架設微壓感測器於距漩渦中心一定距離，且測量管固定於水面下位置。

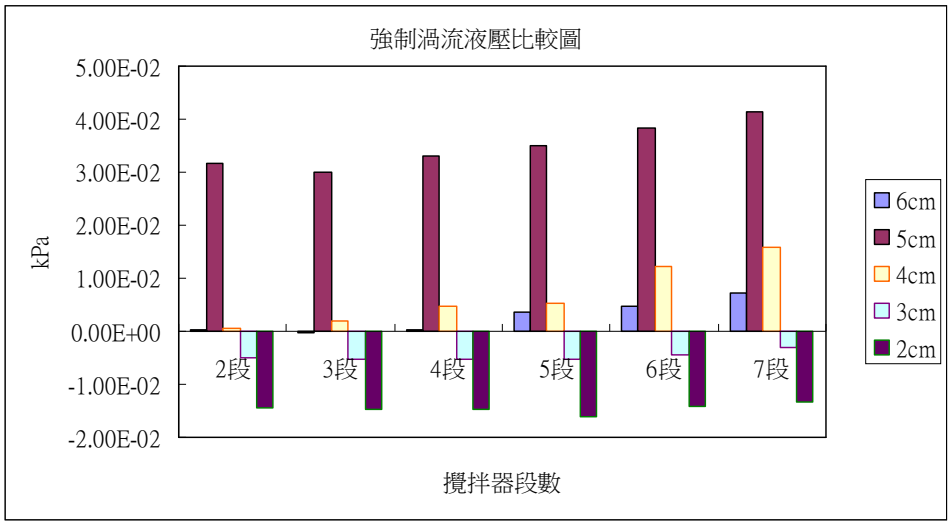
(2) 靜待流體成靜止狀態後，啟動攪拌器至欲測速度段數。

(3) 待漩渦穩定存在後，啟動微壓感測，十秒後停止，並將攪拌器加速至下一段數。

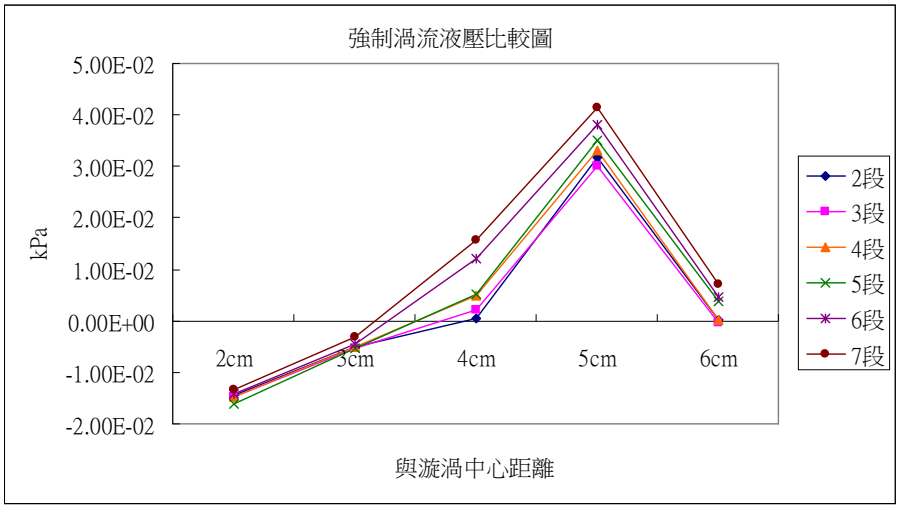
(4) 重複(2)和(3)以測完 2 到 7 段。

(5) 改變微壓感測器距離漩渦的距離，並重複執行(2)到(4)的步驟。

1.綜合比較



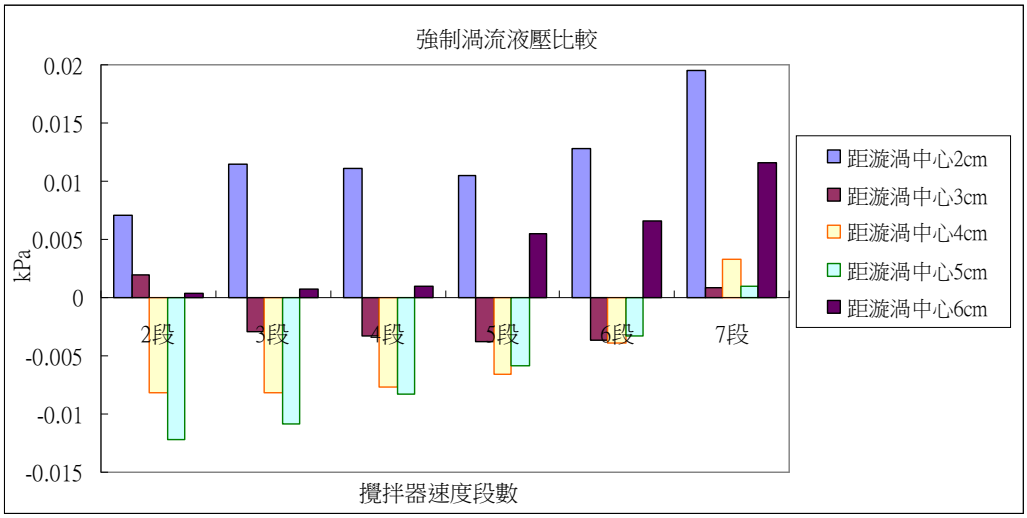
圖(三十八) 強制渦流液壓隨段數增加之比較圖



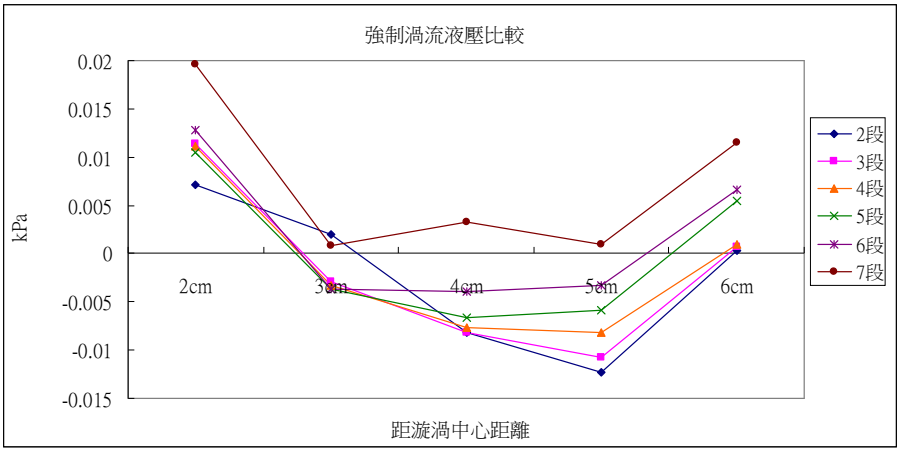
圖(三十九) 強制渦流液壓與漩渦中心距離的關係圖

2.實驗改良 1

上述實驗由於 2cm、3cm 和 4cm 的數據與 5cm、6cm 的數據並非同使用同一個校正點，可能因此造成所測量的壓力數據和與漩渦中心距離沒有明顯關係，因此我們改使用同一個校正點測量，可以得到下列數據：



圖(四十) 強制渦流液壓隨段數增加之比較圖



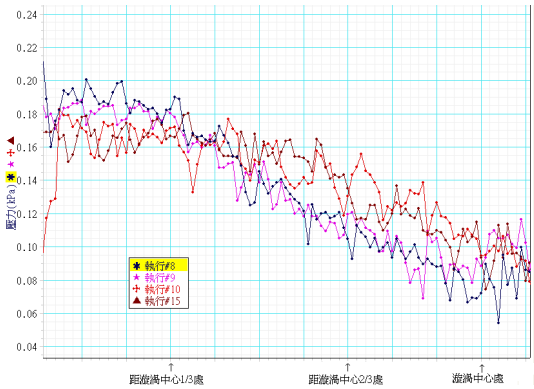
圖(四十一) 強制渦流液壓與漩渦中心距離的關係圖

【實驗二】水箱底部鑿洞製造自由渦流

實驗 2-1

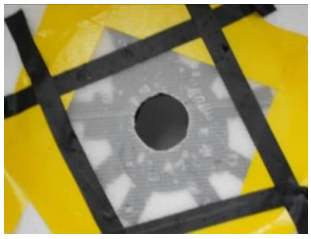
1.流速較大時：(洞口直徑 6cm)

圖(四十二) 水箱洞口直徑 6cm 俯視圖

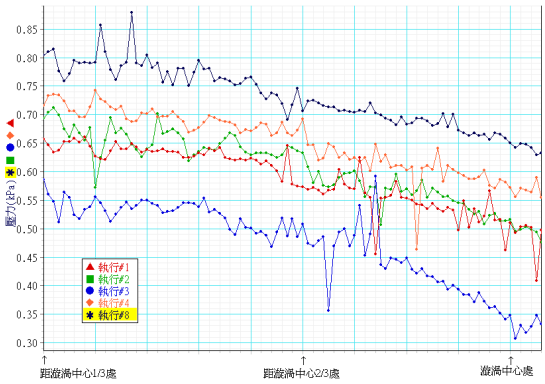


圖(四十三) 水箱底部鑿洞(6cm)製造自由渦流之壓力對時間的圖

2.流速較小時：(洞口直徑 2cm)

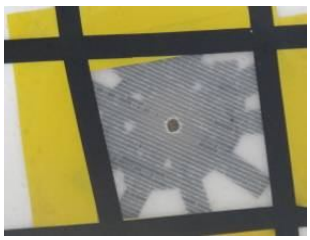


圖(四十四) 水箱洞口直徑 2cm 俯視圖

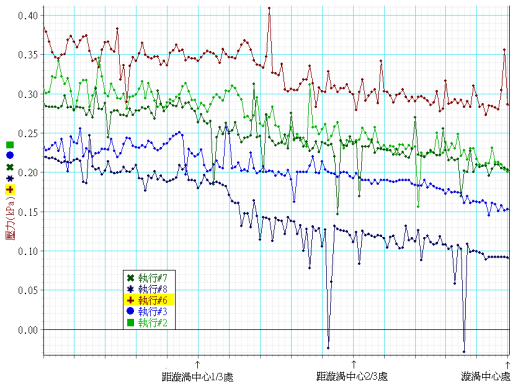


圖(四十五) 水箱底部鑿洞(2cm)製造自由渦流之壓力對時間的圖

3.流速最小時：(洞口直徑 1cm)



圖(四十六) 水箱洞口直徑 1cm 俯視圖



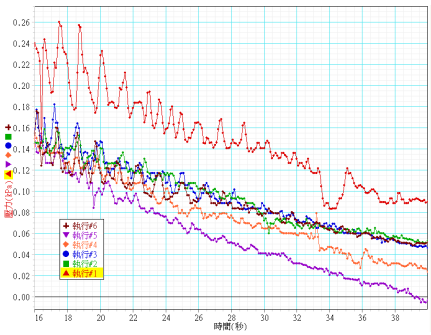
圖(四十七) 水箱底部鑿洞(1cm)製造自由渦流之壓力對時間的圖

4.實驗改良

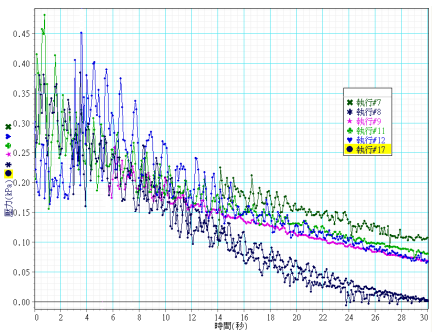
實驗中遇到水流掉，水位下降造成的水壓下降，量得的壓力不是真正的漩渦內外壓力改變，所以我們打算先測定點水位下降的壓力曲線，再測沿水底由外圍到中心的壓力曲線，兩者相減應該就是由外圍到中心不受水位影響的壓力值。可是前者屬於流體力學中的靜壓，後者則屬於動壓，兩者是否能直接相減，尚待確認。詳細討論過程請見討論 2-4。

以下是我們測量同一定點(如下圖)水位下降的壓力改變：

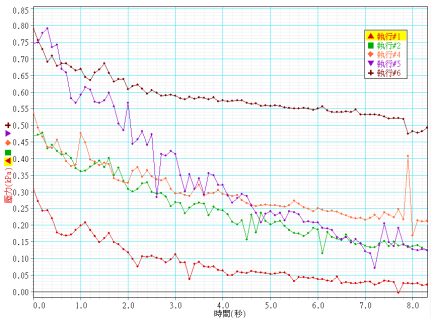
圖(四十八) 水箱底部鑿洞製造自由渦流之定點測量示意圖



圖(四十九)直徑 1cm 處
定點水位下降的壓力改變

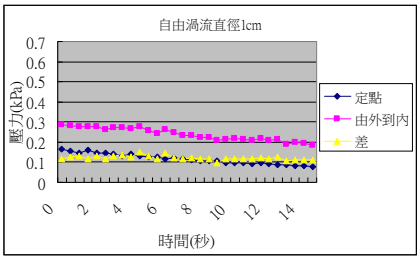


圖(五十)直徑 2cm 處
定點水位下降的壓力改變

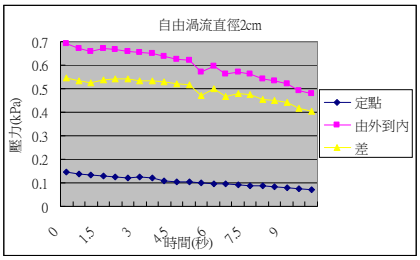


圖(五十一)直徑 6cm 處
定點水位下降的壓力改變

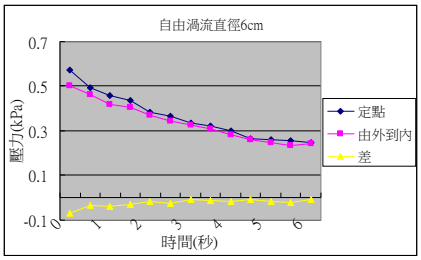
若取兩者平均值，並相減後可得下列圖表：



圖(五十二) 直徑 1cm 壓力差



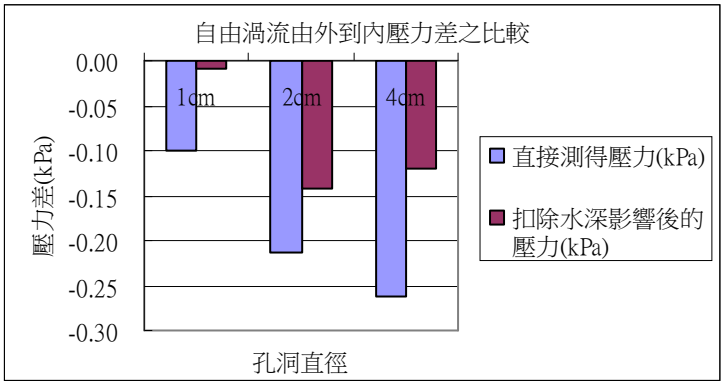
圖(五十三) 直徑 2cm 壓力差



圖(五十四) 直徑 6cm 壓力差

表(二)自由渦流漩渦內外圈壓力綜合比較表：

狀況		1cm		2cm		6cm	
直接測得壓力(kPa)	外	0.29	下降 -0.10	0.69	下降 -0.21	0.50	下降 -0.26
	內	0.19		0.48		0.24	
扣除水深影響後的壓力(kPa)	外	0.12	下降 -0.01	0.55	下降 -0.14	-0.07	下降 -0.12
	內	0.11		0.41		-0.19	



圖(五十五)自由渦流由外道內壓力差之比較

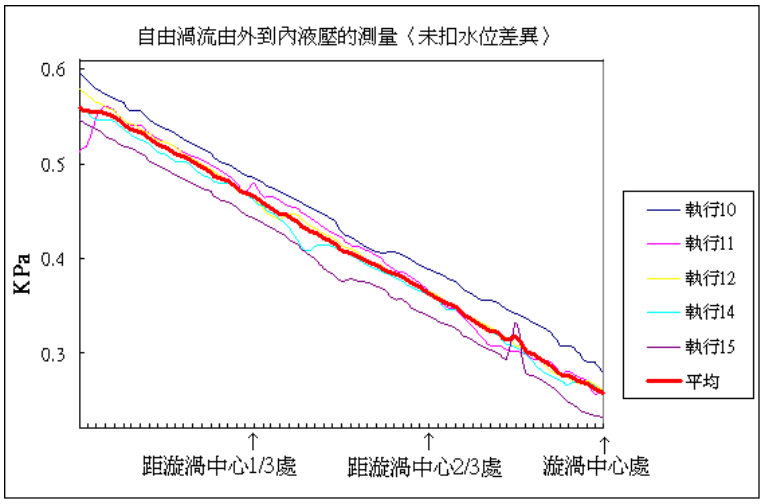
實驗 2-2：

(1) 加入一定量的水於容器中，打開箱底出水口，讓水自然往下流出，產生漩渦於出水口時，測量水位下降時，啟動微壓感測器以測定點壓力，並於 30 秒後停止。

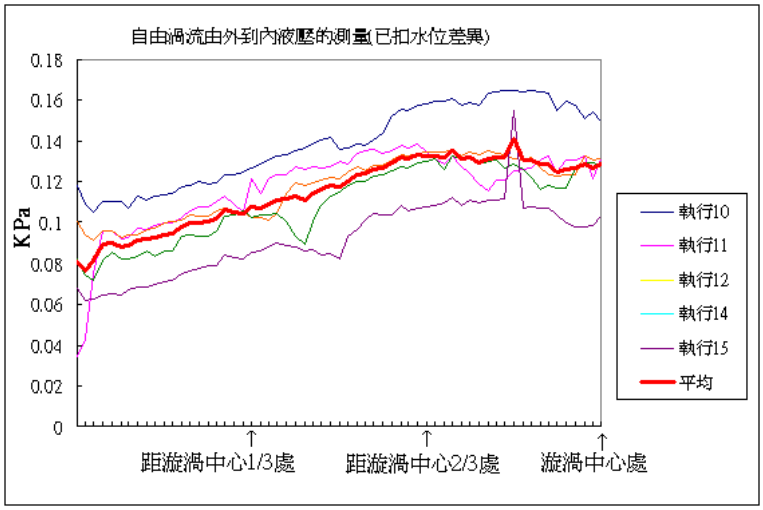
(2) 重新加入一定量的水於容器中，打開箱底出水口，讓水自然往下流出，產生漩渦於出水口時，測量水位下降時，啟動微壓感測器，感測器沿水底由漩渦外圍移至漩渦內圈，並於 30 秒後停止。

(3) 重複(1)、(2)數次，取五組有效數據平均之。

1.洞口直徑 1.5cm



圖(五十六) 自由渦流由外到內液壓的測量(未扣水位差異)



圖(五十七) 自由渦流由外到內液壓的測量(已扣水位差異)

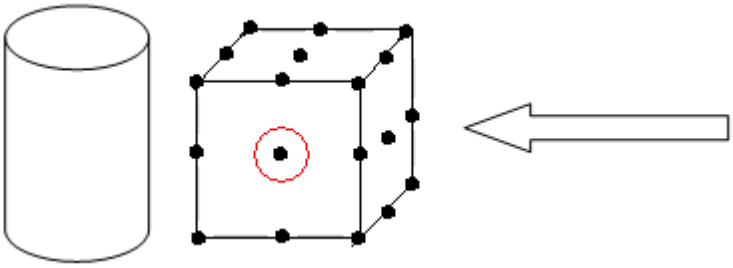
【實驗三】仿真實河流製造自由渦流

實驗 3-1：

此實驗我們欲改變的因素包含障礙物截面積大小與形狀、高度、和距岸邊的距離。另外上游水源位置也有不同：第一種水源由水面上進入，可以模擬河道有落差，且水面流速較快；第二種水源則由上往水底衝，可以模擬瀑布下和水底流速較快的情形。

實驗一與實驗二皆測量由漩渦外圈到內圈的壓力差，然而實驗三漩渦並非持續存在，因此我們改採取定點量測的方式，一共取障礙物前方 27 個點(如下圖)。並為各個

測量點命名，首先，將三個方向軸分別命名為近中遠、上中下、左中右，再依其所在位置命名，例如紅色圈起處為「中中左」。(箭頭代表水流方向)



圖(五十八) 仿真河道測量點示意圖

表(三) 圓柱障礙物產生渦流類型次數與時間長度的比較：(持續觀察時間 120 秒)

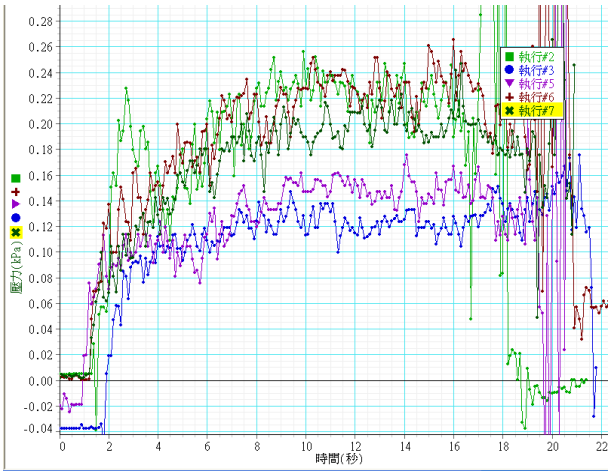
狀況	露出水面障礙物			水面下中型障礙物			水面下小型障礙物		
渦流類型	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)
全上型	4.0	5.6	22.5	6.5	3.4	22.0	6.5	7.4	47.8
全下型	4.0	8.5	34.0	4.0	5.1	20.5	2.5	3.2	8.0
中迴型	0.5	1.0	0.5	2.5	4.6	11.5	1.5	4.3	6.5
中分型	1.5	6.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

實驗 3-2 圓柱障礙物置於水中，俯視之水流狀況分析：

障礙物是大燒杯直立放置，模擬會露出水面的障礙物，例如：橋墩，且上游水源集中河道右側進入。壓力測量由漩渦左側開始往漩渦中心移動，最後在漩渦右側結束，如圖(三十八)箭頭所示。圖(四十)的測量結果中，大約在 7 到 10 秒到達漩渦中心。

圖(五十九) 仿河道中平面漩渦俯視圖與測量位置之改變

圖(六十) 仿河道中平面漩渦測視圖



圖(六十一) 仿真河道中平面漩渦水壓之變化

實驗 3-3：

改良後，底部放置石子、隔板打洞、製造水庫裝置和降低水道傾斜角度，圓柱障礙物置於水中，以相同觀測方式分析側視之水流狀況：

表(四) 改良後，圓柱障礙物產生渦流類型次數與時間長度的比較：(持續觀察時間 120 秒)

狀況	露出水面障礙物			水面下中型障礙物			水面下小型障礙物		
渦流狀況	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)
全上型	1.00	4.80	6.00	3.21	8.23	27.22	4.20	7.94	33.60
全下型	5.60	13.46	74.80	3.21	8.46	34.71	5.20	7.50	38.20
中迴型	0.60	3.20	3.20	0.83	2.84	6.31	0.80	3.50	4.00
中分型	3.20	5.55	18.80	0.25	2.01	3.03	1.40	4.55	11.20

而後我們以障礙物表面的摩擦力作為操縱變因，便以不同大小的石頭取代圓柱作為障礙物，以相同觀測方式分析側視之水流狀況：

表(五)以石頭作為障礙物產生渦流類型次數與時間長度的比較：(持續觀察時間 120 秒)

狀況	石頭 A			石頭 B			石頭 C		
渦流狀況	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)	平均次數(次)	平均持續時間(秒)	出現總時間(秒)
全上型	0.16	8.38	1.35	1.00	21.50	21.50	0.94	35.72	33.52
全下型	0.89	28.43	25.27	0.43	16.33	7.06	0.25	5.48	1.35
上迴型	0.01	0.00	0.04	0.10	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00
中迴型	0.12	12.40	1.53	0.42	8.15	3.42	0.32	6.46	2.07
下迴型	0.04	8.67	0.32	0.02	4.25	0.10	0.00	0.00	0.00
上分型	0.47	16.43	7.71	0.14	10.91	1.48	0.00	0.00	0.00
中分型	0.16	11.54	1.85	0.32	10.31	3.31	0.37	7.17	2.65
下分型	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	1.78	0.00	0.00	0.00

柒、討論

一、【實驗一】以攪拌石製造強制渦流

(一)實驗 1-1

1-1-1 初期實驗發現水壓大小主要受到水深影響，漩渦內圈與外圈的壓力差常因測量點水深控制不穩而受影響，因此我們決定貼著水面測量，此方法不但可以在測量點露出水面時馬上發現，因壓力會明顯改變，可加強水深控制的精準度，也可以減少測量管在水中受水流沖刷而造成的影響。

1-1-2 由圖(十六)至(三十六)和表(一)可知：距水面相同深度處，愈靠近漩渦中心，微壓感應器所測得水壓愈大，此結果與理論相符，且段數越高內外圈壓力差越大。

1-1-4 雖然實驗中觀察到漩渦中心的轉速明顯較快，但不能因此斷定它的流速就比較快，所以我們應用攝影機拍下物體隨水流旋轉狀況，再以電腦分析。

但是嘗試追蹤各種不同物體在漩渦中的狀況後發現：氣泡干擾過大，且物體無法行走在我們想要的路徑以求速度。我們曾試著丟入小塑膠片，發現其軌跡雜亂。若丟入攪拌石轉速較小的漩渦，可發現小塑膠片移動同角度，在漩渦外圍所花費的時間較長，接近漩渦中心時移動相同角度花費時間較短，而小塑膠片進入漩渦中心後不會再回到漩渦外圍。

若丟入攪拌石轉速較大的漩渦，可以發現小塑膠片移動相同角度，在漩渦外圍和接近中心時花費時間不同，而小塑膠片進入漩渦中心後，只有在碰觸到攪拌石時，才會被打到漩渦外圍並向水面移動，移動過程中，大多會在水中又被拉入漩渦中心，僅有幾次會到達水面後再次循環。

理論上，強制渦流各點應以相同角速度流動，觀察結果與理想流體相去甚遠。進一步想要以流速計時，卻發現流速計體積過大，對漩渦系統有極大影響，如果要使用流速計，勢必要將模型放大，這是目前我們尚不能克服的困難。

(二)實驗 1-2

1-2-1 與老師討論實驗方法並改進後，我們改以距漩渦中心不同距離的「定點」測量，可以發現：隨著和漩渦中心的距離愈大，所測量到的壓力愈小。6 cm 處幾乎已貼住杯壁，所以阻力造成水流停滯，測得的壓力會明顯變大。而隨著攪拌器速度段數愈大，所測量到的各處壓力也會愈大。

1-2-1 我們原本以為這和白努利定律無關，因為真實流體不可能達到無摩擦且為無黏滯性等條件，但和教授討論過後發現可以用雷諾數（Reynolds number）來評估：雷諾數的定義為 $R \equiv \dfrac{\rho u d}{\eta}$ ，在實驗一中，我們可以估算出：$\eta \cong 10^{-3}$；$u \cong 0.1$；$d \cong 0.1$；$\rho \cong 10^{3}$。(單位皆為 SI 制)這種情況下的雷諾數 $R \cong 10^{4}$ >>1，所以可以忽略流體的黏滯性。此外，雷諾數<2100 時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中流速的擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定，為層流；反之，若雷諾數>4000 時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展、增強，形成紊亂、不規則的紊流流場。我們估算的雷諾數 $R \cong 10^{4}$ >4000，已可視為紊流。

實際參觀台灣大學水利工程所後，我們才知道白努利定律不可使用在此旋性渦流，且感謝楊德良教授撥空指導，我們得知強制渦流可以使用能量方程式分析。

$$\boxed{\begin{aligned} &E_1^1 + h_A - h_R - h_L = E_2^1 \\ &E_1^1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{\upsilon_1^2}{2g} \\ &E_2^1 = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{\upsilon_2^2}{2g} \end{aligned}}$$

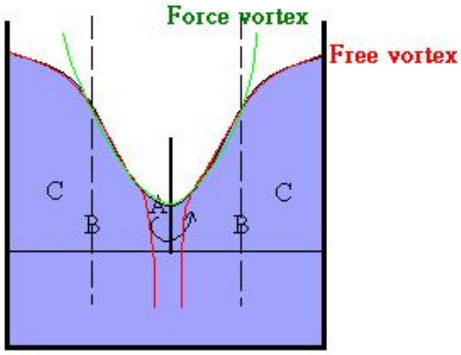
h_A：1~2 點間加入之能量

h_R：1~2 點間移除之能量

h_L：1~2 點間損失之能量

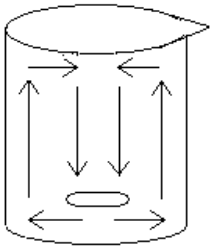
同時也得知攪拌器所製造的並不完全是強制渦流，此方式得到的渦流通常是綜

合性渦流(如下圖)，它的內圈是屬於強制渦流，但越往外圍越接近自由渦流。



圖(六十二) 自由漩渦及強制漩渦之組合漩渦

我們也發現攪拌器段數越高，旋渦形狀會越接近自由渦流，可是自由渦流必有近水口和出水口，我們推測是攪拌石如同一個出水口，上方的水往其中心流動，下方的水想外圍排開，也因此造成漩渦有垂直方向的流線變化(如下圖)。



圖(六十三)實驗一水流狀況

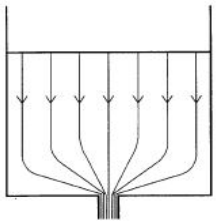
二、【實驗二】水箱底部鑿洞製造自由渦流

(一)實驗 2-1

2-1-1 由圖(四十三)、圖(四十五)與圖(四十七)可知：同樣在水面，愈靠近漩渦中心，微壓感應器所測得水壓愈小，此結果與理論相符。

2-1-2 實驗中遇到水位下降影響壓力的問題，可是如果持續提供水源，漩渦的形成可能是來自水源進入時所提供切線速度。所以我們先測定點水位下降的壓力，再測沿水底由外圍到中心的壓力，兩者相減應該就是由外圍到中心不受水位影響的壓力，也就是沿水面測量由外到中心的壓力。前者屬於流體力學中的靜壓量測，後者則屬於總壓量測，由白努力定律可知水深 h 會產生 ρgh 的壓力，扣除後水壓 P 即與流速有關，即壓力愈小，應表示流速愈大。

2-1-3 從圖(四十九)至(五十一)中可發現：定點測量的水壓難找到相似數據，推測原因是漩渦出現的時間點不一致，而出現時水位高低也不一致，漩渦出現前還可能出現下圖的水流狀況。



圖(六十四) 洞底流出時，無切線方向速度的水流狀況

這種狀況維持的時間不同，而漩渦出現的時間點有所不同，出現時水位高低會影響地心引力在洞口所施的力，也就是自由渦流的動力來源，因此流量和流速會因時間變化而有所不同，從資料中我們才知道這個問題實在複雜，因此我們決定實驗幾次，嘗試證明這個可能對漩渦影響不大。

2-1-4 經過討論 2-1-2 所使用的方法分析後，由圖(五十二)至(五十四)與表(二)可以發現：直徑 1cm 的狀況下，直接量測水壓由外向中心有明顯下降，但扣除水深壓力之後，水壓下降趨勢不明顯；直徑 2cm 的狀況下，直接量測水壓亦明顯下降，且下降程度更大，而扣除水深影響後，仍可明顯看出由外向中心的水流壓力呈下降趨勢直徑 6cm 的狀況下，直接量測可發現由外向中心的流水壓力下降非常明顯，但扣除水深影響後，卻反而有升高現象。此結果明顯與理論不符，由此可見，不能忽略 2-1-3 的影響，若要避免這種情況產生，我們應修改實驗方法。

(二)實驗 2-2

2-2-1 由圖(五十六)可以發現：尚未扣除水位下降所造成的壓力變化前，愈接近漩渦中心，壓力的確愈小，正如同自由渦流的定義以白努利定律推論後所得到的結果，即 r↓, v↑, P↓。詢問過教授後也得知，自由渦流的狀況恰為非旋性渦流，白努利定律確實可以在此使用。

2-2-2 由圖(五十七)可以發現：扣除水位下降所造成的壓力變化後，愈接近漩渦中心，壓力反而有略為上升的趨勢，一再提醒我們實驗改良之必要性。

三、【實驗三】仿真實河流製造自由渦流

(一)實驗 3-1

3-1-1 實驗初期嘗試製造河道漩渦的經驗中，發現只有在障礙物靠近水道邊緣，且水

管直接沖刷時，才有明顯漩渦出現，若在這時以低壓感測器量測水壓，可以發現數據十分不穩定。

在重新思考真實河道的狀況後，我們認為水流直接沖向障礙物會造成漩渦是必然的事，因為水流撞到障礙物就轉彎，造成速度方向改變，因而形成漩渦。所以我們在想，河流中的隱藏危險應是表面水流平穩，水面下暗流洶湧的狀況吧！所以我們試著讓入水口水流平穩，但如此一來，水流流速不足以形成明顯的漩渦，僅能從水中氣泡移動狀況，隱隱看出有往下的水流，而曾經聽過一篇報導說：被漩渦纏住只要身體放輕鬆就可以逃脫，我們猜那只是針對水面上可看見的漩渦而言。而傳說中的水鬼或許指的是這種：表面幾乎沒有水平方向改變，僅有水面下垂直方向流動的渦流。

因此，我們增加一個裝置，如圖（六十五），讓水源流入的寬度幾近河道寬，流速也就相對變小，以模擬較真實的河道狀況。

圖(六十五) 上游水流較穩定的模擬河道

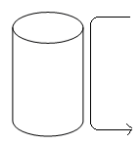
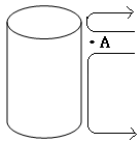
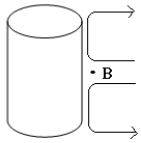
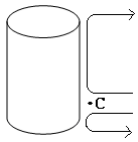
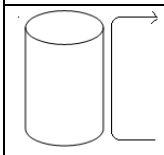
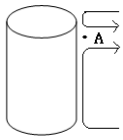
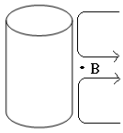
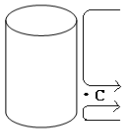
3-1-2 要在水中觀測水流方向十分困難，我們原本希望可以用攝影機先錄下流動狀況，再從水中氣泡移動方向分析之，可是經過嘗試卻發現此方法效果不彰，影片中比實際更難以判斷，而且氣泡本身密度較小，即使在平穩的等速水流中也會往水面漂移，也就是說密度較小的物體其實不適合當作追蹤對象，無法準確觀測向上的渦流，然而密度太大的物體又會沉在水底，無法觀測向下渦流，就連向上渦流也都不易觀測。我們嘗試加入亮粉，這種受水流影響甚大的物體，來當作追蹤對象。

然加入亮粉後，卻發現亮粉不是浮在水面上，就是沉在水底，隨水流移動的亮

粉少之又少，而且它要在某些角度才能反光，也因此很難被看見。但是目前仍找不到更好的方法，我們仍以亮粉作為觀測對象。

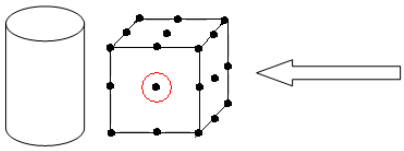
3-1-3 進行初步實驗觀測後，我們發現水面下水流方向大致可以分成以下幾種：

表(六) 水面下水流方向分類

全下型	上分型(A 外)	中分型(B 外)	下分型(C 外)
			
全上型	上迴型(A 內)	中迴型(B 內)	下迴型(C 內)
			

3-1-4 而上游水流進入河道方式我們分成兩種：第一種是以順流方向在水面上進入，用以模擬水面流速較快的河流狀況，例如：河川地形水面平緩，但河床有陡然下降。第二種水源由上往水底衝可以模擬瀑布下方或地形驟然下降，而水底流速較快的情形。

3-1-5 實驗一與實驗二皆測量由漩渦外圈到內圈的壓力差，然而實驗三漩渦並非持續存在，因此我們改採取定點量測的方式，一共取障礙物前方 27 個點，如圖(六十六)，並為各個測量點命名，首先，將三個方向軸分別命名為近中遠、上中下、左中右，再依其所在位置命名，例如紅色圈起處為「中中左」。



圖(六十六)27 個定點量測處 (箭頭指水流方向)

3-1-6 由不同水流進入河道方式的比較中可以發現：水面上進入會造成較多向下水流；而由上往下沖的水流進入方式則容易觀察到向上的水流。我們由此猜測瀑布雖然危險，但前方的流域反而不易形成向下捲的水流，反倒是河道底部地形有落差時，表面上水流看似穩定，但容易在水下障礙物前方形成向下水流，與我們的印象有所不同，實在特別。

3-1-7 我們由能量方程式推測：由於水流源頭穩定，因此可以推測系統中各點流速若

固定不變，則會形成層流。渦流則在流速發生變化時產生，出現向上渦流時，代表下層水流較原本快，水面水流較原本慢(因平均流速不變)，依照推論，水面壓力應變「較大」，接近水底的壓力應變「較小」。而出現向下渦流時相反，水面壓力應變小，接近水底的壓力則應變大。

出現中迴型或中分型的渦流時，代表上下與中間的流速不同，若是中迴型的情況，則是水面與水底流速較快，中間流速較慢，那麼水面與水底壓力就會較小，而中間壓力會較大；反之，中分型水面與水底的流速就會較慢，中間流速較快，那麼水面與水底壓力就會較大，而中間壓力會較小。

實際比較出現向上或向下渦流出現時壓力的變化，可以發現：實驗所得數據與推論結果不盡相同，因此我們認為應該再改進實驗方式，以求更精準。

3-1-8 由表(三)可以發現：向上水流不管是次數或秒數都是水面下小型障礙物最大，露出水面障礙物次之，水面下中型障礙物最小。向下水流的次數或秒數則是露出水面障礙物最大，水面下中型障礙物次之，水面下小型障礙物最小。中迴型和中分型都極少觀察到，因此無法枉下定論。

所以露出水面障礙物最容易出現向下方向的水流，相對而言較為危險，所以橋墩附近容易發生危險的原因之一就是如此吧！而向上水流以水面下小型障礙物出現次數和秒數最大，我們覺得可能是水流撞到障礙物後，從水面下小型障礙物上方流過較水面下中型障礙物和露出水面障礙物容易。

(二)實驗 3-2

3-2-1 圖(六十一)可以發現：當上游水源集中河道右側進入，河道左右水流明顯不同。漩渦左側壓力較低，中心壓力較高，右側則有時較高，有時較低，我們猜測是因為水源進入處干擾漩渦，導致漩渦左右不對稱，這個結果較接近強制渦流。所以就壓力而言，強制渦流較接近真實河道中水面上可見的漩渦。

(三)實驗 3-3

3-3-1 改良過仿真模型後，比較出現向上或向下渦流出現時壓力的變化，仍舊無法找出明顯關係，因此我們推測其他因素干擾（實驗誤差）過大。

3-3-2 由表(四)可以發現：向上水流不管是次數或秒數都是水面下小型障礙物最大，

水面下中型障礙物次之，露出水面障礙物最小。向下水流的次數或秒數則是露出水面障礙物最大，水面下小型障礙物次之，水面下中型障礙物最小。中迴型出現次數和秒數水面下中型障礙物最大，水面下小型障礙物次之，露出水面障礙物最小，和實驗 3-1 結果相同。中分型出現次數和秒數露出水面障礙物最大，水面下小型障礙物次之，水面下中型障礙物最小。

所以露出水面障礙物最容易出現向下方向的水流，而向上水流以水面下小型障礙物出現次數和秒數最大，結果和實驗 3-1 相同。

3-3-3 將障礙物以石頭取代後，分別討論三顆石頭(石頭 A、石頭 B、石頭 C)的外觀：

圖(六十七)

石頭 A：露出水面的大型石頭

圖(六十八)

石頭 B：水面下的中型石頭

圖(六十九)

石頭 C：水面下的小型石頭

3-3-4 由表(五)可以發現：向上水流不管是次數或秒數都是水面下小型石頭最大，水面下中型石頭次之，露出水面石頭最小，且與前二者差距極大。向下水流的次數或秒數則是露出水面石頭最大，水面下中型石頭次之，水面下小型石頭最小。中迴型出現次數和秒數以水面下中型石頭最大，水面下小型石頭次之，露出水面石頭最小。中分型出現次數和秒數與中迴型的結果相同。

所以露出水面障礙物最容易出現向下方向的水流，而向上水流以水面下小型障礙物出現次數和秒數最大，此結果與實驗 3-1(以圓柱作為障礙物時)相同。

3-3-5 以石頭取代圓柱作為障礙物之後，我們有以下發現：第一，河道出現更多類型的渦流（A外、A內、B外、B內），除了有露出水面的大型石頭會出現較多次、較長時間的A外，其餘出現次數和秒數大致上都不大。第二，全上型與全下型出現時間的差異有增大趨勢，而中迴型與中分型則同時有減小趨勢，我們推測此結果為障礙物表面摩擦力的增加所造成。

3-3-6 曾經有教授建議在壓克力水道兩側加貼保麗龍等物以增加側邊摩擦力，才能模

擬出真實河道兩側有石壁或堤防等狀況，因為河道兩側的摩擦力造成河道中央與兩側的速度梯度，但討論後我們決定保持原樣，因現在的仿真河道可以看作是模擬河道中間一段的狀況，兩側流速可能比真實河道河岸邊的流速快，可解釋成我們截取的是較中央的位置。

3-3-7 由表(三)和表(四)可以發現：向下和中分的水流狀況總秒數都有增加，向上和中迴的時間則是大致上減少，我們推測可能是因為改良後底部加放小石頭，導致底部摩擦力增加，代表底部流速變小，由此可見向下渦流的出現，是由於表面流速變快或底部流速減少；相反地，向上渦流是表面流速變慢或底部流速增加。但若以此結果再用白努利定律反推，水流會變成由壓力小流向壓力大的位置，這並不符合我們所學。和教授討論後，教授提出一個不同的想法，他指出底部加放小石頭若以微觀的角度可能因出現小漩渦，而造成底部流速增加，如此則是壓力大流向壓力小，即符合正常想法。

3-3-8 由表(四)和表(五)可以發現：在障礙物所造成摩擦力增加後，全上型和全下型的總秒數都有減少，推測是因為摩擦力增加使水流不容易垂直流動。若再和表(三)比較，可以發現障礙物換成石頭後，全下型出現總秒數反而比底部無石頭且為圓柱障礙物的狀況小，可知障礙物比底部的影響大。

四、實驗誤差討論

(一)實驗中若有需要邊移動邊測量，都是由操作者手持微壓感應器，且感應器的測量管前端是彎曲的細軟水管，因此每次伸入水中的深度可能因為由人手持而不穩定，而且周圍水流沖刷也會造成管口的移動，因此測量數據會有較大誤差。

(二)微壓感應器極為敏感，因此每次校正後壓力仍不斷的有些微變化，我們猜測這就是有時數據起始點大小不同的原因。

(三)實驗三中還有一個可能誤差，由於水流向上或向下非常難觀測，因此也可能造成起始與結束時間的研判錯誤，而且水流改變造成壓力變化的時間，選取的時間過長或過短，都可能造成我們找不到壓力與水流狀況改變的關係。

捌、結論

一、由實驗一發現：以攪拌石製造之漩渦屬於組合漩渦，內部的強制渦流中，距水面相同的深度，愈靠近漩渦中心，微壓感應器所測得水壓愈大。段數越高，即攪拌石轉速越快，渦流強度也越大，內外圈壓力差略有增大趨勢。

二、由實驗二發現：水流從洞底流出時，無切線方向速度的水流狀況對渦流造成的影響無法忽略，所以製造自由渦流應提供切線方向水流的源頭。

三、由實驗三發現：上游水源由水面上進入河道會造成較多向下渦流；上游水源由上往下沖入河道的方式則容易觀察到向上的渦流。也就是說，瀑布雖然危險，但下游的流域反而不易形成向下捲的渦流，反倒是河道地形有落差時，看似平穩流動的水面下，反而容易形成向下渦流，不知情的戲水遊客，可能被此向下渦流捲入水中而發生溺水意外。

四、由實驗三發現：真實河道中若水源集中於某側，水面上可見的平面漩渦較接近強制渦流。

五、由實驗三發現：障礙物大到露出水面的狀況下，比起障礙物未露出水面，更容易出現向下渦流。障礙物表面的摩擦力大小亦影響渦流形成。

六、由實驗三發現：底部增加摩擦力，會增加全下型和中分型的渦流，且會減少全上型和中迴型的渦流。

七、由實驗三發現：障礙物增加摩擦力，會減少所有水流垂直方向的改變，且此影響大於底部摩擦力。

玖、未來展望

一、關於實驗 2-2，本組僅測量單一孔徑之壓力數據，若能進行更多不同孔徑大小的研究，或許能有更進一步的發現。而因水面下降難以控制的水面測量點位置，希望能找到方法克服。

二、測量部份，本組目前僅以質性觀測，並自行分析、研判壓力變化，但我們相信若能以儀器（如攝影機、相關分析軟體等）輔助進行實驗，必能得到較準確的數據。另外，微壓感測器的測量管角度亦可能造成實驗誤差，本組因受限於器材原先的設計，故僅以彎曲的測量管（平行水流方向且平行水平面的管口方向）進行實驗，若未來能改用直的測量管（垂直水流方向且垂直水平面的管口方向），也許可測得較精確的壓力數值。

三、我們希望可以整理台灣容易發生意外之河川地形、水流狀況和上游山區降雨量，嘗試找出其中共通點，並比較我們實驗的結果和實際狀況的異同處。

四、目前的實驗結果本組以壓力呈現，但漩渦還包括流速、渦度等數據可以測量，若有相關儀器能進行各種測量，必能更精確分析漩渦的狀況。

五、本組以水中的漩渦作為研究對象，而氣流中的漩渦（如颱風）若具有和水中的漩渦相似的狀況，則我們的實驗結果或許可應用於颱風相關研究上。

六、實驗一則是希望可以改良實驗方式，例如：用拉坯機固定容器以帶動內部流體運動。

拾、參考文獻

1.Robert W. Fox, Alan T. McDonald, & Philip J. Pritchard(2005)。《流體力學》。黃和順等四人編譯。台北市：全華。

2.Robert L. Street, Gary Z. Watters, & John K. Vennard(2005)。《基礎流體力學》。楊文昌 譯。台北市：五南。

3.古庭安等二人(2009)。漩麗奇跡-漩渦崩潰現象之探討。2009 年臺灣國際科學展覽會。

4.苟昌煥。「橋梁與洪水之關係」。演講簡報。中華大學土工程學系。新竹(2004)。

5.陳奕中(2003)。漩渦之美。臺灣二 OO 三年國際科學展覽會。

6.陳政瑋(2004)。雙孔渦流的奧秘。臺灣二 OO 四年國際科學展覽會。

7.翁通楹主編(2002)。力學名詞辭典(全二冊)。台北市：國立編譯館。

8.維基百科全書。www.wiki.com。白努利定律。

9.顏清連等二人(1994)。進水口捲氣漩渦之研究。國立台灣大學水工試驗所。

10.楊德良(1988)。探究水流的奧秘。科學眼第 49 期。50 至 57 頁。

11.廖清標(1990)。非定常性強制渦流之研究。國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。

12.葛武松等人(1992)。自由液面非定常性強制渦流場之實驗。國立台灣大學工木工程研究所。

13.楊德良等人(1994)。含自由液面圓筒中之渦漩迸裂與霍普分歧(第二期)。國立台灣大學水工試驗所。

【評語】040101

1. 本研究主題貼近生活環境。

2. 實驗手法結果可以調整成“無因次”呈現以利推廣。

3. 實驗多變因交互影響，不利清楚得到具體結論。

4. 欠缺清楚示意圖表達結論。