

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

佳作

030510

『流』『鹽』追追追 — 海洋密度流之探討

學校名稱：新竹縣立成功國民中學

作者： 國二 沈威宏 國二 張嘉玲 國三 張承宗	指導老師： 張君豪 黃伶莉
---	-----------------------------

關鍵詞：海洋、密度流、對流

摘要

本實驗藉由調整溫度差及鹽度差來模擬密度流在三維海洋空間下的分段時間流動，利用簡易器材模擬不同變因下的流動差異，可應用於地球科學之洋流模擬。實驗後發現溫度差或鹽度差增加使密度差加大，則洋流流速加快；且溫度差主要影響不同緯度間的水平橫向運動，鹽度差主要影響不同海層的鉛直交替運動。其中還發現低溫的下沉水團產生崩湧現象，會因堆積崩毀產生一陣陣加速潮。另外觀察到混合增密現象，發現此現象由兩密度相近的水團混合產生，混合後水團密度增加而呈三角結構下沉，但若密度相差太大則不發生，且溫鹽度差越小越易混合，但溫鹽度差越大則密度增加越多。在綜合模擬中看到，由於溫度分布變化較大，故海底的水流多屬溫度控制的水平流動。

壹、研究動機





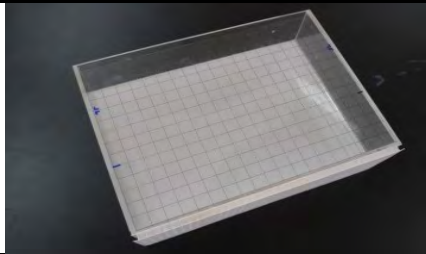
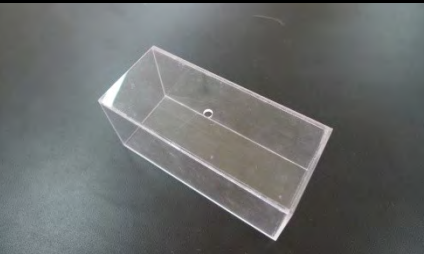




《海底總動員》是一部家喻戶曉的卡通電影，小丑魚馬林搭了便車，乘著號稱「海底高速公路」的密度流到了目的地，其快速又奇特的運動方式使我們對於密度流產生了好奇心，進而深入探討。

貳、實驗目的

- 一、模擬密度流的流動情形
 - (一)密度流進入不同溫度的海域，其升降及流動情形
 - (二)密度流進入不同鹽度的海域，其升降及流動情形
 - (三)比較溫度差與鹽度差所造成之流動差異
- 二、測量不同變因與密度流的鉛直及水平流速之關係
 - (一)不同溫度差下，密度流之鉛直及水平流速
 - (二)不同鹽度差下，密度流之鉛直及水平流速
 - (三)比較溫度差與鹽度差所造成之流速影響
 - (四)建立洋流的空間及時間分項流速計算方式
- 三、探討混合增密現象的影響
 - (一)探討不同鹽度、溫度水團的混合情形
 - (二)探討兩同密度水團混合後密度增加的下沉情形
- 四、綜合鹽度、溫度因素模擬洋流於海中流動的情形
 - (一)以簡易模型模擬類似海洋的鹽度、溫度分布趨勢
 - (二)觀察各密度流的流動情形及在各層分布的過程

參、研究設備及器材

一、實驗器材

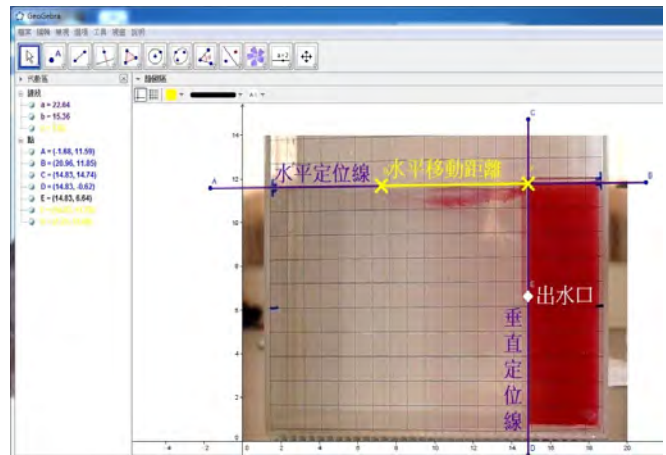
電子溫度計	點滴瓶組 (管口徑 0.2cm 瓶容量 500ml)
	
廣告顏料(飛龍紅 No.11 藍 No.23)	高級精鹽
	
縱切面立水箱 A (20x15x5cm)	定流輸出盒(4x4x10cm)
	
電子天平	電湯匙(金歡喜 110W 1000V)
	
DV 與腳架(SONY)	場域水箱 B (60x60x40cm)
	

二、軟體介紹- Geogebra4.2

用途：測量洋流移動距離

操作說明：

- (一)固定圖片格線為 1cm 並定位出水口
- (二)連接鉛直線和水平線於流動路徑上
- (三)切換圖片並定位最遠移動點
- (四)連接前後兩張圖的最遠移動點
並記錄距離



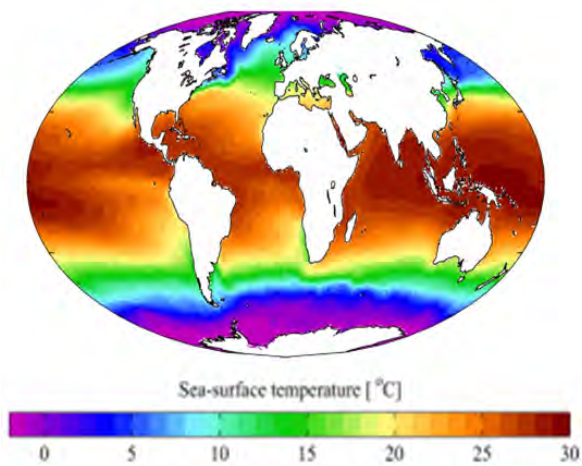
▲圖(3-2-1) Geogebra4.2 操作說明圖

肆、資料蒐集及原理

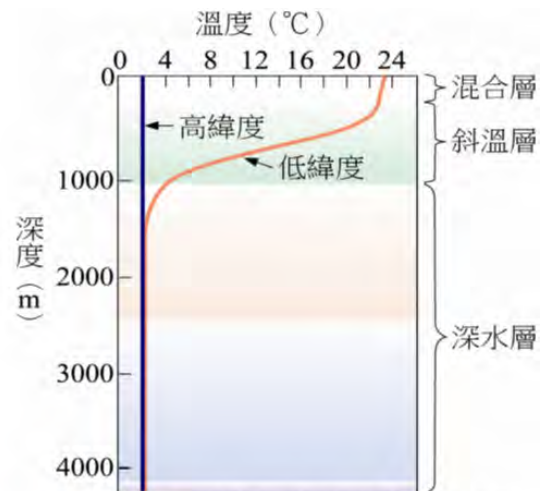
一、資料蒐集

(一)海水溫度

海水溫度主要由陽光影響，海洋水平溫度隨著緯度越高溫度越低，低緯海洋鉛直溫度隨著海水深度增加而降低，高緯表底層海洋則皆保持低溫。



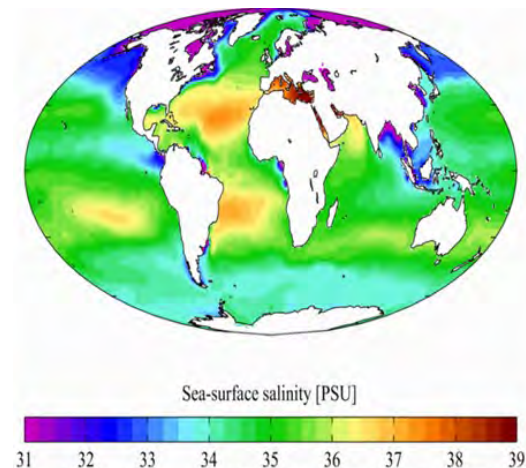
▲圖(4-1-2)表層海水溫度分布圖



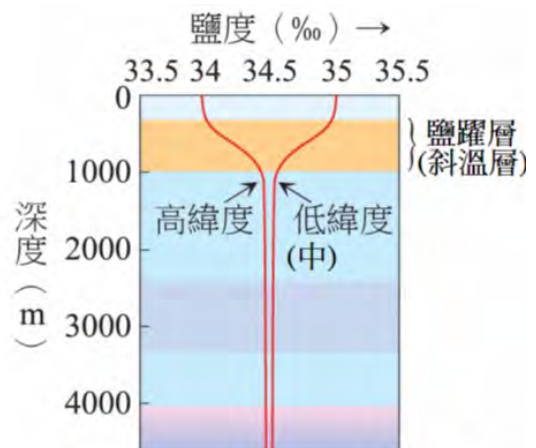
▲圖(4-1-3)海水深度及溫度變化圖

(二)海水鹽度

全球海水鹽度平均約 34.7‰。表面海洋鹽度隨緯度從赤道向兩極呈雙峰馬鞍形分佈。低緯海洋表層鹽度較深層高，高緯則相反，而深於 4000 公尺的海洋鹽度分佈相當平均。



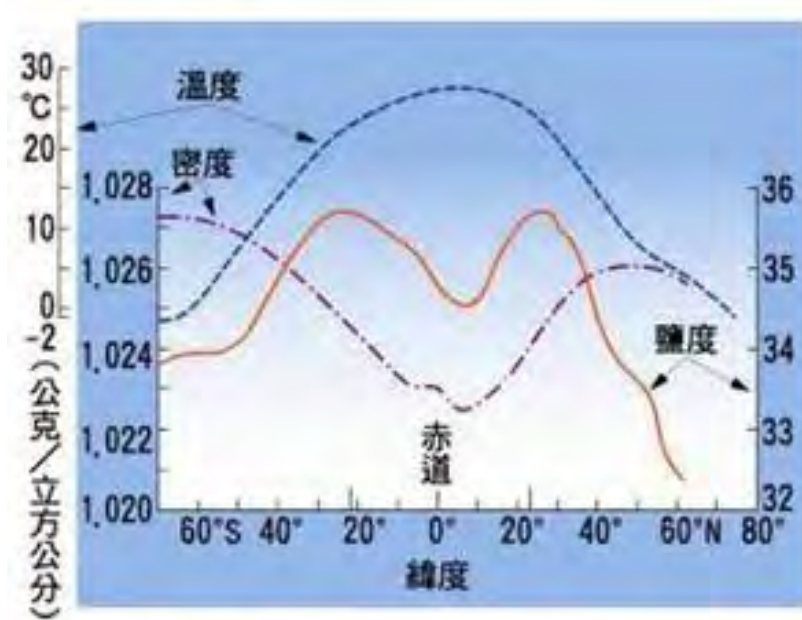
▲圖(4-1-4)表層海水鹽度分布圖



▲圖(4-1-5)海水深度及鹽度變化圖

(三)海水密度

海水密度決定海水在海洋中的鉛直位置，密度大的海水會下沉至密度小的海水下方。而海水的溫度變化比鹽度劇烈，因此溫度對海水的密度影響較大。實際上，只有在常年維持低溫的極區，鹽度才會明顯影響密度。相較於鹽度，溫度才是主要影響海洋密度的因素。



▲圖(4-1-6)海洋表面溫度、鹽度、密度隨緯度分布圖

二、名詞定義

(一)操作液體 Independent Aqueous (Iaq)

即為改變變因值，做為實驗觀察變化的液體，為了方便觀察，皆以 1000g 水溶液比 2g 顏料調配成有色液體，稱為操作液體。

(二)環境水域 Control Aqueous (Caq)

為操作液體所進入並接觸的水域，通常為攝氏 25 度之清水，或千分之二十五鹽度的常溫水，固定其值與操作液體的變因值以作為變因差，不加入顏料以觀察到操作液體的流動。

(三)水平流速 Horizontal Flow Velocity(V_x)

進行流速測量時，以橫向座標變化量除以時間變化量，所得即為水平流速。

$$V_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{水平流速}$$

(四)鉛直流速 Vertical Flow Velocity(V_y)

進行流速測量時，以鉛直座標變化量除以時間變化量，所得即為鉛直流速。

$$V_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \text{鉛直流速}$$

(五)溫(鹽)度差

即為其操作溶液的溫(鹽)度與環境水域的溫(鹽)度的差距。

若操作溶液溫(鹽)度 > 環境水域的溫(鹽)度，則稱「高溫(鹽)度差」

若操作溶液溫(鹽)度 = 環境水域的溫(鹽)度，則稱「零溫(鹽)度差」

若操作溶液溫(鹽)度 < 環境水域的溫(鹽)度，則稱「低溫(鹽)度差」

$$|I_{aq} \text{ 溫(鹽)度} - C_{aq} \text{ 溫(鹽)度}| = \text{溫(鹽)度差}$$

(五)穩定水平流動長度(A 值)

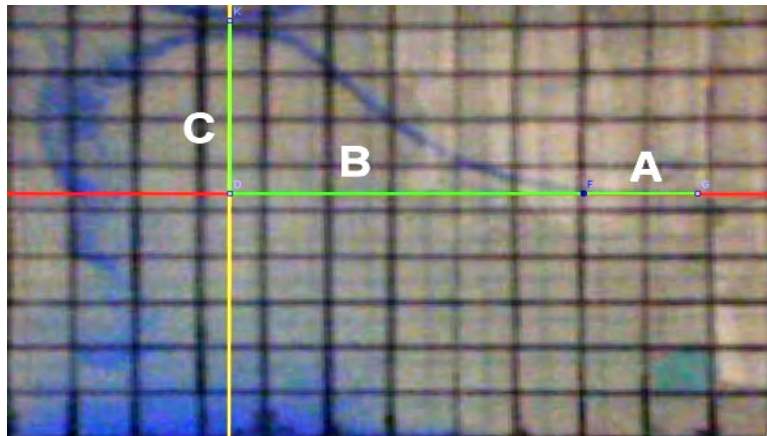
於實驗三、四中，當水流從出水口流出後，並無明顯上升或下降情形，無明顯升降定義為水流位置與出水口之角度小於 15 度。A 值即測量無明顯升降下穩定的水平長度(圖 4-2-1)。

(六)流體最高(低)位置水平長度(B 值)

於實驗三、四中，當水流從出水口流出後，開始進行明顯升降運動(水流位置與出水口之角度大於 15 度)到達鉛直位置最高(低)的極限值時，從開始明顯升降的點與最高(低)極限高度點之間的水平長度即為 B 值(圖 4-2-1)。

(七)流體最高上升鉛直長度(C 值)

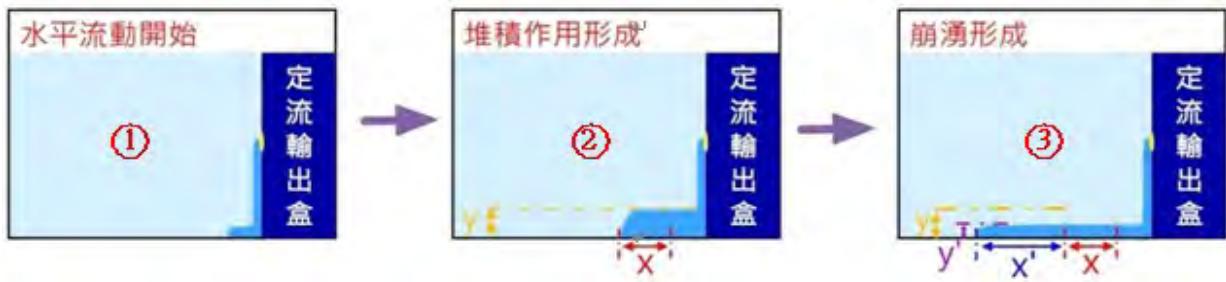
於實驗三、四中，操作液體的上升最高點與出水口的鉛直長度為 C 值，此值僅探討上升的液體，若是液體下沉則不計算此值(圖 4-2-1)。



▲圖(4-2-2)崩湧形成示意圖

(八)崩湧

此現象發生於操作液體的運動為被動性的運動下。由於堆積、遞補性質，液體在水平流動時，會先不斷堆積；直到液體承受到達上限，無法繼續堆積，而發生崩湧，先前堆積的水團便開始往橫向衝擊。

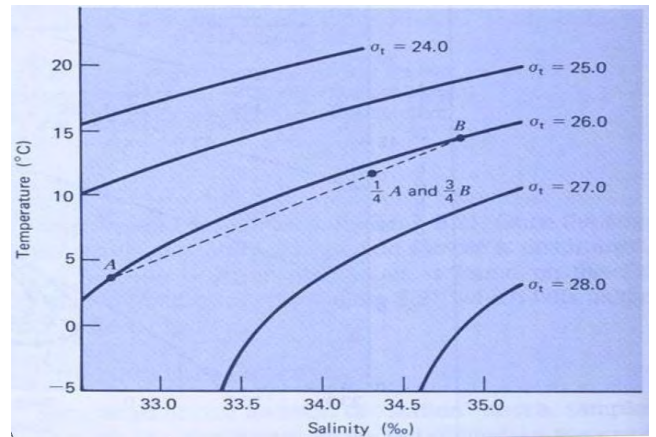


▲圖(4-2-2)崩湧形成示意圖

圖②的水流中，其 x 值為與圖①水團的水平長度差， y 值為水團堆積的厚度，而圖③的 x' 則是與圖②水流比較的水平長度差， y' 為崩湧後的水團厚度。其中， $x' > x$ ， $y > y'$ ；代表堆積作用發生時，因水團堆積而厚度增厚，水平流速(V_x)減緩；崩湧形成因堆積水團暴衝則流速增快，厚度減小。

(九)混合增密

將兩種不同溫、鹽度但密度相近的海水混合，其混合水之溫、鹽度為二者之平均但密度則會增大。如圖有 A (約 4°C 、 32.6‰)、B (約 13°C 、 34.8‰) 不同但密度相近的水團，將 A 與 B 以 1:3 之比例混合後，混合水之密度將比原先兩水團更大。



▲圖(4-2-3) 溫鹽密度與混合增密關係圖

三、海水密度計算—狀態方程式

以下為純水的密度狀態方程式，即鹽度 $S=0$ (單位 psu)， ρ_w = 純水的密度

$$\rho_w = 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2}T - 9.095290 \times 10^{-3}T^2 + 1.001685 \times 10^{-4}T^3 - 1.120083 \times 10^{-6}T^4 + 6.536332 \times 10^{-9}T^5$$

純水密度加入鹽度與溫度之密度方程式(壓力 $P=0$ ，單位 bar)， $\rho(S, T, 0)$ = 鹽水密度

$$\rho(S, T, 0) = \rho_w + S(0.824493 - 4.0899 \times 10^{-3}T + 7.6438 \times 10^{-5}T^2 - 8.2467 \times 10^{-7}T^3 + 5.3875 \times 10^{-9}T^4) + 4.8314 \times 10^{-4}S^2 + S^{3/2}(-5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4}T - 1.6546 \times 10^{-6}T^2)$$

其中 S =salinity 鹽度(psu)

T =temperature 溫度($^\circ\text{C}$)

因壓力因素於本實驗中影響微小，故最後求得的水團密度不探討壓力變因。

摘自 Thurman, H. V. (1993) "Essentials of Oceanography", 4th ed.。

伍、研究裝置及架構

一、研究裝置

(一) 縱切面立水箱 A (如圖 5-1-1)

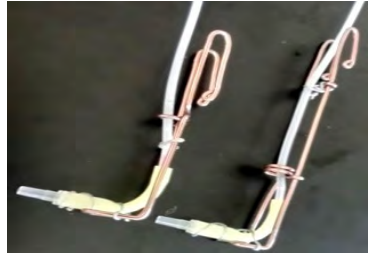
- 1.將透明方格線紙(1x1cm)貼於水箱前方
- 2.水箱背及底部貼白色 PP 板方便觀察



▲圖(5-1-1) 縱切面立水箱 A 裝置圖

(二) 定流輸出管 (如圖 5-1-2)

- 1.以鋁線架固定纏繞點滴管(45cm)，並彎曲點滴管 5cm 處至 90°直角
- 2.製成鋁條長度 5cm、10cm 的支架



▲圖(5-1-2)定流輸出管裝置圖

(三) 場域水箱 B (如圖 5-1-3、4)

- 1.將透明方格線紙(1x1cm)貼於水箱側面及底面
- 2.把兩條長 60cm 的木條頭尾加裝 L 型鐵已活動式固定
- 3.垂直固定 2 支點滴管出水口於左側箱壁水深 5cm，以輸出操作液體
- 4.固定兩支電湯匙於水箱表層 5cm 距兩側 20cm 左側 1cm 處加熱，模擬赤道
- 5.在水箱右側 5cm 固定塑膠 PP 隔板以放置冰水混合液，並在水深 10cm 以上每鉛直 3cm 水平 4cm 鑽一高 2cm 長 4cm 之長條洞孔，模擬北極



▲圖(5-1-3) 場域水箱 B 側視裝置圖



▲圖(5-1-4) 場域水箱 B 俯視裝置圖

(四)定流輸出盒 (如圖 5-1-5)

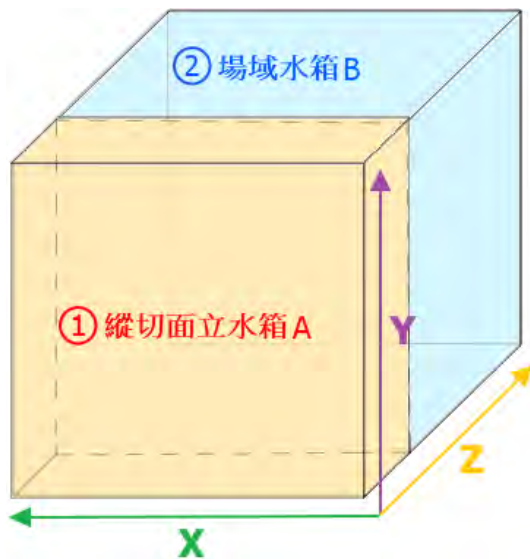
- 1.採內徑 4x4x10cm，厚度 0.15cm 的盒面
- 2.鑽一直徑 0.4cm 的孔於盒正面中央
- 3.利用黏膠堵住洞孔，待使用時夾出



▲圖(5-1-5)定流輸出盒裝置圖

二、研究方法

(一)觀測性質及水箱配置：



①縱切面立水箱 A

- (1)範圍小，便於觀察鉛直(Y)與水平(X)方向的局部細微水流動向。
- (2)用於觀測流速、流向等需較為精確測量水流動的實驗。

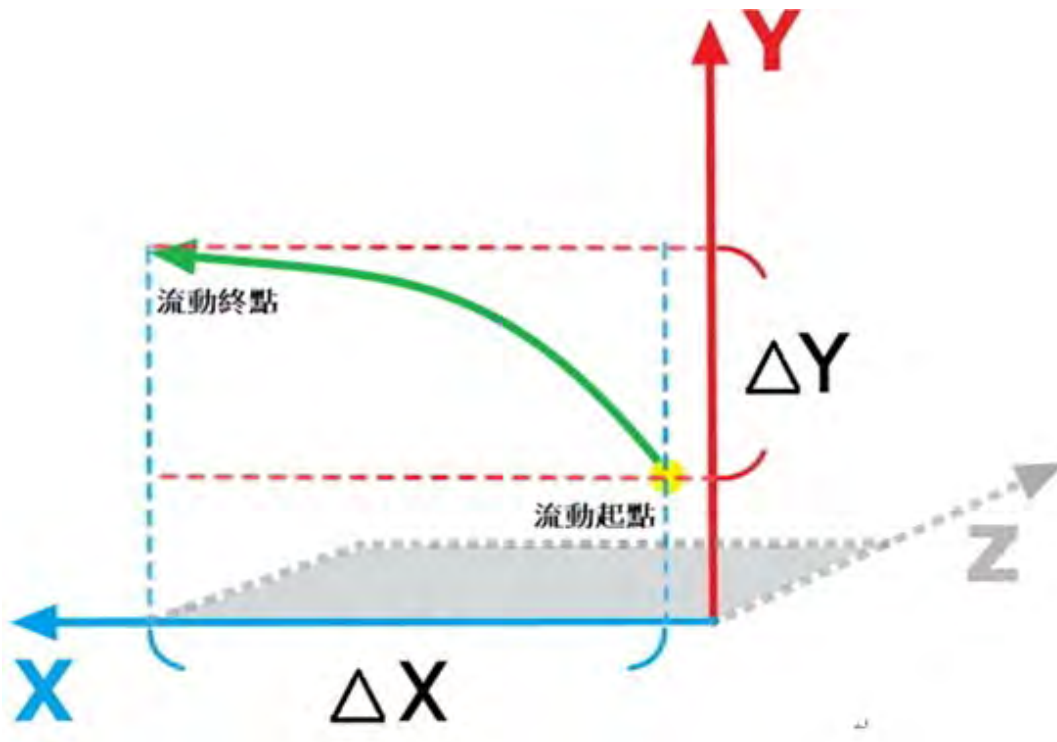
②場域水箱 B

- (1)場域廣大，易於模擬開放性、三維流動(X、Y、Z)且可同時控制多種變因(如:降雨、冰塊)的實際海洋狀況。
- (2)用於進行實際洋流模擬等大型實驗。

▲圖(5-2-1)水箱性質配置圖

(二)流速測量：

此測量流速，將水平及鉛直流速 (V_x, V_y) 分開計算，並分段計算各單位時間下的流速。流動過程中溫度會隨時間散失，包含鉛直和水平流動，如此可得知水流在各時間點的流速，以及各方向的流速。另外，我們視 V_x 為水平面的流動，和另 Z 軸中的 V_z 為同一平面，因此限制水箱 A 中的 Z 軸寬度，僅觀察水平面 V_x 和垂直面 V_y 。



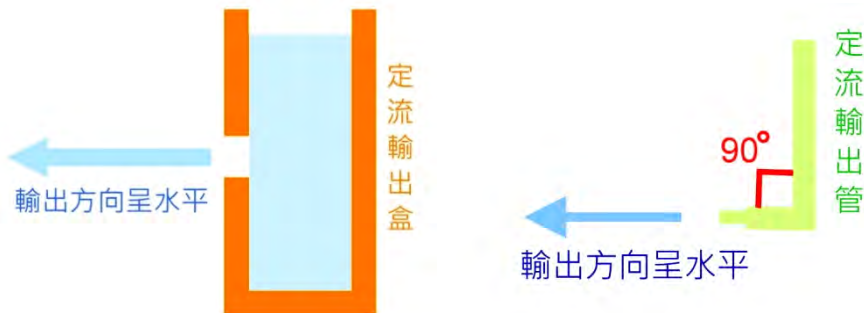
▲圖(5-2-2)流速計算示意圖

經過單位時間(Δt)，假設水流流動路徑如上圖所示，從測量起點到終點的鉛直距離(Δy)和水平距離(Δx)分別除以 Δt ，即為鉛直流速(V_y)與水平流速(V_x)，算式如下。

$$V_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \qquad V_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

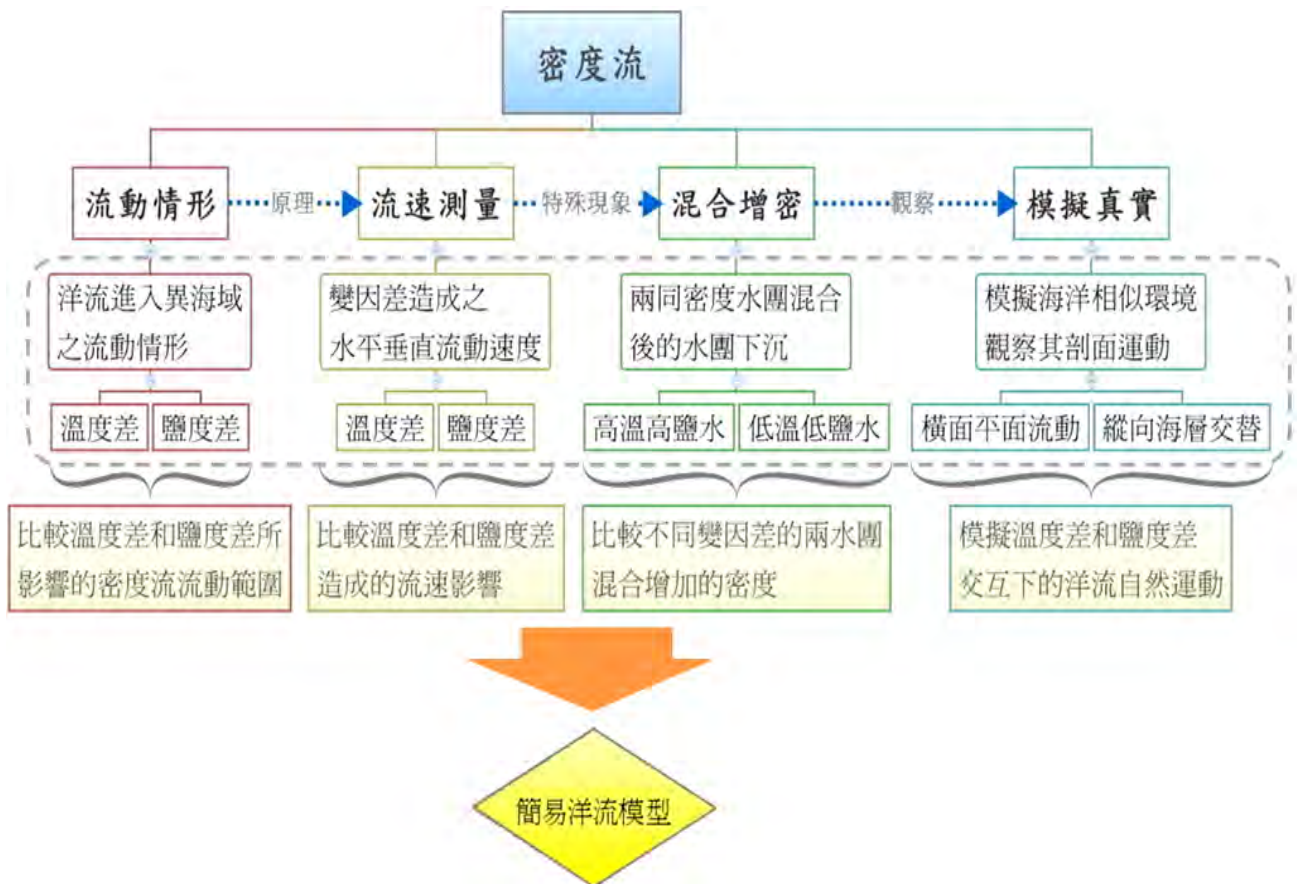
(三)水平定流輸出：

此輸出液體的方式可避免水流運動時碰撞注入設施，使水流的各向運動皆不受輸出口影響。在測量流速時，使用定流輸出盒水平鑽孔使液體自然流出；觀察洋流流動路徑時，則彎曲點滴管出口至 90 度直角輸出。



▲圖(5-2-3)水平輸出示意圖

三、研究架構



陸、研究過程及結果

一、模擬密度流的流動情形

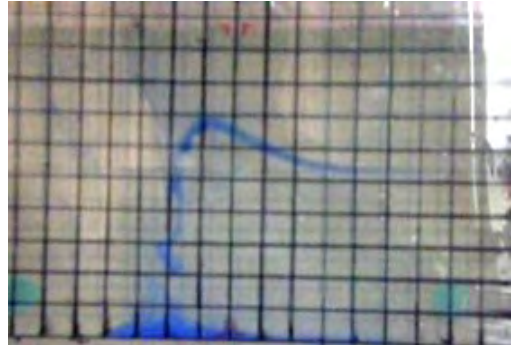
實驗一 模擬洋流進入不同溫度的海域的流動情形

《目的》探討溫度差影響水流的流動路徑的關係

《方法》使用縱切面立水箱 A (含點滴組，如圖 6-1-1) 倒入 25°C 的清水至縱切面立水箱 A 水深 10cm。分別以 1000g 水比 2g 藍墨調出五組操作液體(Iaq)，水溫分別為熱水 45°C、35°C、同溫水 25°C、冷水 15°C、5°C 的墨水並倒入點滴瓶。以固定流量 0.1ml/秒輸出液體並記錄流動路徑(圖 6-1-2)。



▲圖(6-1-1) 縱切面立水箱 A 和點滴組裝置



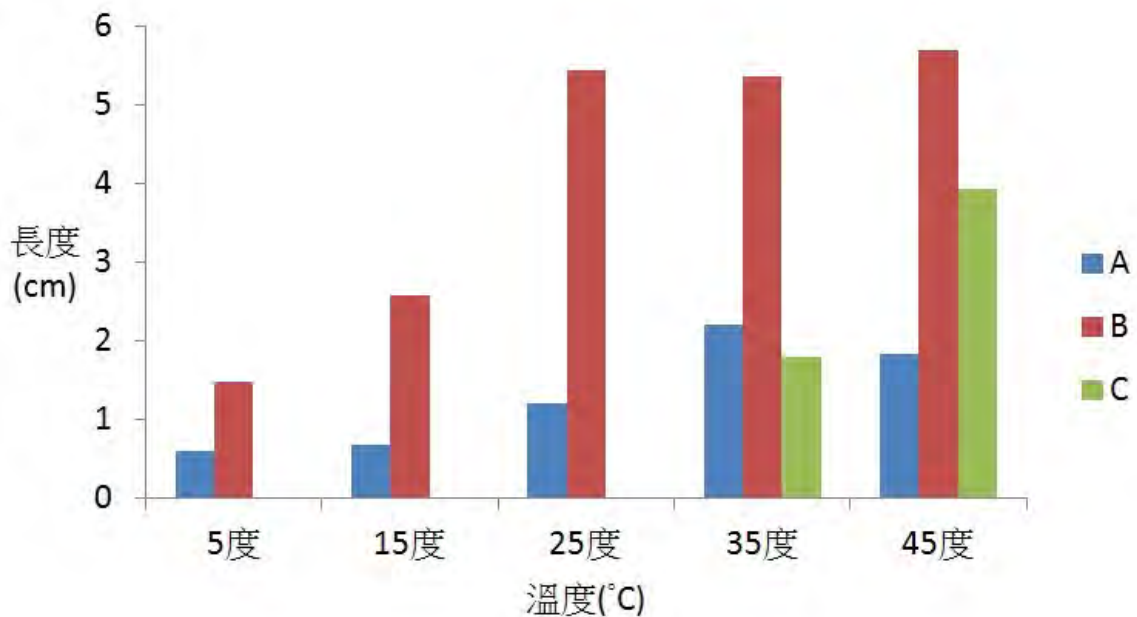
▲圖(6-1-2) 流動路徑實驗進行圖

《結果》A 值^(註四)在 5°C 到 25°C，隨溫度差成負相關；在 35°C 及 45°C，隨溫度差成負相關；最高為 35°C 的 2.21cm。

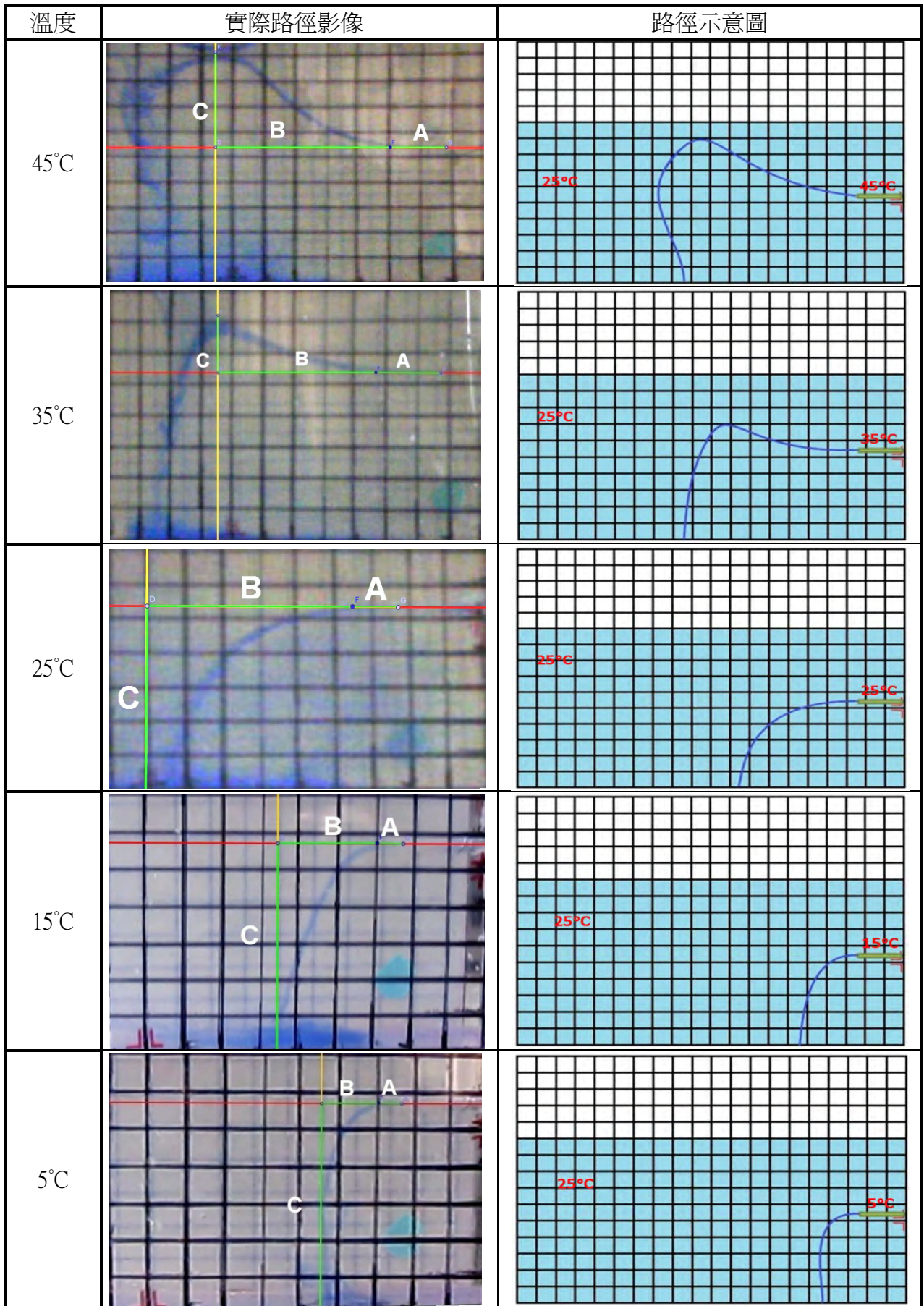
B 值^(註四)隨溫度成正相關，僅 35°C 的 B 值較 25°C 低；最高為 45°C 的 5.68cm。

C 值^(註四)在 35°C 及 45°C，隨溫度成正相關，最高為 45°C 的 3.92cm(圖 6-1-3)。

註(四)A 值：穩定水平流動長度。B 值：流體最高(低)位置水平長度。C 值：流體最高上升鉛直長度，參見(4-3-3、4、5)名詞定義 - A 值、B 值、C 值。



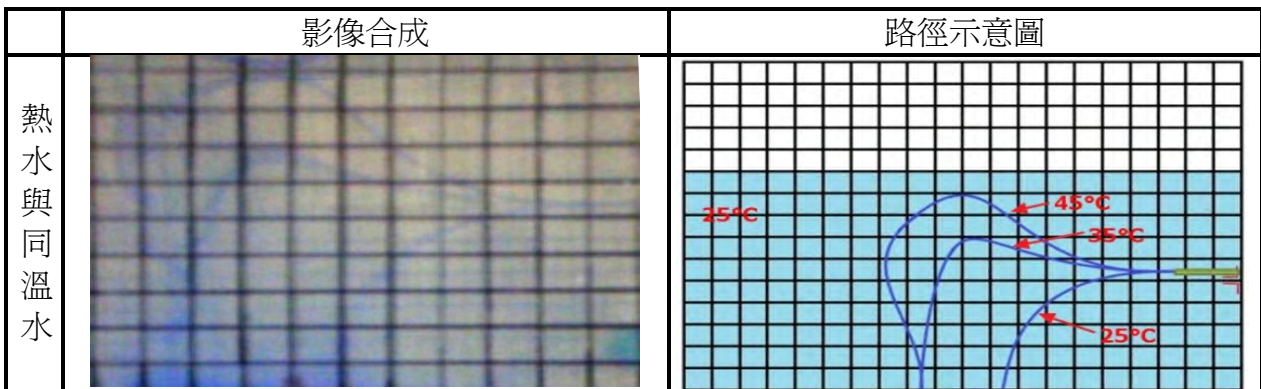
▲圖(6-1-3) 溫度與升降路徑關係圖



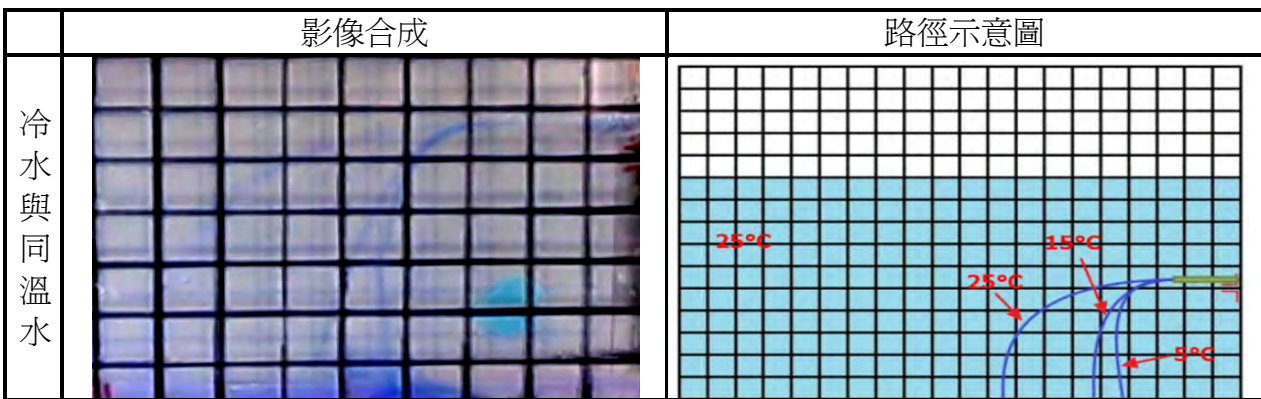
▲圖(6-1-4)各溫度液體在環境水域下的流動路徑圖

▼表(6-1-5)溫度與升降路徑關係(長度單位：cm)

溫度 \ 項目	A	B	C
5°C	0.6	1.48	—
15°C	0.67	2.58	—
25°C	1.2	5.43	—
35°C	2.21	5.36	1.8
45°C	1.83	5.68	3.92



▲圖(6-1-6) 熱水與同溫水在環境水域下的流動路徑合成比較圖



▲圖(6-1-7) 冷水同溫水在環境水域下的流動路徑合成比較圖

《實驗分析》

高溫度差中，溫度差增加；越快上升，初始穩定水平長度 A 值減少，而 35°C 因能量不足、不足以升降使 A 值特高；上升持久，可流動的水平距離 B 值增加，而 35°C 因 A 值特高而 B 值較短，但 A 值+B 值仍比 25°C 多；上升能量高，最高位置 C 值增加。

低溫度差中，溫度差增加；下沉越快，因此 A 值、B 值皆減少。且不論高低溫度差，溫度增加、能量高，流動越遠。

實驗二 模擬洋流進入不同鹽度的海域的流動情形

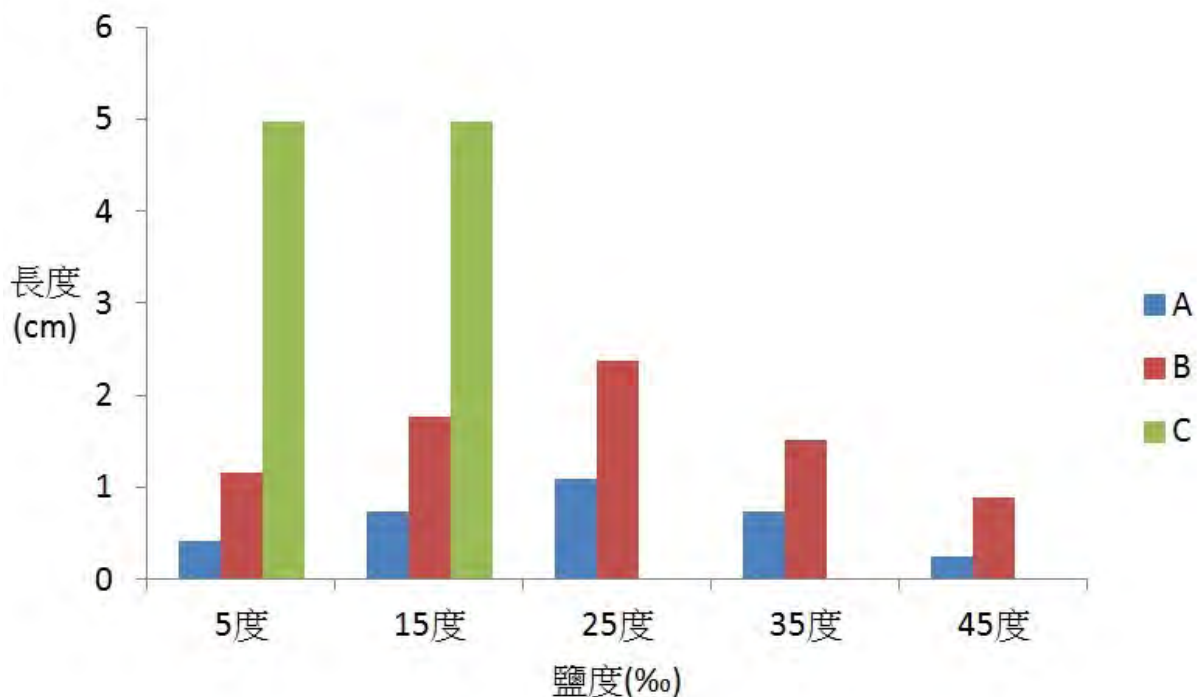
《目的》 探討鹽度差影響水流的流動路徑的關係

《方法》 使用縱切面立水箱 A (含點滴組，如圖 6-1-1) 倒入 25‰ 的常溫水至縱切面立水箱 A 水深 10cm。分別以 1000g 水比 2g 藍墨調出五組操作液體(Iaq)，鹽度分別為高鹽度水 45‰、35‰、同鹽水 25‰、低鹽度水 15‰、5‰ 的墨水並倒入點滴瓶。以固定流量 0.1ml/秒輸出液體並記錄流動路徑(圖 6-1-2)。

《結果》 A 值^(註四) 隨溫度差成負相關，最高為 25‰ 的 1.09cm。

B 值^(註四) 隨溫度差成負相關，最高為 25‰ 的 2.38cm。

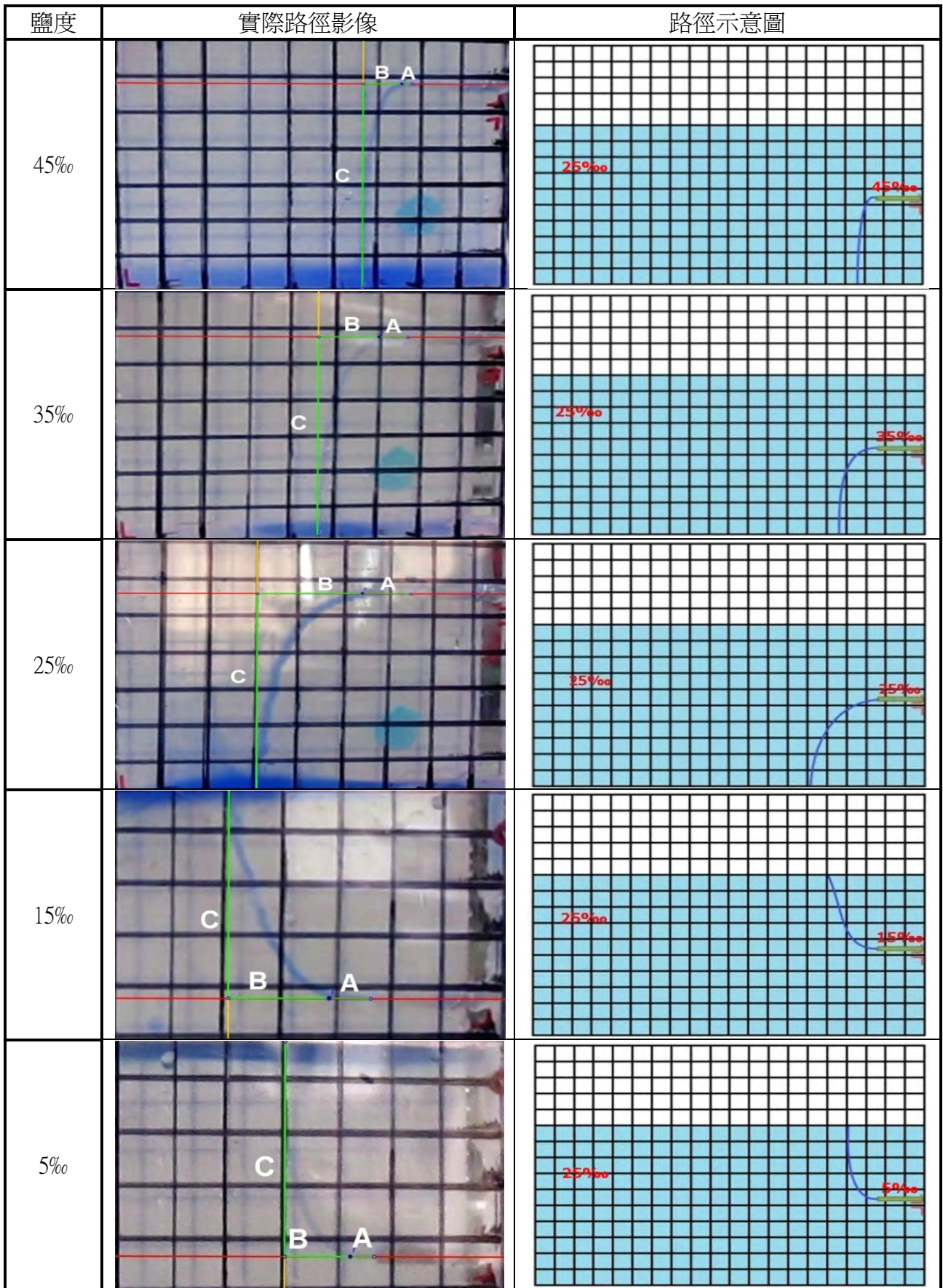
C 值^(註四) 在 5‰ 及 15‰，皆為最大值(5cm)(圖 6-1-8)。



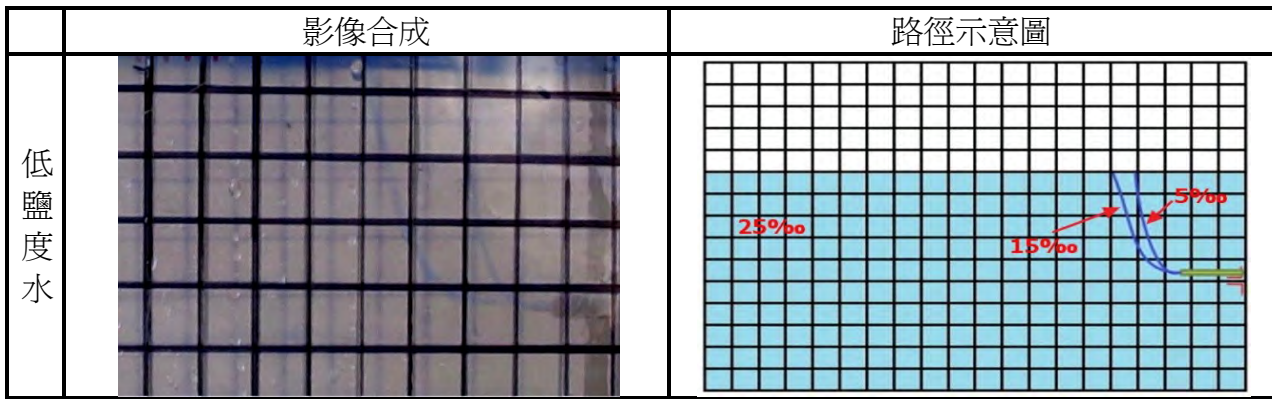
▲圖(6-1-8)鹽度與升降路徑關係圖

▼表(6-1-9)鹽度與升降路徑關係(長度單位：cm)

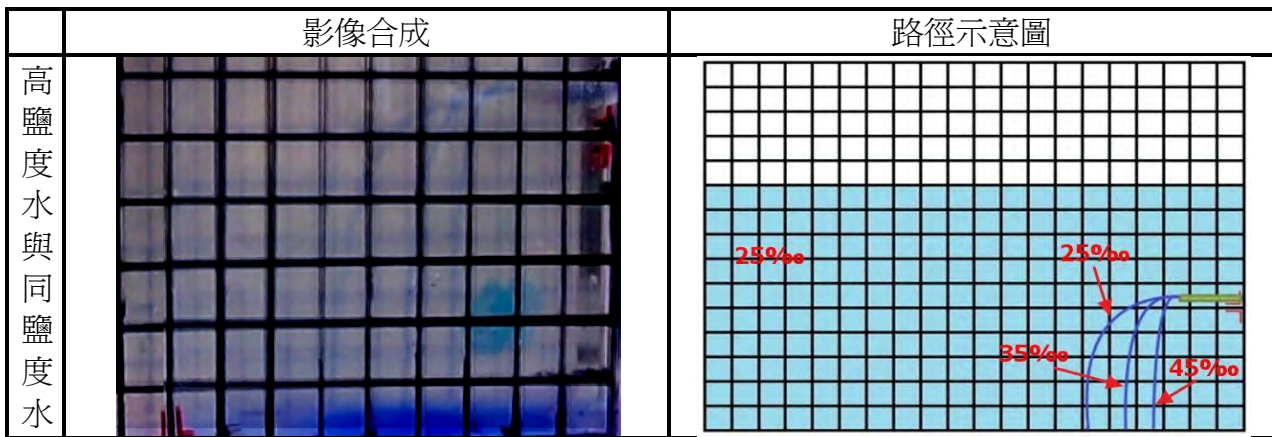
鹽度 \ 項目	A	B	C
5‰	0.42	1.16	5.00
15‰	0.73	1.77	5.00
25‰	1.09	2.38	—
35‰	0.73	1.51	—
45‰	0.24	0.89	—



▲圖(6-1-10)各鹽度液體在環境水域下的流動路徑圖



▲圖(6-1-11) 低鹽度液體在環境水域下的流動路徑合成比較圖



▲圖(6-1-12) 高鹽度與同鹽度液體在環境水域下的流動路徑合成比較圖

《實驗分析》

(一)低鹽度差

鹽度差增加；越快將水團往上帶，使可流動的水平長度 A 值及 B 值減少；由於鹽度穩定不易變化，使低密度水團持續上升，C 值皆為最高。

(二)高鹽度差

鹽度差增加；水流越快下沉，因此 A 值、B 值皆減少。不論高低鹽度差，鹽度差增加，鉛直運動愈快，故水平流動長度皆因來不及發展而減少。

實驗比較 比較溫度差與鹽度差所造成之流動情形差異

實驗一 溫度部分，操作液體(Iaq)溫度越高，其橫向流動增加；縱向微幅增加。

實驗二 鹽度部分，操作液體(Iaq)鹽度差越大，其橫向流動減少；但由於鹽度穩定不易變化，其上升 C 值皆為最大。

整體比較，溫度差主要影響不同緯度的水流橫向運動(V_x)；而鹽度差主要影響不同海層的水流鉛直交替(V_y)。

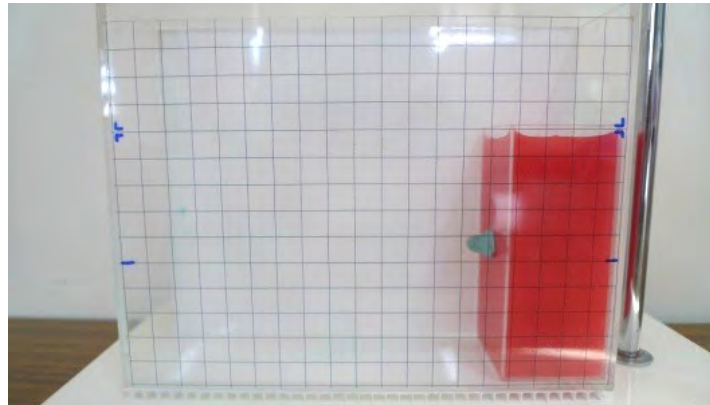
二、測量不同變因與密度流的鉛直及水平流速之關係

實驗三 測量溫度差影響的流速

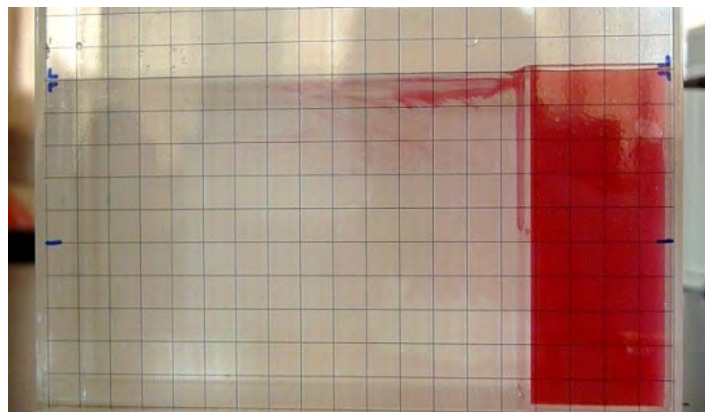
《目的》探討不同溫度差下，洋流之水平及鉛直流速(V_x, V_y)

《方法》使用縱切面立水箱 A 放置定流輸出盒(圖 6-2-1)並倒入 25°C 的清水(C_{aq})至水深 10cm。分別以 1000g 水比 2g 墨調出紅色五組熱水，水溫分別為 50°C、45°C、40°C、35°C、30°C^{註(一)}的墨水與藍色五組冷水，水溫為 20°C、15°C、10°C、5°C、0°C 的墨水(I_{aq})，倒入定流輸出盒至 10cm，使其自然流出(圖 6-2-2)。

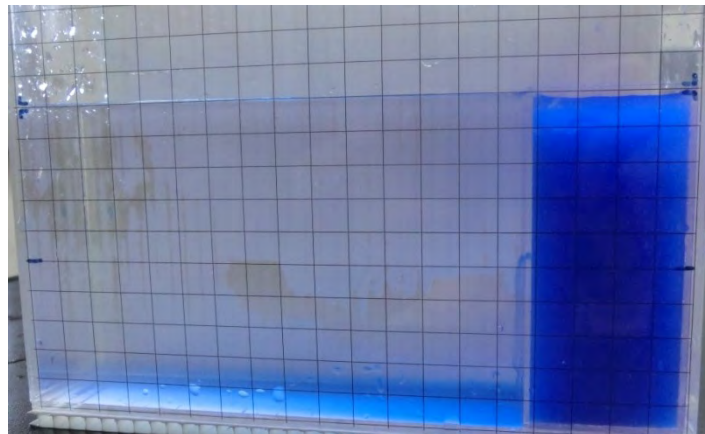
註(一)對於 0 溫差，在自然環境中並不會引起流動，故不予探討之。



▲圖(6-2-1) 縱切面立水箱 A 與定流輸出盒放置圖



▲圖(6-2-2)流速實驗進行圖 1



▲圖(6-2-3)流速實驗進行圖 2

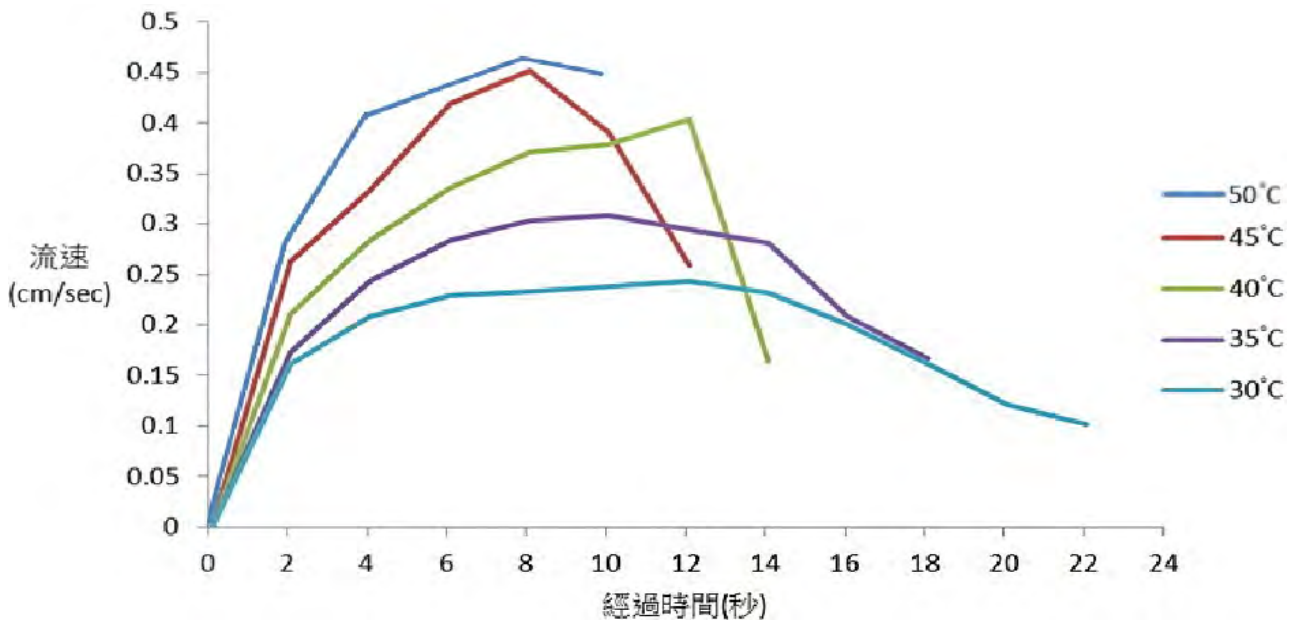
《結果》

(一)熱水流動流速

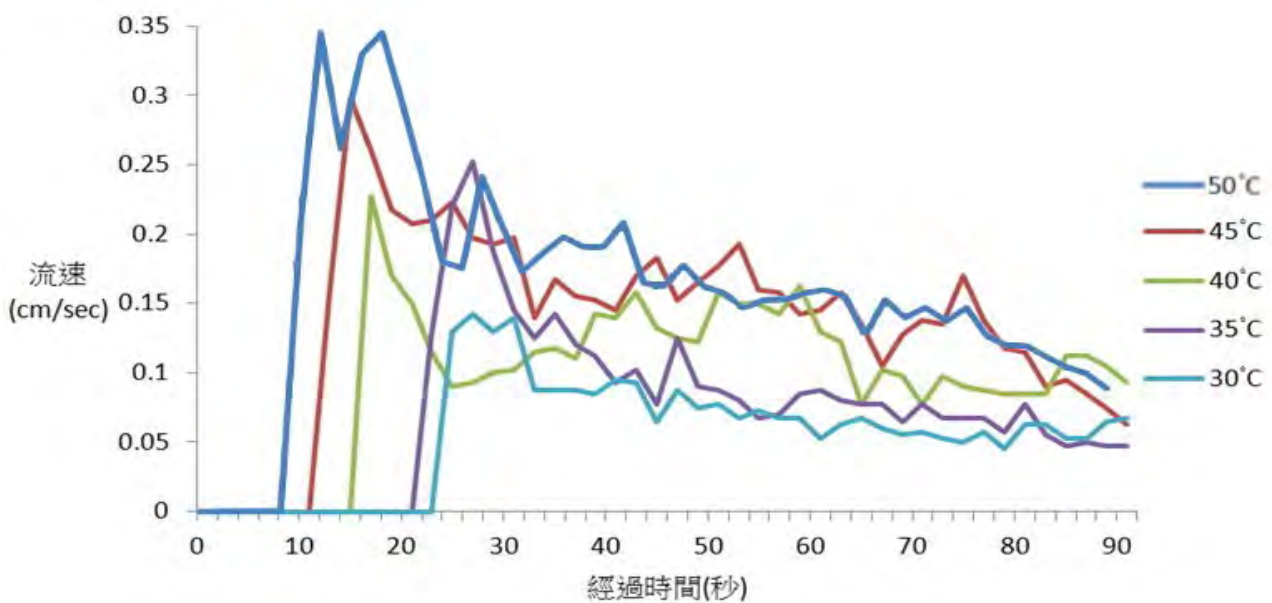
鉛直運動(V_y)由圖(6-2-3)可看到在 50°C 水的上升流速(V_y)中，最快可達到 0.47cm/sec，而 30°C 的上升流速中，最快也可達到 0.23cm/sec，流速皆先升後降。

水平運動(V_x)可再由圖(6-2-4)可看到 50°C 水的水平流速(V_x)最高約為 0.35cm/sec，最低約為 0.09cm/sec，而 30°C 的水平流速(V_x)中，最高 0.14cm/sec，最低為 0.05cm/sec，流速皆不斷下降。

當操作液體(I_{aq})溫度越高而與環境水域(C_{aq})的溫度差越大，水流的流速越快。



▲圖(6-2-3)熱水鉛直流動流速關係圖



▲圖(6-2-4)熱水水平流動流速關係圖

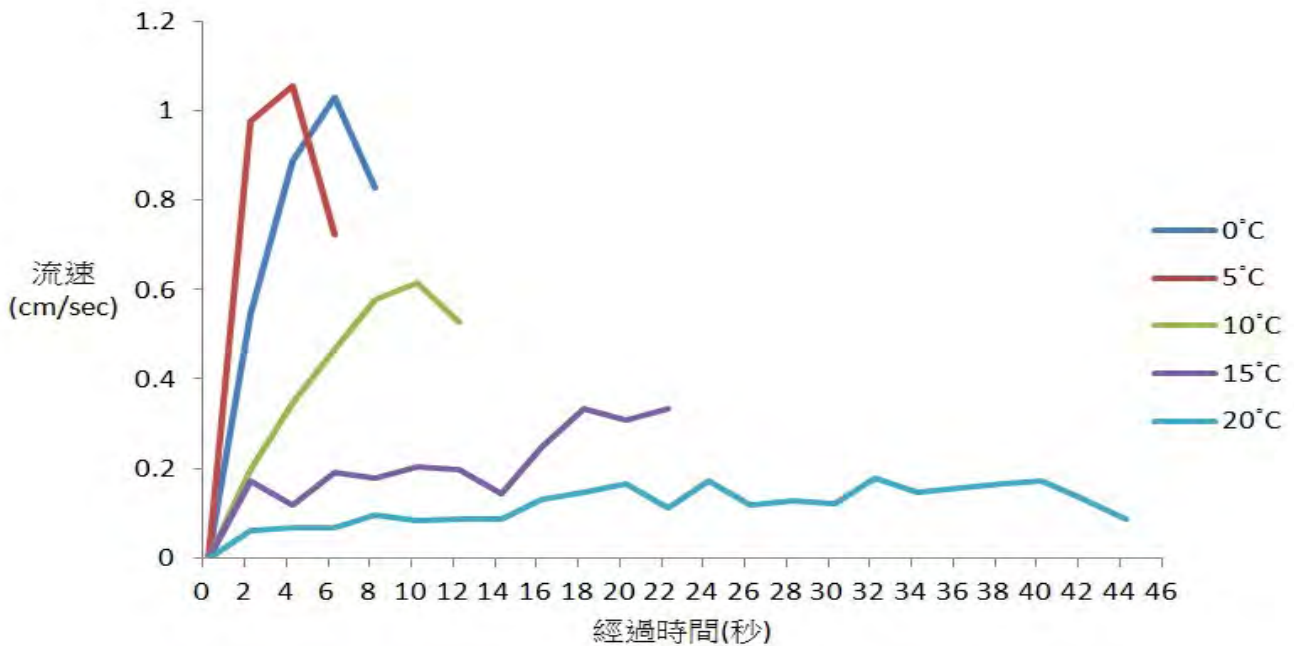
(二)冷水流動流速

鉛直運動(V_y)由圖(6-2-5)可看到在 5°C 水的下降流速(V_y)，最快可達到 1.06cm/sec ；而 20°C 的上升流速中，最快也可達到 0.18cm/sec ；流速皆不斷加速直到衝擊底部為止。

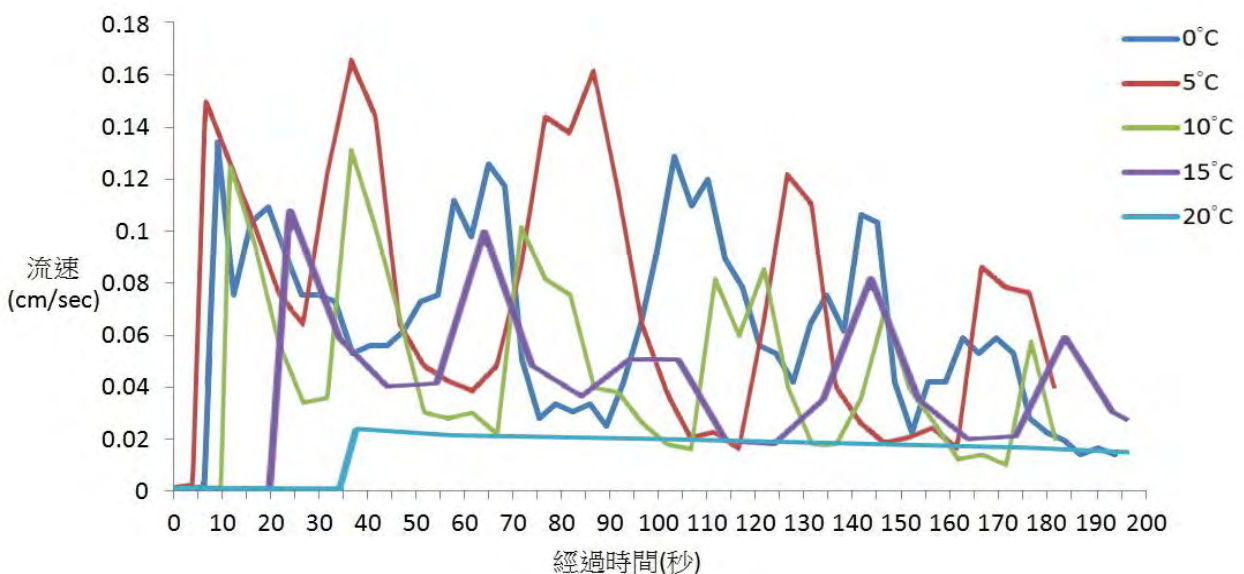
水平運動(V_x)可再由圖(6-2-6)可看到 5°C 水的水平流速(V_x)最高約為 0.169cm/sec ；而 20°C 的水平流速(V_x)，最高也僅 0.024cm/sec ；流速會有間段的高速潮，我們稱其為「崩湧」^(註二)。

當操作液體(I_{aq})，除 5°C 外，皆為溫度越低而與環境水域(C_{aq})的溫度差越大，水流的流速越快。

註(二)崩湧此一詞彙為我們定義之現象，參見(4-2-6)名詞定義-崩湧。



▲圖(6-2-5)冷水鉛直流動流速關係圖



▲圖(6-2-6)冷水水平流動流速關係圖

現象實驗 崩湧原理觀察

《目的》證明管口徑、顏料粒子對於崩湧產生並無影響

《方法》同實驗三步驟。但改以管口徑 0.6cm 的定流輸出盒，輸出 15°C 的操作液體。再以原 0.4cm 口徑之定流輸出盒輸出 15°C、0.2g:1000g 的藍色食用色素水溶液，觀測橫向崩湧現象。

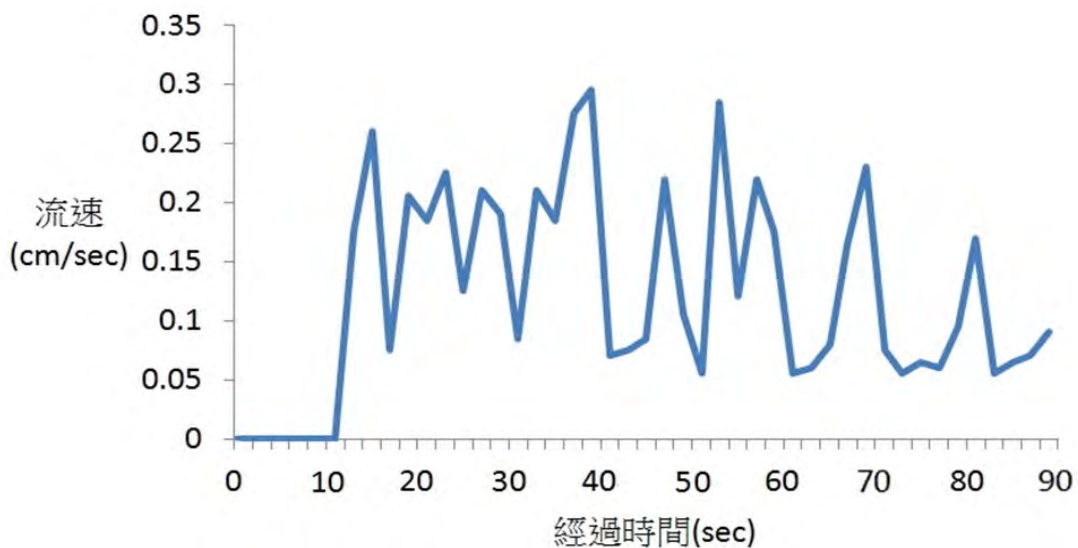
《結果》

(一)改變管口徑

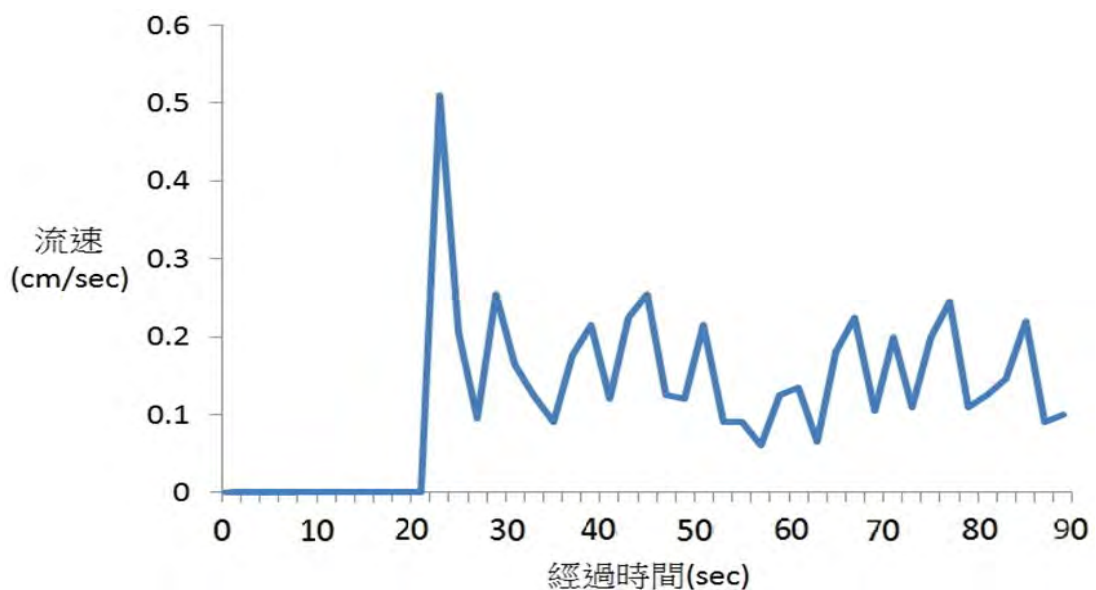
將管口徑從 0.4cm 增加到 0.6cm，橫向流動仍發生崩湧，流速最高達 0.295cm/sec，最低 0.06cm/sec(圖 6-2-7)。

(二)改變顏料種類

將廣告顏料改為食用色素，橫向流動也發生崩湧，流速最高達 0.51cm/sec，最低 0.09cm/sec(圖 6-2-8)。



▲圖(6-2-7) 管口徑 0.6cm、15°C 水平流動速率



▲圖(6-2-8) 食用色素、15°C 水平流動速率

《實驗分析》

(一)熱水流動流速

溫度差越大，水平及鉛直流速(V_x, V_y)越高，是因溫度差增加則密度差使能量增加而流速加快。

鉛直運動(圖 6-2-3)上升的過程中，較高溫度的操作液體(I_{aq})，與較低溫度的操作液體(I_{aq})，其等量單位體積所受浮力相同，但所受重力較小，而流速較快。初因水團上升水壓減小而加速；但隨 Δt 增加，溫度散失而減速。

水平運動(圖 6-2-4)中，較高溫度的操作液體(I_{aq})，與環境水域(C_{aq})的壓力差較大，熱對流旺盛而流速較快。且水平運動(V_x)之初的高流速，是因水流到達液面，上升力量衝擊而加速；但隨 Δt 增加，溫度散失而減速。

(二)冷水流動流速

溫度差越大，水平及鉛直流速(V_x, V_y)越高，但因 5°C 水密度大於 0°C 水，其流速較快。

鉛直流動(圖 6-2-5)下降的過程中，其流速皆不斷增加，是因隨水團下沉，水壓越大所致。

水平運動(圖 6-2-6)中，流速忽快忽慢，是發生「崩湧」^(註二)，因冷水為被動流動，屬遞補或堆積所致，因此當水團所能承載達到上限，水流即湧出而造成高流速；隨 Δt 增加，溫度差減小而緩速。

現象分析 崩湧原理觀察

在改變管口徑和顏料種類後，崩湧依然發生，但頻率增高。當管口徑增加後流量增加，使水團累積的速度變快，崩湧的頻率增快(圖 6-2-7)。改用食用色素時，因食用色素未如廣告顏料一樣添加阿拉伯膠等，其黏滯力又低於廣告顏料，故食用色素的水團在堆積時無法如廣告顏料凝聚的水團那麼多，便因水團易崩潰而崩湧頻繁發生(圖 6-2-8)。

實驗四 測量鹽度差影響的流速

《目的》探討不同鹽度差下，洋流之水平及鉛直流速(V_x, V_y)

《方法》使用縱切面立水箱 A 放置定流輸出盒(圖 6-2-1)並倒入 25‰的常溫水(約 20°C) (C_{aq})至縱切面立水箱 A 水深 10cm。分別以 1000g 水比 2g 墨調出紅色五組高鹽度水，鹽度分別為 50‰、45‰、40‰、35‰、30‰^(註三)的墨水與藍色五組低鹽度水，鹽度分別為 20‰、15‰、10‰、5‰、0‰的墨水(I_{aq})，倒入定流輸出盒至 10cm(圖 6-2-2)。倒入定流輸出盒至 10cm，使其自然流出。

註(三)對於 0 鹽度差，在自然環境中並不會引起流動，故不予探討之。

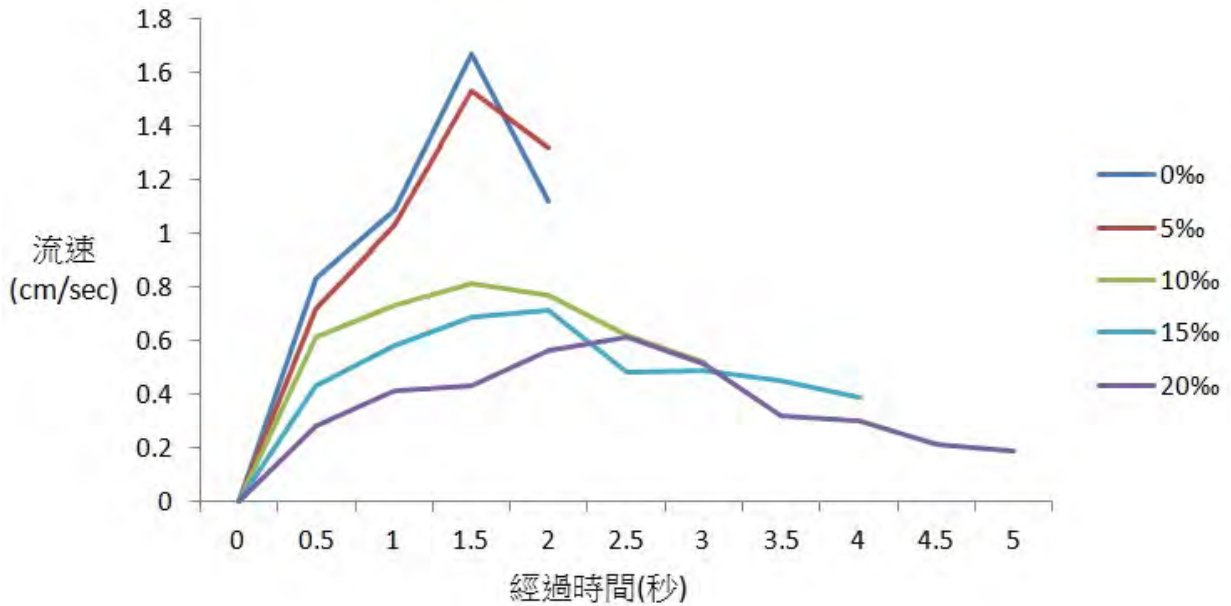
《結果》

(一)低鹽度水流動流速

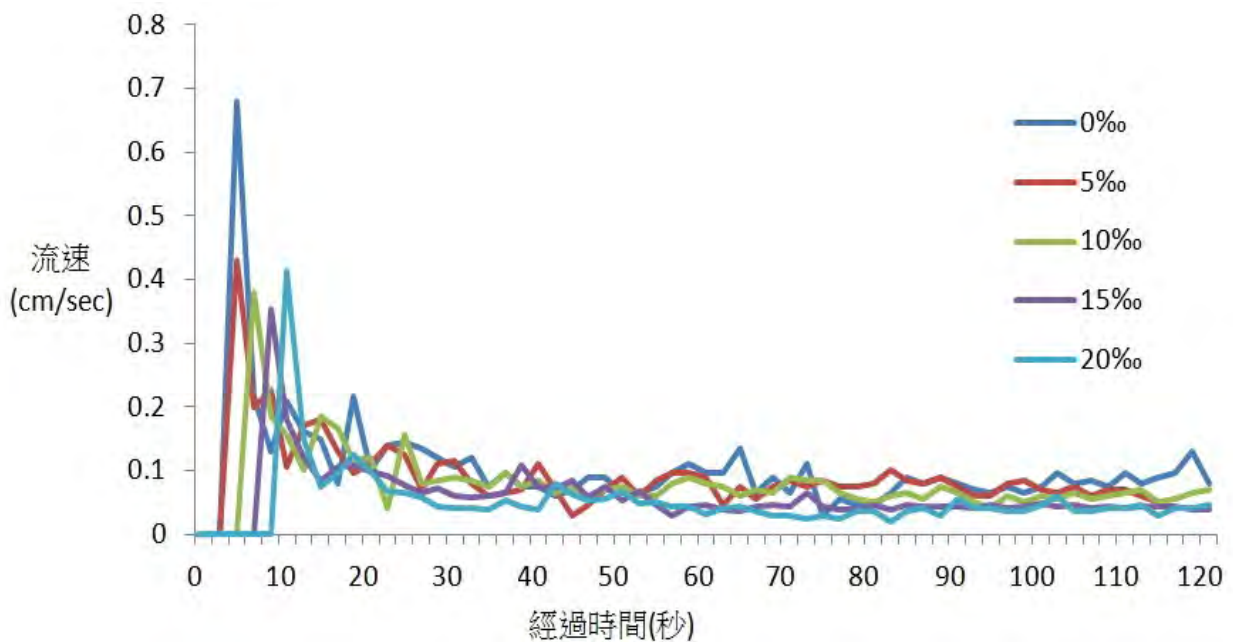
鉛直運動(V_y)由圖(6-2-9)可看到 0‰ 清水的上升流速(V_y)，最高約 1.7cm/sec；而 20‰ 鹽水的流速最高約 0.6cm/sec；流速皆先升後降。

水平運動(V_x)再由圖(6-2-10)可看到 0‰ 清水的水平流速(V_x)最高約為 0.68cm/sec，平均穩定流速約 0.1cm/sec；而 20‰ 鹽水最高 0.41cm/sec，平均穩定流速約 0.05cm/sec；衝擊過後流速趨於穩定低速。

當操作液體(I_{aq})鹽度越低而與環境水域(C_{aq})的鹽度差越大，水流的流速越快。



▲圖(6-2-9)低鹽度水鉛直流動流速關係圖



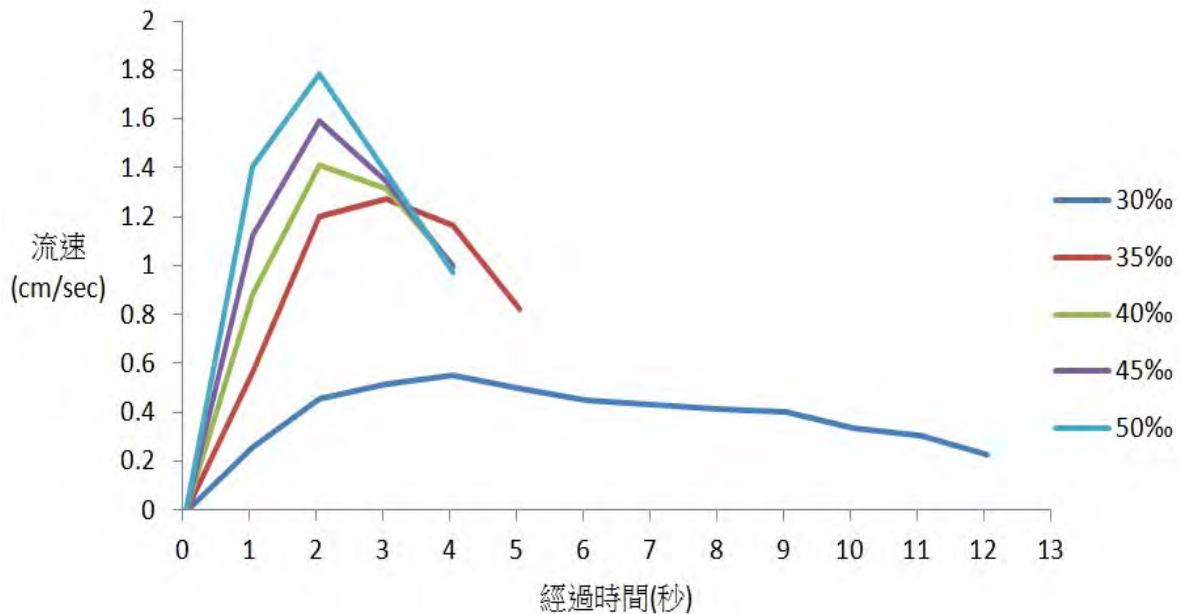
▲圖(6-2-10)低鹽度水水平流動流速關係圖

(二)高鹽度水流動流速

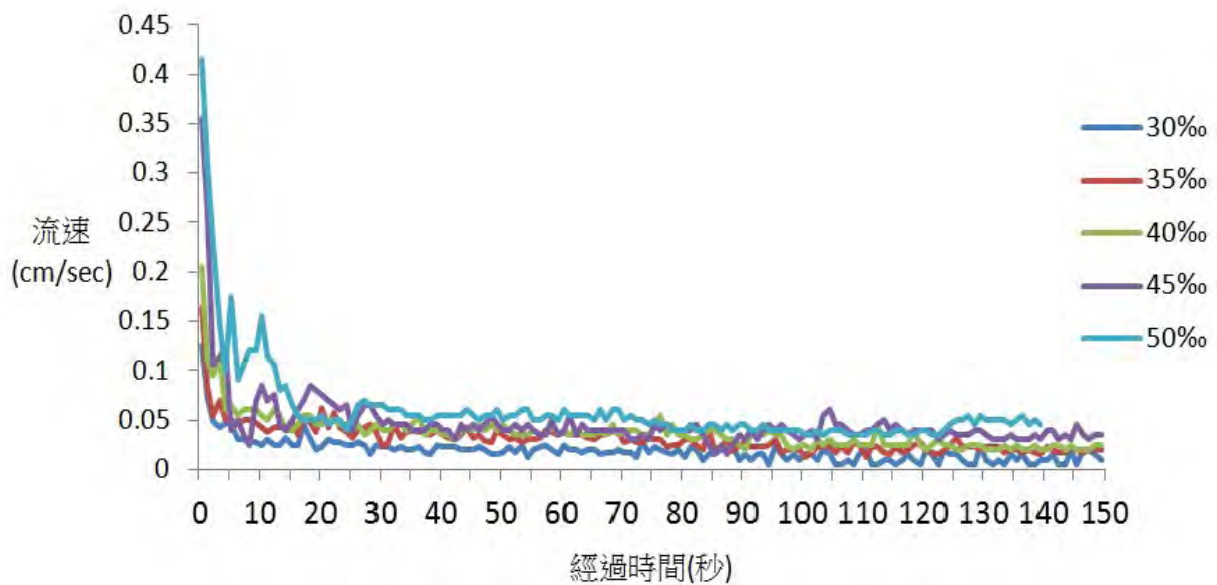
鉛直運動(V_y)由圖(6-2-11)中看到 50‰鹽水的下降流速(V_y)，最高約 1.8cm/sec；而 20‰鹽水的流速最高約 0.58cm/sec；流速皆先升後降。

水平運動(V_x)再由圖(6-2-12)可看到 50‰鹽水的水平流速(V_x)最高約為 0.42cm/sec，平均穩定流速約 0.05cm/sec；而 30‰鹽水最高 0.013cm/sec，平均穩定流速約 0.025cm/sec；衝擊過後流速趨於穩定慢速。

當操作液體(I_{aq})鹽度越高而與環境水域(C_{aq})的鹽度差越大，水流的流速越快。



▲圖(6-2-11)高鹽度水鉛直流動流速關係圖



▲圖(6-2-12)高鹽度水水平流動流速關係圖

《實驗分析》

(一)低鹽度水流動流速

鹽度差越大，水平及鉛直流速(V_x, V_y)越高，是因密度差變大而流速加快。而鹽度不易隨時間散失，流速較穩定。

鉛直運動(圖 6-2-9)上升的過程中，初因水團上升水壓減小而加速；但隨 Δt 增加，環境與操作溶液混合而減速。

水平運動(圖 6-2-10)中，水平運動(V_x)之初的高流速，是因水流到達液面，上升力量衝擊而加速；但由於鹽度不易隨時間改變，流速與 Δt 關係較小，維持穩定低速。且因鹽度差僅改變些微密度，並無較大能量貢獻，故水平流速(V_x)變化不明顯。

(二)高鹽度水流動流速

鹽度差越大，水平及鉛直流速(V_x, V_y)越高但不明顯。且鹽度不易隨時間散失，流速較穩定。

鉛直運動(圖 6-2-11)上升的過程中，較高鹽度的操作液體(I_{aq})，因流速較高易於溶液混合，而緩速較低鹽度水團明顯。初因水團下降水壓增加而加速；但隨 Δt 增加，環境與操作溶液混合而減速。

水平運動(圖 6-2-12)中，水平運動(V_x)之初的高流速，是因水流到達水箱底，下降力量衝擊而加速；但由於鹽度不易隨時間改變，流速與 Δt 關係較小，維持穩定低速。且鹽度差變化僅改變些微密度，與水平流速(V_x)增減影響並不明顯。

實驗比較 比較溫差與鹽度差所造成之流速影響

溫度差或鹽度差增加，其水平及鉛直流速(V_x, V_y)都會增加。

實驗三 溫度部分，冷水較熱水影響鉛直運動(V_y)明顯；而熱水較冷水影響水平運動(V_x)明顯。

實驗四 鹽度部分，高鹽度水較低鹽度水影響鉛直運動(V_y)明顯；而低鹽水較高鹽水影響橫向運動(V_x)明顯。

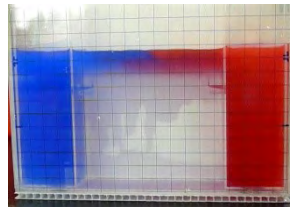
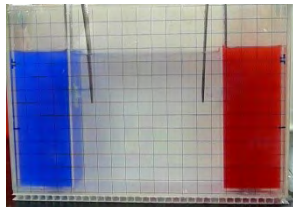
整體比較，鹽度變因較溫度變因穩定，不易隨時間改變，影響流速較小；但溫度差所提供能量較多，故較鹽度影響流速明顯。

三、探討混合增密現象的影響

實驗五 觀察兩同密度水團混合的下降過程

《目的》探討溫度差與鹽度差對於混合增密的水團下降關係

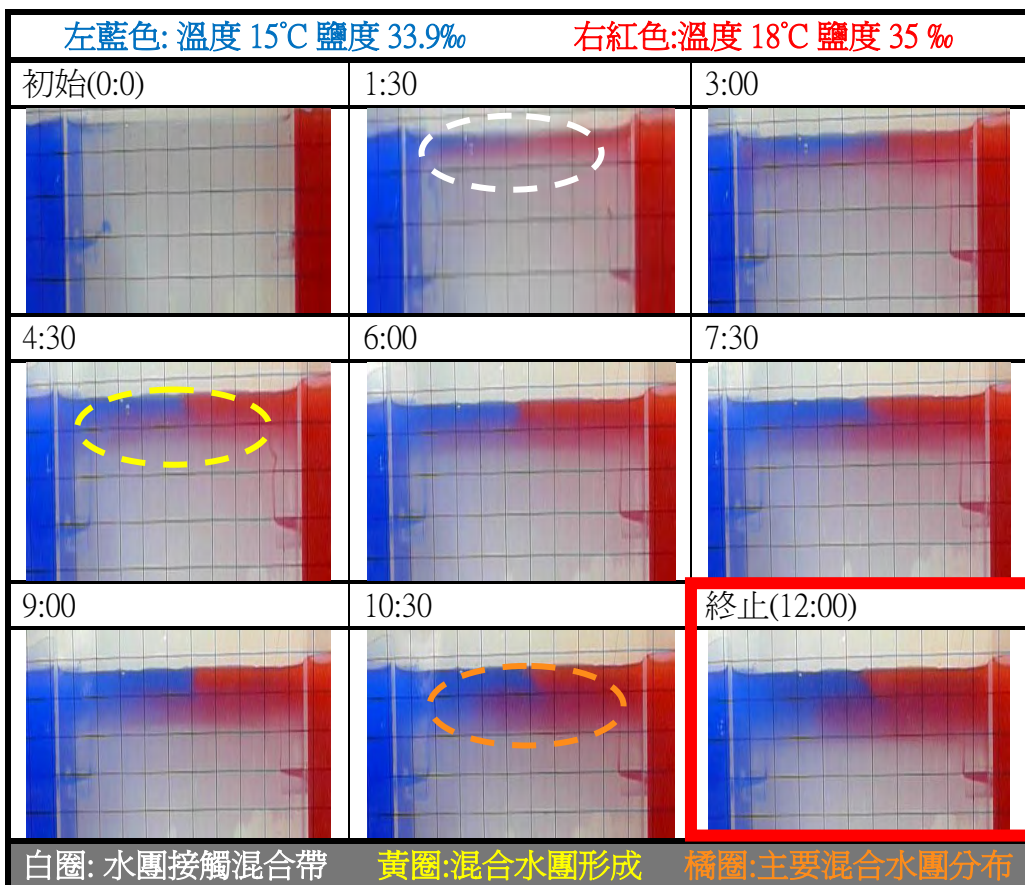
《方法》使用縱切面立水箱 A 放置兩定流輸出盒(圖 6-3-1)並倒入鹽度 50‰、溫度 25°C 的環境水域 (C_{aq})至縱切面立水箱 A 水深 10cm。分別以 1000g 水比 2g 墨調出三組密度 1.025g/cm³，分別為第一組 19°C、35 ‰(紅)和 15.5°C、33.9‰(藍)，第二組 15.5°C、33.9‰(紅)和 10°C、32.5‰(藍)，第三組 19°C、35 ‰(紅)和 10°C、32.5‰(藍)的墨水，倒入兩定流輸出盒至 10cm。使兩液體自然流出，並觀察其混合下降情形(圖 6-2-2)。



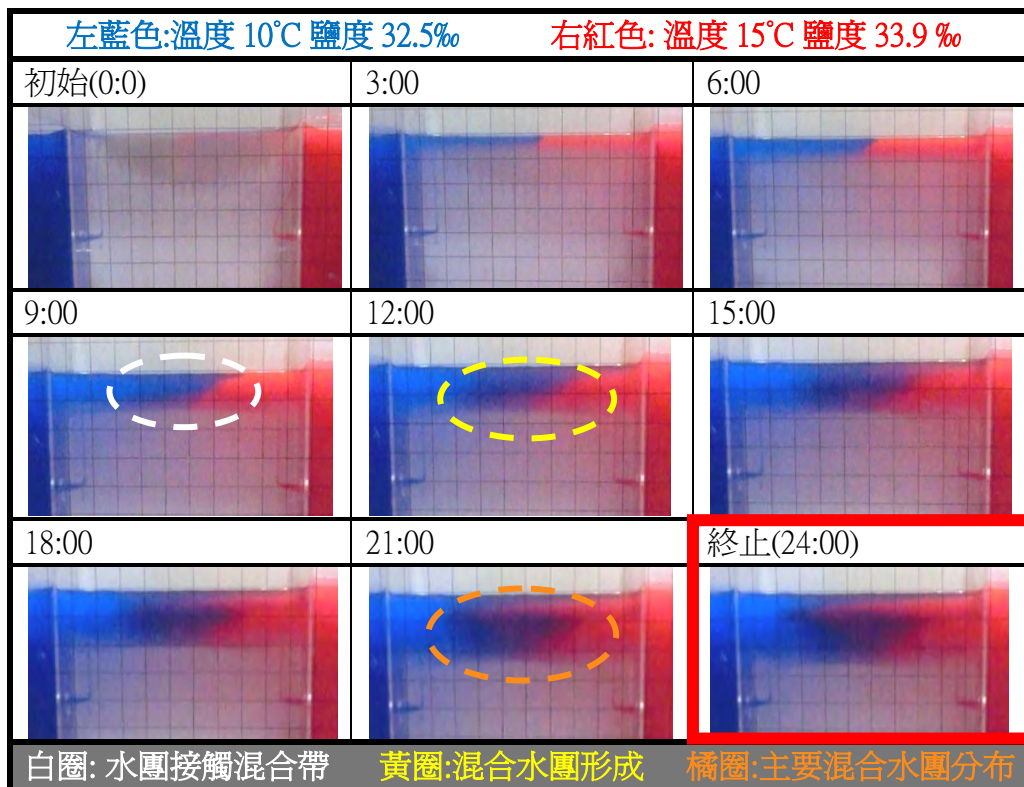
▲圖(6-3-1)混合增密實驗進行圖 1

▲圖(6-3-2)混合增密實驗進行圖 2

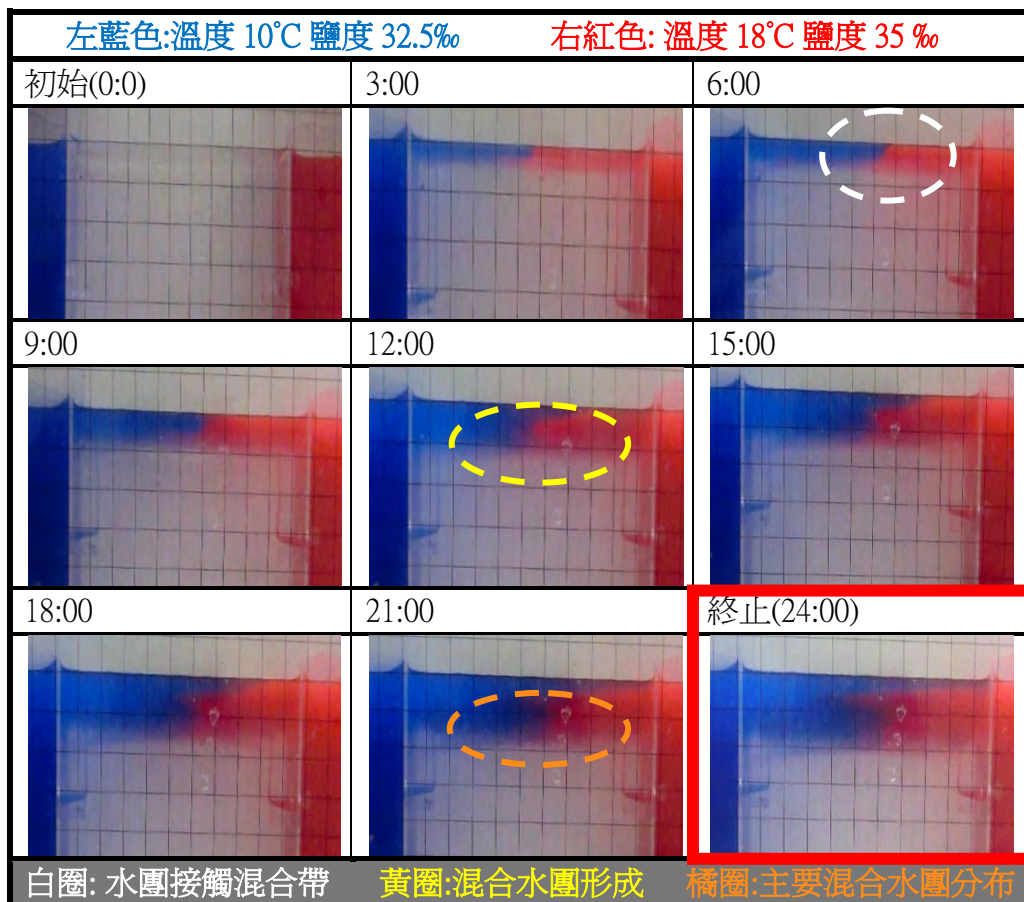
《結果》混合增密造成同密度水團混合後下沉；且水溫越高越易混合而增密現象越早發生也越明顯(圖 6-3-3)；水溫低或溫度及鹽度差大則較不易混合而使現象較晚產生(圖 6-3-4、5)。



▲圖(6-3-3)15°C/33.9‰水與 19°C/35‰水的混合情形



▲圖(6-3-4) 10°C/32.5‰水與 15.5°C/33.9‰水的混合情形



▲圖(6-3-5) 10°C/32.5‰水與 19°C/35‰水的混合情形

《實驗分析》水團自接觸帶混合後，因混合增密作用下沉，形成一三角形下沉結構，漸向底部兩側擴散。溫度越高越易混合，是因其高溫而擴散作用強；溫度差及鹽度差越大越難混合，則因其性質差異大造成。假設水團 ρ_1 及 ρ_2 均勻混合，利用海水密度狀態方程式計算密度 $\rho_{\text{混合}1,2} \left(\frac{S_1+S_2}{2}, \frac{T_1+T_2}{2} \right)$ 如下表(6-3-6)溫度及鹽度差越大，密度增加越多，最高增加 0.1kg/m^3 ；反之，則密度增加較少，最少增加 0.01kg/m^3 。

▼表(6-3-6)兩水團均勻混合後的溫鹽密度 (左縱欄及上列為 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ，右下三格為 $\rho_{\text{混合}}$)

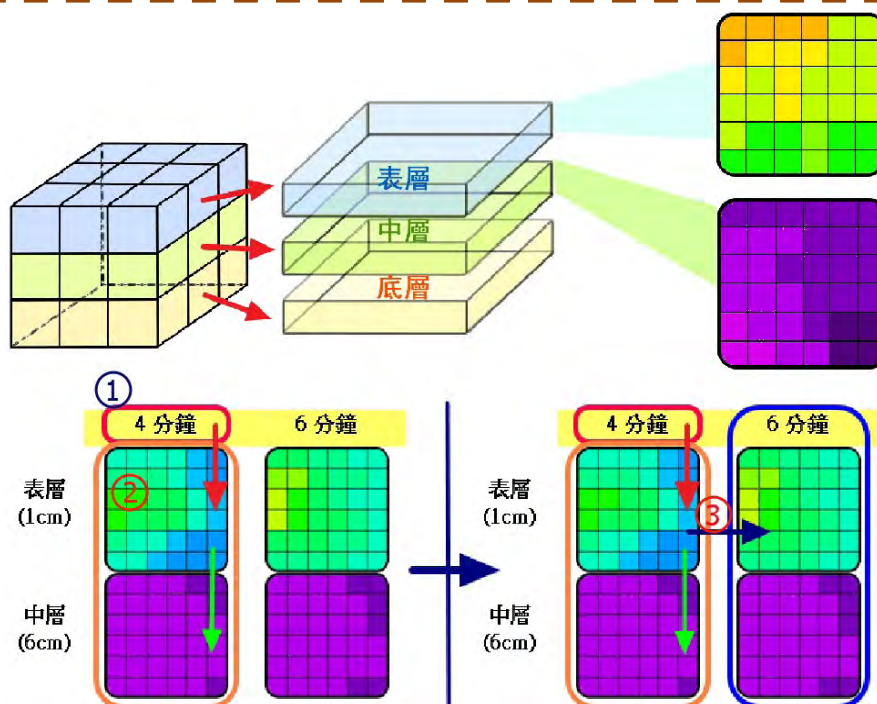
$S(\text{‰})、T(^{\circ}\text{C})、\rho(\text{kg/m}^3)$	$\rho_1(33.9, 15.5)=1025.01$	$\rho_3(32.5, 10)=1025.00$
$\rho_2(35, 19)=1025.02$	$\rho_{\text{混合}1,2}(34.45, 17.25)=1025.03$	$\rho_{\text{混合}3,2}(33.75, 14.5)=1025.12$
$\rho_1(33.9, 15.5)=1025.01$		$\rho_{\text{混合}3,1}(33.2, 12.75)=1025.05$

四、綜合鹽度、溫度因素模擬洋流於海中流動的情形

實驗六 模擬各緯度與深度的洋流流動情形

《目的》模擬不同海域的溫度及鹽度對於洋流移動的路徑關係

《方法》調配鹽度 25‰ 的常溫水(Caq)，倒進場域水箱 B 至 25cm 處。在右側間格內放入冰水混合液至水深 25cm，以電湯匙加熱。以 1000g 水:2g 顏料調配鹽度 15‰、溫度 40°C 的紅墨水，及鹽度 20‰、溫度 30°C 的藍墨水，至左側以固定流量 0.4ml/sec 輸出。

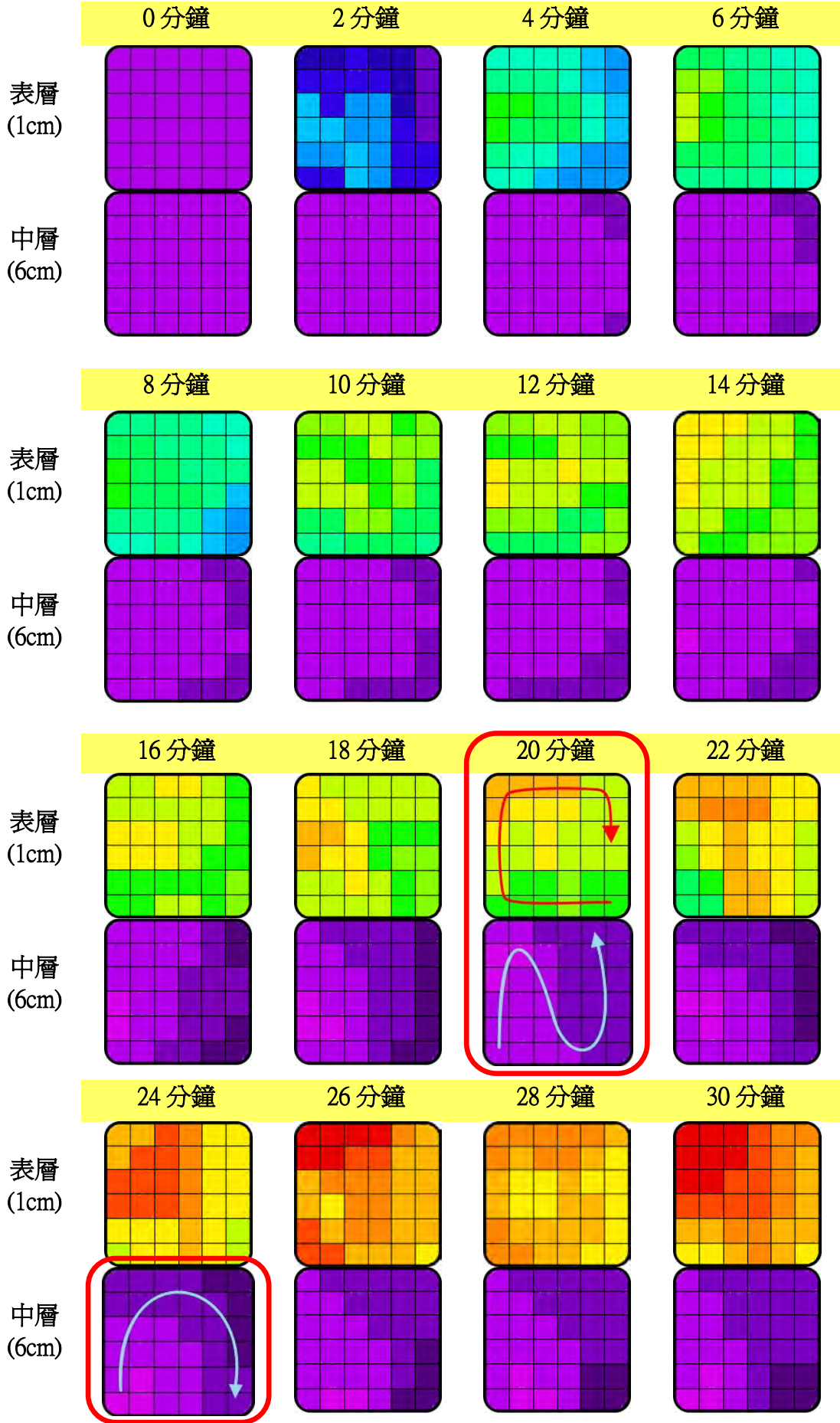


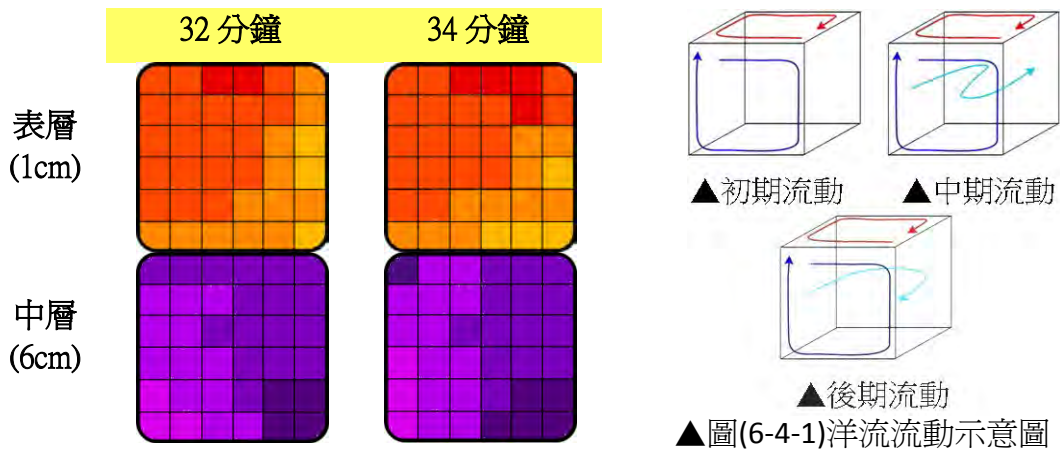
如上圖，我們將大水箱分別分成橫向面以及縱向面切成三面，而我們將橫向面拉出來由上至下，分別分為表、中、底層，對此我們又依不同時間點，紀錄表層的以及中層的溫度。由於底層的溫度分部從實驗開始自最後都並無明顯變化(約 18°C)，故並未標出底層溫度的分佈圖。

由①可以看出記錄溫度的時間，再來②便是當下時間的表層和中層溫度狀況，最後看下一段時間的水層溫度分布便按③的步驟看。



→ : 表層流動方向 → : 中層流動方向





《結果及分析》

此實驗的水箱內模擬海洋由赤道至北極間，鹽度與溫度的相似趨勢分佈；電湯匙加熱模擬高溫的赤道，冰水混合液模擬北極的低溫與低鹽；而紅色操作液體模擬經過赤道加熱的表層流動，藍色溶液則模擬中層流動。

洋流流動示意圖中，表層流動始終呈順時針流動；中層由初期 4 分鐘的單純擴散，到中期 20 分鐘的倒 S 形，至後期 24 分對流擴大成順時針流動。

且表層及中層流動皆由高溫往低溫方向移動，水平流動主要由溫度影響；而鹽度則決定洋流於垂直海層中的高度，與實驗一、二結果相同。

柒、討論

一、模擬密度流的流動情形

在實驗一、二，溫度差增加時，水流縱橫距離皆產生正向關係。但只要有鹽度差時，低鹽度水團會直接上升到頂端，而鹽度差增加橫向距離卻會減少。由實驗三、四證明，當增加鹽度差時，鉛直流速大幅加快，會導致水團快速上升至水面而橫向來不及發展。

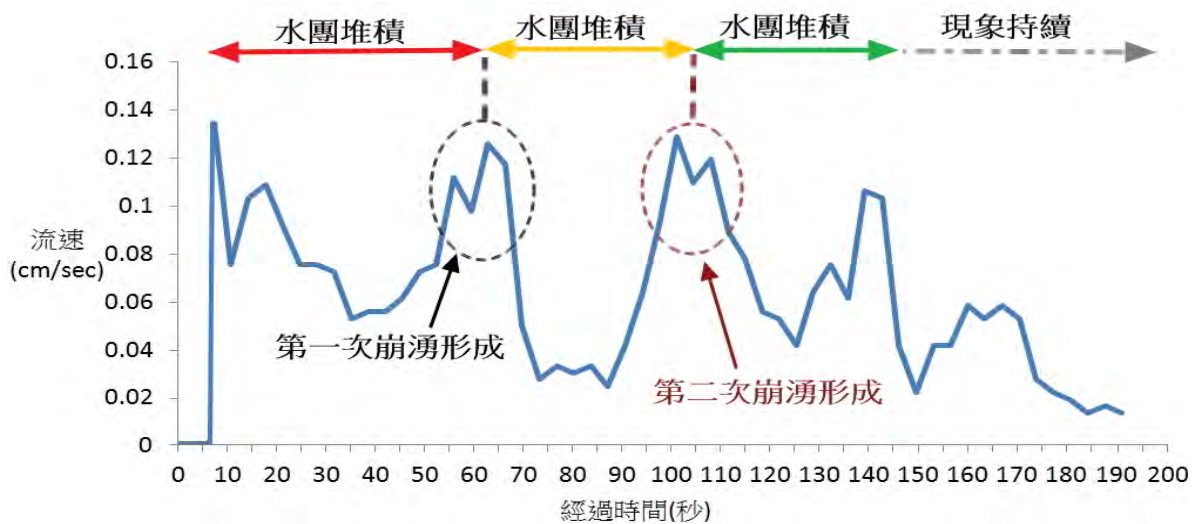
二、測量不同變因與密度流的鉛直及水平流速之關係

實驗三、四有別於前者，使操作液體自然流出，未給予水流初速度，皆發現水流會先鉛直運動後進行橫向運動。密度差產生時，操作液體的鉛直分量大於擴散產生的水平分量。雖兩分量互不干擾，但水平分量力量較小，受水阻影響無法發展；然鉛直方向上升快速，待水流升至水面，助長水平運動造成橫向流動加速。

在低溫流速實驗中，發現崩湧現象(圖 7-1)，在圖(7-1)可以看到水團會先堆積，故流速較為緩慢，當水團累積到一定量時便會崩潰，崩潰時水團會突然出現一加速潮。此現象在水流流動結束前，會不斷的反覆發生。但同樣下降的高鹽度水則無此現象。照說其應與冷水團一樣，下沉堆積之後崩毀而發生崩湧，但並未發生。推測高鹽度水團含鹽粒子，可能因黏滯力，使水團崩潰後，不會和冷水團一樣立刻向前衝，而以較緩的速度移動。

最初我們猜測口徑或顏料粒子會影響崩湧的出現。因此改變口徑，也嘗試使用硫酸銅飽和水溶液，但因不易觀察，而改以水溶性食用色素。在改變兩個變因後，崩湧亦產生且頻率增加。故由此我們排除以上變因影響崩湧現象的可能。

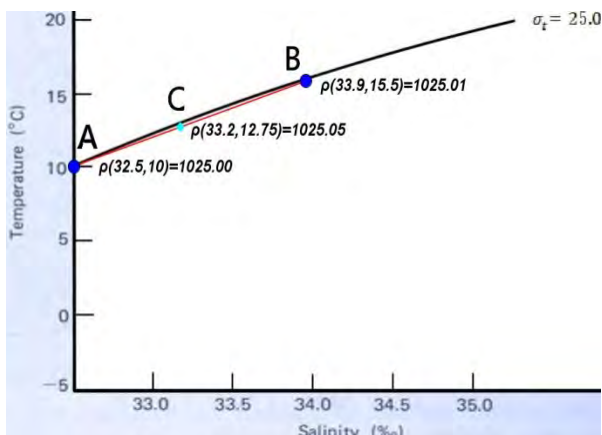
實驗三 20°C 冷水的流速(圖 6-2-6)中，因為 20°C 冷水流動很慢，觀察時間間隔如過短，不易看出變化，故除 20°C 冷水是以每 30 秒紀錄一次，其他皆以每 5 秒進行一次記錄。所以在(圖 6-2-6)中便因為我們觀察的間隔長而看不出微觀流速中一陣陣水流衝擊的出現。



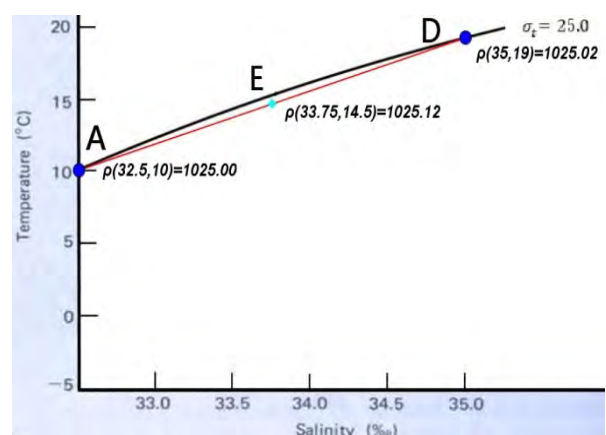
▲圖(7-1)崩湧發生與水團堆積流速圖

三、探討混合增密現象的影響

混和增密實驗裡，將兩鹽度及溫度條件不同但密度相近的水團混合以觀察下沉情形 (圖 7-3-1)。兩水團自然流出後，會在交接處混合 (圖 7-3-2)。此時，其溫度與鹽度將會趨於平均 ($\frac{\text{高鹽度}+\text{低鹽度}}{2}$, $\frac{\text{高溫}+\text{低溫}}{2}$)，但密度會較原兩水團的密度高 [參照名詞定義九、圖(4-2-3)]，造成水團下沉。通常於水團交界混合處出現一三角形的紫色水團 (圖 7-5-3)，我們視其為混合增密現象。不過混合增密僅發生於密度極相近的兩水團，我們利用函數計算，當密度差太大，則混合後密度會介於兩者之間，密度度增加，以 Geogebra 製成下三圖。



▲左上圖(7-2-1)為增密較少狀況

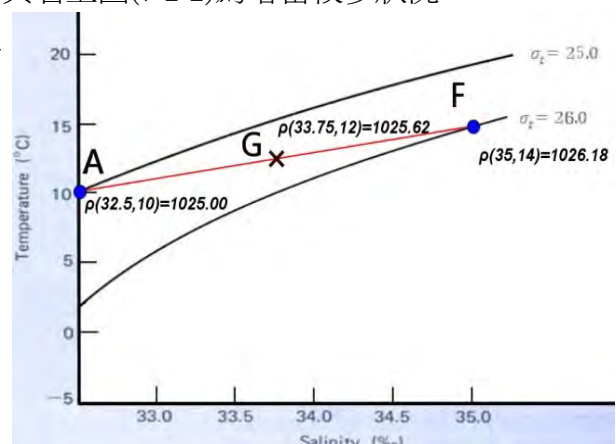


與右上圖(7-2-2)為增密較多狀況

左上圖中，由 A 點和 B 點平均溫度與鹽度的 C 點位於 \overline{AB} 上，且低於 $\sigma_T = 25.0$ 的函數圖形，代表密度 $> 1025\text{kg/m}^3$ 。

而右上圖的 E 點位於 \overline{AD} 上，但因 \widehat{AD} 的弧度較 \widehat{AB} 大，因此 E 點與 $\sigma_T = 25.0$ 的距離較 C 點長，故密度增加較多。

右圖則為混合增密不發生的狀況，若兩點 A 與 F 不位於相近的密度函數線上，則 G 點會位於 $\sigma_T = 25.0$ 與 $\sigma_T = 26.0$ 之間。



▲圖(7-2-3)混合後無增密現象



▲圖(7-3-1)混合增密示意圖 1 ▲圖(7-3-2) 混合增密示意圖 2 ▲圖(7-3-3) 混合增密示意圖 3

四、綜合鹽度、溫度因素模擬洋流於海中流動的情形

在綜合模擬實驗中，鹽度穩定不易變化，因此其主要影響海層的分布，而溫度所影響的層面主要為洋流表層和中層的移動。表層熱水主要依循高溫往低溫流動，但底層的冷水流動則相反。在中層的洋流移動也是從高溫移動至低溫處，由此可見高溫流動的影響範圍可至中層一帶。洋流的運動不只僅限於同一層或鉛直海層交替，是多方向多種流動且因溫度鹽度變化隨時改變。且中層介於上下溫層接觸帶，溫度變化大，其流動也較其他層有更多變化。

捌、結論

- 一、溫度差主要影響不同緯度間的水平橫向運動，鹽度差主要影響不同海層的鉛直交替運動。
- 二、溫度差或鹽度差增加使密度差增加，則其水平及鉛直流速加快。
- 三、混合增密由兩密度相近的水團混合產生，但若密度相差超過限度則不發生。
- 四、由於溫度分布變化較大，而溫度差對海洋流動貢獻較多；但混合增密中，鹽度影響較大。

玖、未來展望

實驗中，我們將流速計算分成垂直分項與水平分項，並取一固定時間加以分段測量，如此便能清楚觀察其流速在各階段的變化。而在未來，我們希望做出更多的延伸，模擬更多海洋中洋流的現象及改善變因控制的方法，例如使用致冷晶片加熱海水，使其能更方便有效且穩定的加熱。而後我們期望能加入模擬湧升流的流動對於海面溫度與氣壓氣流所造成的影響，並深入探討聖嬰現象與海洋洋流之間的關係與變化，及討論其他相關因素如深度等影響密度流的狀況，建立一套更完整的海洋密度流的流動模型。

拾、參考資料

- 1.呂特根、塔布克等(2012)。《觀念地科 3:海洋 大氣》。天下文化。
2. Thurman, H. V. (1993) "Essentials of Oceanography", 4th ed.。
- 3.洋流。取自維基百科 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B4%8B%E6%B5%81>
- 4.海洋教育網。取自國立台灣海洋大學 http://sea.ntou.edu.tw/01oceanandme/oceanandme02_02.php

【評語】 030510

1. 能以影像詳實記錄實驗結果，有助於了解現象發生的過程。
2. 若能在書面及口頭報告呈現上，進一步聚焦，將更為理想。