

中華民國第 62 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

第三名

051807

「鹽」上雙擴散 - 雙擴散對流及鹽手指現象

學校名稱：國立屏東高級中學

作者： 高二 許峰翌 高二 林軒毅	指導老師： 吳家禎
-------------------------	--------------

關鍵詞：鹽手指、雙擴散對流、直布羅陀海峽密度流

摘要

在雙擴散的研究範圍，都只看到物理理論的研究，卻少有研究利用實驗來驗證。因此，我們以過錳酸鉀（ KMnO_4 ）當成可追蹤的染劑，將它水平或垂直緩慢倒入一個上、下層有不同梯度的水域中時，首先發現了鹽手指的產生，此現象為雙擴散對流的一種，再來確定了只有一梯度差時不會有鹽手指後，聚焦在不同（溫度、濃度）梯度差時，對鹽手指的圖形、擴散速率以及擴散分層深度的影響。接著我們深入探討海洋學中的溫鹽環流，以水泥製作海底地形，來模擬直布羅陀海峽的雙擴散對流，探討高溫、高濃度的地中海海水，流入較低溫、低濃度的大西洋海水時的擴散速率以及擴散圖形並模擬冷流與暖流的雙擴散現象，希望對「雙擴散現象」有更深的了解。

壹、前言

一、研究動機：

偶然一次在網路上看到關於咖啡分層的報導，這份報導引起了我們的好奇心，為什麼有些人的拿鐵有著漂亮的多層分層，而有些人卻只有兩層分層呢？在深入探討後，我們看到一個名詞「雙擴散對流」，於是想用不同溶液的溫度差異和鹽度差異的擴散情形著手研究。在研究的途中，我們發現了名為「鹽指(salt finger)」的有趣現象，當溫度的擴散速率遠大於鹽度的擴散速率，此時的擴散現象極度不穩定，兩溶液會產生凹凸不平形狀酷似手指的交界面，這種現象可以在海水中觀察到。我們將其中一項溶液染色並觀察雙擴散對流的分層與鹽手指的產生，並使用 tracker 分析，模擬此現象在海洋中的擴散情況。

二、研究目的：

- (一)、鹽手指現象（染劑由上往下擴散）
- (二)、在低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流（低溫染劑從側面由下往上擴散）
- (三)、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流（高溫染劑從側面由上往下擴散）
- (四)、研究雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式（模擬地中海與大西洋之間的溫鹽流）

三、文獻回顧

(一)、雙擴散對流原理介紹

雙擴散對流是由溫度和濃度兩種不同的梯度在重力所形成的浮力作用下產生的對流現象。拿鐵中咖啡和牛奶的分層就是雙擴散對流的例子。

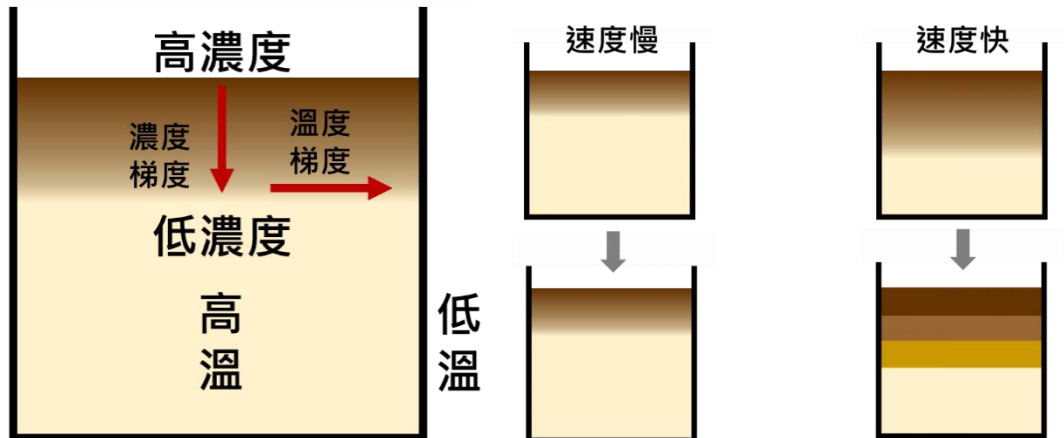


圖 1-3-1 咖啡和牛奶的雙擴散對流，倒入速度會影響分層的多寡

科學家 Turner (1965) 利用實驗，分析出由溫度差異以及濃度差異造成的相對雙擴散速率。即當二種液體的密度差異為 $0.15g/cm^3$ 的情況之下，濃度梯度與溫度梯度的擴散速率公式為 $R_p = \beta\Delta S/\alpha\Delta T$

R_p 為擴散速率， α 液體溫度擴散係數， β 液體濃度擴散係數
 ΔS 為濃度差， ΔT 為溫度差。

(二)、鹽手指現象

在海洋中，上層的海水由於陽光因素，造成相較於下層海水來的高溫高濃度，在濃度和溫度尚未擴散前，此時的海洋會有兩層的分層，開始擴散後，由於溫度的擴散速率遠大於濃度擴散速率，導致溫度已平衡可是濃度差還是極大的不穩定情況，會使得上層這些較重的海水向下沉，此時得交界面上會產生凹凸不平的樣貌，這現象被稱為鹽指(salt finger)，是一種小尺度的混合作用。由於鹽指的溫度可以很快跟周圍達到熱平衡，比鹽度的混合迅速，這些下沉的海水密度會繼續提高，鹽指也就繼續往下伸展，同時也將下層海水置換到上層，達到混合兩層海水的作用。

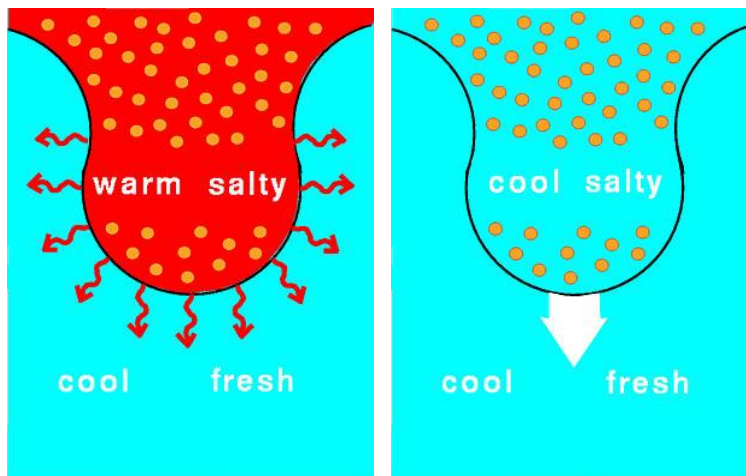


圖 1-3-2 鹽手指的形成原理

(三)、雙擴散在海洋物理學裡面的應用

雙擴散對流是能讓海洋能夠穩定分層的重要機制，海水的溫度和鹽度等狀態參數的分布和變化，並不像常規調查結果所顯示的那樣光滑而連續，例如：通過直布羅陀海峽流入大西洋的高溫、高鹽的地中海水與低溫、低鹽的大西洋深層水上下疊置時，溫度和鹽度的層結呈現階梯狀的結構。其中，自 1200~1800 米的深度內，約有 20 個溫度和鹽度的階梯分布；在低溫、低鹽的北冰洋水與來自大西洋的高溫、高鹽水上下疊置時，大約自深度為 220~340 米之間有 34 個溫度鉛直躍變的階梯。南極威德爾海的溫度和鹽度的鉛直分布也呈現階梯狀結構。

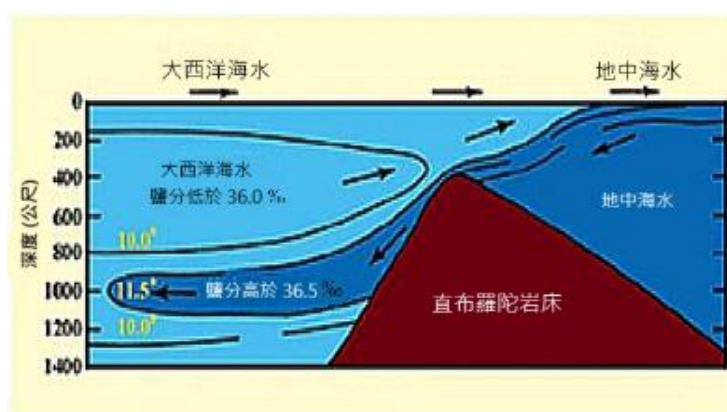


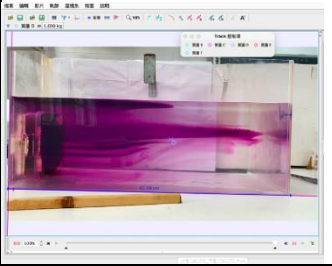





圖 1-3-3 地中海海水流入大西洋海水中形成的雙擴散對流

貳、研究設備及器材

一、實驗器材

過錳酸鉀冰塊	方形保鮮盒	Tracker 追蹤軟體
		
自製壓克力箱	自製水泥塊	聚光燈和自製柔光罩
		

二、實驗裝置圖



圖 2-2-1 實驗一裝置圖

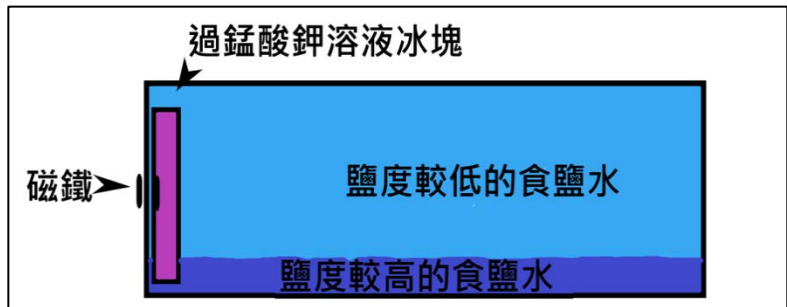


圖 2-2-2 實驗二示意圖

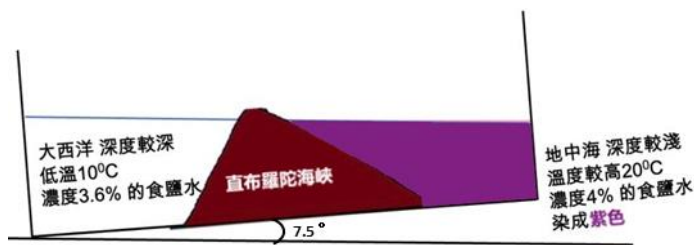


圖 2-2-3 實驗三示意圖



圖 2-2-4 實驗三裝置圖

參、研究過程或方法

一、實驗流程圖：

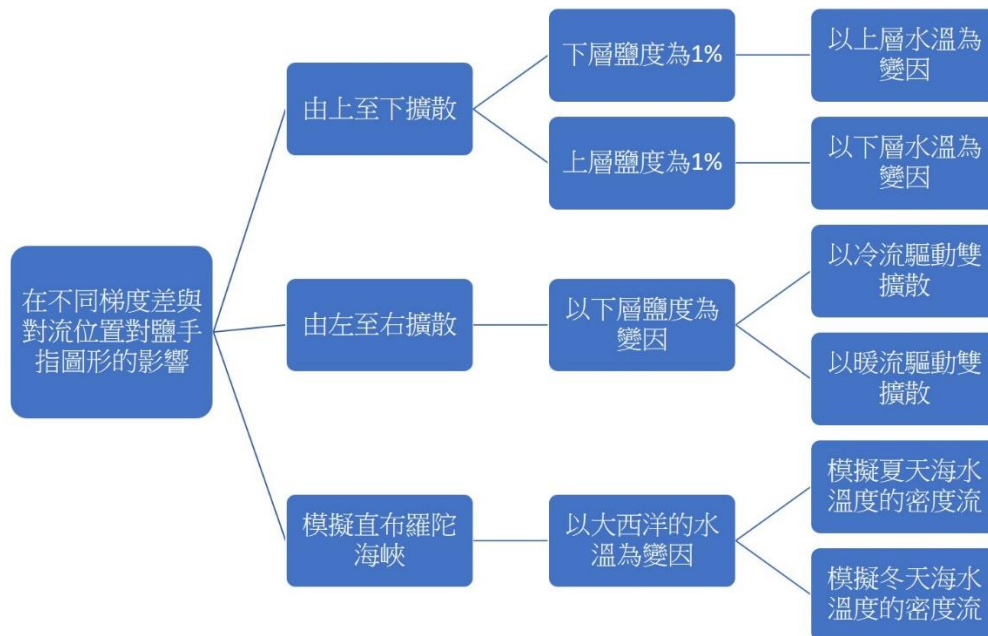


圖 3-1 實驗流程圖

二、實驗項目：

(一)、前置實驗：探討鹽手指所形成條件

1、上層為較高溫的純水，下層為較低溫的純水（只有溫差）

(1) 實驗變因：上層為常溫 27.5 °C 的純水，下層為 10 °C 的純水



圖 3-1-1 前置實驗（只有溫差）實驗設計示意圖

2、上層為純水，下層為濃度 3% 的食鹽水（只有鹽度差）

(1) 實驗變因：上層為 10 °C 的純水，下層為 10 °C 且濃度為 3% 的食鹽水



圖 3-1-2 前置實驗（只有鹽度差）實驗設計示意圖

(二)、探討鹽手指的雙擴散對流模式(過錳酸鉀由上往下擴散)

1、上層為較高溫的純水、下層為較低溫 10 °C 且濃度 1% 的食鹽水

(1) 操作變因：上層分別為溫度 20 °C、30 °C、40 °C 的純水

(2) 控制變因：下層為水溫 10 °C 且濃度 1% 的食鹽水



圖 3-2-1 第一類鹽手指實驗設計示意圖

(3) 實驗步驟：

A、步驟 1：將 10°C 濃度 1% 的鹽水加入容器中

B、步驟 2：將溫度較高的純水經由海綿加入 1% 鹽水中

C、步驟 3：蓋上蓋子並在蓋子上的縫隙放上海綿，並倒上染色過後的純水

D、步驟 4：觀察染色過後的純水在容器中的擴散現象並用 tracker 分析

2、上層為較高溫且濃度 1% 的食鹽水、下層為較低溫的純水

(1) 操作變因：上層分別為溫度 20 °C、30 °C、40 °C 且濃度 1% 的食鹽水

(2) 控制變因：下層為水溫 10 °C 的純水

(3) 實驗步驟：

A、步驟 1：將 10°C 濃度 1% 的鹽水加入容器中

B、步驟 2：將溫度較高的純水經由海綿加入 1% 鹽水中

C、步驟3：蓋上蓋子並在蓋子上的縫隙放上海綿，並倒上染色過後的純水

D、步驟4：觀察染色過後的純水在容器中的擴散現象並用 tracker 分析



圖 3-2-2 第二類鹽手指實驗設計示意圖

(三)、探討由低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流模式(低溫過錳酸鉀從側面由下往上擴散)

1、上、下層不同濃度差異的實驗：

(1) 操作變因：下層分別為濃度 5%、10%、15% 且溫度皆為 10 °C 的食鹽水

(2) 控制變因：上層為濃度 1% 且溫度 15 °C 的食鹽水

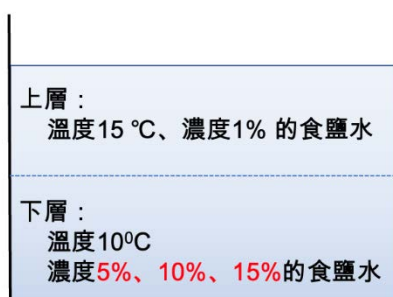


圖 3-3-1 改變上、下層濃度差異的實驗設計示意圖

(3) 實驗步驟：

A、步驟1：將 15 °C 濃度 1% 的鹽水加入容器中

B、步驟2：將 10 °C 具有濃度的鹽水沿水箱壁倒入

C、步驟3：放入染色冰塊

D、步驟4：觀察染色過後的低溫溶液在容器中的擴散現象並用 tracker 分析

(四)、探討高溫液體驅動的「溫度、濃度」的雙擴散對流模式（過錳酸鉀從側面由上往下擴散）

1、實驗條件：左側為溫度 10 °C 的純水，右側為溫度 20 °C 且濃度 0.5% 的食鹽水

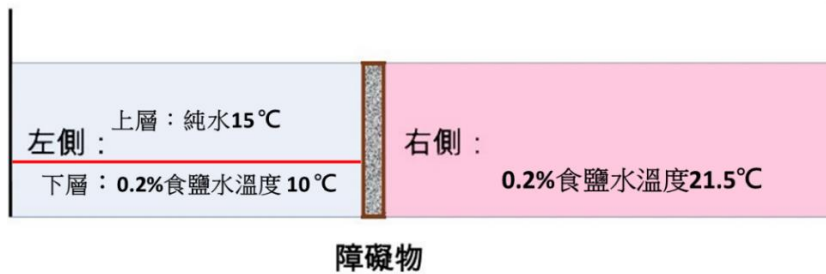


圖 3-4-1 右側高溫液體流向左側低溫區的實驗設計示意圖

2、實驗步驟：

- A、步驟 1：將溶液依上圖加入容器加至與障礙物等高。
- B、步驟 2：緩慢加入右側溶液使高度增加至恰好淹過左側。
- C、步驟 3：觀察溶液的對流現象並用 tracker 分析數據。

(五)、探討雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式(模擬地中海與大西洋之間的密度流)

1、模擬夏天海水溫度的密度流：

- (1) 操作變因：左側區域為純水上層 30 °C 與下層 20 °C
- (2) 控制變因：右側區域為溫度 20 °C 且濃度為 0.5% 的食鹽水

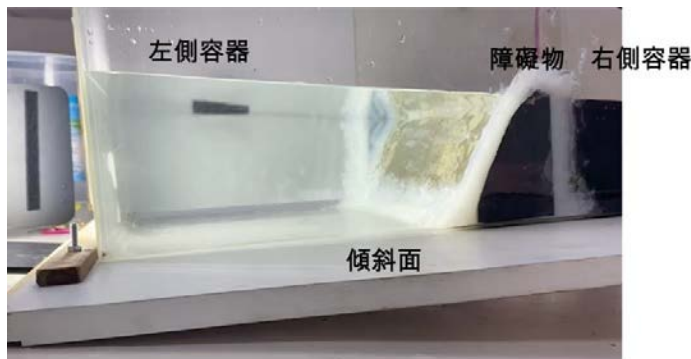


圖 3-5-1 擴散對流遇到障礙物時的實驗裝置圖

(3) 實驗步驟：

- A、步驟 1：將溶液依上圖加入容器加至與障礙物等高。
- B、步驟 2：緩慢加入右側溶液使高度增加至恰好淹過左側。
- C、步驟 3：觀察溶液的對流現象並用 tracker 分析數據。

2、模擬冬天海水溫度的密度流：

- (1) 操作變因：左側區域為純水上層 20 °C 與下層 10 °C (模擬冬天海水溫度)
- (2) 控制變因：右側區域為溫度 20 °C 且濃度為 0.5% 的食鹽水

肆、研究結果

一、前置實驗

(一)、探討鹽手指所形成條件

1、上層為較高溫的純水，下層為較低溫的純水（只有溫差）

(1) 實驗變因：上層為常溫 27.5 °C 的純水，下層為 10 °C 的純水

A、實驗觀察：



圖 4-1-1-1-1 只有溫差的染料擴散

2、上層為純水，下層為濃度 3% 的食鹽水（只有鹽度差）

(1) 實驗變因：上層為 10 °C 的純水，下層為 10 °C 且濃度為 3% 的食鹽水

A、實驗觀察：

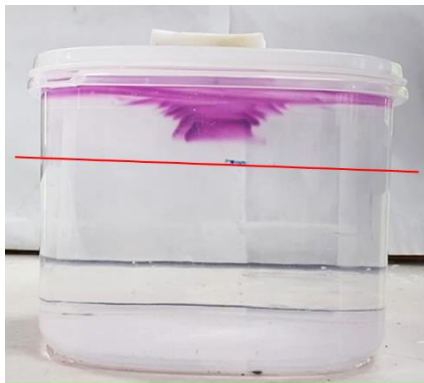


圖 4-1-1-1-2 只有鹽度差的染料擴散

3、綜合比較：藉由上面兩個前置實驗可以說明在只有一種梯度差的情況下無法產生鹽手指現象。另外，由於溫度的擴散速率遠大於鹽度的擴散速率，因此相較於只有鹽度差的染劑擴散，只有溫度差的染劑擴散更容易到達底部。

二、鹽手指現象

(一)、探討鹽手指的雙擴散對流模式 (過錳酸鉀由上往下擴散)

1、上層為較高溫度的純水、下層皆為低溫 10 °C 且濃度 1% 的食鹽水

(1)、實驗條件：上層為溫度 20 °C 的純水

A、實驗觀察：



圖 4-2-1-1-1 鹽手指現象。上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張

B、分層界面：

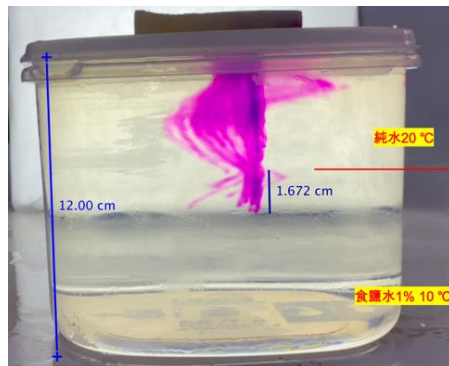


圖 4-2-1-1-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現較明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 1.672cm。

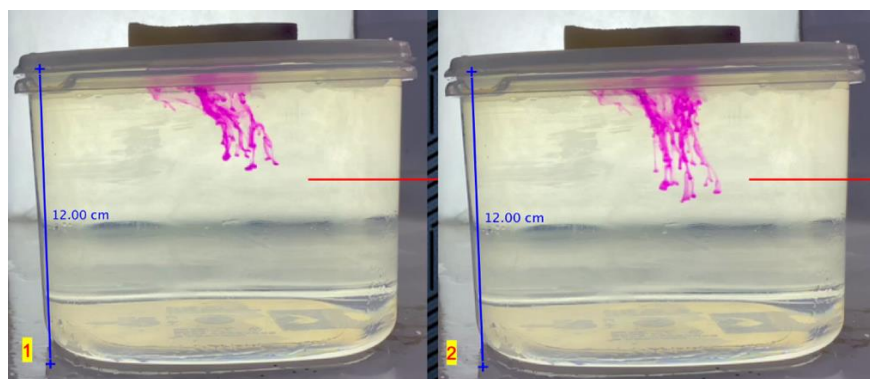


圖 4-2-1-1-3 在分界層位置時，較大的鹽手指分裂成更多更小的鹽手指

在分界層處，出現鹽手指一分為二或一分為三的分裂現象。

C、鹽手指擴散速度分析：

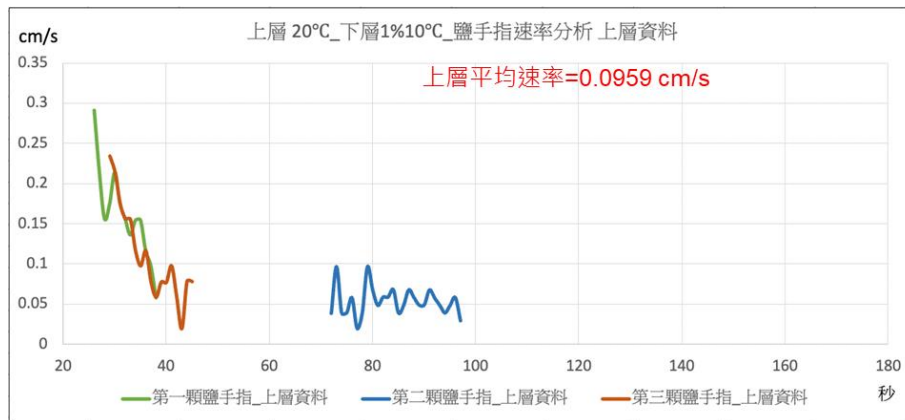


圖 4-2-1-1-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

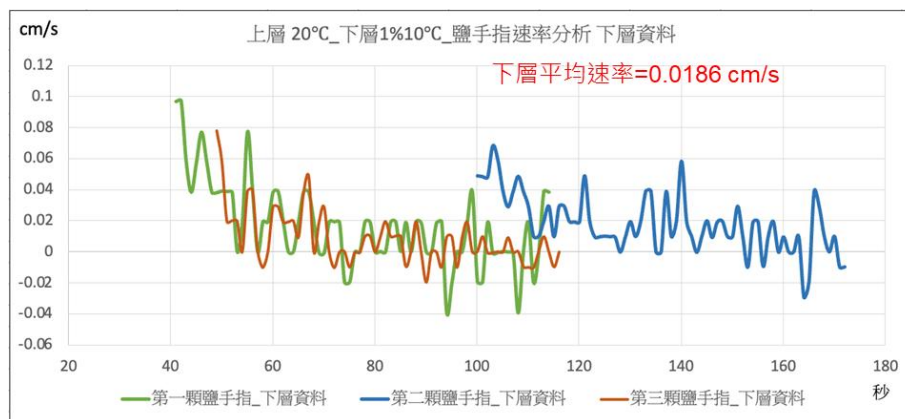


圖 4-2-1-1-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.0959cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.0186cm/s，下層/上層的擴散速率比值約為 19.43%。

(2)、實驗條件：上層為溫度 30 °C 的純水

A、實驗觀察：



圖 4-2-1-2-1 鹽手指現象，上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張。

B、分層界面：

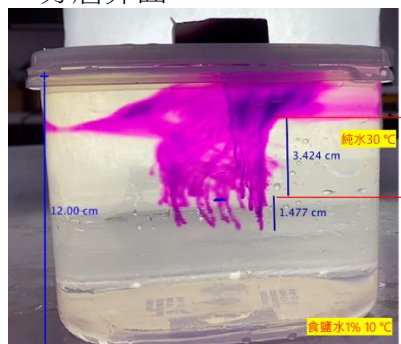


圖 4-2-1-2-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現較明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 1.477cm。

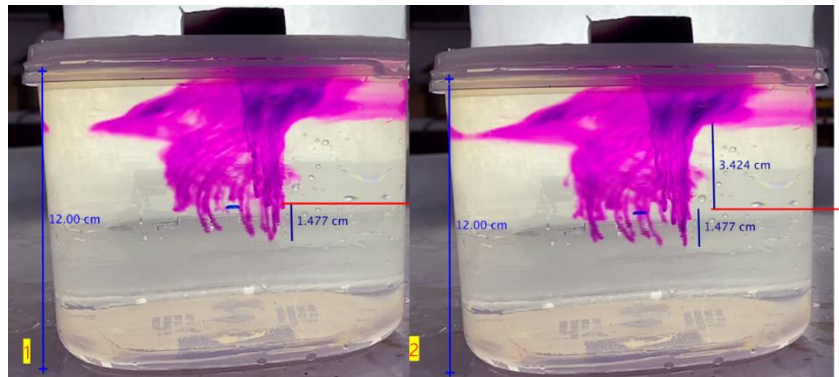


圖 4-2-1-2-3 可見鹽手指在交界面上旋轉

在分界層處，出現鹽手指一分為二或一分為三的分裂現象。

C、鹽手指擴散速度分析：

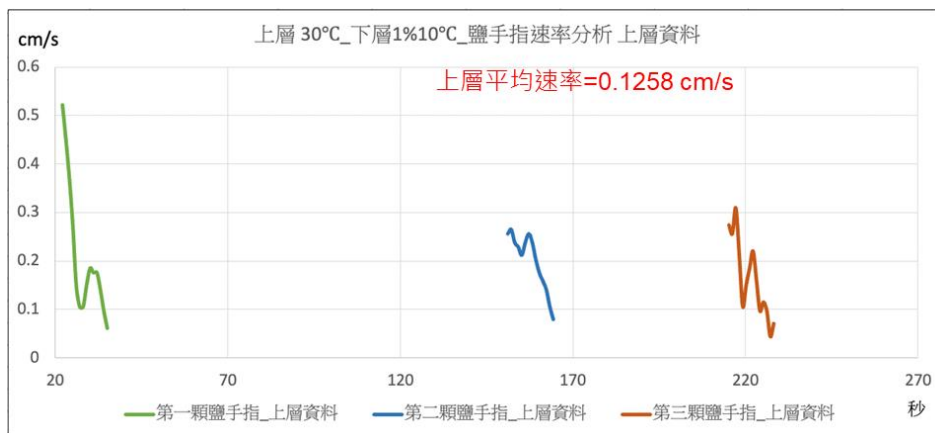


圖 4-2-1-2-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

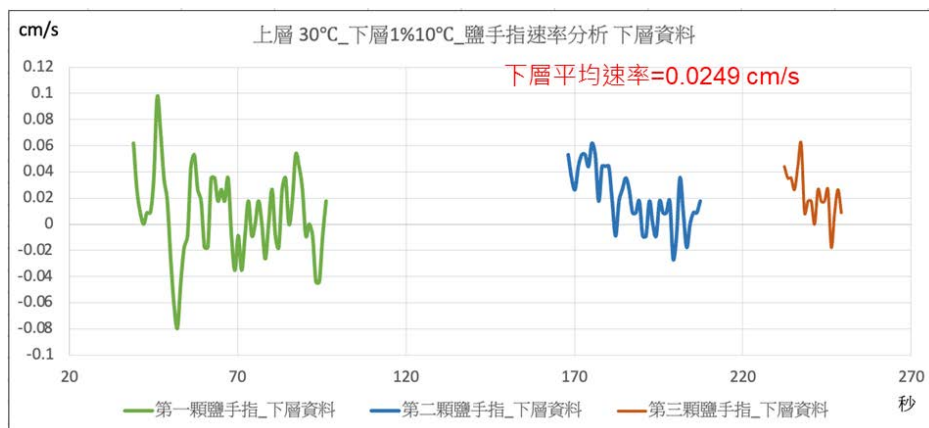


圖 4-2-1-2-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.1258cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.0249cm/s，

下層/上層的擴散速率比值約為 19.79%。

(3)、實驗條件：上層為溫度 40 °C 的純水

A、實驗觀察：



圖 4-2-1-3-1 鹽手指現象，上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張

B、分層界面：

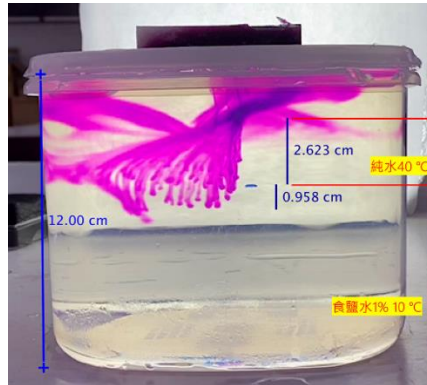


圖 4-2-1-3-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現比上層 30°C 更為明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 0.958cm。

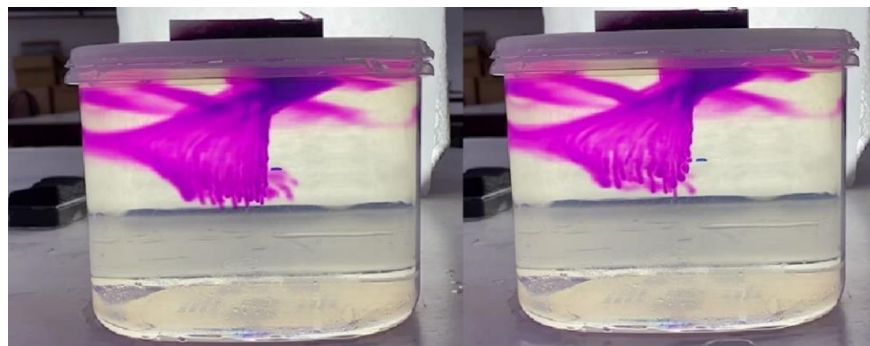


圖 4-2-1-3-3 在交界面以下有明顯的鹽手指現象

C、鹽手指擴散速度分析：

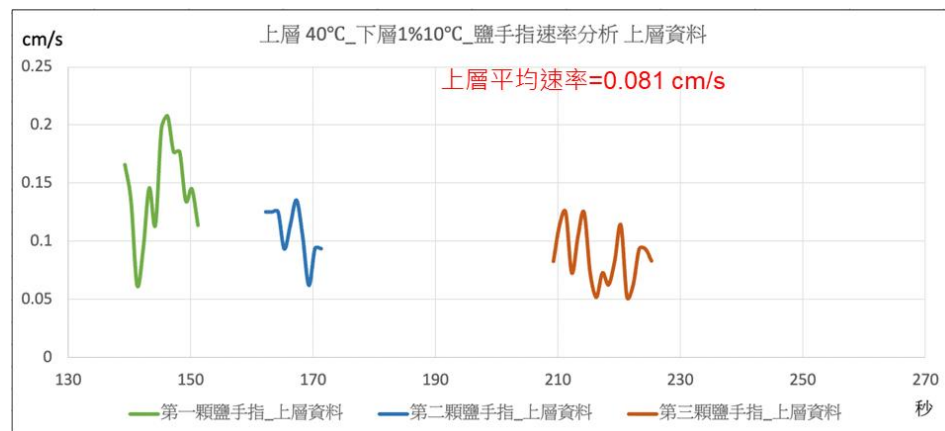


圖 4-2-1-3-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

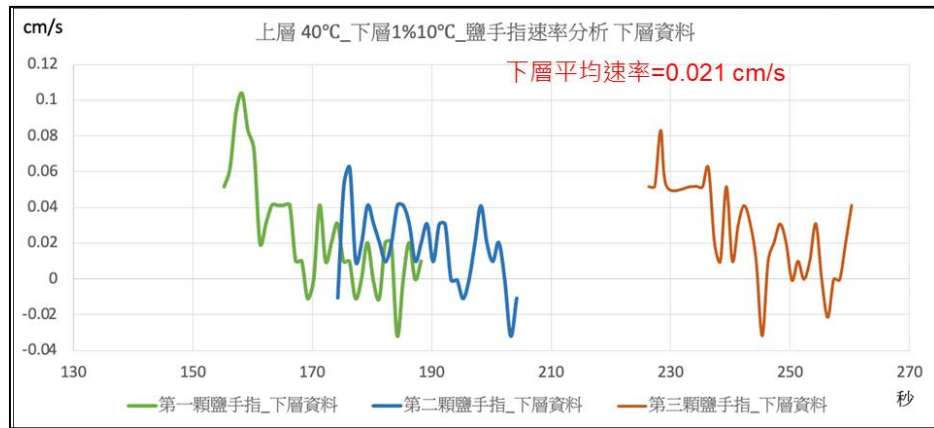


圖 4-2-1-3-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.081cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.021cm/s，
下層/上層的擴散速率比值約為 26.14%。

(4)、綜合比較：上層為較高溫的純水時，與下層的溫差越大，上下擴散速率較小，橫向水平擴散速率較大，且鹽手指在介面分層下擴散距離愈短。

2、上層為較高溫且濃度 1% 的食鹽水、下層為較低溫 10 °C 的純水

(1)、實驗條件：上層為溫度 20 °C 且濃度 1% 的食鹽水

A、實驗觀察：

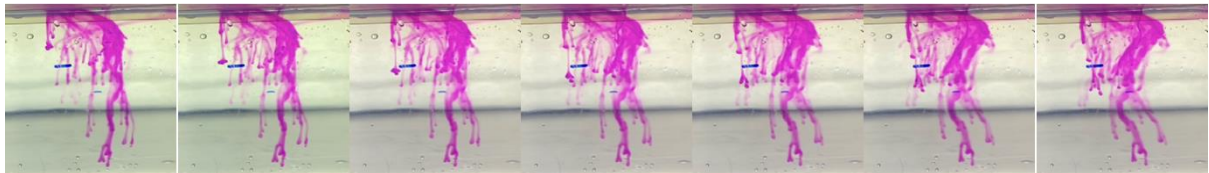


圖 4-2-2-1-1 鹽手指現象。上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張

B、分層界面：

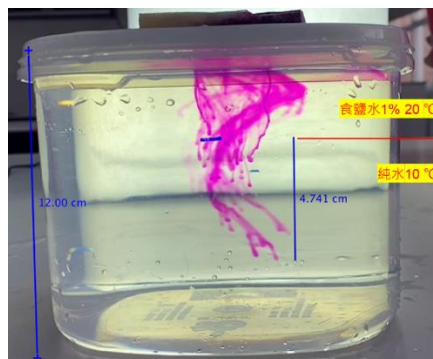


圖 4-2-2-1-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現較明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 4.741cm。

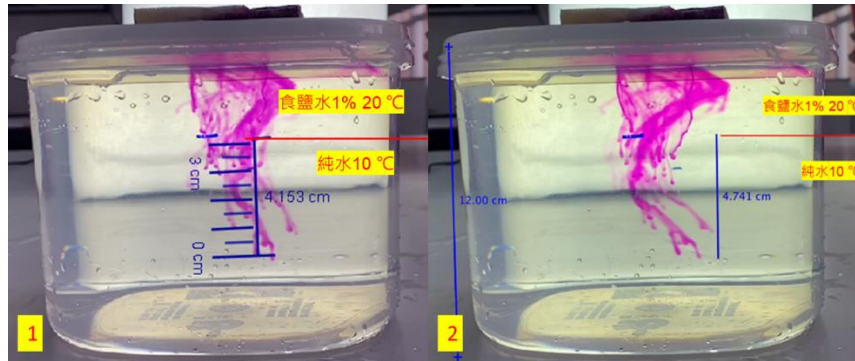


圖 4-2-2-1-3 在分界層位置時，較大的鹽手指分裂成更多更小的鹽手指

C、鹽手指擴散速度分析：

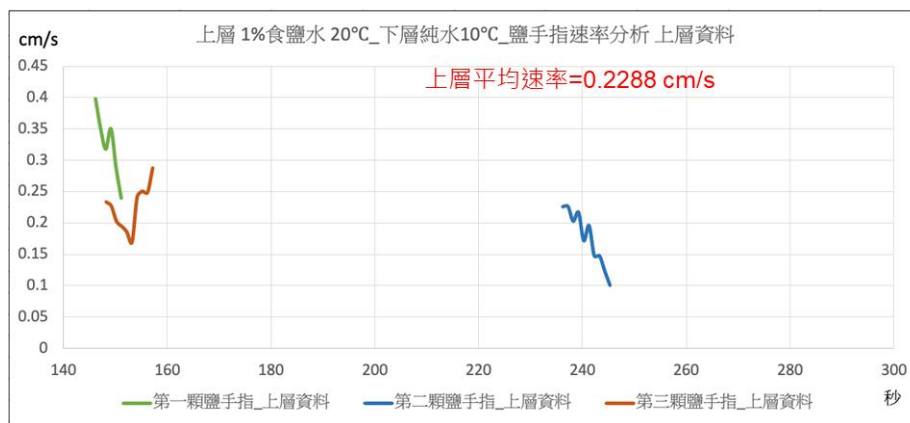


圖 4-2-2-1-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

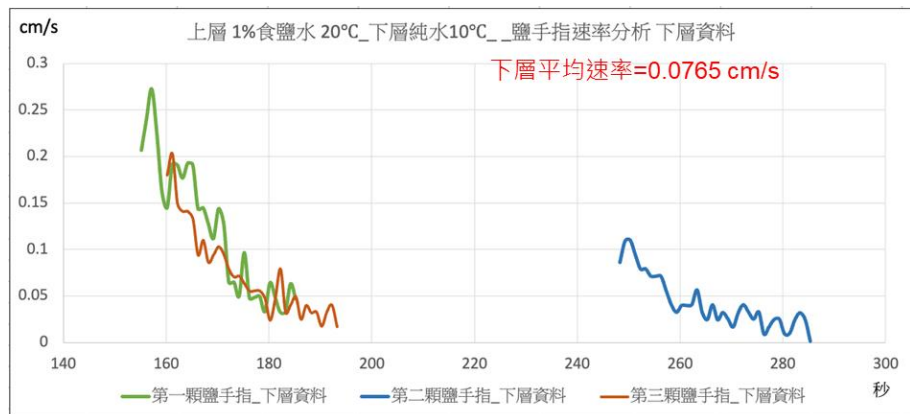


圖 4-2-2-1-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.2288cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.0765cm/s，
下層/上層的擴散速率比值約為 33.44%。

(2)、實驗條件：上層為溫度 30 °C 且濃度 1%的食鹽水

A、實驗觀察：

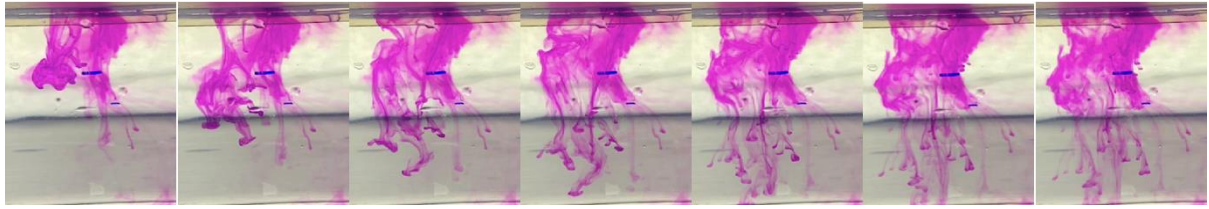


圖 4-2-2-1 鹽手指現象。上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張

B、分層界面：

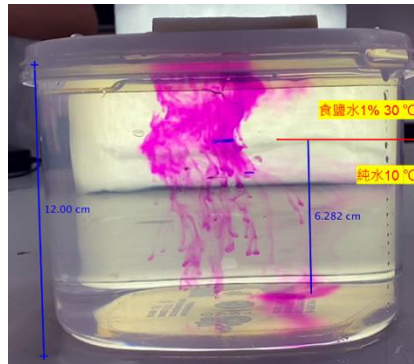


圖 4-2-2-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現較明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 6.282cm。

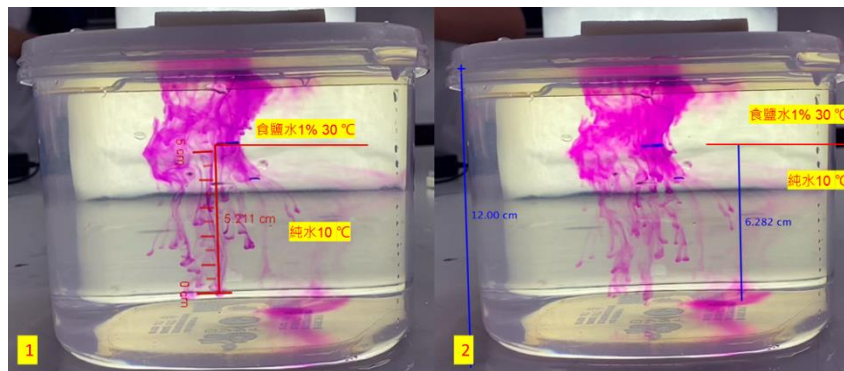


圖 4-2-2-3 在分界層位置時，較大的鹽手指分裂成更多更小的鹽手指

C、鹽手指擴散速度分析：

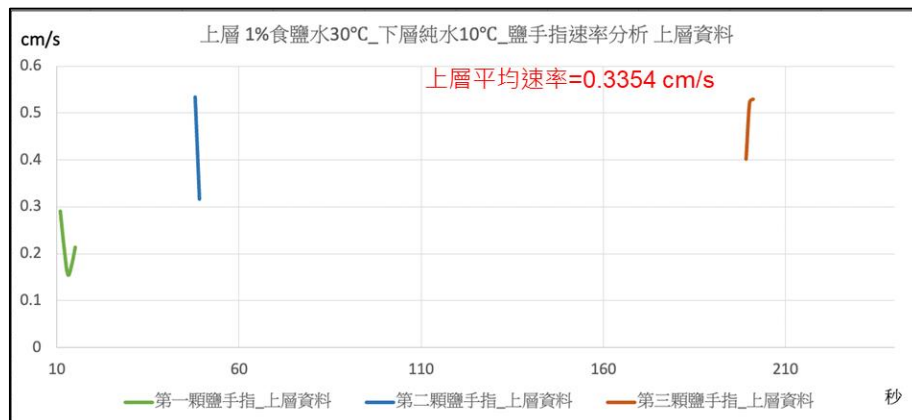


圖 4-2-2-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

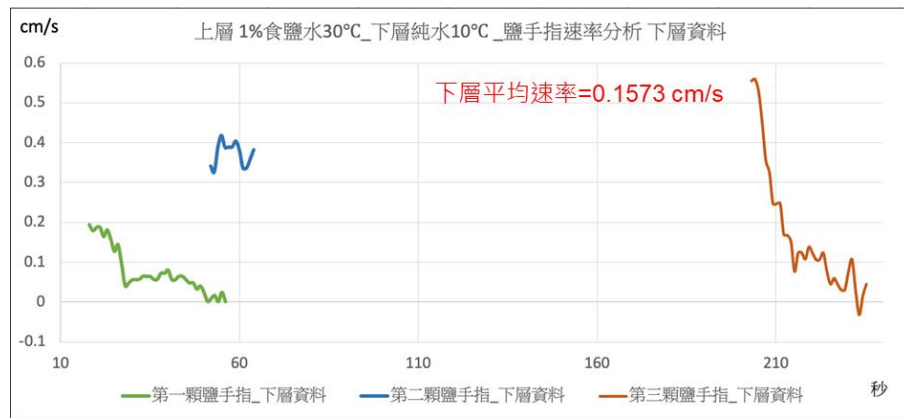


圖 4-2-2-2-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.3354 cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.1573cm/s，
下層/上層的擴散速率比值約為 46.89%。

(3)、實驗條件：上層為溫度 40 °C 且濃度 1% 的食鹽水

A、實驗觀察：

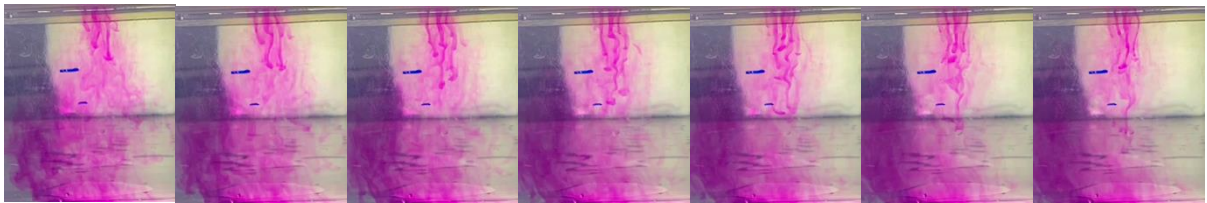


圖 4-2-2-3-1 鹽手指現象。上圖為從拍攝影片中前半段每 5 秒截圖一張

B、分層界面：

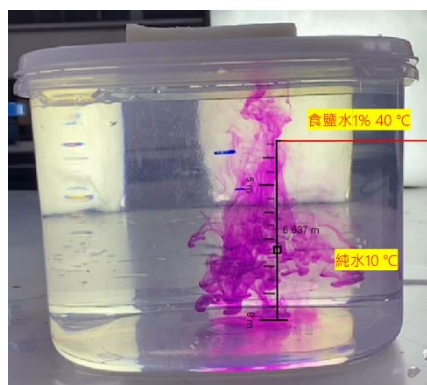


圖 4-2-2-3-2 後半段呈現停滯穩定狀態

在分界層上方出現較明顯的水流旋轉現象。鹽手指最低到分界層下方 6.637cm。

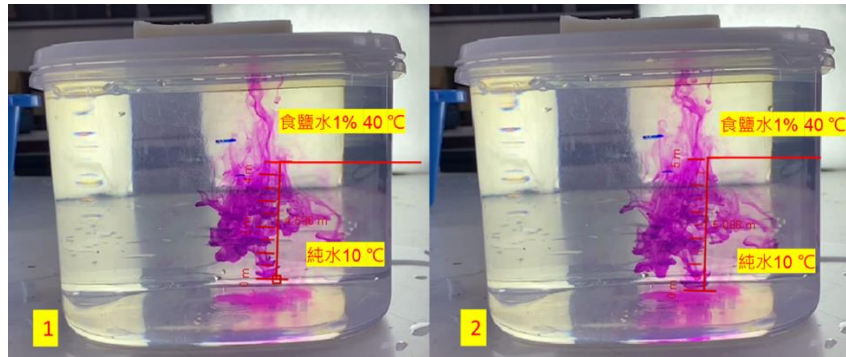


圖 4-2-2-3-3 在分界層位置時，較大的鹽手指分裂成更多更小的鹽手指。

C、鹽手指擴散速度分析：

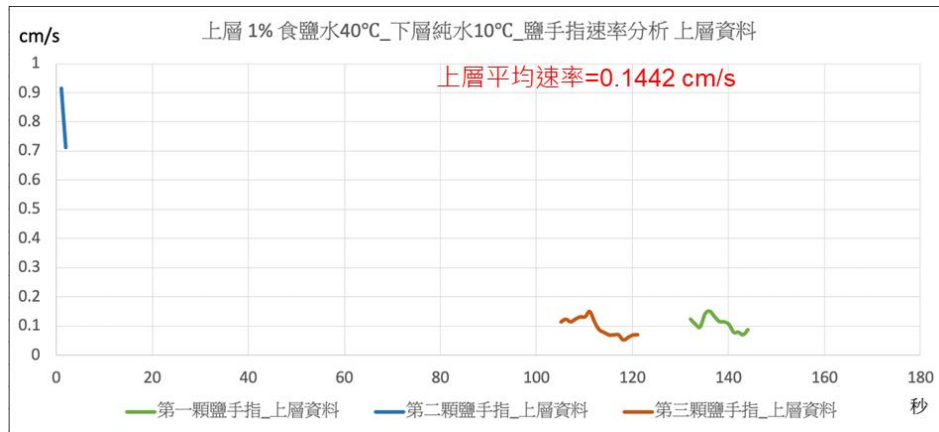


圖 4-2-2-3-4 在分界層上層的鹽手指下降速率

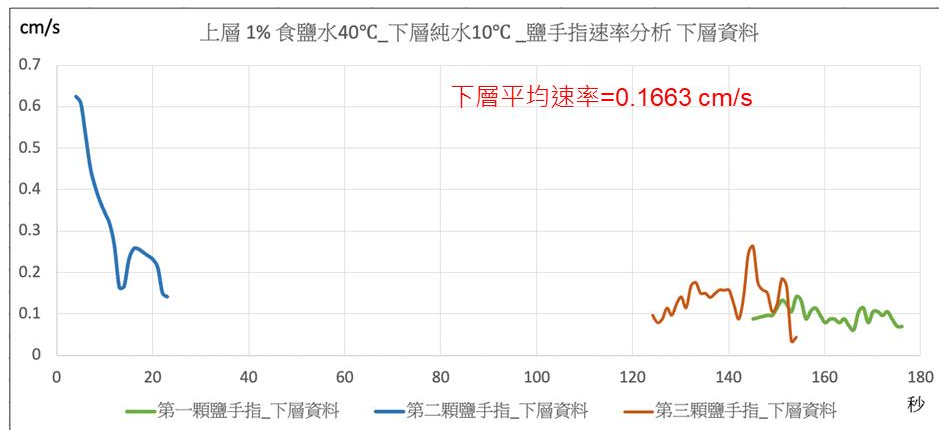


圖 4-2-2-3-5 在分界層下層的鹽手指下降速率

上層的鹽手指下降速率為 0.1442cm/s，下層的鹽手指下降速率為 0.1663cm/s，
下層/上層的擴散速率比值約為 115.33%。

(4)、綜合比較：上層為較高溫的食鹽水時，與下層的溫差越大，上下擴散速率較大，橫向水平擴散速率也較大。

三、由低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流模式(低溫過錳酸鉀從側面由下往上擴散)

(一)、上、下層「不同濃度」差異的實驗：

1、實驗條件：上層為濃度 1%、15 °C 的食鹽水，下層為濃度 5%、10 °C 的食鹽水

(1)、實驗觀察：

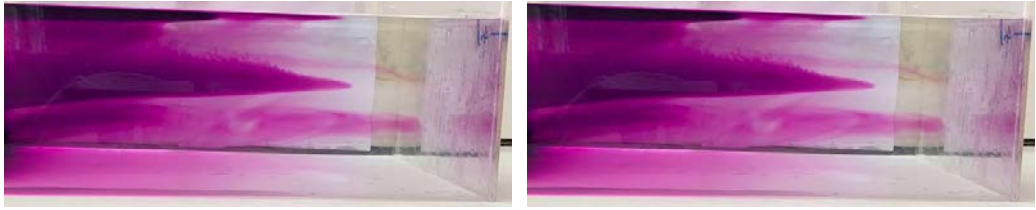


圖 4-3-1-1-1 濃度差 4%，橫向分層擴散與縱向擴散截圖，兩張圖間隔 50 秒。

(2)、擴散速度分析：



圖 4-3-1-1-2 C 點為鹽手指發生處

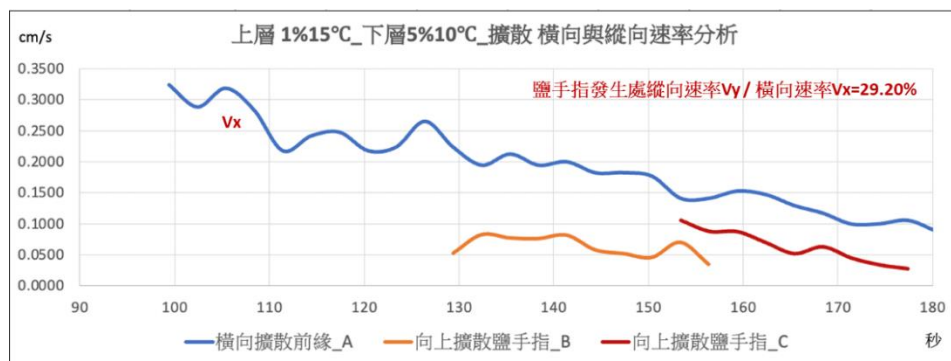


圖 5-3-1-1-3 為鹽手指發生處橫向及縱向速率比

經過 Tracker 追蹤計算，鹽手指發生處橫向及縱向速率比約為 29.20%。

2、實驗條件：上層為濃度 1%、15 °C 的食鹽水，下層為濃度 10%、10 °C 的食鹽水

(1)、實驗觀察：

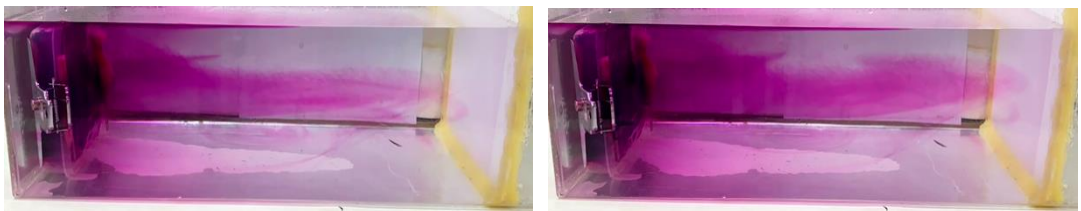


圖 4-3-1-2-1 濃度差 9%，橫向分層擴散與縱向擴散截圖，兩張圖間隔 50 秒。

(2)、擴散速度分析：

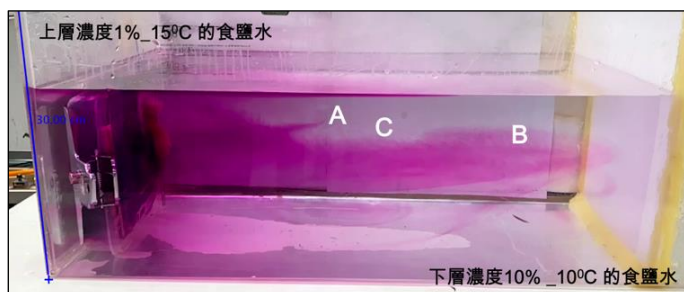


圖 4-3-1-2-C 點為鹽手指發生處

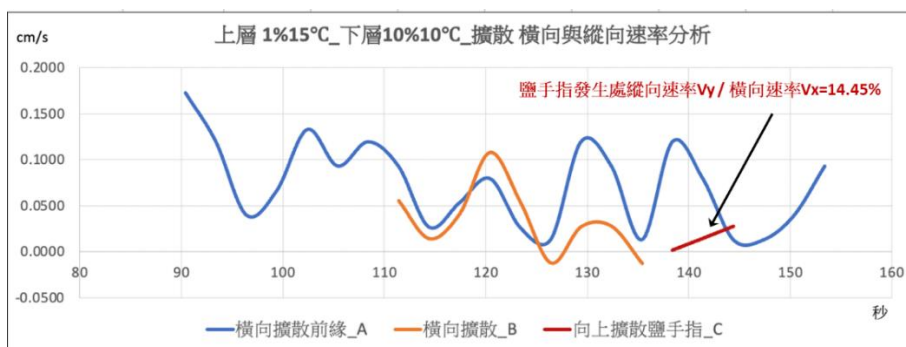


圖 4-3-1-2-3 為鹽手指發生處橫向及縱向速率比

經過 Tracker 追蹤計算，鹽手指發生處橫向及縱向速率比約為 14.45%。

3、實驗條件：上層為濃度 1%、15 °C 的食鹽水，下層為濃度 15%、10 °C 的食鹽水

(1)、實驗觀察：



圖 4-3-1-3-1 濃度差 14%，橫向分層擴散與縱向擴散截圖，兩張圖間隔 50 秒。

(2)、擴散速度分析：



圖 4-3-1-3-2C 點為鹽手指發生處

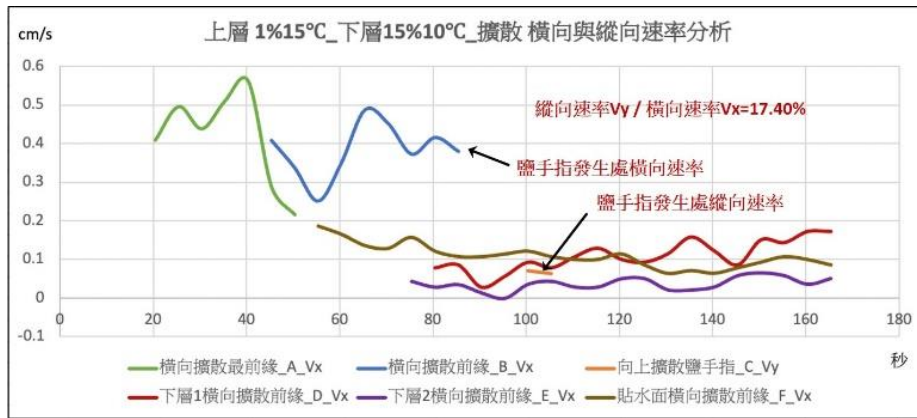


圖 4-3-1-3-3 為鹽手指發生處橫向及縱向速率比

經過 Tracker 追蹤計算，鹽手指發生處橫向及縱向速率比約為 17.4%。

4、實驗條件：上層為濃度 1%、15 °C 的食鹽水，下層為濃度 20%、10 °C 的食鹽水

(1)、實驗觀察：

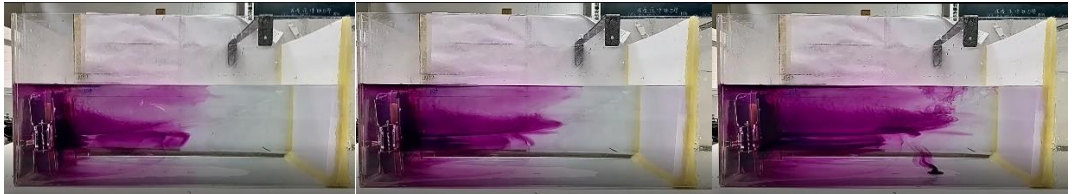


圖 4-3-1-4-1 濃度差 19%，橫向分層擴散與縱向擴散截圖，兩張圖間隔 50 秒。

(2)、擴散速度分析：

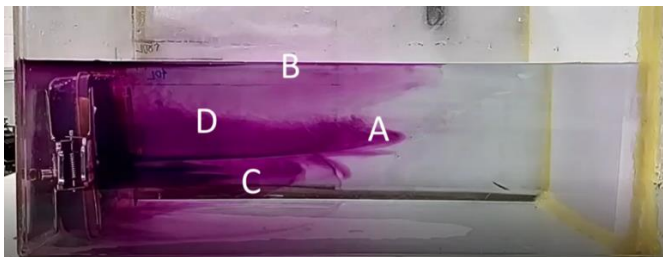


圖 4-3-1-4-2 C 點為鹽手指發生處

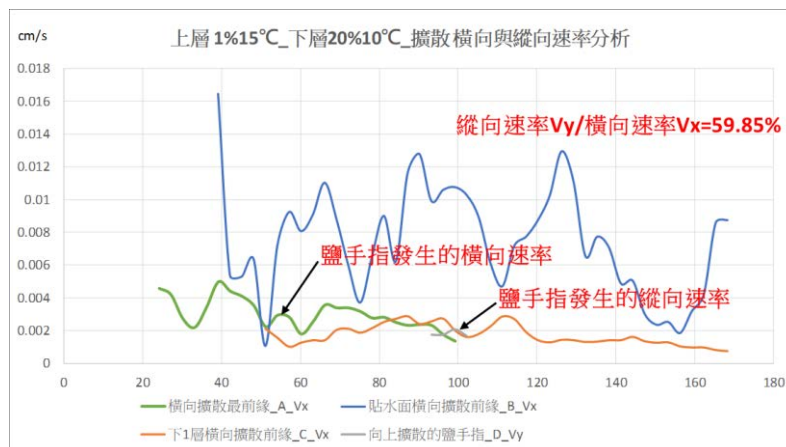


圖 4-3-1-4-3 為鹽手指發生處橫向及縱向速率比

經過 Tracker 追蹤計算，鹽手指發生處橫向及縱向速率比約為 59.85%。

5、綜合比較：由於風的影響因素，貼水面橫向擴散的速率不太穩定，橫向的雙擴散對流則因為水箱大小出現的水箱內波影響導致擴散速率呈現上下起伏的狀況。

四、探討高溫液體驅動的「溫度、濃度」的雙擴散對流模式（過錳酸鉀從側面由上往下擴散）

(一)、實驗條件如下圖：

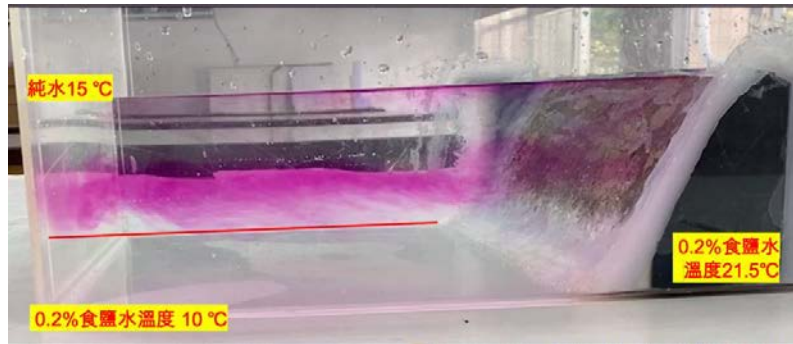


圖 4-4-1 右方為高溫區，流向左方低溫區

(二)、實驗觀察：



圖 4-4-2 擴散過程的攝影截圖

初期擴散：因為重力的關係，所以高溫液體先沿著障礙物往下沉。

中期擴散：高溫液體向下擴散時，遇到底部低溫區隨後反彈向上，呈現水平擴散。

後期擴散：水平擴散因容器大小限制，呈現停滯狀態，此時出現鹽手指往下擴散。

(三)、擴散速度分析：

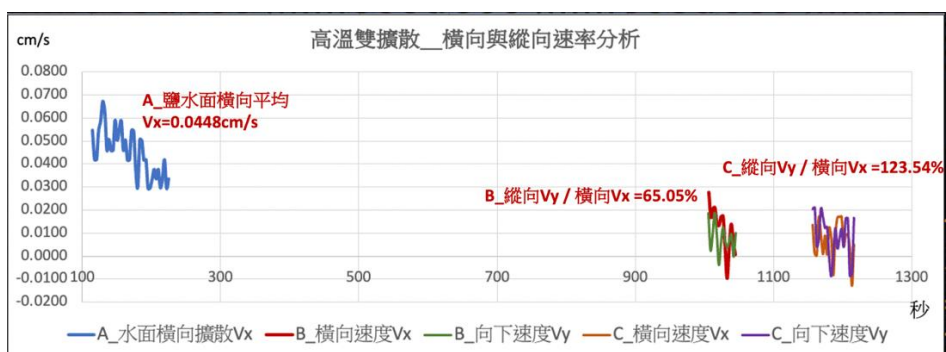


圖 4-4-3 高溫雙擴散速率分析

橫向擴散速度受水流流速影響，但鹽手指的垂直擴散效應出現在水流相對緩慢的時候，擴散效率相對較高。

五、探討雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式（模擬地中海與大西洋之間的溫鹽流）

（一）、模擬夏天海水溫度的密度流：

1、實驗觀察：



圖 4-5-1-1 擴散過程的攝影截圖

夏天表層水溫較高。當表層橫向擴散速度較大時，能量在垂直方向擴散不明顯，因此沒有觀察到鹽手指。等到橫向水流速度減緩時，就出現鹽手指，加速垂直方向上的擴散對流。

2、數據分析結果：

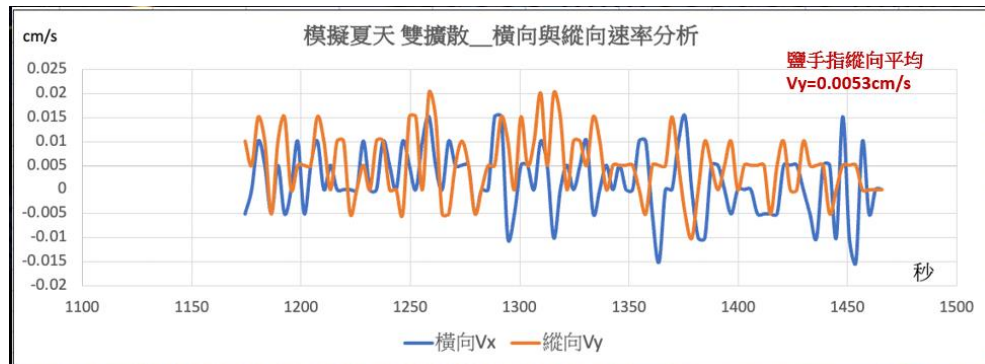


圖 4-5-1-2 夏天海水擴散速率分析

（二）、模擬冬天海水溫度的密度流：

1、實驗觀察：



圖 4-5-2-1 擴散過程的攝影截圖

冬天表層水溫較低。當低溫水流經過障礙物時，即迅速往下沉降，另有一小部分水流則沿著表面橫向擴散。等到底層橫向速度變慢時，出現些許的鹽手指往上擴散，表層水流則出現往下擴散的現象。

(三)、實驗結論：由上面的實驗觀察可以發現，在橫向速度相對較低的地方，鹽手指以及能量垂直交換的現象比較明顯。

伍、討論

一、結果討論

(一)、藉由前置實驗發現只有一個梯度差時無法產生鹽手指現象，且溫度的擴散速率遠大於鹽度的擴散速率，因此擴散深度也會較深

(二)、上層為較高溫的純水時，與下層低溫的食鹽水溫差越大，上下相對擴散速率比越大，且鹽手指在垂直擴散距離會愈短。

速率 cm/s	上層平均速率	下層平均速率	下層速率/上層速率
上層 20 °C 純水	0.0959	0.0186	19.40%
上層 30 °C 純水	0.1258	0.0249	19.79%
上層 40 °C 純水	0.081	0.021	25.93%

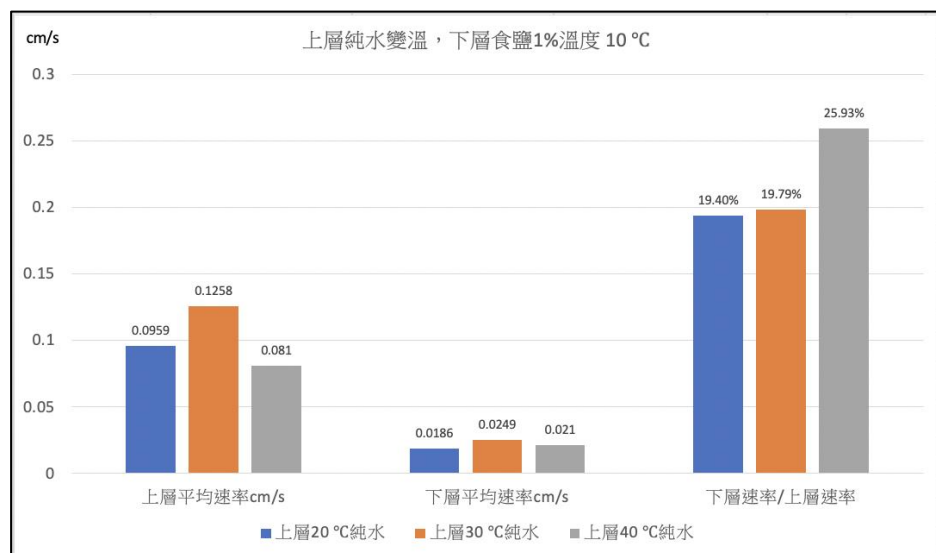


圖 5-2-1 實驗 2-1 的上、下層的擴散速率及擴散速率比

(三)、上層為較高溫的食鹽水時，與下層的純水溫差越大，上下相對擴散速率比越大，橫向水平擴散速率也較大，鹽手指在介面分層下的位置也越來越深。

速率 cm/s	上層平均速率	下層平均速率	下層速率/上層速率
食鹽水 1% + 20 °C	0.2288	0.0765	33.44%
食鹽水 1% + 30 °C	0.3354	0.1573	46.89%
食鹽水 1% + 40 °C	0.1442	0.1663	115.33%

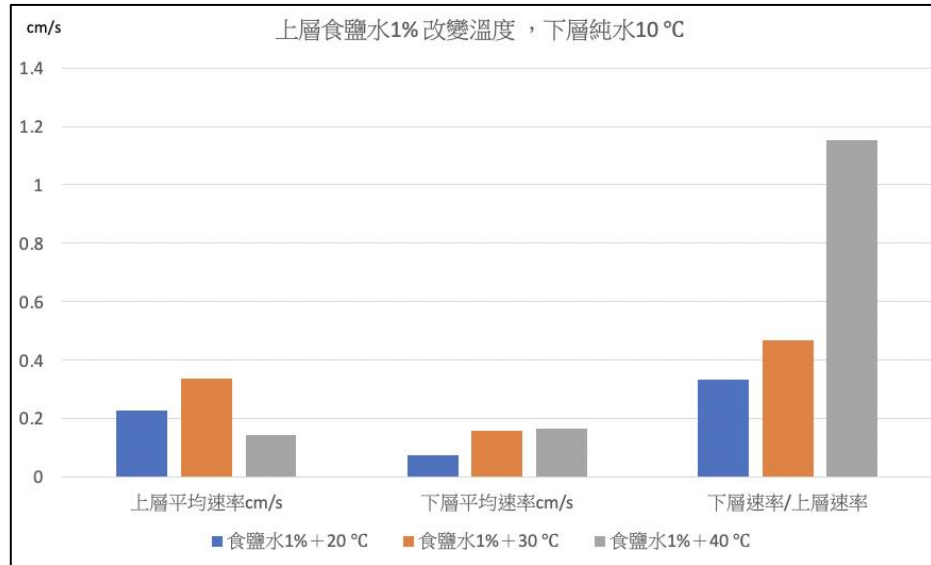


圖 5-3-1 實驗 2-2 的上、下層的擴散速率及擴散速率比

在此實驗 2-2 的下層擴散速率，遠比實驗 2-1 的下層擴散速率高大約八倍。

上、下層能量垂直交換的效率比較高。

(四)、在低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流實驗

上層皆為濃度 1% 溫度 15 °C	縱向速率 V_y / 橫向速率 V_x
下層濃度 5% 溫度 10 °C	29.20%
下層濃度 10% 溫度 10 °C	14.45%
下層濃度 15% 溫度 10 °C	17.40%
下層濃度 20% 溫度 10 °C	59.85%

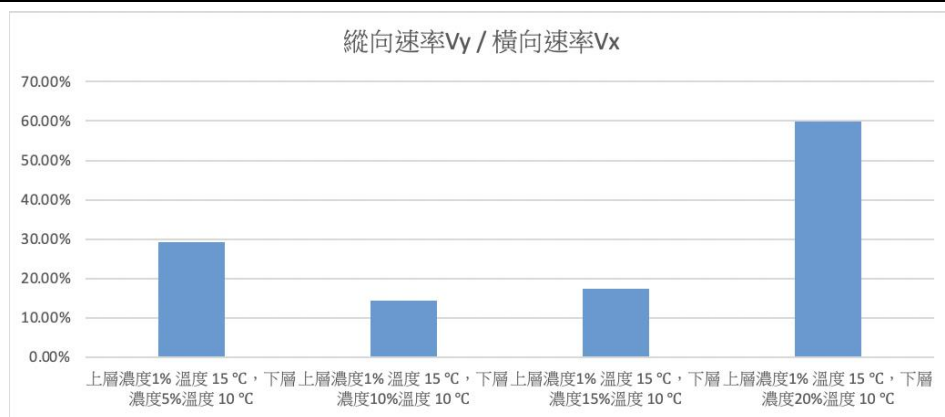


圖 5-4-1 實驗 2 的縱向與橫向擴散速率比

- (五)、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」的雙擴散對流實驗中，橫向擴散速度受水流流速影響，但鹽手指的垂直擴散效應出現在水流相對緩慢的時候，擴散效率以及上、下層能量垂直交換的效率比較高。
- (六)、由模擬直布羅陀海峽的密度流實驗可以發現，夏天時，在水流速度緩慢時，鹽手指以及能量垂直交換的現象比較明顯。冬天時，表面低溫海水往下沉降的速率較快。

二、實驗上的問題與可能改善方法

- (一)、在實驗二時我們無法控制加入染色溶液的速率，進而導致向下擴散速率太快而沒有鹽手指的現象產生。加高海綿使之流入的速率得到緩衝，且使用滴管少量多次的加入，減少誤差。
- (二)、在實驗三時我們加入冰塊時必須將手放入水中，這會導致水被擾動進而影響實驗，應使用比水位還高的冰塊，並使用磁鐵固定減少手造成的誤差。
- (三)、在實驗四時右側溶液會因表面張力的原因，水位會略高於表面張力，我們能試著在水泥上方塗清潔劑，消除面張力。
- (四)、在實驗四我們在調配左側溶液時，無法控制上層溶液加入的流速，應使用能產生固定流量的工具，並加上海綿減少擾動。
- (五)、實驗時，由於風的影響因素，貼水面橫向擴散的速率不太穩定，橫向的雙擴散對流則因為水箱大小出現的水箱內波影響導致擴散速率呈現上下起伏的狀況，因此實驗時，以擋風紙板遮住自然風，可以得到較穩定的結果。

三、未來可以研究的方向

- (一)、可以使用熱顯像儀觀察更細的溫度分布。
- (二)、可以藉由更大的容器以減少內波的產生，達到更精準的模擬數據。
- (三)、利用雙擴散對流來研究南極死亡冰柱的機制。

陸、結論

- 一、在只有一種梯度差的情況下無法產生鹽手指現象。
- 二、在上層為較高溫的純水時，與下層低溫食鹽水的實驗條件下，溫差越大，界面垂直擴散速率差異越明顯，且經過界面分層後，垂直擴散距離越短。
- 三、在上層為較高溫且濃度 1% 的食鹽水、下層為較低溫 10 °C 的純水的實驗條件下，溫差越大，界面垂直擴散速率差異越明顯。但垂直擴散速率遠比上層只是純水時，大約高 8 倍。由此可證明，鹽水的密度差異會增加垂直擴散速率。因此，死海在高溫的氣候條件下，水溫相對較高，大量蒸發後，鹽度變大，亦有利於垂直擴散，讓鹽類沉澱在海床上面。
- 四、在低溫液體驅動的雙擴散對流實驗中，濃度差異造成的縱向與橫向擴散速率，差異不明顯。
- 五、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」的雙擴散對流實驗中，但鹽手指的垂直擴散效應出現在水流相對緩慢的時候，亦即當流速變慢時，上、下層能量垂直交換的效率比較高。
- 六、由模擬直布羅陀海峽的密度流實驗發現，夏天高溫海水或暖流會在水流速度緩慢時，以鹽手指的方式進行垂直方向上的能量交換。而冬天低溫海水或涼流由於密度較大，不需要流速緩慢即可進行垂直方向上的能量交換。

柒、參考資料及其他

參、網路資源

一、中文部分

【單篇文章】

- (一)、鄧亦辰等 (2016 年) · 鹽糖證共—探討濃度及溫度對不穩定性雙擴散之影響—56 屆國中組地球科學科展 · 取自 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/56/pdf/051803.pdf>
- (二)、趙倩,趙進平(2011) · 加拿大海盆雙擴散階梯結構分布與熱通量研究 · 地球科學進展, 第 26 卷, 第 2 期 · 取自 <https://reurl.cc/6E4KEM>

【單篇文章, 無作者】

- (一)、海洋細微結構 · 百科知識 · 取自 <https://reurl.cc/WkY0rD>

【雜誌文章, 無作者】

- (一)、咖啡中的流體力學 (2018 年 1 月 23 日) · CASE 報科學 · 取自 <https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=30164>

二、英文部分

【單篇文章】

- (一)、University of Toronto · *Environmental Fluid Dynamics* from <https://www.uts.utoronto.ca/labs/efd/lab/>
- (二)、Herbert, E. H., Turner, J. S. (1981). *Double-diffusive convection*: J. Fluid Me&. (1981), vol. 106, pp. 299-329.
- (三)、TURNER, J. S., 1965 *The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface*. Int. J. Heat Mass Trans. 8, 759-767.

【單篇文章, 無作者】

- (一)、*Salt Fingering* from <https://www.planetwater.ca/research/oceanmixing/saltfingers.html>

【評語】 051807

本作品探討液體在雙層溶液的擴散，以溶液的濃度梯度或溫度梯度作為調控的物理參數，溫度梯度所引發的擴散，值得再深究。內容著重在紀錄液體的擴散軌跡，依據軌跡計算擴散速率，以標準流程作擴散典型流程分析，而能對鹽手指的圖形、擴散速率以及擴散分層深度作實驗結論。但實驗時溶液的溫度梯度及橫向確實係等溫，應再作較精準的調控及量測，以提升實驗的可信度。內容宣稱深入探討海洋學中的溫鹽環流，並模擬直布羅陀海峽密度流部分，並無科學證據確實能以小型設置就能模擬大型海域的實況。

作品簡報



「鹽」上雙擴散— 雙擴對流及鹽手指現象

物理與天文學科

高級中等學校組

前言

當奶精加入咖啡時，不同溫差、濃度竟會產生不同的分層狀況。我們發現這是雙擴散對流所造成的結果，也發現一種名為「鹽手指」的奇特現象。

隨後，我們以過錳酸鉀溶液作為染色劑追蹤，在上下層不同梯度的水域中，我們發現了鹽手指現象。此現象為雙擴散對流的一種。確定了只有一種梯度差時不會有鹽手指之後，我們將實驗聚焦在不同溫度、鹽度梯度差時，對鹽手指的圖形變化做紀錄分析、並利用tracker影像軟體分析其擴散速率與擴散分層深度的影響，最後再模擬海洋溫鹽流遇到海底地形障礙時的雙擴散現象。

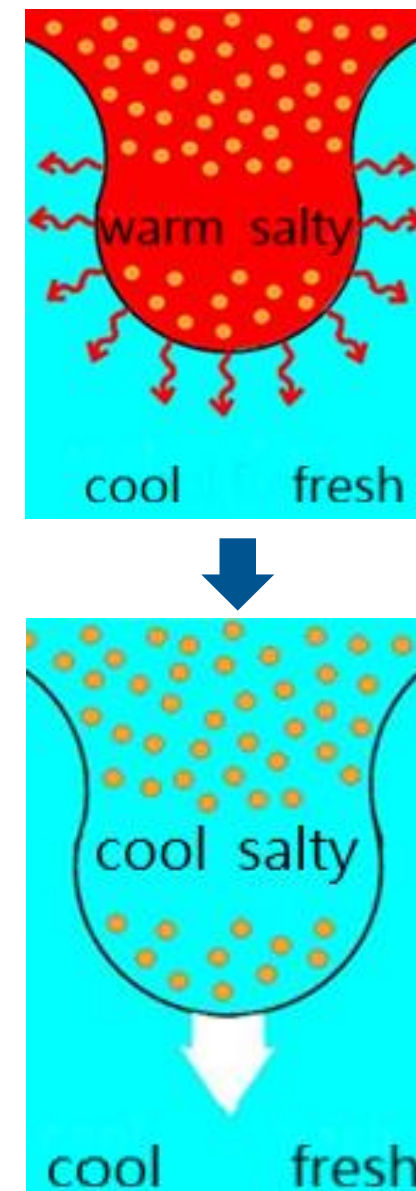


圖1-1 鹽手指的形成

實驗目的

- 一、前置實驗：鹽手指的生成條件
- 二、鹽手指現象
- 三、在低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流
- 四、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流
- 五、研究雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式
(模擬地中海與大西洋之間的溫鹽流)

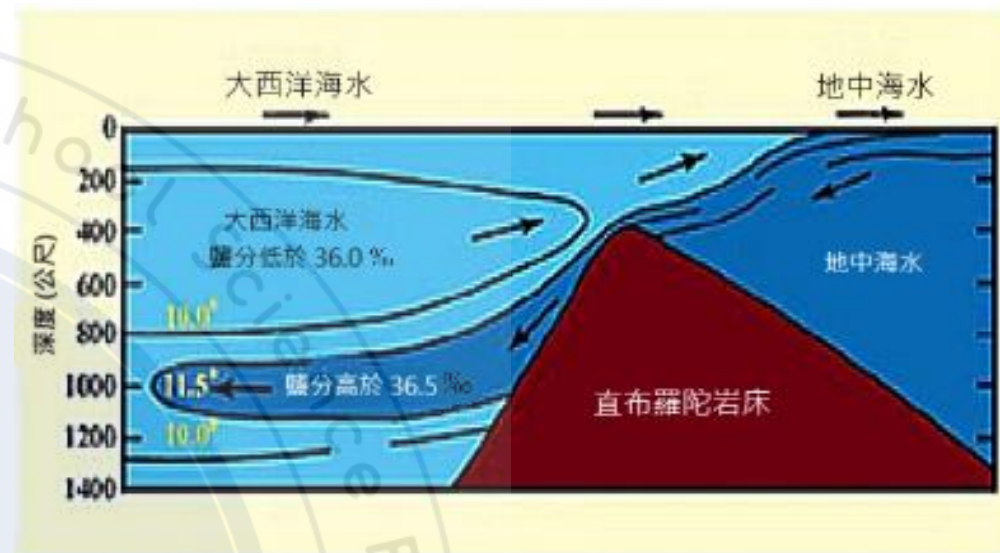


圖1-2 地中海海水流入大西洋海水中形成的雙擴散對流

研究過程及方法

一、前置實驗：鹽手指的生成條件

上層： 溫度 27.5°C 的純水	上層： 溫度 10°C 的純水
下層：10°C 的純水	下層：10°C 濃度3% 的食鹽水

↑只有溫度差

↑只有鹽度差

二、鹽手指現象

上層： 溫度20°C、30°C、40°C 的純水	上層： 溫度20°C、30°C、40°C 濃度1% 的食鹽水
下層：10°C 濃度1% 的食鹽水	下層：10°C 的純水

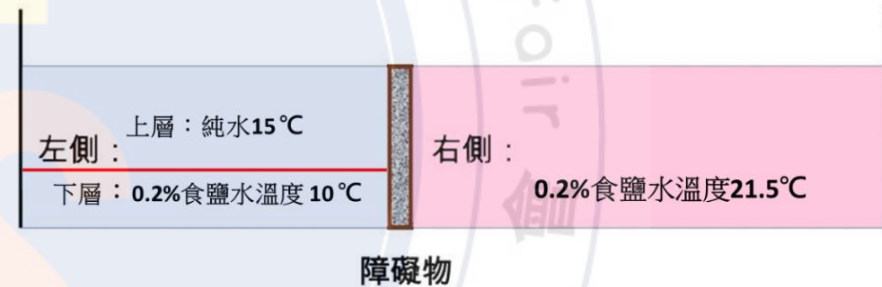
↑第一類鹽手指

↑第二類鹽手指

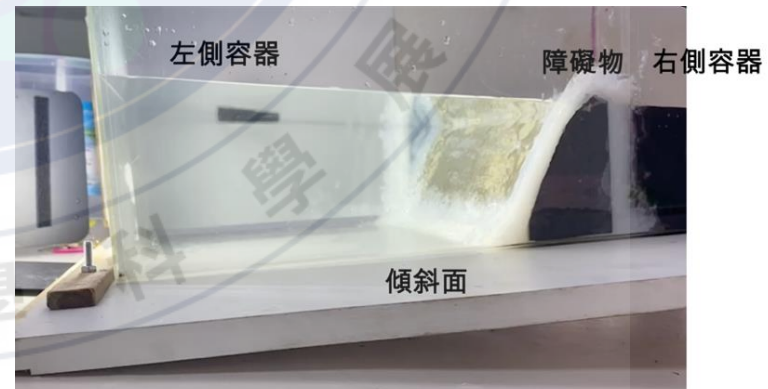
三、在低溫液體驅動的雙擴散對流

上層： 溫度15°C、濃度1% 的食鹽水
下層： 溫度10°C 濃度5%、10%、15% 的食鹽水

四、在高溫液體驅動的雙擴散對流



五、研究雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式



研究結果：一、前置實驗

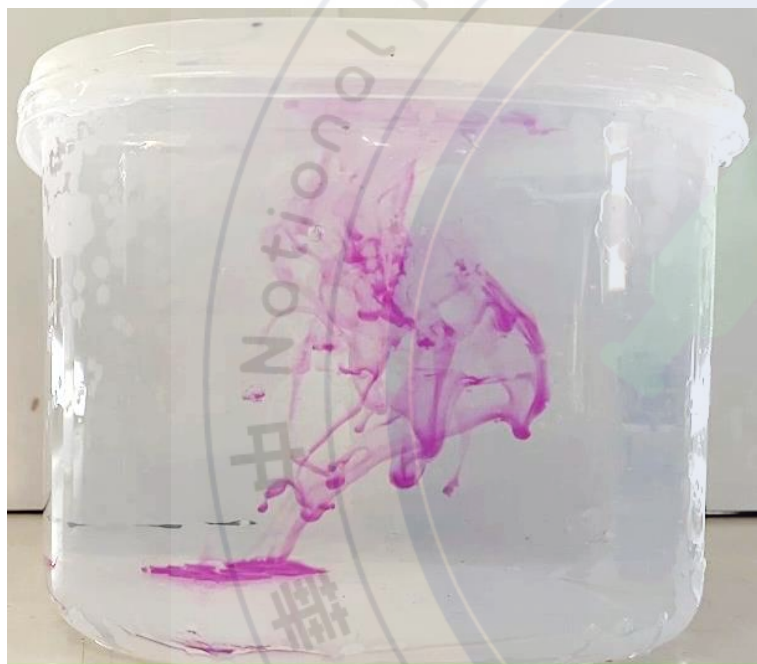


圖4-1-1只有溫差的染料擴散

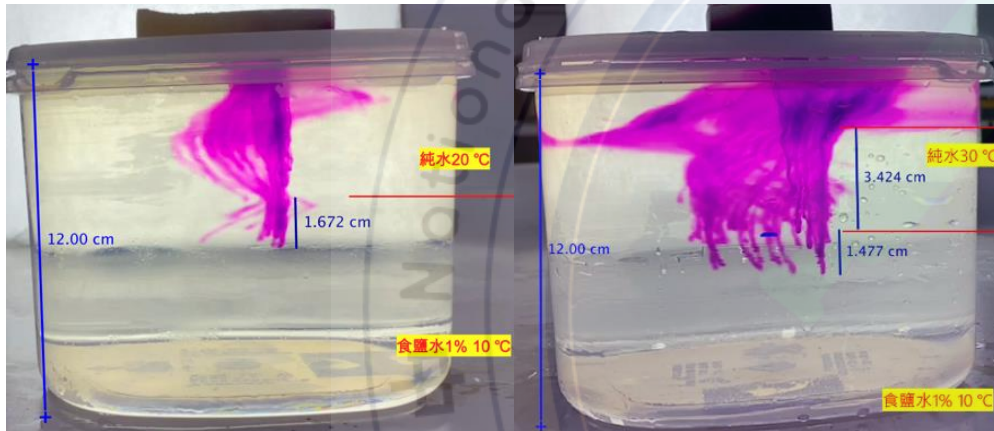


圖4-1-2只有鹽度差的染料擴散

綜合比較：在上面兩個前置實驗可以說明在只有一種梯度差的情況下無法產生鹽手指現象。另外，由於溫度的擴散速率遠大於鹽度的擴散速率，因此溫度差的染劑擴散更容易到達底部。

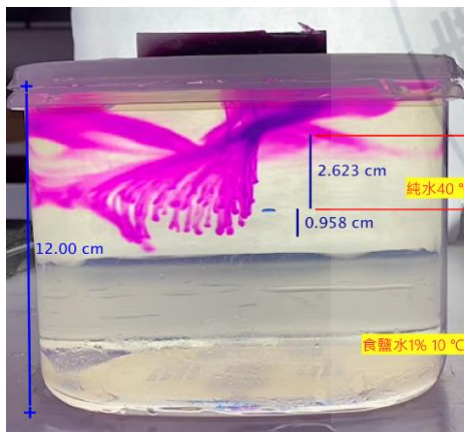
研究結果：二、鹽手指現象

1、上層為較高溫度的純水、下層皆為低溫10 °C且濃度1%的食鹽水

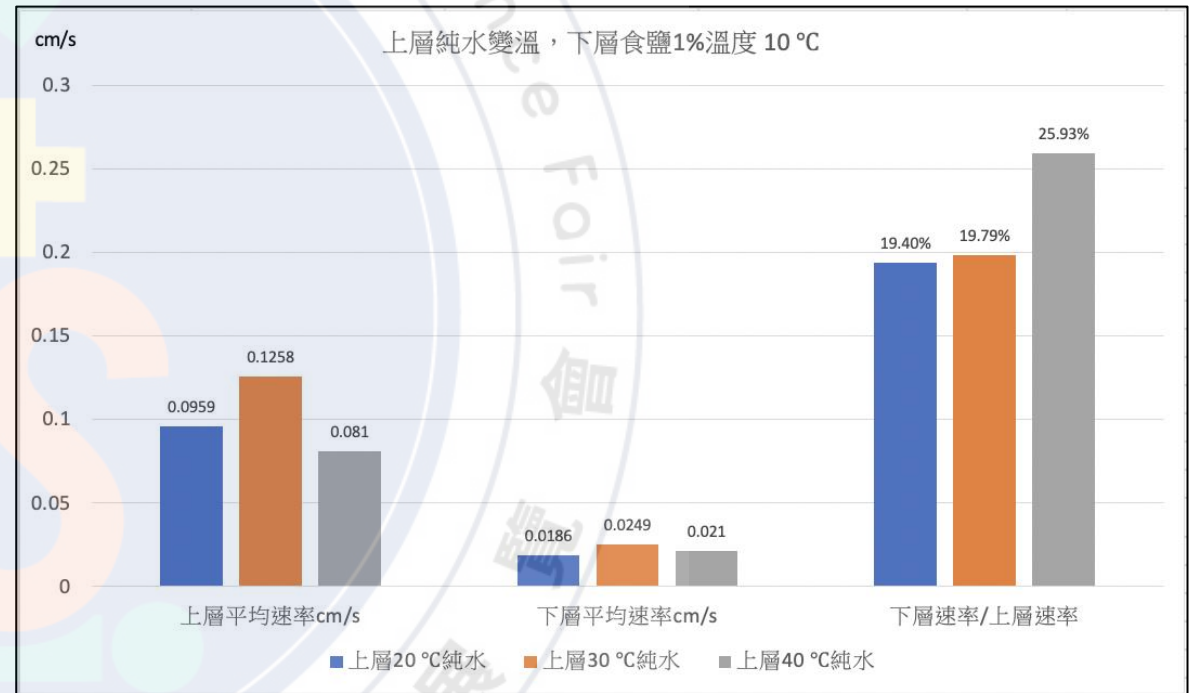


上層為20 °C

上層為30 °C



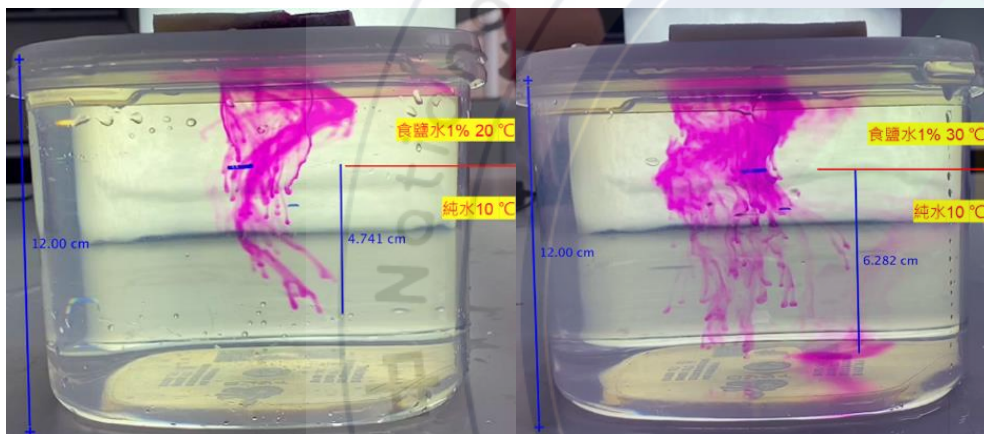
上層為40 °C



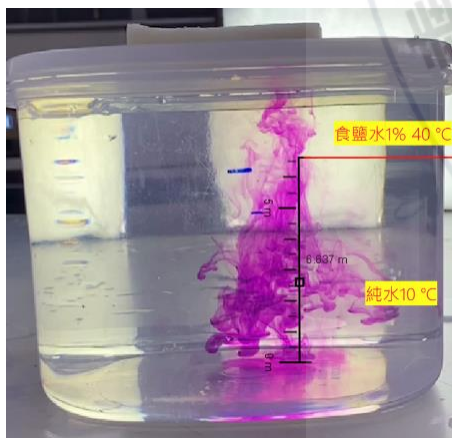
綜合比較：上層為較高溫度的純水時，與下層低溫的食鹽水溫差越大，上下相對擴散速率比越大，且鹽手指在垂直擴散距離會越短。

研究結果：二、鹽手指現象

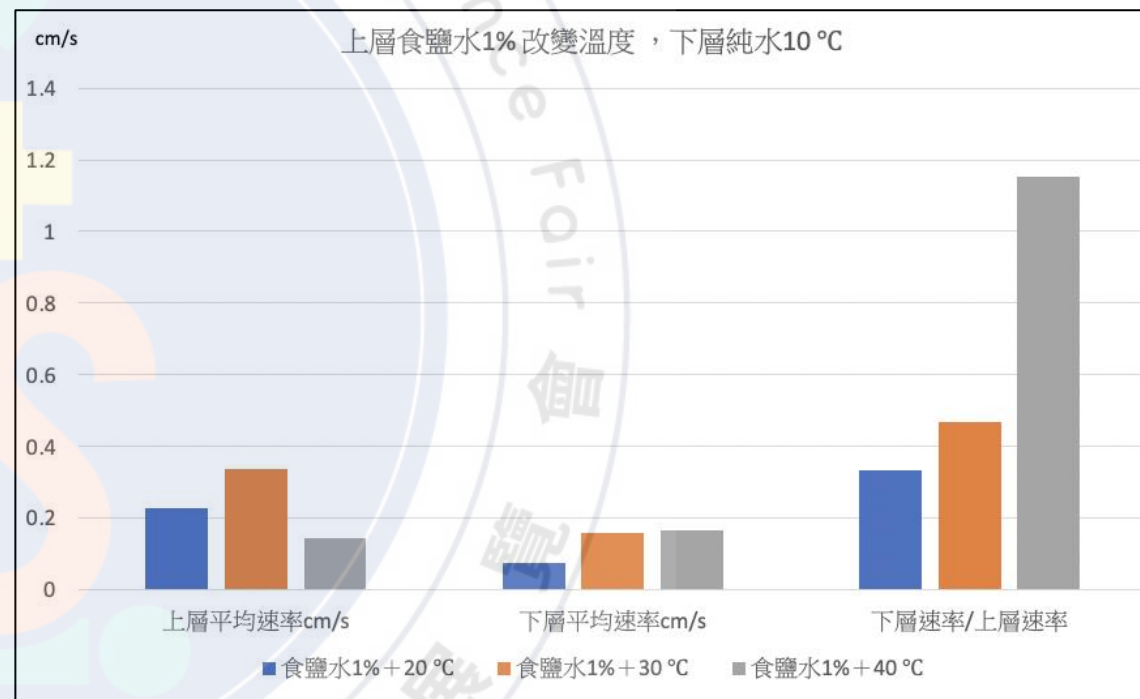
2、上層為較高溫且濃度1%的食鹽水、下層為較低溫10 °C的純水



上層為20°C 1%食鹽水 上層為30°C 1%食鹽水

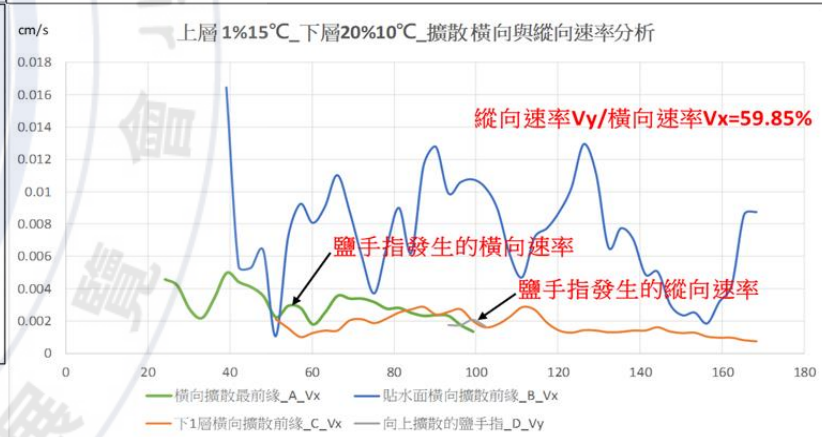
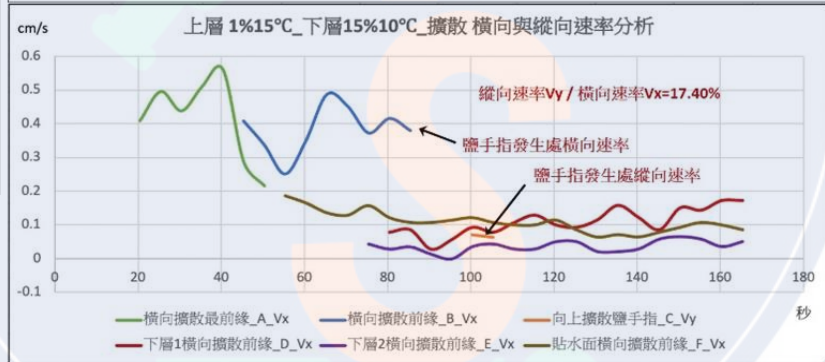
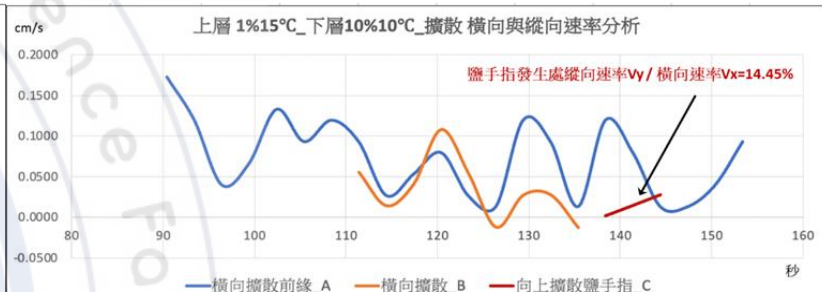
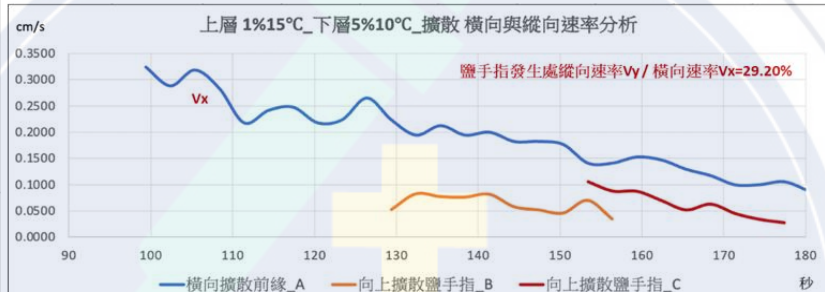
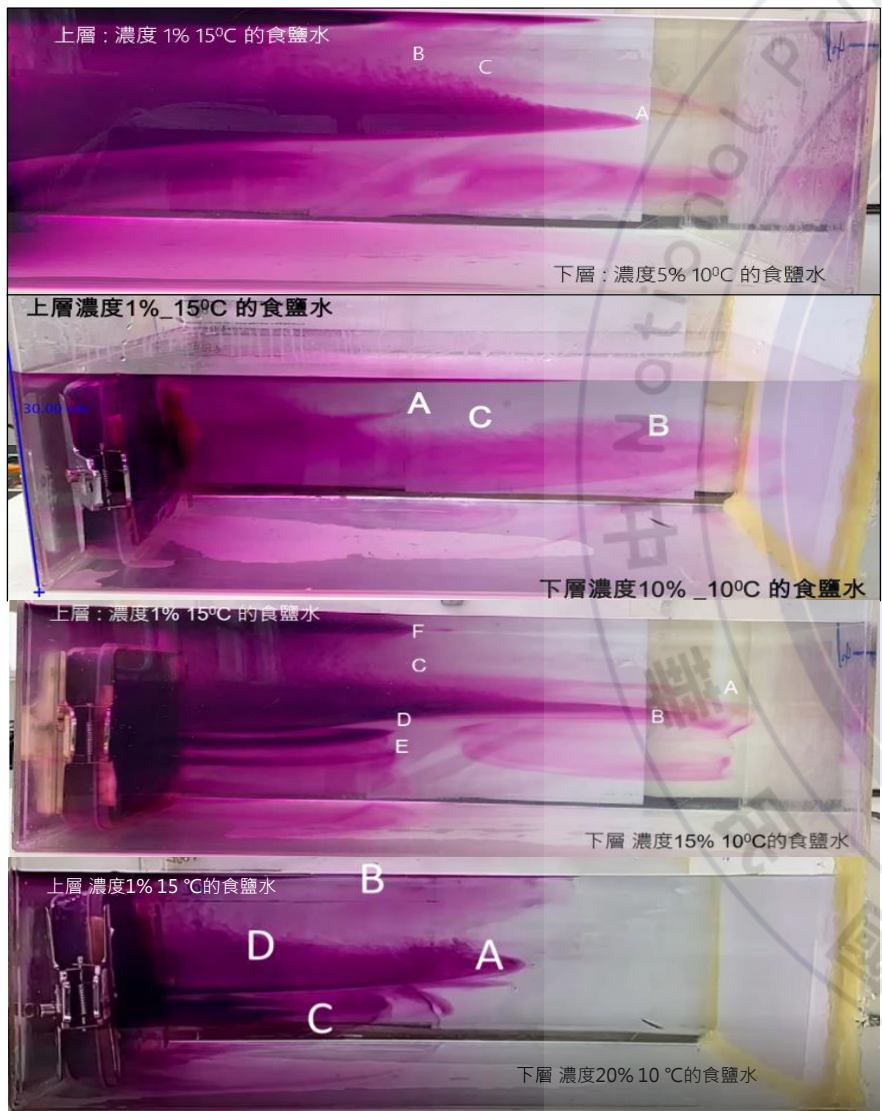


上層為40°C 1%食鹽水



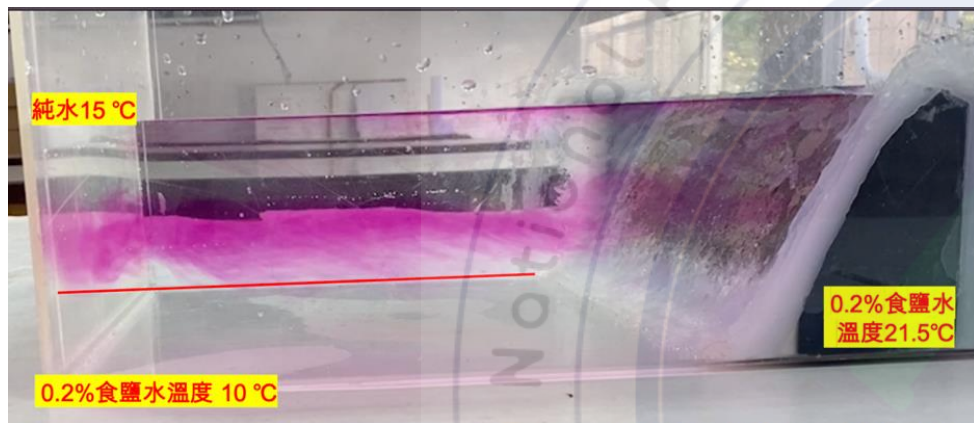
綜合比較：上層為較高溫的食鹽水時，與下層的純水溫差越大，上下相對擴散速率比越大，鹽手指在介面分層下的位置也越來越深。且比實驗2-1的下層擴散速率高大約八倍。上、下層能量垂直交換的效率比較高。

研究結果：三、在低溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流

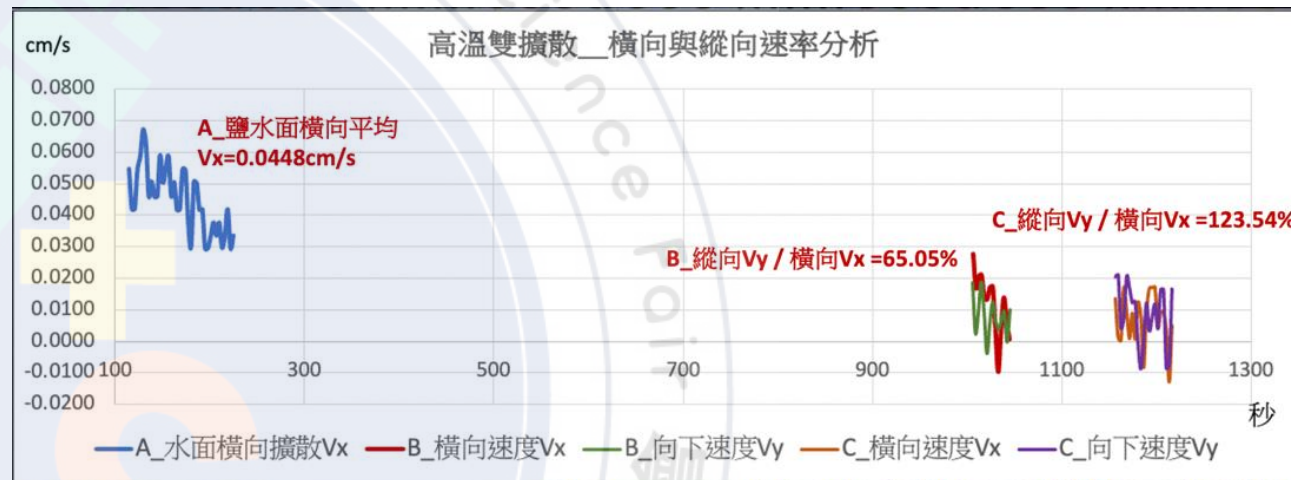


↑ 由於風的影響因素，貼水面橫向擴散的速率不太穩定，橫向的雙擴散對流則因為水箱大小出現的水箱內波影響導致擴散速率呈現上下起伏的狀況。

研究結果：四、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」雙擴散對流



右方為高溫區，流向左方低溫區



初期擴散：因為重力的關係，所以高溫液體先沿著障礙物往下沉。

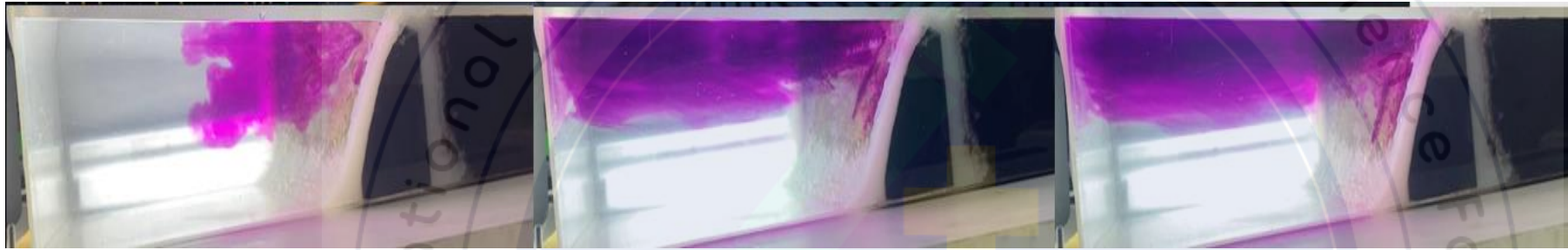
中期擴散：高溫液體向下擴散時，遇到底部低溫區隨後反彈向上，呈現水平擴散。

後期擴散：水平擴散因容器大小限制，呈現停滯狀態，此時出現鹽手指往下擴散。

↑ 橫向擴散速度受水流流速影響，但鹽手指的垂直擴散效應出現在水流相對緩慢的時候，擴散效率相對較高。

研究結果：五、研究雙擴散對流遇到障礙物時的擴散模式

(模擬地中海與大西洋之間的溫鹽流)



↑ 模擬夏天海水溫度的密度流

夏天表層水溫較高。當表層橫向擴散速度較大時，能量在垂直方向擴散不明顯，因此沒有觀察到鹽手指。等到橫向水流速度減緩時，就出現鹽手指，加速垂直方向上的擴散對流。



↑ 模擬冬天海水溫度的密度流

冬天表層水溫較低。當低溫水流經過障礙物時，即迅速往下沉降，另有一小部分水流則沿著表面橫向擴散。等到底層橫向速度變慢時，出現些許的鹽手指往上擴散，表層水流則出現往下擴散的現象。

結論

- 一、在只有一種梯度差的情況下，無法產生鹽手指現象。
- 二、在實驗2-1上層為較高溫純水的實驗條件下，溫差越大，界面垂直擴散速率差異越明顯且經過界面分層後，垂直擴散距離越短。
- 三、在實驗2-2上層為較高溫食鹽水水的實驗條件下，溫差越大，界面垂直擴散速率差異越明顯。但垂直擴散速率遠比上層只是純水時，大約高8倍。
- 四、在低溫液體驅動的雙擴散對流實驗中，濃度差異造成的縱向與橫向擴散速率，差異不明顯。
- 五、在高溫液體驅動的「溫度、濃度」的雙擴散對流實驗中，但鹽手指的垂直擴散效應出現在水流相對緩慢的時候，亦即當流速變慢時，上、下層能量垂直交換的效率比較高。
- 六、由模擬直布羅陀海峽的密度流實驗發現，夏天高溫海水或暖流會在水流速度緩慢時，以鹽手指的方式進行垂直方向上的能量交換。而冬天低溫海水或涼流由於密度較大，不需要流速緩慢即可進行垂直方向上的能量交換。



參考資料

一、中文部分

【單篇文章】

- (一)、鄧亦辰等 (2016年) • *鹽糖證共—探討濃度及溫度對不穩定性雙擴散之影響*—56屆國中組地球科學科展
- (二)、趙倩,趙進平(2011)•*加拿大海盆雙擴散階梯結構分布與熱通量研究*•地球科學進展, 第26卷, 第2期

二、英文部分

【單篇文章】

- (一)、Herbert, E. H., Turner, J. S. (1981). *Double-diffusive convection*: J. Fluid Me&. (1981), vol. 106, pp. 299-329.
- (二)、TURNER, J. S., 1965 *The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface*. Int. J. Heat Mass Trans. 8, 759-767.