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

第一名

040103

『液』想不到的對流胞

－瑞利貝納爾對流胞之探討

學校名稱：國立新竹高級中學

作者：	指導老師：
高二 洪尚緯 高二 莊凱丞	葉婉如

關鍵詞：瑞利數、對流胞、表面張力

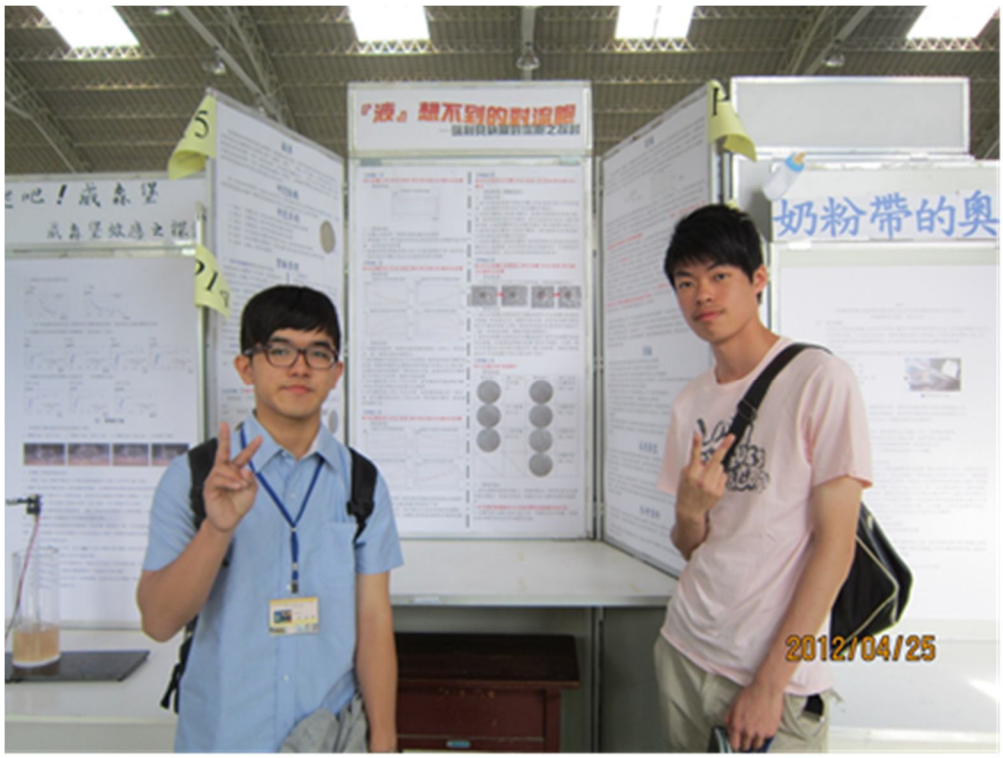
得獎感言

科展經驗分享

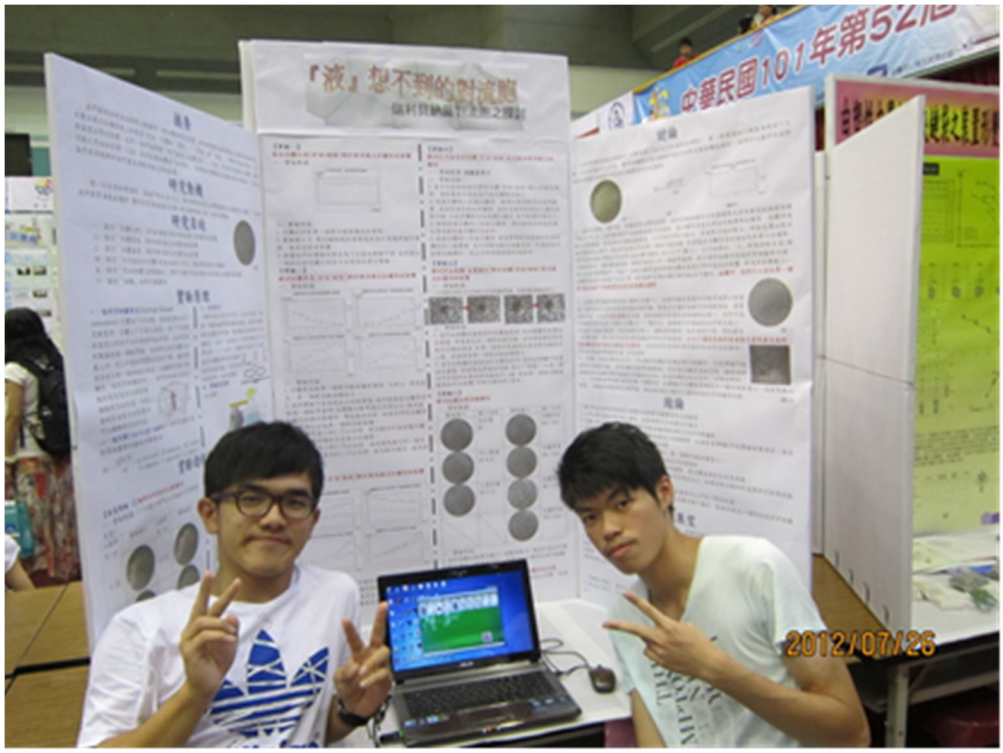
還記得七月二十三日踏上火車的那刻起，我們知道即將出征，代表著竹中，代表著新竹，更代表著整個桃竹苗。這五天裡，有緊張、有鬆懈、有驚喜更有喜極而泣的眼淚。當主持人宣佈第一名時，彼此的心臟揪了一下，我們真的被震驚到了。緩緩地走向舞台，心中有一種欣慰的感覺。做了那麼久的科展，終於被肯定，終於有一個那麼甜美的果實了。到了後台，眼淚就這樣漫出，覺得這段日子，真的很累，真的好辛苦。在這裡謝謝一路上幫助過我們的人，以及各位評審老師的肯定、建議與鼓勵。

至於科展一切的一切還是從高二的開學說起，科展人生在此展開。從一開始的尋覓題目到後來的實驗以及最後的撰寫報告書，這一路崎嶇不平。我相信，大部分的科學人，在尋找科展題目時，都花費了不少的工夫、不少的精力。如同我的指導老師所說，科展的題目就佔了百分之五十。從日常的生活經驗中，找尋相關題目別有趣味，留意生活中大大小小的事，才發現自己的渺小。真的很感謝老天爺給我們的靈感和老師的諄諄教誨。曾經有人問我科展可以學到什麼？我想在這一年內我已經有答案了，科展會訓練一個人的解決事情能力，如何去克服現實上實驗裝置的架設，訓練一個人的膽量，包括口頭介紹以及過程中自信的展現。我想這就是我的答案。我並沒有後悔加入這個科學人行列，儘管過程真的很艱辛，但堅持下去，你就可以繼續地走下去。參展時，令我最有印象的事情莫過於第四天下午的報告解說，站在自己的作品，等待他人的發問。在彼此的問與答之間我找到了一種成就感，就好像現在翻著自己的書面作品資料，還是會會心一笑地佩服自己。

不管未來你或妳要做科展，或從事相關研究，切記要有毅力不拔的精神、處處學問的好奇心以及追根究底的態度，這樣你或妳就可以聽到成功的聲音正在呼喚著你或妳。



地方區域科展海報前合照



彰化全國科展海報前合照

摘要

我們發現味噌湯靜置時會呈現特殊的圖形，經研究發現可能與熱對流有關，便針對與其形成之圖案展開研究。我們的研究主要在探討各種環境上的變因(例如：流體<矽油+鋁粉>的「濃度」、「厚度」與「溫度」）對對流胞的形狀、大小與溫度分布的影響。此外，我們也針對「不同溫度之液體混合」，以及「外加不同溫度之固體」對對流胞形成的影響。之後，我們改變液體的「黏滯性」，將實驗流體換成<油酸+鋁粉>的組合，分析討論其對流胞與矽油所產生的對流胞之間的差異。希望能對「對流胞」的形成有進一步的認識，以便將來從事相關研究（如大氣、地球地函的活動等）時能有更深入的了解。

壹、 研究動機

有一次在喝味噌湯時，當碗平放在桌子上，數秒鐘後便產生如蜂巢般的沉澱圖形，即使我們使用湯匙去攪拌，圖形仍究會緩慢的呈現，而這個過程引發了我們的興趣。

於是我們針對這六邊形特殊的沉澱圖形做深入的研究，欲找出影響此沉澱圖形大小與影響形狀和形成的原因。之後，我們翻閱高中的熱學教材、文獻資料以及有關味噌湯沉澱的資料，發現此特殊圖形的沉澱可能跟熱對流的模式有關係，於是便設計實驗進一步分析。

貳、研究目的

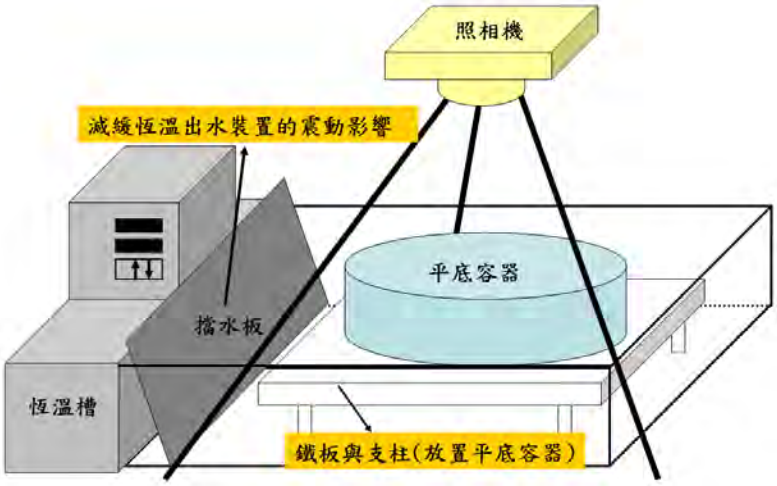
一、探討「流體比例」(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響
二、探討「流體厚度」對於對流模式和圖形的影響
三、探討「流體溫度」對於對流模式和圖形的影響
四、探討「不同溫度的流體(矽油+鋁粉)混合」後的對流模式和圖形
五、探討「外加物體(金屬圓柱)」對於流體(矽油+鋁粉)對流模式和圖形的影響
六、探討「油酸」的對流胞圖形

參、研究設備及器材

一、器材

(一)恆溫槽	(十)電子秤
(二)數位相機	(十一)游標尺
(三)相機腳架	(十二)漏斗
(四)鐵板、四角柱體支架	(十三)鐵塊
(五)平底容器	(十四)瓦斯爐
(六)矽油	(十五)PhotoImpact12
(七)油酸	(十六)Extra Movie to Gift
(八)鋁粉	(十七)紅外線溫度計(TM-919AL)
(九)秤量紙	(十八)紅外線熱影像儀(光碟內建讀檔軟體)

二、實驗裝置

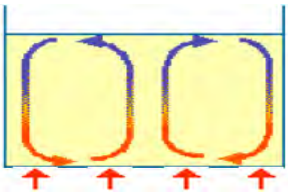


肆、研究過程或方法

【實驗原理說明】

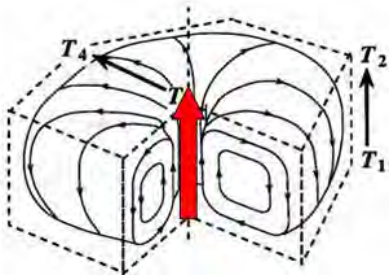
一、對流:

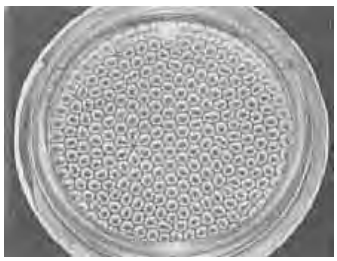
「熱對流」是指當液體或氣體物質一部分受熱時，體積膨脹，密度減少，逐漸上升，再由周圍溫度較低、密度較大的物質補充。接下來，此物質再受熱上升，周圍物質又來補充，如此循環不已，遂將熱量藉流動之流體傳播到各處。(下圖為熱對流的示意圖。)



二、瑞利貝納爾對流:

流體由下方加熱，當溫度增加到一定程度時，流體上下方產生溫差，且下方加熱的速度大於水平向外熱傳導速率時，也就是瑞利數值超過或低於一個臨界值，受熱部分的流體從各處上升，而上升處的周圍則反向下降。藉著密度差產生對一個個胞狀對流，此種對流模式就稱作「瑞利貝納爾對流」(Rayleigh – Bénard convection)。(左圖為瑞利貝納爾對流胞的立體結構示意圖；右圖為瑞利貝納爾對流胞的俯視圖。)





對流胞中心處溫度較高，所以流體上升
(為紅色箭頭)，且穩定態為六邊形。

當時認為產生對流胞的原因為浮力與密度驅動對流的形成，但後人發現表面張力的影響亦可以驅動對流的形成。

(一)浮力驅動對流理論:表層流體溫度相對於底層受熱流體低，密度較大；底層流體因受熱而溫度較高，密度較小，導致上下層流體產生密度差，形成了不穩定的系統，產生對流。

(二)表面張力驅動對流理論: 具有高表面張力的流體比周圍低表面張力的流體具有較大的吸引力，而表面張力梯度存在，自然會導致流體從低表面張力流向高表面張力處。

(三)浮力和表面張力共同作用理論:一般環境下，格子對流是由浮力與表面張力共同作用的結果，經理論分析後可建立瑞利數值的公式。

三、瑞利數(rayleigh number):為形成穩定瑞利貝納爾對流胞的判斷數值

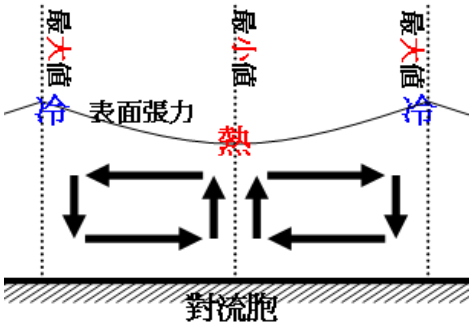
$$Ra = \frac{g\beta\Delta T h^3}{\nu\alpha}$$

(g:重力加速度，β:熱膨脹係數，ΔT:溫度梯度，h:流體層厚度，ν:動黏滯係數，α:熱擴散率)

四、表面張力:

一種因為粒子受力不平均，合力不為零，而產生一個類似繃緊彈性膜的效應，使整個液體表面向液體內部內縮，讓液體的表面積傾向於最小。此外，表面張力(T)等於總受力(F)/邊界長度（ℓ)。此外，液體的表面張力可以看成是液體每單位表面積所含的表面位能，而當表面位能愈低，系統愈穩定。

由下圖可以說明表面張力與對流胞之間的關係。



五、矽油與油酸的性質介紹:

(一)矽油:其黏度不易受溫度的高低影響；熱傳導效果佳且易保溫；在實驗過程中不會有汽化、凝固等現象。因此我們的實驗中以此流體為主。

(二)油酸:密度與矽油差不多(約為1.05g/ml)；在實驗過程中不會有汽化、凝固等現象；黏滯係數較低。

六、溫度梯度:

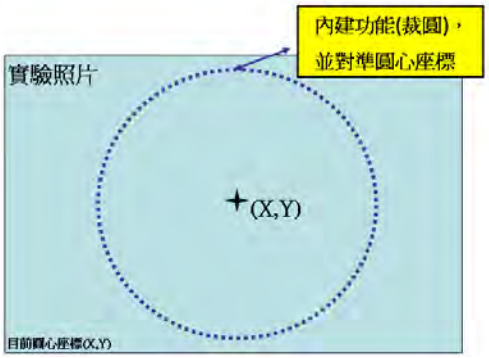
描述溫度在特定的區域環境內變化急劇程度。本實驗中，計算方式為單一個對流胞內外溫差(℃)/單一個對流胞面積開根號(cm)<此因次相當於對流胞的半徑>。

七、實驗數據分析:

(一)單一個對流胞面積的數據分析部份，以下方法為我們所採用:我們固定相機腳架、高度以確保照片的統一性。接著使用軟體剪裁照片為圓形，再採用人工方式<照片的面積除以人工估算的對流胞數>計算出單一個對流胞面積(單位:像素)，再利用比例尺將像素轉為平方公分。此方法較方便，且造成的誤差較小。

(二)由於使用的平底容器為圓形的，因此我們使用PhotoImpact12軟體功能將實驗所拍攝的照片剪裁成等大圓形，且圓心位於同一螢幕座標上。在計算此圓形中的對流胞個數，並將面積(像素)除以對流胞個數得到單一個對流胞面積(像素)。(如有不完整的對流胞，我們查看原照片，並估計此不完整的對流胞占原完整對流胞的百分比)

再使用原始照片中的比例尺將實驗數據中所得單一個對流胞面積(像素)轉換為單一個對流胞面積(平方公分)。此方法，我們稱之為「**剪圓比例尺轉換法**」



【前置實驗 I】

一、目的: 觀察味噌湯的沉澱圖形

二、變因: (一)操縱變因:流體厚度(水+味噌)

(二)控制變因:環境溫度(21.0℃)、相機架設高度

三、步驟: (一)配置流體並將其倒入平底容器中。

(二)並加熱平底容器底部且計時。

(三)一段固定時間後，停止加熱，再使用攪拌棒攪拌，使其物質均勻分散。

(四)沉澱後，使用數位相機從容器的正上方垂直往下拍攝。

【前置實驗 II】

一、目的: 觀察對流胞的現象

二、變因: (一)操縱變因:不同流體組合(水+味噌、水+木屑、矽油+木屑、油酸+木屑、水+鋁粉、矽油+鋁粉、油酸+鋁粉、)

(二)控制變因:流體厚度(矽油+鋁粉) (1.0cm)、恆溫槽溫度(80.0℃)、環境溫度(19.0℃)、相機架設高度

三、步驟: (一)配置多種不同的流體組合(水+味噌、水+木屑、矽油+木屑、油酸+木屑、水+鋁粉、矽油+鋁粉、油酸+鋁粉、)。

(二)倒入平底容器中，並使它均勻分布，再將平底容器放至於鐵板上。

(三)等待對流胞不再劇烈地消漲後且圖形較清楚時，使用數位相機從容器的正上方垂直往下拍攝。

【實驗一】

一、目的: 探討流體比例(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

二、變因: (一)操縱變因:流體比例(矽油+鋁粉)

(二)控制變因:流體厚度(矽油+鋁粉) (1.0cm)、恆溫槽溫度(80℃)、環境溫度(19.0

℃)、相機架設高度

三、步驟: (一)將鋁粉加入矽油後，使用攪拌棒攪拌均勻。

(二)再倒入平底容器中，並使它均勻分布，並將平底容器放至於鐵板上。

(三)等待對流胞不再劇烈地消漲後，且圖形較清楚時，使用數位相機從容器的正上方垂直往下拍攝。

(四)拍攝完一張照片後，使用攪拌棒重新攪拌。

(五)重複(四)步驟，一組數據中拍攝五張照片。

(六)再加入1.0g的鋁粉，重複上述(一)~(四)步驟，做至所含鋁粉量為10.0g，即完成此項實驗。

【實驗二】

一、目的: 探討流體厚度(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

二、變因: (一)操縱變因:流體厚度(矽油+鋁粉)

(二)控制變因:流體比例(矽油+鋁粉)(300g矽油/2g鋁粉)、恆溫槽溫度(80.0℃)、環境溫度(19.0℃)、相機架設高度

三、步驟: (一)固定矽油+鋁粉的比例，倒入平底容器中，並使它均勻分布，再將平底容器放至於鐵板上。

(二)使用游標尺量流體厚度(矽油+鋁粉)，達到我們所欲的高度。

(三)同【實驗一】的實驗步驟(三)-(五)。

(四)額外加入相同比例的鋁粉加矽油，達到下一個實驗數據所需的厚度(以0.25公分為實驗中所固定的差值)，重複上述步驟，即完成此項實驗。

【實驗三】

一、目的: 探討流體溫度(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

二、變因: (一)操縱變因:恆溫槽溫度

(二)控制變因:流體比例(矽油+鋁粉)(300g矽油/2g鋁粉)、環境溫度(19.0℃)、流體厚度(矽油+鋁粉)(0.75cm)、相機架設高度

三、步驟: (一)調整恆溫槽的溫度控制鍵至所欲實驗溫度。

(二)同【實驗一】的實驗步驟(二)-(五)。

(三)調整恆溫槽溫度，達到下一個實驗數據所需之溫度(以5.0℃為實驗中所固定的差值)，重複上述步驟，即完成此項實驗。

【實驗四】

一、目的: 探討不同溫度的流體(矽油+鋁粉)混合後的對流模式和圖形

二、變因: (一)操縱變因:流體溫度(矽油+鋁粉)

(二)控制變因:流體厚度(矽油+鋁粉)(0.75cm)、流體比例(矽油+鋁粉)(300g矽油/2g鋁粉)、環境溫度(19.0℃)、相機架設高度、漏斗底部與流體(矽油+鋁粉)表面的距離

三、步驟: (一)取一固定溫度的流體(矽油+鋁粉)置入平底容器，再將平底容器放置鐵板上。

(二)調整漏斗的高度及水平，再取另一高溫或低溫的流體(矽油+鋁粉)經漏斗加入

平底容器中。

(三)觀察其現象，並使用數位相機，從上方拍攝影片。

(四)將影片檔傳至電腦，使用電腦軟體(Extra Movie to Gift)將影片檔案轉成多張圖片(一秒一張)的型式，再取相同間隔秒數的圖片，以表格方式呈現對流胞之變化。

【實驗五】

一、目的: 探討外加物體(金屬圓柱)對於流體(矽油+鋁粉)對流模式和圖形的影響

二、變因: (一)操縱變因:外加物體(金屬圓柱)的溫度

(二)控制變因:流體厚度(矽油+鋁粉)(0.75cm)、流體比例(矽油+鋁粉)(300g矽油/2g鋁粉)、環境溫度 (17.0℃)、恆溫槽溫度(80.0℃)、相機架設高度、外加物體大小、外加物體材質

三、步驟: (一)用直徑1.5cm圓柱鐵塊

(二)分二組實驗: 1.外加物體溫度(約75.0-80.0℃)高於流體溫度(矽油+鋁粉)

2.外加物體溫度(約15.0-20.0℃)低於流體溫度(矽油+鋁粉)

(三)將外加物體(金屬圓柱)輕置平底容器內部。

(四)同【實驗四】的實驗步驟(三)(四)。

【實驗六】

一、目的: (一)探討油酸的對流胞圖形

(二)探討流體厚度對流酸對流胞的影響

二、變因: (一)操縱變因:流體厚度(油酸+鋁粉)(0.75cm)、流體比例(油酸+鋁粉)(300g油酸/2g鋁粉)、環境溫度(16.0℃)、恆溫槽溫度(80℃)、相機架設高度

(二) 1.操縱變因:流體厚度(油酸+鋁粉)

2.控制變因:流體比例(油酸+鋁粉)(300g油酸/2g鋁粉)、環境溫度(16.0℃)、恆溫槽溫度(80℃)、相機架設高度

三、步驟: (一) 1.固定流體比例(油酸+鋁粉)，倒入平底容器中，並使它均勻分布。

2.將平底容器放至於鐵板上，再使用攪拌棒，不規則任意地攪拌。

3.等待對流胞不再劇烈地消漲後且圖形較清楚時，使用數位相機從容器的正上方垂直往下拍攝。

4.使用攪拌棒重新攪拌，並重複(3)步驟。

5.將所拍攝的照片傳入電腦加以分析，做出結論。

(二) 1.固定流體比例(油酸+鋁粉)，倒入平底容器中，並使它均勻分布。

2.使用游標尺量測溶液厚度，達到我們所欲的高度。

3.將平底容器放至於鐵板上，使用攪拌棒，不規則任意地攪拌。

4.等待對流胞不再劇烈地消漲後且圖形較清楚時，使用數位相機從容器的正上方垂直往下拍攝。

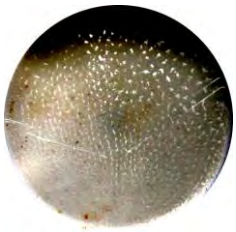
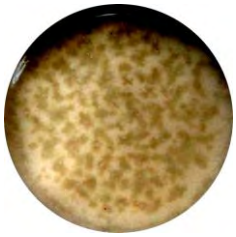
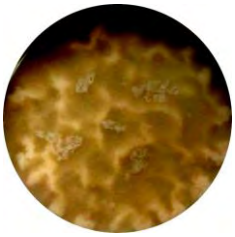
5.使用攪拌棒重新攪拌，並重複(4)步驟。

6.額外加入相同比例的鋁粉加油酸，達到下一個實驗數據所需的厚度(以0.25公分為實驗中所固定的差值)，重複上述(一)~(五)步驟，即完成此項實驗。

伍、研究結果

【前置實驗 I】觀察味噌湯沉澱圖形

一、實驗數據:(下表圖片經過PhotoImpact12調整亮度對比)

流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)	流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)
0.25		0.50	
0.75		1.00	
1.25		1.50	

二、實驗結論:

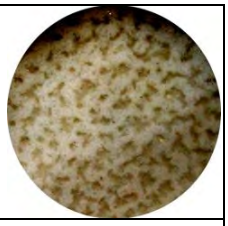
(一)經過電腦亮度對比調整過，可看見如蜂窩狀的沉澱圖形。

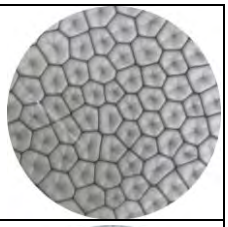
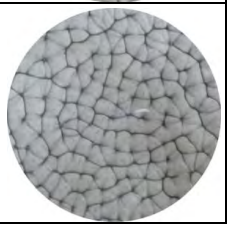
(二)每個如蜂窩狀的沉澱圖形隨流體厚度增加而有變大的趨勢。

→與之後矽油的實驗結果相似

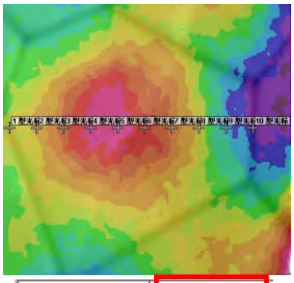
【前置實驗 II】觀測對流胞的現象

一、實驗數據

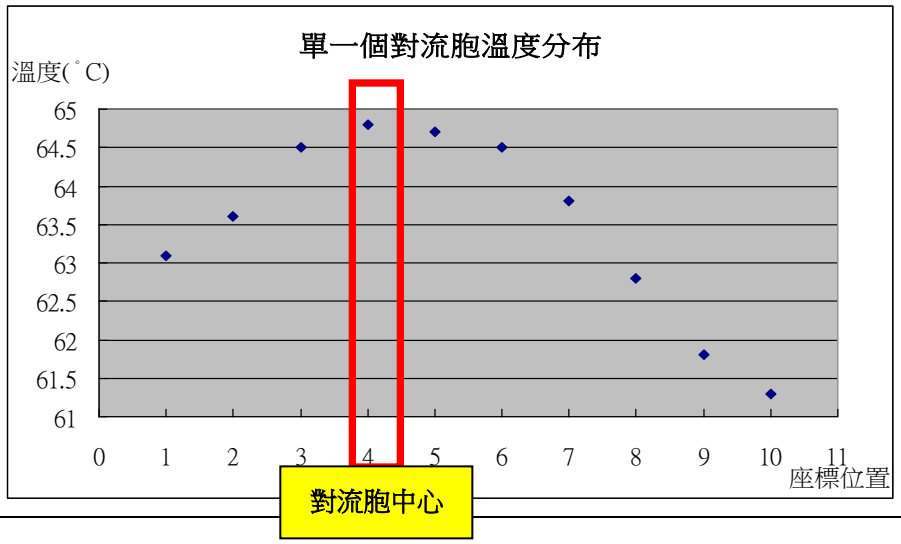
水+味噌	味噌湯沉澱圖形(此照片經過對比及亮度的調整) 
水+木屑	兩者不互溶，無法觀察到對流胞
矽油+木屑	
油酸+木屑	
水+鋁粉	

矽油+鋁粉	可以明顯看到對流胞，且圖形較穩定，變化性不大	
油酸+鋁粉	可以明顯看到對流胞，但圖形流動性較大	

二、數據分析(下圖為紅外線熱影像儀拍攝出的單一個對流胞的溫度分布)



名称	温度
1 型光标	63.1 ℃
2 型光标	63.6 ℃
3 型光标	64.5 ℃
4 型光标	64.8 ℃
5 型光标	64.7 ℃
6 型光标	64.5 ℃
7 型光标	63.8 ℃
8 型光标	62.8 ℃
9 型光标	61.8 ℃
10 型光标	61.3 ℃



三、實驗結論:

(一)味噌湯沉澱時可看見如蜂窩狀的圖形，我們推測與加熱時的對流模式有關係。

(二)矽油+鋁粉所混合的流體可以清楚發現五邊形或是六邊形的對流胞且明顯觀察到鋁粉微小顆粒從對流胞中心上升，流向邊界，並在對流胞邊界處下沉。

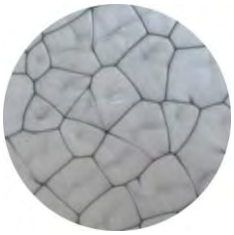
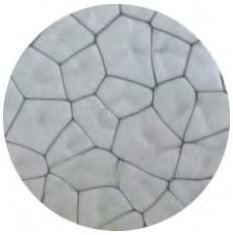
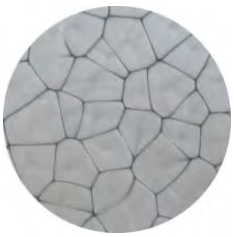
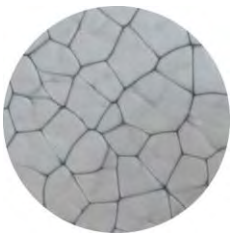
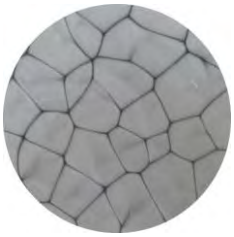
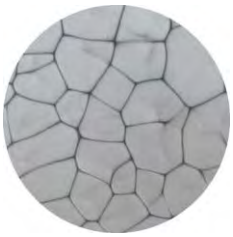
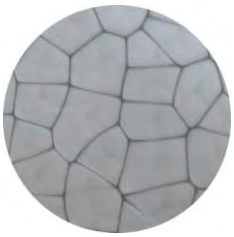
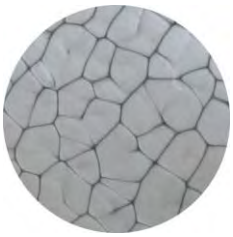
(三)發現對流胞的上升處(中心處)比對流胞邊界處稍低。

(四)使用紅外線溫度計與熱影像儀觀測出對流胞中心處的溫度相對於邊界處高。

【實驗一】探討流體比例(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

一、實驗數據；

所含鋁粉量(g)	實驗圖片(取一張為代表)	所含鋁粉量(g)	實驗圖片(取一張為代表)
1.0g		2.0g	

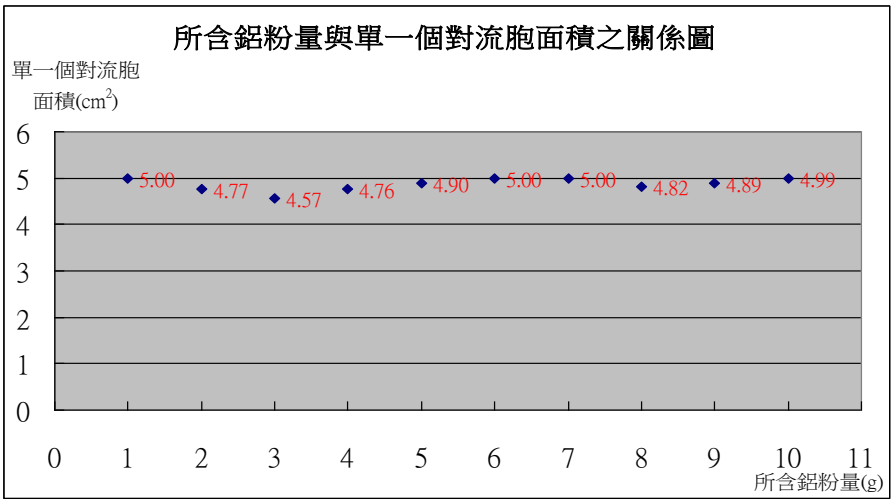
所含鋁粉量(g)	實驗圖片(取一張為代表)	所含鋁粉量(g)	實驗圖片(取一張為代表)
3.0g		4.0g	
5.0g		6.0g	
7.0g		8.0g	
9.0g		10.0g	

二、數據分析:

(一) 所含鋁粉量(固定矽油量)與單一個對流胞面積之關係

所含鋁粉量(g)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	單一個對流胞面積(cm^2)
1.0	5.41	4.91	4.49	4.76	5.41	5.00
2.0	5.06	4.76	4.91	4.62	4.49	4.77
3.0	4.91	4.36	4.62	4.62	4.36	4.57
4.0	4.62	4.36	4.36	5.23	5.23	4.76
5.0	4.76	4.36	4.76	5.23	5.41	4.90
6.0	4.62	5.23	5.41	4.49	5.23	5.00
7.0	4.36	4.76	5.23	5.41	5.23	5.00
8.0	4.36	4.36	5.23	5.41	4.76	4.82
9.0	5.61	5.23	4.62	4.49	4.49	4.89
10.0	4.76	4.62	4.76	5.41	5.41	4.99

(二)數據分析



三、實驗結論:

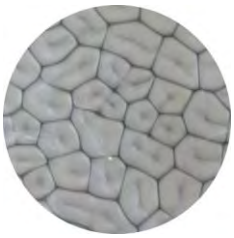
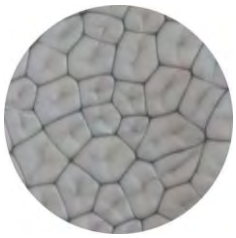
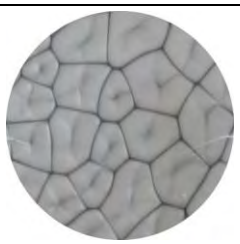
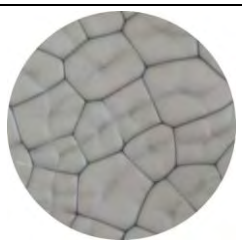
(一)流體比例與單一個對流胞面積沒有關係。

(二)根據我們的實驗結果且為了之後的實驗方便，我們是以一個固定的流體比例去完成後面的其它實驗。

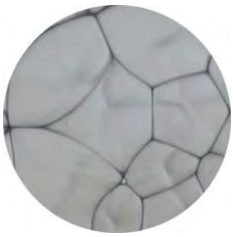
【實驗二】探討流體厚度(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

一、實驗數據:

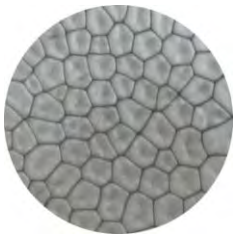
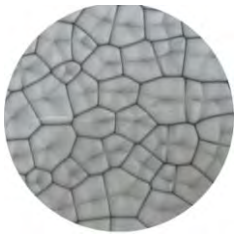
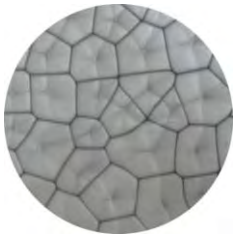
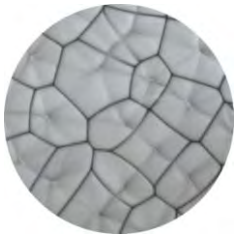
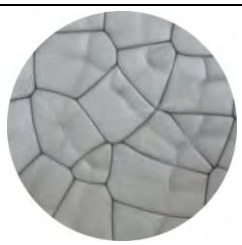
(一) 流體溫度(矽油+鋁粉)50.0℃

流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)	流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)
0.25		0.50	
0.75		1.00	
1.25		1.50	

流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)	流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)

1.75		2.00	
※流體厚度大於2.00cm的實驗數據中，流體流動快速且不穩定，所得照片為其中一瞬間所呈現的對流胞圖形。大體上，我們不去計算厚度較厚的單一個對流胞面積。			

(二)流體溫度(矽油+鋁粉)80.0℃

流體厚度(cm))	實驗圖片(取一張為代表)	流體厚度(cm)	實驗圖片(取一張為代表)
0.25		0.50	
0.75		1.00	
1.25		1.50	
1.75		2.00	
※流體厚度大於2.00cm的實驗數據中，流體流動快速且不穩定，所得照片為其中一瞬間所呈現的對流胞圖形。大體上，我們不去計算厚度較厚的單一個對流胞面積。			

二、數據分析:

(一)關係表格

1.流體溫度50.0℃

(1)流體厚度(矽油+鋁粉)與對流胞個數之關係

次數 厚度(cm)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均個數

0.25	32.4	35.6	35.8	32.5	31.4	33.5
0.50	24.2	26.1	25.6	26.8	27.3	26.0
0.75	20.2	20.3	19.1	19.5	18.7	19.5
1.00	16.2	14.6	14.9	15.3	14.7	15.1
1.25	12.3	12.4	13.7	12.5	13.4	12.8
1.50	7.8	8.1	8.3	7.2	7.9	7.8
1.75	6.3	6.2	5.9	5.7	6.0	6.1
2.00	4.7	5.1	5.5	4.3	4.9	4.9

單位:個數

(2)流體厚度(矽油+鋁粉)與單一個對流胞面積之關係

次數 / 厚度(cm)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	單一個對流胞面積(cm^2)
0.25	2.42	2.20	2.19	2.41	2.50	2.34
0.50	3.24	3.01	3.06	2.92	2.87	3.02
0.75	3.88	3.86	4.11	4.03	4.19	4.01
1.00	4.84	5.37	5.26	5.13	5.34	5.18
1.25	6.38	6.33	5.72	6.28	5.85	6.10
1.50	10.06	9.69	9.45	10.90	9.93	9.99
1.75	12.46	12.66	13.30	13.77	13.08	13.03
2.00	16.02	16.70	15.39	14.27	18.25	16.02

2.流體溫度80.0℃

(1)流體厚度(矽油+鋁粉)與對流胞個數之關係

次數 / 厚度(cm)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均個數
0.25	61.4	58.8	59.1	55.2	56.7	58.2
0.50	33.4	29.2	28.8	27.1	28.6	29.4
0.75	20.1	18.5	20.0	20.2	21.1	19.0
1.00	13.2	13.9	11.1	12.8	12.9	12.8
1.25	9.3	10.3	9.1	11.8	11.9	10.6
1.50	8.1	7.9	8.2	8.5	8.6	8.3
1.75	5.1	5.9	4.2	3.6	5.1	4.8
2.00	2.9	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8

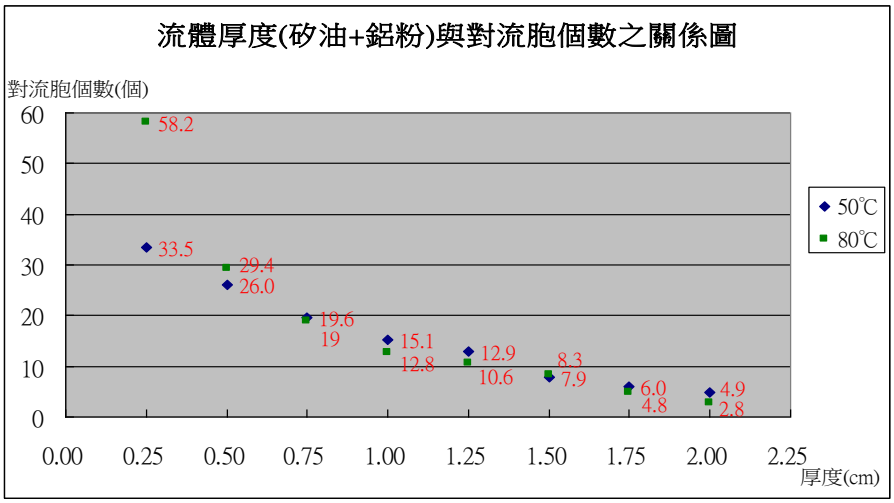
單位:個數

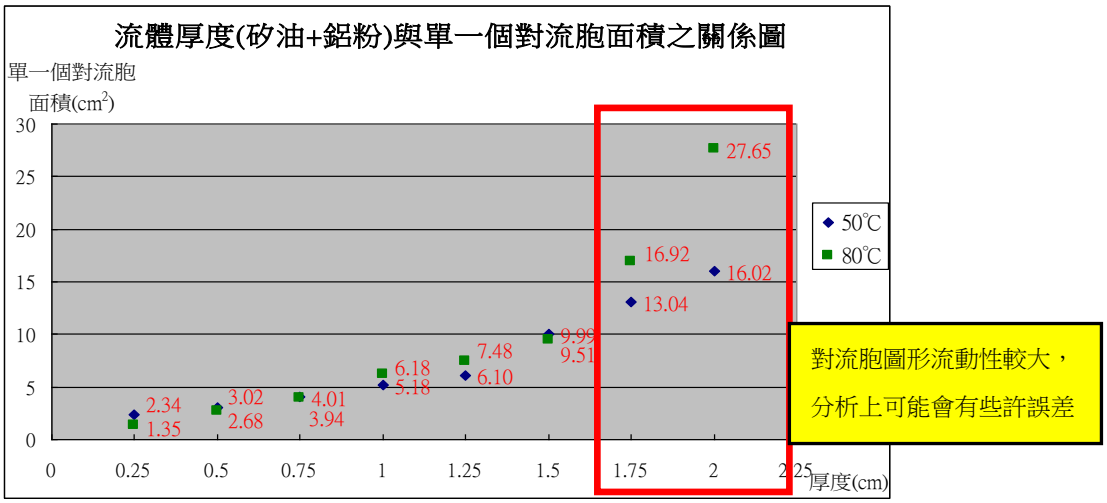
(2)流體厚度(矽油+鋁粉)與單一個對流胞面積之關係

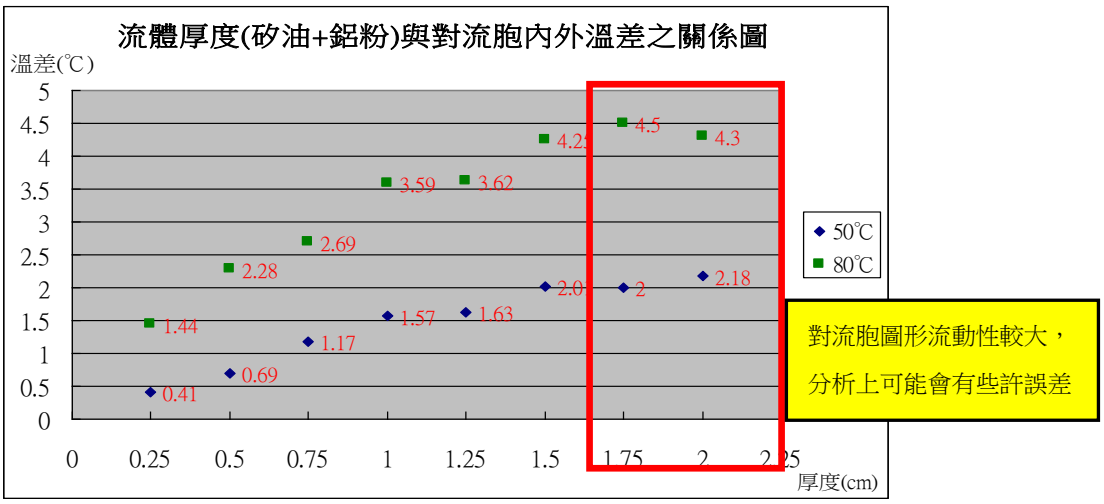
次數 / 厚度(cm)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	單一個對流胞面積(cm^2)
0.25	1.28	1.34	1.33	1.42	1.38	1.35
0.50	2.35	2.69	2.73	2.90	2.74	2.68

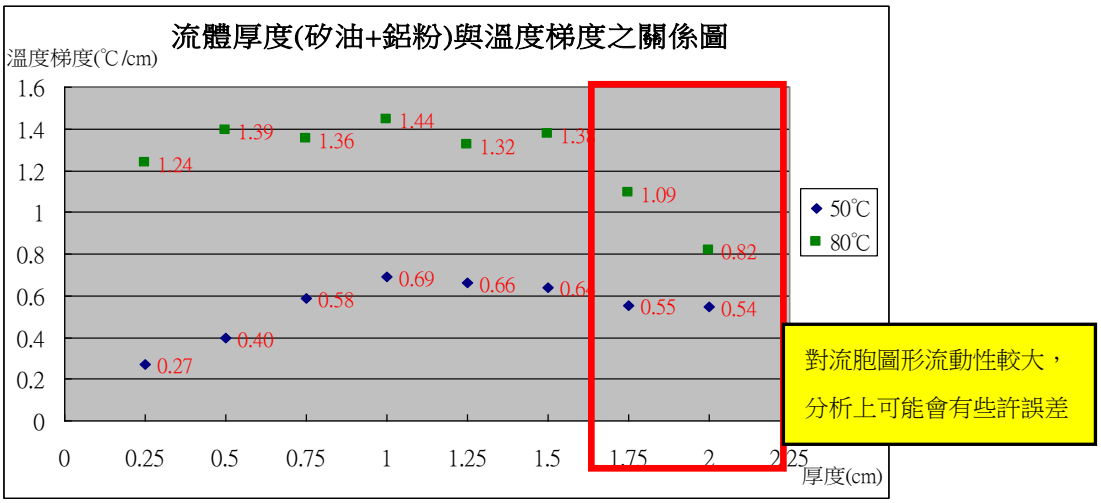
0.75	3.91	4.24	3.93	3.89	3.72	3.94
1.00	5.95	5.65	7.07	6.13	6.09	6.18
1.25	8.44	7.62	8.09	6.65	6.60	7.48
1.50	9.69	9.94	9.57	9.24	9.13	9.51
1.75	15.39	13.31	18.69	21.81	15.39	16.92
2.00	27.07	28.04	27.07	28.04	28.04	27.65

(二)關係圖









三、實驗結論:

(一)流體厚度與單一個對流胞面積有關係。大致上，厚度愈大與，單一個對流胞面積愈大。

(二)我們實驗中有做到五公分的厚度但發現當流體厚度超過一個臨界值時(此實驗的臨界值大約兩公分)無法產生穩定的對流胞圖形，導致無法分析，故無法得到流體厚度大於兩公分的單一個對流胞面積。

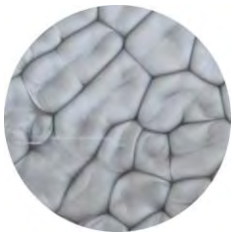
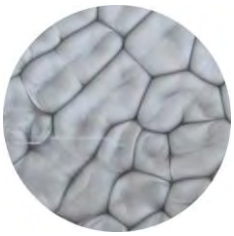
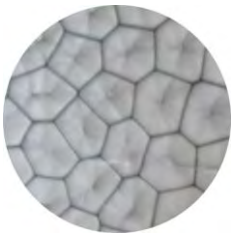
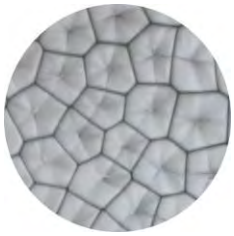
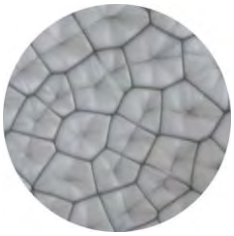
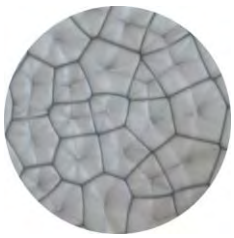
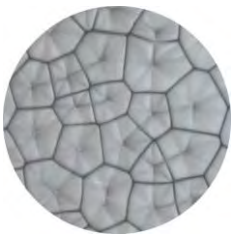
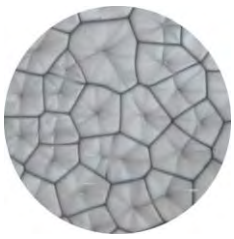
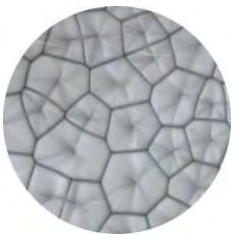
(三)在流體厚度小於1.75公分時，對流胞內外溫差隨流體(矽油)厚度的增加而有變大的趨勢。

(四)在流體厚度小於1.75公分時，溫度梯度接近於一個定值；當流體厚度大於1.75公分時，對流胞不穩定，溫度梯度偏離定值。

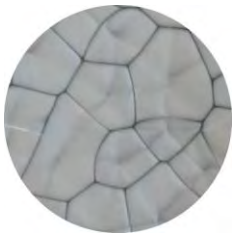
【實驗三】探討流體溫度(矽油+鋁粉)對於對流模式和圖形的影響

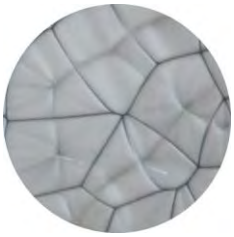
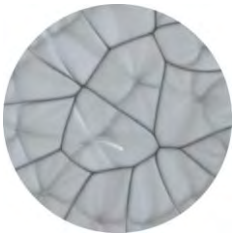
一、實驗數據

(一)　流體厚度0.75公分(矽油+鋁粉)

流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)	流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)
29.0		35.0	
38.0		43.0	
47.0		52.0	
55.0		59.0	
62.0		65.0	

(二) 流體厚度1.25公分(矽油+鋁粉)

流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)	流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)
29.0		35.0	
38.0		43.0	

流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)	流體溫度(℃)	實驗圖片(取一張為代表)
47.0		52.0	
55.0		59.0	
62.0		65.0	

二、數據分析:

(一)關係表格

1.流體厚度0.75公分

(1)流體溫度(矽油+鋁粉)與流胞個數之關係

次數 / 流體溫度(℃)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均個數
29	14.1	15.2	14.8	13.9	14.1	14.4
34	14.2	15.8	15.9	16.0	14.1	15.2
38	1.38	15.8	15.4	15.2	14.5	15.0
43	15.6	15.9	17.5	15.5	15.1	15.9
47	16.4	16.5	17.2	16.3	17.4	16.8
52	18.6	18.5	17.5	16.5	16.8	17.6
55	20.1	19.6	19.4	18.2	18.7	19.2
59	19.3	19.5	18.6	18.7	20.1	19.2
62	20.5	20.1	20.7	20.6	21.1	20.6
65	21.4	20.6	20.3	21.2	20.5	20.8

單位:個數

(2)流體溫度(矽油+鋁粉)與單一個對流胞面積之關係

次數 流體溫度(℃)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	單一個對流胞面積(cm^2)
29	5.57	5.16	5.30	5.65	5.57	5.45
34	5.53	4.97	4.94	4.91	5.57	5.18
38	5.69	4.97	5.10	5.16	5.41	5.27
43	5.03	4.94	4.49	5.06	5.20	4.94
47	4.79	4.76	4.56	4.82	4.51	4.69
52	4.22	4.24	4.49	4.76	4.67	4.48
55	3.91	4.01	4.05	4.31	4.20	4.10
59	4.07	4.03	4.22	4.20	3.91	4.09
62	3.83	3.91	3.79	3.81	3.72	3.81
65	3.67	3.81	3.87	3.70	3.83	3.78

2.流體厚度1.25公分

(1)流體溫度(矽油+鋁粉)與對流胞個數之關係

次數 流體溫度(℃)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均個數
29	7.1	7.4	7.9	6.5	7.2	7.2
34	8.1	8.3	8.2	7.1	7.3	7.8
38	7.2	6.9	6.9	9.5	9.3	8.0
43	9.6	8.7	9.3	8.6	8.5	8.9
47	8.5	9.4	9.3	9.8	9.2	9.2
52	8.9	8.8	9.1	9.6	9.5	9.2
55	10.4	9.9	9.7	10.3	9.6	10.0
59	10.4	10.4.	9.8	9.9	9.6	10.0
62	10.2	9.6	10.6	9.6	9.1	9.8
65	9.6	10.4	10.2	10.3	11.1	10.3

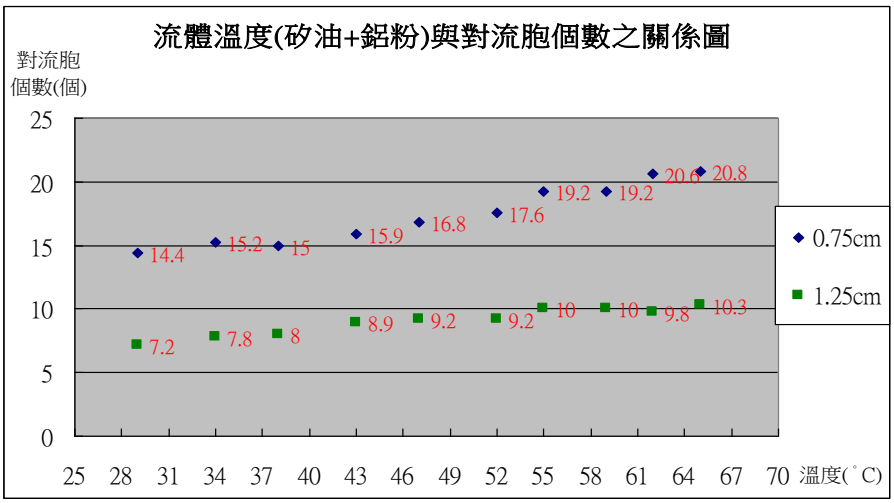
單位:個數

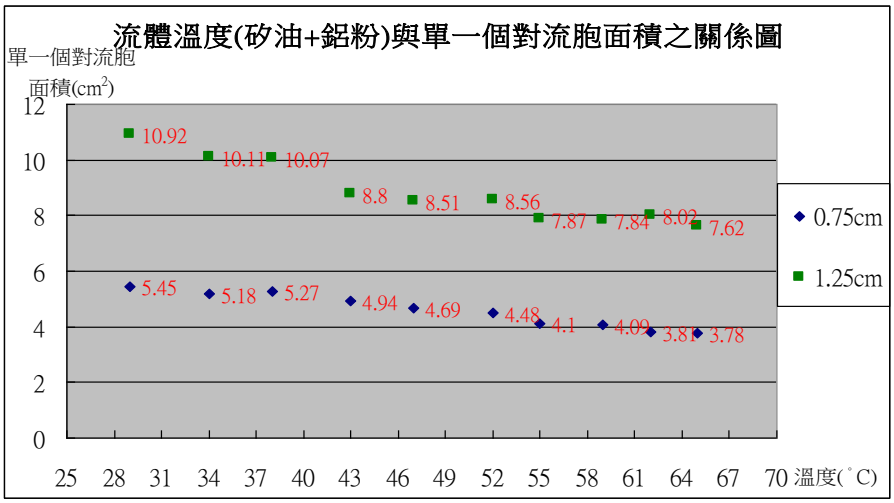
(2)流體溫度(矽油+鋁粉)與單一個對流胞面積之關係

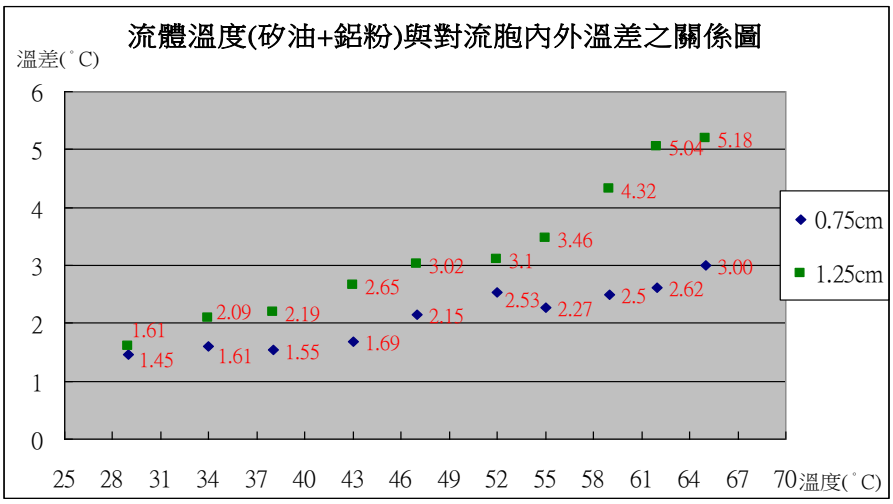
次數 流體溫度(℃)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	單一個對流胞面積(cm^2)
29	11.06	10.61	9.94	12.08	10.90	10.92
34	9.69	9.46	9.57	11.06	10.75	10.11
38	10.90	11.38	11.38	8.26	8.44	10.07

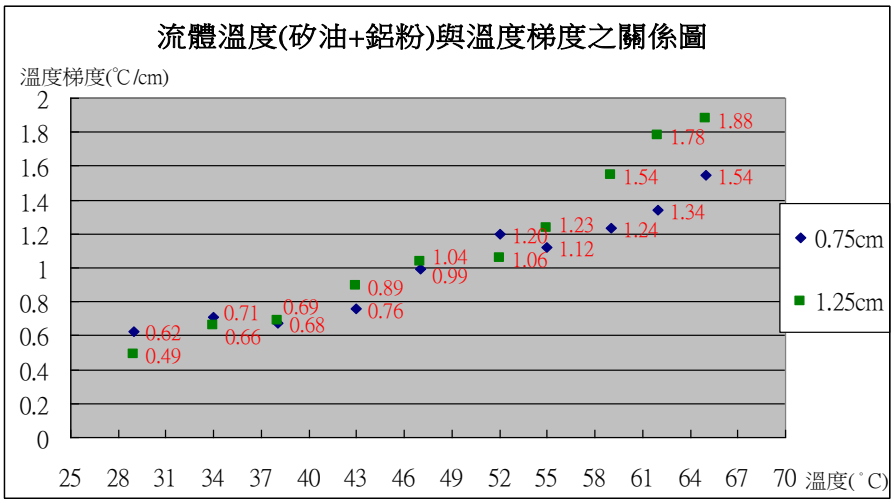
43	8.18	9.02	8.44	9.13	9.24	8.80
47	9.24	8.35	8.44	8.01	8.53	8.51
52	8.82	8.92	8.63	8.18	8.26	8.56
55	7.55	7.93	8.09	7.62	8.18	7.87
59	7.55	7.55	8.01	7.93	8.18	7.84
62	7.70	8.18	7.41	8.18	8.63	8.02
65	8.18	7.55	7.70	7.62	7.07	7.62

(二)關係圖









三、實驗結論:

(一)當流體溫度愈高時，對流胞的個數有微幅增加的趨勢，相對地，單一個對流胞面積則微幅地下降。

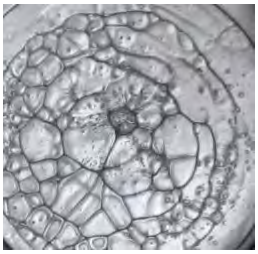
(二)流體溫度與對流胞內外溫差成正相關。

(三)當流體溫度愈高時，流體溫度與溫度梯度呈線性相關。

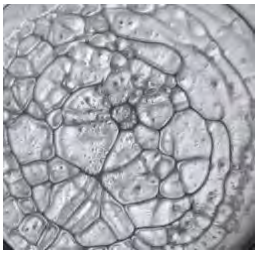
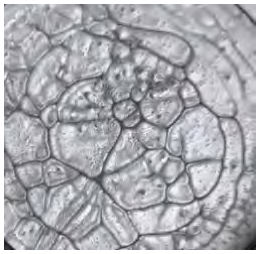
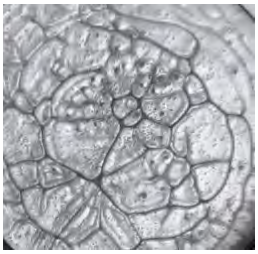
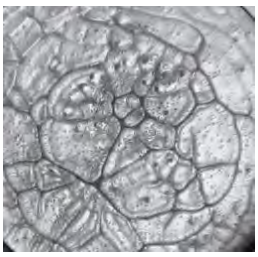
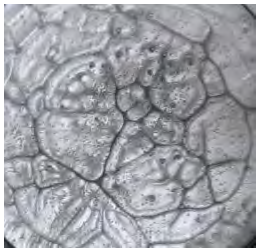
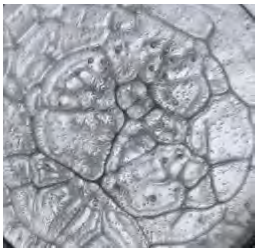
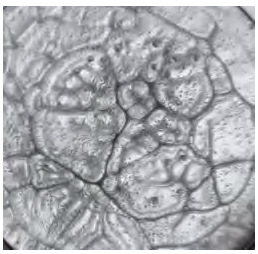
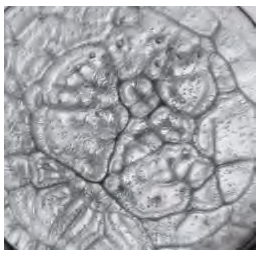
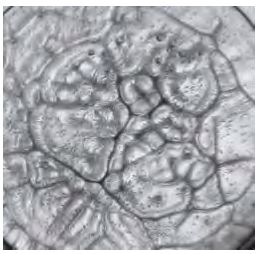
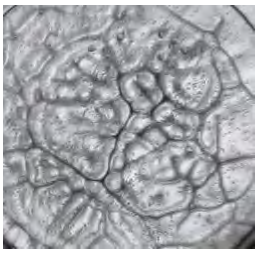
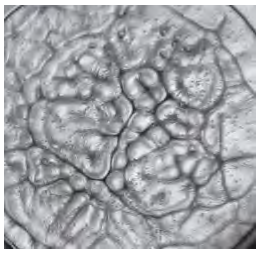
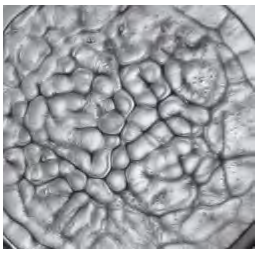
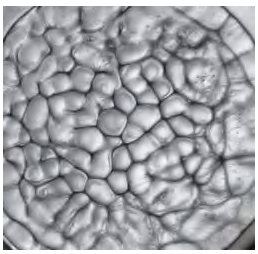
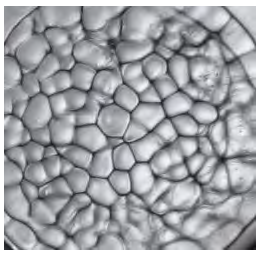
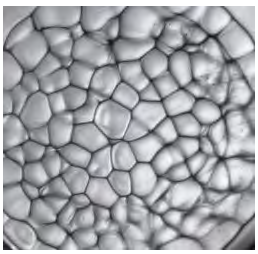
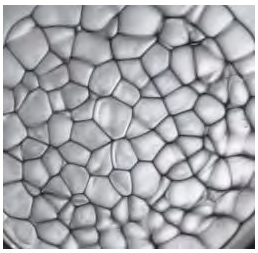
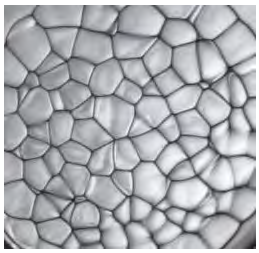
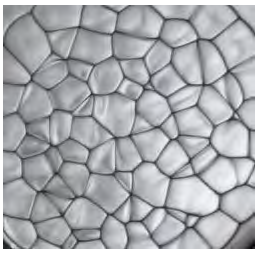
【實驗四】探討不同溫度的流體(矽油+鋁粉)混合後的對流模式和圖形

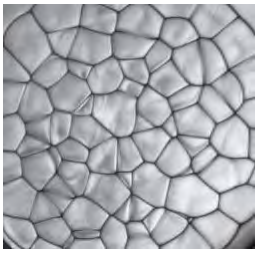
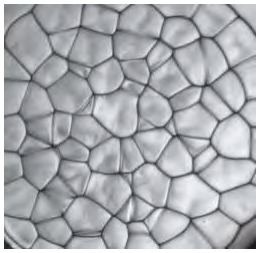
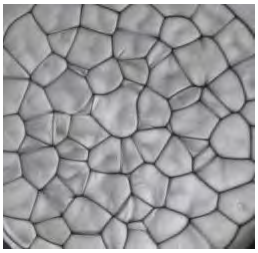
一、實驗數據:

(一) 高溫流體(約100.0-101.0℃)倒入低溫流體(約54.0-55.0℃)

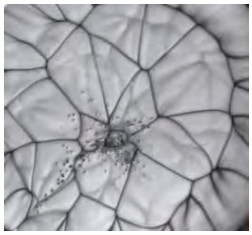
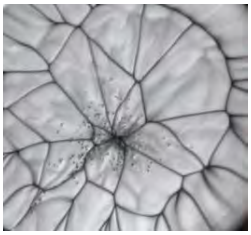
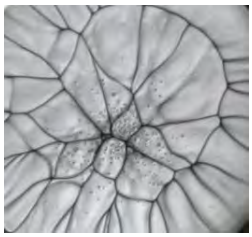
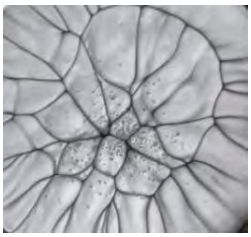
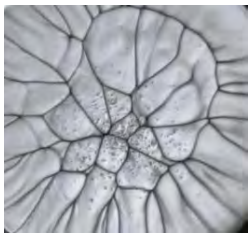
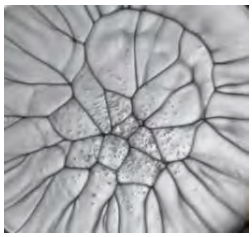
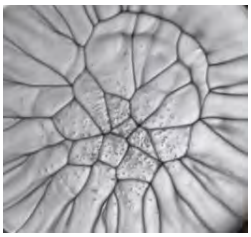
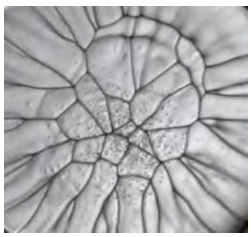
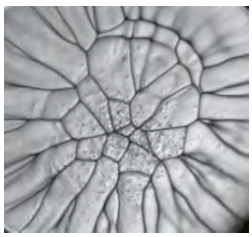
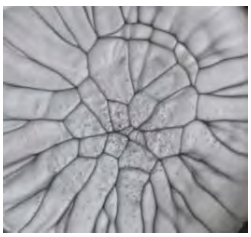
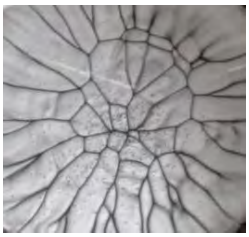
秒(s)	實驗圖片	秒(s)	實驗圖片	秒(s)	實驗圖片
0		7		14	

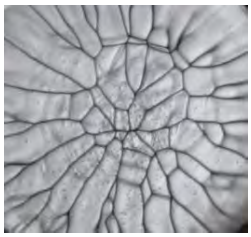
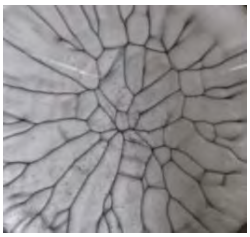
漏斗:將流體倒入後即移除

21		28		35	
42		49		56	
63		70		77	
84		91		98	
105		112		119	
126		133		140	

147		154		161	

(二)低溫流體(約18.0-19.0℃)倒入高溫流體(約64.0-65.0℃)

秒(s)	實驗圖片	秒(s)	實驗圖片	秒(s)	實驗圖片
0	漏斗:將流體倒入後即移除	6		12	
18		24		30	
36		42		48	
54		60		66	
72		78		84	

90		96		102	

※注意有特別註記秒數的實驗圖片之間的差別

二、實驗結論:

(一)當不同溫度的相同濃度流體(矽油+鋁粉)倒入平底容器時，會影響原平底容器中的流體對流模式。

(二)高溫流體倒入低溫流體時，會增加整個對流系統的能量，使得整個系統向外擴張，並且迅速地形成似六邊形的對流胞，之後整體對流系統趨向穩定，對流胞圖形變化小。

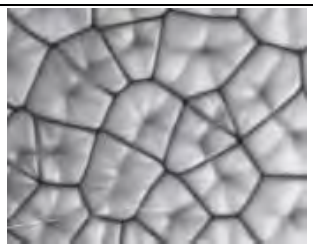
(三)發現高溫流體倒入低溫流體時，對流胞對流的速度會比原先較低溫流體的流速快。

(四)低溫流體倒入高溫流體時，會使整個對流系統向低溫流體的加入處壓縮，且外部對流胞呈現圓筒狀，不為理想中的對流胞圖形，從上方俯視為放射狀地排列。

【實驗五】探討外加物體(金屬圓柱)對於流體(矽油+鋁粉)對流模式和圖形的影響

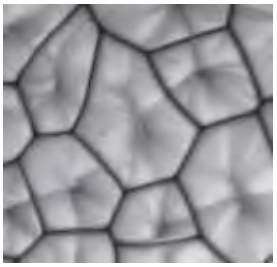
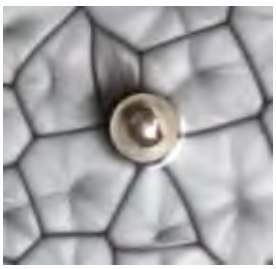
一、實驗數據:

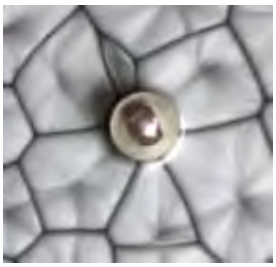
(一) 外加物體溫度高於流體溫度<*注意金屬圓柱周圍對流胞增漲的情形*>

秒數(s)	實驗圖片				
0		5		10	
15		20		25	
30		35		40	

45		50		55	
60					

(二) 外加物體溫度低於流體溫度<*注意金屬圓柱周圍對流胞消失的情形*>

秒數 (s)	實驗圖片				
0		6		12	
18		24		30	
36		42		48	

54		60		66	
72		78		84	

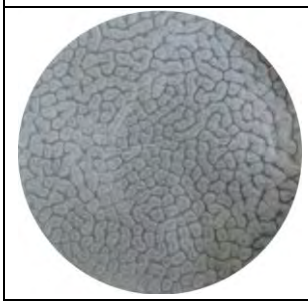
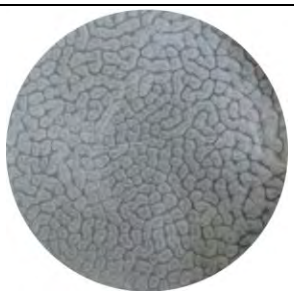
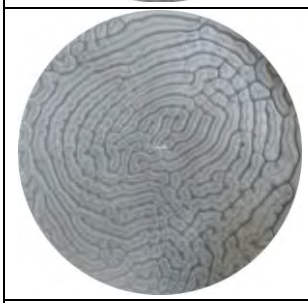
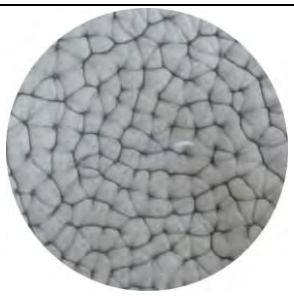
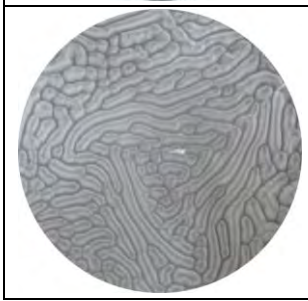
二、實驗結論:

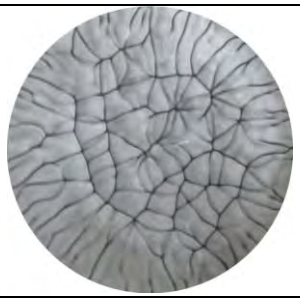
(一)當外加物體的溫度高於流體溫度時，外加物體所放置的位置處，即會產生出一個新的對流胞，或使放置處之對流胞面積變大。

(二)當外加物體的溫度低於流體溫度時，外加物體所放置的位置處，即會變成黑線的交點(對流下降處)，或使放置處之對流胞變小而消失。

【實驗六】探討油酸的對流胞圖形

一、實驗數據:

實驗圖片	實驗圖片說明	實驗圖片	實驗圖片說明
	鋁粉加入油酸後，平穩地將平底容器置入鐵板上，**未經攪拌**所呈現出來的對流胞圖形。		其流體厚度為0.5cm。
	**同心圓攪拌方式**		其流體厚度為1.0cm。
	**三角形攪拌方式**		其流體厚度為1.5cm。

			其流體厚度為2.0cm。

二、實驗結論:

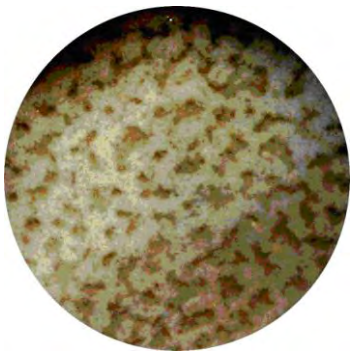
(一)由於油酸的黏滯力較小，流動性較大，對流所產生的圖形較不穩定，故無法得到一個穩定似六邊形的對流胞圖形。

(二)<u>攪拌棒攪棒的方向會影響對流胞圖形的呈現</u>。

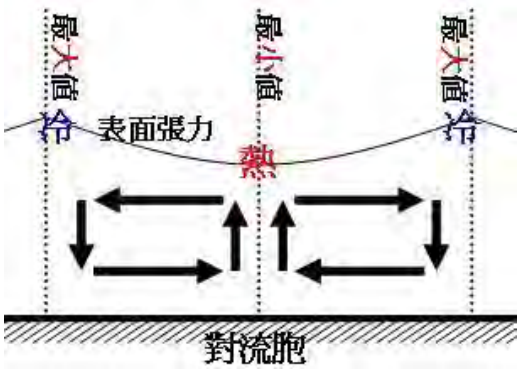
(三)流體厚度(油酸+鋁粉)愈大時，流動性更加明顯，故無法看到穩定的瑞利貝納爾對流胞。

陸、討論

一、從味噌湯的沉澱圖形(流體厚度1.0公分)(經過亮度調整)，圖中味噌湯的沉澱處為對流下沉處，反之則為對流上升處，圖形結構跟矽油加鋁粉所產生的對流胞結構也相似。我們可以推得形成特殊的味噌湯沉澱圖形與熱對流確實有很大的關係。

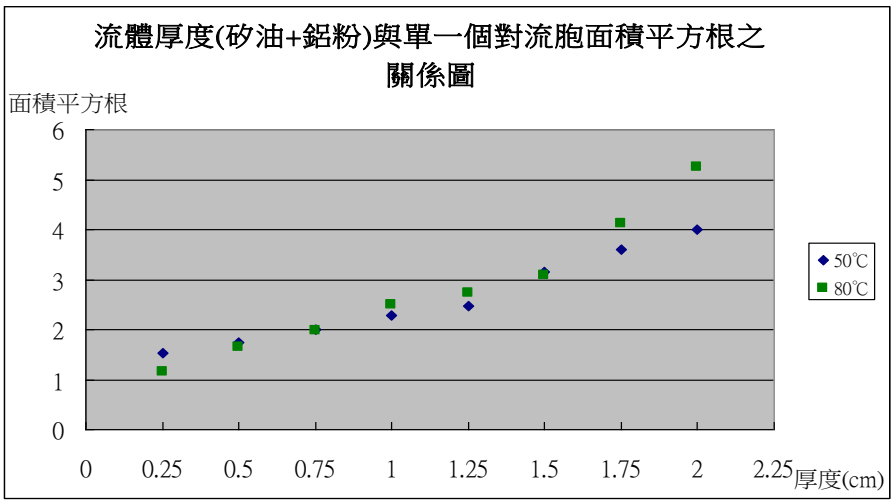


二、從實驗二關係圖，明顯得知厚度與單一個對流胞面積成正相關且具有較高的相關係數R^2值(大於0.9)。我們推測可能與表面張力有關。當流體厚度愈大時由於熱傳導的關係，流體厚度較大的實驗組，其表面的流體溫度較低(如下圖所示)，表面張力也較大，所能包覆的對流胞同樣也比較大，因此所呈現出來的單一個對流胞面積，則會隨著流體厚度的增加而變大的趨勢。



我們也發現瑞利數Ra公式(如下圖)，分子的部份:「 h 」為特徵長度(對流胞的厚度)。當Ra數值超過一個臨界值或低於一個臨界值時，則不會形成穩定的瑞利貝納爾對流胞。因此在我們的實驗中，同溫下(忽略流體厚度對整個流體表面溫度的影響)，流體厚度愈大(超過2.0公分)時，對流胞所呈現的圖形較混亂且不穩定。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T h^3}{\nu\alpha}$$



由上圖，我們可知單一個對流胞面積平方根與厚度有高度相關性。

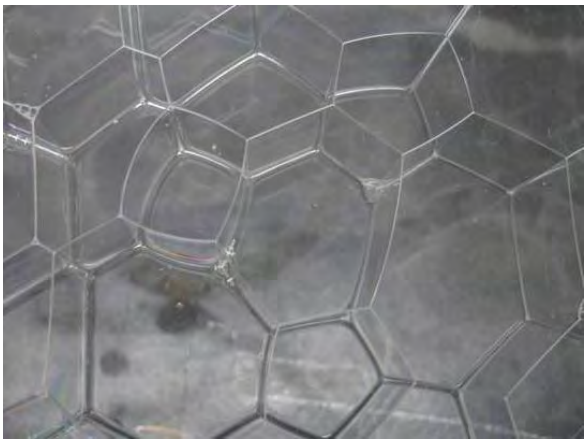
三、從實驗三中，我們發現當溫度愈高，單一個對流胞面積有變小的趨勢。而以下為我們的猜測及解釋:

(一)溫度愈高，同一厚度下的流體表面張力愈小，所能包覆的對流胞也較小。

(二)溫度愈高，平底鍋的熱點變多。假設一個熱點能夠產生固定量的對流胞，那麼溫度愈高，整個平底鍋的熱點也較多，因此單一個對流胞的面積在分配之下也變少。

(三)如果把實驗照片中黑色實線的部份(對流下沉區)視為一種能量的釋放或轉換，當溫度愈高，則對流系統存在著較多的能量待釋放，因此單一個對流胞面積在分配之下也變小。

四、大部分對流胞形狀為六邊形，這個問題是需許多數學演算才能證明。我們試著以別的角度來討論這個問題。它也許與表面張力有關，因表面張力是會令表面積縮成最小，生活中的肥皂泡也是如此(如下圖所示)。對流胞中溫度較高的液體從中央升起，部份的熱由表面散逸，冷卻的液體便從對流胞邊緣下沉，，因此液體表面溫度分布並非一致。一般而言，表面張力是隨溫度的升高而減小，對流胞中央的溫度較高、表面張力較小，對流胞邊緣溫度較低、表面張力高，因此產生一力量差，其力的方向 是從對流胞的中央向外放射，所以對流胞的六邊形結構可能是由表面張力差所產生。六邊形是由於表面張力差所產生成的，鉛直方向對流則與密度差有關。這是我們目前對於對流胞形狀的形成的看法，尚待理論與實驗做更進一步的證明。



五、由以下的瑞利數的公式中，可以推得油酸所呈現的對流胞圖形，不是理論中的瑞利貝納爾對流胞，因為油酸的黏滯係數較低，所以當流體厚度相同時，鋁粉加矽油與鋁粉加油酸的對流胞圖形有明顯差別。從瑞利數Ra的公式中，分母的部份:「ν」即為動黏滯係數(黏滯係數/流體密度，此實驗中流體密度雖然不一樣但相差甚小，沒有明顯的影響)。油酸的Ra數值超出臨界值，因此無法產生穩定六邊形的瑞利貝納爾對流胞。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T h^3}{\nu\alpha}$$

六、我們設計出來的實驗裝置有些地方有待改進:

(一)雖然我們所使用恆溫槽，但當我們所設定溫度為80.0℃，恆溫槽內部的水實際溫度可能介在79.0~81.0℃，這是一個使實驗會有微小誤差的問題。

(二)我們使用的平底容器，為一般家用的透明平底鍋，直徑並不是很大，所以會有邊界效應的影響，儘管我們使用PhotoImpact12擷取拍攝照片中間的部份，但我們不能確定中間部份是否有邊界效應的存在。

(三)由於恆溫槽內部有一個噴口裝置，會導致恆溫槽內部水流不穩定，儘管我們用鐵板將水流的強度降低，避免我們的平底容器產生巨烈晃動，但恆溫槽內部的水還是在動，我們無法確定水流的不平穩導致平底容器微幅震動是否會對對流胞的形成有影響。

我們期許未來可以想出更好的實驗裝置，以避免上列敘述的問題。

柒、結論

1.確定形成特殊的味噌湯沉澱圖形與熱對流確實有很大的關係。
2.大部分對流胞的形狀為六邊形，使整個對流系統趨向於穩定。
3.流體比例(矽油+鋁粉)對單一個對流胞面積與對流模式沒有明顯關係。
4.流體厚度(矽油+鋁粉)與單一個對流胞面積成正相關趨勢，且與前置實驗I中的實驗結果吻合，且流體的厚度與單一個對流胞面積平方根有高度相關。
5.流體溫度(矽油+鋁粉)愈大，對流胞個數增加，單一個對流胞面積愈小。
6.單一個對流胞內外溫差與流體厚度、流體溫度成正相關趨勢。
7.單一個對流胞的溫度梯度與流體厚度有正相關的趨勢，與流體溫度則有高度相關。
8.不同溫度的流體混合(矽油+鋁粉)可改變整個對流系統的大小，且確定對流胞的形成與特定區域的能量有關係。
9.使用外加物體(金屬圓柱)可以改變對流的模式或改變對流上升或下降的位置。
10.由於油酸黏滯性較低，流動性較大，對流所產生的圖形較不穩定，故無法產生六邊形的瑞利貝納爾對流胞。

捌、參考資料及其他

【未來展望與其應用】

1.我們希望有方法、技術能夠研究對流胞對流的速度、與實際對流胞內部的溫度分布。
2.利用對流胞的概念進一部地研究太陽表面的米粒組織。
3.地球內部一地函也是一個對流的例子。人類可以運用地震波等技術探討地函內部熔融的對流狀態，再加以分析，避免突如其來的災害帶來極大影響。

【參考資料】

1.吳國賓(2006)。我的味噌湯-微小顆粒在液體中沈澱模式之觀察研究。臺灣2006年國際科學展覽會。
2.吳文忠(2007)。近鄰界瑞利數Ra下之自然對流模擬計算。國立成功大學航空太空工程研究所博士論文。
3.劉漢濤,常建忠,安康,蘇鐵熊(2010)。熱對流條件下雙顆粒沉降的直接數值模擬。物理學報 ACTA PHYSICA SINICA
4. M. Pedersen(2004)。Rayleigh-Bénard Convection。
5. Dhananjay, G. S. Agrawal , R. Bhargava(2010)。Rayleigh-Bénard Convection in nanofluid。Department of Mathematics, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee-247667 India。

【評語】040103

1. 簡易鋁粉加矽油之混合體得以調配液體黏滯濃度，來探討 Domain Wall 能量，應可再善加利用。

2. 建議可將溫度、濃度對 Domain Wall 能量的影響，探討其物理量。