# 2016 年臺灣國際科學展覽會
# 優勝作品專輯

作品編號　**180007**

參展科別　地球與環境科學科

作品名稱　對流胞狀雲的實驗模擬

得獎獎項　大會獎：一等獎


就讀學校　國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師　洪逸文

作者姓名　陳昱宏、陳世豪



關鍵字　胞狀雲、開放胞、封閉胞

# 作者簡介

**陳昱宏**

大家好，我是陳昱宏，很開心能參加這屆的國際科展。從小到大就超喜歡探索大自然現象的我，高中時時常跟著地科專研去野外考察，深入發掘不同的地質特色！我也十分關心天氣的變化，除了研究不同的天氣雲圖並且跟同學討論其中的奧妙外，還會三五好友聚集在老師旁提問成了個小學堂呢！我喜歡研究時討論的刺激感，因為此時可以激發自己更大的潛能，活化自己沉睡的腦細胞！

**陳世豪**

大家好，我是陳世豪。從小，我就對科學很有興趣，不論是科普書籍介紹的小知識，或是自然課動手實作，都令我開心不已。高中之後，參加專題研究課程，開始了這次的研究，雖然並非一路順遂，我卻更深入了解科學研究的精神。很高興這次能參加國際科展，讓我能跟來自各地的朋友們交流切磋，更增進自己對科學的認識和熱忱。希望以後我能繼續精進，從事與科學相關的研究或工作。

# 摘要

當冷氣團從大陸移動到海面時，常會形成一些特殊的雲，常見的有雲街與胞狀雲。胞狀雲因其成雲機制與分布差異又可分為開放與封閉的形式。本實驗藉味噌湯不同加熱條件下所產生的圖形模擬大氣中胞狀雲的對流，並探討不同溫度與厚度下，味噌湯的加熱對流圖形差異與大小變化。

實驗發現味噌湯在低溫加熱時，其形成的圖形較類似開放胞，我們認為是溫度較低時，流體下沉的力量較向上對流的力量強，與形成開放胞的條件相同；高溫時，其圖形較類似封閉胞，我們認為是溫度較高時，流體向下對流的力量較向上的力量弱，符合形成封閉胞的條件。且流體厚度增厚時，所形成的對流胞大小也會增大。另外，流體在旋轉狀況下所形成的對流圖形更接近大氣胞狀雲的圖形。

# Abstract

There is a special type of clouds often form when cold air mass from the continent moves toward the surface of ocean and we call it cellular cloud. Due to its different forming mechanisms and distributions, it can be organized into patterns of open cells and closed cells. In this experiment, we use miso soup to simulate the formation of cellular cloud to observe the different patterns including convectional size and rate in different thicknesses and temperatures.

We found that when miso soup is heated at low temperature, it will form into open cell system. On the contrary, when heated at high temperature, it will form into closed cell system. At low temperature, the force of downwelling fluid is stronger than the upward direction, similar to the way open cell system forms. Conversely, at high temperature, the force of downwelling fluid is weaker than the upward direction, and its forming process is similar to closed cell system. We also found that when the thickness of fluid grows, that is, as the volume of convection grows, the size of cell will increase. Additionally, the convection pattern of fluid becomes more familiar to the cellular clouds when it is rotating.

# 壹、研究動機

之前在上有關觀察衛星雲圖的課程時，偶然發現了一種形狀特別的雲，叫做胞狀雲。由於在課本或是科普雜誌中鮮少被提及，我們就很好奇地再深入搜尋了解，發現胞狀雲與瑞利本納胞(Rayleigh – Bénard convection)息息相關，其中牽扯了許多熱量轉換的過程，而轉換中的熱量又使胞狀雲出現開放式與封閉式的形態，更是胞狀雲的一大特色。

有一次我們在園遊會中，發現快見底的味噌湯也出現類似胞狀雲對流的圖形。在仔細地觀察後，發現味噌會在水體對流上升處聚集，可以表現出水體上升對流處的分布，因此我們嘗試以流體的對流來模擬大氣中胞狀雲的形成。

# 貳、研究目的

一、以味噌模擬大氣中胞狀雲在不同厚度中對流的圖形差異。

二、以味噌模擬大氣中胞狀雲在不同溫度中對流的圖形差異。

三、模擬冷卻效應對大氣中胞狀雲的影響。

四、模擬流體在旋轉狀況下所形成的對流圖形差異。

五、以實驗合理說明胞狀雲在大氣中的成因。

# 參、研究設備及器材

一、器材

(一) 味噌　　(二) 平底鍋

(三) 腳架、檯燈　　(四) 電磁爐

(五) 數位相機、錄影機　　(六) 攪拌棒

(七) 電子秤　　(八) 鐵尺

(九) 探針溫度計　　(十) 暖暖包

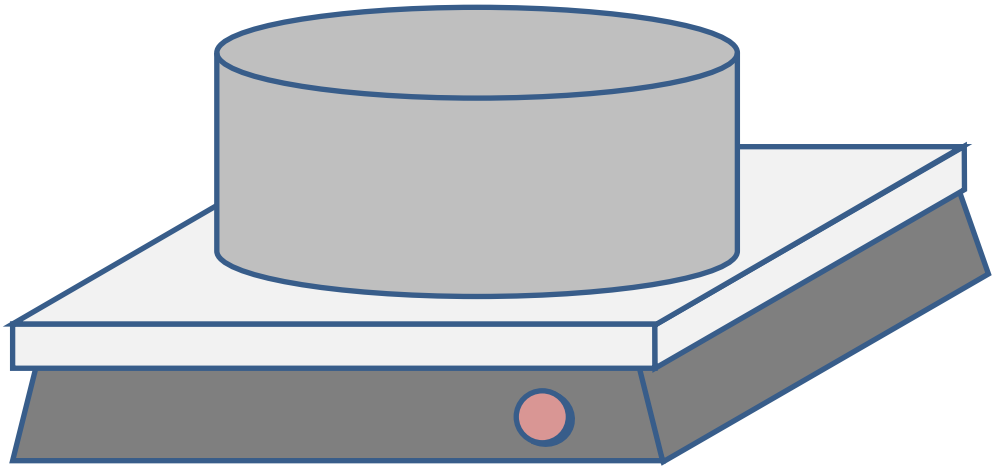
(十一) 冰塊　　(十二) 旋轉台

(十三) 小風扇　　(十四) 電腦程式 image J

二、實驗裝置：

(一)加熱部分實驗裝置

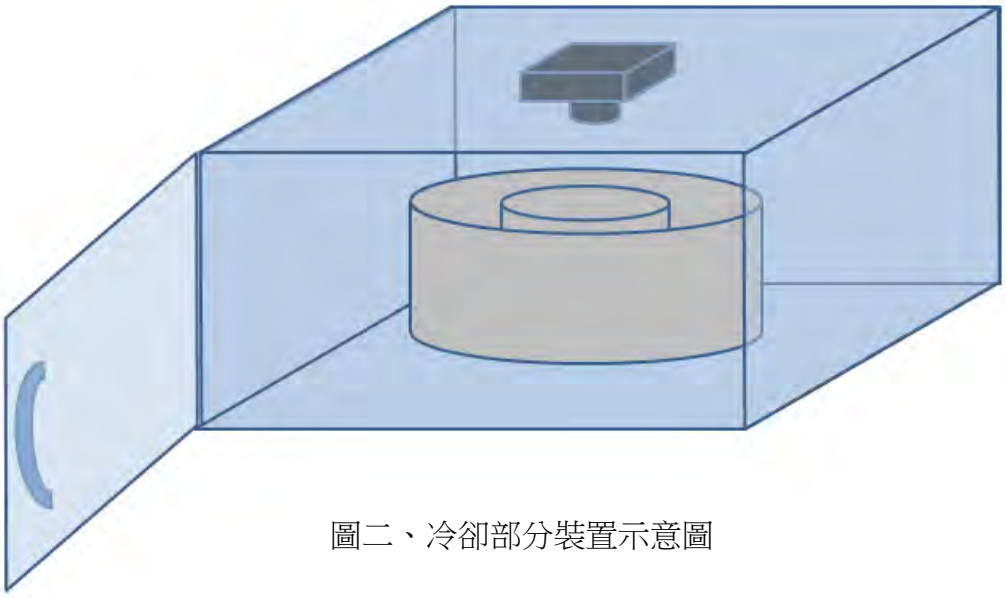
利用可以提供穩定平均熱源的電磁爐，加熱盛裝味噌湯的平底鍋，模擬大氣中胞狀雲在不同溫度與厚度下對流圖形的差異。



圖一、加熱部分裝置示意圖

(二)冷卻部分實驗裝置

將隔水加熱達到相同溫度的內外鍋一同置入冷凍庫，觀察在加強液面上方冷卻後的流體對流圖形與僅加熱底部所形成的圖形兩者間的差異。



圖二、冷卻部分裝置示意圖

(三)旋轉部分實驗裝置

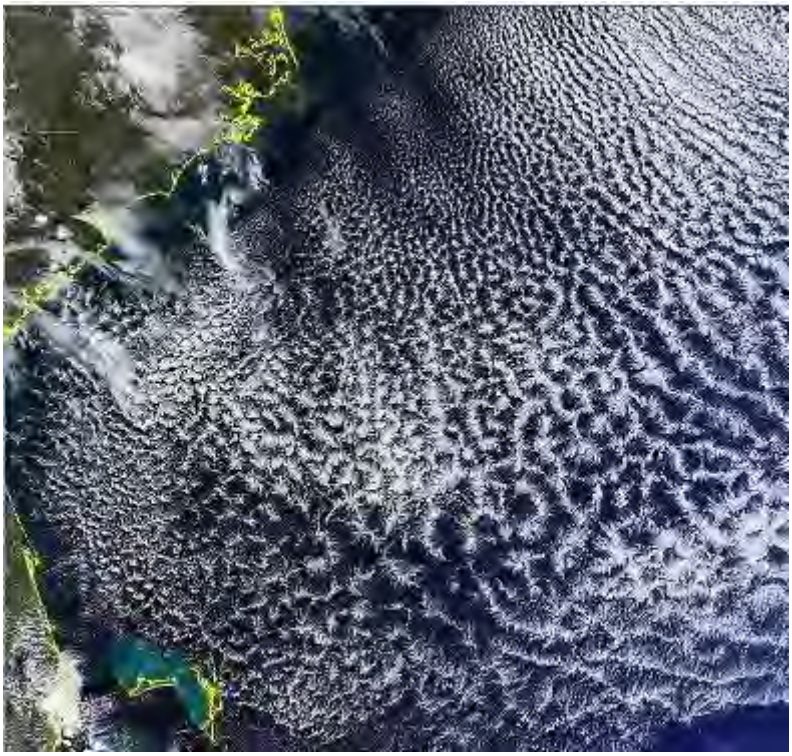
我們將電磁爐與盛裝味噌湯的平底鍋一同放在旋轉台上，並將相機架設於平底鍋的正上方，且以相同的速度一同旋轉。為了過程中利於攝影觀察，架設了提供充足光線的座燈與避免霧氣影響攝影的小電扇。

圖三、旋轉部分裝置照片

# 肆、研究過程或方法

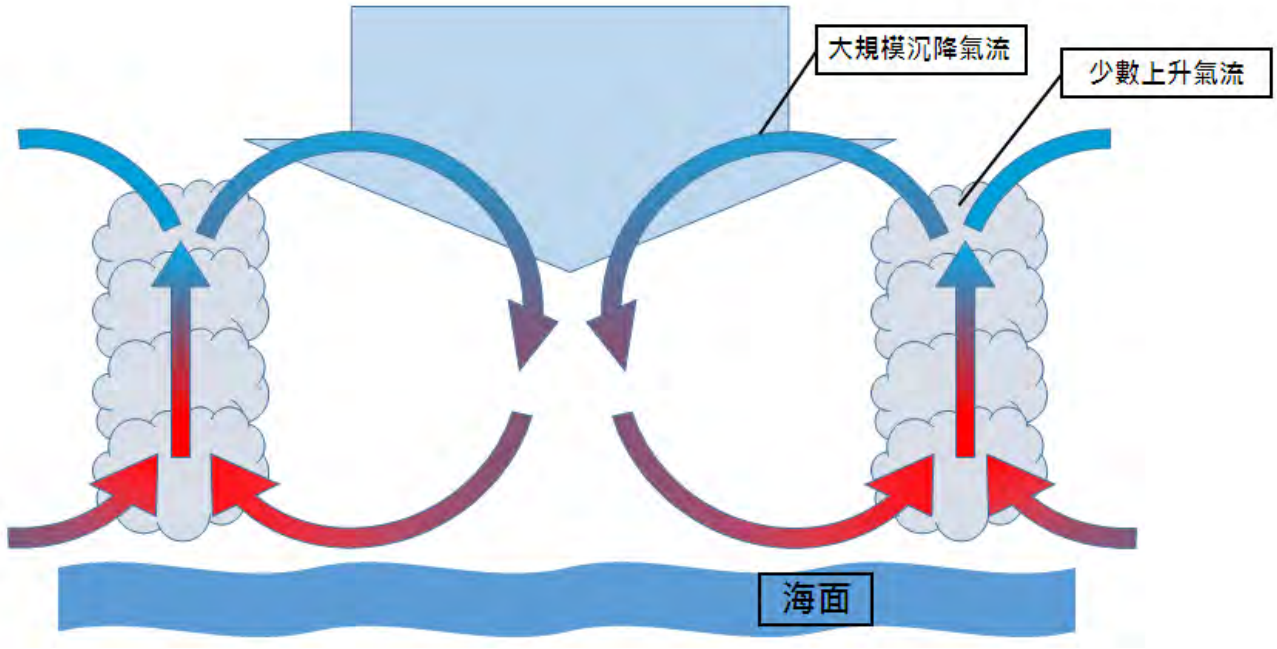
一、胞狀雲介紹與模擬

衛星影像上，常常可以在海面觀察到大面積分布的胞狀雲。胞狀雲以蜂窩狀的雲朵排列為特徵，又可分為「開放胞」與「封閉胞」兩種。前者邊界有雲，中央無雲；後者邊界無雲，中央有雲。胞狀雲可以視為是瑞利本納胞(Rayleigh－Bénard convection)在大氣中的表現形式。



圖四、美東海岸的胞狀雲對流 資料來源：NASA

瑞利本納胞是指當流體底部被加熱到與流體頂部有一定程度的溫差，且流體下方由加熱所獲得熱量的速率大於熱向外水平傳導速率時，受熱部分的流體因為溫度較高、密度較小所以上升，而表層流體因遠離熱源，且相對於底層的流體溫度較低導致其密度變小，所以下降，由於下降的力量不敵不停獲得熱量的上升流動，因此僅能在散布在上升處的周圍。因為流體上下的密度不同，而產生外觀具蜂窩狀的對流胞，稱作瑞利本納胞。



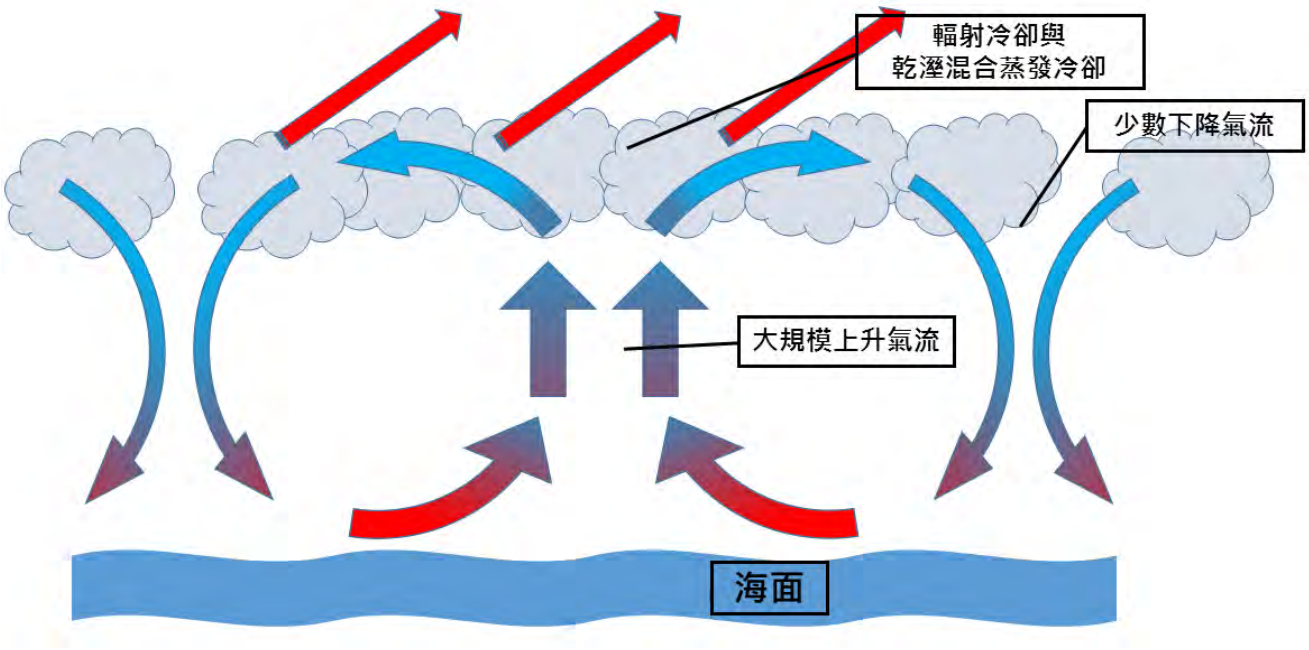

圖五、大氣中的開放胞示意圖

<u>開放胞</u>：

寒潮爆發時，冷空氣會被推送到較溫暖的水體上方。此時近地面混合層的空氣仍然較冷，空氣的大規模運動仍維持下沉趨勢。僅有底部空氣會獲得水面的熱量與水氣通量，會因受熱而向上升。由下方獲得的熱量與水氣是驅動開放胞狀雲形成的動力。但因下沉力量整體大於上升的力量，因此上升僅占較小的面積，且上升氣流受下沉氣流引響，形成外觀具有環狀排列。

另外，因寒潮爆發形成的冷空氣平流會穩定的下沉，導致強烈的下沉逆溫，此層逆溫會限制了下方混合層成雲的高度。隨著時間增長與離岸距離增加，混合層的熱量與水氣量皆增加，這導致混合層增長，對流的發展導致逆溫層被推升。

小結：開放胞的上升處會於胞的邊界處出現，雲也伴隨空氣上升而於邊界處出現，形成邊界有雲中央無雲的形狀。

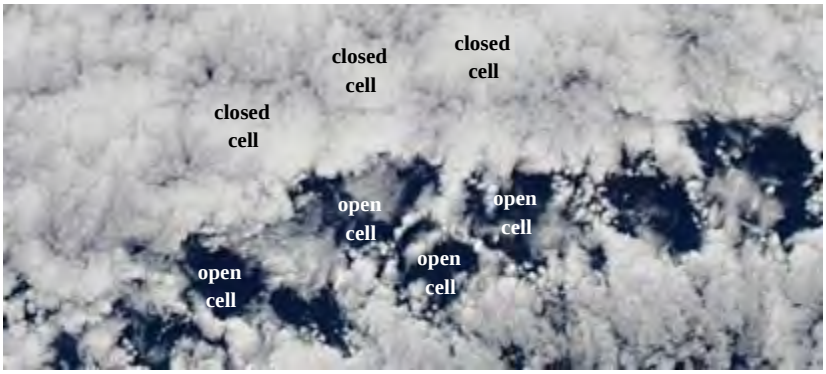



圖六、大氣中的封閉胞示意圖

<u>封閉胞</u>：

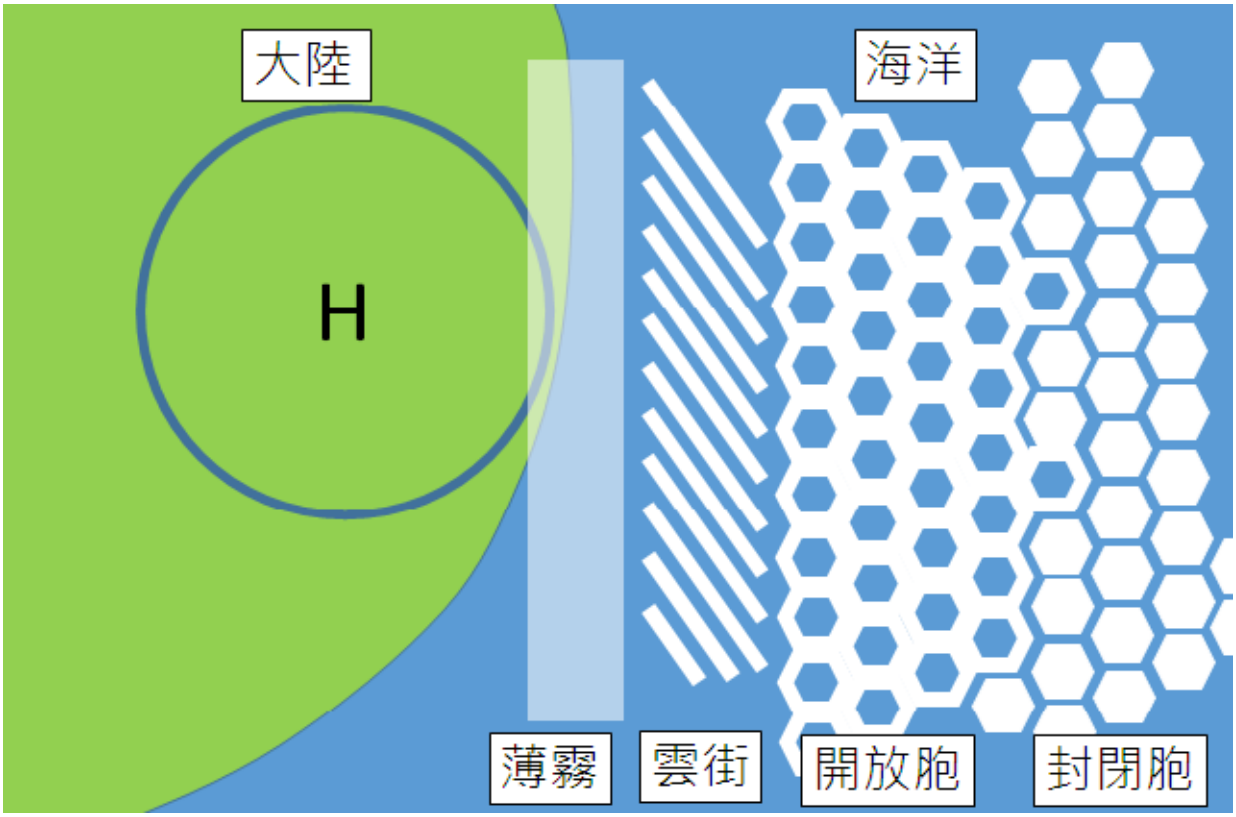
當冷空氣在海面上經過一段時間後，更多的熱量及濕氣傳入，且混合層更加成長。此時混合層的溫度已經較高，具有較充足的上升對流動力。若要形成封閉胞，最關鍵的因素是雲頂的冷卻效應，包含雲頂輻射冷卻導致空氣溫度較低而下沉。另外，雲頂的飽和水氣與高空乾冷空氣混合後也會造成溫度下降。這些冷卻效應導致此層的穩定以及下沉的運動，驅動了封閉胞的形成。由於此層下沉動力小於上升動力，下沉占較少的水平截面積，上升運動占較大截面積，促使下沉的氣流沿大範圍上升氣流邊緣環狀下切。

小結：封閉胞的下降處會於胞的邊界處出現，無雲處也伴隨空氣下降而於邊界處出現，形成邊界無雲中央有雲的形狀。




圖七、開放胞與封閉胞並存之衛星影像。資料來源：wattsupwiththat.com

冷氣團出海後，途中雲霧的分布示意圖與說明：




圖八、開放胞與封閉胞分布位置俯視示意圖

一般而言，開放胞會出現在距離陸地較近的海面上，而封閉胞則會出現在距離陸地較遠的海面上。空氣離岸的時間較短、距離岸邊較近時，由於大範圍運動仍為沉降，僅下方的海面提供熱量與水氣，故形成開放胞。空氣離岸較久，距岸較遠時，已經受到足夠的熱量與水氣，故上升作用較旺盛，由雲頂輻射與乾溼混合的效應驅動封閉胞形成。

二、研究步驟

<u>胞狀雲的實驗模擬簡介</u>：

我們利用較薄的水體對流產生瑞利本納胞(Rayleigh – Bénard convection)的實驗，下方的熱源對水加熱以模擬溫暖的海表對空氣輸入熱量，並加入味噌，觀察對流期間上升處與下降處分布的情形。

由實驗我們發現味噌會於水體對流上升處聚集，而不會於對流下降處聚集。此狀況恰與胞狀雲的成雲處相符，故以下實驗皆利用味噌的對流圖型來模擬胞狀雲的形狀。

(一)以味噌模擬大氣中胞狀雲在不同厚度中對流的圖形差異

(二)以味噌模擬大氣中胞狀雲在不同溫度中對流的圖形差異

1. 將 25g 味噌加入 1000ml 水中配成味噌湯
2. 將味噌湯舀入鍋中，使液體厚度為 10mm
3. 以電磁爐加熱味噌湯，使溫度達到攝氏 30 度
4. 觀察味噌湯的圖形並拍照記錄
5. 調整溫度至攝氏 40 度、50 度、60 度至 100 度再拍照記錄
6. 調整液體厚度，使液體厚度為 9、8、7、6、5mm，重複步驟 3~5

(三)同一流體中各部份具有不同厚度的對流圖形差異。

1. 將 25g 味噌加入 1000ml 水中配成味噌湯
2. 將味噌湯舀入鍋中，墊高容器一側，使液體厚度一側為 10mm 一側為 5mm
3. 以電磁爐加熱味噌湯，使溫度達到攝氏 40 度
4. 觀察味噌湯的圖形並拍照記錄
5. 調整溫度至攝氏 100 度再拍照記錄

(四)模擬同一流體以不同區域加熱時體的對流圖形差異。

1. 將 25g 味噌加入 1000ml 水中配成味噌湯
2. 將味噌湯舀入鍋中，使液體厚度為 7mm
3. 以電磁爐加熱味噌湯，使溫度達到攝氏 40 度
4. 將流體擺於一半為暖暖包，一半為冰塊的水平平面上
5. 觀察味噌湯的對流圖形並拍照記錄

6. 調整流體溫度為攝氏 100 度，重複步驟 4~5

(五) 模擬冷卻效應對大氣中胞狀雲的影響

1. 將 20g 味噌加入 1000ml 水中配成味噌湯
2. 將味噌湯舀入內鍋中，使液體厚度為 10mm
3. 將內鍋放入裝有 70 度熱水的外鍋中
4. 以電磁爐加熱鍋，使內鍋與外鍋溫度皆維持於攝氏 70 度
5. 將內鍋與外鍋放入冷凍庫中，以錄影機記錄其降溫過程中的圖形
6. 當對流圖型已不再改變，給予適當攪拌，並記錄其降溫過程中的圖形

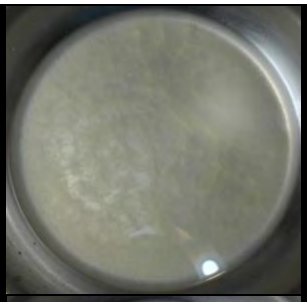
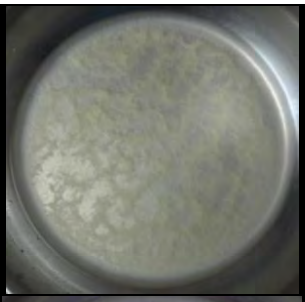
(六) 模擬流體在旋轉狀況下所形成的對流圖形差異。

1. 將 50g 味噌加入 1000ml 水中配成味噌湯
2. 將味噌湯舀入鍋中，使液體厚度為 7mm
3. 以電磁爐加熱味噌湯，使溫度達到攝氏 40 度
4. 將流體擺於旋轉台上，以每分鐘 3 次的角頻率旋轉
5. 將錄影機同樣架於旋轉台上，對流體的對流過程錄影
6. 調整轉速為每分鐘 8 次、13 次、18 次，重複步驟 4~5
7. 調整流體溫度為攝氏 100 度，重複步驟 4~6

# 伍、研究結果

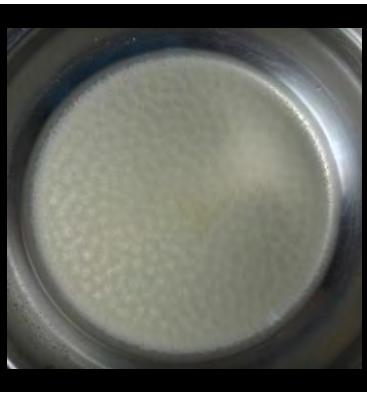
一、以下呈現不同溫度與厚度中對流的圖形差異的模擬結果

| 溫度(℃)/厚度(mm) | 30 | 40 | 50 | 60 |
|---|---|---|---|---|
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

| 溫度(℃)/厚度(mm) | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|
| 5 |  |  | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

二、液體厚度與對流胞面積變化的模擬結果

(一)流體厚度愈厚，單一對流胞對流區域愈大。

| 5mm 40˚C | 6mm 40˚C | 7mm 40˚C |
|---|---|---|
| |  | |
| 8mm 40˚C | 9mm 40˚C | 10mm 40˚C |
| | | |
| 5mm 100˚C | 6mm 100˚C | 7mm 100˚C |
| | | |
| 8mm 100˚C | 9mm 100˚C | 10mm 100˚C |
| | | |

表二、水在不同厚度中的對流圖形比較

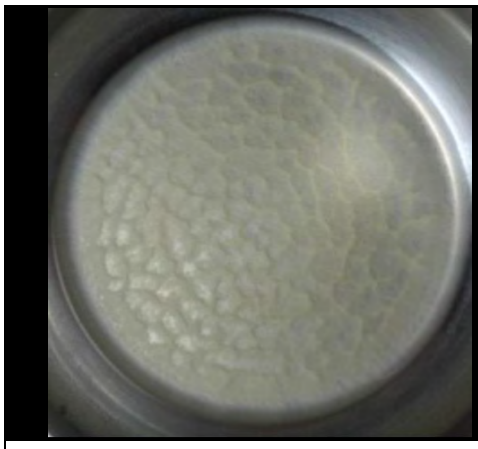
(二)傾斜中的流體所出現的對流圖形

同一流體各部份具有不同厚度時，流體厚度較厚處，形成的胞較流體厚度較薄的地方大。參照上一實驗結果可知，無論是否為同一對流系統，流體較厚處的對流胞都較大。

圖九、同一流體中各部份具有不同厚度的對流圖形

三、溫度高低與對流胞形狀模擬結果

(一)溫度低時，流體的對流圖形類似開放胞；溫度高時，流體的對流圖形類似封閉胞

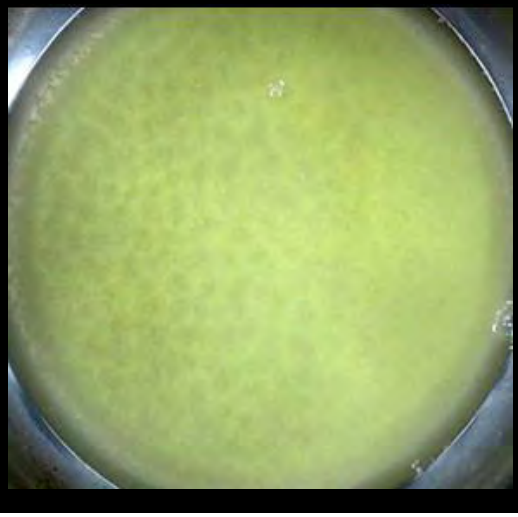
| | |
|---|---|
|  | |
| 10mm 40˚C | 10mm 100˚C |

表三、流體在不同溫度中對流圖形的比較

(二)模擬同一流體在不同供熱條件下其對流圖形的差異

1.在開放胞形成時(攝氏 40 度)可見到較暖區(左區)對流圖形較明顯，而較冷區(右區)則不明顯

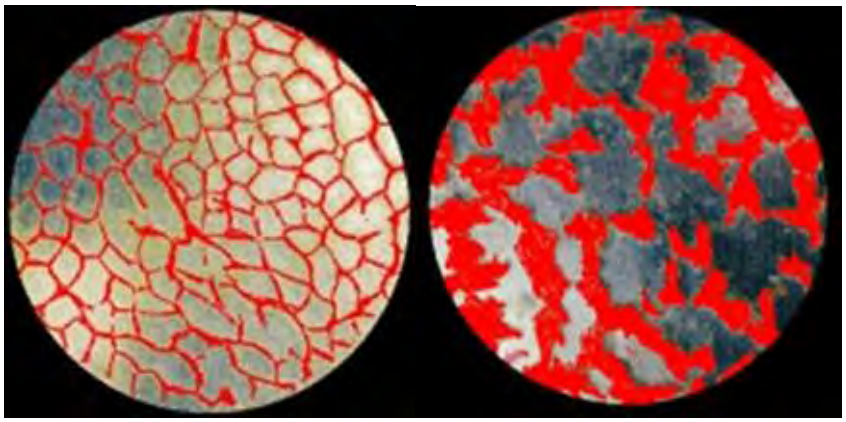
2.在封閉胞形成時(攝氏 100 度)可見到較暖區(左區)對流圖形較明顯，而較冷區(右區)則不明顯

| | |
|---|---|
|  | |
| 7mm 40˚C | 7mm 100˚C |

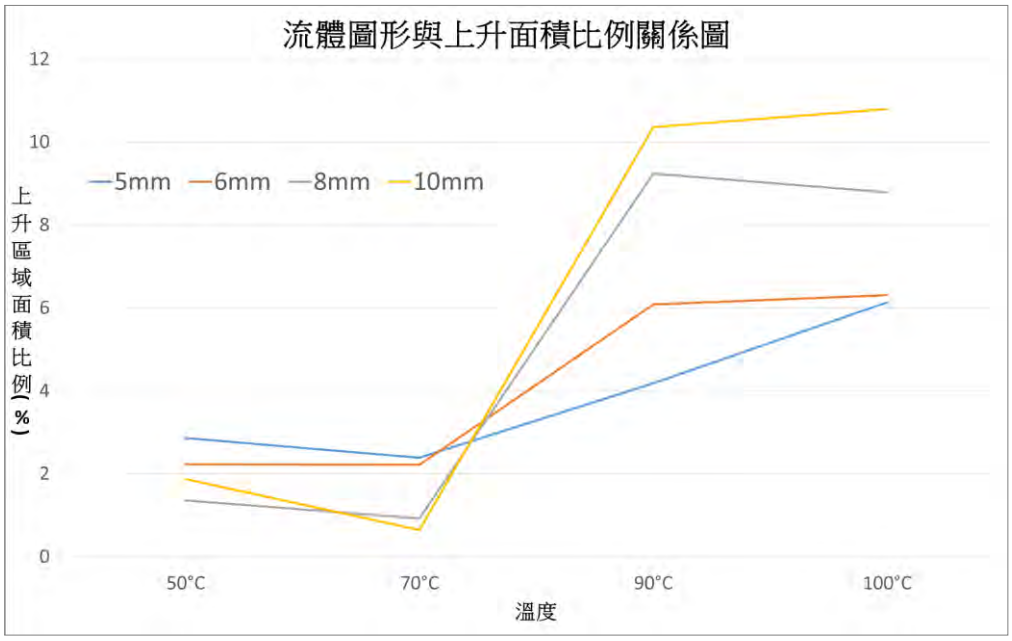
表四、模擬同一流體在不同供熱條件下其對流圖形的差異之實驗結果

四、利用電腦軟體 imageJ 分析流體上升區域面積比例的結果

我們利用電腦判斷味噌分布的區域(即上升區域)，並利用電腦軟體 imageJ 計算其面積



圖十、電腦軟體 imageJ 判讀示意圖

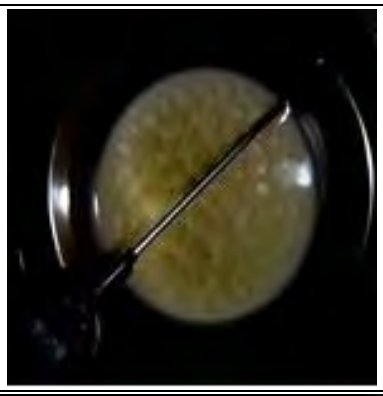
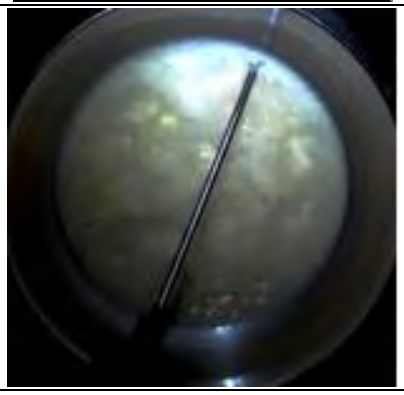



圖十一、流體溫度與上升面積比例關係圖

低溫(攝氏 50~70 度)時流體上升面積較小，高溫(攝氏 90~100 度)時上升面積較大

五、模擬冷卻效應對大氣中胞狀雲的影響

當降溫加劇時，所形成的上升區域與下降區域界線更為明顯

| 溫度 | 對流圖形 | 溫度 | 對流圖形 |
|---|---|---|---|
| 35˚C |  | 45˚C | |
| 55˚C | | 65˚C |  |
| 70˚C | | | |

表四、冷凍庫中不同溫度的對流結果

六、調控味噌的性質使流體對流圖形更加接近大氣胞狀雲

(一)比較不同品牌味噌分布於流體表層對流圖形

圖十二、不同味噌品牌分布於流體表層對流圖形比較圖

(二)以鹽分調整味噌分布於流體表層對流圖形

味噌中含有以下四種內容物：大豆、米麴、鹽和水。

我們猜測大豆、米麴與鹽均可能會改變味噌顯示對流圖形的性質，但是調控大豆來源與加入米麴發酵的過程實屬不易，故我們嘗試改變其中所含的鹽量來觀察是否鹽量能造成味噌在流體中的性質改變。

在加入鹽的後，觀察到味噌在對流上升處聚集的更集中，味噌對流的速度也略減。

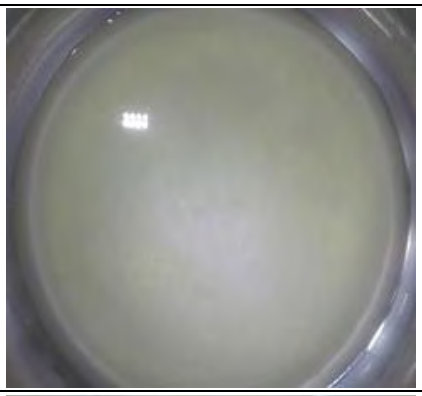
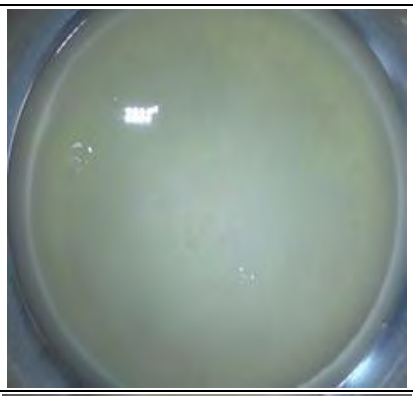
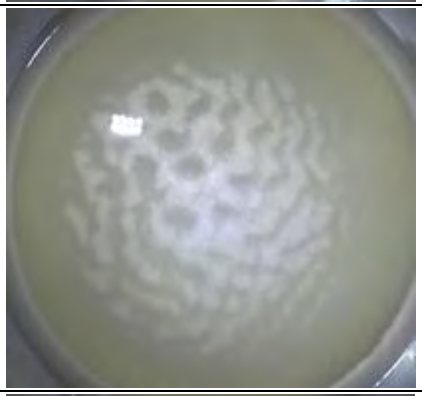
我們推測可能是因為味噌互相吸引的性質增強，造成所表現出的流體對流圖形改變。

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | |
| 5g 鹽 | 10g 鹽 | 15g 鹽 | 20g 鹽 |

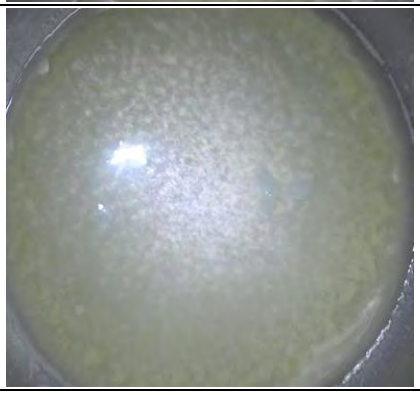
表五、不同鹽分的流體對流圖形比較表

味噌會逐漸因離心力而甩至外緣，加鹽可以減緩此效應，故接下來的旋轉實驗我們也考慮加鹽對旋轉中流體的影響，互相比較。

七、模擬流體在旋轉狀況下所形成的對流圖形差異

| 是否加鹽/<br>轉速(次/min) | 未加鹽 | 加 5 克鹽 |
|---|---|---|
| 3 |  |  |
| 8 | | |
| 13 |  | |
| 18 | | |

表六、低溫狀況下不同轉速所形成的對流圖形

| 是否加鹽/<br>轉速(次/min) | 未加鹽 | 加 5 克鹽 |
|---|---|---|
| 3 | | |
| 8 | | |
| 13 | | |
| 18 |  | |

表七、封閉胞對流於不同轉速下之圖形

1. 低溫與高溫下，轉速愈快的流體其對流圖形皆愈明顯
2. 加鹽過後我們發現低溫所出現的開放胞其形狀趨於長型，而高溫時所出現的封閉胞形狀較完整。此兩者皆更類似大氣中胞狀雲的對流圖形。
3. 在鍋中靠外圍所形成的胞比近中心所形成的胞大

<u>小結</u>：

1. 流體厚度愈厚，單一對流胞對流區域愈大
2. 流體在低溫時(50 度以下)對流圖形類似開放胞，高溫時(80 度以上)則類似封閉胞，且高溫時的上升面積較低溫時大
3. 溫度介於 60 度至 70 度時，流體較為混濁不易分辨識其對流圖形
4. 當降溫加劇時，流體的對流圖形分界較明顯
5. 加入鹽之後，味噌在對流上升處聚集的更集中，味噌對流的速度也略減
6. 當流體在旋轉狀況下，形成的對流圖形較接近大氣胞狀雲的圖形

# 陸、討論

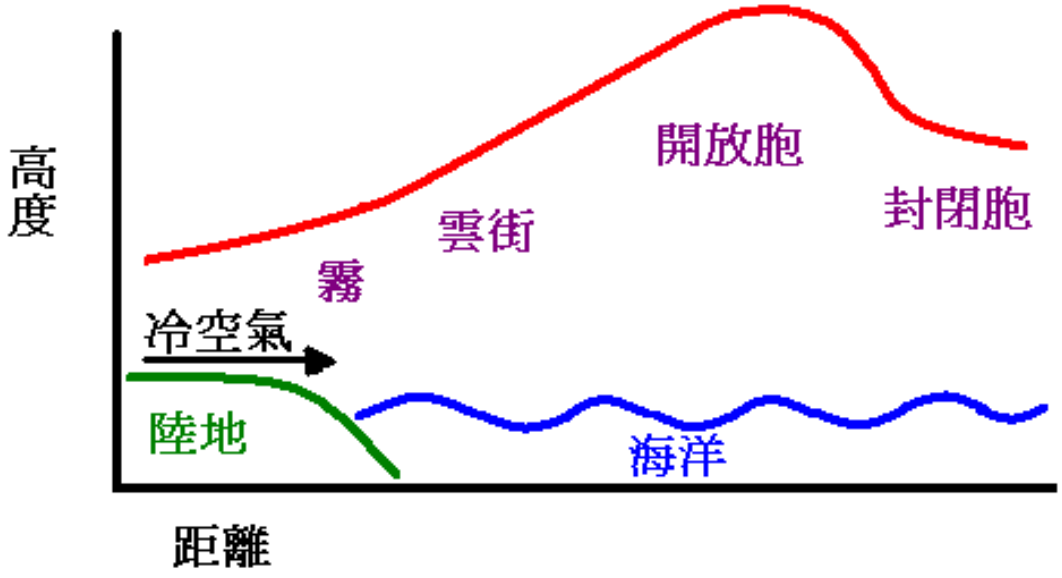
在「研究過程或方法」中已詳細闡釋了開放胞狀雲與封閉胞狀雲的形成機制，並提及味噌湯與胞狀雲的相似性質。這裡藉味噌湯的實驗結果來解釋大氣中胞狀雲對流所產生的現象。

一、流體厚度愈厚，單一對流胞對流區域愈大：

實驗中發現，在相同的溫度下，當流體厚度增加時，無論是開放胞或是封閉胞，其面積都有變大的趨勢。我們推論是因為流體厚度較厚時，其體積較大，能含有的總熱量較多，故單個胞的對流區域較大。

大氣中，海水會不斷加熱上方的空氣，使空氣獲得熱量，隨時間增加，空氣所獲得的熱量增多，對流效應隨之加劇，故混合層的厚度增加，雲頂高度亦隨之上升。

由開放胞狀雲轉換到封閉胞狀雲之後，由於封閉胞狀雲的動力更強，故上升的氣流與上層的乾空氣混合並降溫，使該氣團的濕度下降而達不到露點，導致逆溫層上方的雲頂降低，如圖所示。




圖十三、雲頂高度、成雲種類隨離岸距離變化圖

二、溫度高低與對流胞形狀模擬結果

(一)流體在低溫時(50 度以下)對流圖形類似開放胞，高溫時(80 度以上)則類似封閉胞：

我們推論流體在低溫時，整體上升的動力不強。對流圖形是邊界有味噌聚集，中間沒有味噌的蜂窩狀圖形，與大氣中開放胞狀雲相同。

高溫時，水的對流劇烈，具有很強的上升動力。當對流上升動力大於下降動力時，所形成的對流圖形是邊界沒有味噌，而中間有味噌的蜂窩狀圖形，與大氣中封閉胞狀雲相同。

(二)模擬同一流體在不同供熱條件下其對流圖形的差異

在開放胞或封閉胞形成時，皆可見到較暖區對流圖形較明顯，而較冷區則不明顯：推測是流體較冷的區域溫度過低，使對流上升的動力不足，故對流圖形較不明顯。

三、利用電腦軟體 imageJ 分析流體上升區域面積的比例

(一)流體上升區域面積於 70~90˚C 時會大幅上升：

推論是因為在此溫度區間內，流體將從原先對流上升動力小於下沉動力轉換成大於對流下沉動力，即是開放胞轉換成封閉胞的時候。

(二)溫度於 70˚C 以下時，厚度較厚的流體，其對流上升的面積較小：

推測是因厚度較厚的流體，此溫度時上升動力仍不強，無法造成較大的上升面積。

(三)溫度於 90˚C 以上時，厚度較厚的流體，其對流上升的面積較大：

此時已經接近流體沸點，較厚的流體蘊含更多的熱量，故上升面積較大

四、模擬冷卻效應對大氣中胞狀雲的影響

在大氣中，胞狀雲移至溫暖的海面上時，不但下方有溫暖的海水加熱，其上方也有冷卻效應。

當流體置入冷凍庫時，可以觀察到劇烈的溫差使對流上升區域與下降區域界線更為明顯許多，由於這時流體上方的冷卻效應加強，導致其受冷下降的狀況變得明顯，加劇了流體的對流，使上升區域與下降區域更集中於同一區域，隨之下降區域與上升區域的界線也漸為明顯了。

五、旋轉狀況下的流體，所形成的對流圖形更接近實際大氣胞狀雲圖形

(一)不同轉速的影響

旋轉台低速旋轉時，流體旋轉力量所造成的效應不明顯，無法使流體的運動穩定，又對流圖形受到旋轉影響而干擾，所以出現的圖形不具規則性。

高速旋轉時，流體旋轉力量所造成的效應變得更明顯，這能使流體的運動較為穩定，對流圖形得以顯現出來。

以下實驗討論皆考慮流體在高速旋轉時所形成的對流圖形。

(二)不同流體溫度在高速旋轉下的對流圖形

在旋轉狀況下的流體，其對流圖形更接近大氣中胞狀雲形成時的對流圖形外觀。

其可能原因是旋轉作用使對流上升的力量減弱，進而使原先也能表現對流上升的紊流消失，造成對流上升面積略減，並使得對流胞略為拉長，才讓圖形更接近大氣中胞狀雲的對流圖形。

1. 流體上升區域減少方面

高溫時的封閉胞：高溫時所形成的封閉胞，其向上對流的動力很強，流體中大多數面積皆可見為上升區域，一般狀況下的高溫時，較容易產生紊流，這樣可能使流體上升的區域會因紊流而增多。但當流體在旋轉時，旋轉會影響高溫紊流的產生與強度，使紊流達不到液體表層即下降，僅留下較強的上升對流。

低溫時的開放胞：低溫時所形成的開放胞，其向上對流的動力較弱，因此產生的紊流較少，處於靜置情況下的對流圖形就與大氣對流相似。當流體在旋轉時，流

體上升區域雖然減少，但不影響原本的對流圖形。

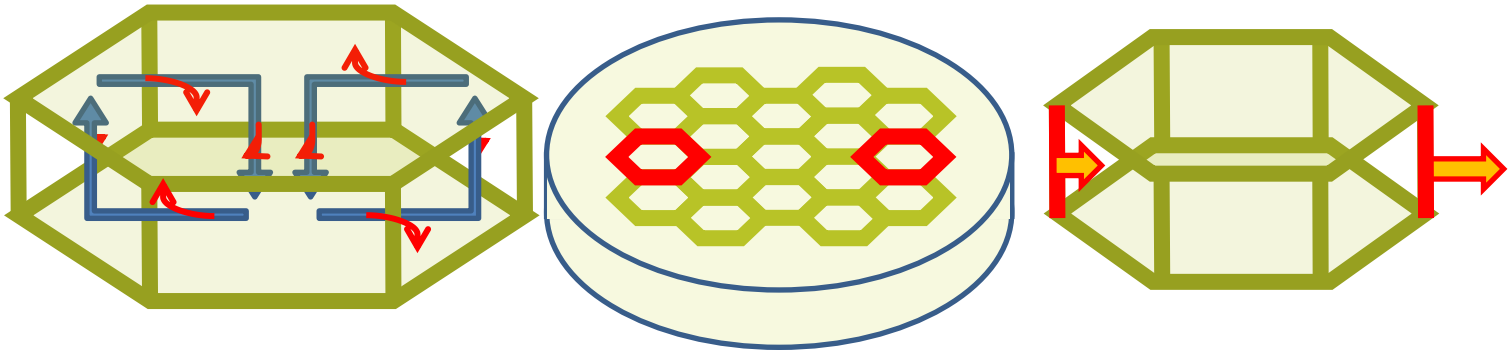
2. 對流胞形狀拉長方面

流體在未旋轉時形成的對流圖形，其對流胞的形狀較為整齊，大小一致，形狀接近瑞利本納胞的六邊形圖形。但在旋轉作用影響下，對流胞稍微被拉長，使得形成的對流胞圖形與大氣中胞狀雲的對流圖形較接近。

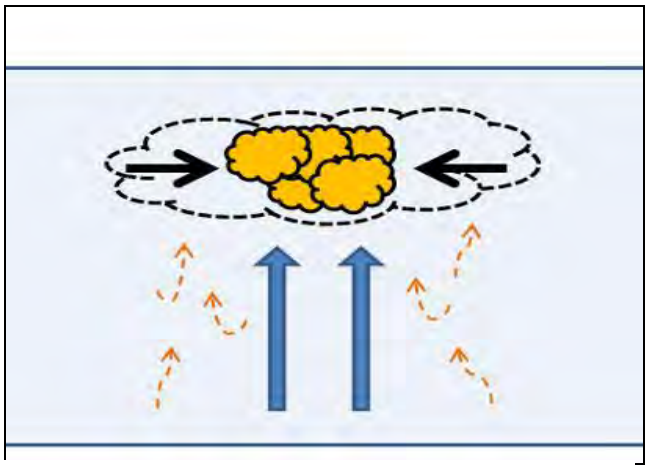
推究流體在等角速度旋轉下所受的力，可分為柯氏力以及離心力。

柯氏力為流體對流過程中，受到垂直其速度方向的作用力。我們分析單一個對流胞對流的狀況，對流行進的方向會受到柯氏力作用，而略為偏離。故我們推測柯氏力是導致流體上升力量減少，進而使原先也能表現對流上升區域的紊流消失的作用力。

由向心力公式 $a=r\omega^2$(其中 ω 為角速度、r 為離圓心的距離)可知道距離圓心愈遠的流體受離心力愈大，故單一對流胞離圓心較遠處所受的離心力較內側大，這導致了對流胞被拉長。



圖十四、旋轉對胞狀雲影響示意圖(左：科氏力、右：離心力)



圖十五、旋轉致封閉胞紊流消失示意圖

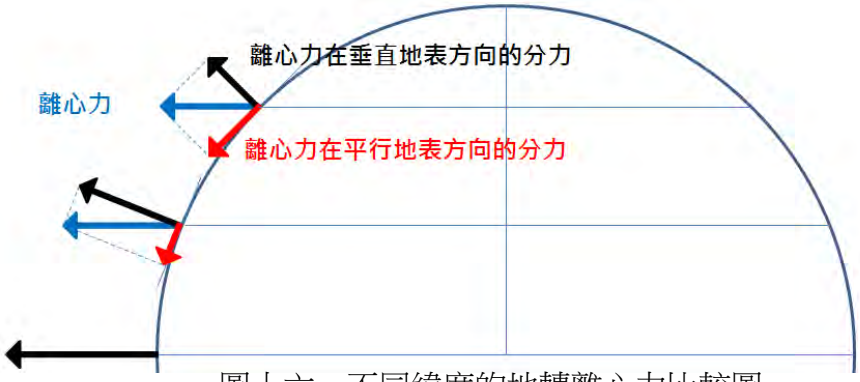
六、旋轉狀況流體與實際大氣的比較

(一)對流胞形狀拉長方面

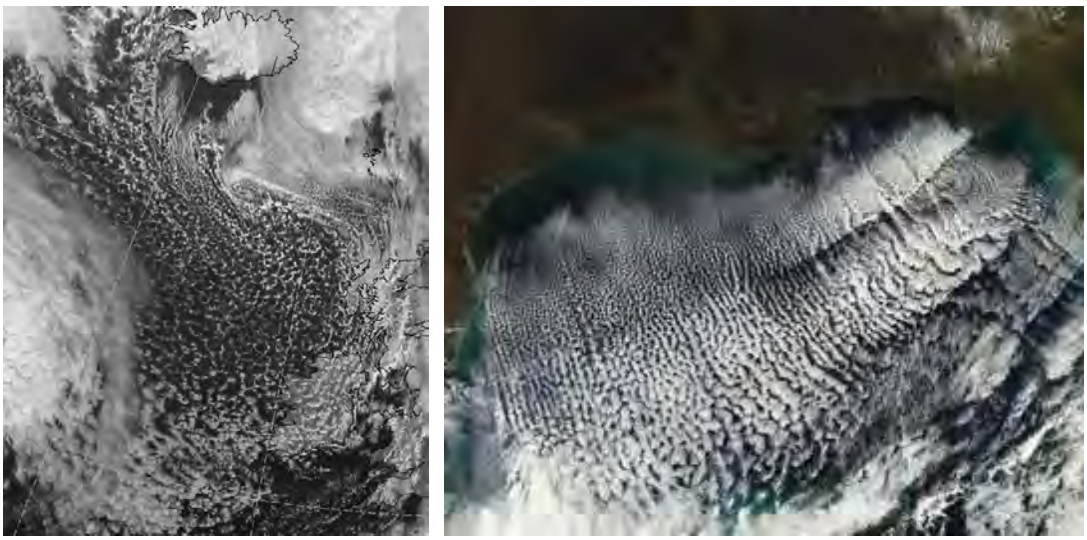
流體在旋轉狀況下，所受的離心力會使得對流胞拉長形變。

在地球上，較高緯度的地區，地球自轉的離心力其水平分量較大，赤道地區則無水平方向的分力。

中高緯度的胞狀雲拉長形變較明顯，中低緯度出現的胞狀雲則較接近六邊形，與本實驗旋轉時出現的結果相同。




圖十六、不同緯度的地轉離心力比較圖



圖十五、不同緯度的胞狀雲(左：英國外海 50~60°N、右：墨西哥灣 20~30°N)

(二)流體上升區域減少方面

旋轉下的流體，藉由科氏力影響消去紊流後，對流胞呈現的圖形更接近大氣中胞狀雲形成時的圖形外觀。

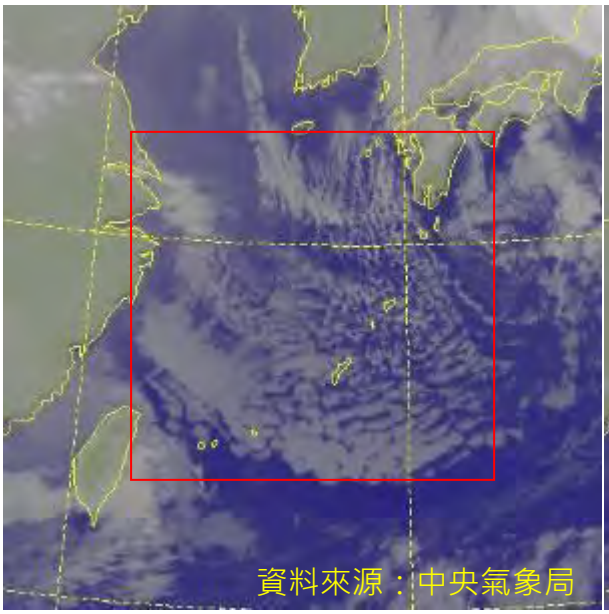
根據科氏力公式 $F(\theta) = -2mv\omega\sin\theta$(其中 $\omega$ 為地球旋轉角速度、$\theta$ 為物體所在緯度)，

我們知道在愈高緯度地區，物體移動時所受的科氏力愈大；我們進一步推測在中高緯度地區形成的胞狀雲，其上升面積應較低緯度地區的胞狀雲小。

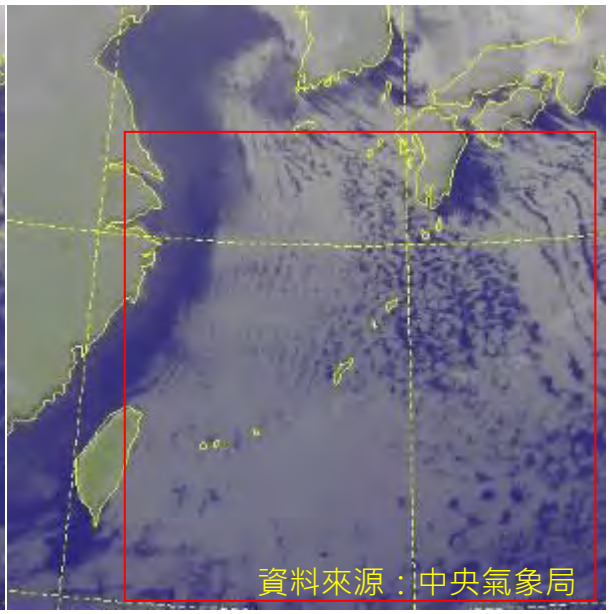
但由於每次形成胞狀雲的冷氣團強度與海溫條件不盡相同，大氣所蘊含的熱量不一樣，故難以觀察上升區域的多寡有無明顯差異。

七、本實驗對大氣中胞狀雲出現區域的解釋

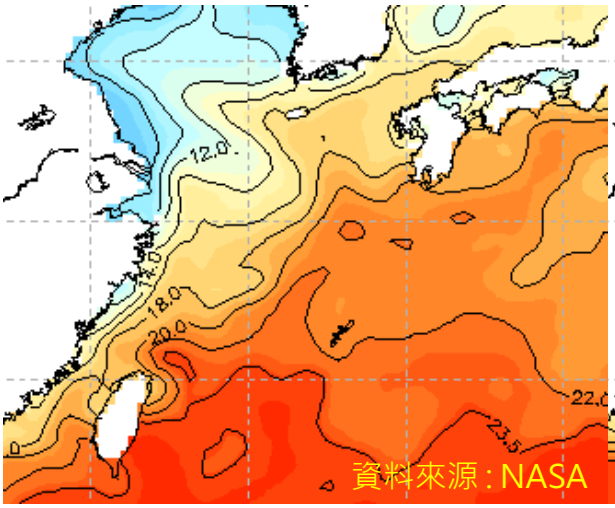
以下四圖為 2014 年 2 月 15 日與 2015 年 1 月 2 日的衛星雲圖與海溫圖。在衛星雲圖中可以發現，前者由開放胞狀雲轉封閉胞狀雲的地方緯度較高，即形成封閉胞的離岸距離較近。經對照海溫圖後可得知前者的海溫較高，這時前者在相同時間內從海面獲得的熱量較多，符合本實驗對大氣中胞狀雲對流圖形形成的解釋。



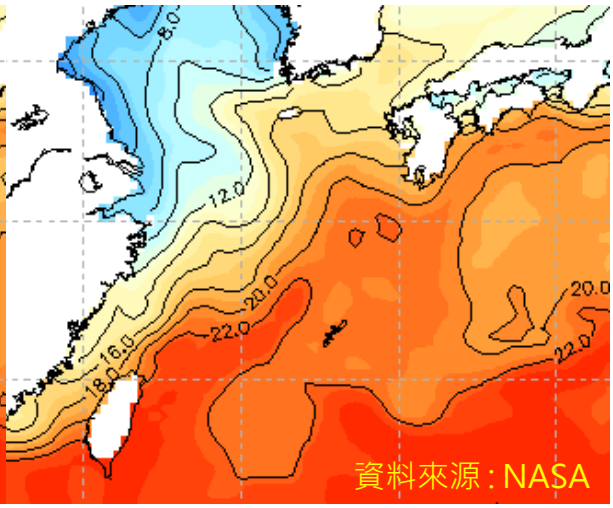

圖十六、20140215 衛星雲圖




圖十六、20150102 衛星雲圖




圖十六、20140215 海溫圖




圖十六、20150102 海溫圖

# 柒、結論

一、流體厚度愈厚，對流胞的大小愈大。我們推估是因為厚度較厚時，其體積較大，能含有的總熱量較多，故單個胞的對流區域較大。

二、溫度低(約攝氏 50 度以下)時水的對流圖形類似於開放胞狀雲，溫度高(約攝氏 80 度以上)時水的對流圖形類似於封閉胞狀雲。我們推估是溫度低時下沉力量大於上升力量，與開放胞狀雲相同，溫度高時下沉力量小於上升力量，與封閉胞狀雲相同。

三、經由 imageJ 分析，厚度較薄的流體於 70˚C 以下時，上升面積較厚度較厚的流體大；90˚C 以上時上升面積則較小。推測是厚度薄的流體加熱容易，但所蘊含的熱量較少。70~90˚C 上升面積大幅增加，推測是因為此溫度區間內，上升對流動力超越下降動力，由開放胞對流形式轉換為封閉胞對流形式。

四、高緯度的胞狀雲形變較劇烈，低緯度則無，本實驗中，流體在旋轉狀況下形成的對流胞因受離心力作用，亦具有拉長形變的狀況，兩者互相吻合。

五、當表層流體降溫加劇時，其下沉力量增強，故對流更加劇烈，導致下沉區域與上升區域的界線趨於明顯。

六、我們的實驗可以順利解釋實際狀況下大氣中胞狀雲對流圖形的差異。經由衛星雲圖證實，海表溫度較高時，海面提供給空氣的熱量較多，空氣較易到達形成封閉胞的溫度，故出現封閉胞狀雲的離岸距離較近。

# 捌、參考資料及其他


1. Noteboom, Saskia(2007)。Open Cell Convection and Closed Cell Convection。
2. Ruby Krishnamurti(1974)。On Cellular Cloud Patterns.part 1&2&Laboratory Model。
3. Arthur F. Krueger and Sigmund Fritz(1960)。Cellular Cloud Patterns revealed by Tiros I。U.S. Weather Bureau。
4. 洪尚緯、莊凱丞(2012)。『液』想不到的對流胞－瑞利貝納爾對流胞之探討。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會。
5. 臺灣颱風預報輔助系統。http://photino.cwb.gov.tw/tyweb/tyfnweb/report/htm/2005pap-04.htm。
6. BOUNDARY LAYER CONVECTION。 http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met455/notes/section9/1.html。
7. Cloud Structures - 'Close Cell' Structure – Description。 http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/close-cells-description.htm。
8. 氣象小常識-雲的分類與觀察。http://web2.nmns.edu.tw/PubLib/NewsLetter/88/144/11.htm。
9. NASA Earth Observatory。http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=43795。
10. Adaptive behavior of marine cellular clouds。 http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3753593/。
11. 颱風論壇。http://bbs.typhoon.gov.cn/read.php?tid=65886。

## 【評語】180007

很有創意的實驗設計用於探討自然界海上開放型與封閉型胞狀雲的形成原因與影響因素分析。對胞狀雲之生成環境條件有更清楚之了解。未來可以進行自然界不同環境條件下，胞狀雲特性之統計特別是胞狀雲結構與環境條件之統計分析，並與味噌湯實驗做密切之聯結，另外建議善用衛星遙測，特別是福衛三號與 AIRS 衛星之溫度探空與海上觀測平台之海氣觀測參數，進行更深入之分析探討。