

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

佳作

030303

黏黏有移—探討環境因素對黏菌移動的影響

學校名稱： 桃園市立東興國民中學

作者：	指導老師：
國二 彭心渝	洪慧怡
國二 姜凱淇	

關鍵詞： 黏菌、地心引力、磁力

摘要

本實驗探討黏菌對不同條件所產生的趨性。七年級生物課時看過介紹黏菌的影片，引發我們對這種奇妙生物的興趣，想透過本研究了解環境因素如何會影響其移動。一、放在不同角度傾斜面的黏菌，都表現出對於重力的趨性。二、黏菌對於磁鐵具有正趨性，在磁鐵 N 上 S 下的環境會做順時針旋轉，反之 S 上 N 下做逆時針旋轉，在磁場強的環境下旋轉速度較快。三、黏菌移動受到 1mA 或以上電流抑制。四、黏菌會避開黴菌生長區域。五、在某些環境條件下黏菌會循著其分泌的黏液移動。

近年來科學家對於黏菌的移動策略有一些研究，我們希望以簡單的實驗方式，透過控制單一變因，為黏菌存在的爭議或研究空缺找到答案，認識黏菌潛藏的適應策略與行為特性。

壹、前言

一、研究動機

七年級上到原生生物時初識黏菌，才知道小時候玩的史萊姆原型是它！黏菌在迷宮中可以以最短的路徑找到食物。用燕麥模擬東京鐵路網中各站的位置，黏菌形成的網絡與東京地鐵路高度相似卻又更有效率(Tero et al,2010)。

帶著好奇心，我們參加學校科展研究黏菌。歷屆科展作品中有些研究引起我們興趣：黏菌移動時留下的黏液痕跡會幫助它記憶，它會避開含有黏液的區域，作為路徑決策參考(Dussutour et al ,2016)；黏菌對於磁性 N 上 S 下有正趨性，對於 N 下 S 上則無(吳等，2022)……。國中第一堂生物課，老師分享網路上流傳的「偽科學」，提醒科學研究的結論必須要經得起不斷的驗證。所以我們想設計實驗方法去驗證前人的研究結果，也想找出影響黏菌移動的可能因素。希望透過這次的實驗，讓我們對於黏菌有進一步的認識。

二、研究目的

- (一)探討黏菌的移動與地心引力的關係。
- (二)探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響。
- (三)探討電流強度對黏菌移動的影響。
- (四)探討黴菌對黏菌移動的影響。
- (五)探討黏液對黏菌移動的影響。

三、文獻回顧

近年來國內外對於黏菌的研究方興未艾，歸納出五年來的實驗探究方向與趨勢包括：

1. 探究黏菌爬行能力及偏好，探討其在面對「困難選擇」或「多目標選擇」時的偏好與模式；
 2. 非神經學習與記憶，利用環境線索與過往經驗修改行為，具有空間記憶與模式識別能力；
 3. 材料科學與環境感知應用，黏菌可感測溫度、光線、化學物質，應用於生物感測器開發。
- 我們整理相關的文獻如下表，並提出摘要。

表 1. 黏菌相關文獻整理(本表由作者整理)

編號	作品名稱	作者	內容摘要
1.	探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線(<i>Physarum wires</i>)的特性	林映辰、李竑萱、陳睿泓，2024	1. 探討黏菌電線的潛力。 2. 具可變電阻特性，可用於特殊環境或生物感測器。
2.	影響盤頭絨泡黏菌最佳化途徑的因素及其應用	陳睿泓、林映辰、黃柏誠，2023	1. 黏菌會選擇食物間的最短路徑。 2. 氯化鈉、咖啡因會抑制黏菌爬行速度。
3.	聯黏有偷-探討多頭絨泡黏菌特性及其應用	北梅國中，2023	1. 黏菌移動會避開不喜歡的食物。 2. 對含鐵粉食物具有正趨性。 3. 黏菌具導電性，可作可變電阻。
4.	關於史萊姆那檔事—黏菌爬行的相關研究	吳長佑、劉鎮瑋，2022	1. 黏菌偏好高濃度葡萄糖洋菜膠。 2. 黏菌的移動速率和角度有關。 3. 黏菌的「移動方向選擇」會受「磁力方向」影響。
5.	Stepwise slime mould growth as a template for urban design.	Frey, S., et al. (2022).	1. 黏菌會發展成原生質的血管網絡，連接節點狀的食物來源。 2. 透過原生質流的建設性回饋來強化最佳路徑。

6.	Behavioural changes in slime moulds over time.	Vogel, D., et al. (2022).	1.黏菌移動速度會隨著年齡的增長而降低；決策和學習能力則不會。 3.老的黏菌與年輕的同類融合，它們可以恢復其行為表現。
7.	Substrate and cell fusion influence on slime mold network dynamics.	Dussutour, A., & Latty, T. (2020).	1.黏菌在中性環境下建構出脈絡較細的網絡，在營養充足或不利環境下建構出脈絡較粗網絡。 2.黏菌在不利環境中建構長、高效且有彈性的網絡，而在營養環境中，它們建構更短、更集中的網絡。 3.在中性有利環境中，黏菌能快速融合並與它們的克隆夥伴建立多重連接。
8.	Substrate composition directs slime molds behavior.	Fernando,P., et al. (2019).	1.化學物質會影響黏菌探索行為。 2.營養物質和不利物質都會減緩探索速度。 3.不利環境中的黏菌會優先佔據先前探索過的區域，利用黏液分泌作為緩衝。

在自然界中，黏菌與微生物群落、腐植質層與小型節肢動物之間形成微妙互動關係，是微觀但關鍵的「生態工程師」，近年來科學界也熱衷於了解黏菌如何規劃路徑、進行決策，法國甚至把黏菌送到國際太空站，想觀察黏菌在微重力環境下的行為變化，並和 4500 所法國學校學生同步進行的實驗結果進行比較，可見黏菌的行為與生理現象越來越受到關注。我們藉由參考前人對於黏菌的實驗觀察，進行實驗設計，找尋磁場、重力以及電流對於黏菌移動的影響。

四、研究架構圖

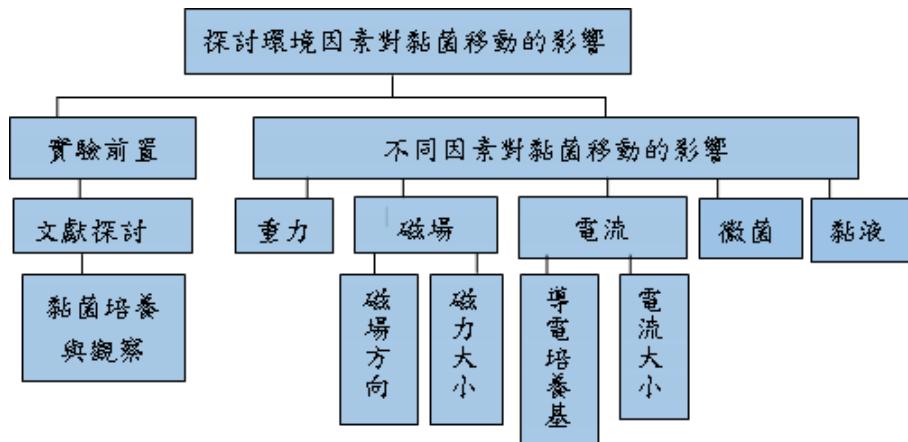


圖 1.研究架構(本圖表由作者使用 word 繪製而成)

貳、研究設備及器材

一、實驗黏菌-多頭絨泡黏菌 (*Physarum polycephalum*)

(一)簡介

近年許多科學實驗以多頭絨泡黏菌為研究對象。其分類地位為細胞生物總域-真核生物域-原生生物界-黏菌門-黏菌綱-絨泡黏菌目-絨泡黏菌科-絨泡黏菌屬。多頭絨泡黏菌喜生存於陰涼潮濕的環境，如森林的落葉和有機腐植質中，菇類培育所用木材也常是研究者黏菌採集來源。此次研究考量野外採集的樣本需要辨識純化，所以我們直接從網路購買取得。

黏菌的生命史可分為三個部分：變形蟲體(*amoebae*)和變形體(*plasmodium*)及子實體(*fruiting body*)以及兩個逆境階段(*resistant stages*)：微囊(*microcyst*)以及菌核(*sclerotium*)

。當黏菌處於變形體階段，會呈現多核的原生型態，且會利用原生質流的方式向前延伸後形成網狀結構，尋找環境中的有機物質，找到後以原生質包裹、吞噬、分解。當環境惡劣，缺乏水分或食物時，它會萎縮形成菌核。當菌核再次接觸到水時，會在 30 至 60 分鐘內「復甦」、開始遷移。本研究就是以菌核的方式保存黏菌，用沾水方式使其復甦。

多頭絨泡黏菌(*Physarum polycephalum*)呈現亮麗的鮮黃色。由於常見、容易培養等

特點，多頭絨泡黏菌成為原生質體黏菌中的模式生物，它們常被拿來進行各種實驗。

(二)黏菌培養與觀察

1.黏菌的移動

飼養黏菌的過程中，我們觀察到黏菌會持續移動(圖 2)。幾天不餵食，黏菌看起來像是被濃縮，顏色變深，停滯不動(圖 3)。如果培養皿中滋生黴菌，黏菌顏色逐漸變淡，最後變得透明無色，過一段時間後消失，只留下黃色分泌物。當黏菌移動到達麥片時，一部分會停留在麥片上，剩下部分繼續向外探索(圖 4)。

以複式顯微鏡觀察黏菌時，看見黏菌的細胞質流動（圖 5），經過查詢發現黏菌透過胞質流動來移動。

2.分泌的液體

黏菌行走過的洋菜膠表面會留下一層淡黃色透明液體(圖 6)；查詢後發現是黏液 (slime; mucilage)，黏菌可以利用黏液辨別走過與未走過的路徑(Christopher,2012)。我們觀察到黏液在經過一段時間會消失，經過查詢發現黏液的確會揮發。當黏液消失後，黏菌可能以為該區域沒有探索過，因此又重新爬過。



圖 2.黏菌移動(作者自行拍攝)



圖 3.黏菌停滯(作者自行拍攝)



圖 4.停留在麥片上的黏菌
(作者自行拍攝)

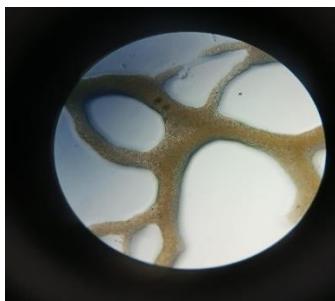


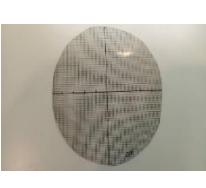
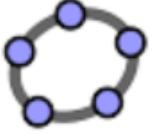
圖 5.複式顯微鏡下細胞質流動
(作者自行拍攝顯微鏡畫面)



圖 6.黏菌分泌的液體
(作者自行拍攝)

二、實驗設備與材料

表 2.研究設備與材料(下面表格中的實驗器材皆是實驗器具實體，自己拍攝得到。)

多頭絨泡菌 菌核	燕麥片	洋菜粉	玻璃培養皿	透明方格紙卡	硝酸鉀
					
食用色素	取黏菌圓形 戒指	直流電源 供應器	酒精燈(滅 菌)	不鏽鋼鍋(滅菌)	Gauss/ Teslameter
					 SYPRIS Model 6010
通風櫈	複式顯微鏡	三用電表	強力磁鐵	75%酒精	繪圖軟體  Geogebra
					

參、研究過程或方法

一、實驗前準備工作與數據處理

(一)培養基製作:

- 1.以量筒取 1.5L 純水，與市售洋菜粉 10 公克倒在鍋子中加熱攪拌溶解，直到沸騰。
- 2.在直徑 10cm 的培養皿中，倒入洋菜膠達 3mm 深度，等待冷卻。(圖 7)
- 3.使用前將培養皿倒放，防止蒸發的水分滴回培養基中，造成濕度過高而致發霉。

(二)透明方格卡製作:

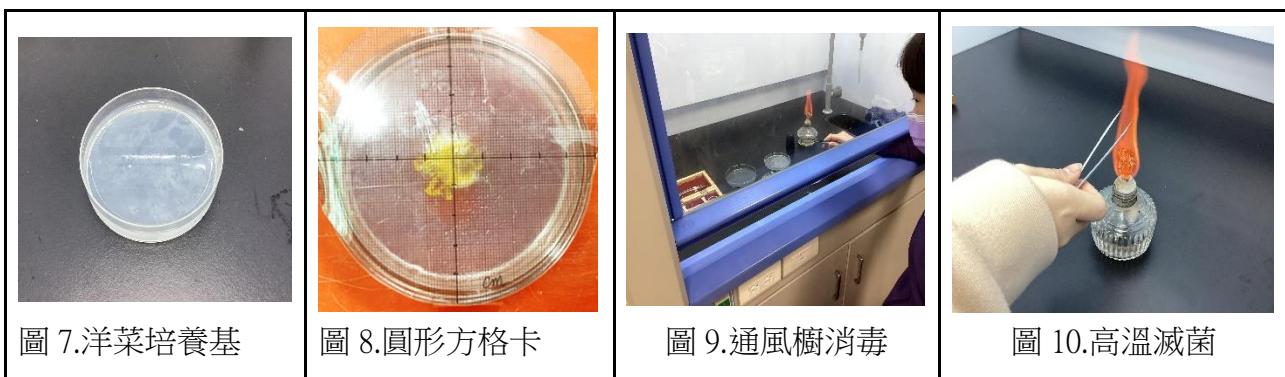
- 1.將投影片印上方格後，畫出 x-y 軸，以 0.5 或 1cm 為單位長，裁切成圓形後以膠帶固定於培養皿蓋子上。(圖 8)
- 2.利用透明方格卡，方便觀察黏菌的移動距離，利於資料的數據化。

(三)消毒流程:

- 1.以濃度為 75% 的消毒酒精噴灑，進行實驗操作空間通風櫥以及器具的消毒，以盡量避免黏菌樣本或乾淨培養皿，受到空氣中細菌或黴菌孢子等汙染。

(四)培養黏菌:

- 1.通風櫥消毒後，將櫥窗開啟一個縫隙以便操作實驗。(圖 9)
- 2.在小燒杯中噴灑酒精並待其蒸乾，達到消毒的目的，並裝入適量純水。
- 3.將鑷子在火焰上方加熱(圖 10)，以達到消毒目的後再夾取有黏菌菌種的濾紙，沾少許純水，放在洋菜膠上。
- 4.以消毒過的鑷子放置麥片並每天觀察其生長情形。**(以下四張圖片為作者自行拍攝)**



(五)以 Geogebra 尋找黏菌分布範圍的重心

- 1.將黏菌照片匯入 Geogebra，點擊照片，點選水滴圖形，降低透明度(調整至 50%)並拖動照片使其與 x、y 軸重合。(如圖 11)

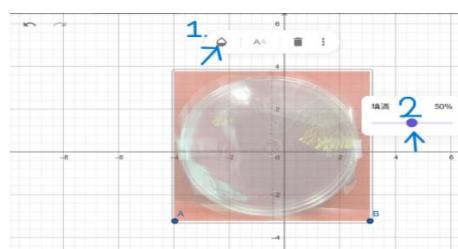


圖 11. (ggb 畫面)

- 2.調整照片大小使方格紙卡上的 1 公分和座標上的單位長相等。(如圖 12)



圖 12. (ggb 畫面)

3.點選[基本工具]中的[新點]，圍繞黏菌分布區域新增適當數量頂點。(圖 13)

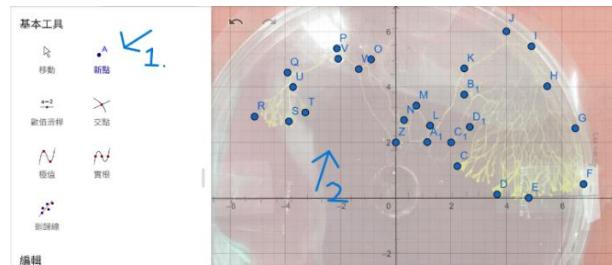


圖 13. (ggb 畫面)

4.點選[多邊形]中的[多邊形]，依序連接各頂點形成多邊形(poly1、2、3……)。(圖 14)

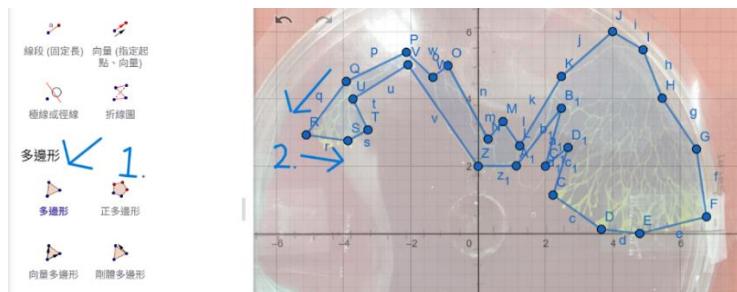


圖 14. (ggb 畫面)

5.刪除頂點與邊的標籤，邊的透明度(改為 30)，頂點的樣式(改為中空)與大小(改為 3)作微調。(圖 15)

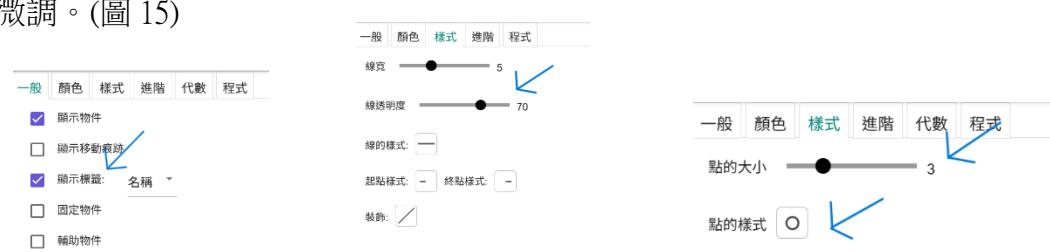
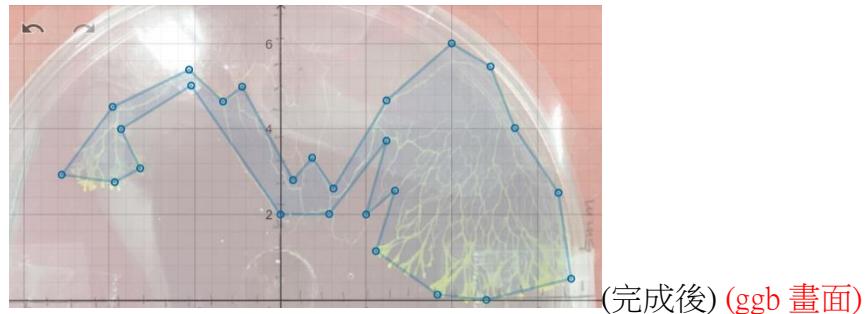


圖 15. (ggb 畫面)



6.箭頭處輸入指令 $\text{Centroid}(\text{poly1}、\text{2}、\text{3}……)$ ，畫面顯示重心，點擊重心，標註時間。(圖 16)

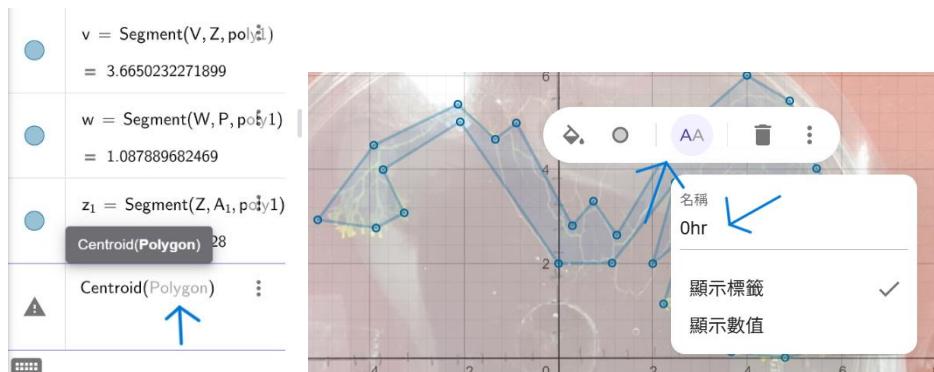


圖 16. (ggb 畫面)

7.點選照片，將之移除。(圖 17)

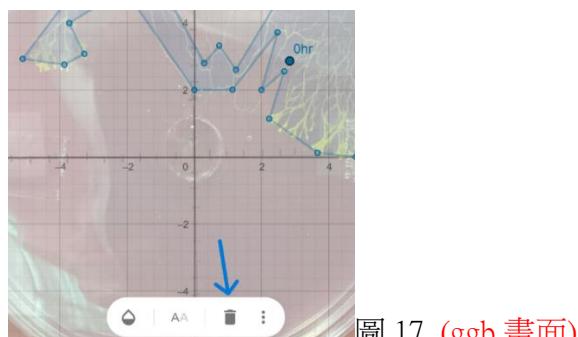


圖 17. (ggb 畫面)

8.以此類推，將同一組實驗中，每一張照片黏菌分布範圍與重心集中在同一座標平面上，標示為不同顏色，以便觀察。（操作：點選頂點，按左鍵，點選[設定]，點選[顏色]在表格中選取需要的顏色）(圖 18)



圖 18. (ggb 畫面)

二、探討黏菌的移動與地心引力的關係

藉由將黏菌以不同角度放置，了解黏菌對地心引力趨性。

(一)第一階段實驗步驟

1. 將半徑 1cm 的戒指用酒精燈滅菌後冷卻，用其切割出固定大小的黏菌樣本，重複消毒戒指後在有洋菜膠培養皿中央切割出洞口。將黏菌樣本放入培養皿中。(如圖 19)
2. 將培養皿固定於塑膠長方盤上，分別以 30°、60°和 90°的角度固定。(如圖 20)
3. 30°、60°和 90°各三組實驗組，一組 0°平放作為對照組，共 10 組進行觀察 6 小時。每 1 小時拍照記錄黏菌移動情形。



圖 19.以戒指取黏菌(作者自行拍攝)



圖 20.將黏菌以 90°固定(作者自行拍攝)

(二)第二階段實驗步驟

1. 以戒指切割黏菌樣本，重複消毒後在洋菜膠的中央切割，將黏菌樣本放入。
2. 黏菌移至培養基中心點後，將培養皿固定於塑膠長方盤上(分別是 30°、60°和 90°)
3. 取 30°、60°和 90°各三組實驗組，加上一組 0°平放為對照組，共 10 組進行觀察 4 小時。在第 4 小時，將塑膠盤上下翻轉 180°後(圖 21)，再持續觀察黏菌移動 4 小時。
4. 每小時拍照記錄黏菌移動情形。



圖 21.觀察 4 小時後將黏菌翻轉 180°(作者自行拍攝)



三、探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響

實驗探究包含三個方向：

- 1.在單層磁鐵實驗中，藉由在培養皿放置不同磁極方向磁鐵，觀察黏菌移動是否受到磁極方向影響；
- 2.以雙層磁鐵增加磁場強度，觀察黏菌的移動方向與快慢是否受到磁場強度影響；
- 3.以直徑 15 公分大培養皿進行實驗，增加黏菌活動空間，觀察其移動行為是否改變。

(一)以高斯磁場強度計測量磁場強度：

- 1.上下各一顆磁鐵中間間隔 1 公分，以高斯計測量磁場強度為 70 高斯。
- 2.上下個兩顆磁鐵共四顆磁鐵，中間間隔 1 公分，測量磁場強度為 140 高斯。

(二)單層磁鐵實驗裝置：

- 1.以消毒過的戒指切割出黏菌樣本，重複消毒戒指後在有洋菜膠的培養皿中央切割出洞口，將黏菌樣本放入。
- 2-1. 培養皿上下各放置一強力磁鐵於座標(4,0)位置，N 極朝上並以膠帶固定。將此實驗組編號為 N-1-1(N 極朝上-上下各一顆磁鐵-樣本 1)、N-1-2 與 N-1-3。(如圖 22)
- 2-2. 同 3-1，改 S 極朝上，編號為 S-1-1、S-1-2 與 S-1-3。(如圖 23)
- 2-3. 不放置磁鐵的 2 組培養皿作為對照組。
- 3.在每個培養皿底下左側各放置 4 個載玻片，維持培養皿的水平狀態，防止因加了磁鐵造成的傾斜角度影響黏菌的移動。
4. 實驗記錄：以平板縮時錄影 20 小時進行紀錄。

(三)雙層磁鐵實驗裝置：

- 1.同(二)單層磁鐵實驗裝置步驟 1、2，準備 6 個培養皿。
- 2.. 培養皿上下各放置 2 個強力磁鐵於座標(4,0)，N 極朝上並以膠帶固定。將其編號為 N-2-1、N-2-2 與 N-2-3 培養基。S 極朝上則編號 S-2-1、S-2-2 與 S-2-3。
- 3.在每個培養皿底部的左側各放置 8 個載玻片，防止傾斜角度影響黏菌的移動。
- 4.以平板縮時錄影，15 小時後將所有磁鐵由移動至(-4,0)，再持續錄影 5 小時，共 20 小時。

(四)大培養皿實驗裝置(直徑 15 公分)：

- 1.同(二)單層磁鐵實驗裝置步驟 1、2，準備 7 個大培養皿(直徑 15 公分)。(如圖 24)

2.取1個培養皿上下各放置一強力磁鐵於座標(7,0)，N極朝上，編號為N-1-1。

2個培養皿上下各放置2個強力磁鐵於座標(7,0)，N極朝上，編號N-2-1、N-2-2。

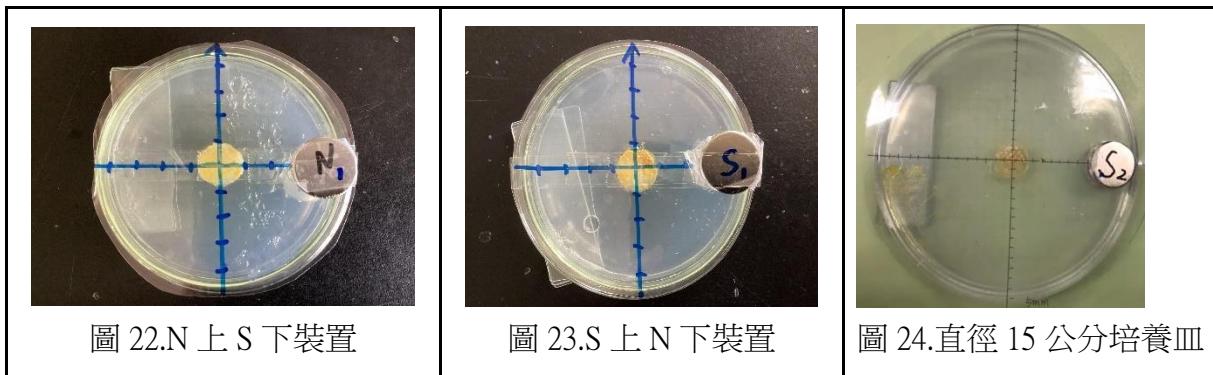
1個培養皿上下各放置一強力磁鐵於座標(7,0)，S極朝上，編號為S-1-1

2個培養皿上下各放置2個強力磁鐵於座標(7,0)，S極朝上，編號S-2-1、S-2-2。

3.在每個培養皿底下磁鐵的另一側各放置4或8個載玻片。

4.不放置磁鐵的1組培養皿則作為對照組。

5.實驗記錄：以平板縮時錄影20小時進行紀錄。(以下三圖為作者自行拍攝)



四、探討電流強度對黏菌移動的影響

(一)嘗試多種通電方式

1.一開始以三用電表測量純水洋菜膠，通電後無法讀到電流。

2.試以食鹽水製作培養基，為避免鹽類抑制黏菌生長，所以製作上層純水洋菜膠，下層為食鹽水洋菜膠，但鹽分會滲透，影響黏菌生長與移動。

3.將電路板線外塑膠皮去除後埋入純水洋菜膠中，兩端連接電池通電，但形成短路。

4.以特斯拉線圈槍放電電擊黏菌，觀察黏菌受到電的刺激後的反應。

5.因特斯拉線圈槍放電為閃電，無法測量其電流大小，最後以硝酸鉀水溶液製作洋菜膠，發現黏菌可以在硝酸鉀洋菜膠上生長，因此以硝酸鉀洋菜膠作為培養基，以電源供應器通電。

(二)直流電源實驗裝置

1.製作硝酸鉀洋菜膠：

以0.5L、0.1M硝酸鉀水溶液，與洋菜粉10公克倒在鍋子中加熱直到沸騰。在直徑10cm的培養皿中，倒入洋菜膠達3mm深度，等待冷卻。

2. 直流電源持續通電:

- (1)用消毒過的戒指切割出黏菌樣本，放入硝酸鉀洋菜膠的培養皿中。
- (2)以鱷魚夾線將直流電源供應器負極、三用電表和培養皿接在一起，將培養皿蓋子打開，鱷魚夾夾在培養皿兩側，與洋菜膠接觸。
- (3)插上電源供應器插頭並開啟電源，用旋轉鈕調整電流強度至 1 毫安培，再移除三用電表，連接電源供應器與培養皿。(如圖 25)
- (4)以六個電源供應器重複以上步驟，三組通電流 1 毫安培，三組通電 5 毫安培。另外以兩組不通電作為對照組。

3. 實驗記錄: 每 1 小時拍照記錄移動情形，持續 8 個小時。

五、探討黴菌對黏菌移動的影響

(一) 實驗裝置:

- 1.用戒指切割出黏菌樣本，放入培養皿中。
- 2.左邊放置新鮮燕麥片，右邊放置有黴菌生長的燕麥片(左右麥片數量、與黏菌距離固定)。(如圖 26)

(二) 實驗記錄: 每 1 小時拍照記錄黏菌移動情形，持續 8 個小時。

六、探討黏液對黏菌移動的影響



圖 25.以電源供應器提供電流
(作者自行拍攝)

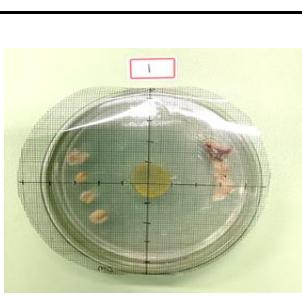


圖 26.左側新鮮右側發霉燕麥
(作者自行拍攝)

(一) 實驗裝置:

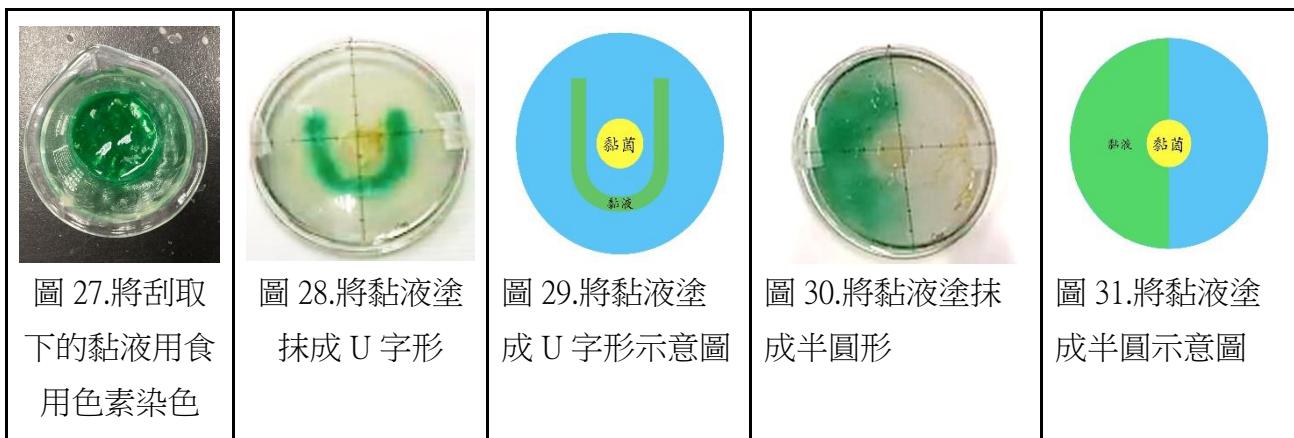
- 1.用戒指切割出黏菌樣本，放入培養皿中。
- 2.以刮勺從飼有黏菌的培養皿中刮取透明黏液至燒杯中，加入 10 毫升蒸餾水和綠色食用色素將其染色並攪拌均勻，塗抹於培養基上。(如圖 27)
3. 實驗組編號 6-1-1 和 6-1-2 培養基: 將黏液塗抹成 U 字形。(如圖 28、29)

實驗組編號 6-2-1 和 6-2-2 培養基: 將黏液塗抹成半圓形。(如圖 30、31)

對照組編號 6-3 培養基: 將食用色素塗抹成 U 字形。

對照組編號 6-4 培養基: 將食用色素塗抹成半圓形。

(二) 實驗記錄: 以平板縮時錄影 14 個小時。



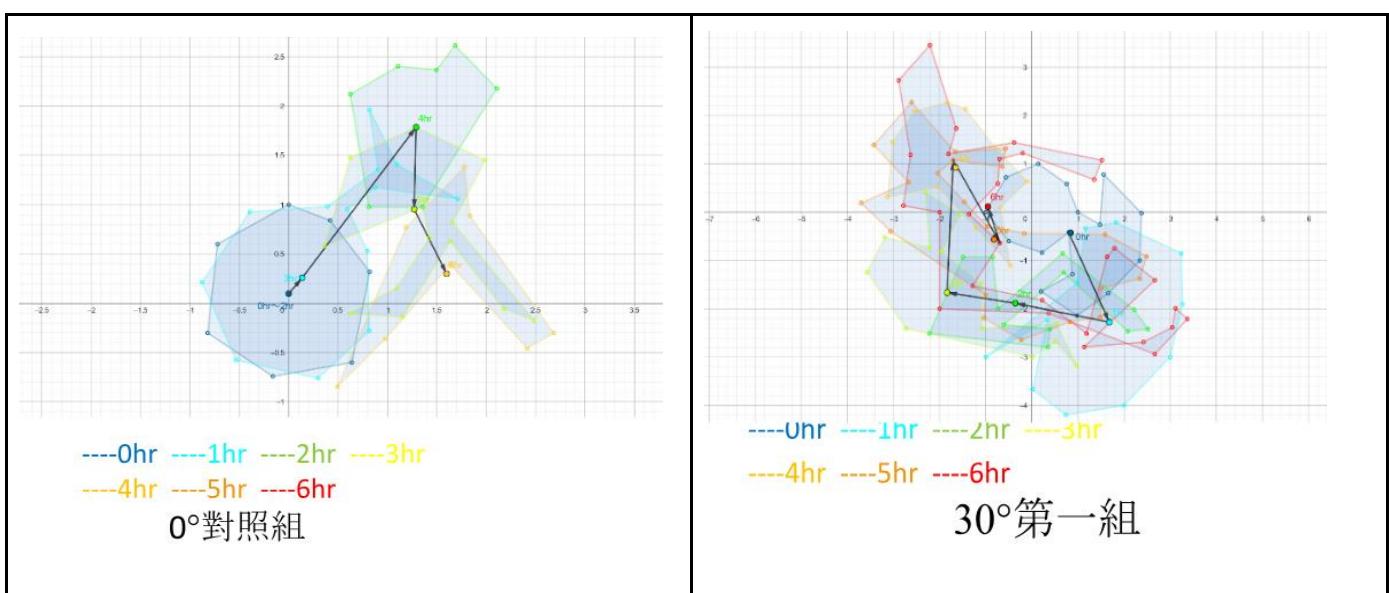
(以上五圖為作者自行拍攝)

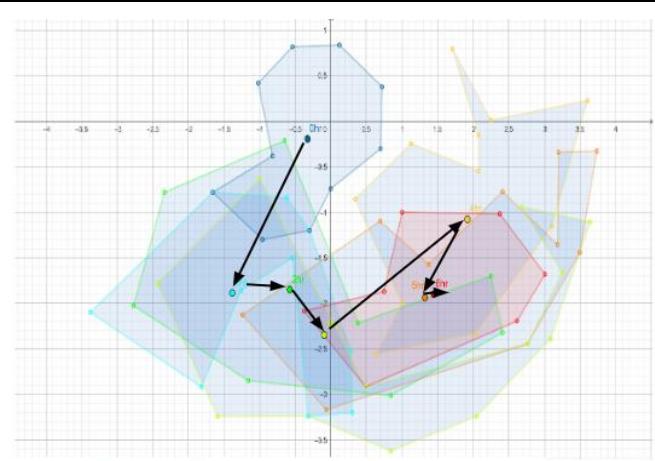
肆、研究結果

一、探討黏菌的移動與地心引力方向的關係

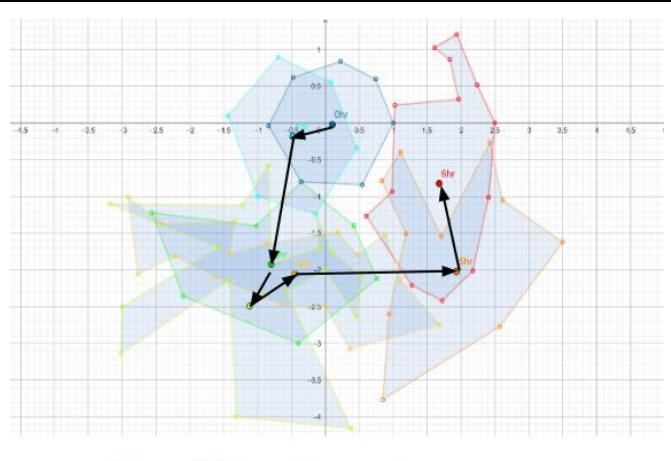
(一) 第一階段實驗結果: 直徑 10 公分培養皿, 角度以 0°-30°-60°-90° 培養

1. 第一階段各組黏菌移動情形暨重心移動示意圖

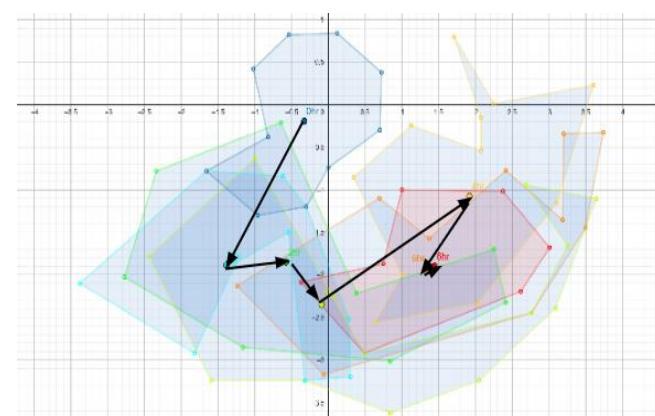




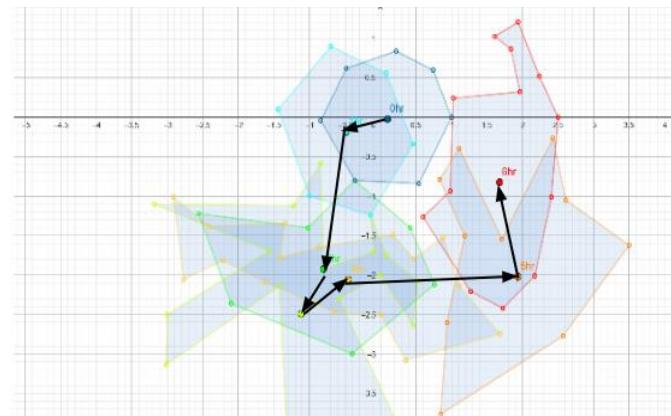
---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
30°第二組



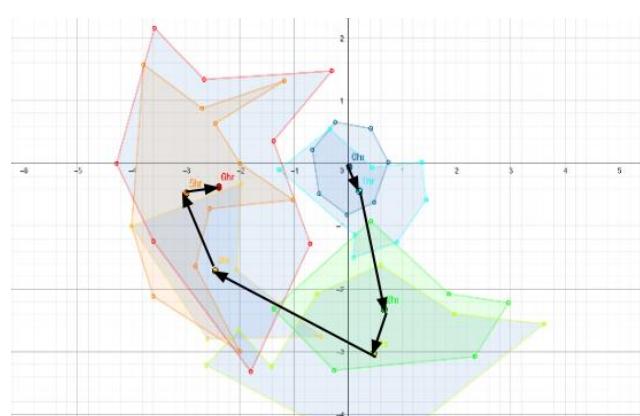
---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
30°第三組



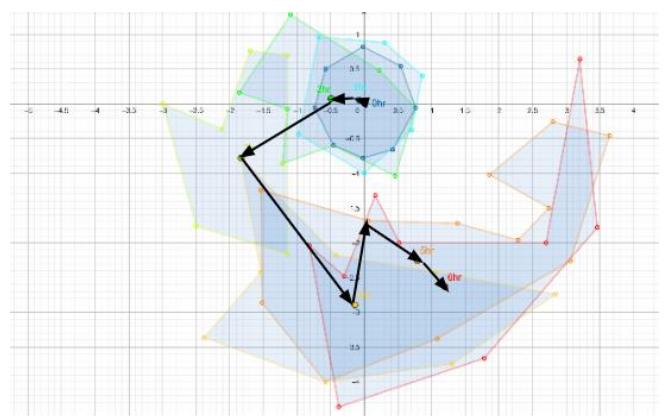
---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
60°第一組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
60°第二組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
60°第三組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr
90°第一組

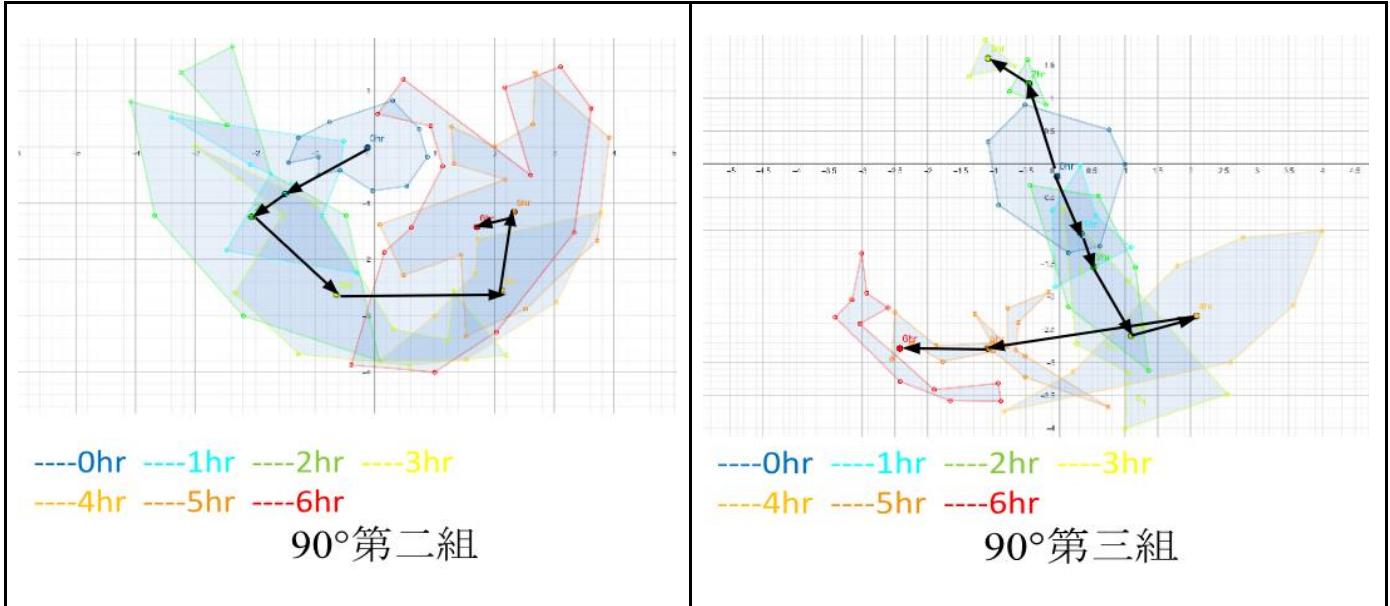


圖 32. 第一階段各組黏菌移動情形暨重心移動示意圖

(以上畫面為作者截圖 ggb 畫面後由 word 編輯得到)

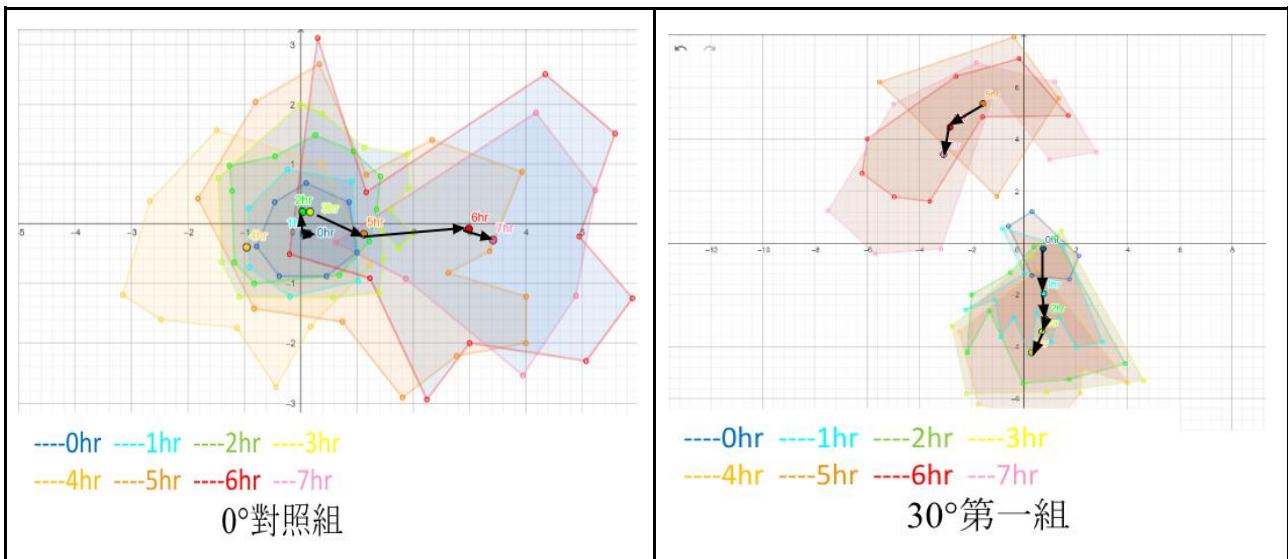
2.第一階段實驗小結:

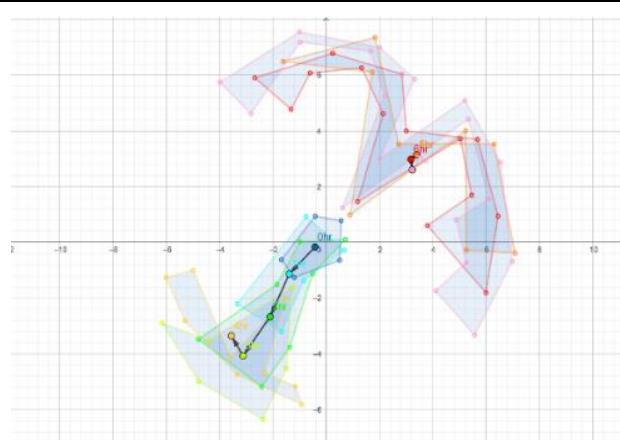
(1)在 30° - 60° - 90° 傾斜角度中，我們觀察到黏菌在 3 小時內均向重力方向移動。

(2)培養時間 4 到 7 小時時，我們觀察到因為培養皿空間有限，黏菌移動至培養皿最下方的邊緣時，就會開始往側邊或上方移動生長。

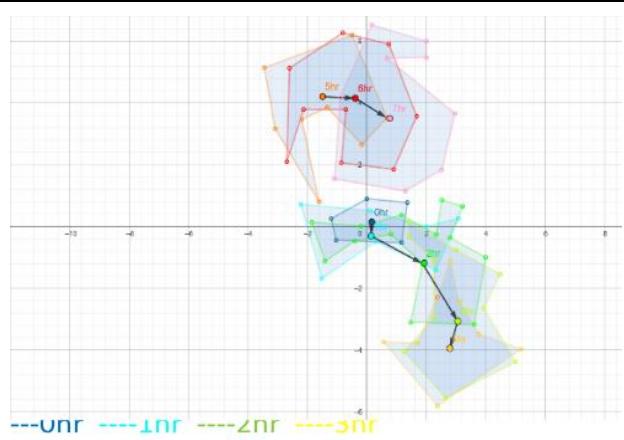
(一)第二階段實驗結果:直徑 15 公分培養皿，角度以 0° - 30° - 60° - 90° 培養至第 4 小時，將培養皿上下 180° 翻轉，再紀錄 4 小時。

1.第二階段實驗各組黏菌重心移動示意圖

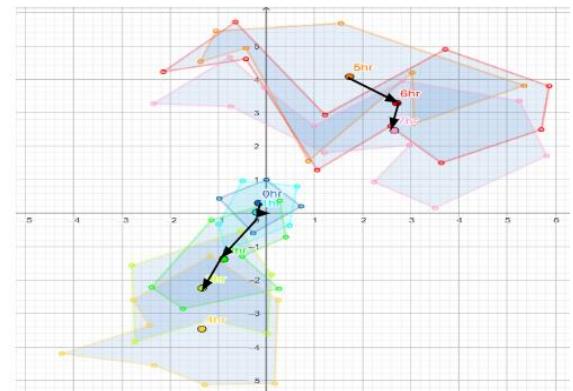




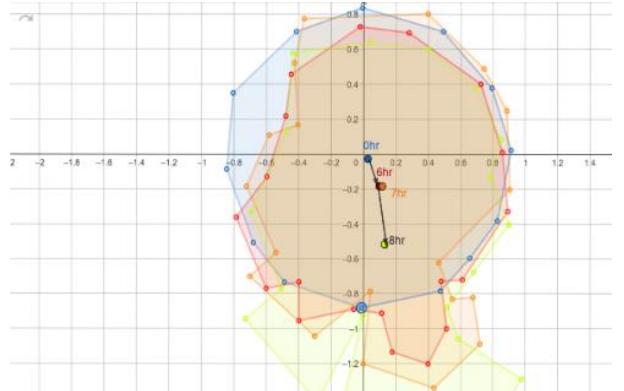
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
30°第二組



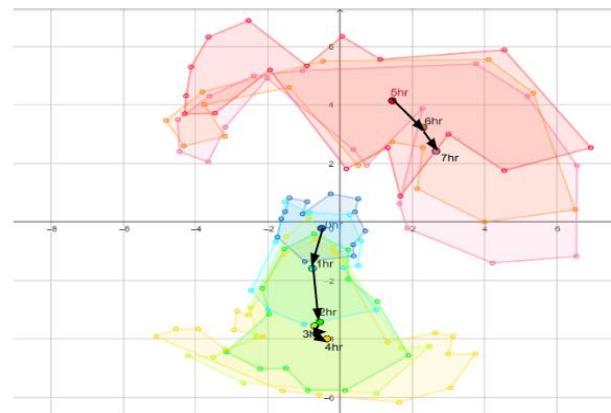
---unr ---1hr ---2nr ---3nc
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
30°第三組



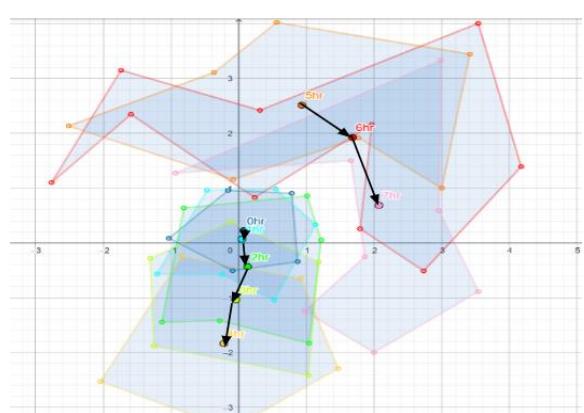
---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
60°第一組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
60°第二組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
60°第三組



---0hr ---1hr ---2hr ---3hr
---4hr ---5hr ---6hr ---7hr
90°第一組

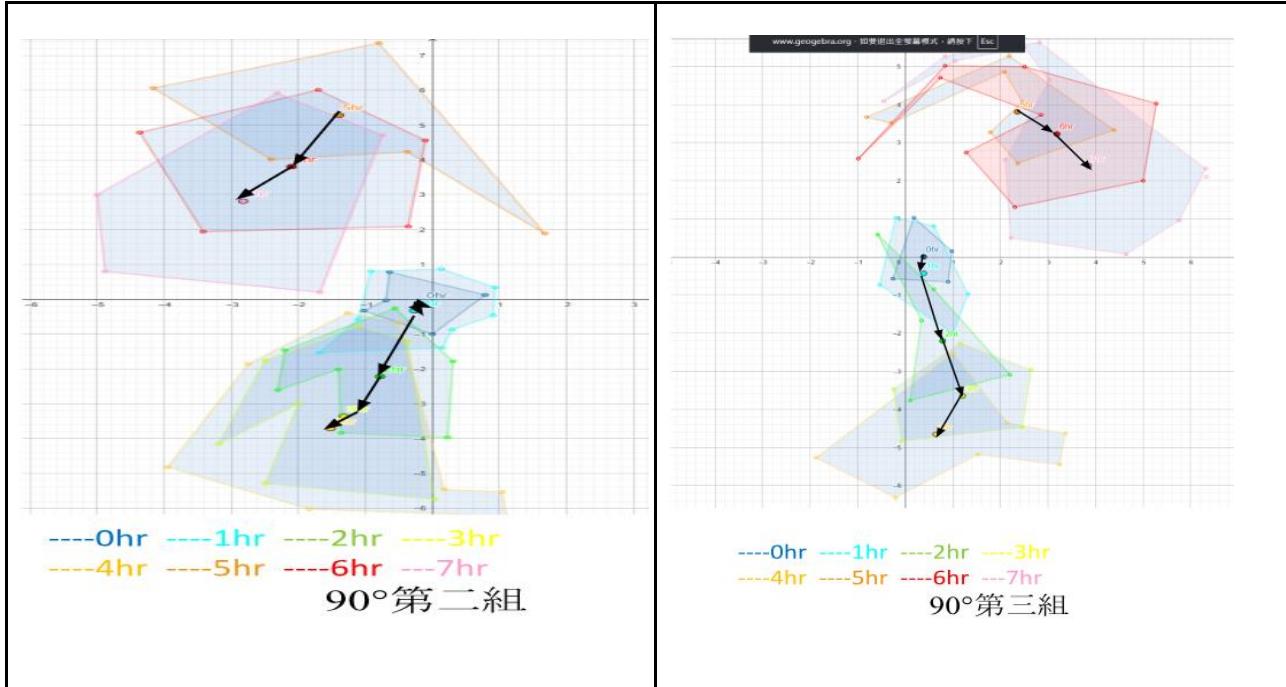


圖 33. 第二階段實驗各組黏菌重心移動示意圖(畫面為作者截圖 ggb 畫面後由 word 編輯得到)

2.第二階段實驗小結:

- (1) 在 30° - 60° - 90° 傾斜角度中，我們觀察到因為培養皿直徑大，黏菌在 0 到 4 小時內尚未移動到培養皿邊緣，黏菌均呈現向重力方向移動的軌跡。以鉛直線向下為 0 度，黏菌向下移動方向與鉛直線夾角皆在 45° 之內。(圖形下半部所示)。
- (2) 第 4 小時將培養皿翻轉後，黏菌變成在培養皿的上方。黏菌在 1 小時內移動方向轉動將近 120 度，朝向新的重力方向移動。(圖形上半部所示)。

二、探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響

(一)單層磁鐵(70 高斯)與雙層磁鐵(140 高斯)實驗:

1.不同磁場強度與不同方向的磁極對於黏菌移動的影響

(1)不同磁場強度與不同方向的磁極對於黏菌移動的影響(直徑 10 公分培養皿)

表 3. 不同磁場強度與不同方向的磁極對於黏菌移動的影響(直徑 10 公分培養皿)

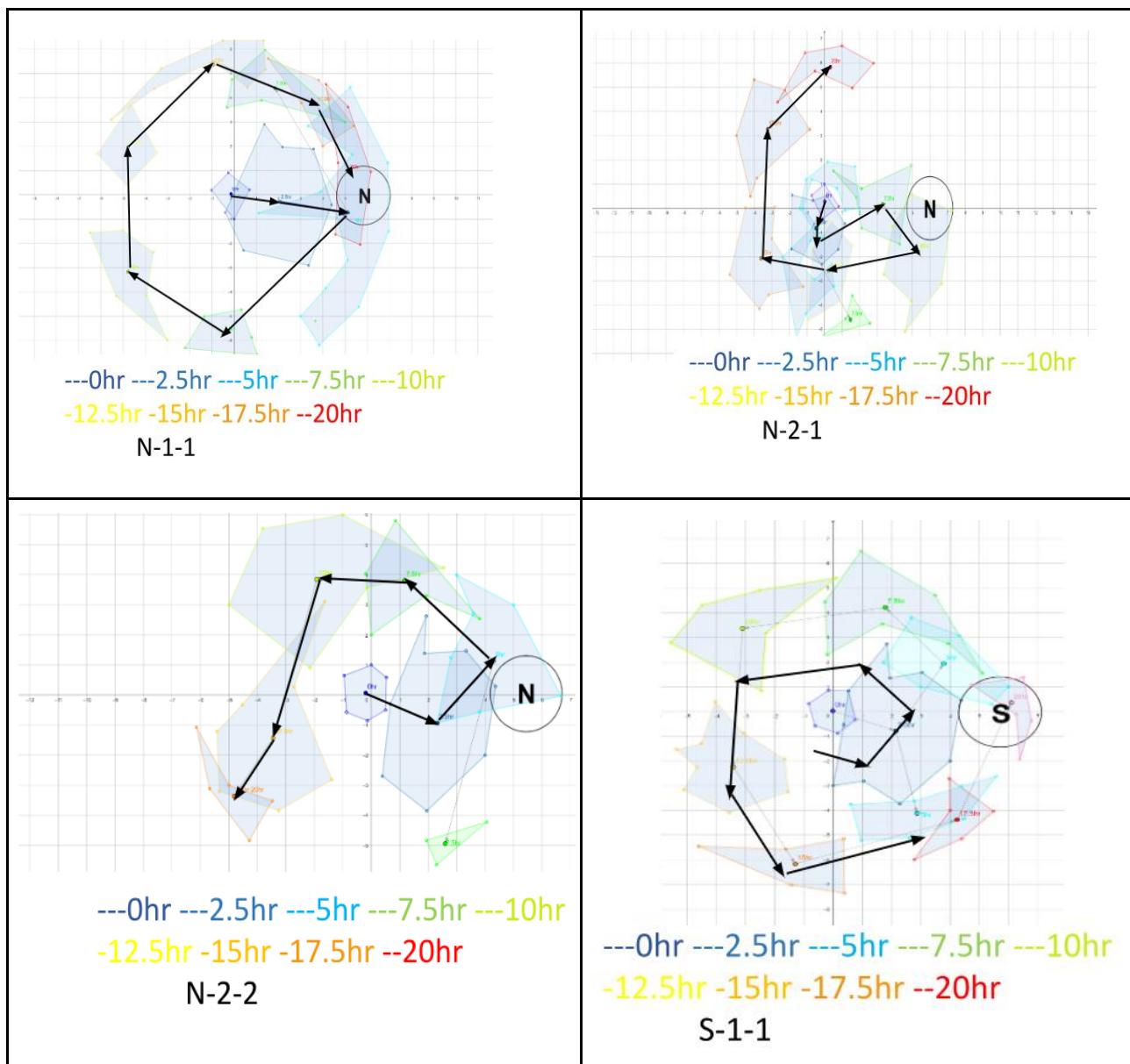
雙層磁鐵(140 高斯)	N-2-1	N-2-2	N-2-3	S-2-1	S-2-2	S-2-3
方向(順逆時針)	順	逆	順	逆	逆	逆
旋轉移動速度(角度/hr)	30	38.3	30	31.6	34.7	21
單層磁鐵(70 高斯)	N-1-1	N-1-2	N-1-3	S-1-1	S-1-2	S-1-3
方向(順逆時針)	順	順	順	逆	逆	逆
旋轉移動速度(角度/hr)	9	8	9	9	10	8

(2)不同磁場強度與不同方向的磁極對於黏菌移動的影響(直徑 15 公分培養皿)

表 4. 不同磁場強度與不同方向的磁極對於黏菌移動的影響(直徑 15 公分培養皿)

組別	N-2-1	N-2-2	N-1-1	S-2-1	S-2-2	S-1-1
磁通量	140 高斯	140 高斯	70 高斯	140 高斯	140 高斯	70 高斯
方向(順逆時針)	順	*逆	順	逆	逆	*順
旋轉移動速度(角度/hr)	26.2	25	22	21	21.4	14

3.不同磁場影響黏菌重心移動示意圖(直徑 15 公分培養皿中)



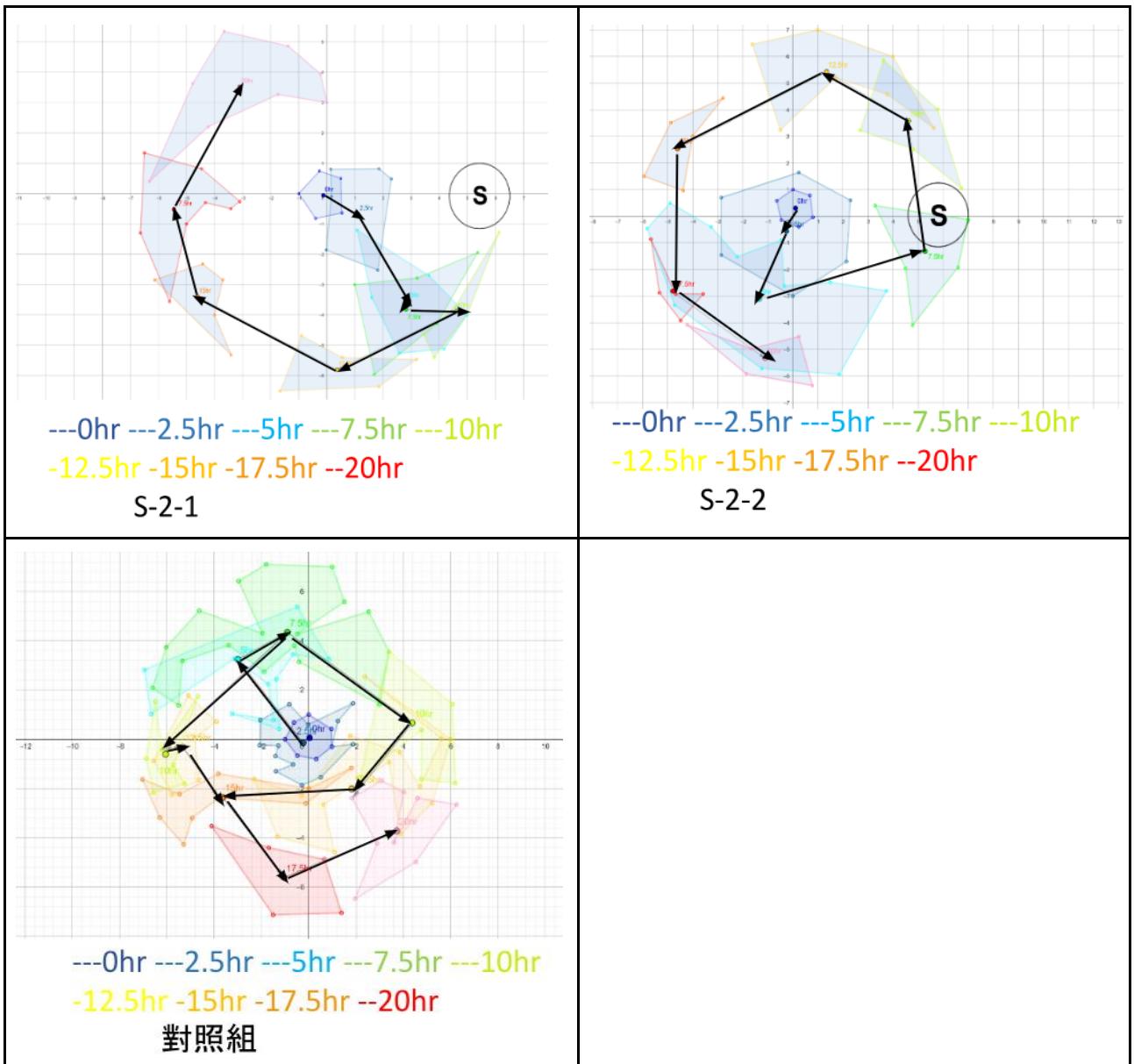


圖 34.不同磁場影響黏菌重心移動示意圖(畫面為作者截圖 ggb 畫面後由 word 編輯得到)

(二) 實驗小結

1. 不論磁極 N 上 S 下或是 N 下 S 上，雖然黏菌一開始生長方向隨機，但都有明顯轉向磁鐵生長的情形，展現出明顯的趨性(如圖 35、圖 36)。
2. 無論在直徑 10 公分或 15 公分培養皿中，磁鐵 N 上 S 下 的黏菌組以順時針方向旋轉移動佔 7/9 比例；反之磁鐵 S 上 N 下 的黏菌有 8/9 的組別，以逆時針方向移動。
3. 在小培養皿中，磁場強度明顯影響黏菌移動速度：在單層磁鐵(70 高斯)下，黏菌每小時平均旋轉角度約為 8.8°；在雙層磁鐵(140 高斯)下，黏菌每小時平均旋轉角度約為 30.9°，二者差距約為 3.5 倍。

4.在大培養皿中，磁場強度影響黏菌移動速度:在單層磁鐵(70 高斯)下，黏菌每小時平均旋轉角度約為 18° ；在雙層磁鐵(140 高斯)下黏菌每小時平均旋轉角度約為 23.4° ，二者影響差距較小約為 1.3 倍。

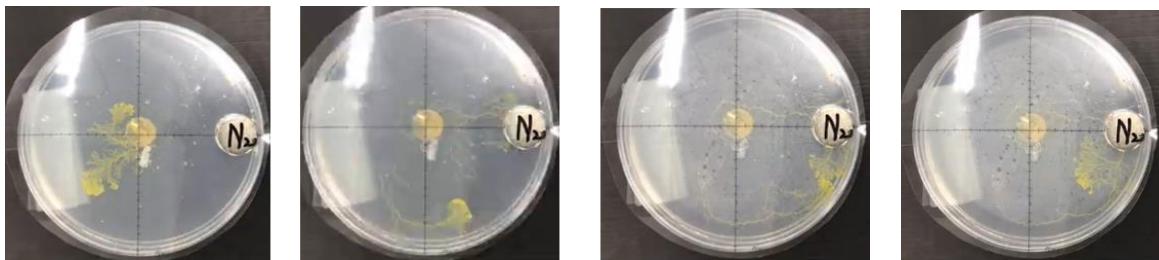


圖 35.黏菌生長對 N 上 S 下表現出正趨性(作者自行拍攝)

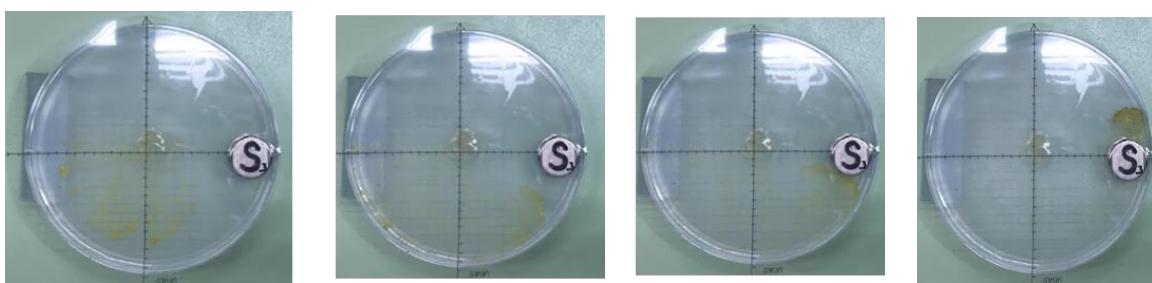


圖 36.黏菌生長對 S 上 N 下表現正趨性(作者自行拍攝)

三、探討電流強度對黏菌移動的影響

(一) 實驗結果

1. 不同電流對黏菌生長的影響(通電流 10 小時)

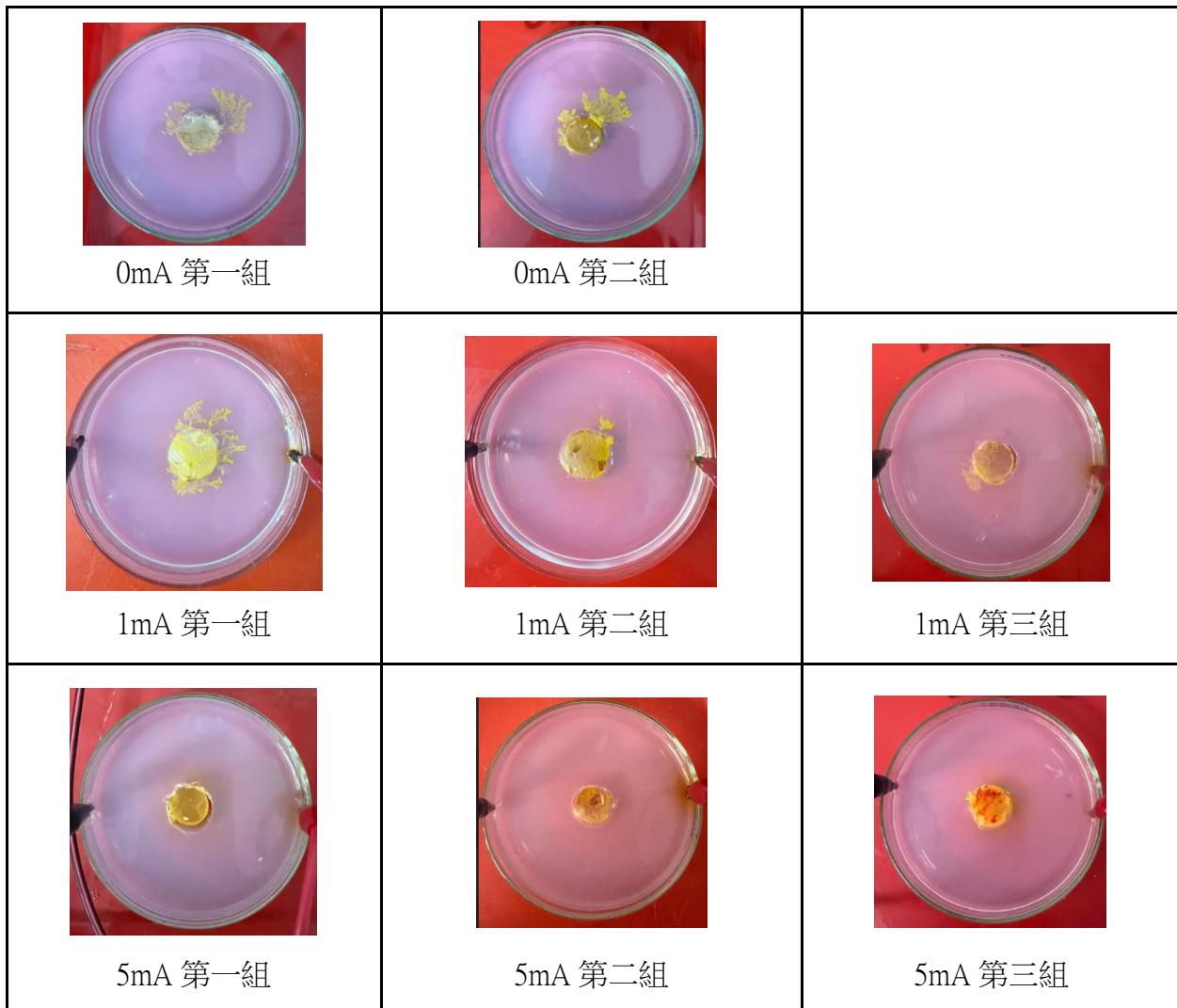


圖 37. 不同電流對黏菌生長的影響(通電流 10 小時) (作者自行拍攝)

(二) 實驗小結:

1. 黏菌移動速率為: 未通電流 > 通以 1mA 電流 > 通以 5mA 電流。
2. 黏菌生長的速度較其他實驗緩慢。
3. 通以 1mA 電流的黏菌在第二十二小時(如圖 38)，黏菌分泌出黃色分泌物(為死亡跡象)，將洋菜膠染色；通以 5mA 電流時，黏菌幾乎沒有移動，分泌出黃色分泌物。

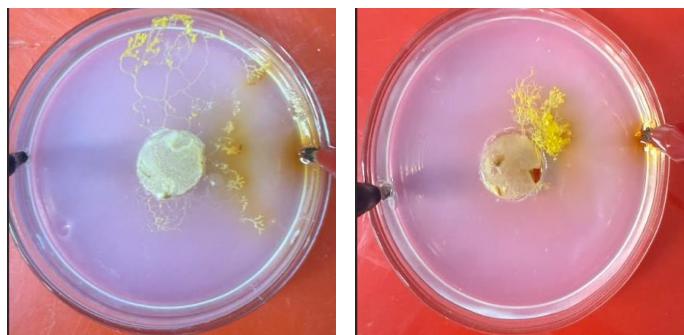


圖 38.黏菌分泌出黃色分泌物(作者自行拍攝)

四、探討黴菌對黏菌移動的影響

(一)各組黏菌移動示意圖

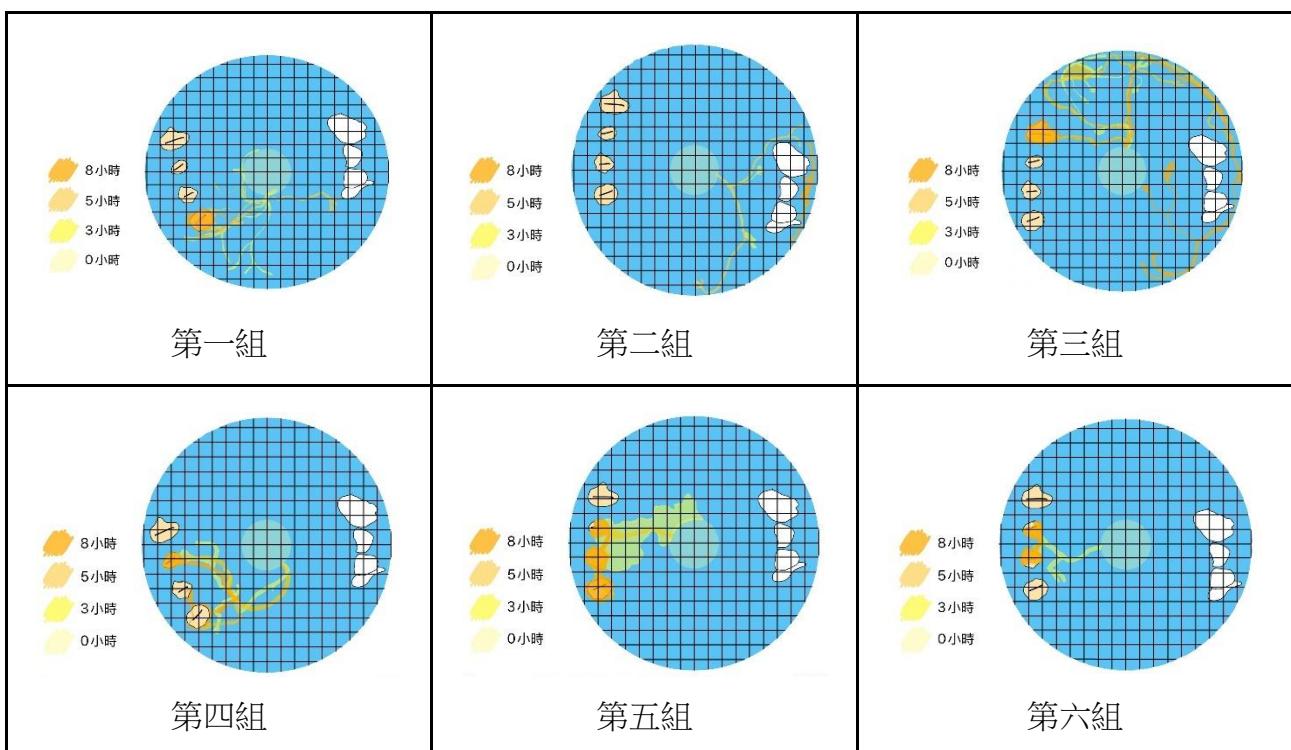


圖 39. 黴菌對黏菌移動影響示意圖(左側為新鮮燕麥，右側為有黴菌生長的燕麥)

(以上六個畫面為作者輸入原始圖檔，使用[無邊記]描繪而成)

(二)實驗小結: 第四五六組只找到新鮮燕麥，並移動到燕麥之上；第一三組新鮮與黴菌生長的燕麥都有找到，但只覆蓋新鮮燕麥；第二組只找到發霉的燕麥，但並沒有移動到燕麥上。

五、探討黏液對黏菌移動的影響

(一)各組黏菌移動示意圖

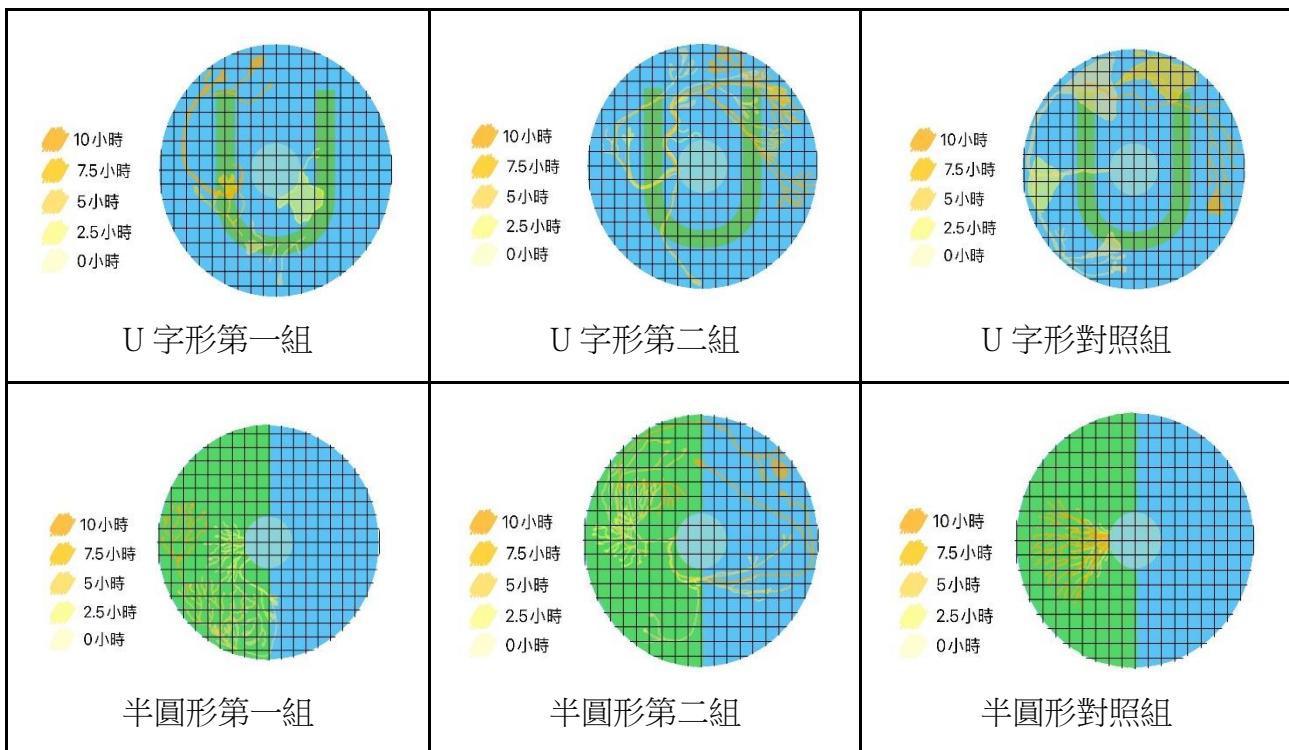


圖 40. 黏液對黏菌移動的影響

(以上六個畫面為作者輸入原始圖檔，使用[無邊記]描繪而成)

(二)實驗小結: 在 U 字形的黏液分布條件下，黏菌照著 U 字形黏液移動，在半圓形的黏液分布條件下，黏菌移動至塗抹黏液的區域。

伍、討論

一、探討黏菌的移動與地心引力方向的關係:

我們分別設置了 30° , 60° 和 90° 垂直的實驗各三組加上一組對照組，共十組，發現具有傾斜角度的黏菌組皆朝向地心引力方向移動，且翻轉培養皿後依然向下移動。我們推測可能是因為黏菌透過胞質流動的方式移動，而地心引力使胞質向下流動，所以黏菌較容易朝地心引力的方向移動。前人的科展作品中，並沒有對於黏菌是否具有趨地性進行研究；吳長祐等人在 2022 年的科展作品中的實驗，讓黏菌在不同斜坡往上移動，發現黏菌的移動速率隨著角度增加而減少。我們將黏菌在斜面中的移動過程，以軟體找出黏菌「重心位置」變化，並沒有發現各組中的黏菌移動速率與傾斜角度有顯著的相關。

二、探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響:

(一)磁場方向:磁鐵 N 上 S 下的黏菌組大部分(7/9)以順時針方向旋轉移動；反之，S 上 N 下黏菌有 8/9 的比例以逆時針方向轉移動。

(二)在直徑 10 公分的雙層磁鐵裝置下，黏菌的旋轉移動速率明顯大於單層磁鐵黏菌的旋轉速率，移動速率約為 3.5 倍；但直徑 15 公分的培養皿中，雙層磁鐵中的黏菌移動速率約為單層磁鐵的 1.3 倍。查詢資料後發現可能的原因：

1. 磁場極性決定了黏菌細胞內(如磁鐵礦顆粒)的磁矩排列方向，從而引導細胞骨架(如肌動蛋白)的極性或細胞質流的初始方向(順/逆時針)。更強的磁場會使鐵礦物質的磁化程度更高，產生更大的「磁扭矩」，直接推動細胞質流動或偽足伸展。
2. 黏菌可能通過感知磁場梯度來調整運動，類似於趨化性中的濃度梯度感知。高梯度環境下(多磁鐵組)讓黏菌更「堅定」地沿磁力線方向移動。
3. 磁場極性可能影響細胞膜電位或離子通道的極化方向(如鈣離子流動)，而磁場強度影響「幅度」：N 極朝上誘導特定方向的離子流，促進順時針環流；S 極朝上反向離子流導致逆時針環流。磁場越強，離子流的極化效應越顯著，運動速度或方向穩定性提高。

(三)自然界中有生物會隨著磁場方向改變，出現逆或順時針旋轉的現象。有研究發現「磁性細菌」在外部磁場翻轉時，菌群會由原來在微滴中的旋轉方向，整體逆轉(Murat et al., 2016)。

三、探討電流強度對黏菌移動的影響:

(一)實驗中顯示電流大小會影響黏菌的移動速率甚至會影響黏菌生存，推測可能原因為：

1. 電穿孔效應(Electroporation): 即使微弱電流也可能導致細胞膜暫時性穿孔，若電流過強，則可能造成不可逆的膜破壞，導致細胞質流失、離子失衡而快速死亡。
2. 電流可能直接干擾 ATP 合成(如線粒體功能受損)，導致能量不足而運動減緩。
3. 在磁場或弱電流下，黏菌需分配能量抵抗物理干擾(如修復膜損傷)，導致運動速率下降。高強度時，能量系統崩潰，細胞死亡。

因此建議要利用電流進行黏菌實驗時，在電流的大小設定時以「微安培」為單位。

(二)此實驗中我們所使用的硝酸鉀洋菜膠，雖實驗前經過測試，確認其兼具培養黏菌與導電的功能，但實驗中發現未導電導電作的對照組，上面的黏菌生長相較純水洋菜膠緩慢。是否硝酸鉀不利於黏菌生長，或是濃度需要調整？後續要進行實驗需先做驗證。

四、探討黴菌對黏菌移動的影響：

實驗中顯示黏菌菌脈觸碰到新鮮燕麥時，便會迅速移動至燕麥上方，但當菌脈接觸到有生長黴菌的麥片時，卻不會移動至有黴菌生長的燕麥片正上方。查詢資料後推測可能原因如下：

(一)黏菌可能避開產生厭惡氣味或有害物質的區域，稱為負趨化(negative chemotaxis)。

黴菌在分解食物時可能釋放出黴菌毒素(mycotoxins)、揮發性有機物(VOCs)與酸性代謝產物。這些物質對黏菌來說可能是有害的訊號，因此黏菌會選擇避開它們。

(二)黏菌在自然界中會選擇風險最小的食物來源，黴菌可能代表食物已被其他微生物佔據、品質變差，黏菌會選擇不進入可能含有競爭者或毒素的區域。黏菌的這種行為可看作是一種「避敵性策略」。

五、探討黏液對黏菌移動的影響：

黏菌最為人津津樂道的就是走迷宮尋找食物的能力。許多實驗證明黏菌會使用黏液作為「路徑記錄」與「導引」工具，標記已經走過的路徑，避免重複；但在我們的研究中卻看見，黏菌更「喜愛」盤踞在塗抹黏液的區域，甚至會沿著有黏液的路徑移動。

文獻中提及不利環境中的黏菌會優先佔據先前探索過的區域，而不是未探索過的區域(Fernando et al,2019)，在這次研究中並無不利的環境因子，所以我們猜想的原因可能是：

(一)黏菌其實是順著環境線索走：我們為了方便觀察黏液塗抹的區域，加入了食用色素，黏菌看起來沿著黏液移動，實際上黏菌可能是被環境線索影響。所以在這個實驗中我們忽略了做好控制變因。

(二)黏菌的行為具有彈性與情境反應性：黏菌的行為並不是絕對的，它會根據整體環境條件或者受到各種趨性如光線、溫度、營養物質、其他微生物等交互作用後，做出「最有利」的決策。例如前面的重力實驗，黏菌依循重力方向向下移動，我們將培養皿上下翻轉後，黏菌幾乎立即循著原來的路徑向下移動，沒有避開走過的路徑。

六、本研究的貢獻與前人研究的差異性

表 5.前人研究與本研究貢獻比較表(本表作者自行整理)

研究目的	前人相關研究	本研究貢獻
探討黏菌的移動與地心引力的關係	<p>國外研究</p> <p>1. 黏菌放置於垂直板面 65.8%朝下移動，29.4%朝上移動(Wolke et al.,1987)</p> <p>2. 使用快速旋轉器模擬微重力及太空環境，證實黏菌能在重力環境改變時調節胞漿流速與振動頻率。(Block et al.,1994)</p> <p>國內研究與科展實驗</p> <p>1. 對黏菌研究多聚焦於其生態多樣性、代謝及應用潛力方面，較少探討黏菌的重力趨性。</p> <p>2. 黏菌向上爬行速度，角度大者速度慢。(吳等， 2022)</p>	<p>1. 本研究藉由翻轉黏菌，畫出黏菌移動路徑，證明黏菌具有顯著的趨地性。</p> <p>2. 由黏菌的移動軌跡圖得出不論在 30 度、60 度、90 度斜面上，黏菌皆具有趨地性。</p>
探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響	<p>國外研究</p> <p>對於磁場的影響，多聚焦在黏菌的細胞生理變化，如細胞分裂、代謝、胞漿流動特性會被影響，但「磁場是否直接影響移動方向」目前研究較少。</p> <p>國內研究與科展實驗</p> <p>當磁性 N 上 S 下黏菌有正趨性，磁性 N 下 S 上則無此現象。(吳等， 2022)</p>	<p>1. 本研究發現無論是 N 上 S 下或是 S 上 N 下，黏菌的移動皆表現出對磁鐵的正趨性。</p> <p>2. 當黏菌移動至磁鐵後，會繞著培養皿移動。N 上 S 下環境中，7/9 的黏菌為順時針方向移動；N 下 S 上環境中， 8/9 的黏菌為逆時針方向移動。</p> <p>3. 黏菌在較強的磁場中移動速度比較弱磁場快。</p>
探討電流對黏菌移動的影響	<p>國外研究</p> <p>1. 黏菌的原生質體會被吸引至電流匯位置，藉此改變其移動方向一即黏菌呈現電趨性 (electrotaxis) 行為。實驗證實可利用此特性「引導黏菌走線」，對未來在生物電子路由設計領域有重要參考價值。(Tsuda, et al.,2012)。</p> <p>國內研究與科展實驗</p> <p>黏菌電線具有可變電阻特性可應用於特殊環境或生物感測器(林等，2024)。</p>	<p>1. 黏菌受到電擊會有負趨性。</p> <p>2. 找出可以利用<0.1M 硝酸鉀溶液製備洋菜培養基，用來進行電流與黏菌等微生物生長的實驗。</p> <p>3. 1mA 的電流對於黏菌的生長有抑制的作用，如要觀察黏菌的生長，適宜使用更微小的電流。</p> <p>4. 並未觀察到黏菌的電趨性。</p>

探討黴菌對黏菌移動的影響	<p>國外研究 並無研究黴菌影響黏菌移動行為的研究。但有黏菌與紅酵母動態的研究發現二者間互為競爭者。</p> <p>國內研究與科展實驗 細菌與黏菌會產生競爭的現象(吳等， 2022)</p>	黏菌在有食物情形下會「選擇避開」黴菌，但經過長時間，黏菌在食物減少後會移動到黴菌生長區域，與其競爭。
探討黏液對黏菌移動的影響	<p>國外研究 1. 黏菌會避免穿越自己留下的黏液痕跡，這種外部化的空間記憶，有助於其在複雜環境中的導航。(Boisseau et al,2016) 2. 不利環境中的黏菌會優先佔據先前探索過的區域，而不是未探索過的區域，利用黏液分泌作為緩衝。(Fernando et al,2019)</p> <p>國內研究與科展實驗 黏菌較少停留在黏液痕跡上(吳等， 2022)。</p>	1. 利用食用色素明顯標示黏液的位置。 2. 對照組的黏菌幾乎都可直接穿越過食用色素上(無黏液)的區域；實驗組則有黏菌直接沿著 U 型含黏液的染色區移動。 我們推測黏液痕跡作為外部化空間記憶有多樣化功能，有趨利也有避害的導航功能。

柒、結論

(一)在地心引力對黏菌影響的實驗中發現，黏菌表現出趨地性。

(二)黏菌對於磁鐵具有正趨性；在磁鐵(N 上 S 下)會繞著培養皿邊緣順時針旋轉；反之磁鐵(S 上 N 下)則逆時針旋轉。在磁場較強的環境中旋轉速度較快。

(三)黏菌在電流 1mA 以上的環境中移動速度較緩慢，甚至出現死亡的跡象。

(四)黏菌不會移動至黴菌生長的燕麥，顯示出黏菌與黴菌之間的競爭關係。

(五)實驗中發現黏菌似乎沿著有黏液的路徑移動，顯示出黏菌有順著環境線索走的趨勢。

未來展望

七年級生物老師曾播放一個關於瓢蟲趨性(taxis)的影片，當研究可以控制所有變因時，我們可以明顯地分別觀察到瓢蟲的負趨地性與正趨光性。但生物生存的環境中，往往有許多變項會同時交互影響。該如何設計實驗控制變因，減少環境因素對於黏菌的影響，釐清我們設計的實驗是否真的能解答我們的問題，是我們這次科展實驗的最大心得。

- 1.我們想試著以濾紙培養黏菌進行實驗，因為經過資料查詢發現洋菜膠中含有醣類可提供黏菌養分，可能影響它面對各種因素的判斷。
- 2.以複式顯微鏡觀察黏菌的胞質流動現象時，發現黏菌會改變其細胞質流動的方向。希望能長時間觀察與錄影，看看流動方向是否具有一定規律，並且尋找方法測量流動速率，以了解流動速率是否影響黏菌的移動速度。
- 3.電擊的實驗可以減小電流強度，使黏菌可以存活較長時間，觀察電流對黏菌移動的長期影響。
- 4.更準確測試不同磁場強度對於黏菌移動的影響，使用精密儀器測量磁鐵磁力進行實驗。
- 5.我們的實驗多為巨觀，可以試著增加微觀角度，以顯微鏡觀察。
- 6.我們推測磁場可以影響黏菌移動的可能原因為黏菌體內含有鐵礦物質，未來我們想使用鐵螯合劑處理黏菌，觀察運動方向是否受影響。

捌、參考資料及其他

一.中文文獻

1. 北梅國中 (民 112)。南投縣第 63 屆中小學科學展覽會作品作品說明書：聯黏有偷一探討多 頭絨泡黏菌特性及其應用。
- 2.吳長祐、劉鎮瑋(2022)。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會作品說明書：關於史萊那檔案—黏菌爬行的相關研究。
- 3.林映辰、李竑萱、陳睿泓(民 113)。中華民國第 64 屆中小學科學展覽會作品說明書：探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線(Physarum wires)的特性。
- 4.陳睿泓、林映辰、黃柏誠(2023)。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書：影響盤頭絨泡黏菌最佳化途徑的因素及其應用。
- 5.薛良凱(1992)。中華民國第 32 屆中小學科學展覽會作品說明書：黏菌(Slime Molds)攝食方式的探討—胞內、胞外消化的驗證。

二.英文文獻

- 1.Boisseau, R. P., Vogel, D., & Dussutour, A. (2016). Slime mold uses an externalized spatial “memory” to navigate in complex environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(23), 6474 – 6479.
- Dussutour, A., & Latty, T. (2020). Substrate and cell fusion influence on slime mold network dynamics. *Scientific Reports*, 10, 80320.
- 2.Frey, S., et al. (2022). Stepwise slime mould growth as a template for urban design. *Scientific Reports*, 12, 5439.
- 3.John S. MacNeil (2000) Slimy, But Not Stupid: Study suggests slime molds can do simple computations. *Science* 27 Sep 2000.
- 4.Mirna Kramar and Karen Alim (2020). Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network. Edited by Andrea J. Liu, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, and approved January 19, 2021 (received for review April 23, 2020)
- 5.Murat, D., Hérisse, M., Espinosa, L., Bossa, A., Alberto, F., & Wu, L.-F. (2015). *Opposite and coordinated rotation of amphitrichous flagella governs oriented swimming and reversals in a magnetotactic spirillum*. *Journal of Bacteriology*, 197(19), 3275 – 3282.
- 6.Sarraf, M., Kataria, S., Muroyama, D., & Kurepin, L. V. (2022). Growth, physiological, biochemical and molecular changes in plants induced by magnetic fields: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 181, 41 – 52.
- 7.Tero, Atsushi, et al. (2010) “Rules for biologically inspired adaptive network design.” *Science* 327.5964 (2010): 439-442.
- 8.Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada & Ágota Tóth (2000). Maze-solving by an amoeboid organism TNature volume 407, page470.
- 9.Vogel, D., et al. (2022). Behavioural changes in slime moulds over time. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 377(1843), 20200418.

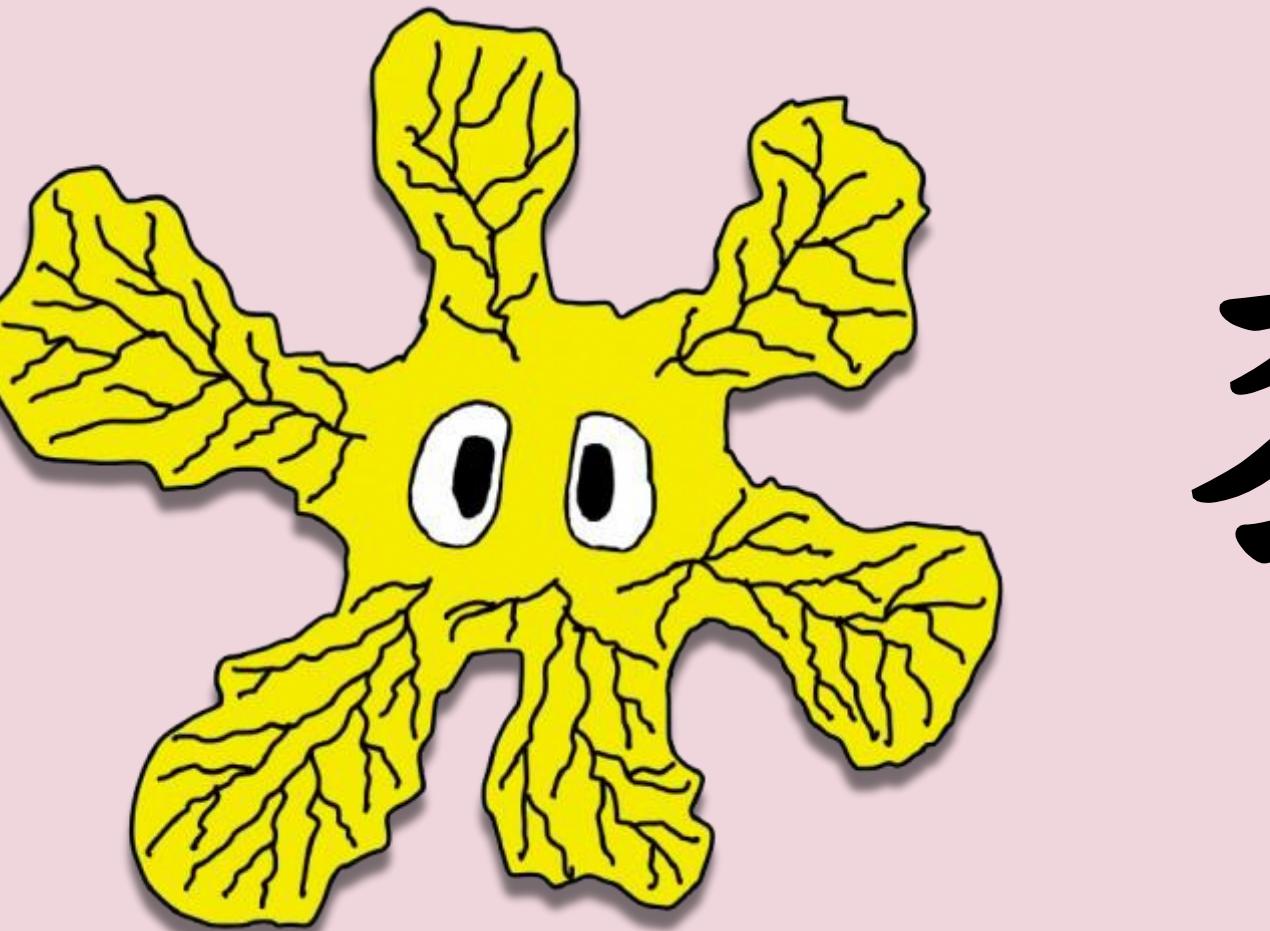
【評語】030303

1. 此研究以多頭絨泡黏菌為對象，探討其在重力、磁場、電流、黴菌與自身黏液等環境因子下的移動行為，主題明確且具科學探究精神，實驗設計有條理，資料紀錄亦相當詳細，展現良好的實驗執行與紀錄能力，對於理解黏菌行為機制具有參考價值。
2. 實驗設計結合多種物理與生物因子，整體構思具潛在創意，但目前研究主要聚焦於重現與驗證前人已發表的實驗結果，若能進一步強化與先前研究的差異分析，或針對結果趨勢異同進行深入討論，將有助於提升研究的原創性與價值。
3. 雖然研究設計良好，但部分數據重複數不足或不一致，且缺乏統計顯著性檢定與誤差範圍呈現，使結果解釋力略顯薄弱。建議針對各組實驗結果補充樣本數並進行基本統計分析，以提升科學嚴謹性與數據說服力。
4. 在對黏菌趨向黴菌與黏液行為的解釋部分，雖引用相關文獻說明其可能具「外部化記憶」或「彈性調整」能力，惟推論與假說之間的連結尚可更明確，建議未來可進一步區分自發行為與環境驅動的反應機制，並明確假設與驗證方式。
5. 研究中引用國內外相關文獻，對主題背景有一定掌握，然而部分前言與文獻引用語句表述尚顯模糊或語意不明，建議加強前言與討論撰寫的邏輯性與清晰度，提升整體報告的可讀性與專業性。

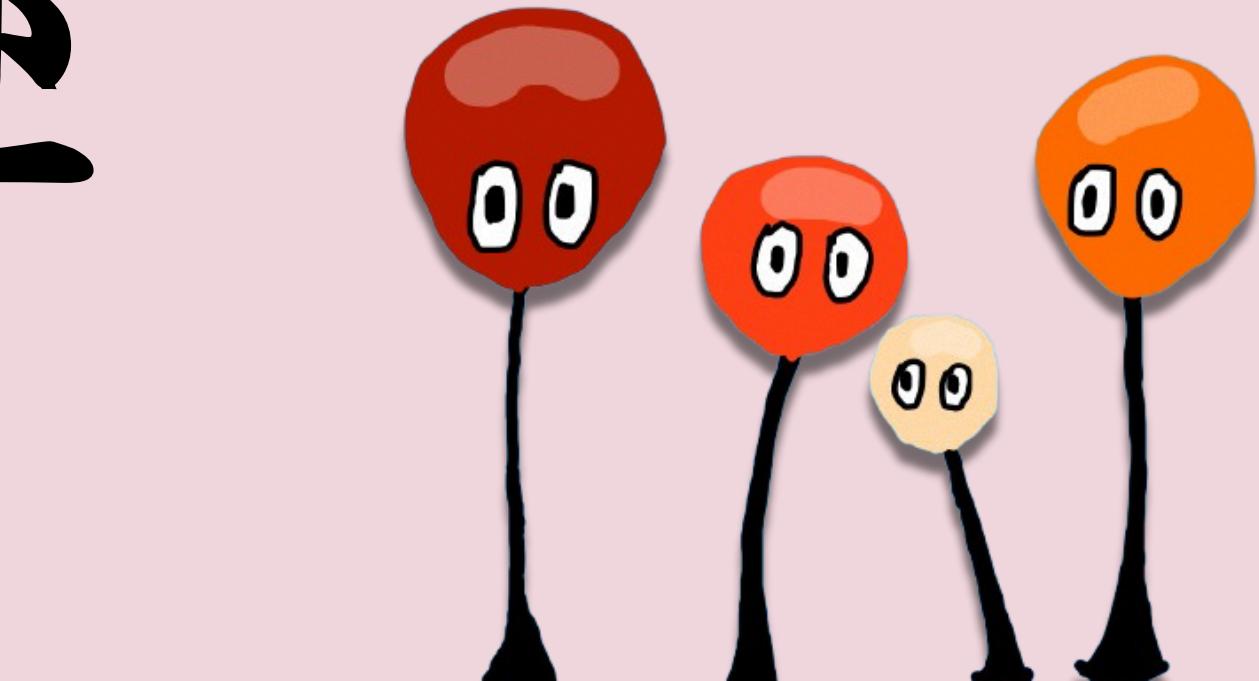
6. 資料呈現方式目前以圖形繪製為主，輔以 Geogebra 等工具輔助分析，雖有助於視覺化理解，但仍欠缺具體的量化結果與可比較數據，建議未來可補充移動速率、角度變化等具體數值，並加入統計資料，以增進量化層面的完整性。

作品海報

黏黏有移—探討環境因素對 黏菌移動的影響



黏菌移動的影響



研究動機

七年級上到原生生物時初識黏菌，才知道小時候玩的史萊姆原型是它！黏菌在迷宮中可以以最短的路徑找到食物。用燕麥模擬東京鐵路網中各站的位置，黏菌形成的網絡與東京地鐵路高度相似卻又更有效率。

帶著好奇心，我們參加學校科展研究黏菌。歷屆科展作品中有些研究引起我們興趣，所以我們想設計實驗方法去驗證前人的研究結果，也想找出影響黏菌移動的可能因素。希望透過這次的實驗，讓我們對於黏菌有進一步的認識。

研究目的

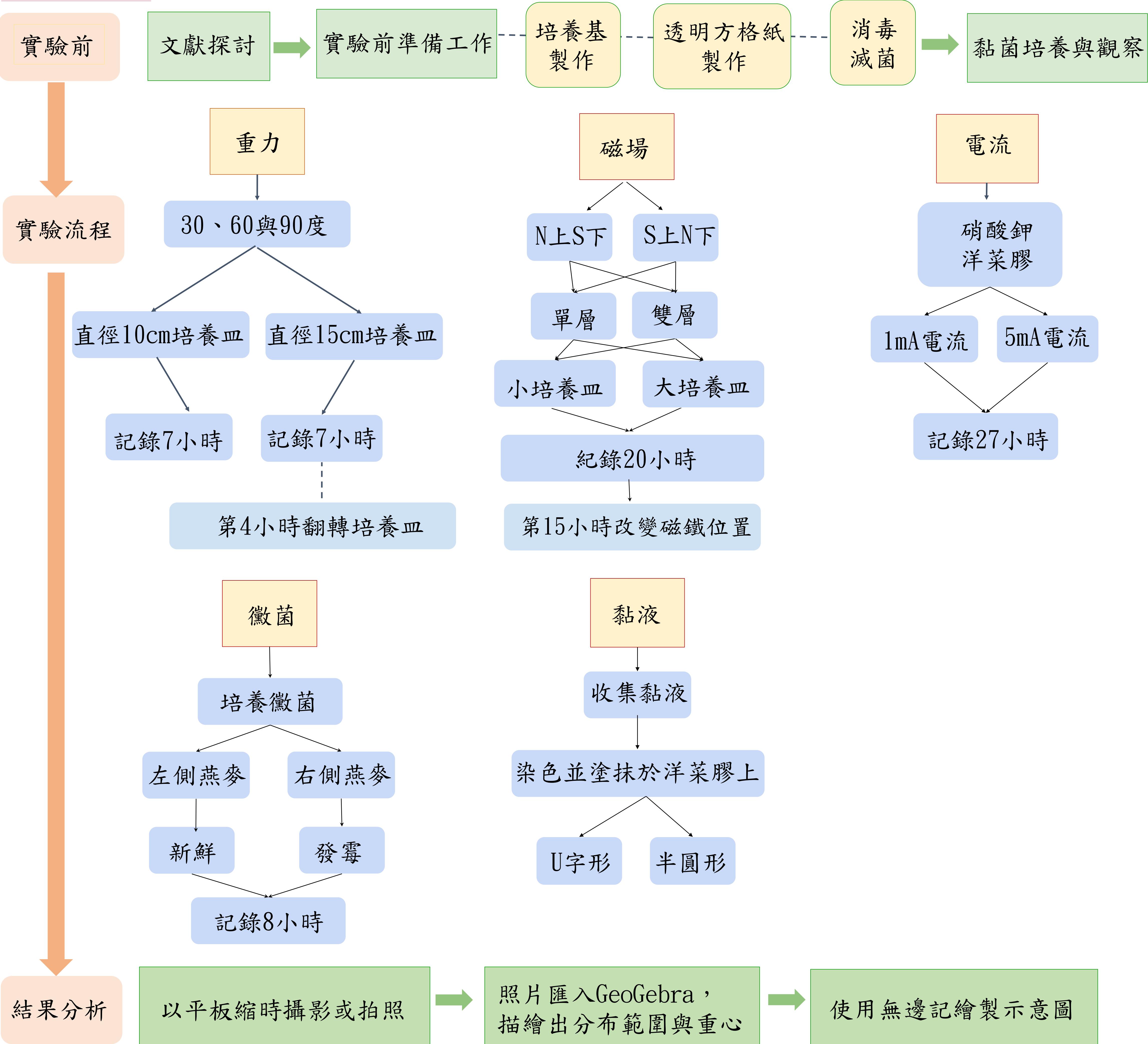
- (一) 探討黏菌的移動與地心引力的關係。
- (二) 探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響。
- (三) 探討電流強度對黏菌移動的影響。
- (四) 探討黴菌對黏菌移動的影響。
- (五) 探討黏液對黏菌移動的影響。



多頭絨泡黏菌
(照片由作者拍攝)

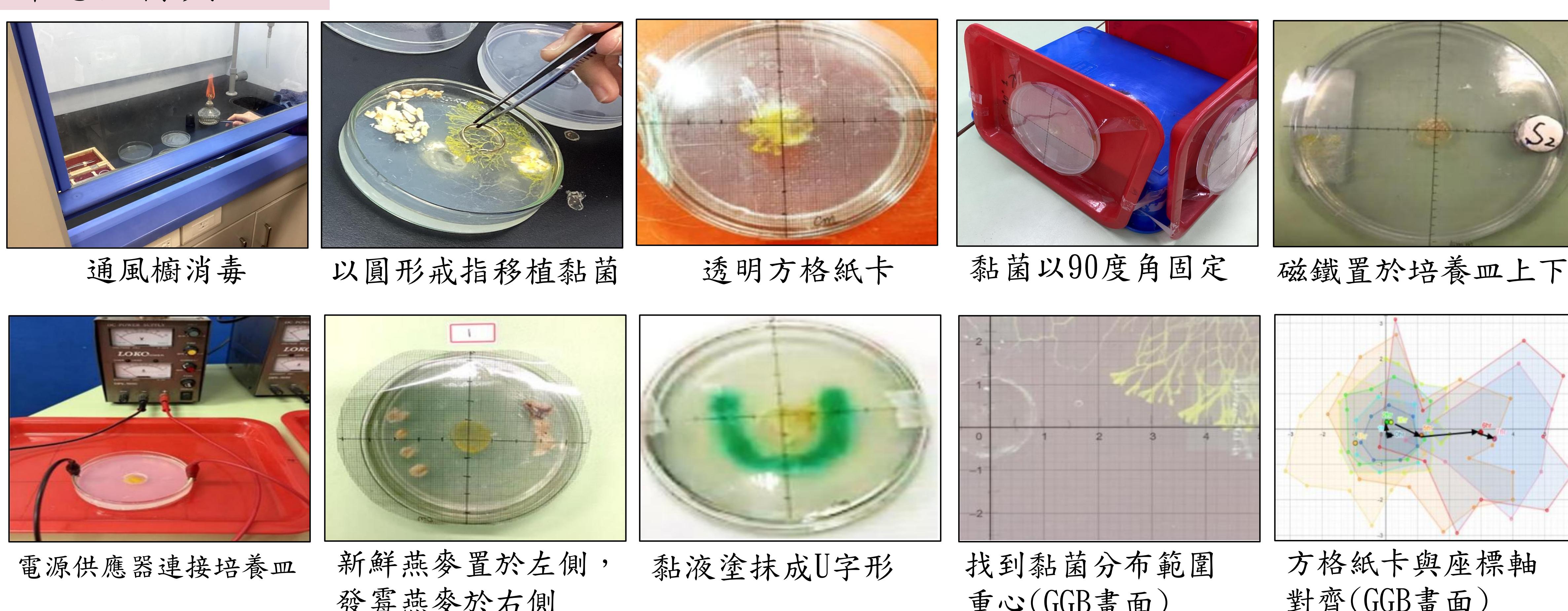
研究架構與器材

研究架構 (研究架構圖由作者繪製)



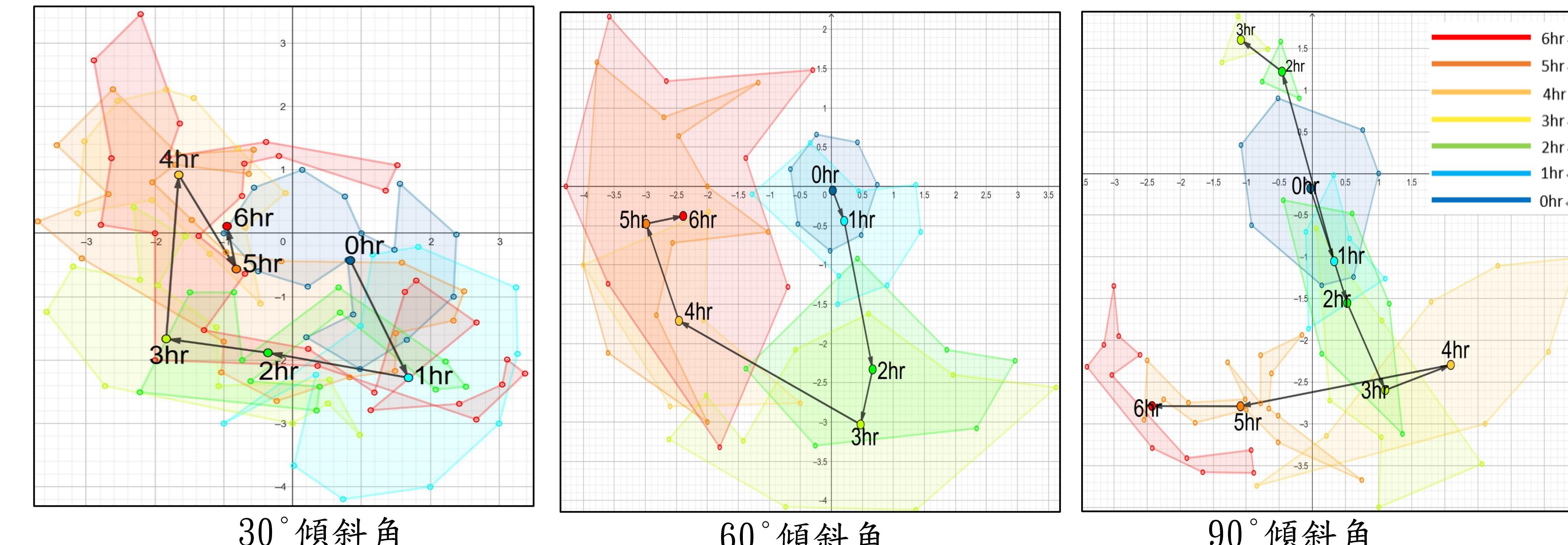
研究器材與方法

(研究器材與方法照片由作者拍攝)

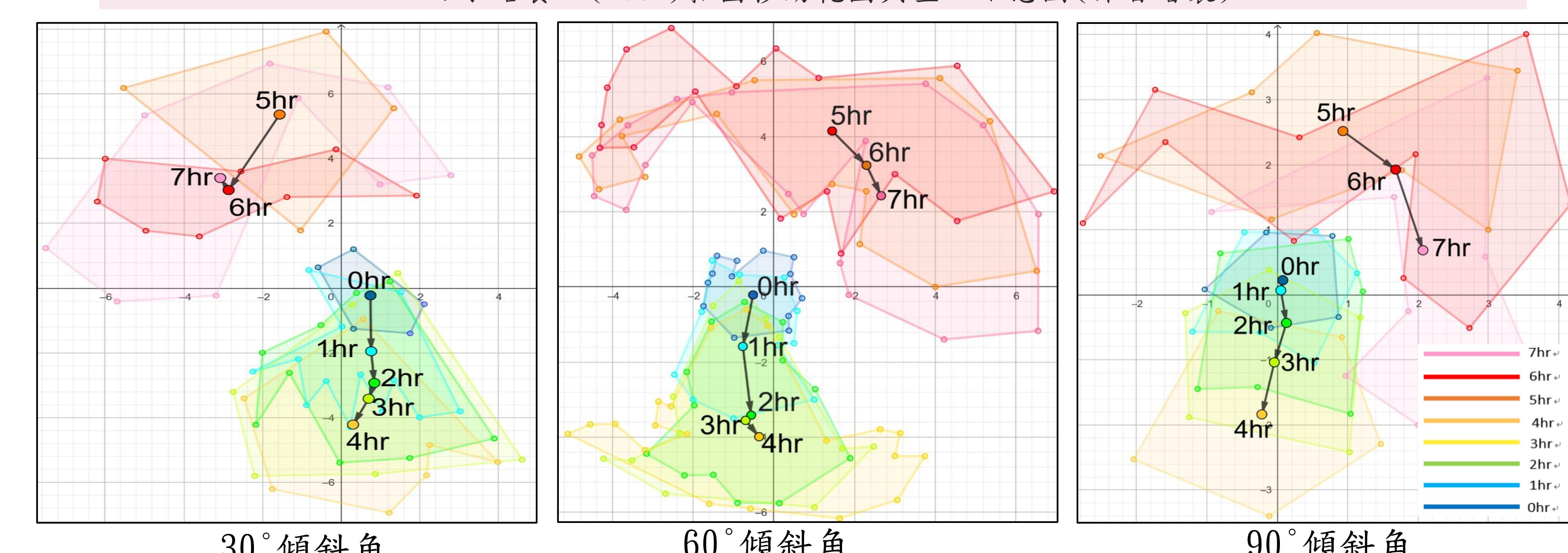


研究結果與討論

一、探討黏菌的移動與地心引力方向的關係

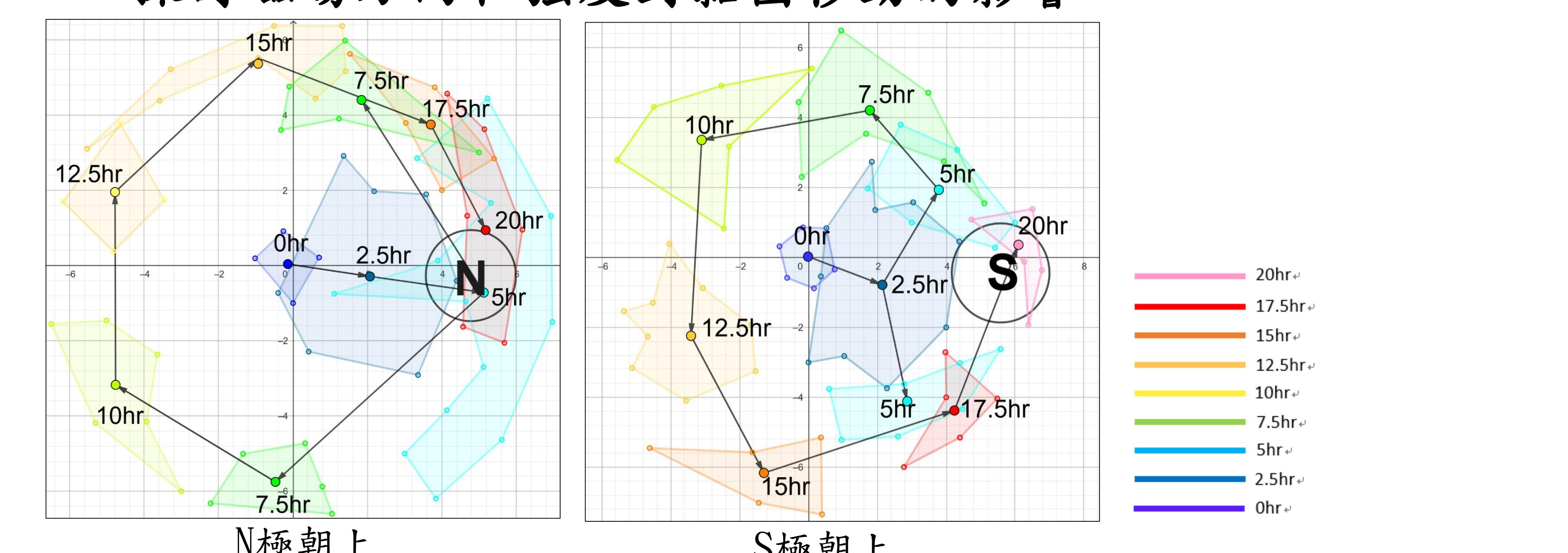


1-1. 小培養皿(10cm)黏菌移動範圍與重心示意圖(作者繪製)

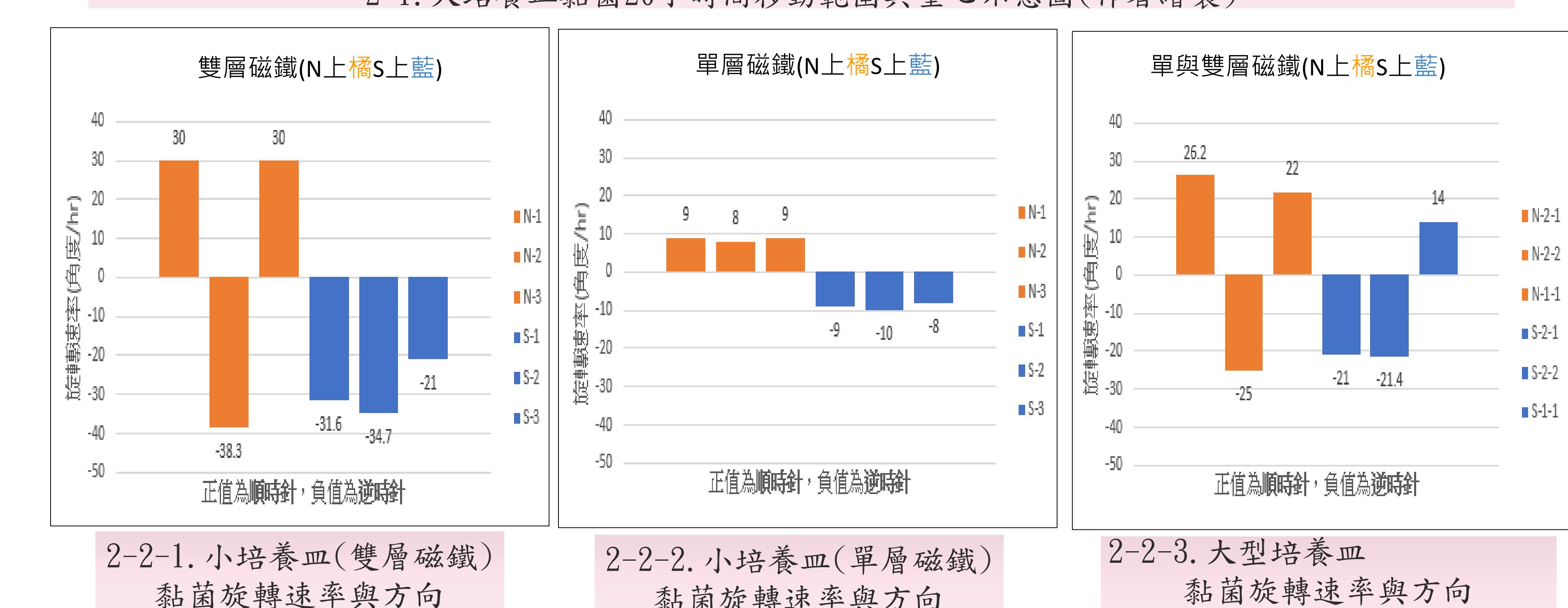


1-2. 大培養皿(15cm)黏菌移動範圍與重心示意圖(作者繪製)

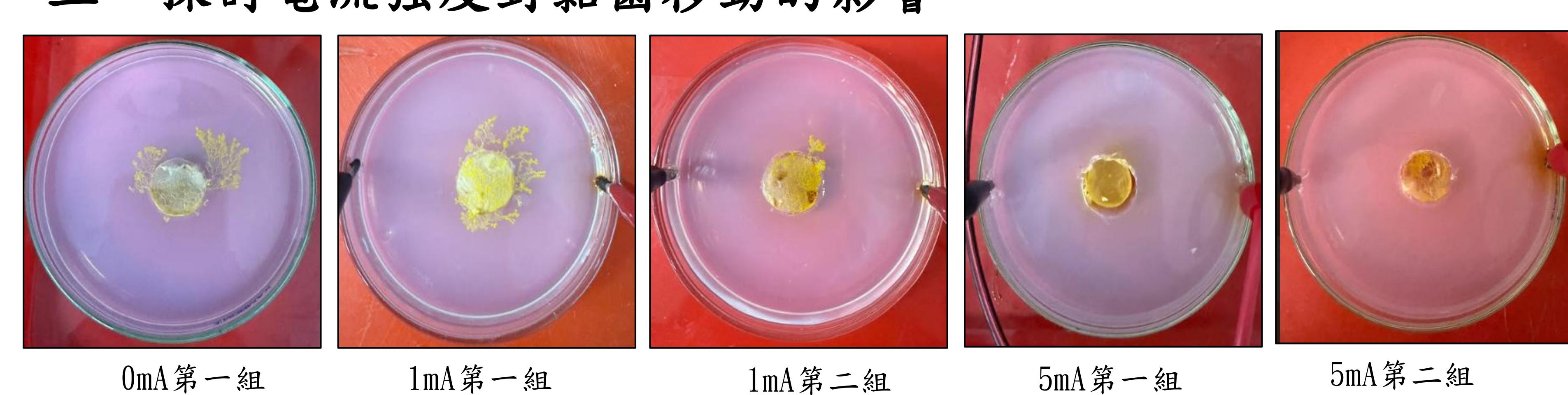
二、探討磁場方向和強度對黏菌移動的影響



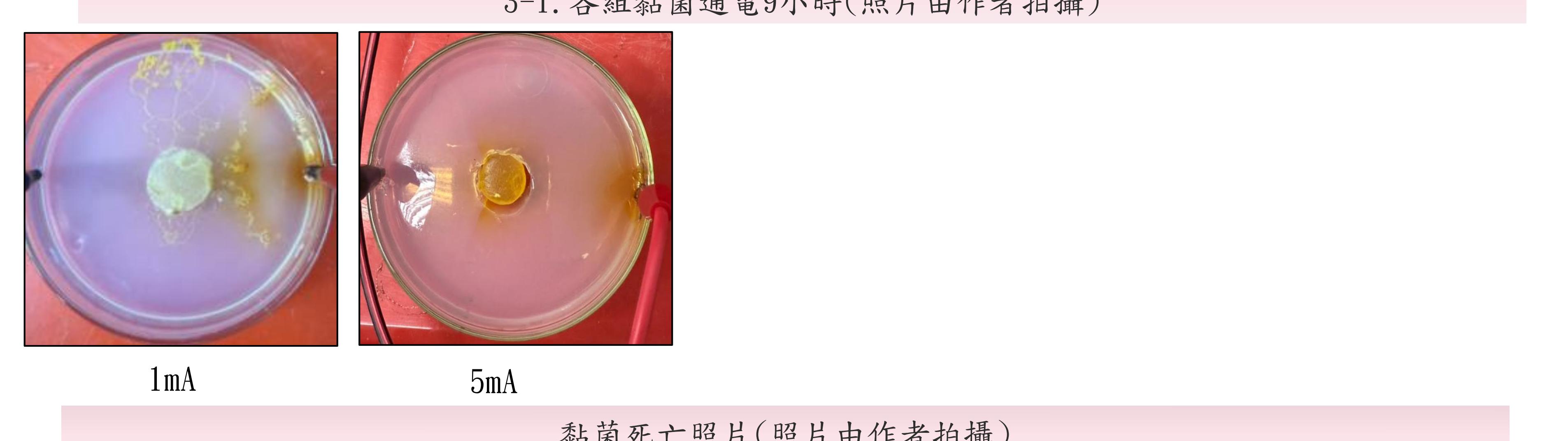
2-1. 大培養皿黏菌20小時間移動範圍與重心示意圖(作者繪製)



三、探討電流強度對黏菌移動的影響



3-1. 各組黏菌通電9小時(照片由作者拍攝)



黏菌死亡照片(照片由作者拍攝)

1-1. 實驗結果:

1. 黏菌在3小時內均呈現向重力方向移動的軌跡。
2. 觀察到7小時，因為培養皿空間有限，黏菌移動至培養皿最下方的邊緣時，就會開始往側邊或向上方移動生長。

1-2. 實驗結果:

1. 黏菌在1-4小時內的移動軌跡皆朝向重力方向移動。若以鉛直線向下為0°，則黏菌移動方向在0° - 45°之間。
2. 在第4小時時將培養皿翻轉後，黏菌朝向新的重力方向移動。

討論：

- (一) 國外研究指出黏菌放置於垂直板面時，約65.8%朝下移動，國內科展作品中提到傾斜角度大，黏菌移動速度慢。
- (二) 藉由翻轉培養皿，顯示黏菌具有顯著的趨地性，但移動速度不受傾斜角度影響。推測可能是黏菌移動採原生質體流動的方式，地心引力使原生質體向下流動。

2-1. 實驗結果:

1. 磁鐵N上S下的黏菌組絕大多數以順時針方向旋轉，反之磁鐵S上N下的黏菌則以逆時針方向移動。

2-2. 實驗結果:

1. 磁場強度會影響黏菌旋轉速率。磁場較強的環境下黏菌旋轉(移動)的速率較快。

討論:

- (一) 國內科展研究認為黏菌對於磁性N上S下有正趨性，磁性N下S上無磁趨性，我們的研究則是無論磁鐵N上或S上，黏菌表現出對磁鐵的正趨性。

- (二) 在N上S下的磁場中，黏菌大部分以順時針方向移動；在S上N下的磁場中，黏菌以逆時針方向移動。

- (三) 在磁場較強的環境下黏菌移動速度快；這和磁性細菌在外部磁場翻轉時，菌群的旋轉方向變化有異曲同工的現象。

3. 實驗結果:

1. 黏菌移動速率：未通電流>1mA電流>5mA電流。
2. 通以1mA電流的黏菌分泌出黃色分泌物(死亡跡象)；通以5mA電流時，黏菌幾乎沒有移動，也分泌出黃色分泌物。

討論:

- (一) 國外研究指出黏菌呈現電趨性。
- (二) 實驗中顯示電流會影響黏菌的移動速率，甚至不利黏菌生長。
- (三) 電流達1mA時，黏菌的生長移動即受到明顯的抑制，建議電流單位應調整為100微安培。
- (四) 以0.1M硝酸鉀溶液製備的培養基，在未通電流的情況下，黏菌移動緩慢。

四、探討黴菌對黏菌移動的影響

<p>實驗結果示意圖 (註:左側為新鮮燕麥,右側為發霉燕麥)</p>		
實驗結果	1. 黏菌新鮮與發霉的燕麥都有找到,但只覆蓋新鮮燕麥。 2. 黏菌只找到發霉的燕麥但並沒有移動到燕麥上。 3. 黏菌只到新鮮燕麥,並移動到燕麥上。	
討論	無搜尋到國內外對於黏菌與黴菌交互關係的研究。在培養黏菌的過程中,經常有培養基受黴菌感染。黏菌菌脈觸碰到新鮮燕麥時,會覆蓋燕麥;菌脈接觸到有黴菌生長的麥片時,卻會逕行避開。黏菌表現出對於黴菌的負趨性。	

示意圖與表格由作者編繪

五、探討黏液對黏菌移動的影響

<p>實驗結果示意圖 (綠色為塗抹黏液區,橘黃色為黏液分布範圍)</p>		
實驗結果	在U字形的黏液分布條件下,黏菌部分沿著U字形黏液移動,部分直接穿過U型區域; 在半圓形的黏液分布條件下,黏菌多移動至塗抹黏液的區域。	
討論	<p>(一) 國外研究指出黏菌會避免穿越自己留下的黏液痕跡,利用外部的空間記憶,幫助它在複雜環境中的導航。</p> <p>(二) 在實驗中觀察到黏菌會沿著有黏液的路徑移動,甚至有更大的比例盤踞在塗抹黏液的區域。探討原因可能為1. 黏菌是順著環境線索走,對於食用色素有趨性; 2. 黏菌的行為受到所有環境因子交互影響而產生反應。</p>	
	示意圖與表格由作者編繪	

結論與未來展望

依照實驗結果得到以下結論:

- 一、黏菌生長表現出趨地性,不同傾斜角不影響移動速度。
- 二、黏菌生長表現出趨磁性,磁場越強移動速度越快,
 磁場N上S下黏菌進行順時針旋轉,磁場N下S上黏菌進行逆時針旋轉。
- 三、黏菌生長速度受到電流抑制,甚至死亡。
- 四、黏菌生長表現出對黴菌的負趨性。
- 五、在某些環境下黏菌會循著黏液移動。

未來展望:

對於黏菌移動策略的研究,我們與前人的實驗結果存在著差異,差異可能來自於實驗設計的方法與觀察的角度。過程中我們學習到科學的態度是:大膽假設,小心求證。更嚴謹地設計實驗,控制變因,結果才能更接近真相,為黏菌存在的爭議或研究空缺找到答案,認識黏菌潛藏的適應策略與行為特性。

參考文獻

1. Tero, Atsushi, et al. (2010). "Rules for biologically inspired adaptive network design." *Science* 327.5964 (2010): 439-442.
2. Mirna Kramar and Karen Alim (2020). Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network. Edited by Andrea J. Liu, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, and approved January 19, 2021 (received for review April 23, 2020)
3. Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada & Ágota Tóth (2000). Maze-solving by an amoeboid organism *TNature* volume 407, page470.
4. John S. MacNeill (2000) Slimy, But Not Stupid: Study suggests slime molds can do simple computations. *Science* 27 Sep 2000.
5. 陳睿泓、林映辰、黃柏誠(2023)。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書：影響盤頭絨泡黏菌最佳化途徑的因素及其應用。
6. 吳長祐、劉鎮瑋(2022)。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會作品說明書：關於史萊那檔案—黏菌爬行的相關研究。