

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生物科

030307

影響盤頭絨泡黏菌最佳化途徑的因素及其應用

學校名稱：臺中市華盛頓高級中學

作者：  國一 陳睿泓  國一 林映辰  國一 黃柏誠	指導老師：  江宏惟  劉欣榮
---	-----------------------------

關鍵詞：盤頭絨泡黏菌、最佳化途徑

## 摘要

本研究利用檢索表鑑定校園中採集的黏菌種類，並探討盤頭絨泡黏菌是否具有形成最佳化路徑的能力以及什麼因素會影響其移動。我們利用環形迷宮及 6x6 迷宮測試，發現黏菌在夾角為 90 度時皆能形成最短路徑，而在夾角 180 度下則有 60% 會形成雙路徑，顯示黏菌能找到連結食物的最短路徑，且可以形成破解迷宮的最短路線。

我們探討金屬鹽、麥片濃度及咖啡因對黏菌移動的影響，我們發現 0.2Osm/L 氯化鈣可以有效抑制黏菌移動速度，以及黏菌爬行後的黏液會影響其爬行方向，當黏菌移動時也偏好較高濃度的麥片。未來將繼續探討影響盤頭絨泡黏菌決策的因素，以及其形成最短路徑能力如何應用於台灣城市間高速鐵路、高速公路及鐵路的應用。

# 壹、前言

## 一、研究動機

在生物課時我們學到了動物的神經系統，老師介紹大腦為我們的意識中樞，可以協助我們進行決策，但我們不禁想起之前看過中垣俊之(Toshiyuki Nakagaki)教授的研究影片，影片中多頭絨泡黏菌 (*Physarum polycephalum*) 從起點移動到終點，中間都沒有迷路 (Toshiyuki Nakagaki 2000)，黏菌明明沒有神經系統，卻能夠進行決策，並且找到迷宮的解答，與我們國中所學的內容大相逕庭。因此我們對於黏菌產生了極大的興趣，想進一步探討影響黏菌爬行的因子為何？以及黏菌這種特性可以運用在什麼地方？

## 二、目的

(一) 盤頭絨泡黏菌是否能在迷宮中找到最佳化路徑

- (1) 盤頭絨泡黏菌是否能選擇最短距離。
- (2) 在迷宮中盤頭絨泡黏菌是否能找到最短路徑

(二) 何種因素會影響盤頭絨泡黏菌移動

- (1) 咖啡因是否會影響盤頭絨泡黏菌移動。
- (2) 不同金屬鹽 (氯化鈉、氯化鎂、氯化鈣、氯化鉀) 是否會影響盤頭絨泡黏菌移動。

(三) 盤頭絨泡黏菌是否能進行決策

- (1) 不同濃度麥片是否會影響盤頭絨泡黏菌選擇
- (2) 黏菌爬行後所分泌的黏液是否會影響其決策

## 三、文獻回顧

(一) 實驗生物介紹

黏菌最早是在 1654 年，由德國真菌學家 Thomas Panckow 在他的著作中，首次記錄了對黏菌綱的子實體觀察 (Panckow, 1654)，但因黏菌具有特殊的生命史，因此早期被歸類於真菌、植物、以及動物界中。

盤頭絨泡菌(*Physarum pezizoideum*)的分類地位為：

原生生物界  
黏菌門  
黏菌綱  
絨泡黏菌目  
絨泡黏菌科

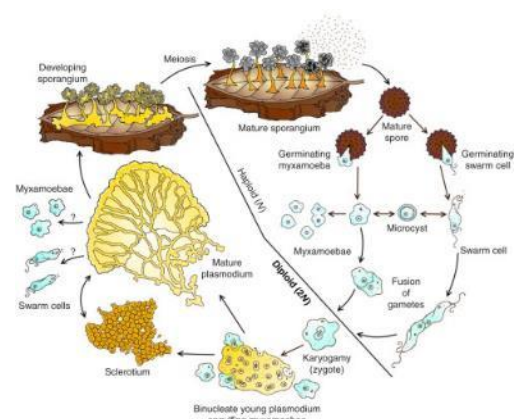


圖 1. 多頭絨泡黏菌生命史

## 絨泡黏菌屬

### 盤頭絨泡菌 *P. pezizoideum*

黏菌喜歡生活在陰暗潮濕的環境中。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(protoplasmic streaming) 的方式向前延伸出片狀構造，其流動速度最高可達到 1350  $\mu\text{m/s}$  (Gray and Alexopoulos, 1968) 而後形成網狀結構，並尋找環境中的有機物質(腐木、細菌、各種有機物)，找到後以原生質包裹並吞噬、分解。

當環境惡劣，缺乏水分或食物時，他會萎縮形成菌核。當菌核再次接觸到水時，在 30 至 60 分鐘內會甦醒並開始遷移，此種情況稱為「復甦」，本研究中就是以菌核的方式保存黏菌。此外，盤頭絨泡菌若受到過多光線照射，容易形成子實體並產生孢子，且此過程不可逆。

#### (二) 黏菌相關文獻回顧

台灣對於黏菌的研究較少，搜尋台灣科展群傑廳中自民國 71 年自民國 111 年共有 5 篇研究：

表 1.

編號	標題	作者	年代
1	黏菌的研究	牛立德	民國 73 年
2	台灣的黏菌	王郁文	民國 71 年
3	黏菌攝食方式的探討—胞內、胞外消化的驗證	薛良凱	民國 81 年
4	師大附中校園黏菌相之調查	張東晟	民國 84 年
5	關於史萊姆那檔事-黏菌爬行的相關研究	吳長祐、劉鎮瑋	民國 111 年

在與黏菌原生質體移動相關的研究中，牛立德研究中提到 0.7% ~ 0.1% 的 NaCl 適合黏菌生長，且黏菌原生質體會受到  $\text{Mg}^{++}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的影響(牛立德，民 73)；吳長祐、劉鎮瑋的研究中提到黏菌會受到麥片吸引，並且原生質體移動時會受到鐵粉及磁鐵磁場影響(吳長祐、劉鎮瑋，民 111)。

在國外文獻中，黏菌最短路徑實驗最早是來自日本科學家中垣俊之 (Toshiyuki Nakagaki) 於 2000 年開始的實驗。實驗中發現，在培養皿中設置迷宮，並在起點和終點各擺放麥片，經過一段時間後，黏菌縮回走錯的分支，只形成最短的一條路線。之

後，他們試著將黏菌的這個特性運用在東京的地鐵路線上，利用黏菌來確定鐵路的最佳線路，困擾東京 100 多年的鐵路問題，在 26 小時內就解決了。而影響黏菌原生質體的移動實驗最初是由 John R. Denbo 和 Donald M. Miller 於 1975 年，觀察氯化鈉 (NaCl) 的質量對於黏菌移動速率的影響。隨後，Romain P. Boisseau 等人於 2016 年的研究。分別使用咖啡因 (caffeine) 與奎寧 (quinine) 製作成橋的狀態，起點放置黏菌，終點放置營養物質，記錄到達終點的時間。法國科學家 Audrey Dussutour 團隊發現黏菌還具有記憶力，黏菌會在經過的路線上分泌醣類黏液，標示提醒自己不再重回較長路徑。此外，在 2022 年時 Jasmine Lu 及 Pedro Lopes 發現黏菌也可當電線使用。利用自製心率感測器，當黏菌在爬行時會將電源傳至心率感測器，使其運作。相反，當放置乾燥的黏菌時，心率感測器無法運作。由此可知，心率感測器的運作受黏菌的健康狀況影響。

國外研究大多聚焦在多頭絨泡黏菌(*Physarum polycephalum*)上，我們想了解台灣產的絨泡黏菌屬是否擁有相同特性，在台灣也尚未有人研究黏菌的最佳化途徑，我們想藉此建立研究黏菌最佳化路徑的研究方式，並進一步挖掘盤頭絨泡黏菌的研究潛力。

#### 四、實驗架構圖

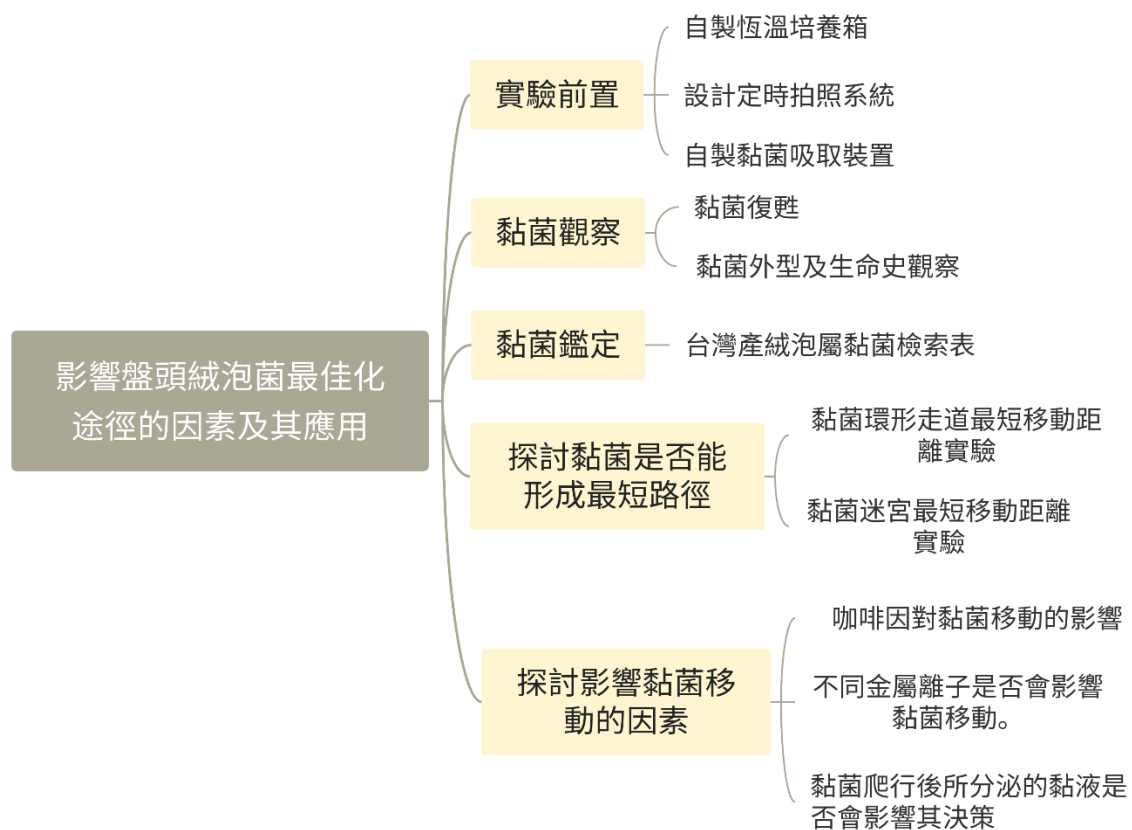


圖 2. 實驗架構圖 (作者自繪)

## 貳、 研究設備及器材

### 一、研究儀器

表 2. 研究器材清單

名稱	廠商/規格	備註
Raspberry Pi 4	Model B 4Gb	購自傑森創工
數位攝影機	Aver Media	購自 Aver Media
實物攝影機	IPEVO V4K USB	購自 PChome 24h
複式顯微鏡	Nikon Scliipse E100	購自 Nikon
Apple iPad 10th	Apple	購自 Apple
A4 描圖用透寫台	Soyoma	購自品藝精品美術
塑膠培養皿	9cm 15cm	購自瀚薇企業
血清瓶	250mL 500mL 1000mL	購自瀚薇企業
Creality Ender-3	Creality	購自創想三維
電子秤	Vibra	購自德和衡器
PLA 線材	1.75mm、600g	購自明耀 3D 列印
繼電器	10A	購自傑森創工
製冷晶片	TEC1-12706	購自環島科技電子材料
12V 工業用變壓器	12V	購自環島科技電子材料
12V 風扇	12cm x 12cm	購自環島科技電子材料
Arduino Nano	Arduino	購自傑森創工

表 3. 藥品清單

名稱	廠商/規格	備註
洋菜粉	500g	購自食品材料行
燕麥粉	300g	購自全聯福利中心
麥片	1kg	購自全聯福利中心
咖啡因	300g	購自興大化工
氯化鎂	500g	購自國教儀器
氯化鈣	500g	購自國教儀器
氯化鉀	500g	購自國教儀器

## 參、 研究過程或方法

### 一、藥品配製

#### (一) 4mM 咖啡因膠體

1. 取 500mL 的水至燒杯內。
2. 分別秤重 0.39g 的咖啡因，和 0.25g 的洋菜粉。
3. 將咖啡因和洋菜粉倒入水中，利用鋁箔紙封口，防止加熱時水分散失。
4. 取適量的熱水倒入鐵鍋，將燒杯放入鐵鍋，開中火隔水加熱。
5. 沸騰後，取出燒杯，將其倒入 9cm 培養皿。
6. 冷卻凝固後，放入冰箱保存。

#### (二) 1%水洋菜膠體

1. 取 495mL 熱水+5g 洋菜粉，倒入鐵鍋。
2. 利用電磁爐加熱，開中火。
3. 煮至沸騰後，倒入燒杯。
4. 在冷卻前，迅速將其分別倒入 9cm 培養皿中。
5. 放涼凝固後，放入冰箱保存。

#### (三) 配製 200 mOsmol / L 氯化鎂、氯化鈣、氯化鉀

1. 氯化鎂：100mL 水+ 2.2g 氯化鎂  
氯化鈣：100mL 水+ 1.9g 氯化鈣  
氯化鉀：100mL 水+ 1.5g 氯化鉀
2. 置於燒杯中攪拌溶解，保存至 4 度冰箱中。

#### (四) 1.2%鹽水膠體

1. 取 100mL 熱水+1.2g 鹽+ 1g 洋菜粉。
2. 將其倒入燒杯，利用鋁箔紙封口。
3. 在鐵鍋內倒入適量熱水，將燒杯放入。
4. 利用電磁爐加熱，開中火。
5. 待熱水煮至沸騰，物質完全融化後，倒入實驗器材，等待凝固。

#### (五) 10%麥片膠體

1. 在燒杯內倒入 445mL 的溫水。

2. 分次倒入 50g 的麥片粉，攪拌至完全融化。
3. 將 5g 的洋菜粉倒入燒杯，攪拌均勻。
4. 利用鋁箔紙將燒杯口封起來，放入煮沸熱水隔水加熱。
5. 煮至完全融化後，將麥片瓊脂凝膠利用紗布過濾，倒入 9cm 培養皿。
6. 冷卻凝固後，放置冰箱保存。

## 二、黏菌繼代培養 (Subculture)

我們每日觀察並記錄黏菌生長狀況，每盤培養皿每次放置 0.1g 麥片，每 5 天進行繼代培養。我們取培養皿四分之一的黏菌，移至新的 1% 洋菜膠上。另外，當黏菌被細菌侵襲，洋菜膠表面呈現黏稠狀態，或是洋菜膠表面發霉，影響黏菌時，會將附有黏菌，且洋菜膠無污染的部分切取，移往新的洋菜膠上。經過約 24 小時後，被繼代培養的黏菌從原本的洋菜膠上，完全爬至新的洋菜膠上時，我們會將被繼代的洋菜膠取出，阻止其影響黏菌的生活環境。藉由繼帶培養的方式，使黏菌成倍的增加。

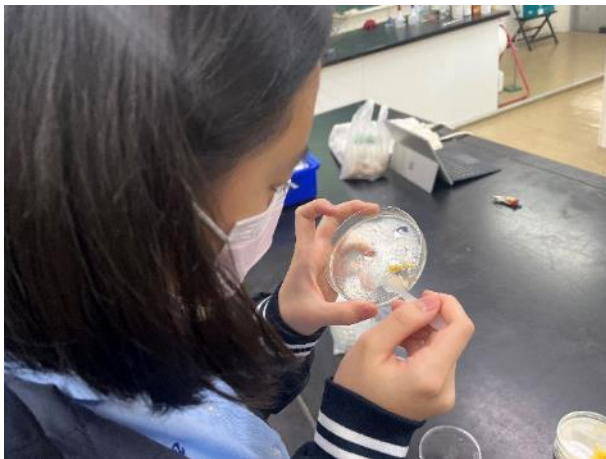


圖 3. 黏菌繼代培養



圖 4. 黏菌繼代培養

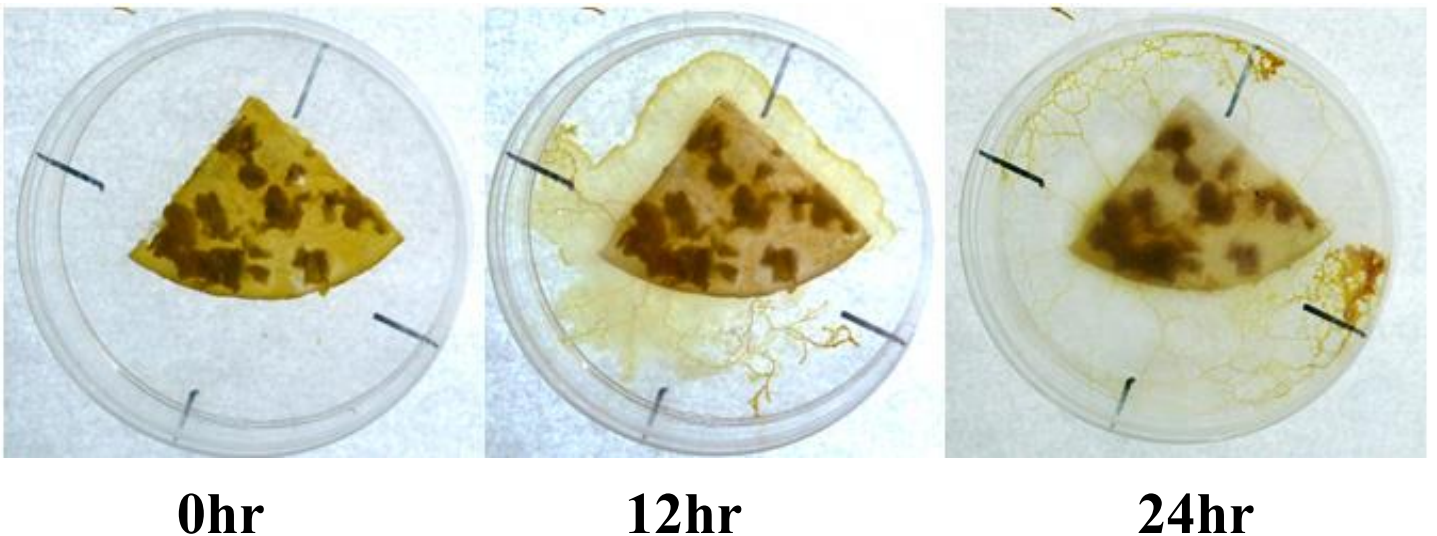


圖 5. 黏菌繼代培養 24hr 情形



### 三、培養環境及定時拍照裝置設計

#### (一) 自製恆溫培養箱

黏菌適合培養於 25°C 恆溫環境中，為此我們選擇使用保麗龍箱搭配製冷晶片維持恆溫環境。

1. 將製冷晶片與水冷頭連結，以水管連結水冷頭及水排散熱器。
2. 將製冷晶片正、負極連結控溫晶片且並聯工業用 12V 變壓器。
3. 將 12cm x 12cm 風扇及 12V 沉水馬達正、負極連結工業用 12V 變壓器。
4. 啟動電源後確定製冷晶片、風扇及抽水馬達有正確啟動，並將溫度控制於 25°C。
5. 將製冷晶片後端放置架高腳架上、前端放在燒杯上，使其呈現傾斜狀態，讓散熱鰭片中的冷凝水可以順利排出，並在不結霜的狀態下運作。
6. 每日記錄溫、溼度數值。

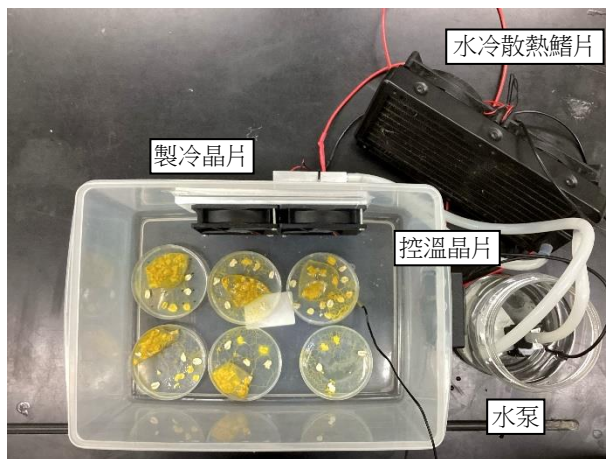


圖 6. 小型恆溫培養箱

#### (二) 定時拍照系統

1. 在 Raspberry Pi 4B 中安裝 Motioneye OS，並設定 IPEVO V4K USB 實物攝影機，控制攝影機每 30 分鐘拍照一次。
2. 同時，在 Arduino 編輯程式每 30 分鐘啟動繼電器使 LED 燈光啟動，並將程式燒錄於 Arduino nano 板中，使系統啟動拍照時有足夠光線。



圖 7. 定時拍照系統畫面

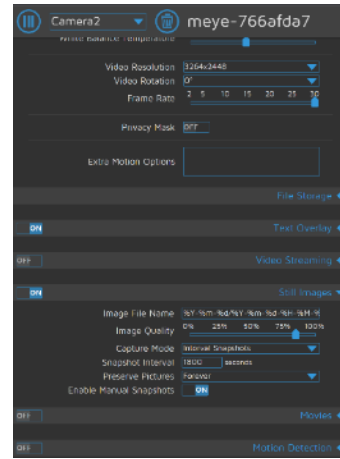


圖 8. Motioneye OS 設定

3. 利用網格紙確認攝影機鏡頭焦距，並在裝置周圍放置紙箱遮蔽外來光源，避免反光。
4. 裝置拍照將自動上傳照片儲存於 Dropbox 雲端空間，以便後續分析。

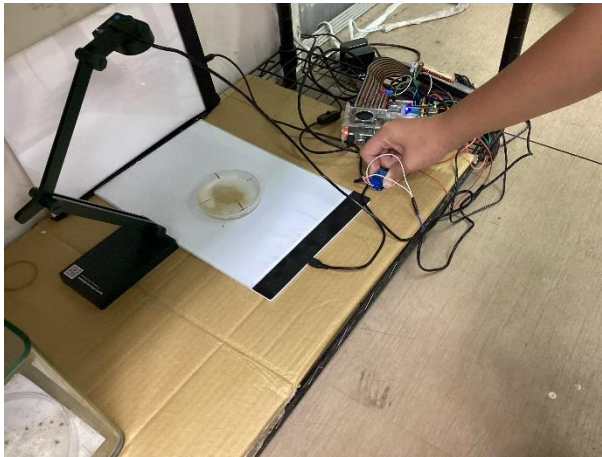


圖 9. 拍照環境設置

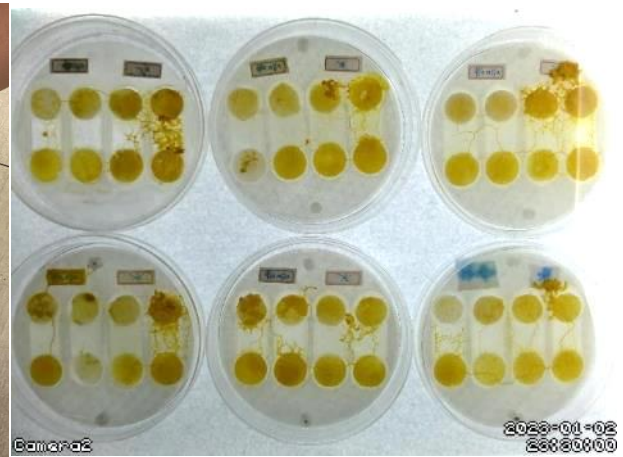


圖 10. 定時拍照系統實時拍攝

#### 四、保存黏菌及黏菌復甦

##### (一) 黏菌保存

1. 將需要保存的黏菌裁切下來並放置在沾水的濾紙培養於 25°C 環境。
2. 等乾燥後以剪刀剪取適當大小以 4°C 保存。



圖 11. 培養於濾紙上的黏菌，準備進行保種

## (二) 黏菌復甦

1. 製作 1% 的洋菜膠於 9cm 的培養皿中。
2. 將要復甦的黏菌從冰箱取出，放置於培養皿洋菜膠上。
3. 在置於培養皿的黏菌周圍擺上麥片，等待一段時間後黏菌便會開始爬行。

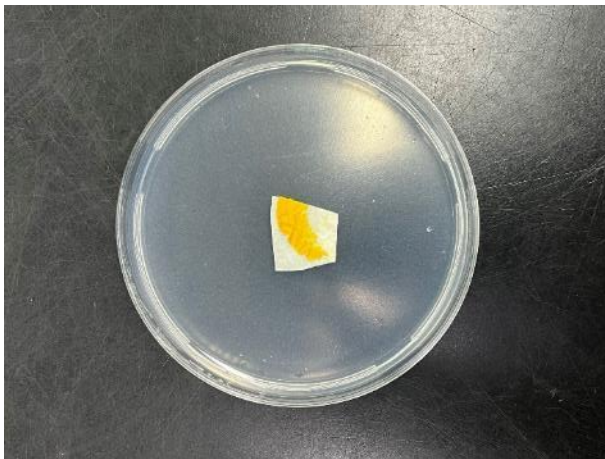


圖 12. 乾燥黏菌復甦

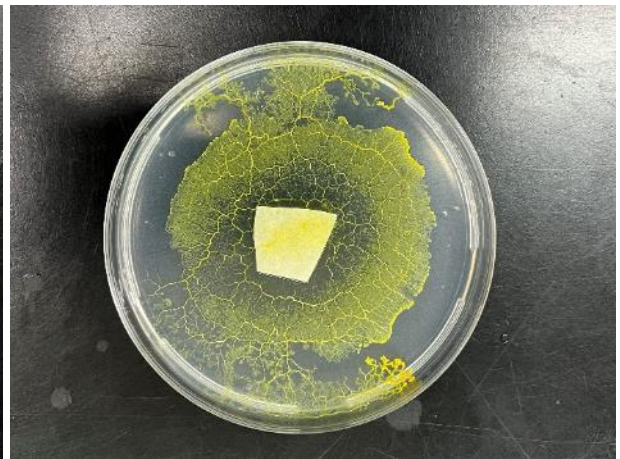


圖 13. 乾燥黏菌復甦 24hr

## 五、實驗設計

### (一) 自製黏菌移植裝置

1. 取一水族用滴管，在頂部約 3 公分位置進行裁切，使切口圓直徑為 2cm。
2. 使用時壓下頂部，並以圓型切口切取直徑為 2cm 的黏菌塊進行吸取。

3. 至實驗裝置上時，再排出空氣使黏菌塊落下於裝置上。

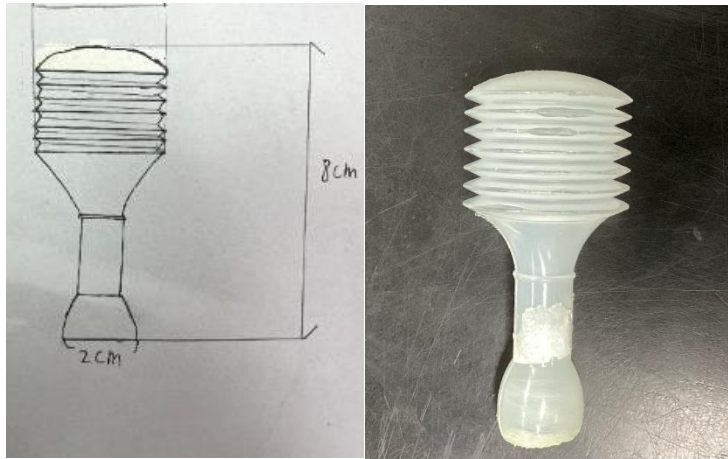


圖 14. 自製黏菌移植裝置

## (二) 黏菌採集

1. 黏菌採集地點為校園內(24°09'29.4"N 120°44'43.9"E)的落葉區。
2. 在雨後的兩天左右至採集地翻找落葉，觀察落葉上是否有黏菌的變形體。
3. 將落葉置於濕潤的餐巾紙上進行培養，並移植到 1%水洋菜膠培養皿上。
4. 另外撿拾落葉區的樹枝，並放入不透光盒中以水覆蓋一半進行濕室培養。



圖 15. 校園採集黏菌



圖 16. 校園採集黏菌

## (三) 黏菌外型及生命史觀察

1. 將乾燥黏菌片放置於培養皿中進行復甦。
2. 待黏菌形成變形體開始爬行時放置於解剖顯微鏡下觀察以 40X 觀察。
3. 將形成子實體的黏菌以鑷子夾取，置於載玻片，滴水並蓋上蓋玻片觀察。
4. 拍照並且儲存以利紀錄。



圖 17.學生利用顯微鏡觀察黏菌孢子



圖 18.學生觀察黏菌外觀並製作水埋玻片

#### (四) 黏菌環形走道最短移動距離實驗

1. 先配製 1% 水洋菜膠體並倒入 9cm 的培養皿中等待冷卻。
2. 將黏菌移至培養皿中央，待黏菌平均分佈後，再將 3D 列印的圓形框架(直徑 7cm、高 1.5cm)壓入以形成環形走道。
3. 將起點與終點放入麥片並呈 180 度、90 度、135 度，觀察並記錄黏菌路徑形成狀態。(θ 代表麥片放置角度)



圖 19.黏菌移植培養

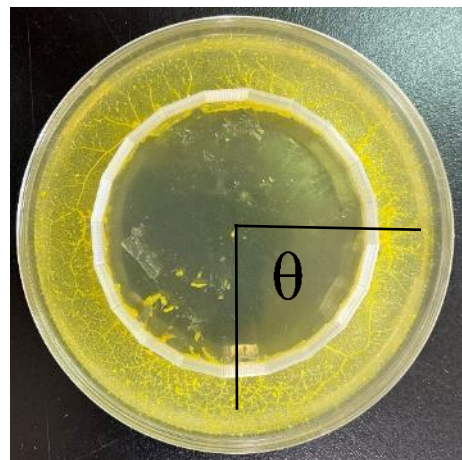


圖 20. 24hr 後放置環形迷宫框

#### (五) 黏菌迷宮最短移動距離實驗

1. 利用 Autodesk Tinkercad 參考 Toshiyuki Nakagaki (2001) 的迷宮設計，並將其修改為 6x6 正方形迷宮以便放入 9cm 培養皿，並利用 3D 列印機列印，列印條件為右表。

噴頭	0.4mm
溫度	200°C
層高	0.16mm
填充	25%
列印速度	50mm/s

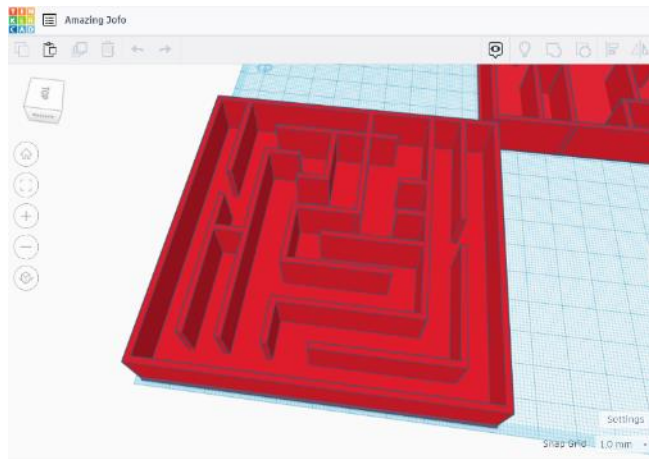


圖 21. Tinkercad 設計迷宮

- 我們將迷宮的正確路徑編號為路徑  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ，並測量其長度，結果如下圖

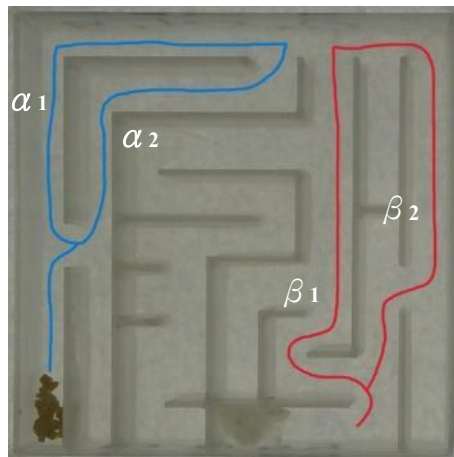


圖 22. 迷宮路徑規劃

$\alpha_1$ :9.1cm ( $\pm 1.0$ )、 $\alpha_2$ :8.85cm ( $\pm 0.4$ )、 $\beta_1$ :9.3cm ( $\pm 0.6$ )、 $\beta_2$ :9.4cm ( $\pm 0.4$ )

- 將迷宮放置在 9cm 培養皿中，配製 1% 洋菜膠，倒入迷宮，約 2mm。
- 在培養皿底部利用馬克筆繪製 20 個點，分別將 0.4g 的黏菌平均分配在點上。靜待其平均分佈於迷宮中。
- 待黏菌平均分佈後，將迷宮起點與終點分別放置 4~5 片麥片。
- 觀察並記錄黏菌形成的路徑。

#### (六) 影響盤頭絨泡黏菌移動的因素實驗

- 我們利用 Autodesk Tinkercad 設計黏菌的忌避實驗裝置，並把設計好的裝置轉換為 STL 檔方便列印。

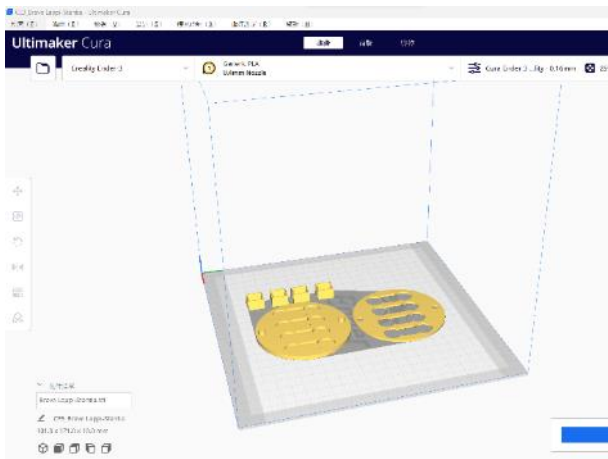


圖 23. 利用 Cura 切片軟體進行切片

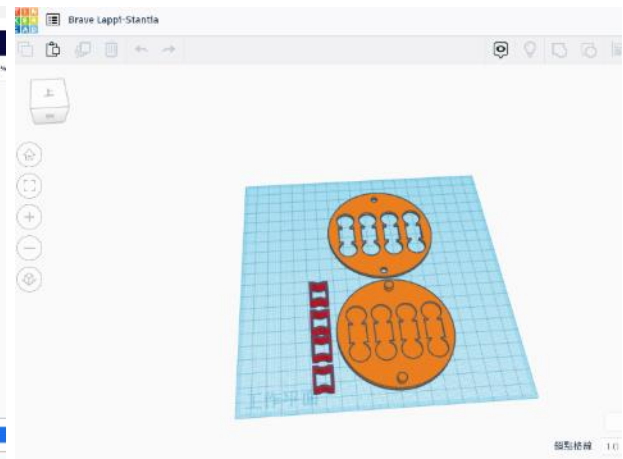


圖 24. 利用 Tinkercad 繪製迷宮

2. 使用 Creality Ender-3 的 3D 列印機列印出裝置的模型，條件如下表

噴頭	0.4mm
溫度	200°C
層高	0.16mm
填充	25%
列印速度	50mm/s

3. 將製作好的裝置放置於 9 cm 的培養皿裡。

4. 配製膠體：

**【咖啡因組】**

起點配製 1% 洋菜膠、終點配製 10% 麥片洋菜膠、中間走道配製含有 4mM 咖啡因的 1% 洋菜膠。

**【NaCl 組】**

起點配製 1% 洋菜膠、終點配置 10% 麥片洋菜膠、中間走道配製含有 1.2% NaCl 的 1% 洋菜膠。

**【CaCl<sub>2</sub> 組】**

起點配製 1% 洋菜膠、終點配置 10% 麥片洋菜膠、中間走道配製含有 200 mOsmol CaCl<sub>2</sub> 的 1% 洋菜膠。

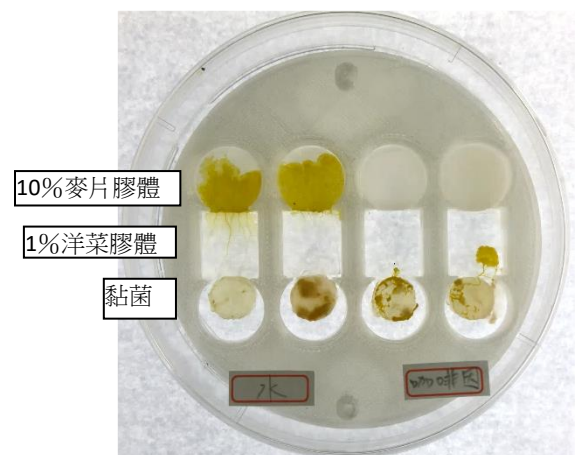


圖 25. 咖啡因橋與鹽橋

### 【KCl 組】

起點配製 1%洋菜膠、終點配置 10%麥片洋菜膠、中間走道配製含有 200 mOsmol KCl 的 1%洋菜膠。

### 【MgCl<sub>2</sub> 組】

起點配製 1%洋菜膠、終點配置 10%麥片洋菜膠、中間走道配製含有 200 mOsmol MgCl<sub>2</sub> 的 1%洋菜膠。

### 【對照組】

起點配製 1%洋菜膠、終點配製 10%麥片洋菜膠、走道配製 1%洋菜膠。

5. 將黏菌以吸取裝置吸取並放置於起點，培養於 25°C 環境，使用定時拍照系統每 30 分鐘拍照並記錄。
6. 利用 Excel 進行 t 檢定判斷是否具有差異。

### (七) 黏菌爬行後所分泌的黏液是否會影響其決策

1. 我們利用 Autodesk Tinkercad 設計實驗裝置，並利用 3D 列印機列印。
2. 利用自製吸取器吸取黏菌，並放置於裝置的圓形框中。
3. 先放置黏菌於 1% 的水膠體中等待一段時間後黏菌擴散且分泌黏液，並取下黏菌移動後所留下的黏液。
4. 在右邊的走道上放置 1% 的洋菜膠，左邊走道放置富有黏液的洋菜膠。
5. 將實驗裝置放於定時拍照系統下，觀察其停留在兩邊走道的時間。

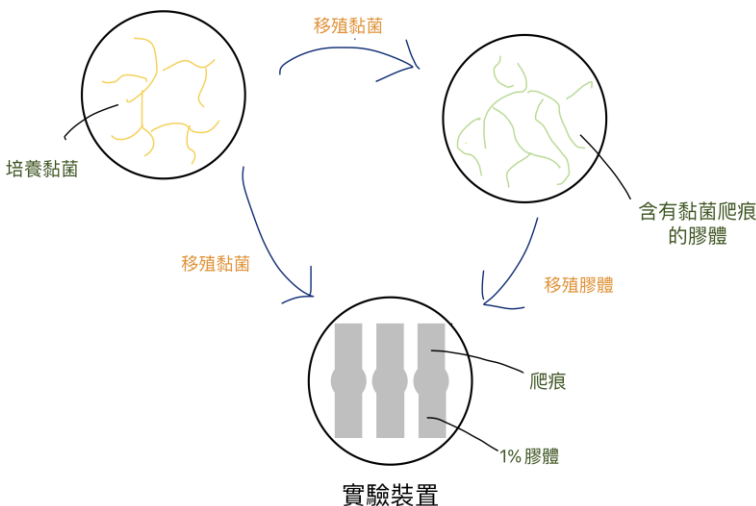


圖 26. 黏液影響黏菌爬行實驗流程圖

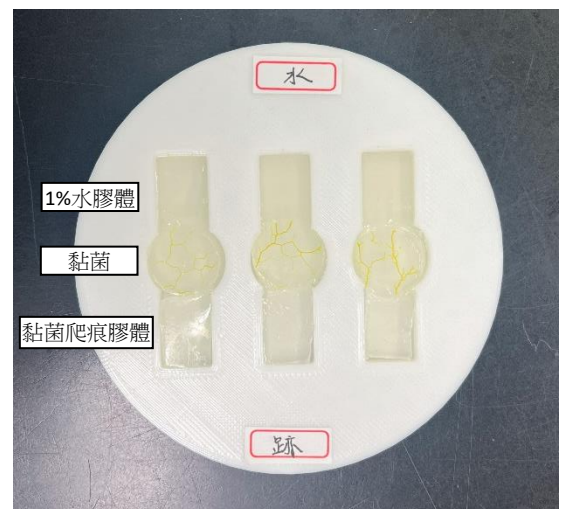


圖 27. 雙向走道實驗裝置



(八) 盤頭絨泡黏菌對不同濃度麥片的取食偏好

1. 我們利用 Autodesk Tinkercad 設計黏菌不同濃度麥片是否會影響盤頭絨泡黏菌選擇裝置，並把設計好的裝置轉換為 STL 檔方便列印。

2. 使用 Creality Ender-3 的 3D 列印機列印出裝置的模型，條件如下表

噴頭	0.4mm
溫度	200°C
層高	0.16mm
填充	25%
列印速度	50mm/s

3. 將製作好的裝置放置於 9cm 的培養皿裡。

4. 配製膠體：

【洋菜膠組】

配置 1%洋菜膠

【5%麥片組】

在終點位置(終點的兩個圈中其中一個)配製 10%麥片洋菜膠

【10%麥片組】

在終點位置(終點的兩個圈中其中一個)配製 5%麥片洋菜膠

5. 將黏菌以吸取裝置吸取並放置於起點，培養於 25°C 環境，使用定時拍照系統每 30 分鐘拍照並記錄。

6. 利用 ImageJ 將照片轉換為 8bit 灰階，計算終點區黏菌的灰度值，並除以 255(灰階值為 0~255)轉換為百分比。

灰度比 =  $\frac{\text{灰度}}{255} - \text{背景值} \times 100\%$

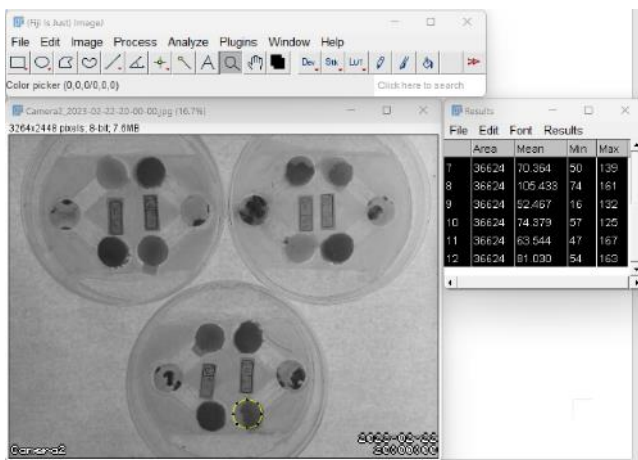


圖 28. ImageJ 灰度分析

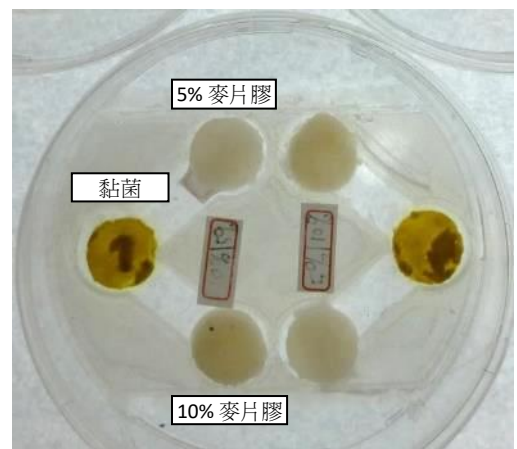


圖 29. 取食偏好 Y 字迷宮

7. 以 Excel 製作圖表並進行 t 檢定判斷是否具有差異。

## 肆、 研究結果

### 一、黏菌採集及培養

黏菌通常生長於枯木及落葉之中，我們在校園內找尋草叢區及落葉堆肥區尋找黏菌變形體，我們利用鏟子將枯木翻面後，發現黏菌的子實體。將附有黏菌的部分切取下來，帶回實驗室。將餐巾紙鋪在培養箱的底部，用清水沾濕，將採集到的枯木放置箱內，蓋上蓋子，等待約 1~2 個月後，黏菌形成變形體。另外我們將落葉上發現黏菌的變形體，並將落葉置於 1%水洋菜膠培養基進行培養，待黏菌變形體轉移至培養基後，移除落葉並持續進行繼代培養。



圖 30.濕室培養法

### 二、黏菌外型及生長史觀察

我們利用複式顯微鏡觀察孢子囊體的黏菌，發現其形狀為飛碟狀，顏色為深紫色，直徑大約為  $7.9\mu\text{m}$ 。我們閱讀參考文獻(Chin-Hui Liu, Jong-How Chang and Fu-Ya Yeh, 2021)，鑑定實驗生物，發現我們的實驗生物為盤頭絨泡黏菌(*Physarum pezizoideum*)。其特徵為：

子實體有柄

└─> 缺發孢子囊軸

└─> 孢子囊通常為一個

└─> 孢子囊的柄突出

└─> 柄通常比孢子囊長兩倍以上

└─> 缺乏假孢子囊軸

└─> 孢子囊成碟形

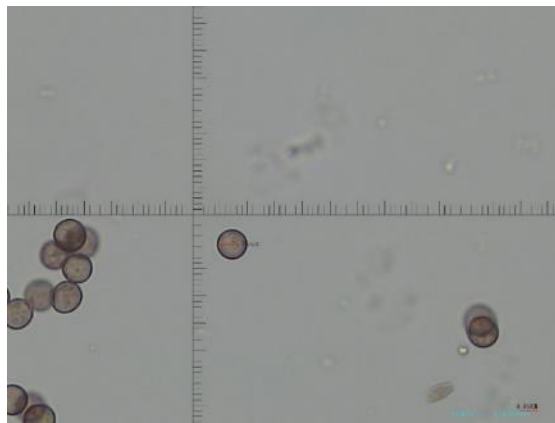
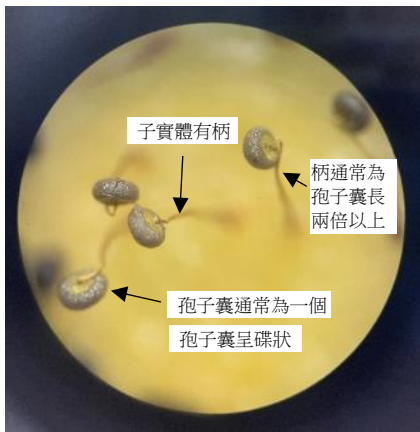


圖 31.盤頭絨泡黏菌的子實體

圖 32.盤頭絨泡黏菌的孢子

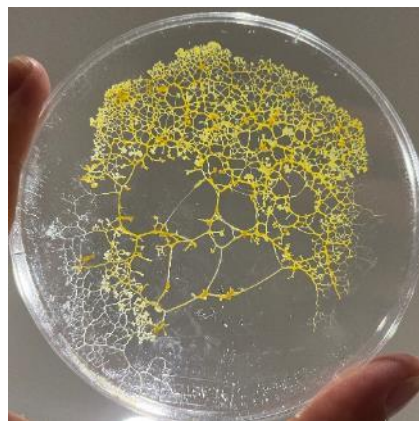


圖 33.盤頭絨泡黏菌的變形體

圖 34.黏菌在培養基上移動情形

孢子由孢子囊破裂散播出來，當接觸到潮濕的地方會形成變形蟲體。此外，若黏菌變形體接觸強烈光線後，會加速形成子實體。

### 三、盤頭絨泡黏菌是否能選擇最短途徑

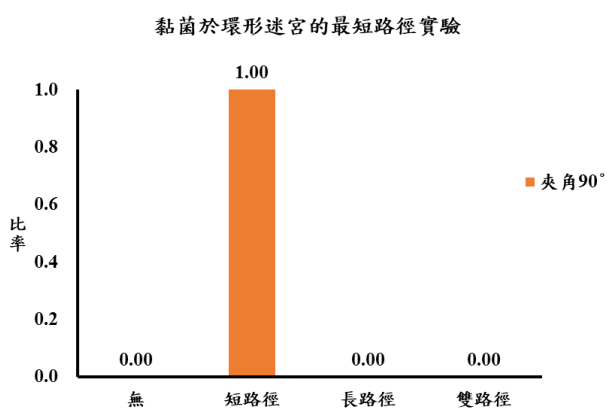


圖 35.環形迷宫中麥片夾角為 90 度角

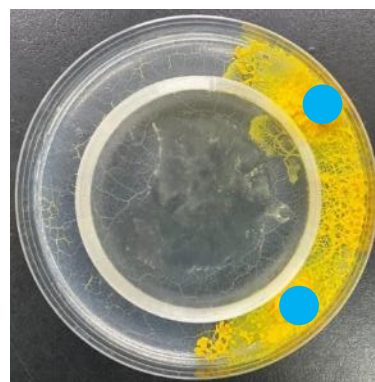


圖 36.90 度角中黏菌形成短路徑

由上圖 35.可知盤頭絨泡黏菌在環形迷宮中，當麥片擺放角度為 0 度與 90 度時，所有的黏菌都會在短路徑相連，短路徑與長路徑有顯著差異。

黏菌於環形迷宮的最短路徑實驗

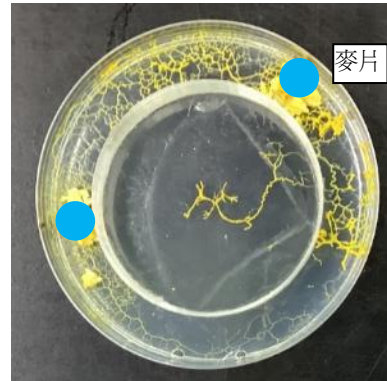
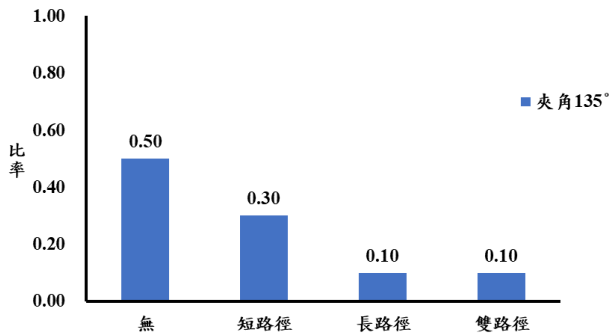


圖 37. 環形迷宮中麥片夾角為 135 度角

圖 38. 135 度角中黏菌形成短路徑

在圖 37.中可得知當盤頭絨泡黏菌在麥片擺放角度為 135 度的情況下，50%的黏菌彼此沒有相連，各自取食麥片、有 30%的黏菌會在短路徑相連，由以上結果可得知，當麥片擺放的角度越接近時，黏菌越容易以麥片之間的最短路徑相連。

黏菌於環形迷宮的最短路徑實驗

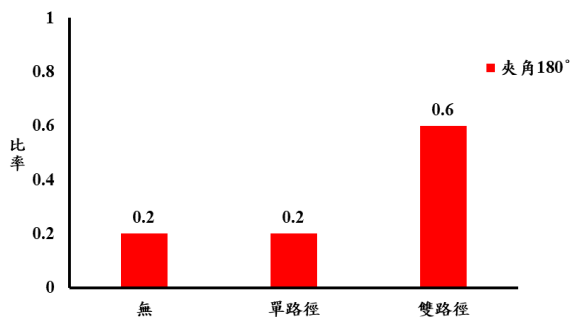


圖 39. 環形迷宮中麥片夾角為 180 度角

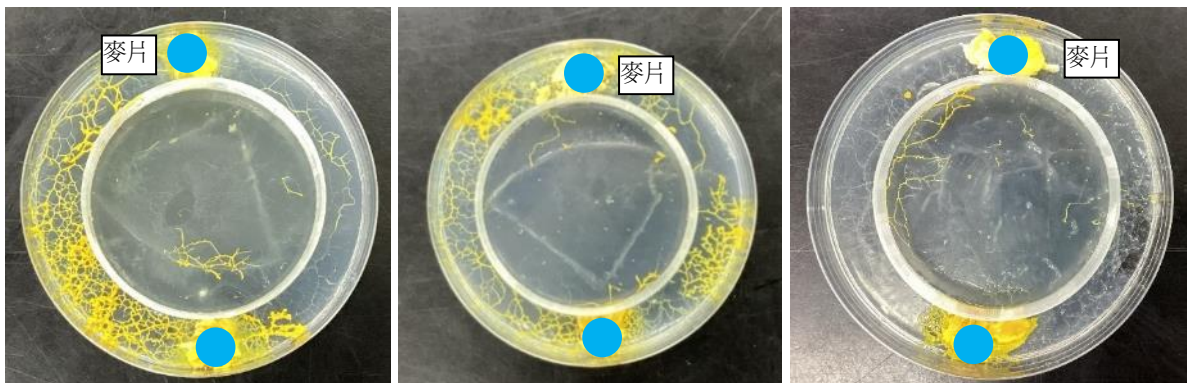


圖 40. 180 度角中黏菌各種路徑 (左：單路徑 中：雙路徑 右：未形成路徑)

接著我們試著將麥片擺放在環形迷宮的兩側，角度為 180 度，有 20%的黏菌各自取食、

20%的黏菌以單路徑相連，有 60%的黏菌同時連接環形迷宮的兩側，接下來我們想了解若黏菌在複雜的迷宮中，是否也能呈現最短路徑的特性。

#### 四、盤頭絨泡黏菌是否能解決迷宮問題

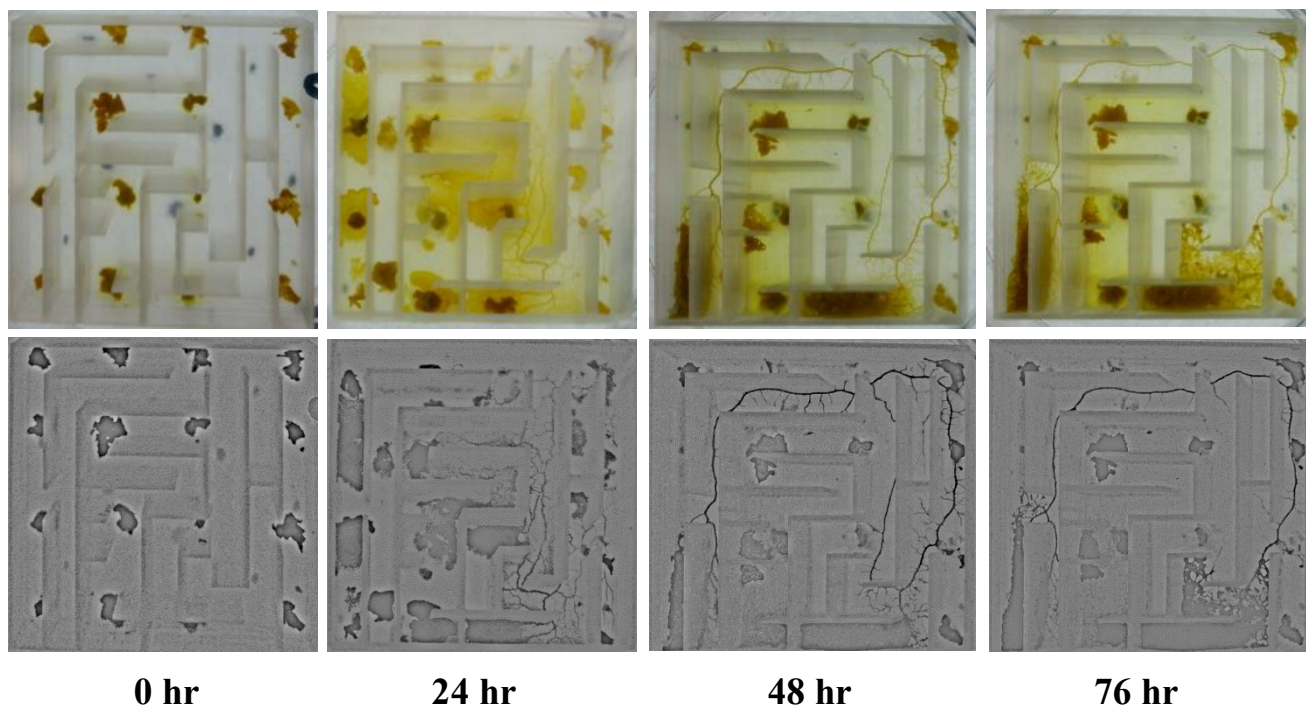


圖 41. 6x6 迷宮中黏菌路徑形成情形

透過環形迷宮的實驗，我們發現盤頭絨泡黏菌會在取食的麥片間形成最短路徑，因此我們想進一步探討，黏菌是否可以破解複雜型的迷宮，以及是否會在迷宮內選擇最短路徑。在圖 32 中可以發現，放置在迷宮內的盤頭絨泡黏菌經 24 小時後，會平均分佈於迷宮中，此時在起點及終點各放置 0.1g 麥片。經過 48 小時，盤頭絨泡黏菌形成多條路徑 ( $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\beta 1$ 、 $\beta 2$ )。76 小時後，黏菌抵達終點，縮回較長走錯的路線，留下最短路徑 ( $\alpha 2$ 、 $\beta 2$ )，其路徑長為 18.6cm。綜合以上結果，我們發現盤頭絨泡黏菌不管在簡單還是複雜的環境，皆能探索並形成最短的路徑來取得食物。

## 五、何種因素會影響盤頭絨泡黏菌移動

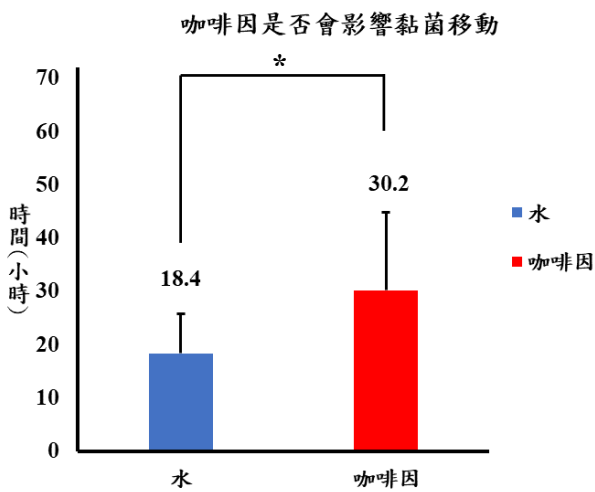


圖 42. 咖啡因是否會影響黏菌移動

( $n=22$ 、水 SD=7.46、咖啡因 SD=14.55、\* $p<0.01$ )

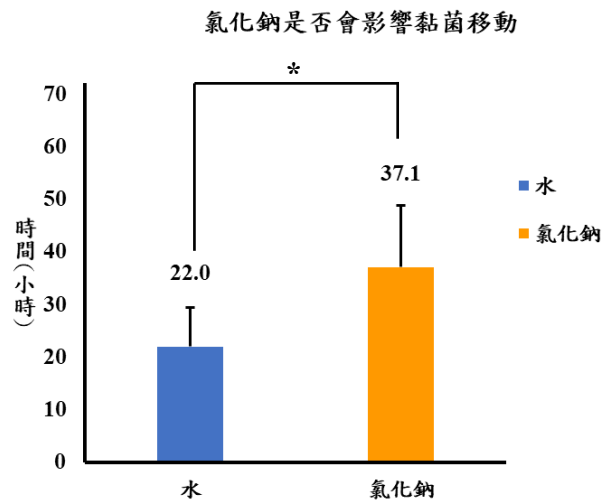
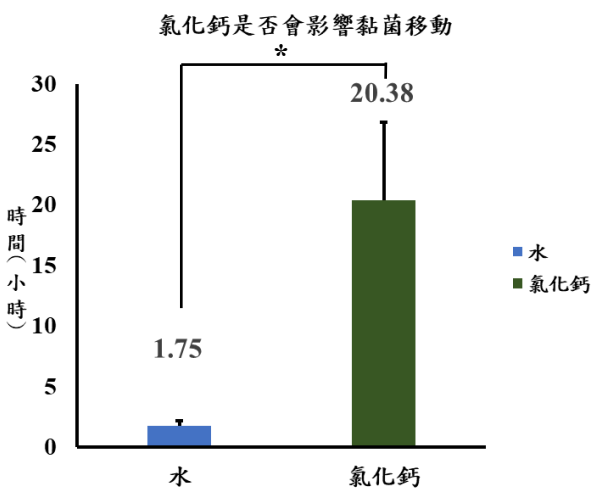


圖 43. 氯化鈉是否會影響黏菌移動

( $n=9$ 、水 SD=6.9、氯化鈉 SD=11.80、\* $p<0.01$ )

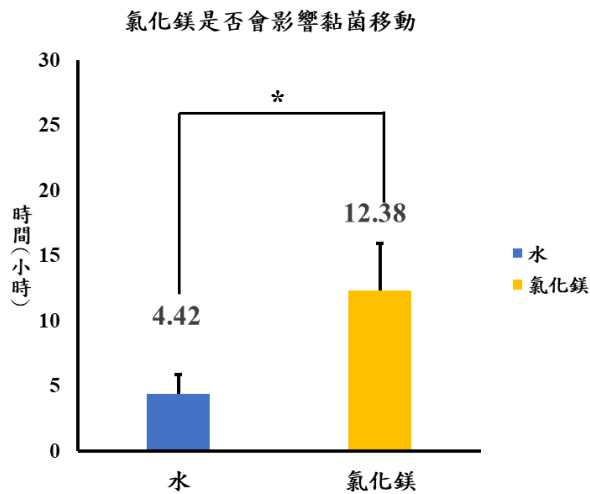
接下來我們想探討盤頭絨泡黏菌在移動時，其移動方向會受到什麼因子影響，我們探討咖啡因及鹽水對黏菌移動的影響，我們發現黏菌經過水膠體抵達終點所需的時間僅需要 18.4 小時。相同距離的路徑，當黏菌抵達終點的過程須經咖啡因膠體或鹽水膠體時，所需時間拉長至 30.2 小時及 37.1 小時。由實驗結果可知，黏菌移動至終點的時間受咖啡因及鹽水影響。



( $n=12$ 、水 SD=1.75、氯化鈣 SD=22.2、\* $p<0.01$ )

圖 44. 氯化鈣是否會影響黏菌移動

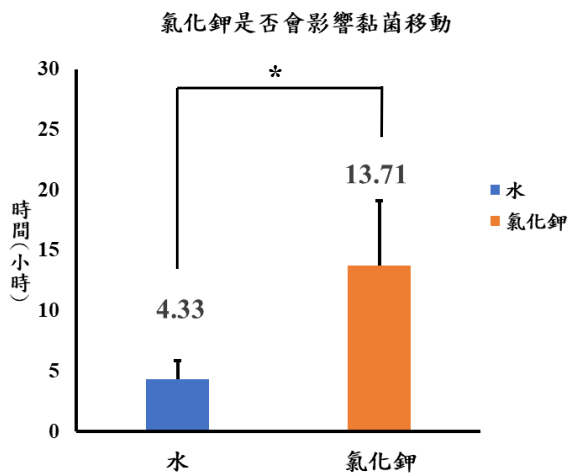
接著我們想探討氯化鈣是否會影響黏菌的移動。由圖 44. 可知，黏菌經過水膠體抵達終點所需的時間為 1.75 小時，經過氯化鈣膠體抵達終點所需的時間為 20.38 小時。由實驗結果可知，氯化鈣減緩了黏菌的移動速度，會影響黏菌的移動。



(n=12、水 SD=1.46、氯化鎂 SD=3.60、\* $p<0.01$ )

圖 45.氯化鎂是否會影響黏菌移動

由圖 45.可知，經過氯化鎂膠體抵達終點所需的時間為 12.38 小時，黏菌經過水膠體抵達終點所需的時間為 4.42 小時。由實驗結果可知，氯化鎂減緩了黏菌的移動速度，會影響黏菌的移動。



(n=12、水 SD=1.54、氯化鎂 SD=5.38、\* $p<0.01$ )

圖 46.氯化鉀是否會影響黏菌移動

由圖 46.可知，經過氯化鉀膠體抵達終點所需的時間為 13.71 小時，黏菌經過水膠體抵達終點所需的時間為 4.33 小時。由實驗結果可知，氯化鉀減緩了黏菌的移動速度，會影響黏菌的移動。

## 六、不同濃度的麥片是否會影響盤頭絨泡黏菌的決策

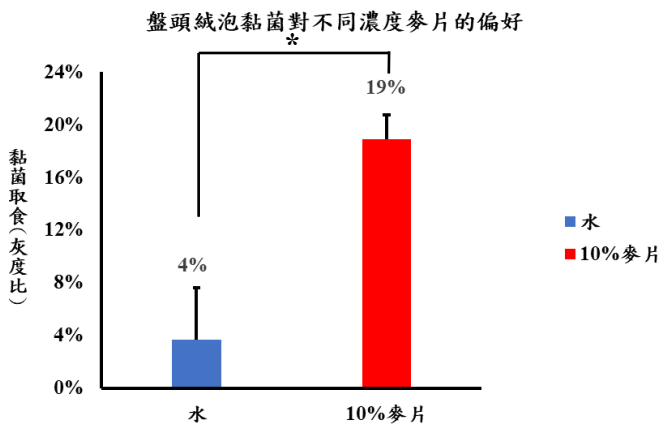


圖.47 黏菌對水與 10%麥片的取食偏好

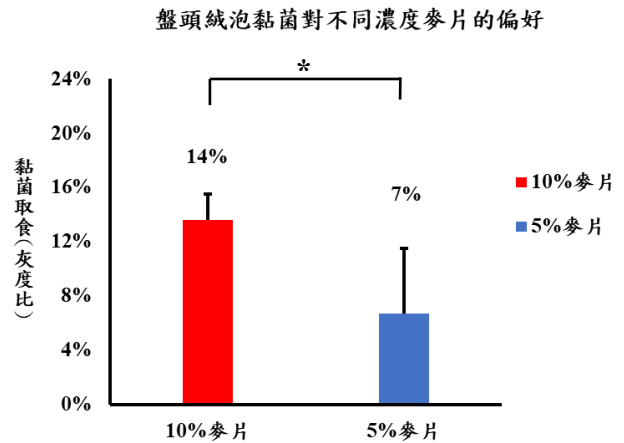


圖.48 黏菌對 5%、10%麥片的取食偏好

( $n=5$ 、10%麥片  $SD=0.02$ 、5%麥片  $SD=0.05$ 、 $*p<0.01$ )，利用 imageJ 灰階處理，並分析兩區灰度值比例，顏色較深者灰度比較高。

從以上實驗我們了解盤頭絨泡黏菌對於咖啡因、氯化鈉、氯化鎂、氯化鈣、氯化鉀有不同偏好，接下來我們想探討不同濃度的麥片是否會影響盤頭絨泡黏菌的偏好，實驗結果呈現當環境中同時有 10%麥片及 5%麥片時，盤頭絨泡黏菌在 10%麥片濃度分布較多，與 5%麥片濃度有顯著差異  $p<0.01$ 。

## 七、黏菌爬行後的分泌物對黏菌移動的影響

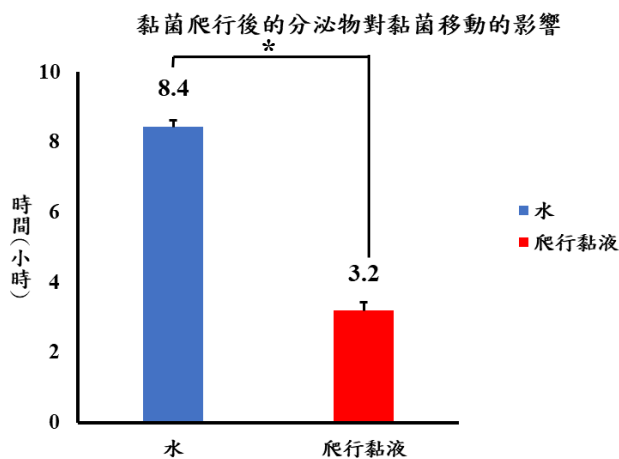


圖 49.爬行後產生的黏液是否會影響黏菌移動

( $n=18$ 、水  $SD=0.3$ 、爬行後的黏液  $SD=0.2$ 、 $*p<0.01$ )

我們在文獻中讀到黏菌爬行後所分泌的黏液會影響黏菌的移動，因此我們進行了此實驗。我們發現在 12 小時內黏菌停留在水膠體上的時間為 8.4 小時，且停留在黏液膠體



上的時間僅有 3.2 小時，因此我們可以知道黏菌爬行後所分泌的黏液對黏菌的移動具有影響性。

## 伍、 討論

一、在最短路徑實驗中，黏菌形成雙路徑的原因。

我們在佈滿黏菌的環形迷宮上放置麥片，使麥片間的路徑形成不同大小的夾角，觀察黏菌所形成的路徑，在實驗前我們預期黏菌會形成最短路徑，但在實驗中發現在 135 度角及 180 度角時，盤頭絨泡黏菌有時會在食物路徑上形成兩條路徑，這違背我們預期結果。我們在查詢文獻後，Toshiyuki Nakagaki 提到若兩側路徑差異較小時，容易形成雙路徑，且增加添加的營養物質以及都會影響路徑形成的數量。

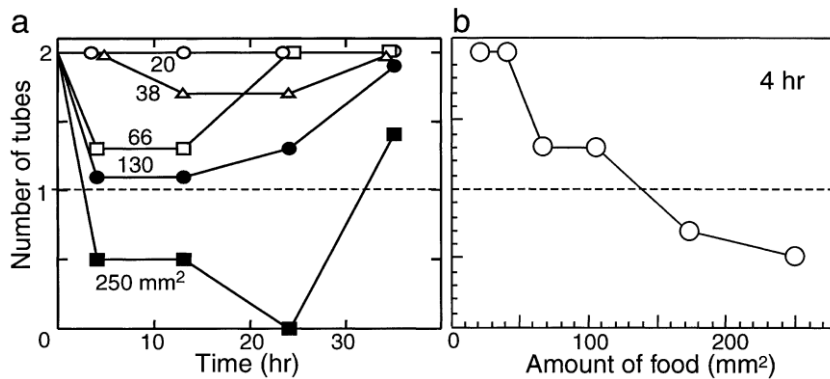


圖 50. 養分添加與路徑數量的關係

引用自 Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada, Agota Tóth (2001).

二、黏菌移動後在培養基上遺留的物質會影響黏菌移動意願

實驗過程中我們發現，黏菌培養過程中會不斷移動及探索，當黏菌探索過後會在培養基的表面上形成透明的物質(圖 51.)，且我們觀察到當表面有該物質存在時，黏菌再次移動到此路徑的機率會降低，我們認為此物質對於黏菌可能是一種化學訊號，以提示黏菌該路徑已經走過，不需要再進行探索，後續可以針對此物質進行詳細研究，期待可以運用在控制黏菌移動的用途上。透過黏菌爬行後所分泌的黏液對黏菌移動的影響實驗，我們發現黏菌在 12 小時內停留在水膠體上的時間為 8.4 小時，停留在黏液膠體上的時間為 3.2 小時。因此由實驗結果可知黏菌爬行後所分泌的黏液會影響黏菌的移動。

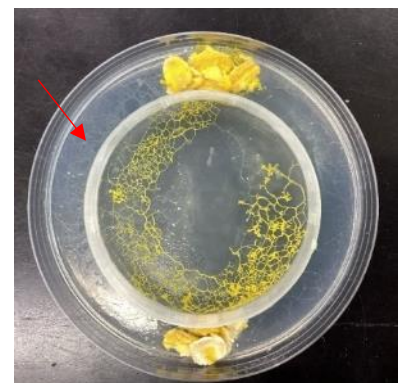


圖 51. 移動後會形成透明物質

### 三、盤頭絨泡黏菌與細菌的關係

培養黏菌的過程中，我們發現當洋菜膠表面的麥片隨著時間軟化以及產生黏稠狀液體時，黏菌會逐漸離開該區域，若此時仍不進行繼代培養，黏菌的分布範圍會逐漸退縮，最後死亡。我們認為麥片會隨時間逐漸產生大量細菌，雖然黏菌會取食有機物質以及細菌(Andrew Adamatzky, 2009)，但當細菌大量增生時，此時細菌與黏菌會產生競爭的現象，若不及時處理，黏菌的生長會受到影響。



圖 52. 微生物增生情形

### 四、盤頭絨泡黏菌顏色

盤頭絨泡黏菌的變形蟲體具有鮮黃或是帶點黃綠的顏色，在文獻中提到(Leokadia Rakocz et al.,1986) (Pankajam Nair and George G. Zabka, 1966)黏菌的細胞質中含有胡蘿蔔素和黃酮素，胡蘿蔔素是一種具有光敏性的化合物，它可以吸收藍色和紫色光線，而黃酮素是目前已知的天然抗氧化劑，具有抗氧化及可溶於水的特性。我們觀察到若將乾燥黏菌放置於潮濕的濾紙上復甦時，濾紙周圍將會產生黃色的液體，我們推測即為類黃酮素溶於水滲出。此外，黃酮素在植物中具有抗炎、抗菌等多種生理活性，有助於保護植物不受外界環境的影響，或許在黏菌中也扮演重要角色有待未來更進一步研究。

### 五、盤頭絨泡黏菌會互相融合

在培養盤頭絨泡黏菌時，我們觀察培養皿中不同群體但同種的黏菌變形蟲體會因為互相接觸後，互相融合形成一個群體，我們認為盤頭絨泡黏菌應該有某種機制可以判斷接觸的物體是否為營養物質，或是與自己同種的生物以達到辨識及融合的行為。

### 六、金屬鹽對黏菌移動的影響

我們探討氯化鈉、氯化鉀、氯化鈣、氯化鎂這些金屬鹽對黏菌移動的影響。由實驗結果可以發現黏菌經過鈉、鉀、鈣、鎂膠體抵達終點所需的時間皆多於經過水膠體抵達終點所需的時間。且經過分析發現氯化鈣這組實驗中，黏菌經過氯化鈣的時間與經過水膠體的時間有 20 倍之差，相較於其他三組只有 3 倍差，可以明顯發現黏菌較排斥氯化鈣。查詢資料後，我們發現高濃度的鈣離子會抑制黏菌的生長，因此需要更多的時間來抵達終點。未來我們可以將氯化鈣運用在其他實驗中，防止黏菌爬出實驗裝置。

## 七、黏菌的健康狀況對於黏菌移動的影響

根據影響黏菌移動的因素實驗，我們發現黏菌經過水膠體抵達終點的時間具有極大的差異。在咖啡因的對照組中黏菌經過水膠體抵達終點的時間為 18.4 小時，但在氯化鈣、氯化鉀、氯化鎂的對照組中，黏菌經過水膠體抵達終點的時間僅需 1 小時或 4 小時。而我們在飼養黏菌的過程中，發現黏菌在越乾淨的洋菜膠體中會散佈的越開且顏色較淺，而在越髒的洋菜膠體中黏菌會聚集成一團且顏色較深，因此我們推測黏菌經過水膠體抵達終點的時間之所以差異極大是因為黏菌如果是從髒的洋菜膠體移置新的黏菌便會爬的較快影響了結果。

## 八、黏菌最佳化途徑與應用

實驗中得知盤頭絨泡黏菌具有模擬最佳化路徑的潛力，我們可以用來規劃大眾運輸工具的路線，例如：捷運、鐵路以及高速公路，傳統大眾運輸設計會花費大量時間以及金錢，以中華民國 108 年《交通作業基金國道公路建設管理基金分預算》中，國道計畫綜合規劃設計費為 5,415 萬 7 千元，而根據台北市政府捷運工程局《臺北都會區大眾捷運系統環狀線北環段及南環段先期規劃報告書》中設計費用為 2,766 百萬元，假若採取黏菌模擬路徑的方式或許可以減少部分路線規畫費用，台中市捷運目前有 18 站點，但仍比台北市捷運的 131 站少且涵蓋範圍也較小，造成台中市民捷運的搭乘率不高。若利用黏菌搭配人口活動熱點來規劃捷運及鐵路規畫，相信能增加市民搭乘意願。

黏菌規劃能力也能利用在台灣高速公路的規劃上面，台灣因為中央山脈阻隔造成東西向交通道路開發不便，若利用黏菌規劃路線的能力也能減少規劃費用並且得到較佳的成效。

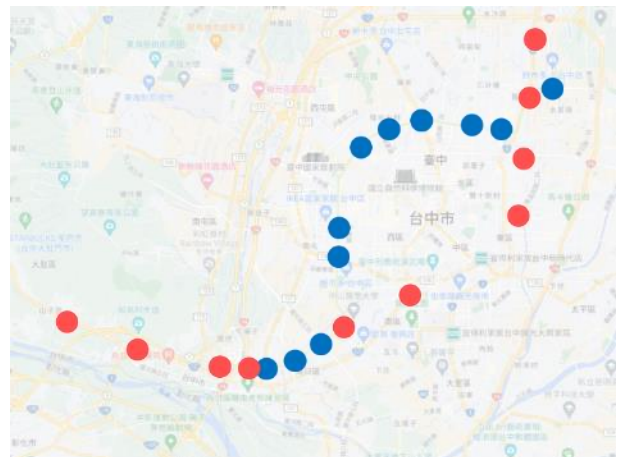


圖 53. 台中市捷運及鐵路路線圖局部  
藍點為台鐵車站；紅點為捷運車站



圖 54.台灣高速公路圖

### 九、本研究與其他研究的差異性

表 3. 本研究與其他研究比較

研究作者	Toshiyuki Nakagaki et al.	吳長祐、劉鎮璋	本研究	本研究貢獻
實驗生物	<i>Physarum polycephalum</i>	<i>Physarum polycephalum</i>	<i>Physarum pezizoideum</i>	驗證盤頭絨泡黏菌也具有形成最佳路徑的潛力
研究方式	環形迷宮 複雜迷宮	培養皿及濾紙	Y 形迷宮 環形迷宮 6x6 複雜迷宮 雙向走道迷宮	利用 3D 列印製作精確迷宮，並探討不同因素
影響黏菌爬行的因素	未討論	培養基的角度	4mM 咖啡因、金屬鹽及粘液會抑制黏菌爬行	確認其他影響盤頭絨泡黏菌移動的因素
	本研究探討			

## 陸、 結論

- 一、經由台灣產絨泡黏菌檢索表鑑定，我們採集的黏菌為盤頭絨泡黏菌。
- 二、盤頭絨泡黏菌會在食物之間形成最佳化途徑，且在複雜迷宮中也能從中脫困。
- 三、4mM 的咖啡因、200 mOsmol 氯化鉀、氯化鈣、氯化鎂、氯化鈉會影響黏菌的移動，其中以氯化鈣最為明顯。
- 四、黏菌移動後所分泌的黏液會影響黏菌的移動
- 五、盤頭絨泡黏菌能判斷環境中麥片濃度的差異，並且偏好濃度較高的食物以形成路徑。

## 柒、 未來展望

黏菌具有在食物間形成最短路徑的潛力，未來我們會更進一步將這個潛力運用在城市規劃上如：台中市或尚未有捷運的城市，並且也能運用在不同的大眾運輸的路線連結，利用黏菌尋找到最有效率且減少開發成本的方案，使人們生活更便利。

此外，Jasmine Lu 和 Pedro Lopes 指出黏菌具有作為生物電路的能力，我們想將黏菌進行決策及形成最佳路徑的能力，利用在構成生物電路以探討其潛力。

## 捌、 參考文獻資料

### 一、外語文獻

1. J R Denbo, D M Miller (1975).FACTORS AFFECTING THE MOVEMENT OF SLIME MOLD PLASMODIA. *Comp Biochem Physiol A Comp Physiol. Physiol.*Vol.55A.p5-12
2. Romain P. Boisseau, David Vogel and Audrey Dussutour (2016)Habituation in non-neural organisms:evidence from slime moulds.Habituation in non-neural organisms:evidence from slime moulds. *Proc Biol Sci.* 283(1829)
3. Harold W. Keller, Sydney E. Everhart, Courtney M. Kilgore.(2021) *The Myxomycetes Second Edition.* Elsevier Inc
4. Chin-Hui Liu, Jong-How Chang and Fu-Ya Yeh (2013). Myxomycetes of Taiwan XXIV. The genus *Physarum*.*Taiwania*, 10 September 2013 Page: 176 - 188
5. Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada , Agota Tóth (2001). Path finding by tube. morphogenesis in an amoeboid organism. *Biophysical Chemistry* . 30;92(1-2):47-52.
6. Toshiyuki Nakagaki ,Hiroyasu Yamada , Ágota Tóth , (2000). Maze-solving by an amoeboid organism . *Nature* Vol 407
7. Tanya Latty and Madeleine Beekman (2006). Food quality affects search strategy in the acellular slime mould, *Physarum polycephalum*. *Behavioral Ecology*, Volume 20, Issue 6, Pages 1160–1167,
8. Andrew Adamatzky (2009). Steering plasmodium with light : Dynamical programming of *Physarum* machine. *New Mathematics and Natural Computation Journal*

### 二、書籍

1. Audrey Dussutour. (2022). *Moi le blob (French Edition)*, humenSciences

### 三、科展說明書

1. 牛立德 (民 73)。中華民國第 24 屆中小學科學展覽會作品說明書：黏菌的研究。
2. 吳長祐、劉鎮璋 (民 111)。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會作品說明書：關於史萊姆那檔事-黏菌爬行的相關研究

### 四、中文文獻

1. 交通部高速公路局。民國 108 年度交通作業基金國道公路建設管理基金分預算。
2. 台北市致府捷運工程局。臺北都會區大眾捷運系統環狀線北環段及南環段先期規劃報告書。

## 【評語】 030307

優點：

此研究旨在包含使用檢索表鑑定校園採集的黏菌種類。之後探討盤頭絨泡黏菌是否具有形成最佳路徑的能力以及影響此中黏菌移動因素。實驗內容的過程和方法說明清楚，有助於讀者理解研究的進行和結果。

建議及檢討：

1. 研究題材多屬前人研究的重複實驗，創新性需加強。
2. 實驗中探究了各項因子會阻礙黏菌的爬行，雖然有科學性的觀察與紀錄，但實驗中並未排除髒汙洋菜膠膠體對黏菌爬行的影響，也未進一步探討各因子是如何妨礙黏菌爬行的？因此本研究內容有趣，但創新度稍嫌不足。
3. 為何選擇咖啡因及各種金屬鹽做為影響盤頭絨泡黏菌移動的因素，請說明理由

4. 此研究範圍僅限於受控環境中黏菌的運動行為，此應用於實際交通系統的可行性尚待考驗，且相關變因研究以運動行為為測量方式而未深入探討其機制，限制將黏菌運動行為優化應用於實際場景的範圍。



## 作品海報



影響盤頭絨泡黏菌最佳化

途徑的因素及其應用

# 研究動機

在生物課時我們學到了動物的神經系統，我們不禁想起之前看過中垣俊之(Toshiyuki Nakagaki)的研究，多頭絨泡黏菌(*Physarum polycephalum*)從迷宮起點移動到終點，中間都沒有迷路，黏菌沒有神經系統卻能夠進行決策，並能找到迷宮的最佳路線，這與我們國中所學的內容大相逕庭。我們想進一步探討影響黏菌爬行的因子為何？以及黏菌這種特性可以運用在什麼地方？

## 目的

### 一、盤頭絨泡黏菌是否能在迷宮中找到最佳化途徑

1. 盤頭絨泡黏菌是否能選擇最短距離
2. 在迷宮中盤頭絨泡黏菌是否能找到最短路徑

### 二、盤頭絨泡黏菌是否能進行決策

1. 不同濃度麥片是否會影響盤頭絨泡黏菌選擇
2. 黏菌爬行後所分泌的黏液是否會影響其決策

### 三、何種因素會影響盤頭絨泡黏菌移動

1. 咖啡因是否會影響盤頭絨泡黏菌移動
2. 不同金屬鹽是否會影響盤頭絨泡黏菌移動

### 實驗前置

- 自製恆溫培養箱
- 設計定時拍照系統
- 自製黏菌吸取裝置

### 黏菌觀察

- 黏菌復甦
- 黏菌外型及生命史觀察

### 黏菌鑑定

- 台灣產絨泡屬黏菌檢索表

### 探討黏菌是否能形成最短路徑

- 黏菌環形走道最短移動距離實驗
- 黏菌迷宮最短移動距離實驗

### 探討影響黏菌移動的因素

- 咖啡因對黏菌移動的影響
- 不同金屬鹽是否會影響黏菌移動。
- 黏菌爬行後所分泌的黏液是否會影響其決策

表1. 實驗架構圖

## 研究過程與方法

### 一、黏菌採集

我們在學校落葉區(24°09'29.4"N 120°44'43.9"E)進行黏菌採集，並利用濕室培養法培養。



圖1. 校園黏菌採集

### 二、培養環境及樹莓派定時拍照系統

我們自製製冷晶片培養箱，將黏菌培養於25°C恆溫環境中，並利用Raspberry Pi 設計定時拍照系統。



圖2. 樹莓派拍照系統



圖3. 黏菌培養環境

### 三、實驗迷宮設計

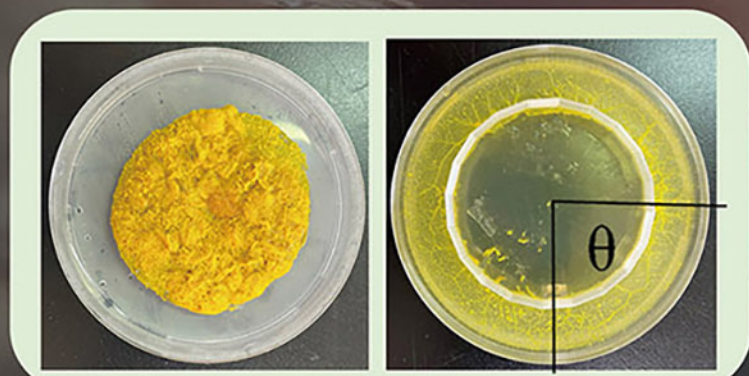


圖4. 環形迷宮

圖5. 測量角度示意圖

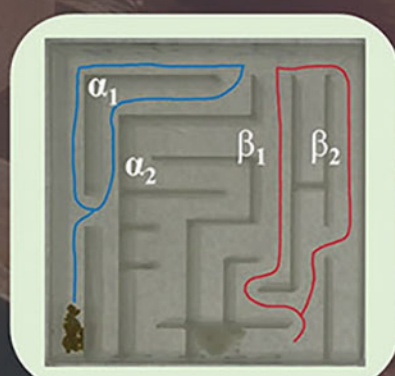


圖6. 6x6迷宮路線圖

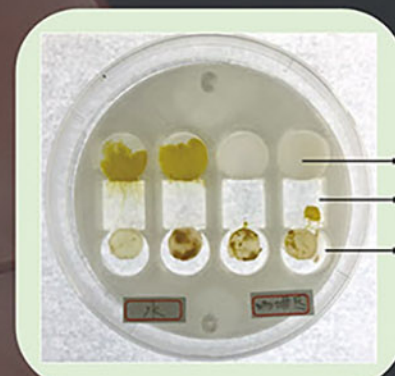


圖7. 雙向走道迷宮

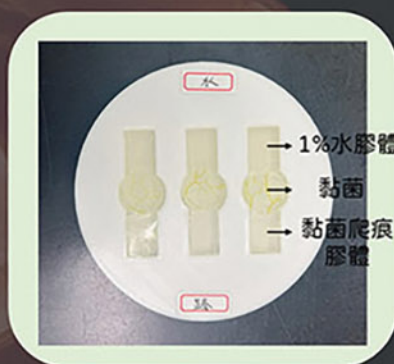
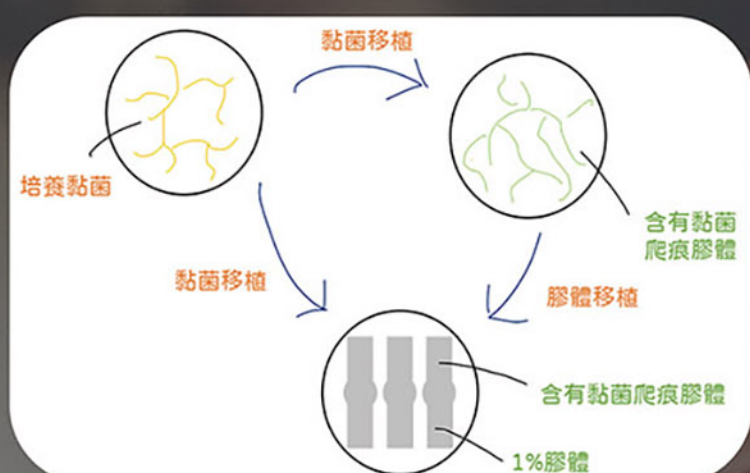


圖9. 雙向走道迷宮

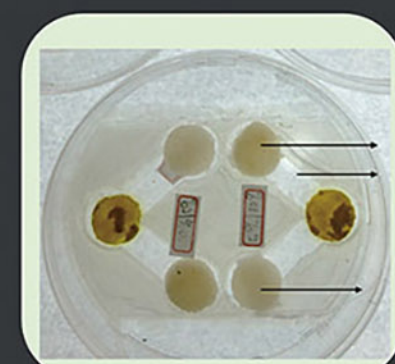


圖10. Y型走道迷宮

# 實驗結果

## 一、黏菌採集及生命史觀察

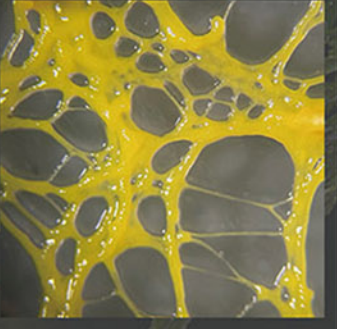
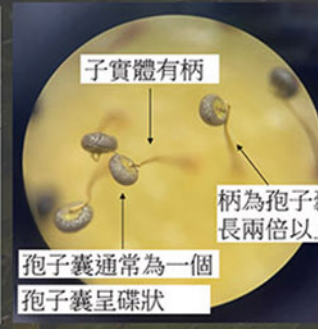
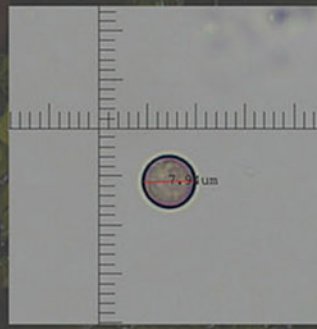
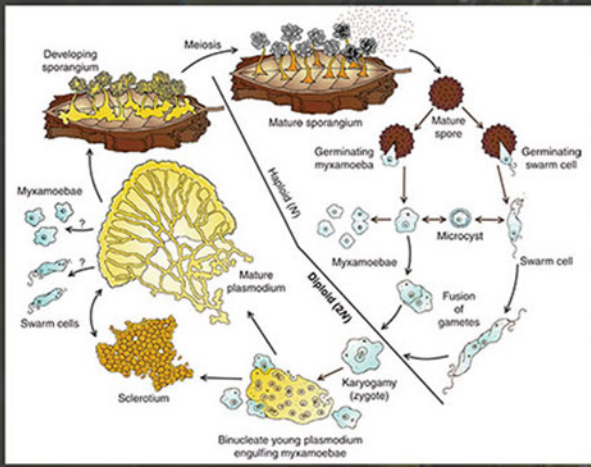


圖11.生命史

圖12.黏菌生命史中各種形態

## 二、以環形迷宮檢驗黏菌是否能形成最佳化途徑？

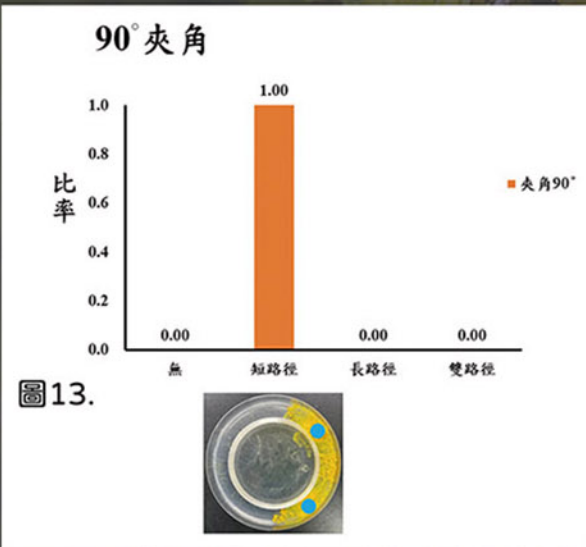


圖13.

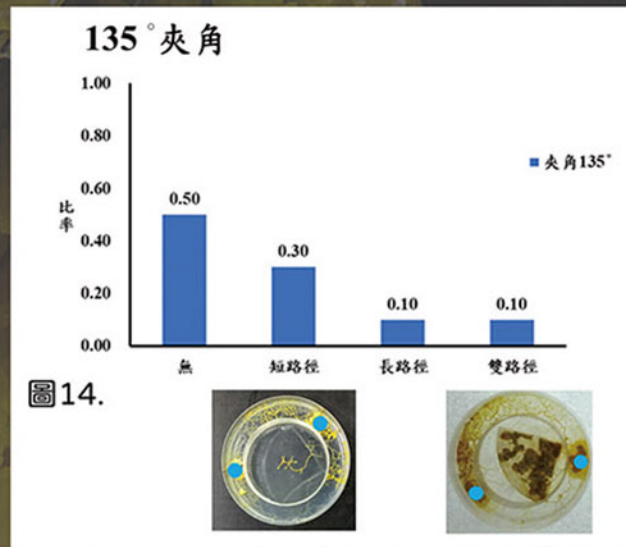


圖14.

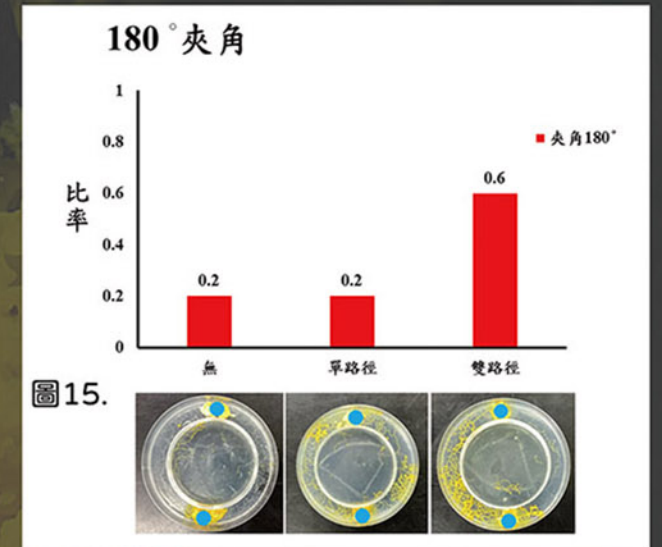


圖15.

夾角90°時，黏菌皆以短路徑相連，角度180°時，有20%的黏菌各自取食、20%的黏菌以單路徑相連，有60%的黏菌同時連接環形迷宮的兩側從90°到135°中可以發現，黏菌傾向以最佳化途徑連接。

## 三、複雜迷宮中黏菌的最佳化途徑

76小時後，黏菌形成最佳化途徑 ( $\alpha 2$ 、 $\beta 2$ )，路徑長為18.6cm。我們發現盤頭絨泡黏菌在複雜的環境，能探索並形成最佳化路徑來取得食物。

$\alpha 1$ : 9.1cm ( $\pm 1.0$ )、 $\alpha 2$ : 8.85cm ( $\pm 0.4$ )

$\beta 1$ : 9.3cm ( $\pm 0.6$ )、 $\beta 2$ : 9.4cm ( $\pm 0.4$ )

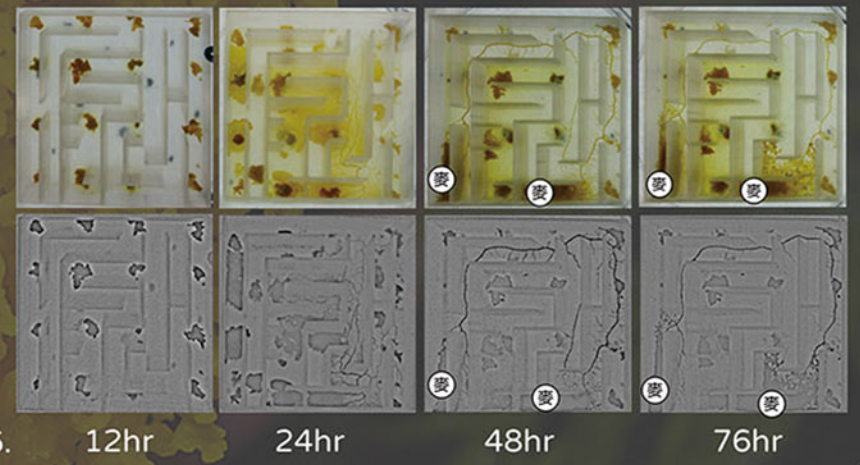
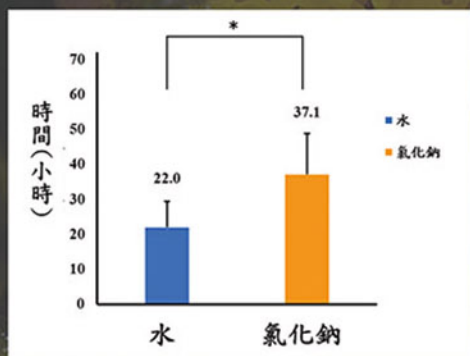


圖16.

## 四、咖啡因與金屬鹽是否會影響黏菌移動？

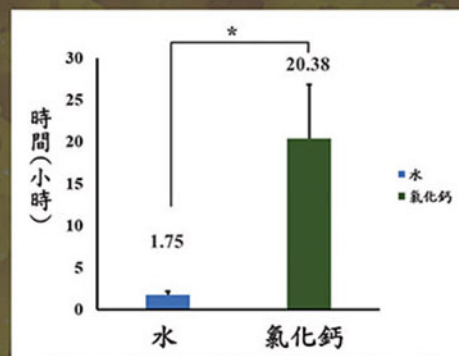
氯化鈉



水SD=6.9、氯化鈉SD=11.80、\* $p < 0.01$

圖17. 氯化鈉影響黏菌移動

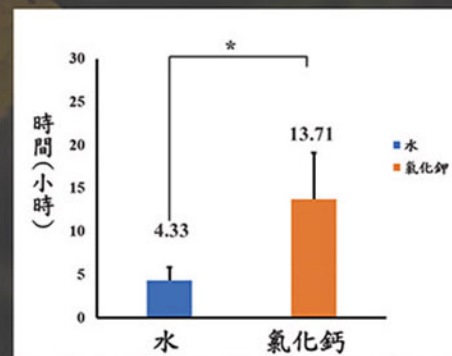
氯化鈣



水SD=1.75、氯化鈣SD=22.2、\* $p < 0.01$

圖18. 氯化鈣影響黏菌移動

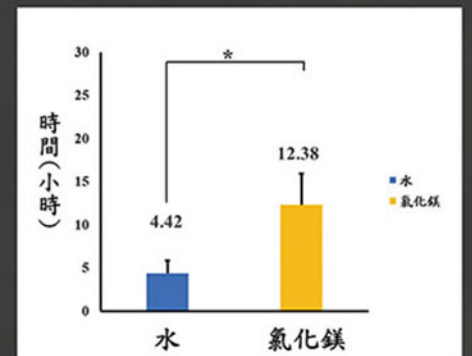
氯化鉀



水SD=1.54、氯化鉀SD=5.38、\* $p < 0.01$

圖19. 氯化鉀影響黏菌移動

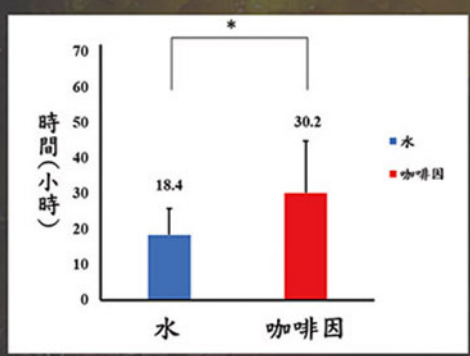
氯化鎂



水SD=1.46、氯化鎂SD=3.60、\* $p < 0.01$

圖20. 氯化鎂影響黏菌移動

咖啡因



水SD=7.46、咖啡因SD=14.55、\* $p < 0.01$

圖21. 咖啡因影響黏菌移動情形

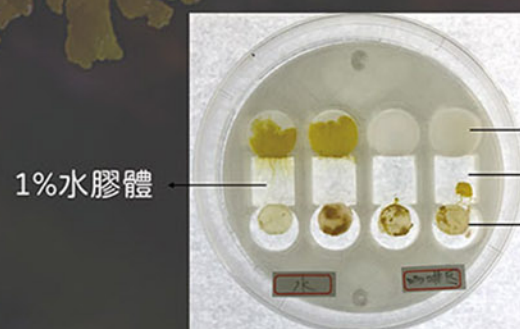
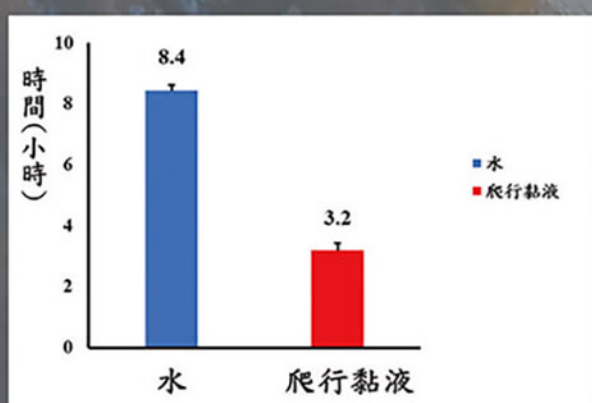


圖22. 影響黏菌爬行因素實驗

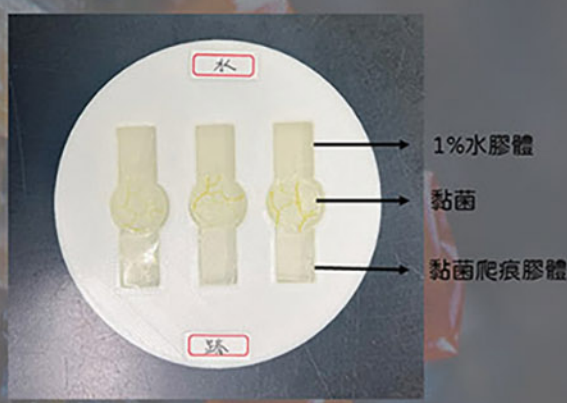
氯化鈉、氯化鈣、氯化鉀、氯化鎂及咖啡因皆會影響黏菌移動，其中氯化鈣抑制黏菌移動效果最為明顯。

## 五、黏菌爬行後的分泌物對黏菌移動的影響？



(n=18、水SD=0.3、爬行後的黏液SD=0.2、\*p<0.01)

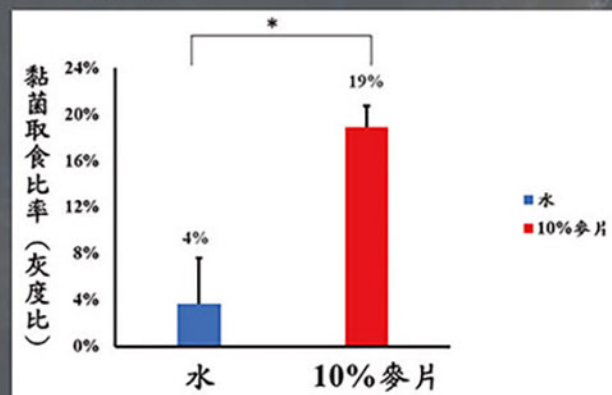
圖23.黏菌爬行後的分泌物對黏菌移動的影響



在12小時內黏菌停留在水膠體上的時間為8.4小時，停留在黏液膠體上的時間僅有3.2小時，因此我們認為黏菌爬行後的黏液對黏菌的移動具有影響。

## 六、食物濃度是否會影響黏菌決策？

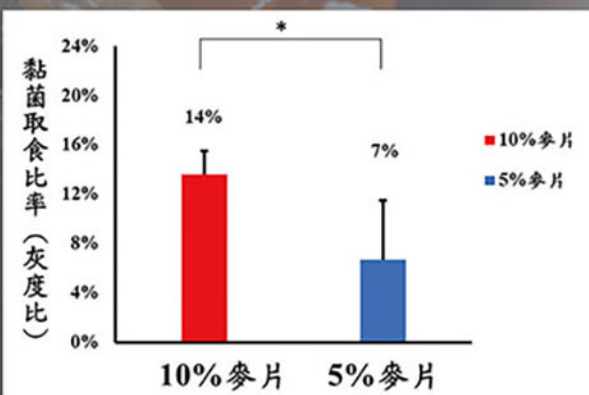
### 10%麥片與水



水 SD=0.04、10%麥片SD=0.02、\*p<0.01

圖24.黏菌對不同麥片濃度偏好

### 10%麥片與5%麥片



10%麥片SD=0.02、5%麥片SD=0.05、\*p<0.01

圖25.黏菌對不同麥片濃度偏好

當環境中同時有10%麥片及5%麥片時，盤頭絨泡黏菌在10%麥片濃度分布較多，與5%麥片濃度有顯著差異(p<0.01)。

## 討論

### 一、黏菌最佳化途徑應用於都市規劃

我們運用黏菌最佳化途徑的能力用於模擬台灣高速公路規劃，先利用GIS系統將台灣本島進行建模並3D列印，並用地理資訊系統將各地區人口以點子圖(Dot)呈現，將黏菌培養在人口稠密區域並觀察連結情形。



圖26.台灣國道圖

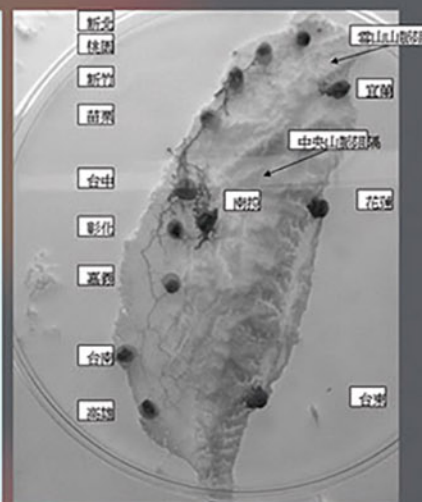


圖27.黏菌路徑圖

### 二、不同金屬鹽對黏菌移動的比較

在實驗中我們發現氯化鉀、氯化鎂、氯化鈉對黏菌移動的影響與對照組相比只有3倍差異，但是氯化鈣與對照組差異有20倍之多，Laszlo Farkas在研究中提到黏菌移動與肌凝蛋白II有關，而Ca<sup>2+</sup>會抑制黏菌的肌凝蛋白II，我們推測氯化鈣會抑制黏菌的生長，未來可以利用氯化鈣來控制黏菌爬行方向。

## 結論

1. 檢索表鑑定，我們採集的黏菌為盤頭絨泡黏菌。
2. 盤頭絨泡黏菌會在食物之間形成最佳化途徑，且在複雜迷宮中也能從中脫困。
3. 4mM的咖啡因、200 mOsmol氯化鉀、氯化鈣、氯化鎂、氯化鈉會影響黏菌的移動，其中以氯化鈣最為明顯。
4. 盤頭絨泡黏菌能判斷環境中麥片濃度的差異，並且偏好濃度較高的食物以形成路徑。

## 未來展望

黏菌具有在食物間形成最佳化途徑的特性，可運用在都市交通規畫。Jasmine Lu和Pedro Lopes指出黏菌具有作為生物電路的能力，未來我們想將黏菌進行決策及形成最佳化途徑的能力，利用在構成生物電路以探討其潛力。

## 參考文獻

1. Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada, Agota Tóth (2001). Path finding by tube. morphogenesis in an amoeboid organism. Biophysical Chemistry . 30;92(1-2):47-52.
2. Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada, Agota Tóth, (2000). Maze-solving by an amoeboid organism . Nature Vol 407
3. Chin-Hui Liu, Jong-How Chang and Fu-Ya Yeh (2013). Myxomycetes of Taiwan XXIV. The genus Physarum. Taiwania, 10 September 2013 Page: 176 – 188
4. Audrey Dussutour. (2022). Moi le blob (French Edition), humenSciences