

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

佳作

030319

探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線(Physarum
wires)的特性

學校名稱：臺中市私立華盛頓高級中學(附設國中)

作者： 國二 林映辰 國二 李竑萱 國二 陳睿泓	指導老師： 江宏惟 劉純如
---	-----------------------------

關鍵詞：盤頭絨泡黏菌、生物電線、多頭絨泡黏菌

摘要

本研究探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線的潛力，利用自製電流檢測裝置繪製伏安特性曲線，結果顯示黏菌電線的電壓與電流高度正相關 ($r=0.986$, $p<0.01$)，且受到連接寬度與溫度的影響，電阻與環境溫度呈中度正相關 ($r=0.642$, $p<0.05$)，顯示其為非歐姆導體。我們利用4nm的鐵粉及 Fe_3O_4 餵食黏菌，並記錄黏菌取食後外觀顏色的變化，結果顯示取食後的電流量提高且電阻下降。

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，本研究設計黏菌並聯及串聯裝置，且利用溫度與電阻的特性設計溫度感測裝置，成功以黏菌藉溫度來調控LED明亮，展現其在生物感測領域的應用潛力。

壹、前言

一、研究動機

黏菌是屬於原生生物界中原生菌類的一種多核單細胞生物，牠生活環境多處在陰暗、潮濕的落葉堆中或枯木之中，在歷屆科展作品中，對於黏菌的研究多著重於黏菌的爬行方式及決策能力、最短路徑選擇及攝食喜好等(陳、林與黃，2023)、(吳、劉，2022)，而探討黏菌作為電線的方向較少，吳、劉(2022)使用麥片混和鐵粉並餵食多頭絨泡黏菌，其研究發現鐵粉對多頭絨泡黏菌具有吸引力，然而並無深入了解取食鐵粉後會對黏菌的導電性產生何種影響，也不清楚長時間導電下，黏菌電線的電阻與電流變化。對於黏菌作為電線的形式讓我們感到非常新奇，因此我們展開了此研究。

二、目的

(一) 探討黏菌是否適合作為電線

1. 黏菌電線電壓與電流的關係
2. 連接寬度對黏菌電線電流與電阻的影響
3. 溫度對黏菌電線電流與電阻的影響

(二) 利用奈米Fe及Fe₃O₄改變黏菌導電特性

1. 探討取食Fe及Fe₃O₄後的黏菌其顏色變化
2. 探討取食Fe及Fe₃O₄的黏菌電流及電阻值改變

(三) 觀察黏菌體內細胞質流的運作

1. 測量黏菌體內細胞質的流速
2. 影響黏菌細胞質流的因素

(四) 利用黏菌電線特性設計電路裝置

1. 檢驗黏菌電線並聯及串聯的可能性
2. 設計溫度感測裝置

三、文獻回顧

(一) 關於黏菌介紹

黏菌生活在潮濕的森林地區和腐爛的植物上，是一種多核單細胞的原生生物，其生命史可以分為三個階段，分別為變形蟲體、變形體、子實體。變形蟲體時，為透明黏稠狀，變形體時，黏菌會利用原生質流(protooplasmic streaming)的方式向前延伸出片狀構造。當生活環境惡劣，黏菌會萎縮形成菌

核；若受到過多的光線照射，黏菌則容易形成子實體並產生孢子，而當盤頭絨泡黏菌變為子實體，其孢子囊呈現飛碟狀，與盤子有幾分相似，因而得名。

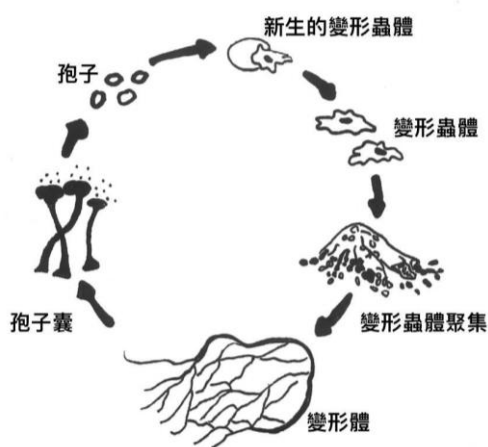


圖1.黏菌生命史

(由第一作者繪製)



圖2.盤頭絨泡黏菌孢子囊

(由第三作者拍攝)

(二) 黏菌相關研究

早期關於黏菌的研究方向多為探討黏菌的細胞週期、有絲分裂(Jockusch BM.,1975)、(Sudbery PE, Grant WD.,1976)，在2000年時日本科學家中垣俊之 (Toshiyuki Nakagaki) 將多頭絨泡黏菌培養於迷宮中，將設有起點與終點的迷宮置於培養皿中，並在兩點放置麥片，便觀察到黏菌形成最短路徑，中垣俊之將這種特性驗證東京地下鐵路的路徑(T Nakagaki,H Yamada et al.,2000)，這篇論文也獲得2010年搞笑諾貝爾的運輸規劃獎。

此後黏菌的研究方向擴展至探討黏菌的決策行為(Madeleine Beekman,Tanya Latty, 2015)，並將這種行為模式運用在交通網路上(Shin Watanabe,Atsushi Tero,et al., 2012)。相較於國外，臺灣對於黏菌的研究較少，主要方向為探究黏菌爬行能力及偏好，我們整理近年和黏菌相關的文獻如下表，並提出我們見解。

編號	作品名稱	作者	研究論點
1	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	<ol style="list-style-type: none"> 1. 黏菌會選擇最佳化途徑： 黏菌爬行時會選擇食物間的最短路徑 2. 影響黏菌爬行的因素： 氯化鈉、咖啡因會抑制黏菌爬行速度

編號	作品名稱	作者	研究論點
2	聯黏有愉-探討多頭絨泡黏菌特性及其應用	北梅國中， 2023	<ol style="list-style-type: none"> 1. 避開不喜歡的食物 黏菌會避開洗手乳麥片、洗碗精麥片 2. 對含鐵粉食物具有正趨性 黏菌偏好加入鐵粉的麥片。 3. 具有通電性 連接上9V電池可以使LED點亮，且隨著電壓上升，其生物電阻也上升
3	關於史萊姆那檔事—黏菌爬行的相關研究	吳長佑、劉鎮瑋， 2022	<ol style="list-style-type: none"> 1. 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 推測黏菌具有磁鐵礦顆粒或磁小體，亦或是細胞內自由基造成化學反應。
我們的見解			
<p>在吳、劉(2022)及北梅國中的科展團隊之研究中，皆提到黏菌偏好取食添加鐵粉的麥片，且有測量黏菌的通電性。我們在閱讀相關文獻後，有了一些不一樣想法，目前上述研究中僅餵食黏菌鐵粉，但未考慮到鐵粉是否能有效被黏菌攝食，且未排除實驗裝置中膠體的電阻及測量時間僅有180秒，未能了解長時間下黏菌電線的電流變化，因此本研究將改進研究裝置，能進行影響監測及長時間紀錄電流變化量，並進行前人尚未研究的部分，我們將重新設計測量黏菌電阻、電流的實驗裝置，並利用粒徑大小為4nm的Fe₃O₄及Fe餵食黏菌及測量餵食後的電流、電阻變化。</p>			

表1. 黏菌相關文獻整理 (第一作者整理)

(三) 奈米鐵及Fe₃O₄的研究

前人利用鐵粉餵食黏菌，但我們認為鐵粉顆粒過大，使得黏菌取食鐵粉顆粒較為困難，因此我們選用粒徑4nm的Fe探討黏菌取食後其導電性質的變化，而本研究中我們額外使用4nm的Fe₃O₄進行實驗。Fe₃O₄應用範圍非常大，可

以應用在：磁共振造影、藥物傳遞、液態軸承上，在現今生物醫學的運用上， Fe_3O_4 是廣為人知的生物相容材料，並具有可溶於水以及可以進入細胞組織的能力(鄭豐裕，2015)，且 Fe_3O_4 在生物醫學上也被利用於製作磁性藥物，可在注射後以磁場引導藥物抵達患部(Yen Pin Yew et al.，2020)，我們認為 Fe_3O_4 具有作為改良黏菌電線的特性，甚至未來可以朝著以磁性引導黏菌電線生長。

四、 研究架構圖

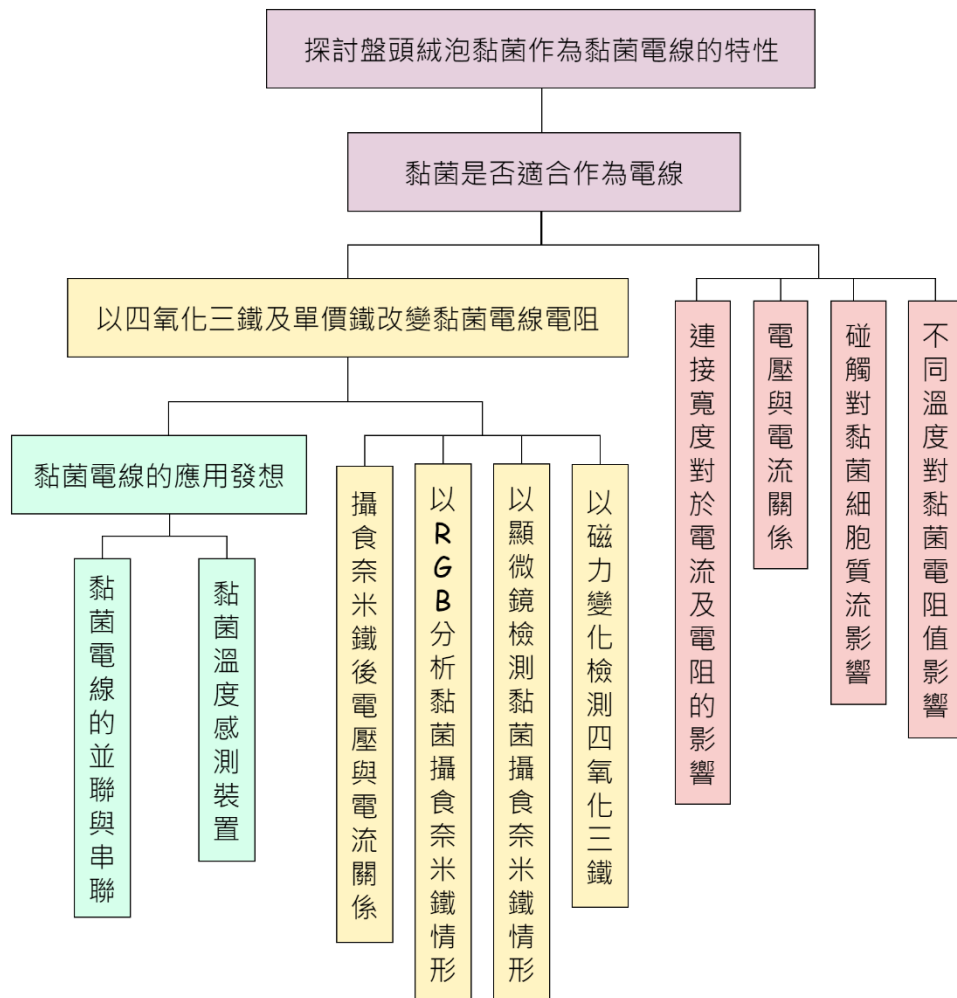


圖3.實驗架構圖 (由第二作者繪製)

貳、研究設備及器材

一、研究儀器

表2. 研究器材清單 (由第二作者繪製)

名稱	廠商規格	備註
Raspberry Pi 4	Model B 4Gb	購自傑森創工
實物攝影機	IPEVO V4K USB	購自PChome 24h
複式顯微鏡	Nikon Scliipse E100	購自Nikon
Bambu Lab P1P	Bambu Lab	購自Bambu Lab
電源供應器	NPS605W	購自今華電子
NodeMCU	ESP8266	購自傑森創工
直流電流檢測器	KV-AMP700uT	購自康威科技
銅箔膠帶	寬15mm	購自今華電子
NAS 雲端伺服器	DS 223j	購自Synology Inc.
桌上型高壓滅菌釜	TM321-24L	購自國教儀器

表3. 藥品清單 (由第二作者繪製)

名稱	廠商規格	備註
洋菜粉	500g	購自島田化學研究所
鹽酸 HCl	500ml	購自國教儀器
硫氰酸鉀 KSCN	500g	購自全泰化工
Fe ₃ O ₄ (5nm)	100g	購自華北金屬材料
Fe (5nm)	100g	購自華北金屬材料
桂格大燕麥片	1kg	購自全聯福利中心

參、研究過程或方法

一、藥品配製

(一) 1%水洋菜膠體

1. 取495mL熱水+5g洋菜粉
2. 將Agar與水攪拌均勻，用鋁箔紙封口，並放入高溫滅菌釜滅菌
3. 無菌操作台下倒入培養皿冷卻，放入冰箱保存

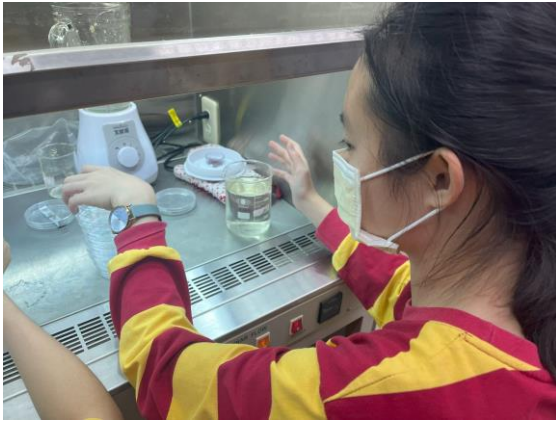


圖4.1%洋菜膠體配製

(第一指導老師拍攝)

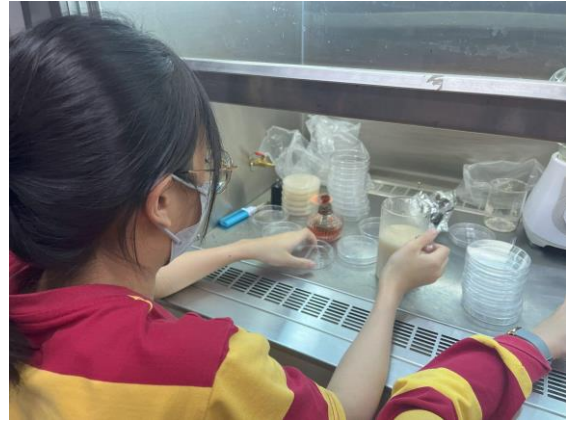


圖5.5%麥片膠體配製

(第一指導老師拍攝)

(二) 5%麥片膠體

1. 取兩個燒杯，分別放置470mL水+5g洋菜粉及25g麥片
2. 把兩個燒杯用鋁箔紙封口，並放進滅菌釜121°C、20min 滅菌
3. 稍待冷卻後，在無菌操作台將麥片及水放入消毒後的果汁機攪拌
4. 倒入培養皿等待培養基冷卻

(三) 配製Fe及Fe₃O₄麥片培養基

1. 配製1%水洋菜膠體，並加入25g麥片攪拌均勻，製成5%麥片膠體
2. 以電子天平秤量25g膠體置於燒杯中
3. 分別加入4g的Fe與Fe₃O₄攪拌均勻，並利用超音波震盪機進行震盪
4. 將混合後膠體25mL倒入培養皿中，待冷卻後置4°C冰箱保存



圖6.奈米鐵麥片膠體 (由第一作者拍攝)

(四) 製備3M 硫氰化鉀(KSCN)溶液

1. 秤量14.5g KSCN 並溶於35.5mL水中，攪拌均勻至溶解
2. 常溫保存以待使用

二、 研究方法

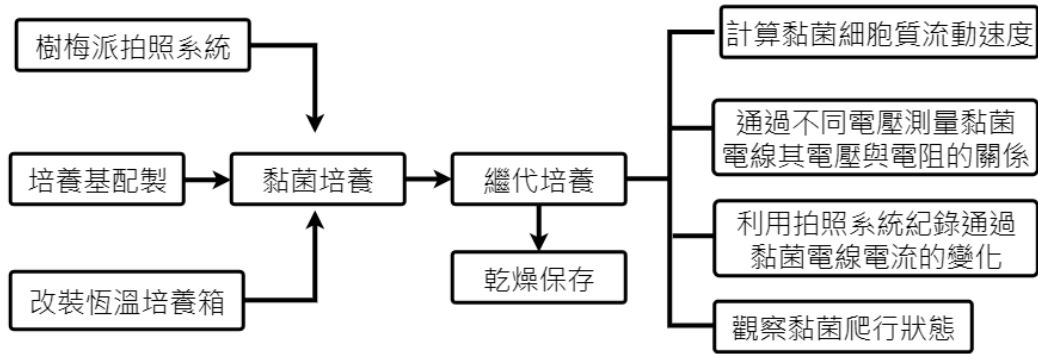


圖7.實驗流程圖 (由第三作者繪製)

(一) 盤頭絨泡黏菌採集

1. 2023年在校園中落葉堆肥區採集 (24°09'29.4"N, 120°44'43.9"E)
2. 採集前觀察氣象預報，在下雨後的兩天左右至採集地翻找落葉與枯木
3. 自枯木中或是落葉堆下找尋變形蟲體或是子實體。將變形體放入1%水洋菜膠培養基上以麥片培養後續進行繼代
4. 子實體的部分則是將枯木放置於沾濕的餐巾紙上進行濕式培養，並移植到1%水洋菜膠培養基上

(二) 多頭絨泡黏菌取得方式

1. 與他校老師交流取得採集自松鶴部落之多頭絨泡黏菌

(三) 黏菌繼代培養

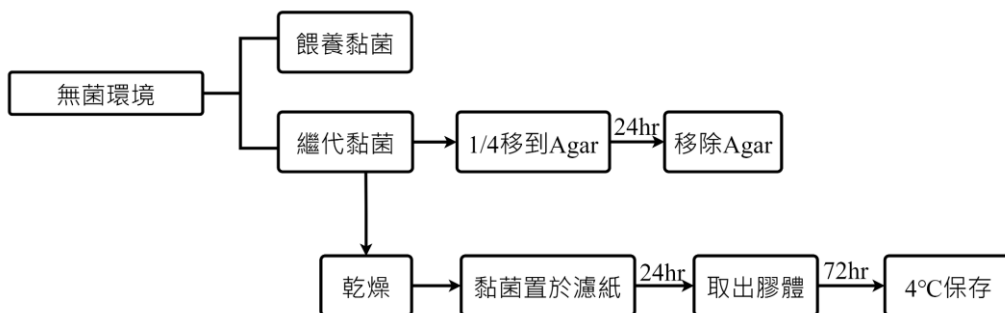


圖8.繼代培養流程圖 (由第一作者繪製)

1. 取二分之一的黏菌，移至新的1%水洋菜膠體培養基上，並餵食適量麥片
2. 24小時後，將舊膠體從培養基中取出，避免其影響已繼代的黏菌生活環境
3. 每日定時餵食適量麥片

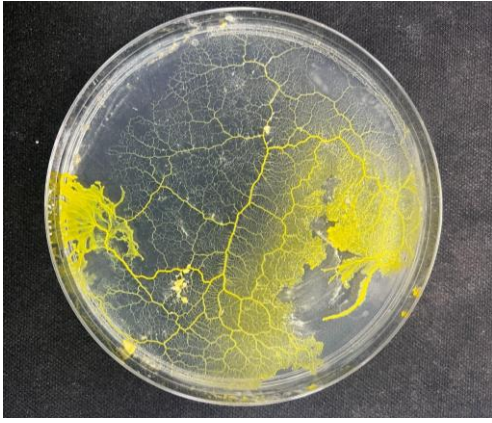


圖9.繼代培養(由第二作者拍攝)



圖10.繼代培養操作(由第二作者拍攝)

(四) 黏菌乾燥保存

1. 將需保存的黏菌裁切，放置在沾水的濾紙以25°C 環境培養
2. 待黏菌全部爬至濾紙上，乾燥後以剪刀剪取適當大小，以4°C 保存



圖11.乾燥菌片(由第三作者拍攝)

(五) 樹梅派定時拍照系統設計

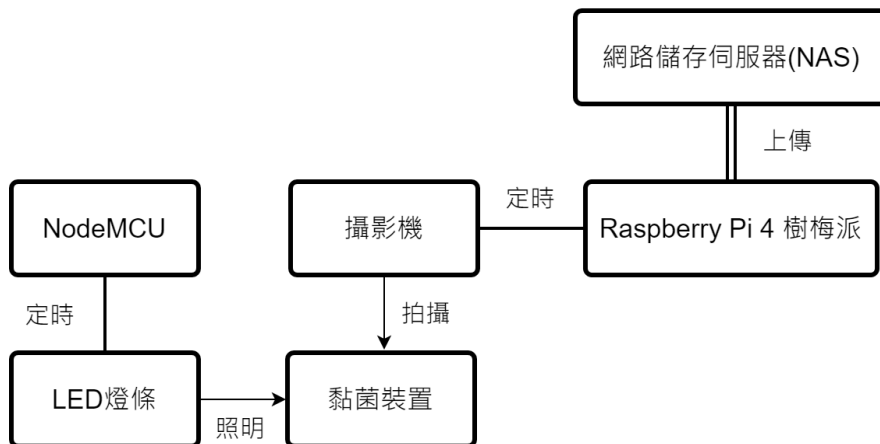


圖12. 樹梅派定時拍照系統設計流程圖 第一作者繪製

1. 在Raspberry Pi 4B中安裝Motioneye OS，並設定IPEVO V4K USB實物攝影機，每30分鐘自動拍攝一張照片
2. 利用NodeMCU使LED燈光每30分鐘啟動一次，以確保拍照時有足夠的光線
3. 使用網格紙調整攝影機鏡頭的焦距，並減少在拍攝時因反光而產生的干擾
4. 將照片上傳NAS儲存，以便進行後續的分析工作，並在需要時共享圖像

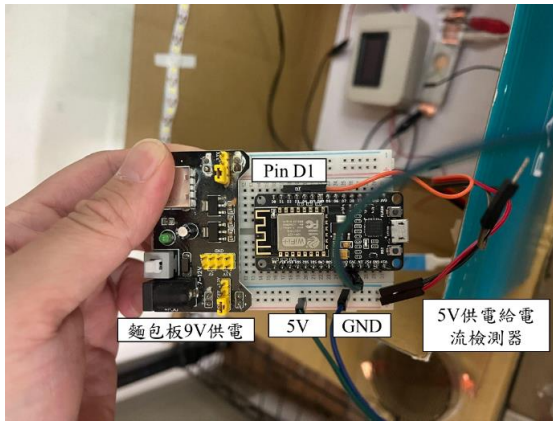


圖13. 定時拍照系統畫面(由第三作者拍攝)

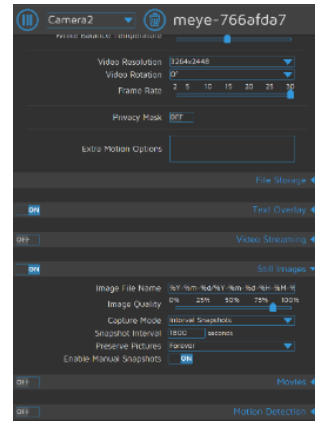


圖14. Motioneye OS設定(由第三作者拍攝)



圖15.定時拍照系統(由第一作者拍攝)

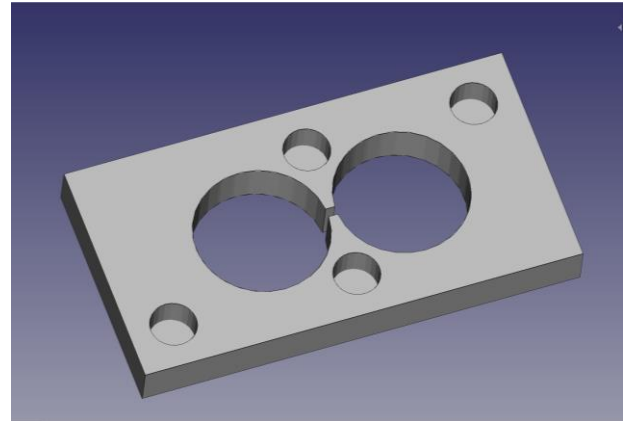


圖16.黏菌電線連接寬度裝置(由第一作者拍攝)

(六) 改良恆溫培養箱

1. 購買小神童GWTB-TR711控溫元件取代原廠溫控元件，設定溫度為25度
2. 利用溫度感測器及濕度感測器監測恆溫箱溫度、濕度變化



圖17.控溫元件(第三作者拍攝)



圖18.溫度感測器 (第三作者拍攝)

(七) 黏菌電線電流檢測裝置

1. 利用FreeCAD 0.21設計模型，並用3D列印將設計好的模型列印出來
2. 在底座部分貼上銅膠帶當作電極
3. 在上蓋與底座各穿四個洞，並鑲入磁鐵，讓上下部分透過磁鐵吸合在一起

4. 在凹槽處各放入黏菌以及麥片膠體
5. 將電極的兩端一邊連接電源供應器，另一邊連接電流檢測器，形成串聯

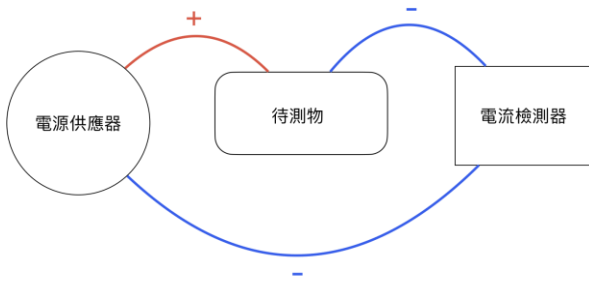


圖19.電線電流檢測裝置 (第一作者繪製)

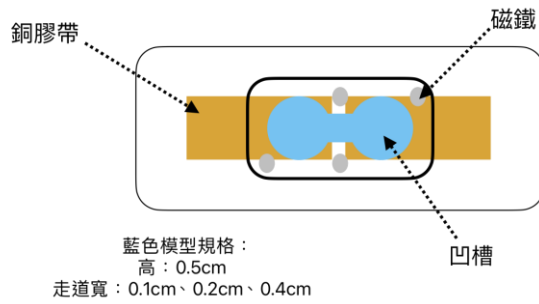


圖20.電流檢測3D列印模型 (第一作者繪製)

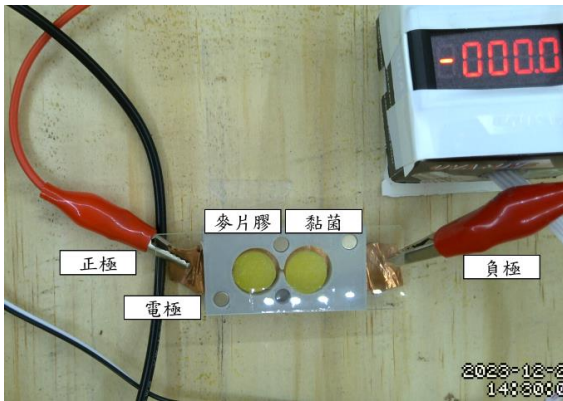


圖21.電流檢測3D列印模型(第三作者拍攝)

(八) 黏菌電阻測量

1. 將黏菌從水Agar上切1/4放到麥片膠體上
2. 等待1天，黏菌完全爬到麥片膠體上
3. 用自製吸取器將黏菌放入實驗裝置的電極上，另一邊(距0.1cm)放麥片膠體
4. 等待黏菌連接兩端，將電源供應器連結電極兩側
5. 測量不同電壓下電流的變化，再利用歐姆定律($V=IR$)計算電阻

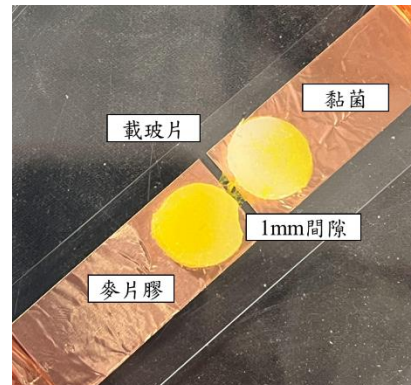
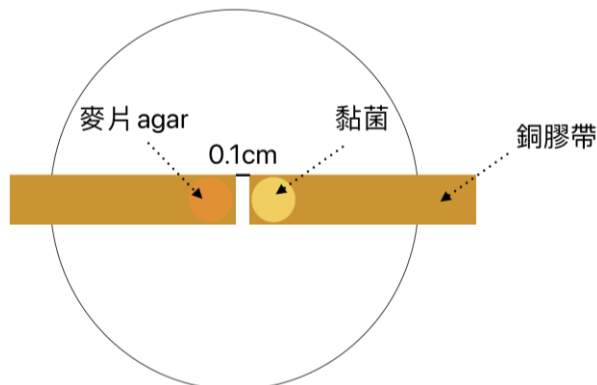


圖22.黏菌電阻檢測裝置 (第一作者繪製) 圖23.黏菌電阻檢測裝置(第二作者拍攝)

(九) 黏菌細胞質流觀察

1. 將黏菌放置於100倍複式顯微鏡下，觀察黏菌流動情形
2. 選擇流動較明顯的部分，並開啟錄影模式
3. 利用頭髮輕觸黏菌，並觀察其流動變化
4. 利用tracker計算細胞質流動的速度



圖24.利用頭髮觸碰黏菌(第三作者拍攝)



圖25.以複式顯微鏡觀察細胞質流(第三作者拍攝)

(十) 溫度對黏菌電線通過電流以及電阻的影響

1. 將乾浴槽中的鋁塊置於冷凍庫中降溫
2. 鋁塊完全降溫後取出，並放入乾浴槽設定溫度
3. 放上電流檢測裝置
4. 啟動設備加溫與監測黏菌溫度，並記錄各溫度下的電流量

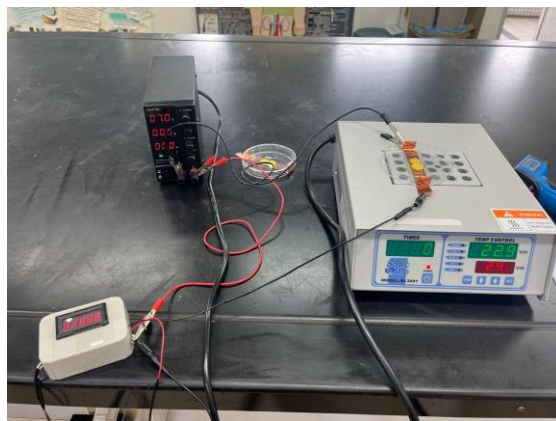


圖26.溫度對黏菌電阻、電流的影響實驗裝置 (第三作者拍攝)

(十一) 利用KSCN藥劑檢測 Fe_3O_4 及Fe

1. 分別將稀鹽酸滴在 Fe_3O_4 膠體及Fe膠體上作用，使 Fe_3O_4 及Fe解離
2. 滴上3M KSCN溶液2mL，靜置並觀察其顏色變化

(十二) 經Fe及Fe₃O₄處理後的黏菌其電壓與電阻關係

1. 將黏菌繼代至無養分Agar上，餵食Fe - 麥片膠體或Fe₃O₄ - 麥片膠體
2. 將電源供應器、電流檢測器、形成通路的黏菌（Fe、Fe₃O₄、未經處理）以串聯的方式連成一條通路
3. 並紀錄不同電壓下，黏菌電線的電流並利用歐姆定律 $V=IR$ 計算電阻

(十三) 利用ImageJ以RGB分析黏菌取食Fe₃O₄、Fe情形

1. 利用定時拍照系統進行拍攝
2. 將0小時、12小時、24小時及48小時黏菌的生長狀況匯入ImageJ
3. 利用ImageJ 擴充元件Color inspector 3D進行RGB分析並匯出結果

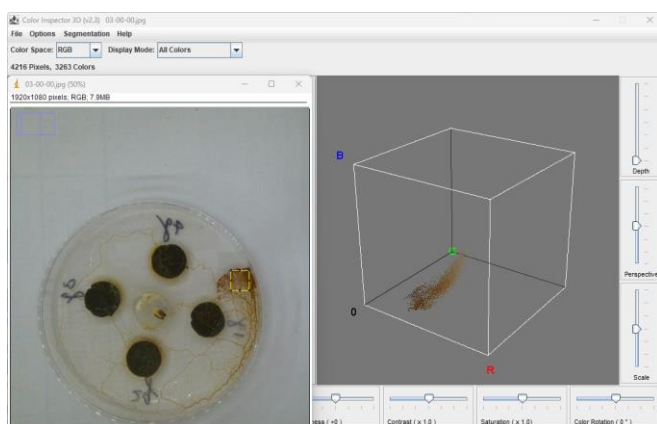


圖27.藉由ImageJ分析黏菌顏色變化

(第一作者拍攝)

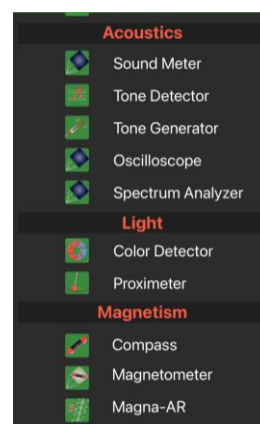


圖28.手機感測APP

(第一作者拍攝)

(十四) 利用手機磁力計檢測Fe₃O₄、Fe膠體的磁力

1. 開啟手機軟體Physics Tool中Magnetometer紀錄磁場的背景值
2. 將培養基放置於手機前端紀錄磁場改變
3. 儲存並匯出數據

(十五) 黏菌電線的串連與並聯電路

1. 將3V LED焊接於雙面纖維板上，在正極位置焊接開關
2. 在正、負極兩端焊接電路板插針，以利連接杜邦線

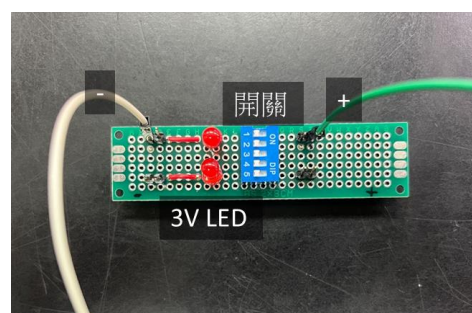


圖29. LED串聯與並聯裝置

(第三作者拍攝)

肆、研究結果

一、 利用台灣產絨泡屬檢索表鑑定黏菌種類

將兩種黏菌以光誘導方式促進形成子實體，利用複式顯微鏡觀察後以台灣產絨泡屬檢索表鑑定種類，如表4。

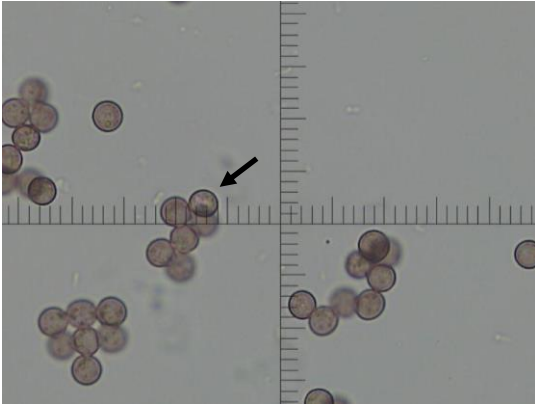


圖30.盤頭絨泡黏菌孢子(第三作者拍攝)

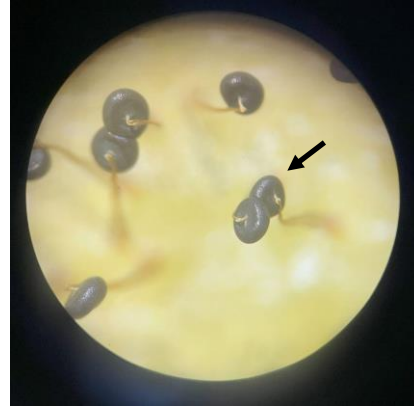


圖31.盤頭絨泡黏菌子實體40X (第三作者拍攝)

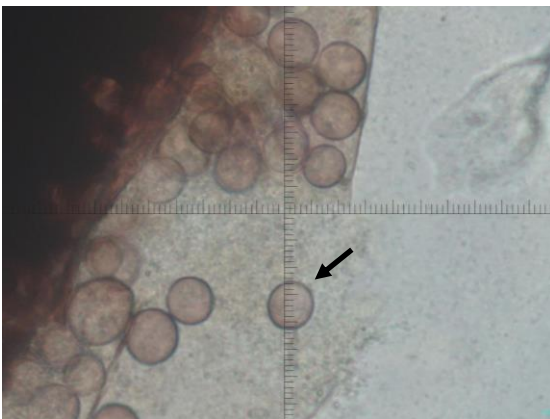


圖32.多頭絨泡黏菌孢子(第二作者拍攝)

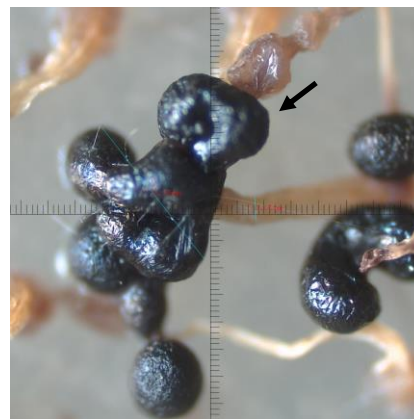


圖33.多頭絨泡黏菌子實體 100X (第二作者拍攝)

盤頭絨泡黏菌子實體	多頭絨泡黏菌子實體
子實體 (Fructification)有柄(Stalked)	子實體 (Fructification)有柄(Stalked)
缺發孢子囊軸(Columella)	缺發孢子囊軸(Columella)
孢子囊(Sporangia)通常為一個	孢子囊葉狀(lobate)或扭曲(distorted)
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 (Pseudocolumella)孢子囊碟狀(saucer-shaped)或透鏡狀	孢子囊形狀不規則或透鏡狀，且不形成假小柱(pseudocolumella)；莖黃色，細長且彎曲

表4. 本研究黏菌檢索結果 (第三作者整理繪製)

二、黏菌電線其電壓與電流之關係

多頭絨泡黏菌電線伏安特性曲線

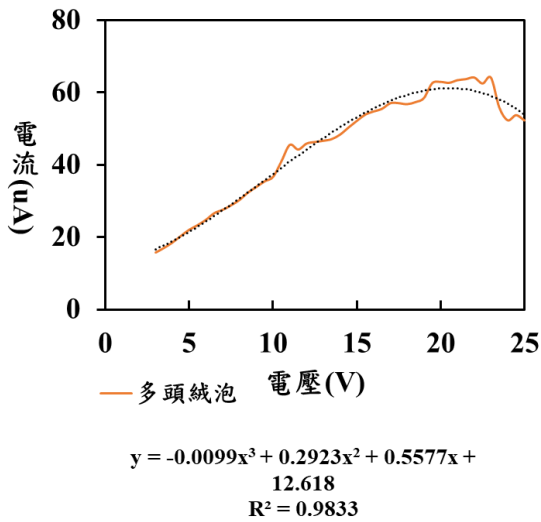


圖34.多頭絨泡黏菌伏安特性曲線

n=41，樣本相關係數=0.805 (第三作者繪製)

盤頭絨泡黏菌電線伏安特性曲線

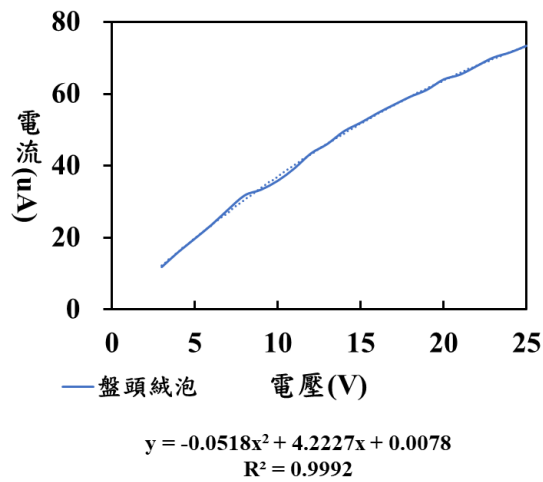


圖35.盤頭絨泡黏菌伏安特性曲線

n=41，樣本相關係數=0.986 (第三作者繪製)

我們將裝置上已形成通路的黏菌電線改變其電壓，並利用直流電流檢測器紀錄通過電流，將數值繪製成伏安特性曲線，盤頭絨泡黏菌的伏安特性曲線如圖35。經曲線擬合方程式為 $y = -0.518x^2 + 4.2227x + 0.0078$ ； $R^2 = 0.9992$ ，樣本相關係數為0.986，屬於高度相關，此結果顯示當盤頭絨泡黏菌電線的電壓提升，通過盤頭絨泡黏菌電線的電流量也會提升。

多頭絨泡黏菌的伏安特性曲線如圖34，經曲線擬合後方程式為 $y = 0.0099x^3 - 0.2923x^2 + 0.5577x + 12.618$ ； $R^2 = 0.9833$ ，樣本相關係數為0.805，屬於高度相關。當電壓提升，通過多頭絨泡黏菌電線的電流量也會增加。

盤頭絨泡黏菌與多頭絨泡黏菌伏安特性曲線比較

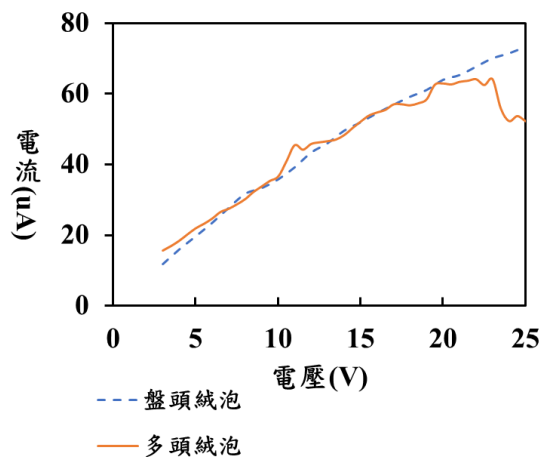


圖36.盤頭絨泡黏菌與多頭絨泡黏菌伏安特性曲線比較(第一作者繪製)

圖36.中可以發現，多頭絨泡黏菌與盤頭絨泡黏菌的伏安特性曲線相似，但在電壓高於20V時，其通過電流開始下降且小於盤頭絨泡黏菌。此實驗結果顯示，兩種黏菌伏安特性曲線皆非直線，意指電阻並非固定值。接下來我們想探討黏菌電線不同的粗細是否與其電阻或電流有關聯，我們利用盤頭絨泡黏菌進行下列實驗。

三、不同連接寬度對黏菌電線通過電流的影響

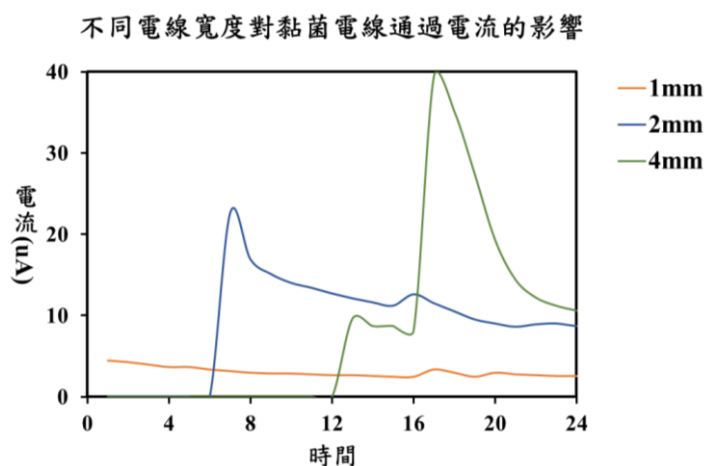


圖37.連結寬度對黏菌通過電流的影響(第一作者繪製)

我們利用自製的實驗裝置進行實驗，使黏菌電線連接寬度分別為1mm、2mm及4mm，圖37.實驗結果發現，2mm在5hr接通且有最大電流接近25uA，而在8hr後2mm通過的電流穩定在20uA，4mm則在17hr接通有最大電流40uA，因此隨著連接寬度變大，其通過的電流量也會增加，此外，當電線連結寬度越大，黏菌需要越多時間連結。

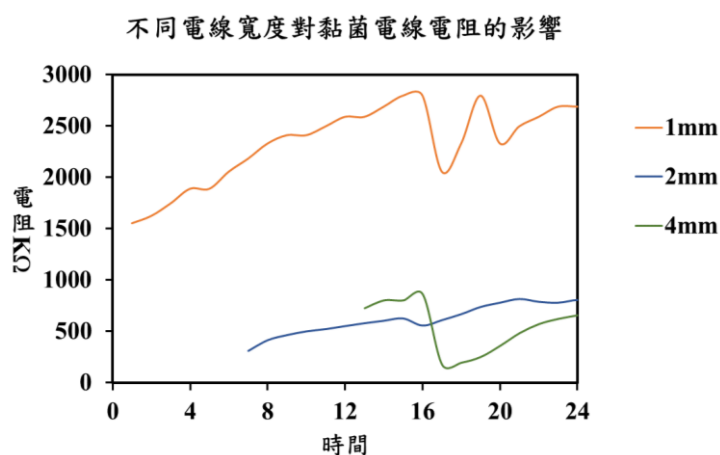


圖38.連接寬度對黏菌電阻的影響(第一作者繪製)

利用歐姆定律換算得到電阻，由圖38.實驗結果可知1mm的電阻值最大，且隨著連接寬度變大，電阻值也就依序變小，因此我們可以發現黏菌電線愈細電阻值愈大，反之，電線愈粗電阻值就愈小，接下來我們探討兩種黏菌電線在不同溫度下電壓與電阻的關係。

四、溫度對黏菌電線電阻的影響

溫度對多頭絨泡黏菌電線的電阻影響

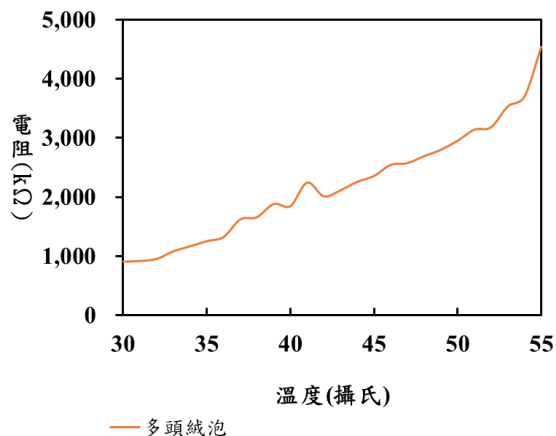


圖39.溫度對多頭絨泡黏菌電線的影響

(第二作者繪製)

n=31，樣本相關係數=0.942，p<0.01

溫度對盤頭絨泡黏菌電線的電阻影響

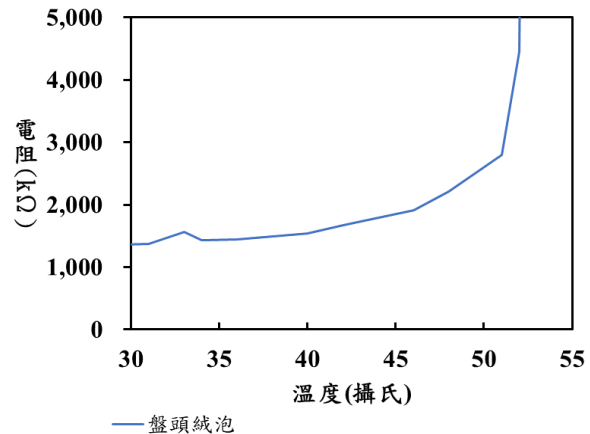


圖40.溫度對盤頭絨泡黏菌電線的影響

(第二作者繪製)

n=35，樣本相關係數=0.642，p<0.05

我們提高黏菌電線裝置的溫度，並記錄兩種黏菌其電流與電壓的變化，將數據利用歐姆定律 $V = I R$ 轉換成電阻值，並繪製成圖39.及圖40.。圖39.顯示溫度對多頭絨泡黏菌電線的影響，當黏菌電線的溫度愈高，其電阻值就愈大，且當溫度超過55°C時，黏菌就無法形成通路，電流量為0，當溫度再次降低時，黏菌也並無再次形成通路。

圖40.為溫度對盤頭絨泡黏菌電線的影響，藉SPSS進行Pearson相關性分析得知，電阻與溫度的相關係數 $r=0.642$ ，屬於中度相關。當溫度在攝氏40以下時，其電阻沒有明顯變化，約1000KΩ到1500KΩ之間，當溫度提高至攝氏45度以上時，電阻則會增加。

溫度對兩種黏菌電線的電阻影響

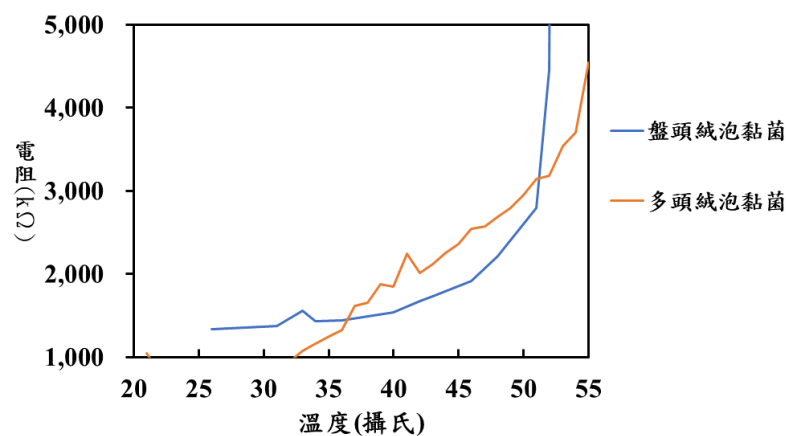


圖41.溫度改變對黏菌電線其電阻影響 (第一作者繪製)

我們對比兩種黏菌不同溫度下的電阻，在圖41.兩種黏菌電線的比較中我們可以發現，當環境溫度升高時，兩種黏菌電線的電阻皆會增加，在攝氏35度以前，多頭絨泡黏菌電阻略低於盤頭絨泡黏菌，但當溫度介於攝氏35到50度時，多頭絨泡黏菌電阻皆高於盤頭絨泡黏菌。而盤頭絨泡黏菌在攝氏50度後其電阻上升速度比多頭絨泡黏菌快。接下來我們想利用奈米鐵及 Fe_3O_4 改良黏菌電線的導電特性。

五、 Fe_3O_4 及Fe檢驗

KSCN是檢驗 Fe^{3+} 的靈敏試劑，它在酸性溶液中會和 Fe^{3+} 產生血紅色的硫氰酸鐵離子 $[\text{Fe}(\text{SCN})_n]^{3-n}$ ($n=1-6$)，我們為確定膠體中是否含有 Fe^{3+} ，因此利用3M KSCN溶液來進行檢測。圖43.為以稀鹽酸處理後的 Fe_3O_4 及Fe培養基，再加入3M KSCN皆產生血紅色的顏色變化，證明培養基中確實含有 Fe^{3+} 。



圖42. Fe_3O_4 培養基 (由第一作者拍攝)

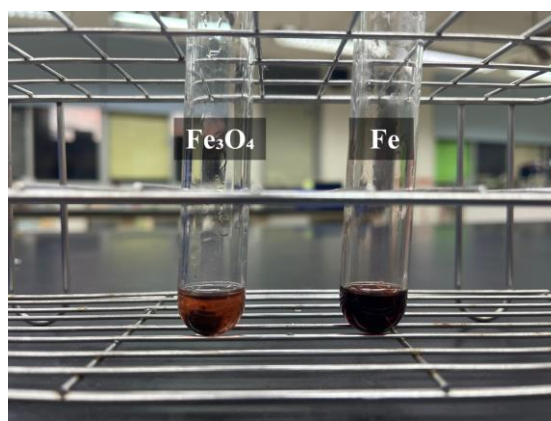


圖43. 硫氰酸鉀溶液檢測 Fe^{3+} (第三作者拍攝)

六、 以手機磁力計檢測 Fe_3O_4 及Fe膠體磁場

因為 Fe_3O_4 具有順磁性之特性，我們先將 Fe_3O_4 置於磁鐵磁場中磁化，再利用手機磁力計檢測磁場變化，結果如圖44.及圖45.。圖44.中，6.09秒前為地球背景磁場其平均值為47.8uT， Fe_3O_4 平均數值為39.7uT，結果顯示 Fe_3O_4 確實具有磁性，而圖45.顯示Fe無法檢測出磁場改變。

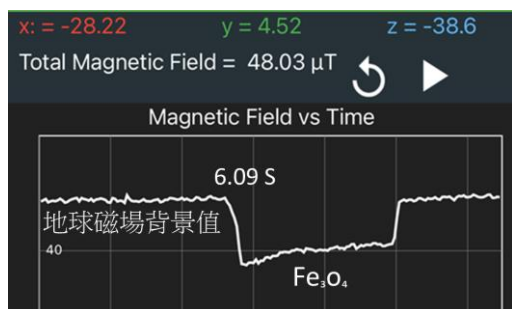


圖44. Fe_3O_4 麥片培養基(第一作者拍攝)

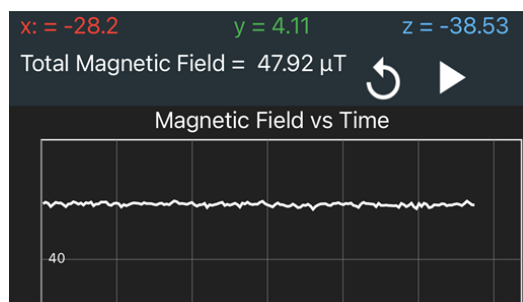


圖45. Fe麥片培養基(第一作者拍攝)

七、 利用ImageJ以RGB分析黏菌取食 Fe_3O_4 及 Fe 的情形

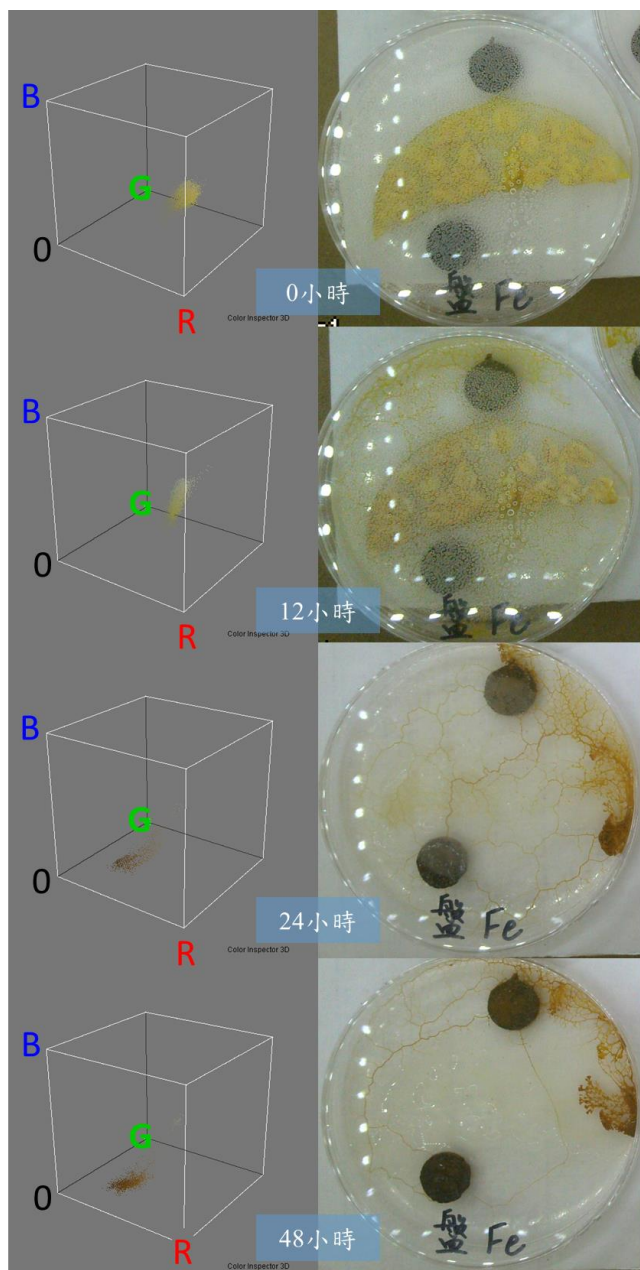


圖46.盤頭絨泡黏菌取食 Fe (第三作者拍攝)

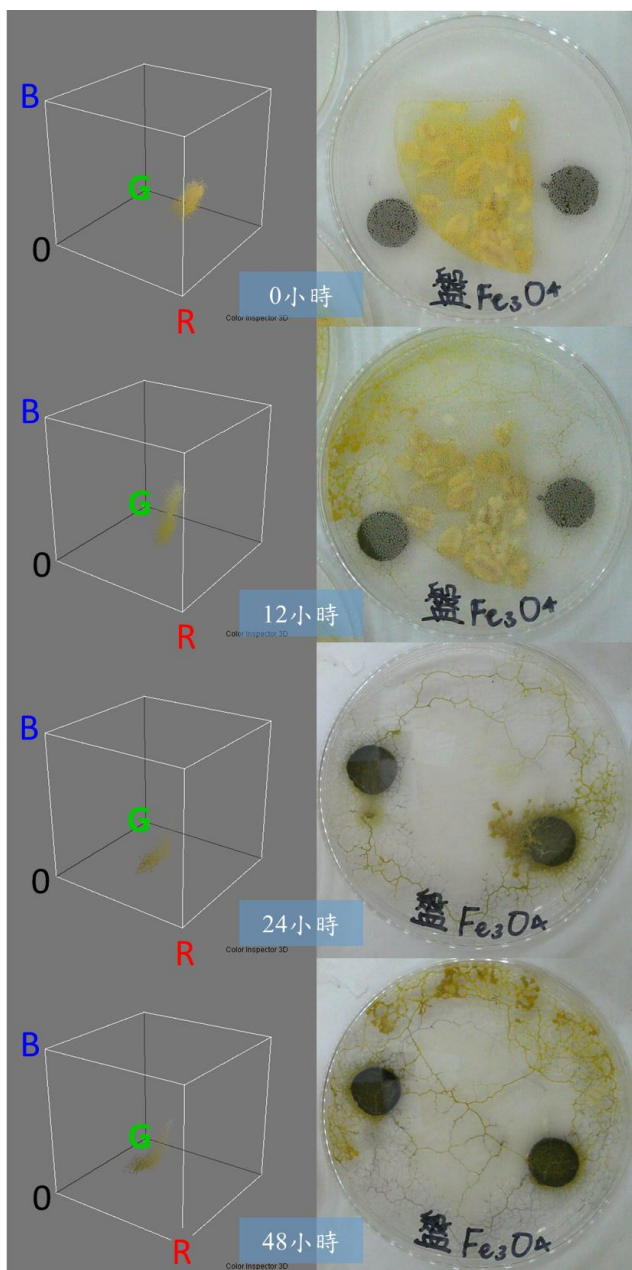


圖47.盤頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 (第三作者拍攝)

我們將黏菌培養在有 Fe_3O_4 或 Fe 的麥片膠體培養基中，並藉由定時拍照系統每12小時進行攝影紀錄黏菌取食情況，並將照片以ImageJ分別進行RGB分析，結果如圖46.到圖49.所示。圖46.中顯示盤頭絨泡黏菌取食 Fe 後，隨著取食時間增加，黏菌的外觀綠色（G）、藍色（B）及紅色（R）值皆下降，呈現褐色。圖47.在 Fe_3O_4 部分，隨著黏菌取食其外觀紅色與藍色下降高於綠色，造成黏菌取食 Fe_3O_4 後顏色較接近墨綠色。

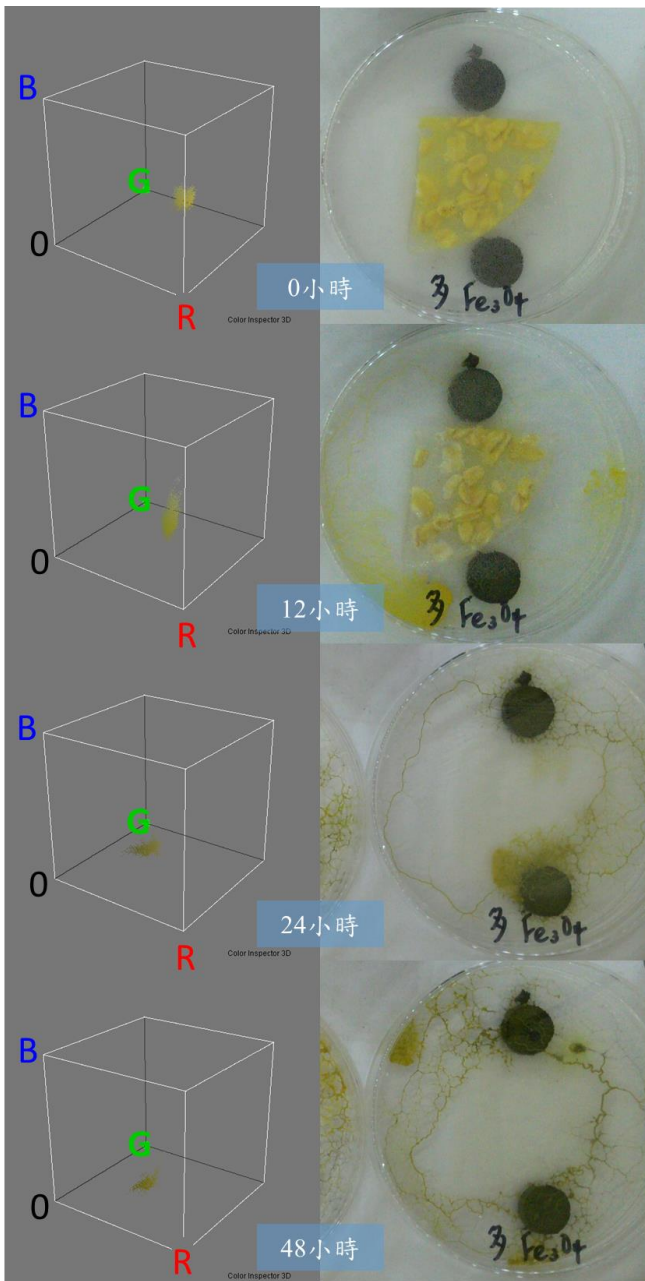


圖48.多頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 (第三作者拍攝)

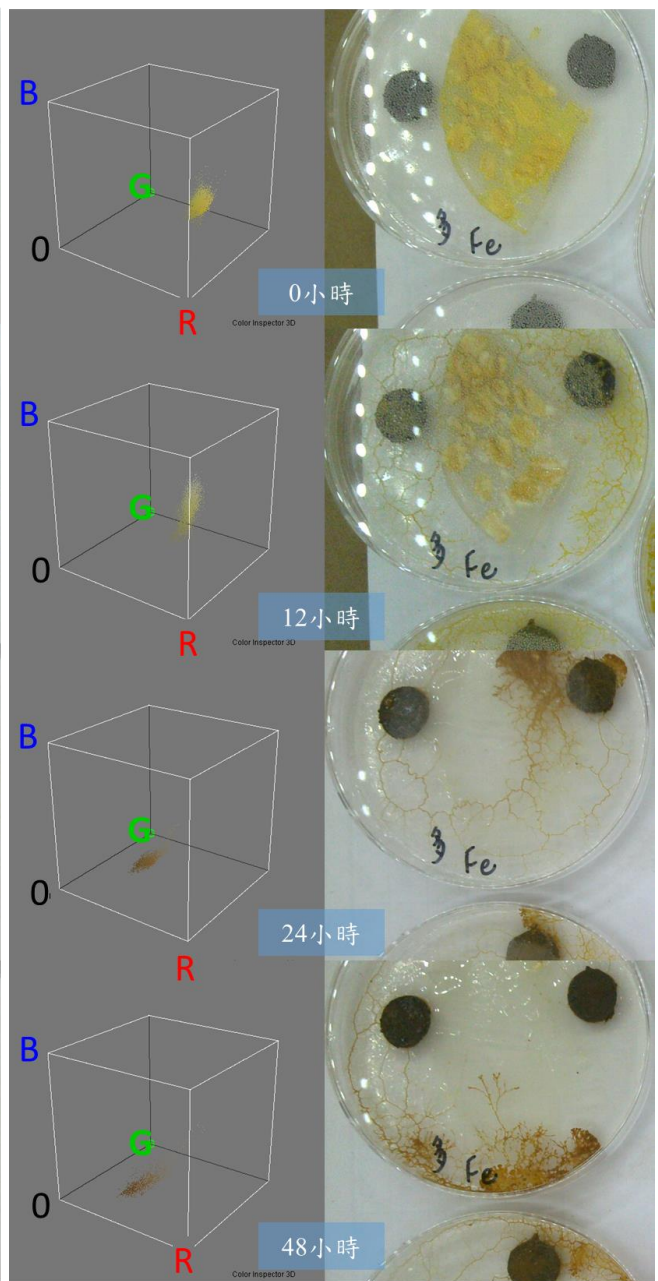


圖49.多頭絨泡黏菌取食Fe(第三作者拍攝)

圖48.及圖49.顯示多頭絨泡黏菌取食取食奈米鐵的顏色變化，當多頭絨泡黏菌取食後，其顏色變化接近盤頭絨泡黏菌外觀變化，綜合結果我們認為黏菌顏色改變與取食奈米鐵有關，可以作為取食奈米鐵的佐證之一。

八、以顯微鏡觀察取食 Fe_3O_4 及Fe膠體前後的黏菌情形

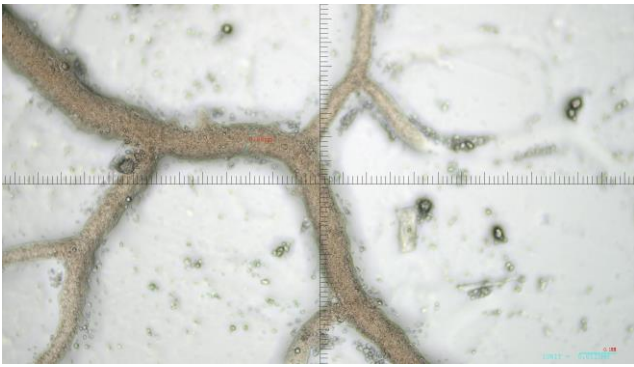


圖50.多頭絨泡黏菌取食前(第三作者拍攝)

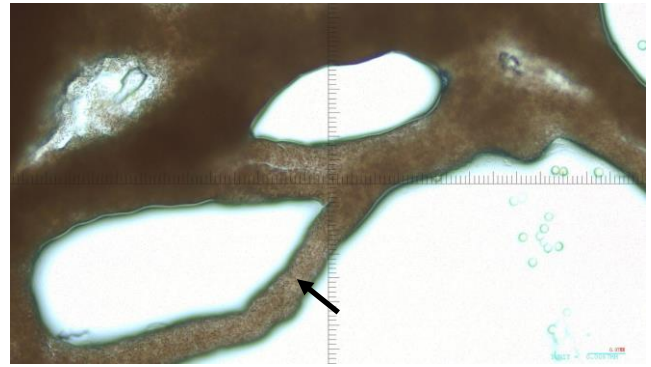


圖51.多頭絨泡黏菌取食後(第三作者拍攝)



圖52.盤頭絨泡黏菌取食前(第三作者拍攝)



圖53.盤頭絨泡黏菌取食後(第三作者拍攝)

我們藉觀察黏菌在取食 Fe_3O_4 及Fe後的變化，由上圖中發現，黏菌取食奈米鐵後，細胞質的顏色均會變深，且具有深咖啡色的顆粒，接下來我們進一步探討取食後黏菌導電特性的改變。

九、不同處理方式對黏菌電線電阻影響

(一) 盤頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4

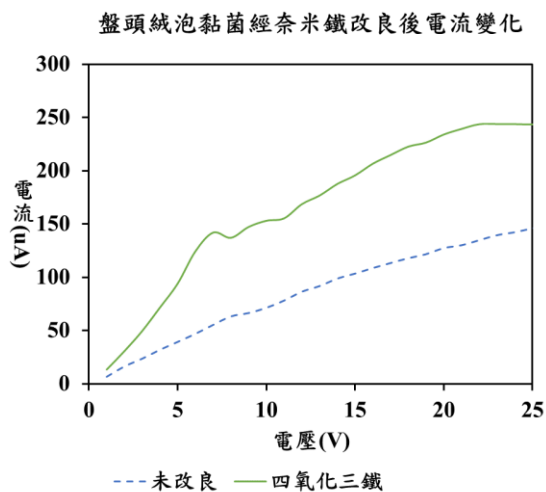


圖54.盤頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 後電流變化

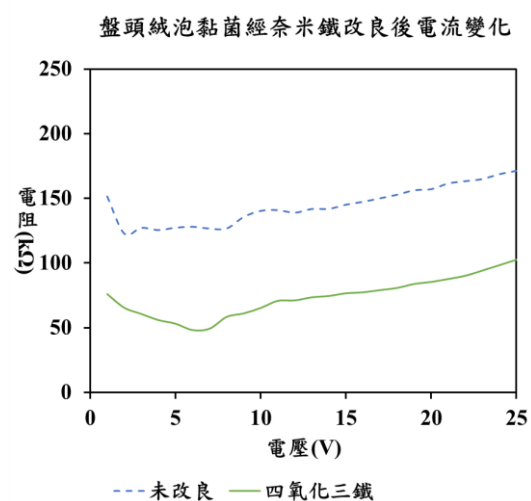


圖55.盤頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 後電阻變化

(第三作者繪製)

$\bar{x}_{處理}=166.9$, $\bar{x}_{未處理}=86.3$

(第三作者繪製)

$\bar{x}_{處理}=93.6$, $\bar{x}_{未處理}=161.7$

我們比較未經處理及取食 Fe_3O_4 的盤頭絨泡黏菌在不同電壓下其電流關係，結果如圖54。經過 Fe_3O_4 處理的黏菌電線在電壓為6V時，通過電流達150uA比對照組電流50uA高3倍，電流隨電壓提升而增加，因此我們認為黏菌電線可以藉由取食的物質改變其導電特性，且 Fe_3O_4 能有效增加黏菌電線的通過電流。

(二) 盤頭絨泡黏菌取食Fe

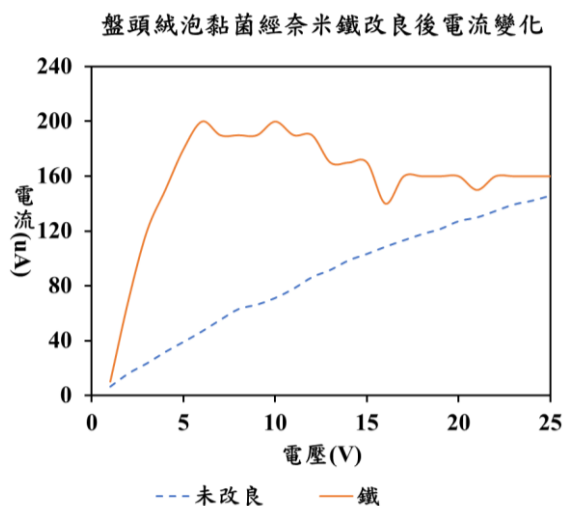


圖56. 盤頭絨泡黏菌取食Fe後電流變化

$\bar{x}_{處理}=158.4$, $\bar{x}_{未處理}=86.3$

(第二作者繪製)

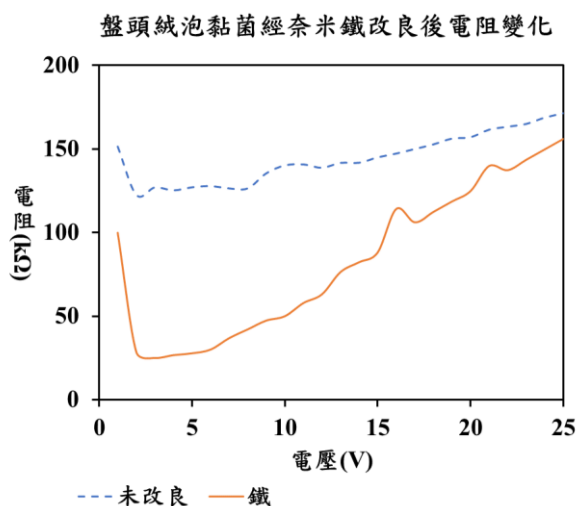


圖57. 盤頭絨泡黏菌取食Fe後電阻變化

$\bar{x}_{處理}=82.7$, $\bar{x}_{未處理}=161.7$

(第三作者繪製)

透過比較取食Fe及未經處理的盤頭絨泡黏菌在不同電壓下的電流變化，結果如圖56，電壓提升至5V時，取食Fe的黏菌其通過電流量快速增加高於未處理的黏菌，當電壓超過10V後其通過電流開始下降，17V至25V維持160uA。圖57顯示取食Fe的盤頭絨泡黏菌在低電壓時可以有效降低電阻值，但隨電壓提升電阻值會逐漸與對照組相近，由此可知，取食Fe後的盤頭絨泡黏菌適用於低電壓的情況，未來可根據電路的電壓決定是否餵食Fe。

(三) 多頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

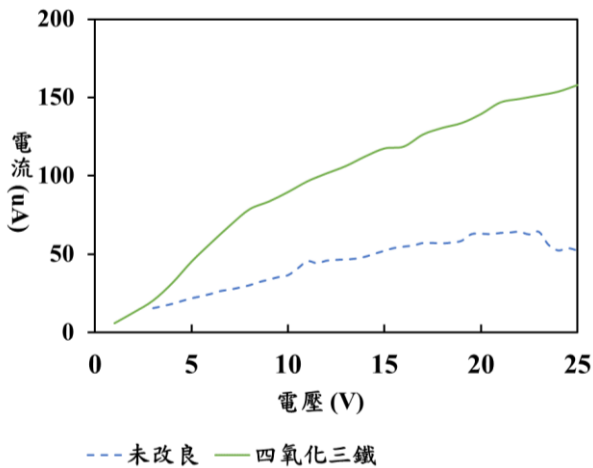


圖58.多頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 後電流變化

$\bar{x}_{\text{處理}}=97.5$, $\bar{x}_{\text{未處理}}=161.7$ (第一作者繪製)

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻值變化

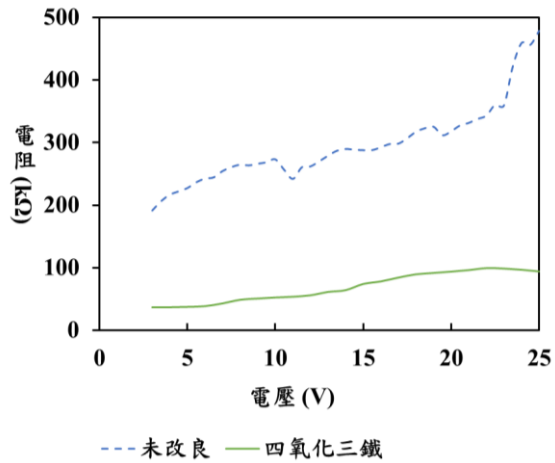


圖59.多頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 後電阻變化

$\bar{x}_{\text{處理}}=69.0$, $\bar{x}_{\text{未處理}}=295.5$ (第一作者繪製)

我們比較了多頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 和未經處理的黏菌在不同電壓下通過電流的差異，結果如圖58。可以觀察到取食 Fe_3O_4 後的黏菌通過電流隨電壓提高而增加，且電流量高於未經處理的黏菌，圖59.觀察到 Fe_3O_4 可以有效降低多頭絨泡黏菌的電阻。

(四) 多頭絨泡黏菌取食Fe

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

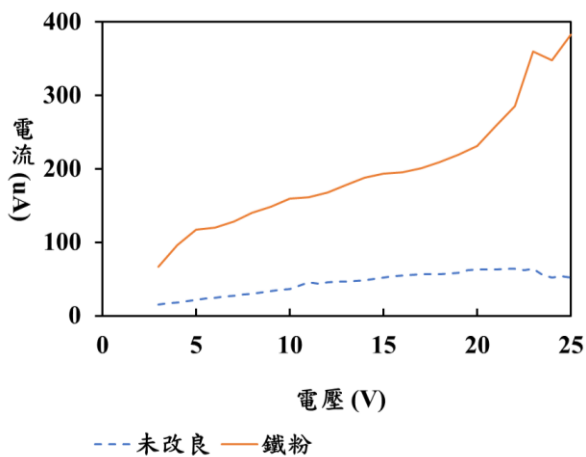


圖60.多頭絨泡黏菌取食Fe後電流變化

$\bar{x}_{\text{處理}}=198.11$, $\bar{x}_{\text{未處理}}=161.7$ (第三作者繪製)

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻值變化

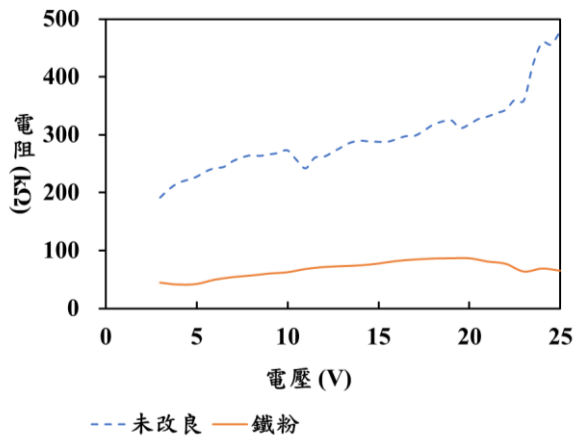


圖61.多頭絨泡黏菌取食Fe後電阻變化

$\bar{x}_{\text{處理}}=68.0$, $\bar{x}_{\text{未處理}}=295.5$ (第二作者繪製)

比較取食Fe後的多頭絨泡黏菌和未經處理的黏菌在不同電壓下的電流變化，我們發現已取食Fe的黏菌在不同電壓下其電流都高於未處理的黏菌，且電阻值小於對照組。因此我們認為Fe可以有效提高多頭絨泡黏菌電線的通過電流，並降低電阻值。

十、 測量黏菌內細胞質流動速度
影響黏菌細胞質流動速度的因素

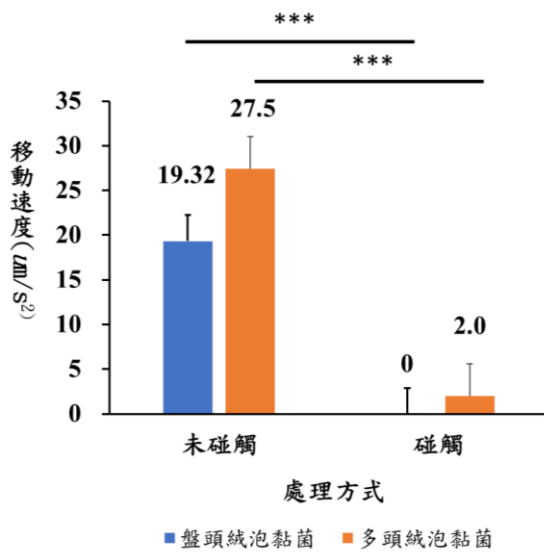


圖62.影響黏菌細胞質流速度的因素
(第三作者繪製)

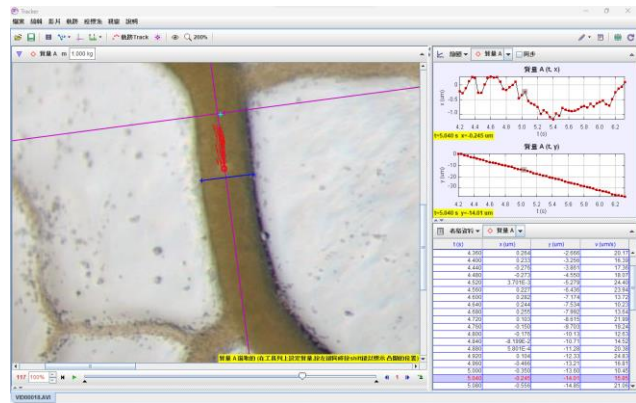


圖63.利用tracker進行影像分析
(第三作者繪製)

在複式顯微鏡下，我們觀察到黏菌有明顯的細胞質流現象，如圖62.，我們想了解外界干擾(如：碰觸)是否會影響黏菌電線，因此我們利用tracker分析觸碰前、後黏菌體內細胞質流速變化，如圖63.，結果發現觸碰會導致兩種黏菌體內細胞質流速降低，利用t檢定後顯示其結果兩者具有顯著差異 ($p < 0.01$)。多頭絨泡黏菌 $SD=2.9$ ；盤頭絨泡黏菌 $SD=3.61$ 。

十一、 黏菌電線的並聯與串聯

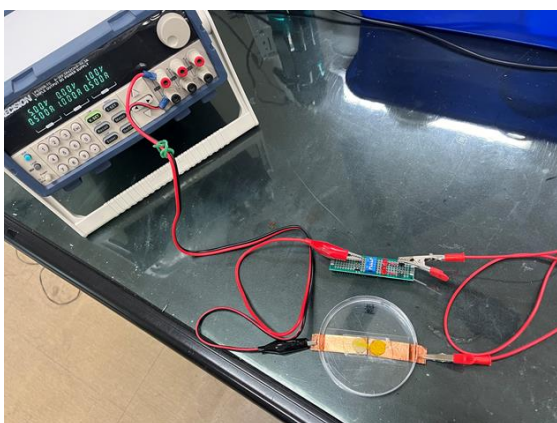


圖64.盤頭絨泡黏菌電線串聯LED
(第一作者拍攝)

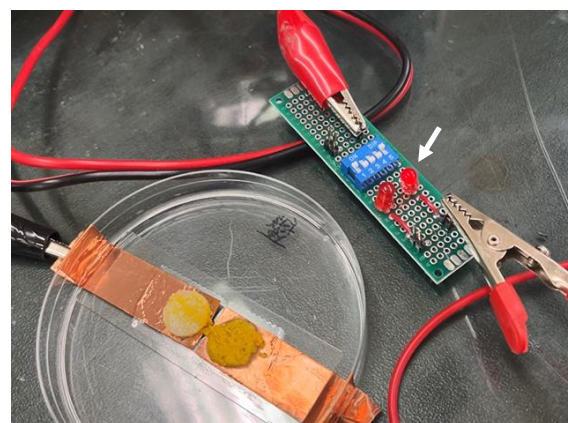


圖65.盤頭絨泡黏菌電線串聯LED
(第一作者拍攝)

將兩種黏菌培養在電線裝置上，等待黏菌連結銅箔兩側後以串聯方式連接5V LED及電源供應器，圖65.顯示LED燈可以正常發光，證明黏菌電線可以串聯於電路之中。

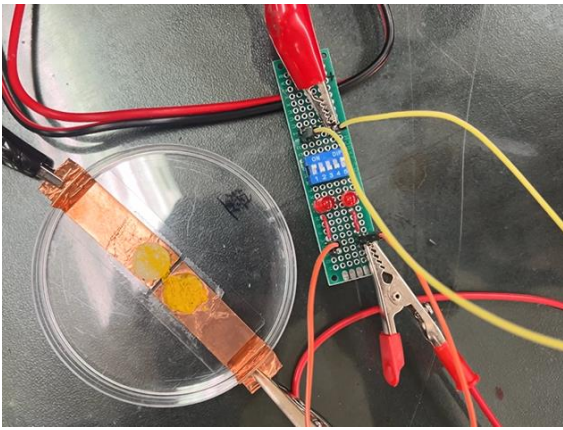


圖66.盤頭絨泡黏菌電線並聯LED

(第一作者拍攝)

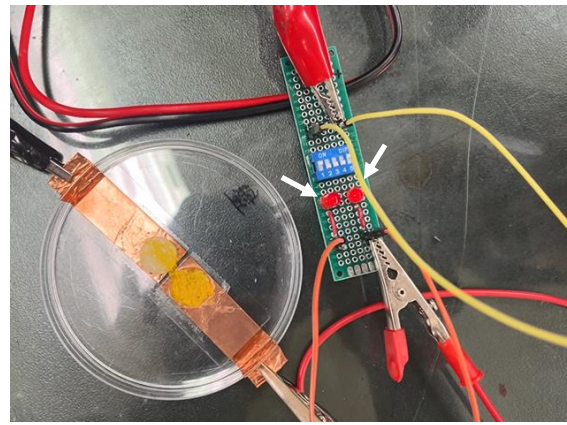


圖67.盤頭絨泡黏菌電線並聯LED

(第一作者拍攝)

以杜邦線將電路板兩側LED相連形成並聯，且與電源供應器及黏菌電線裝置相連，如圖67。待啟動開關後可以發現兩側LED燈可以點亮，故證實黏菌電線可以用於並聯。

十二、黏菌電線應用於溫度感測

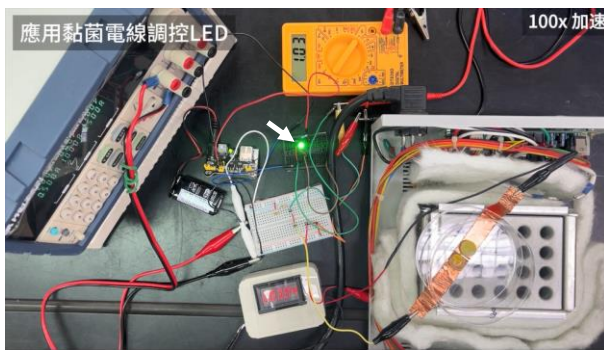


圖68.盤頭絨泡黏菌電線並聯LED

(第一作者拍攝)

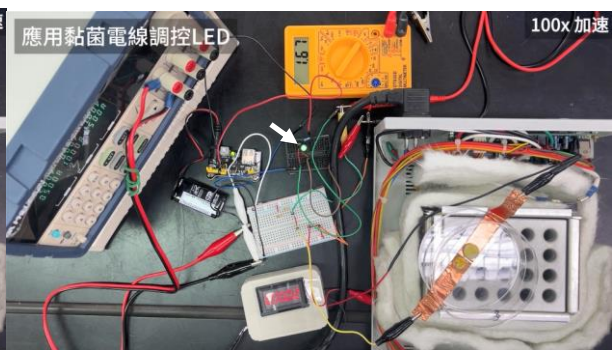


圖69.盤頭絨泡黏菌電線並聯LED

(第一作者拍攝)

圖68.為溫度感測裝置，結果顯示，黏菌電線尚未加熱前，其電流為 $3.94\mu\text{m}$ ，利用乾浴槽加熱後，如圖69，其電流量為 $0.02\mu\text{m}$ ，電阻值較未加熱前高。經分壓電路後，輸出較低的電壓，使LED燈泡變暗(箭頭所指處)。

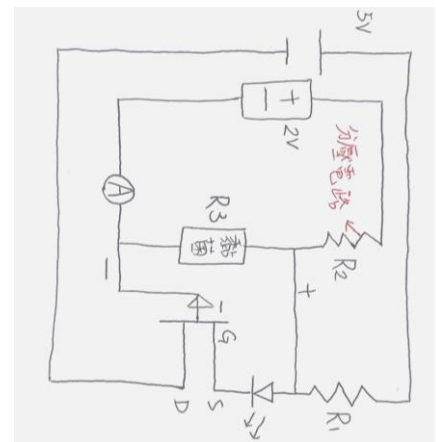


圖70.電路設計圖

(第一作者繪製)

伍、討論

一、黏菌電線伏安特性曲線與其他元件的比較

將導體施以不同電壓並檢測其電流，此繪製出來的圖表即為伏安特性曲線，這種曲線常被用來研究導體電阻的變化規律，是物理學常用的圖像法之一。

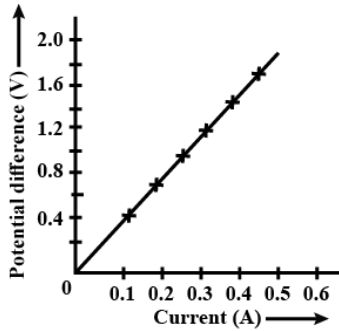


圖71.歐姆導體伏安特性曲線圖

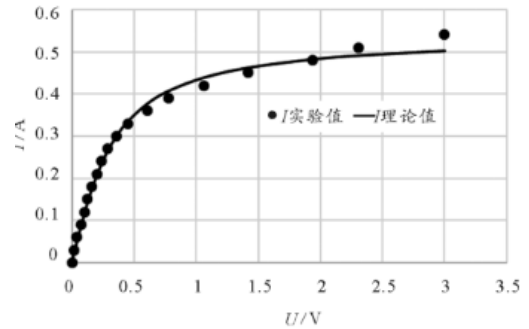


圖72.燈泡伏安特性曲線圖

圖73.引用 維基百科(英文)

圖74.引用 陳日繁 (2020) 小燈泡伏安特性曲線形狀產生原因的探討。物理通報

圖71.為符合歐姆定律的導體伏安特性曲線，斜率的倒數為電阻值，其電阻為一個穩定值。圖72.為白熱燈炮的伏安特性曲線，雖然電流與電壓仍然為正相關，但是電阻值並非一個固定數值，本實驗在檢驗多頭絨泡黏菌及盤頭絨泡黏菌的伏安特性曲線並非直線而是較為接近白熱燈炮的伏安特性曲線。

二、黏菌電線在不同條件下會改變電阻類似於可變電阻。

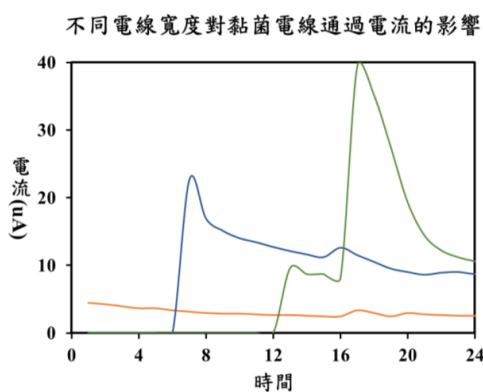


圖73.電線寬度對黏菌電線的影響

(第一作者繪製)

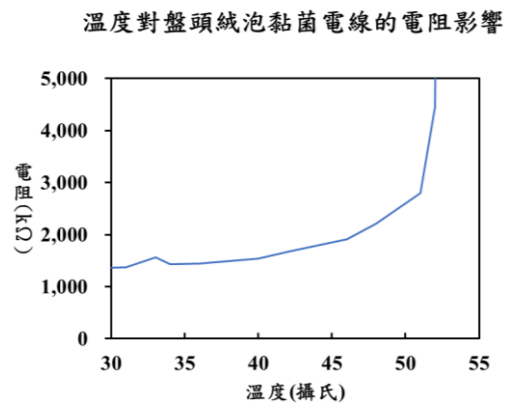


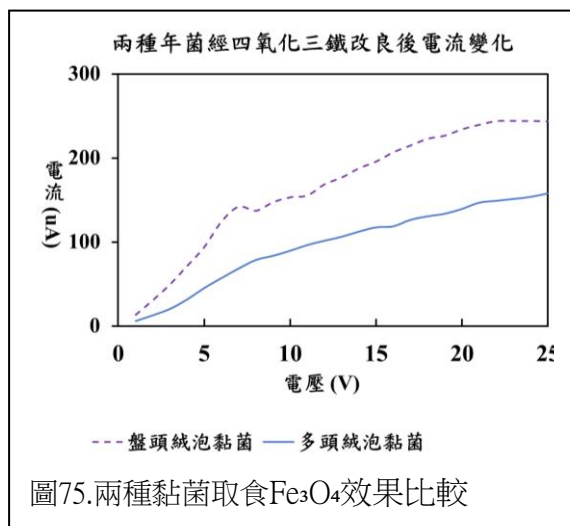
圖74.溫度對盤頭絨泡黏菌電線的影響

(第一作者繪製)

從圖74.中，我們計算出盤頭絨泡黏菌電線的電阻並非固定值，屬於非歐姆式導體，如燈泡、半導體以及二極體等，且黏菌電線的電流、電阻會受到環境因素影

響，如：溫度，因此黏菌電線本身屬於一種可變電阻。可變電阻一般應用於需要調節電路電流或改變電阻值的場合，黏菌電線也可以偵測環境條件，自行改變電阻，或是藉由改變電壓、溫度、餵食的食物等來達到調整電阻值的效果。

三、 不同處理方式對黏菌電線電流的影響



從圖75.中發現，盤頭絨泡黏菌與多頭絨泡黏菌在取食Fe₃O₄後，其電流量較多頭絨泡黏菌佳。此外，圖56.中顯示取食Fe的盤頭絨泡黏菌適合於低電壓的環境下使用（15V以下），而經過相同方法處理後的多頭絨泡黏菌則適合在相對較高的電壓環境中使用（23V以上）。最後，我們以平均值進行比較，綜合來說盤頭絨泡黏菌取食Fe₃O₄的效果較好，多頭絨泡黏菌則是在取食Fe後效果較好。

四、 細胞質流的運輸方向

我們發現黏菌細胞質流都有一定的流動方向並且每過一段時間就會往反方向流動，且當遇到Y字路口時大顆粒都會和小顆粒往不同的方向流動，但是如果觸碰了大顆粒的流動方向後，則大粒子就會往小顆粒的流動方向繼續流動。如果是單純一條的話切斷後就會完全停止，後面的部分會往反方向流動。未來可以就細胞質流動速度及方向探討對於黏菌生理或是對於導電特性的影響。

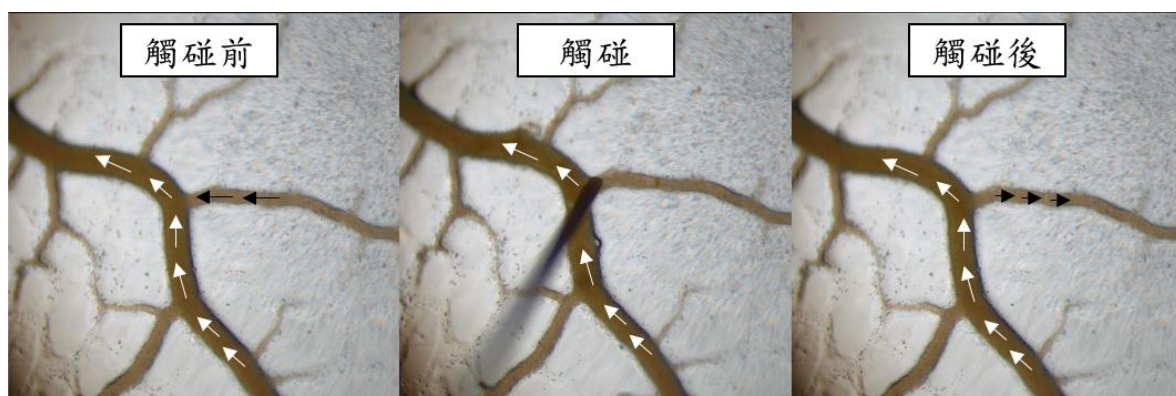


圖76.黏菌體內細胞質流方向 (第三作者拍攝)

五、黏菌電線必須克服的問題及其應用

黏菌電線跟一般電線相比，不管是放置的環境的光線、濕度、溫度等，甚至餵食的食物及連接電路時的電壓都會對黏菌電線造成影響，且因為電阻較高所以通過的電流比較小，不適合使用在高功率的儀器之上，但我們認為黏菌電線的應用並非取代現有的電線，而是可以將黏菌電線應用在特別的需求上，例如：利用黏菌改變電阻的特性來調控電器作為生物保險絲，或是將黏菌作為一種生物感測器。在本研究中的溫度感測器上，我們利用黏菌的特性並連結界面場效電晶體（JFET）來調控LED的明暗，但JFET是利用來自閘極的電壓控制漏極與源極之間的耗盡層，因此必須將黏菌電阻可變的特性與電壓結合，我們的解決方案是使用分壓電路的設計，如圖76。根據分壓公式：輸出電壓= $R2/(R1+R2) \times$ 輸入電壓，當黏菌電阻提升時，輸出電壓也會提高藉此夾斷漏極與源極的電流，造成LED熄滅。

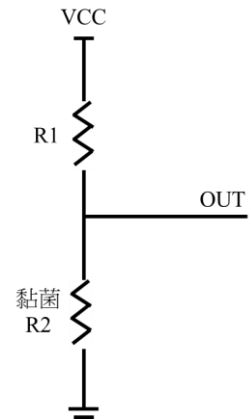


圖77.分壓電路（第一作者整理）

六、改良黏菌電流檢測裝置

黏菌雖然可以施以高達50V的電壓進行實驗，但是其通過的電流相對微弱，我們曾嘗試以三用電表進行量測，但由於通過電流接近10uA因此我們改用可量測1uA的微安培計進行量測。此外，我們發現洋菜膠體本身會導電，因此若直接將三用電錶放於洋菜膠體上測量黏菌電阻，其結果會受到洋菜膠體干擾，於是我們將檢測裝置進一步改良，移除裝置底部的洋菜膠體，改為不導電的玻璃載玻片，並於載玻片上方貼上銅膠帶作為電極，在電極的兩側分別放置黏菌以及麥片膠體，這樣一來便可以改善膠體對實驗數據的影響。

七、本研究的貢獻與前人研究的差異性

	前人研究	本研究貢獻
關於黏菌作為電線之電阻	無研究	本研究驗證黏菌電線屬於非歐姆式導體
黏菌電線連結寬度對於通過電流的影響	無研究	當連結寬度變大，黏菌電線通過電流變大且電阻值越小

	前人研究	本研究貢獻
影響黏菌電線電阻的因素	無研究	探討環境溫度、取食物質對黏菌電線影響
黏菌電線電流測量裝置	將黏菌直接培養於洋菜膠上導電進行檢測	將銅片作為電極使用，避免膠體干擾
奈米鐵對黏菌電線的影響	僅討論黏菌對鐵粉的偏好，並未探討對黏菌的影響	Fe ₃ O ₄ 和Fe能增加黏菌電線的通過電流
黏菌體內細胞質流動	無研究	利用Tracker計算黏菌體內細胞質流動速度，並探討影響其流動速度的因素

表5. 前人研究與本研究貢獻比較表（第一作者整理）

陸、結論

- 一、 黏菌電壓提升其電流也會上升，兩者呈正相關，且電阻並非定值為一種非歐姆導體
- 二、 黏菌連接處愈寬，通過的電流量愈大且電阻值愈小，但連接處越寬，連結時間越長
- 三、 溫度會影響黏菌電線的電流及電阻，當溫度愈高其電阻值就愈大
- 四、 黏菌取食Fe及Fe₃O₄ 在12hr顏色發生改變，Fe造成黏菌接近褐色；Fe₃O₄則為墨綠色
- 五、 Fe及Fe₃O₄可以降低多頭絨泡黏菌及盤頭絨泡黏菌的電阻，及增加通過電流
- 六、 盤頭絨泡黏菌其細胞質流動速度約為每秒19um，且流動速度會受到外力觸碰影響
- 七、 黏菌電線可應用於電路中的串聯及並聯，且可以利用其特性調控電器

柒、未來展望

我們探討了Fe₃O₄與Fe對黏菌電線的影響，而未來我們也會嘗試使用金、銀、銅等金屬粉末進行實驗，此外黏菌具有自我修復的能力，這意味著它們可以在特定條件下彼此連接，這種自組裝特性可以應用於製造微小的電子元件或電路，在微型化電路方面有其應用價值。在研究中我們也發現，黏菌能作為溫度感測裝置，可以隨環境溫度改變，其調控LED燈的亮度，未來我們可以將這個特性運用在培養箱或是電風扇等電器上，進而利用溫度調控電器。

捌、參考文獻資料

一、外語文獻

- (一) Andrew Adamatzky (2013).Physarum wires: self-growing self-repairing smart wires made from slime mould .*UNCONVENTIONAL COMPUTING CENTRE, UNIVERSITY OF THE WEST OF ENGLAND, BRISTOL, BS16 1QY, UNITED KINGDOM*
- (二) Jasmine Lu and Pedro Lopes (2022).Integrating Living Organisms in Devices to Implement Care-based Interactions.*UIST ' 22, October 29 - November 02, 2022, Bend, OR, USA*
- (三) Nina Gizziea, Richard Maynea, Shlomo Yitzchaikb, Muhamad Ikbalb, Andrew, Adamatzky (2015).Living Wires — Effects of Size and Coating of Gold Nanoparticles in Altering the Electrical Properties of Physarum polycephalum and Lettuce Seedlings.*Unconventional Computing Group, University of the West of England, Bristol, UK bInstitute of Chemistry, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, Israel*
- (四) *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*
- (五) Yen Pin Yew , Kamyar Shameli , Mikio Miyake , Nurul Bahiyah Bt Ahmad Khairudin , Shaza Eva Bt Mohamad, Takeru Naiki , Kar Xin Lee (2020) Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe₃O₄ nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system: A review.*Arabian Journal of Chemistry* Volume 13, Issue 1, January 2020, Pages 2287-2308

二、中文文獻

- (一) 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：聯黏有愉—探討多頭絨泡黏菌特性及其應用
- (二) 陳睿泓、林映辰、黃柏誠 (民112)。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
- (三) 吳長佑、劉鎮瑋 (民112)。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

【評語】 030319

本研究探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線的潛力，利用自製電流檢測裝置進行實驗，結果顯示黏菌電線具有可變電阻特性，且可應用於生物感測器中。

1. 研究主題

探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線的可行性，對於了解黏菌的生物電特性和潛在應用具有意義。

2. 創意、學術或實用價值

此研究具有創新性，探討黏菌作為電線的潛力，同時展示在生物感測器中的應用可能性。對於生物電學和生物技術的研究具有學術價值和轉換後之實用價值。

3. 科學方法之適切性

使用自製的電流檢測裝置進行實驗，同時進行量測數據收集和分析，然而，量測的重複數和相關統計分析較不足，應加強。

討論部分為實驗結果的延伸，較缺乏相關前人研究的比較。建議引用更多相關文獻，以增加討論的深度和廣度。此研究較缺乏長期觀察和多次重複實驗，結果的穩定性和可重複性尚待驗證。

作品簡報



探討盤頭絨泡黏菌作為黏菌電線

(*Physarum wires*)的特性

前言

黏菌是屬於原生生物界中原生菌類的一種多核單細胞生物，吳、劉(2022)發現鐵粉對多頭絨泡黏菌具有吸引力，然而並無深入了解鐵粉會對黏菌的導電性產生何種影響，也不清楚黏菌電線的電阻與電流變化，本研究將改進研究裝置，能進行影響監測及長時間紀錄電流變化量，並重新設計測量電阻、電流的實驗裝置，並利用粒徑大小為4nm的 Fe_3O_4 及Fe餵食黏菌及測量餵食後的電流、電阻變化。

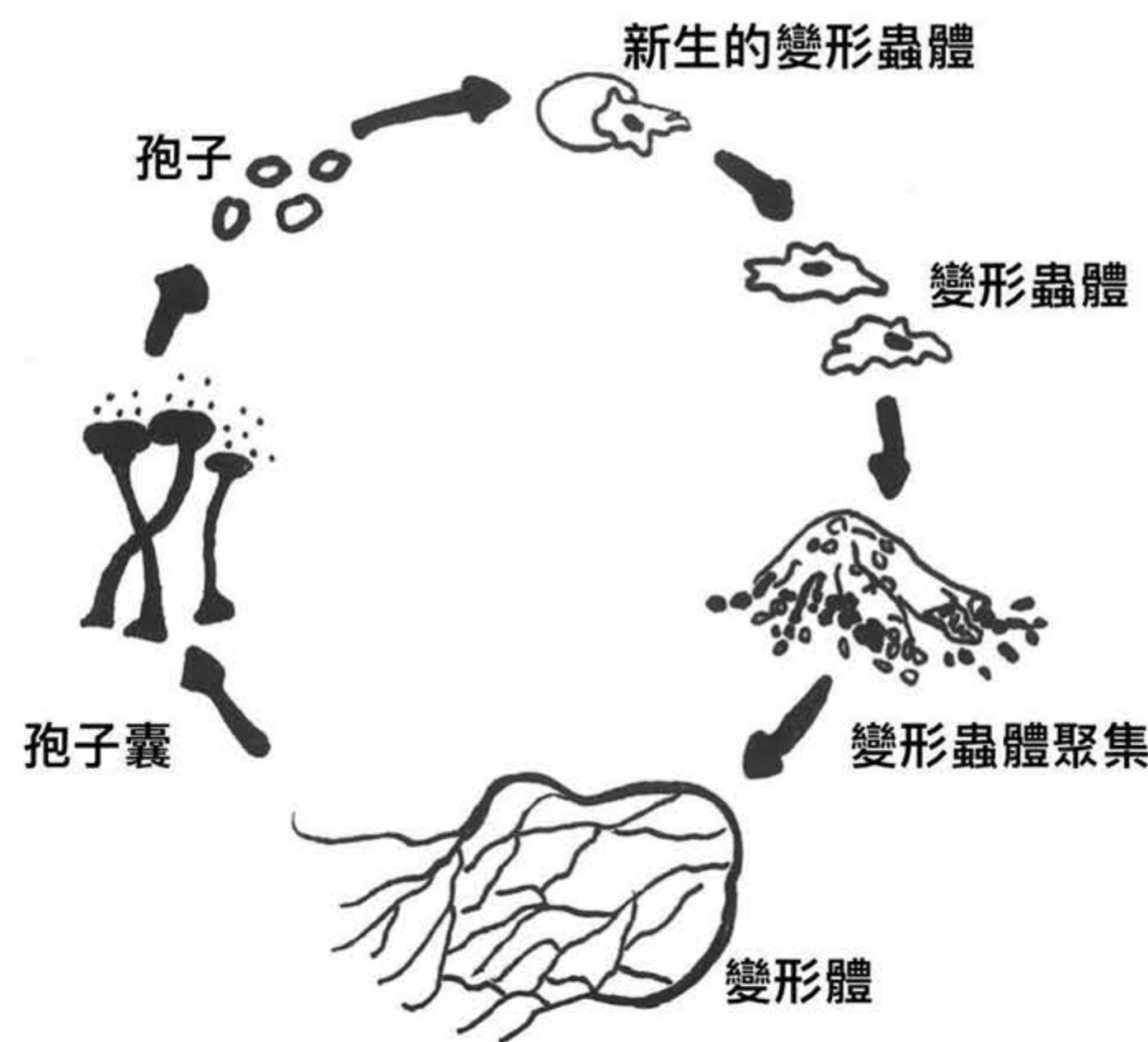


圖1.黏菌生命史 第一作者繪製

研究器材及方法

一、研究器材

Raspberry Pi 4、實物攝影機、Bambu Lab P1P、單晶片NodeMCU、微電流計、電源供應器

二、研究方法

(一) 黏菌採集

盤頭絨泡黏菌採集自2023校園中落葉堆肥區，多頭絨泡黏菌是與他校老師交流獲得(採集自松鶴部落)。

(二) 繼代培養

每次取1/4放置在培養基上並放置麥片，培養在恆溫培養箱。



圖3.盤頭絨泡黏菌



圖4.恆溫培養箱 第二作者拍攝

(三) 樹莓派定時拍照系統

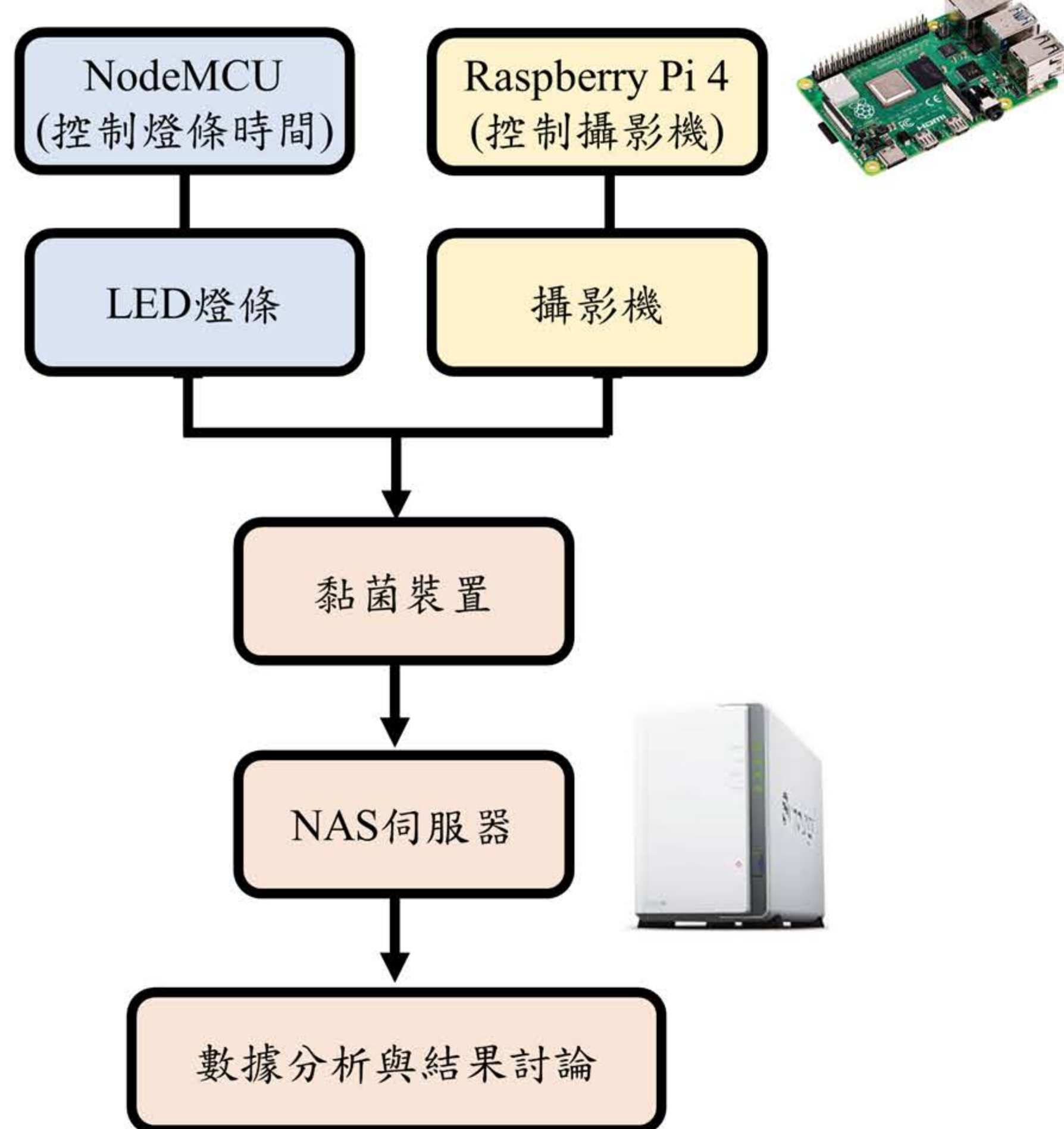


圖3.樹莓派定時拍照系統流程圖 第二作者拍攝

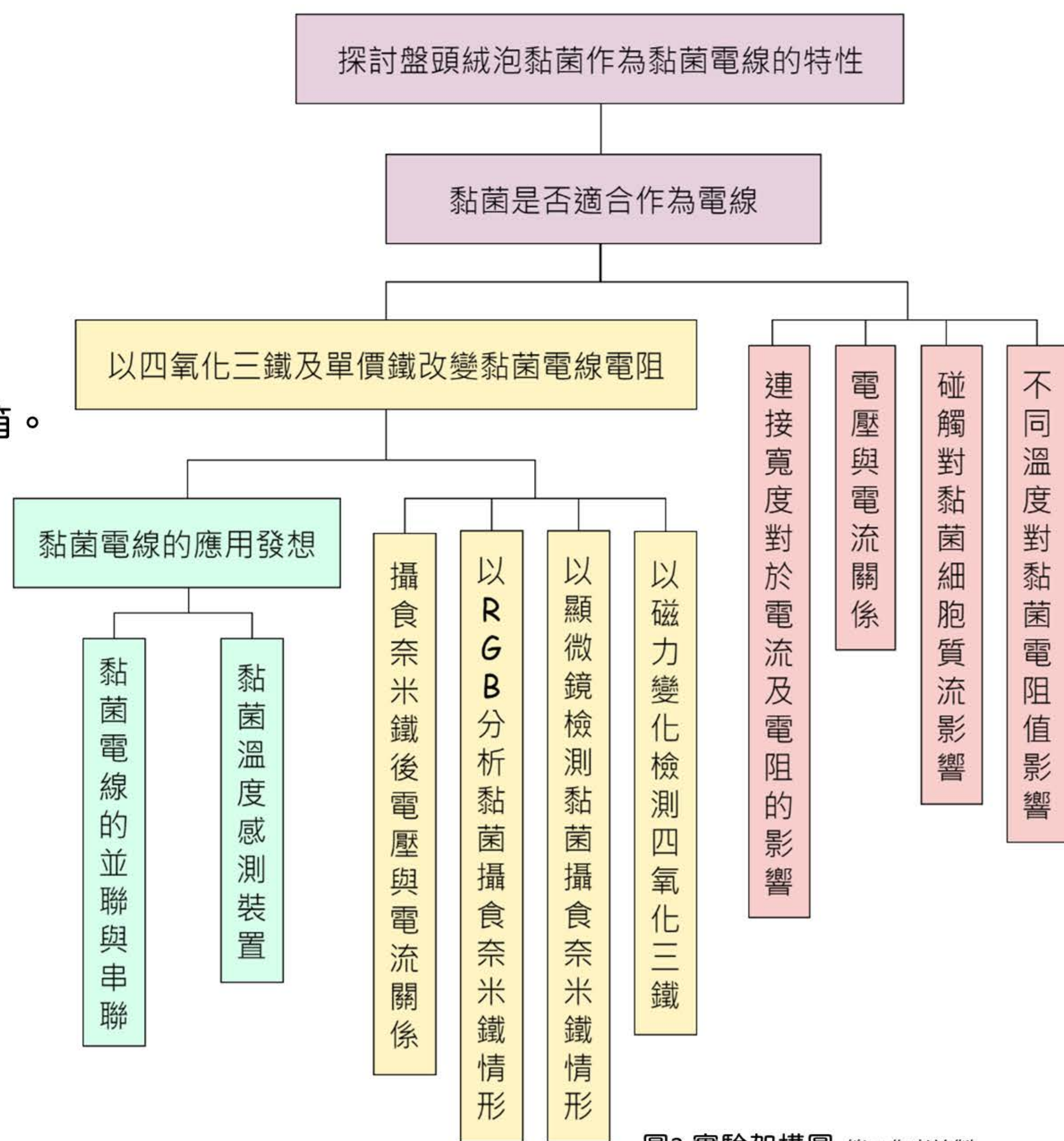


圖2.實驗架構圖 第二作者繪製

實驗三、溫度對黏菌電線電阻的影響

將以連接好的黏菌電線放置於乾浴槽上調整不同溫度，檢測其通過電流的變化。

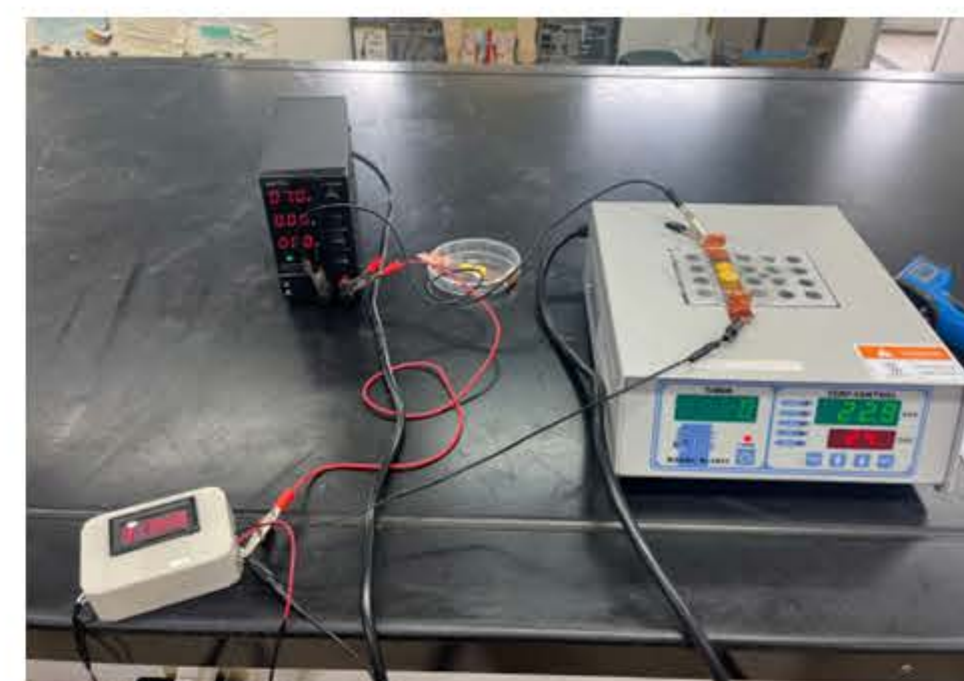


圖8.乾浴槽控溫裝置 第三作者繪製

實驗四、利用 Fe_3O_4 及Fe改良黏菌電線

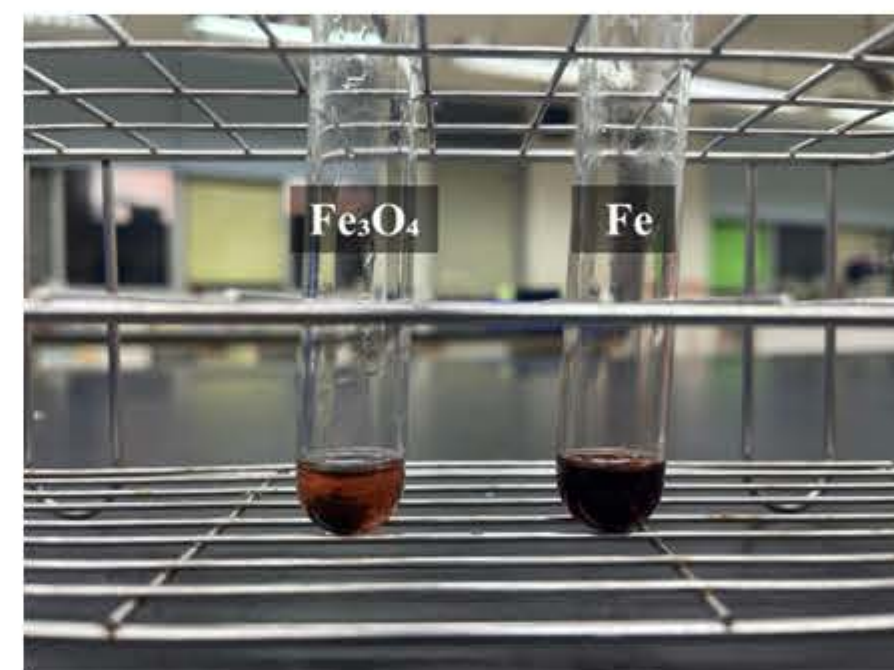


圖9. KSCN檢測三價鐵 第一作者繪製



圖10. 奈米鐵麥片膠體 第一作者繪製

實驗一、檢測黏菌電線的電壓與電流

利用銅膠帶黏貼在絕緣的載玻片上作為電極，並將黏菌培養在銅膠帶上

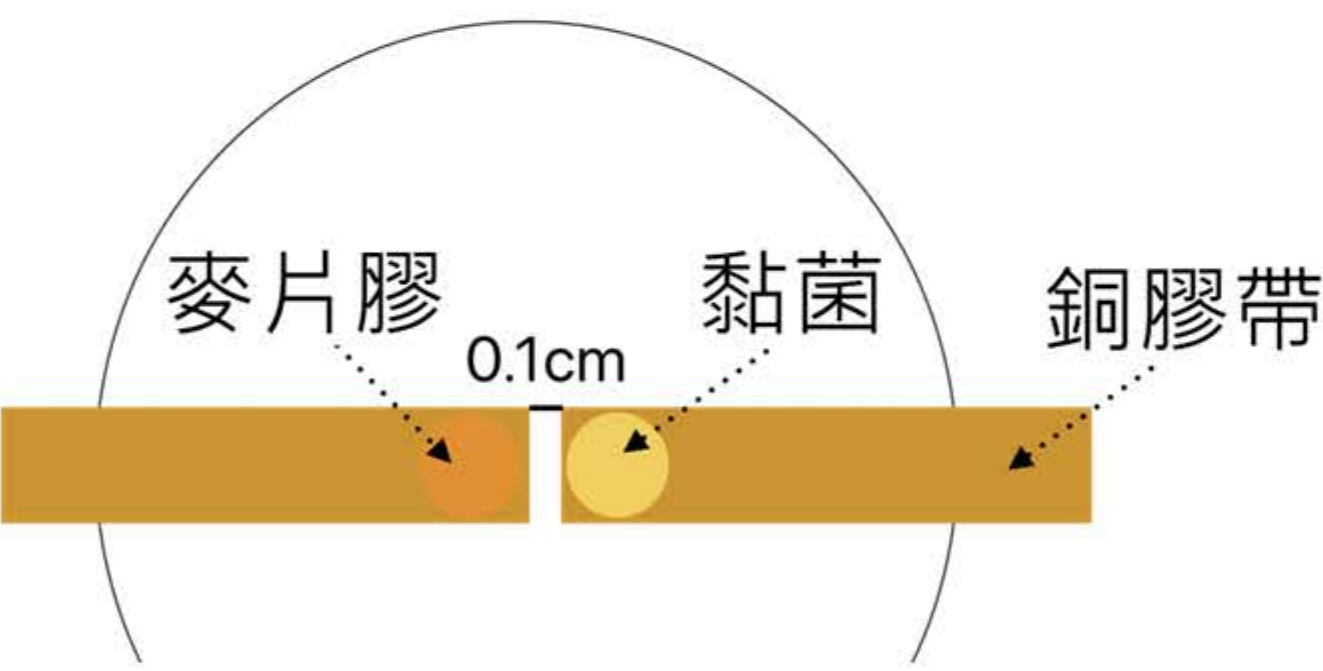


圖4. 黏菌電流檢測裝置 第一作者繪製

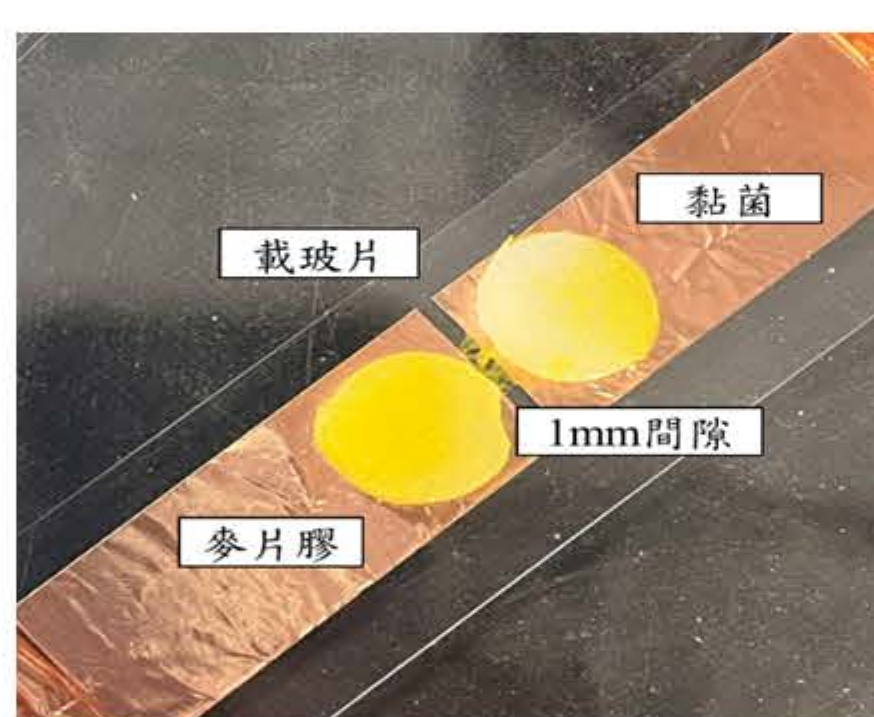


圖5. 黏菌電線 第二作者拍攝

實驗二、連接寬度對黏菌電線電流影響

利用3D建模軟體設計實驗裝置並將黏菌培養在裝置上

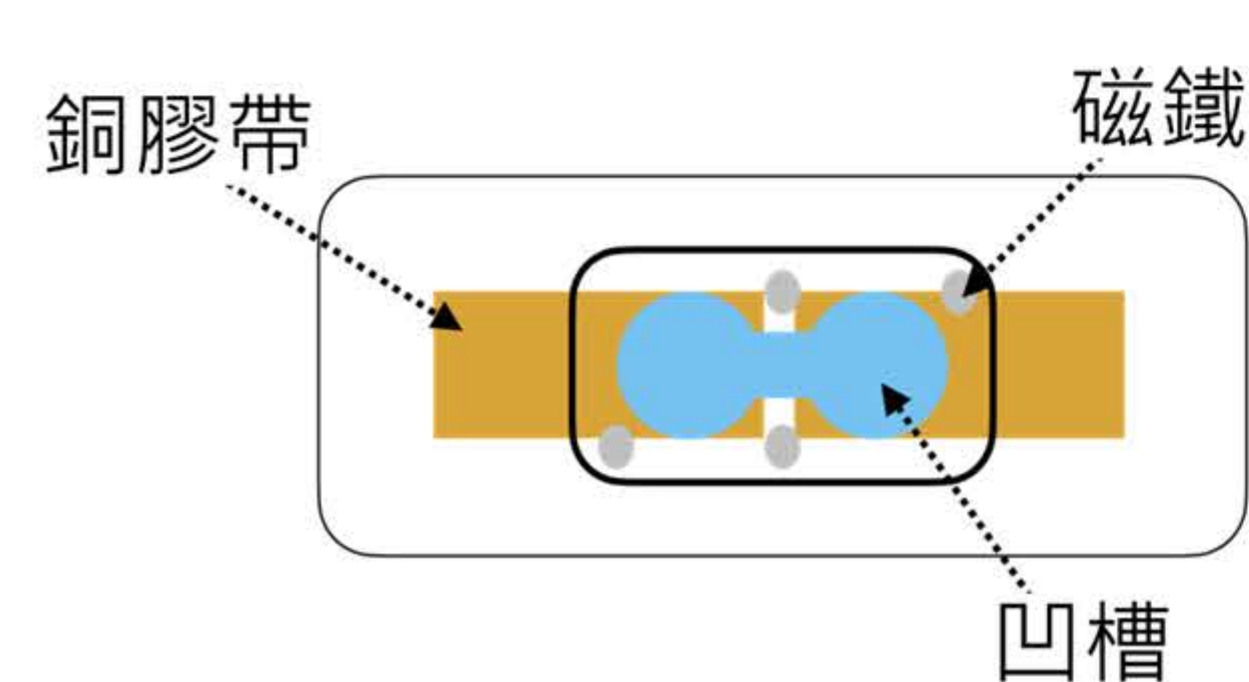


圖6. 黏菌電流檢測裝置 第一作者繪製



圖7. 裝置示意圖 第一作者繪製

實驗五、利用ImageJ以分析黏菌取食奈米鐵情形

利用定時拍照系統將黏菌照片進行分析，並匯出為3D圖形。

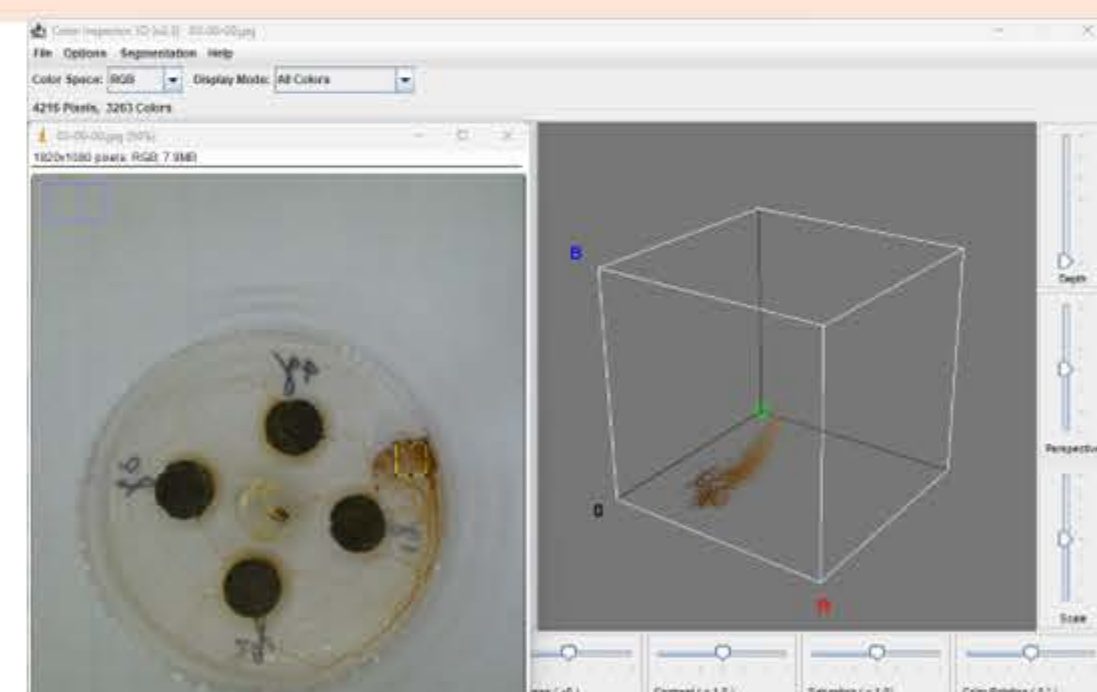


圖11. ImageJ分析示意圖 第三作者拍攝

實驗六、串、並聯裝置與黏菌溫度感測裝置

利用黏菌電線連接LED並控制其亮滅

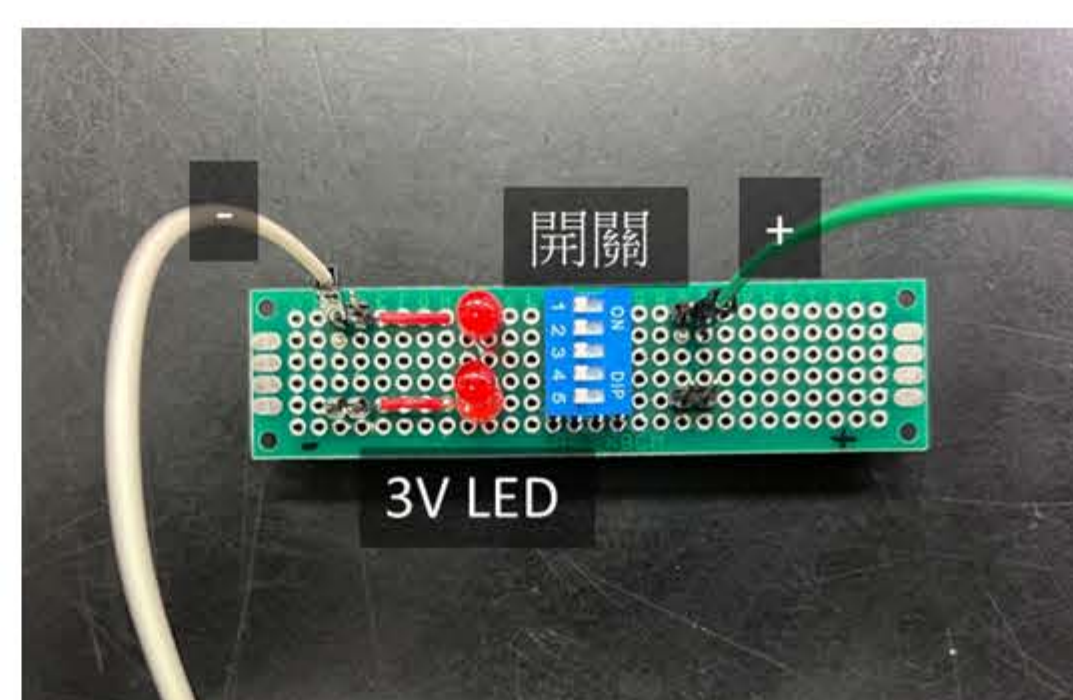


圖12. 黏菌電線串聯及並聯

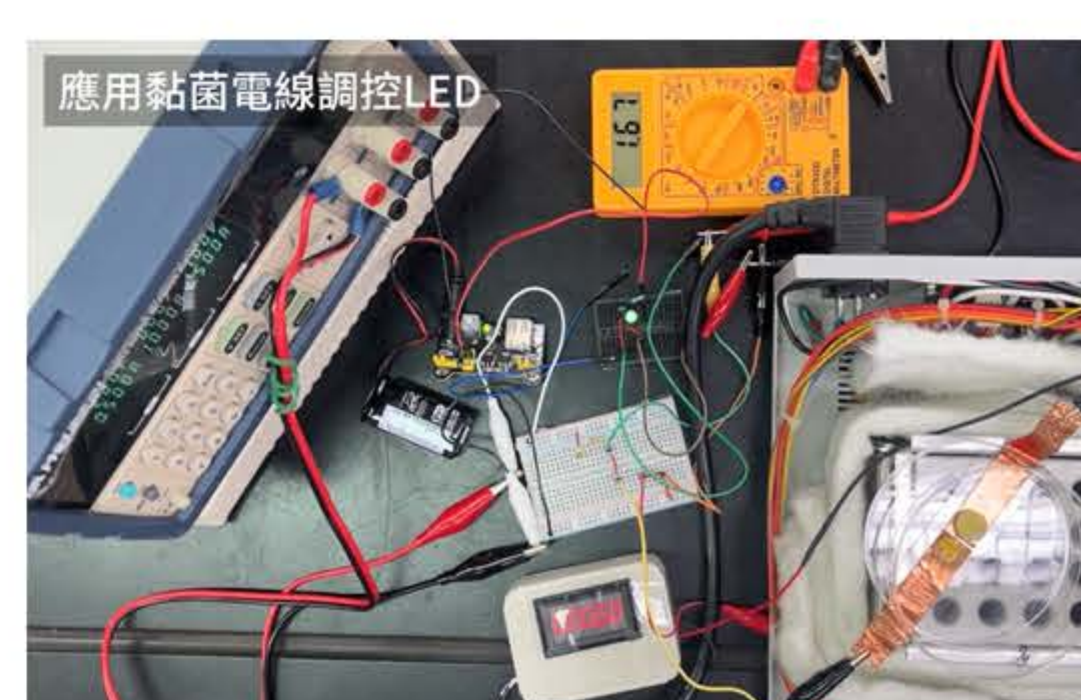


圖13. 黏菌電線感測溫度裝置

實驗結果

一、黏菌電線其電壓與電流之關係

多頭絨泡黏菌電線伏安特性曲線 盤頭絨泡黏菌電線伏安特性曲線

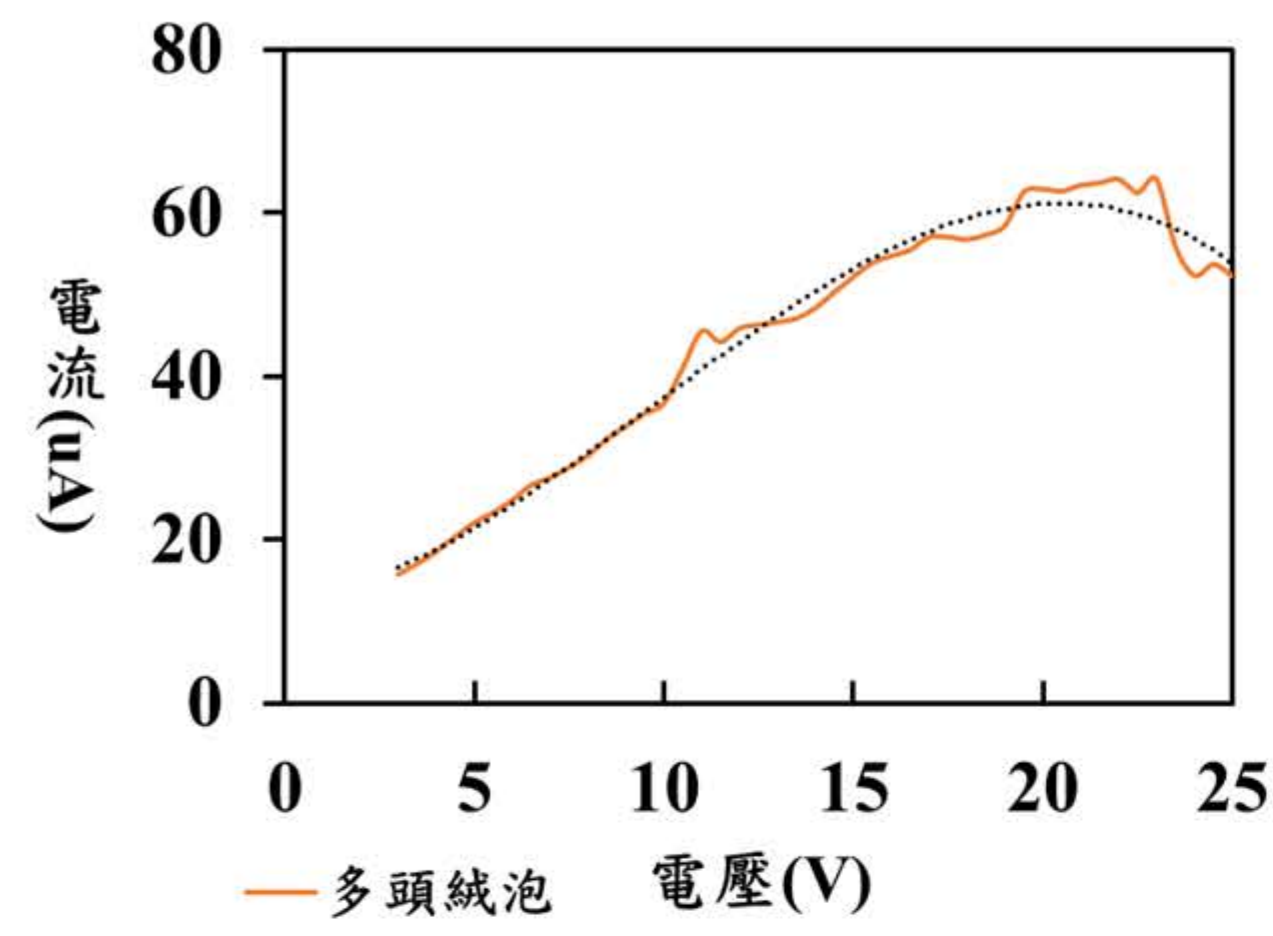


圖14 第三作者繪製
 $y = -0.0099x^3 + 0.2923x^2 + 0.5577x + 12.618$
 $R^2 = 0.9833$

樣本相關係數為0.805，
屬於高度相關

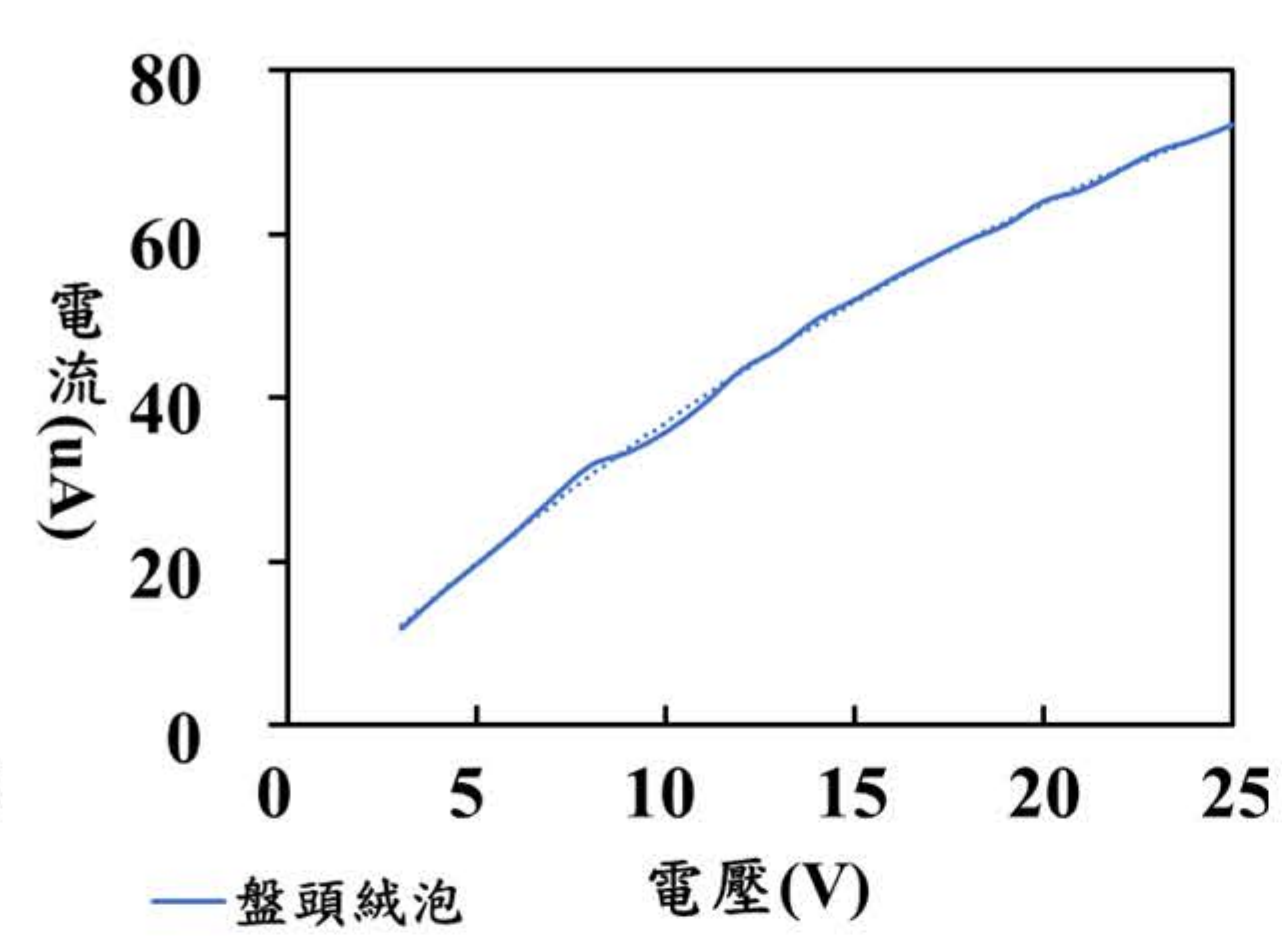


圖15 第三作者繪製
 $y = -0.0518x^2 + 4.2227x + 0.0078$
 $R^2 = 0.9992$

樣本相關係數為0.986，
屬於高度相關

二、溫度對黏菌電線電阻的影響

溫度對多頭絨泡黏菌電線的電阻影響 溫度對盤頭絨泡黏菌電線的電阻影響

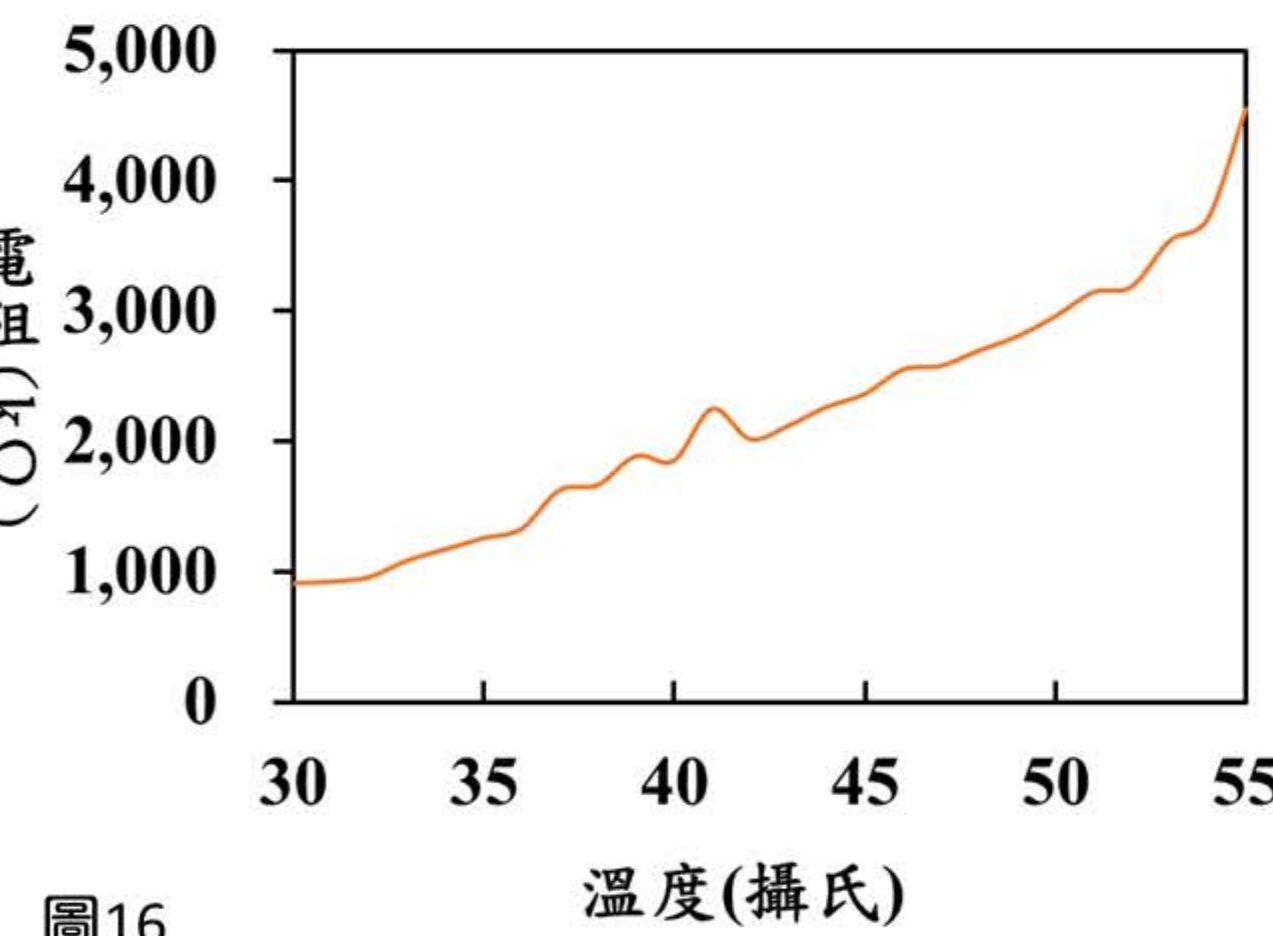


圖16 多頭絨泡

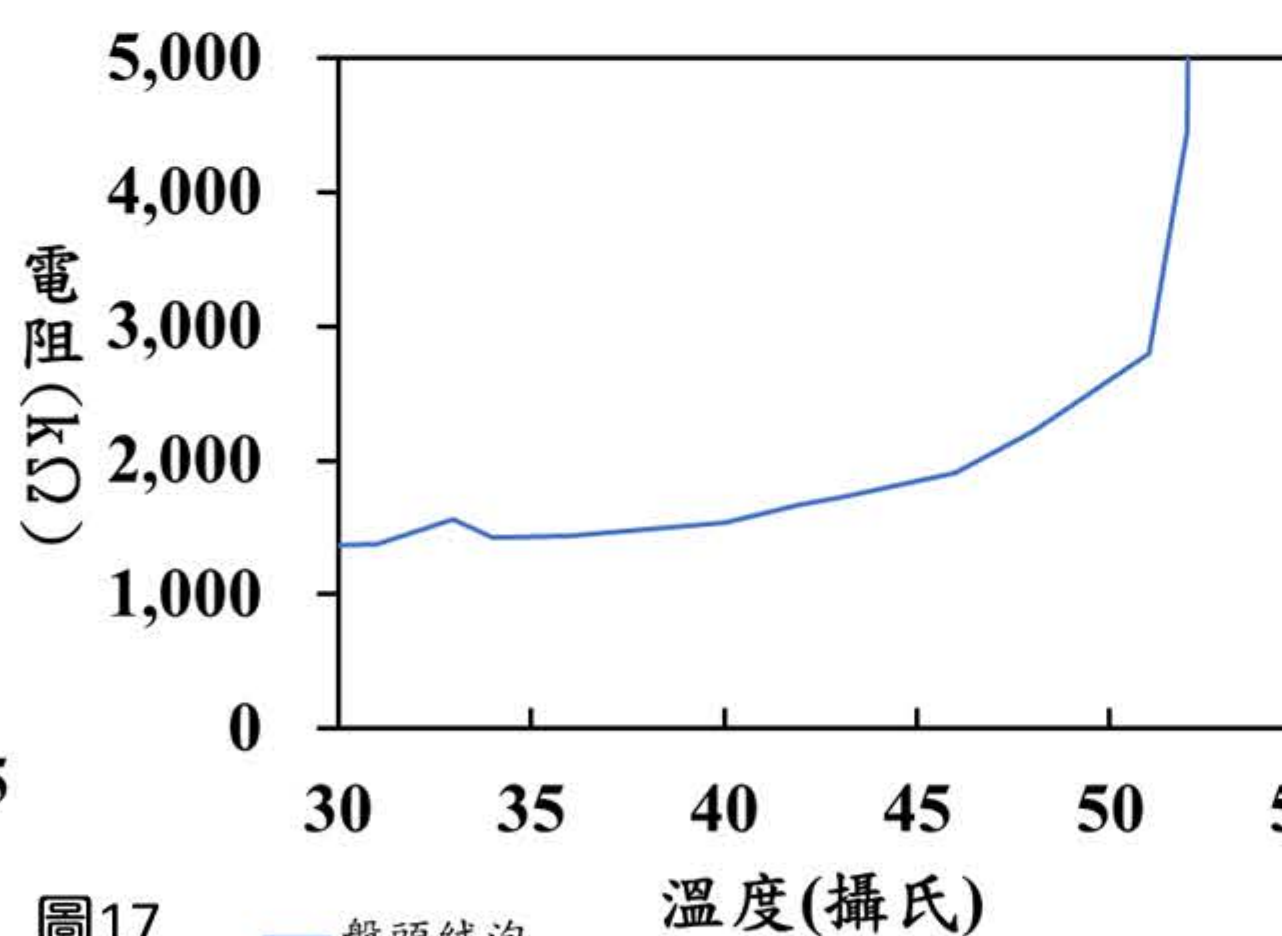


圖17 盤頭絨泡 第三作者繪製

溫度對兩種黏菌電線的電阻影響

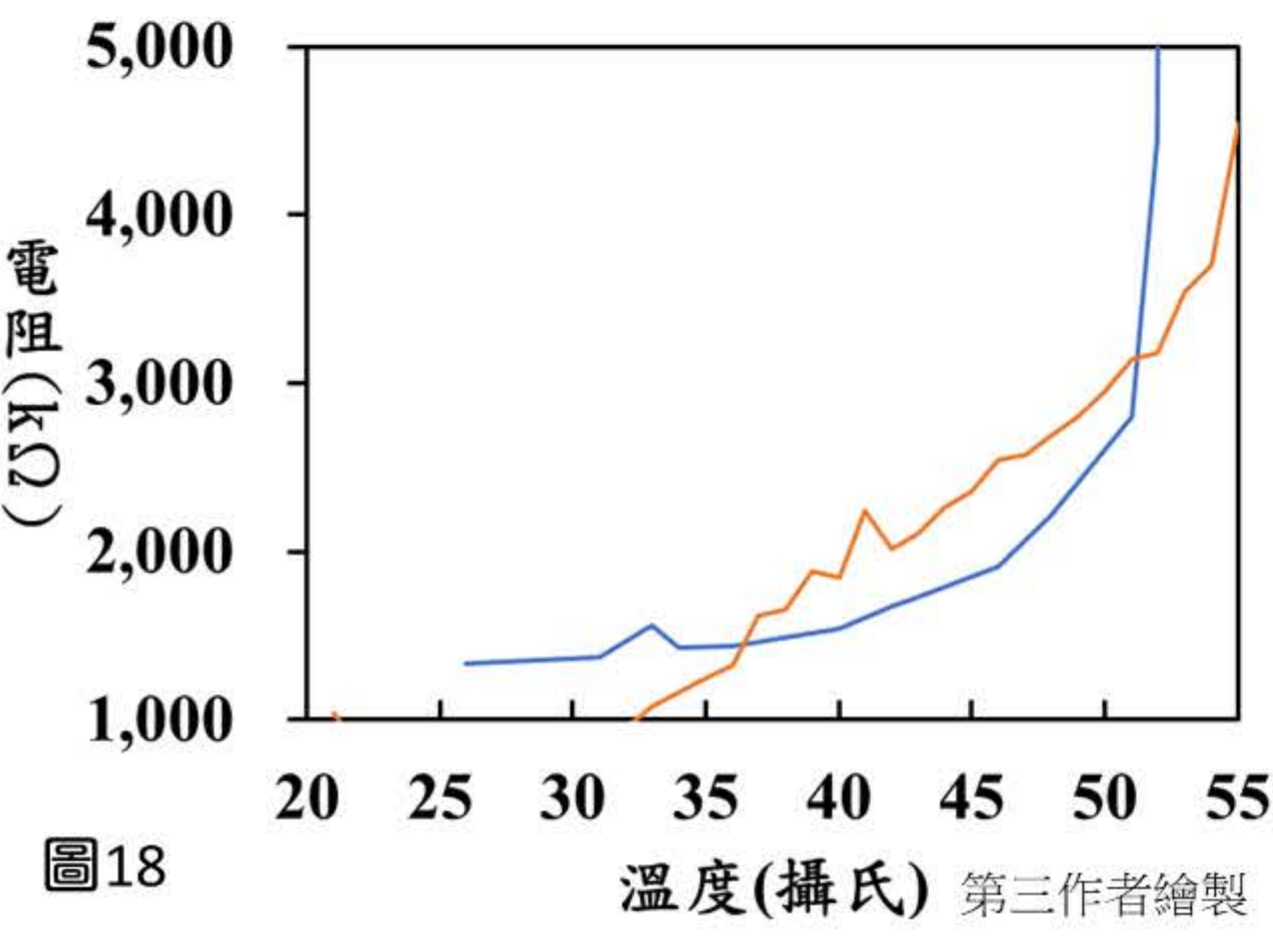


圖18 第三作者繪製

在電壓高於20V時，其通過電流
開始下降且小於盤頭絨泡黏菌。
兩種黏菌伏安特性曲線皆非直線，
意指電阻並非固定值

三、不同連接寬度對黏菌電線通過電流的影響

不同電線寬度對黏菌電線通過電流的影響 不同電線寬度對黏菌電線電阻的影響

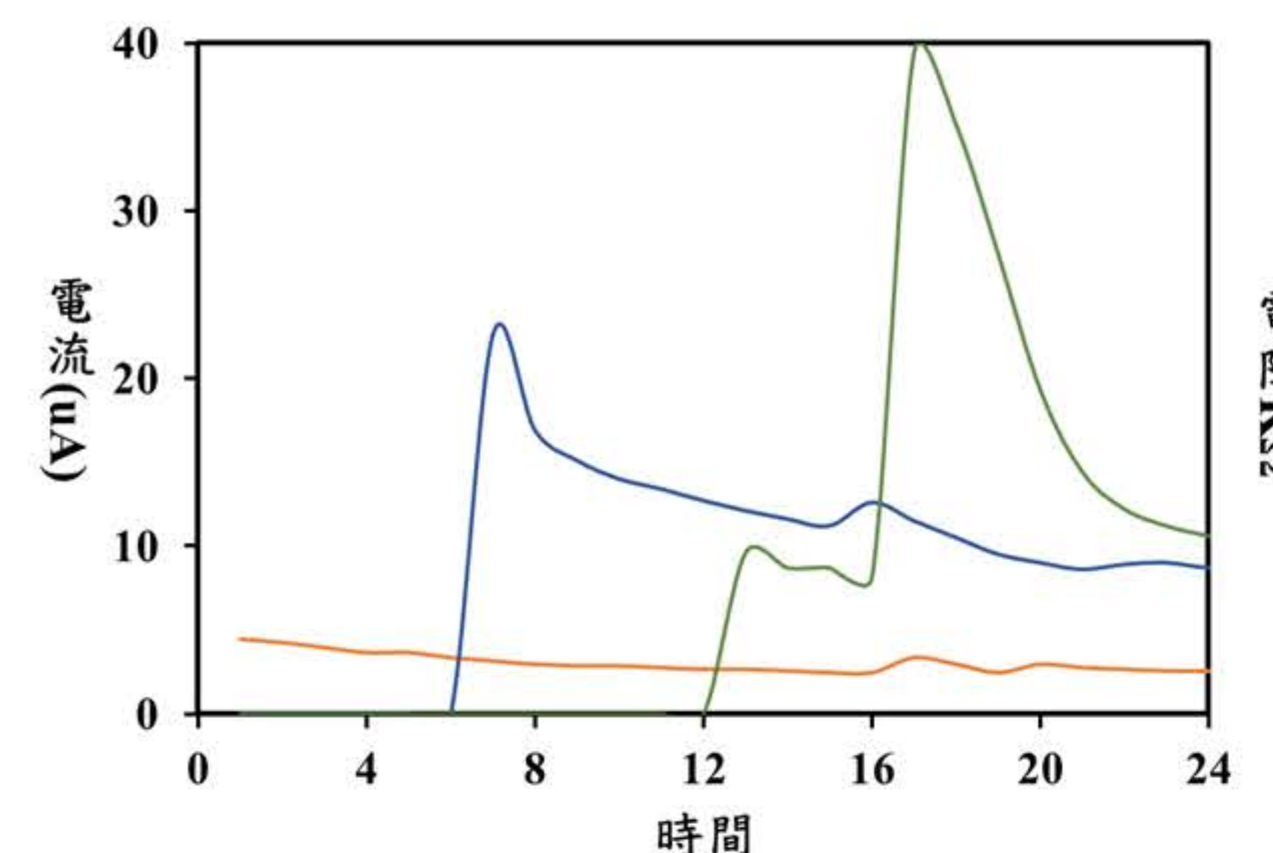


圖19 第一作者繪製

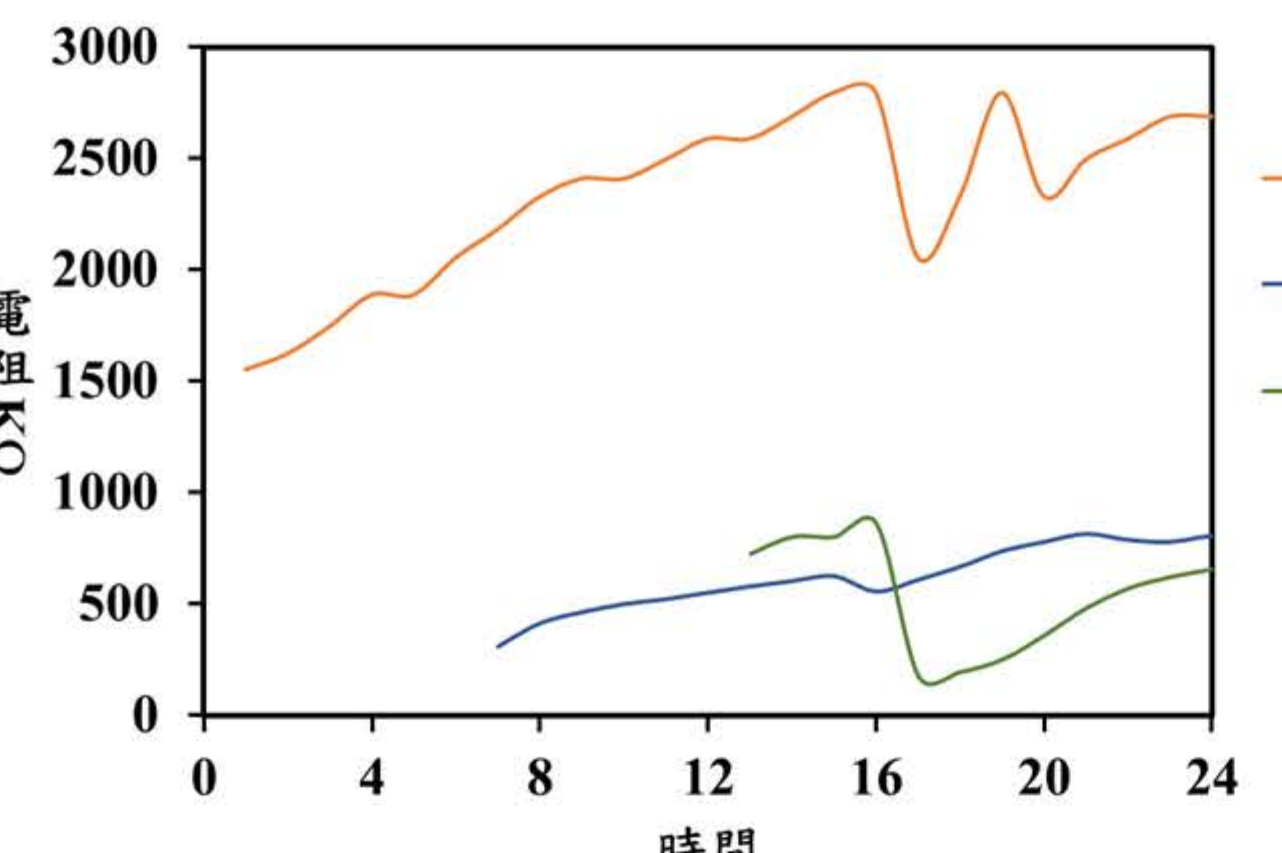


圖20 第一作者繪製

四、以手機磁力計檢測Fe₃O₄及Fe膠體磁場



圖21. Fe₃O₄麥片培養基 第一作者繪製

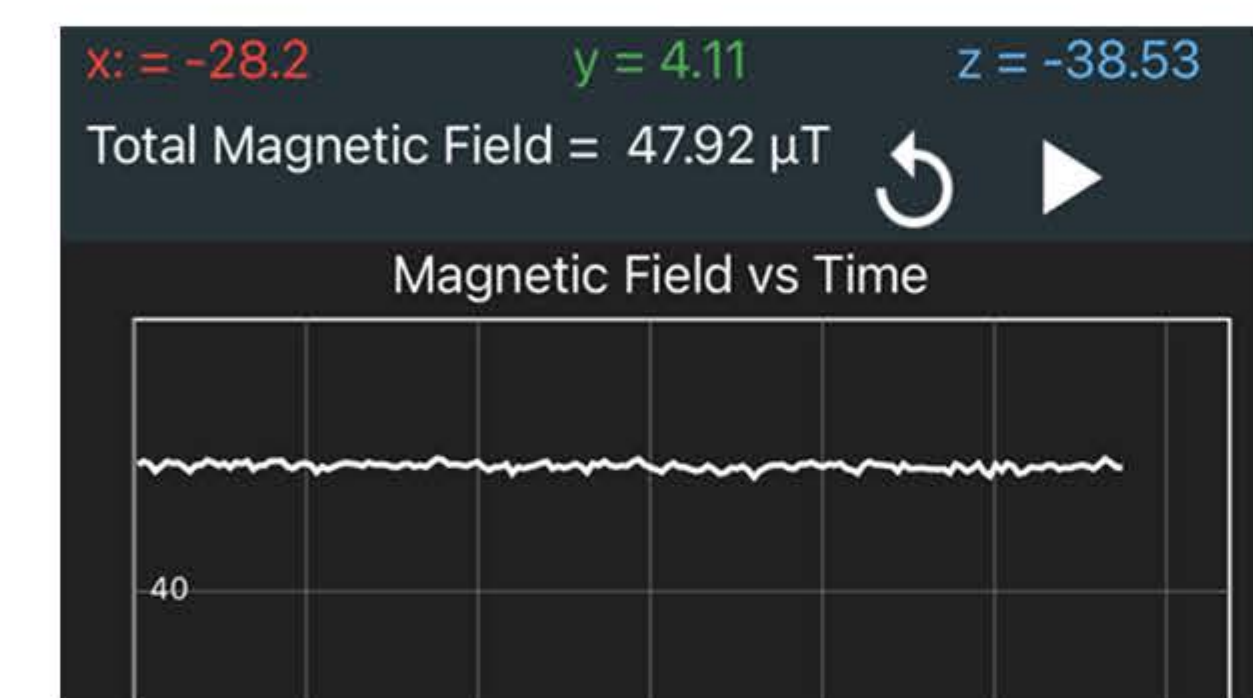


圖22. Fe麥片培養基 第一作者繪製

五、黏菌取食奈米鐵前後顏色變化



圖23 第三作者拍攝

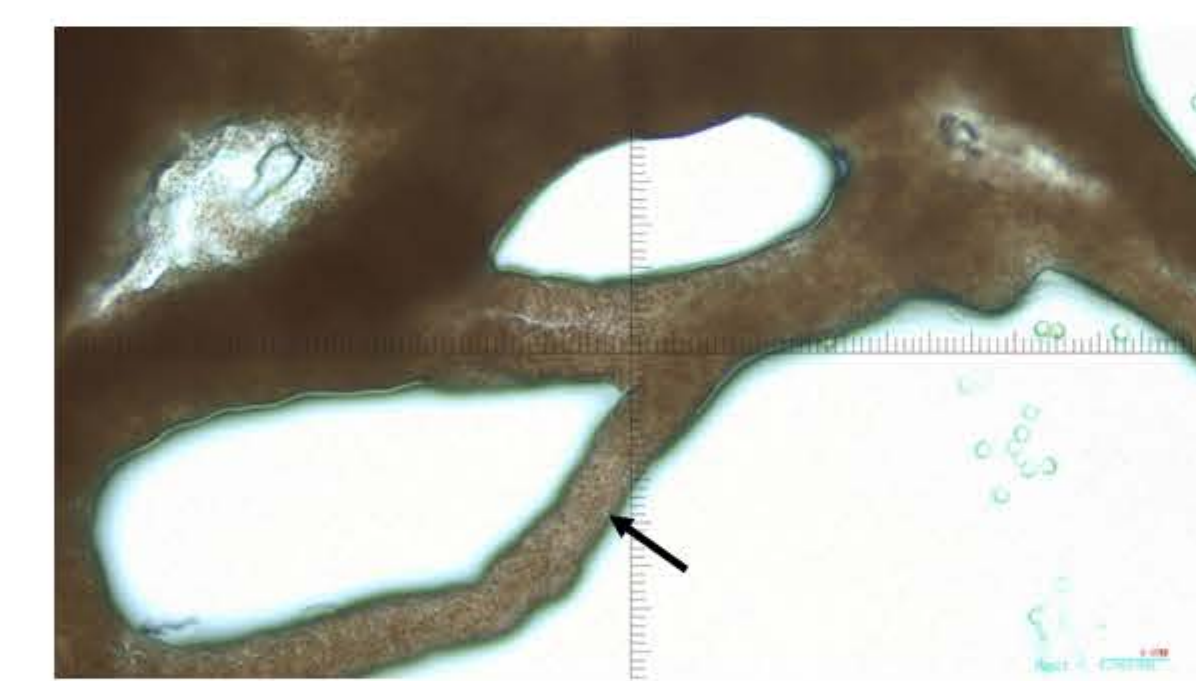


圖24 第三作者拍攝

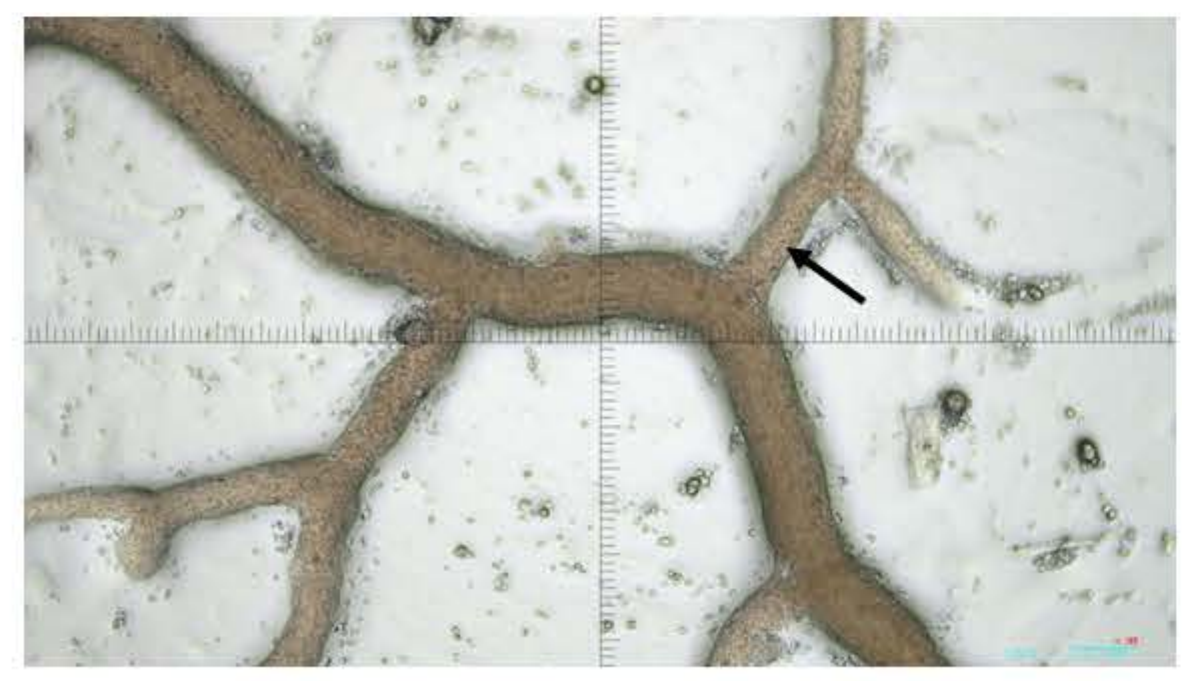


圖25 第三作者拍攝

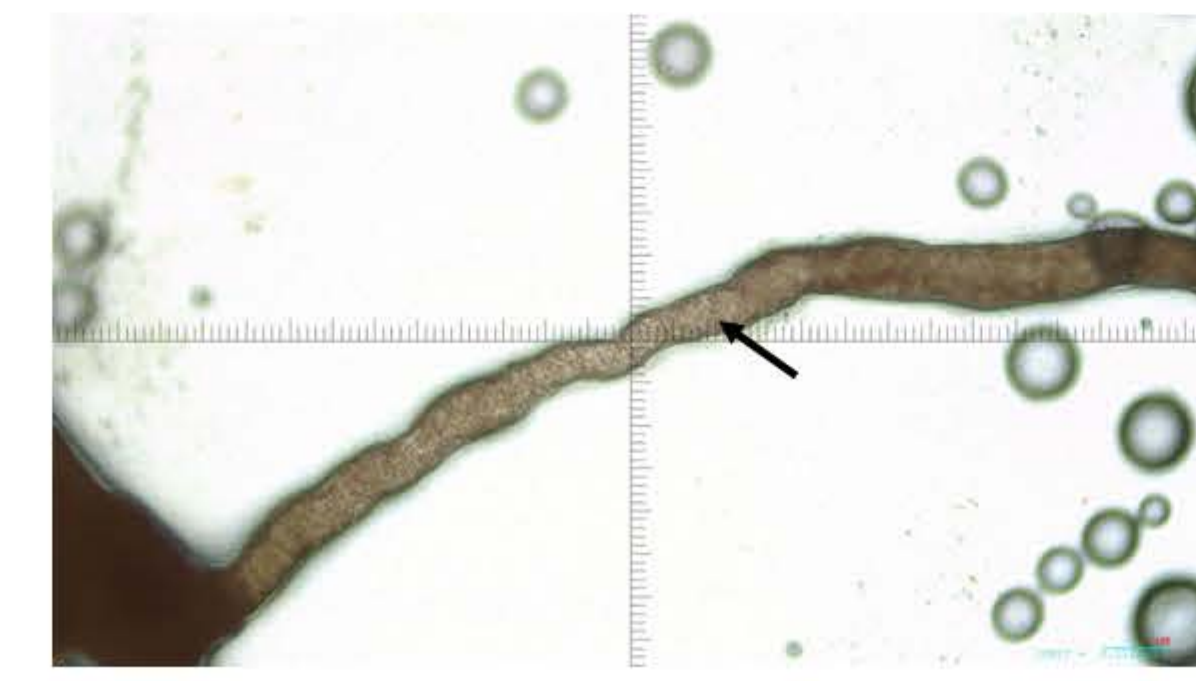


圖26 第三作者拍攝

我們藉觀察黏菌在取食Fe₃O₄及Fe後的變化，由上圖中發現，黏菌取食奈米鐵後，細胞質的顏色均會變深，且具有深咖啡色的顆粒，接下來我們進一步探討取食後黏菌導電特性的改變。

六、利用ImageJ以RGB分析黏菌取食Fe₃O₄及Fe的情形

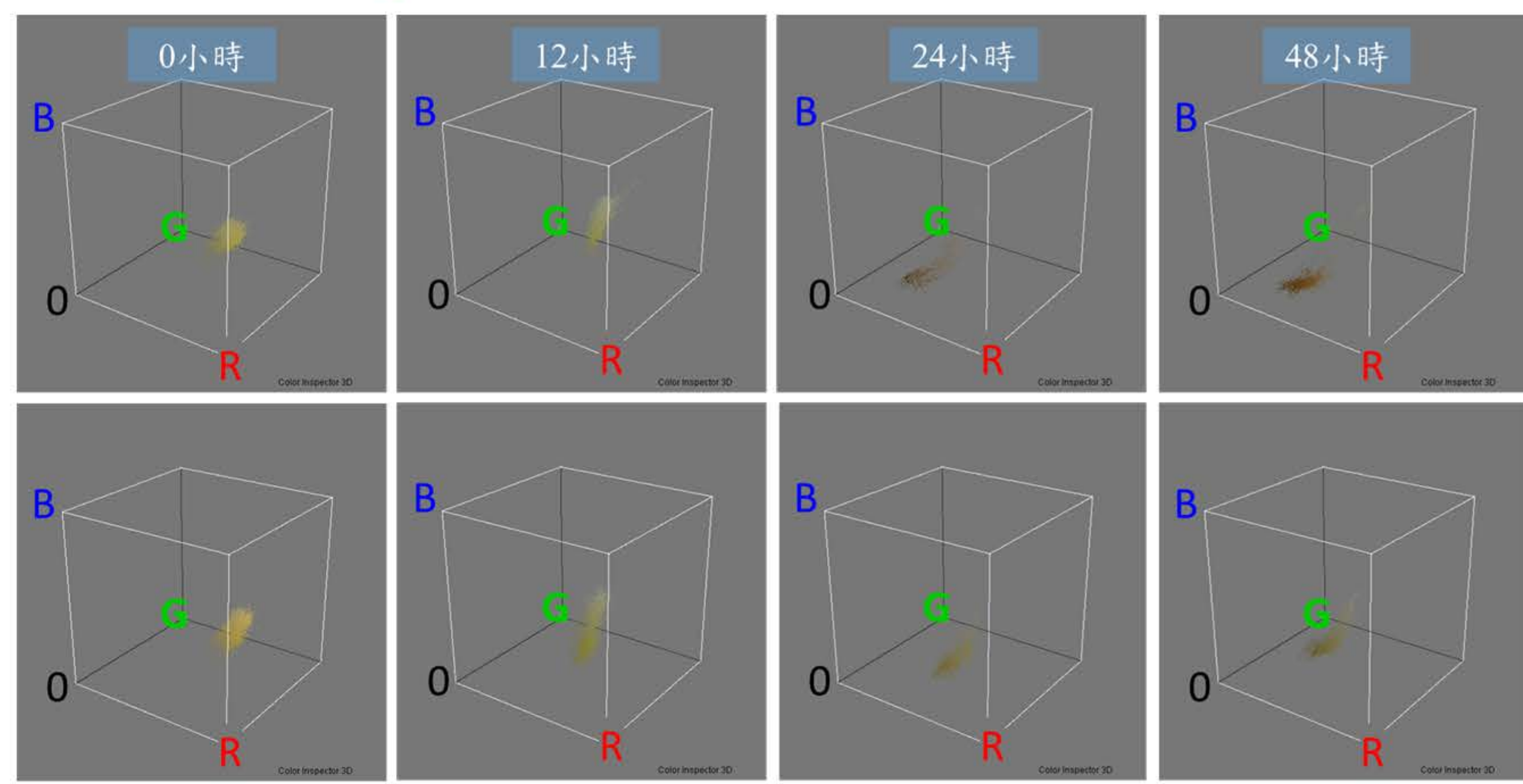


圖27 第三作者拍攝

盤頭絨泡黏菌取食Fe後，隨著取食時間增加，黏菌的外觀綠色(G)、藍色(B)及紅色(R)值皆下降，呈現褐色。

在Fe₃O₄部分，隨著黏菌取食其外觀紅色與藍色下降高於綠色，造成黏菌取食Fe₃O₄後顏色較接近墨綠色。

七、不同處理方式對黏菌電線電阻影響

盤頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

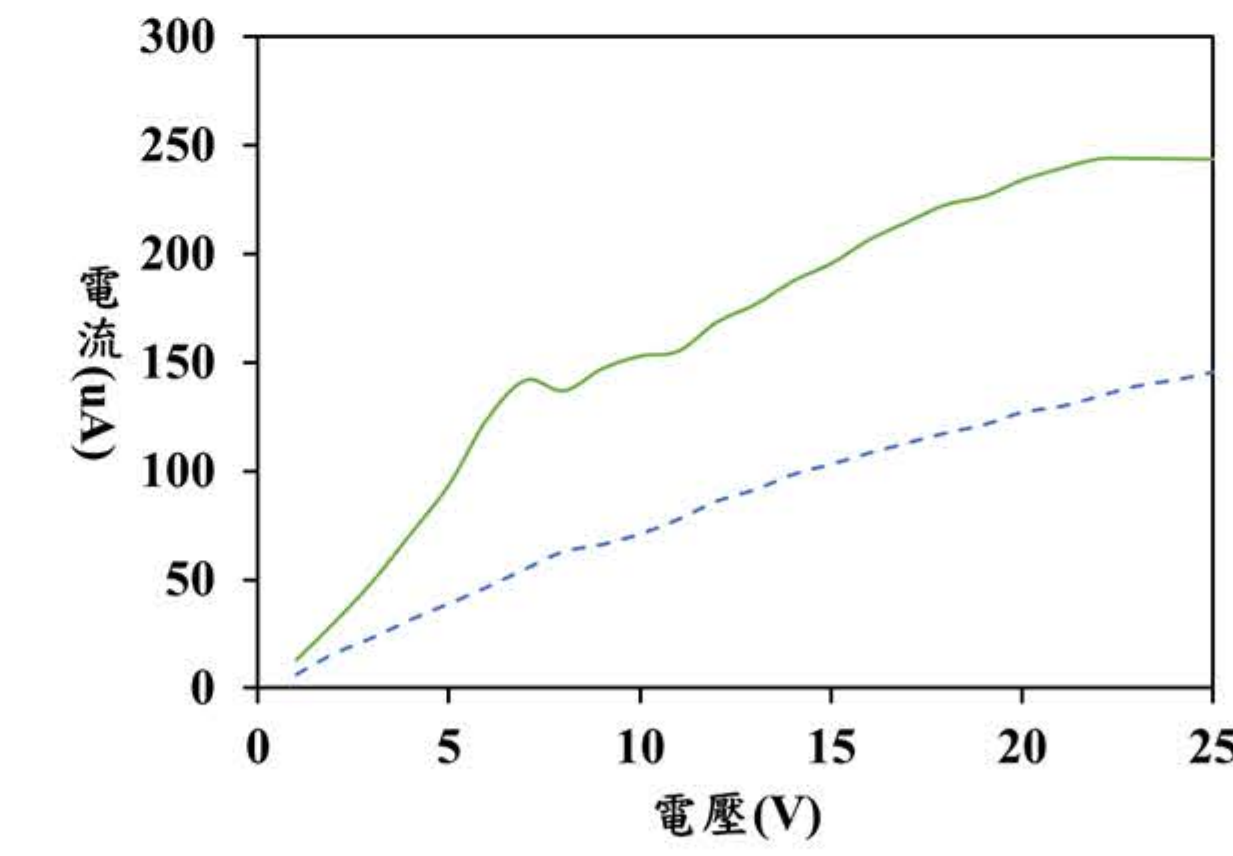


圖28 第三作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 166.9, \bar{x}_{未處理} = 86.3$

盤頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻變化

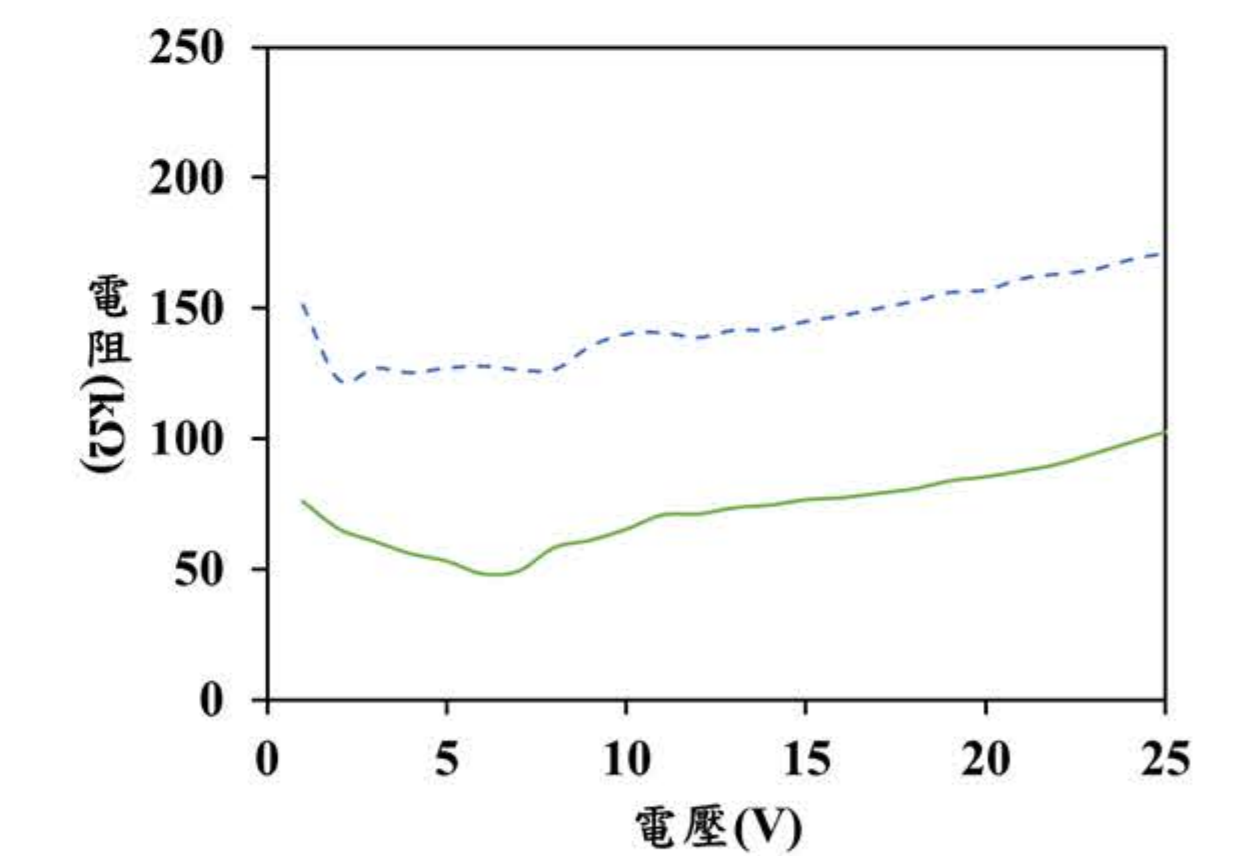


圖29 第三作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 93.6, \bar{x}_{未處理} = 161.7$

盤頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

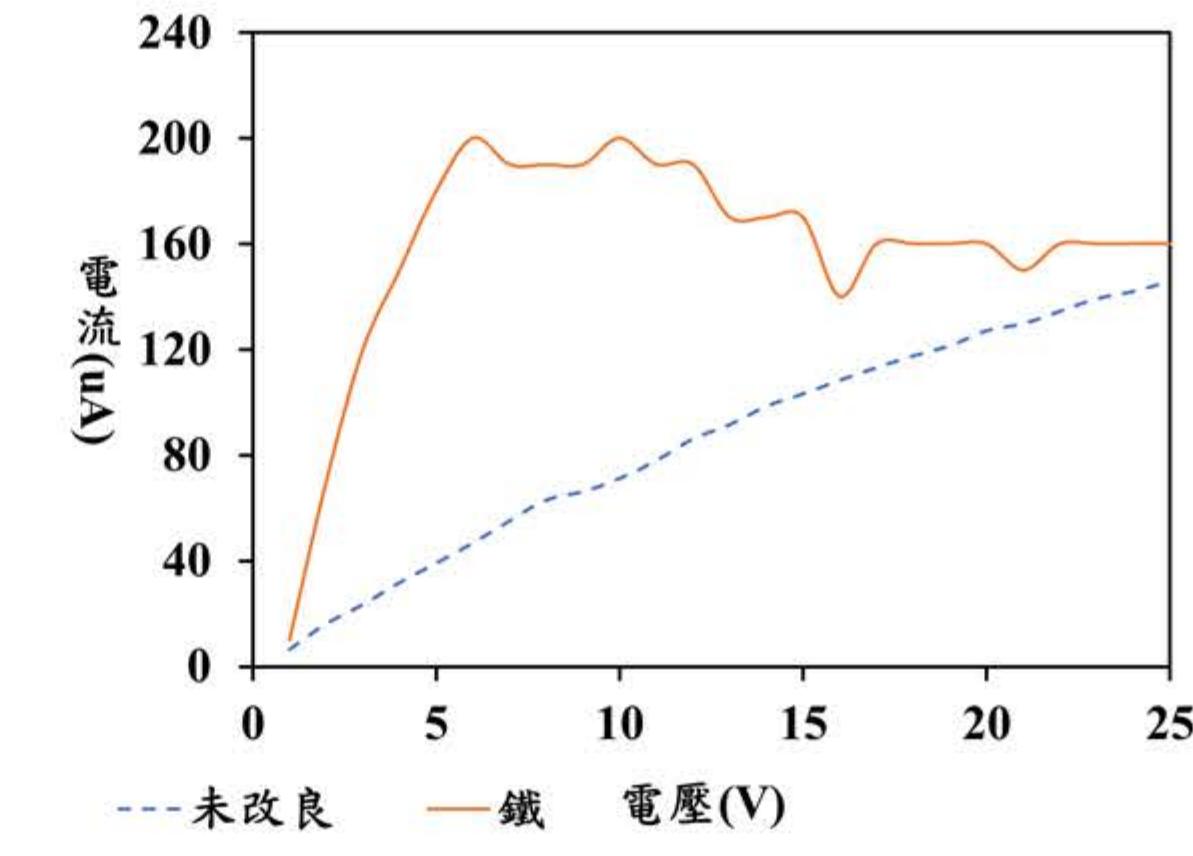


圖30 第二作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 158.4, \bar{x}_{未處理} = 86.3$

盤頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻變化

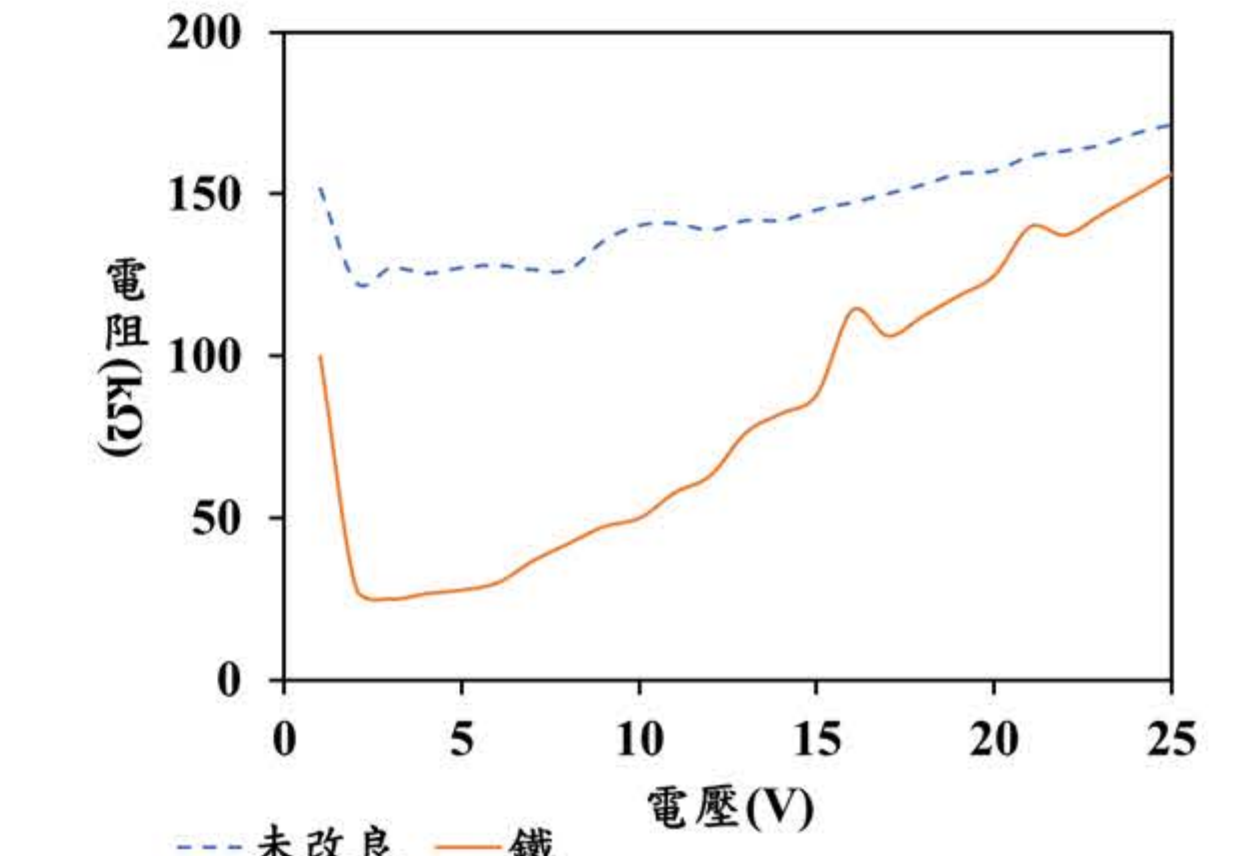


圖31 第二作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 82.7, \bar{x}_{未處理} = 161.7$

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

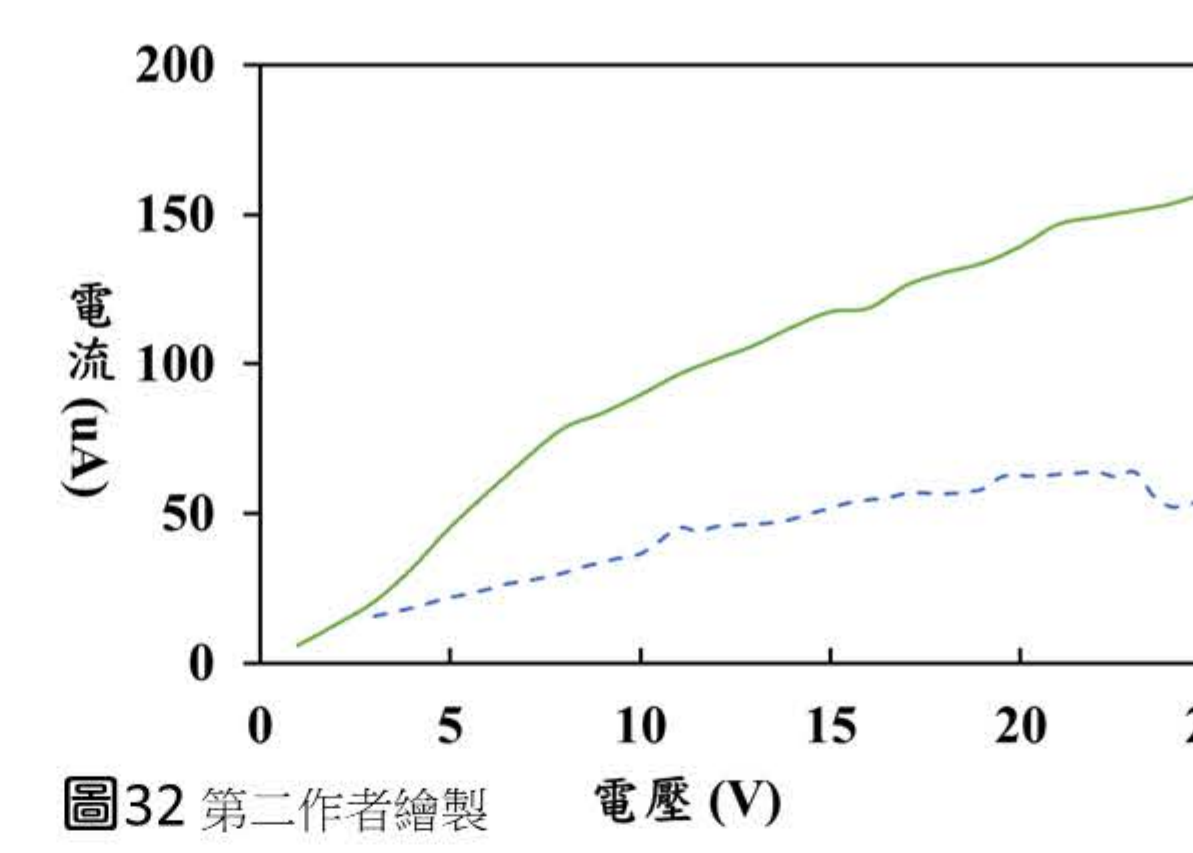


圖32 第二作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 97.5, \bar{x}_{未處理} = 161.7$

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻值變化

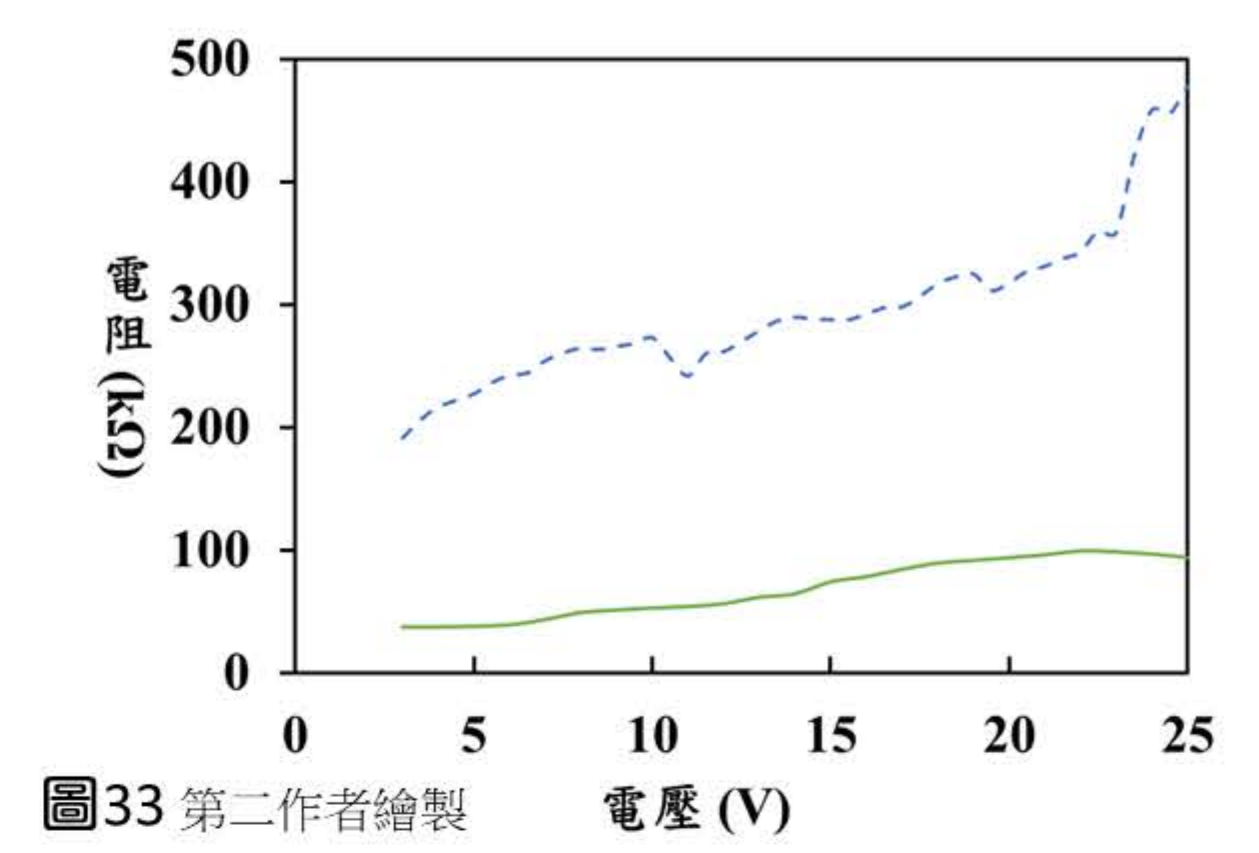


圖33 第二作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 69.0, \bar{x}_{未處理} = 295$

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電流變化

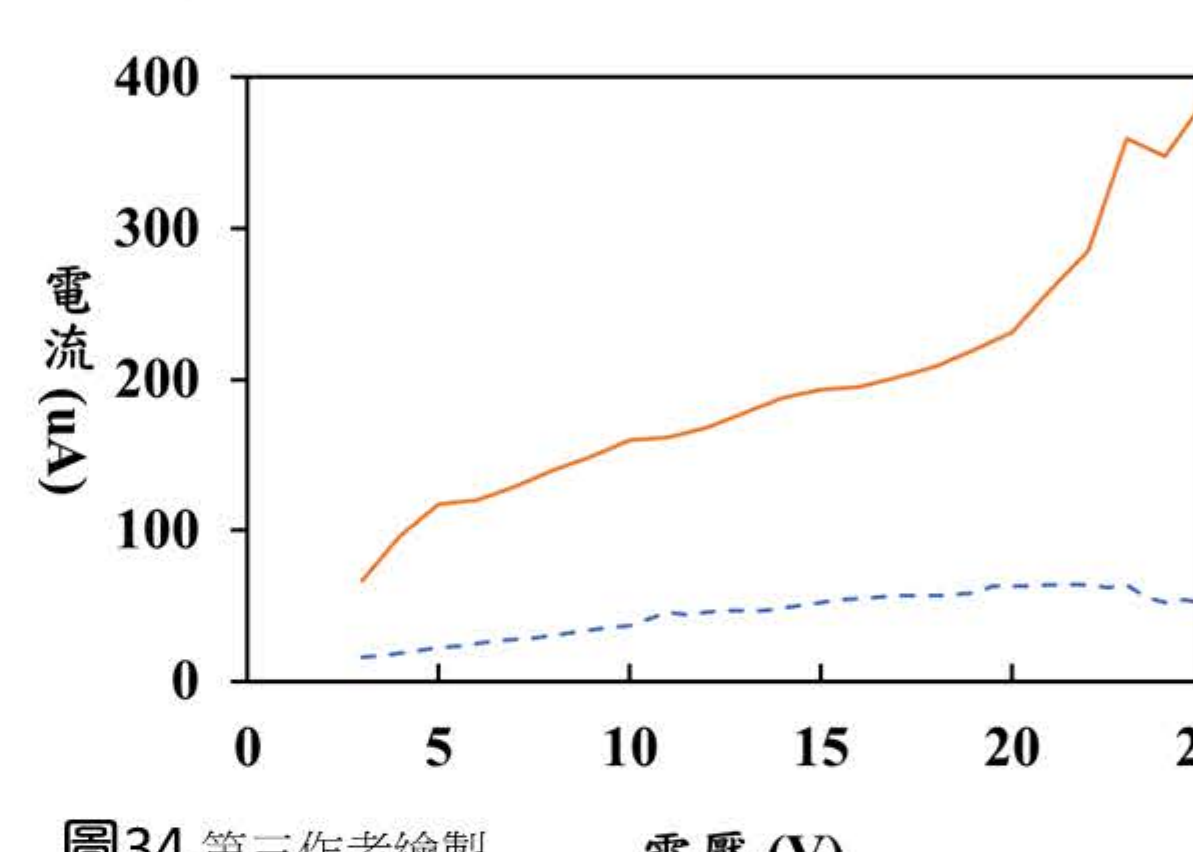


圖34 第三作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 198.11, \bar{x}_{未處理} = 161.7$

多頭絨泡黏菌經奈米鐵改良後電阻值變化

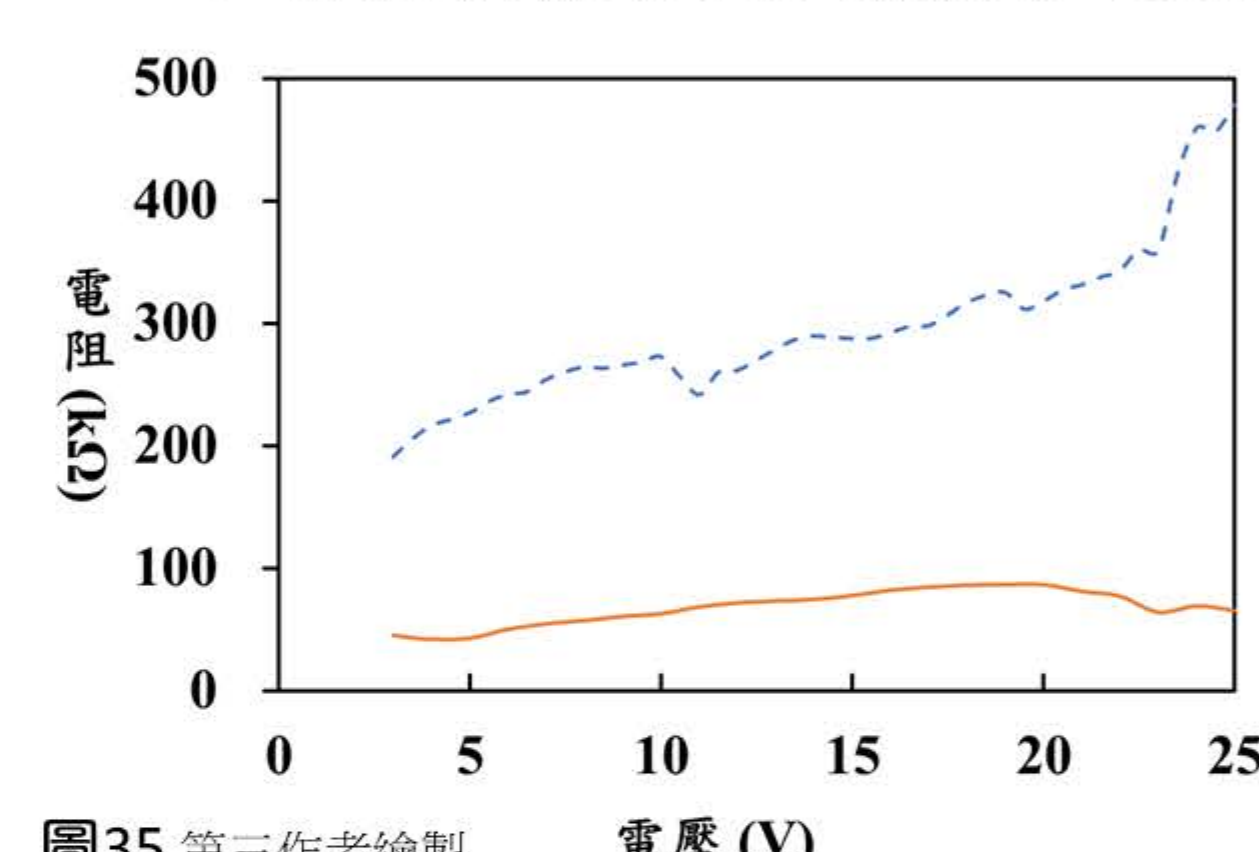


圖35 第三作者繪製
 $\bar{x}_{處理} = 68.0, \bar{x}_{未處理} = 295.5$

八、測量黏菌內細胞質流動速度

影響黏菌細胞質流動速度的因素

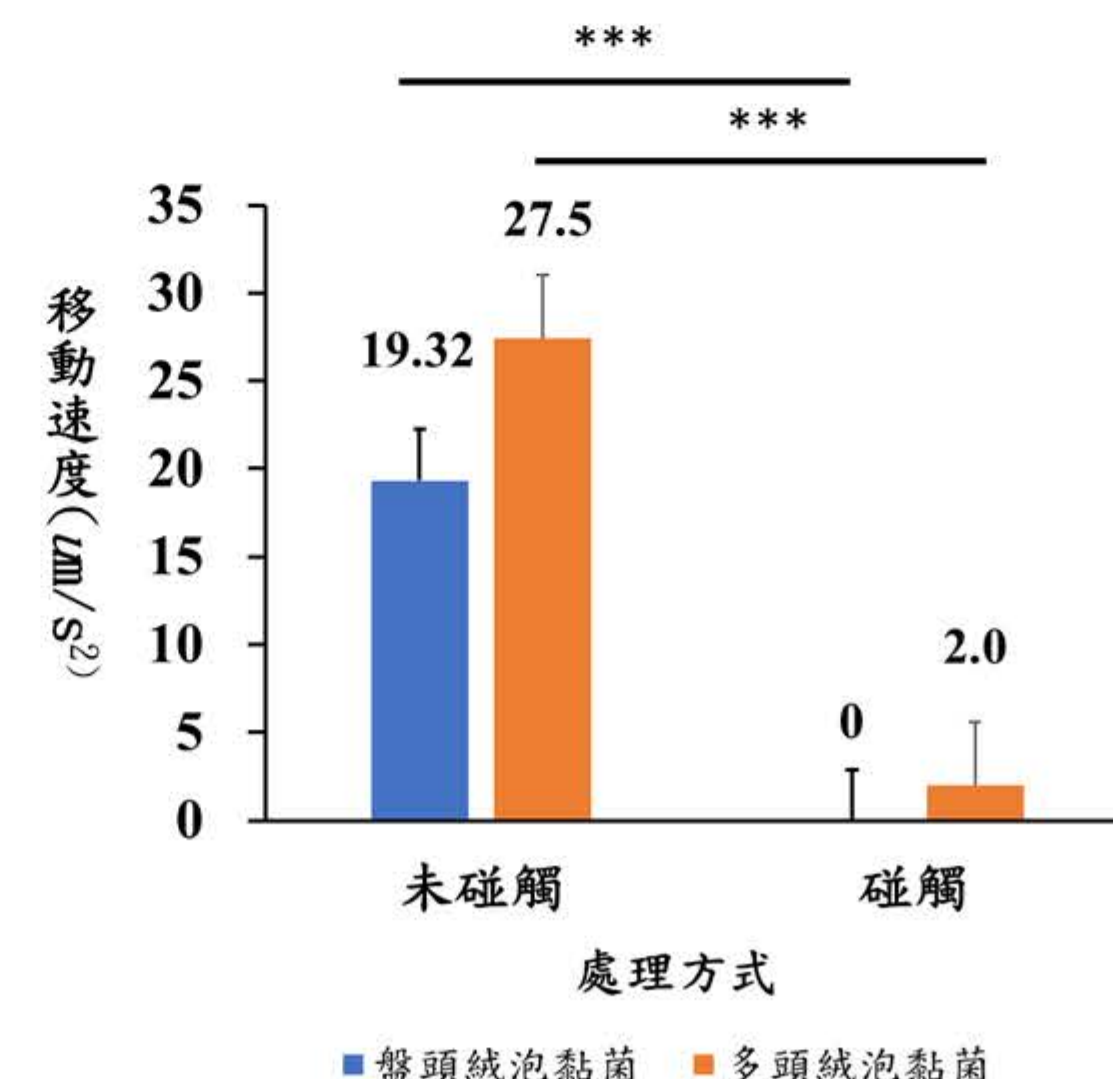


圖36 第三作者繪製

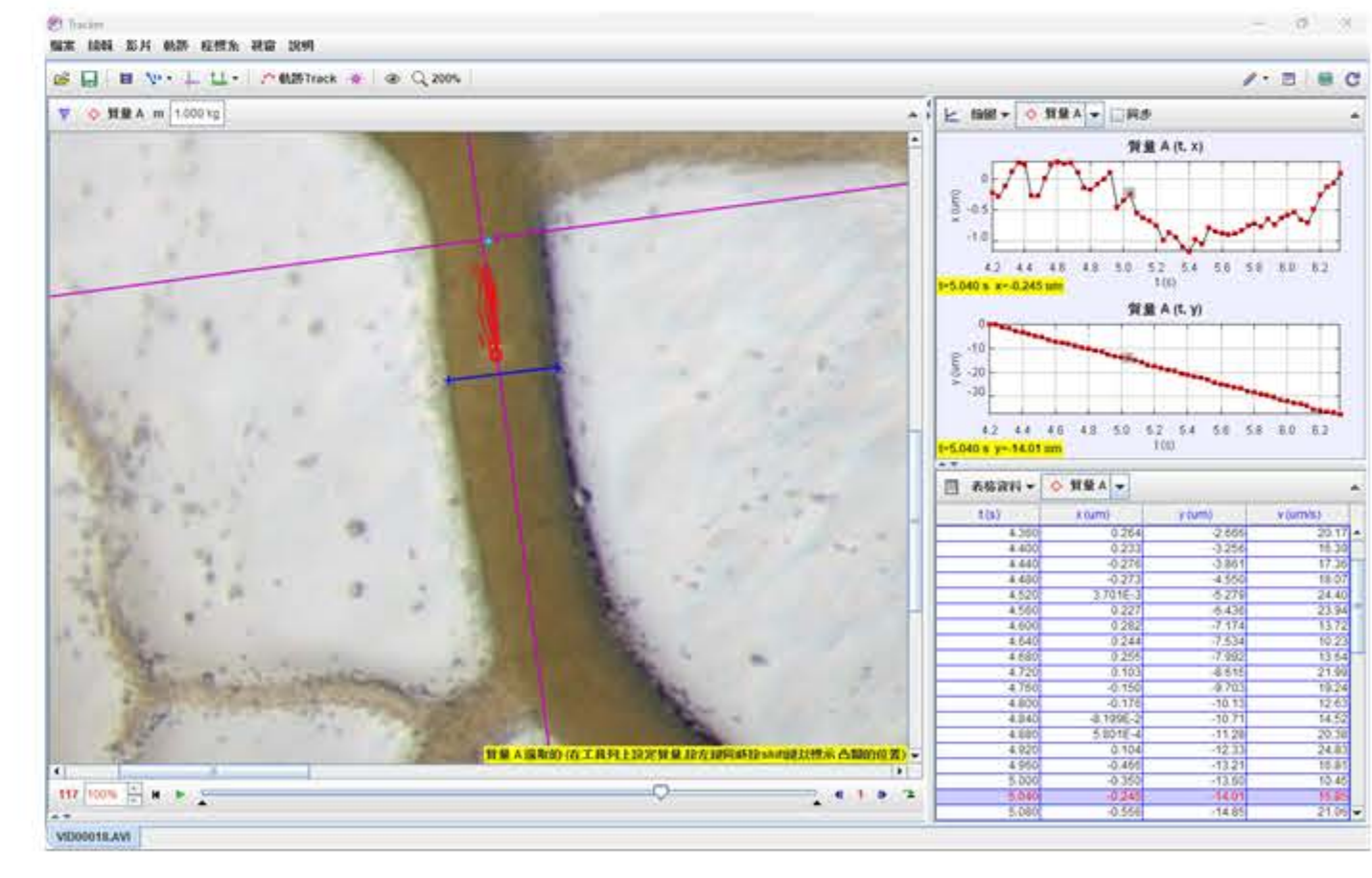


圖37 第三作者繪製

觸碰會導致黏菌細胞質流速降低，利用t檢定後顯示其結果兩者具有顯著差異 ($p < 0.01$)。多頭絨泡黏菌 $SD = 2.9$ ；盤頭絨泡黏菌 $SD = 3.61$

一、黏菌電線伏安特性曲線與其他元件比較

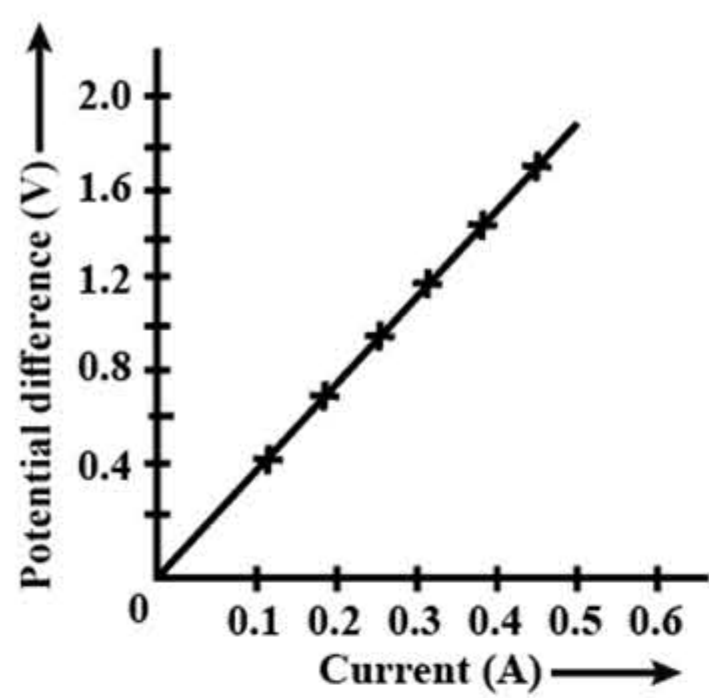


圖38. 歐姆導體伏安特性曲線圖

引用 維基百科(英文)

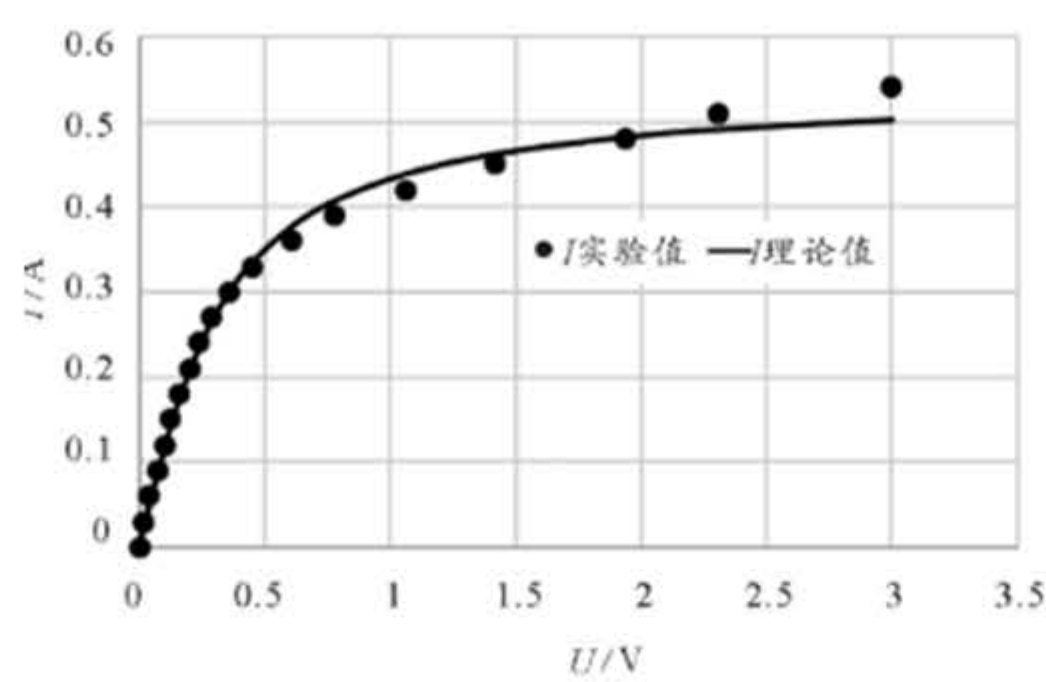


圖39. 燈泡伏安特性曲線圖

引用 陳日繁 (2020)

圖38是歐姆定律的導體伏安特性曲線，其電阻為穩定值。圖39白熱燈泡的伏安特性曲線電阻值不穩定。而黏菌電線的伏安特性曲線接近白熱燈

二、黏菌電線在不同條件下會改變電阻

黏菌電線屬於可變電阻，其電阻受溫度和環境影響。這特性可用於調節電流或保護電器元件，能自行檢測環境條件並調整電阻值，如改變電壓、溫度或食物。

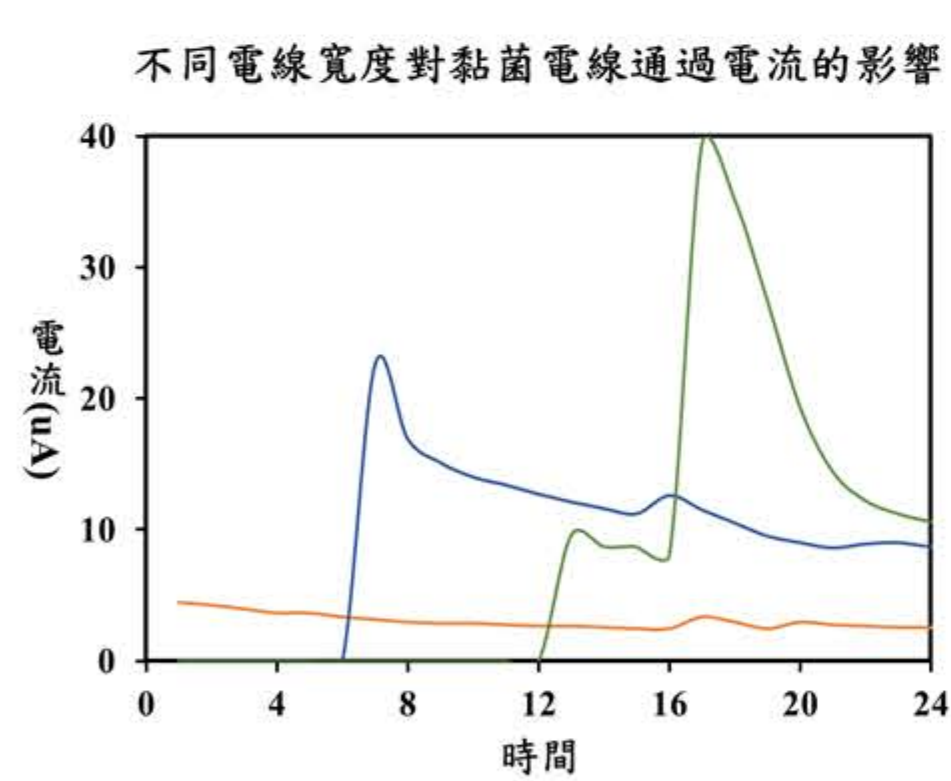


圖40. 電線寬度對黏菌電線的影響

第一作者繪製

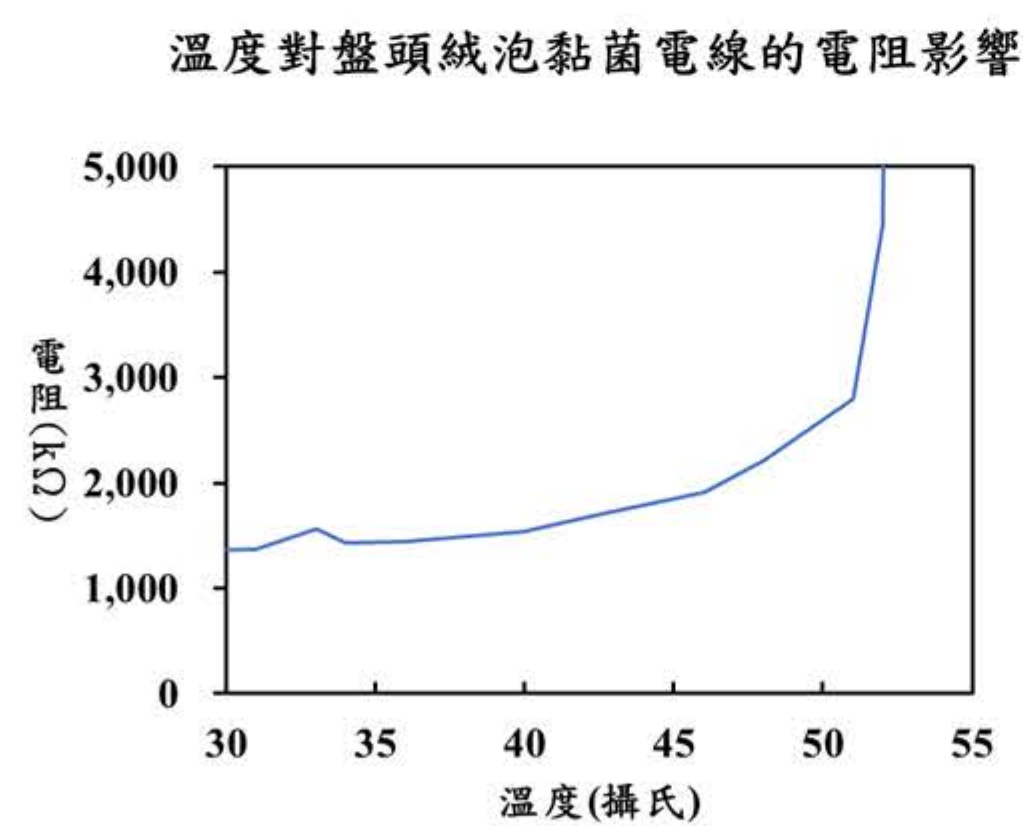


圖41. 溫度對盤頭絨泡黏菌的影響

第一作者繪製

三、不同處理方式對黏菌電線電流的影響

盤頭絨泡黏菌取食 Fe_3O_4 後，其電流量較多頭絨泡黏菌佳。此外，取食Fe的盤頭絨泡黏菌適合於低電壓的環境下使用（15V以下），而多頭絨泡黏菌則適合在相對較高的電壓環境中使用（23V以上）。

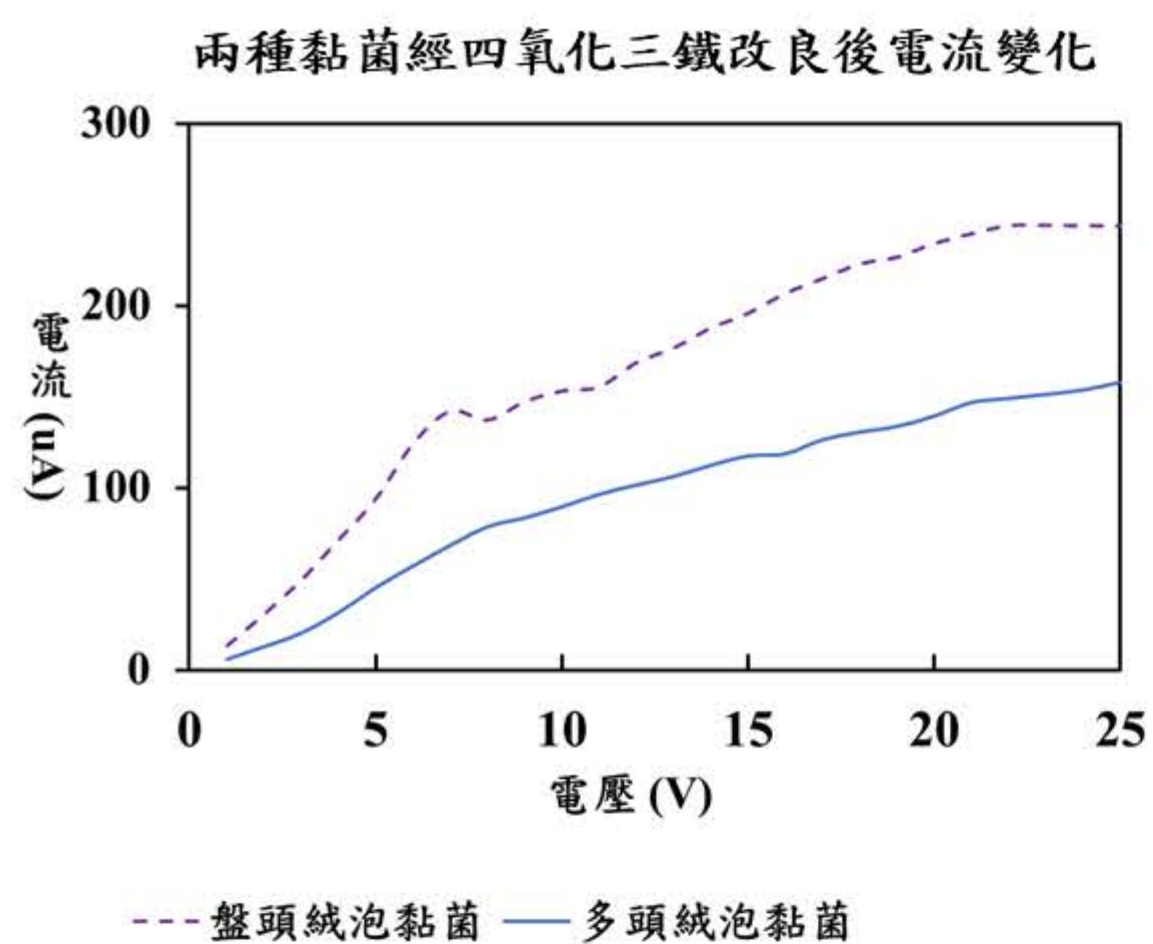


圖42. 兩種黏菌改良後電流變化 第二作者整理

四、黏菌電線必須克服的問題及其應用

黏菌電線因電阻高、電流小，不適合高功率儀器，但可應用於生物保險絲或感測器。本研究利用黏菌結合接面場效電晶體（JFET）調控LED明暗，我們使用分壓電路設計來實現這一點，當黏菌電阻增加時，輸出電壓提高，切斷漏極與源極的電流，使LED熄滅。

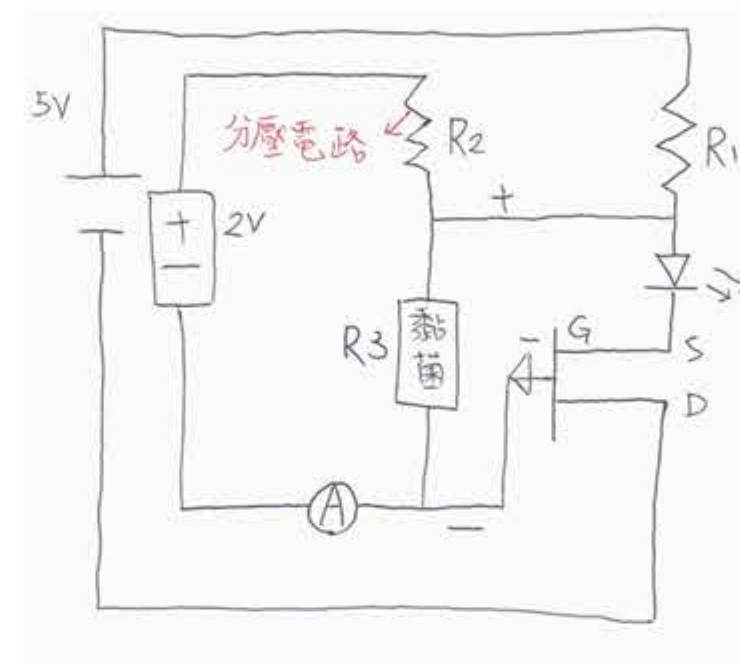


圖43. 電路設計圖 第一作者拍攝

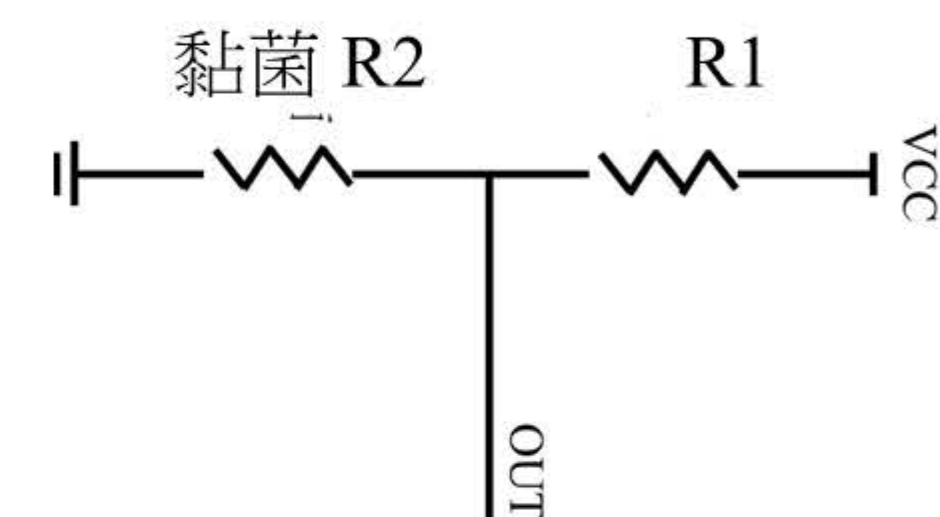


圖44. 分壓電路 第一作者拍攝

五、黏菌細胞質流受到觸碰影響

黏菌細胞質流有一定的流動方向且一段時間就會往反方向流動，但若受外力切斷則該處會完全停止，而支道的部分會往反方向流動。

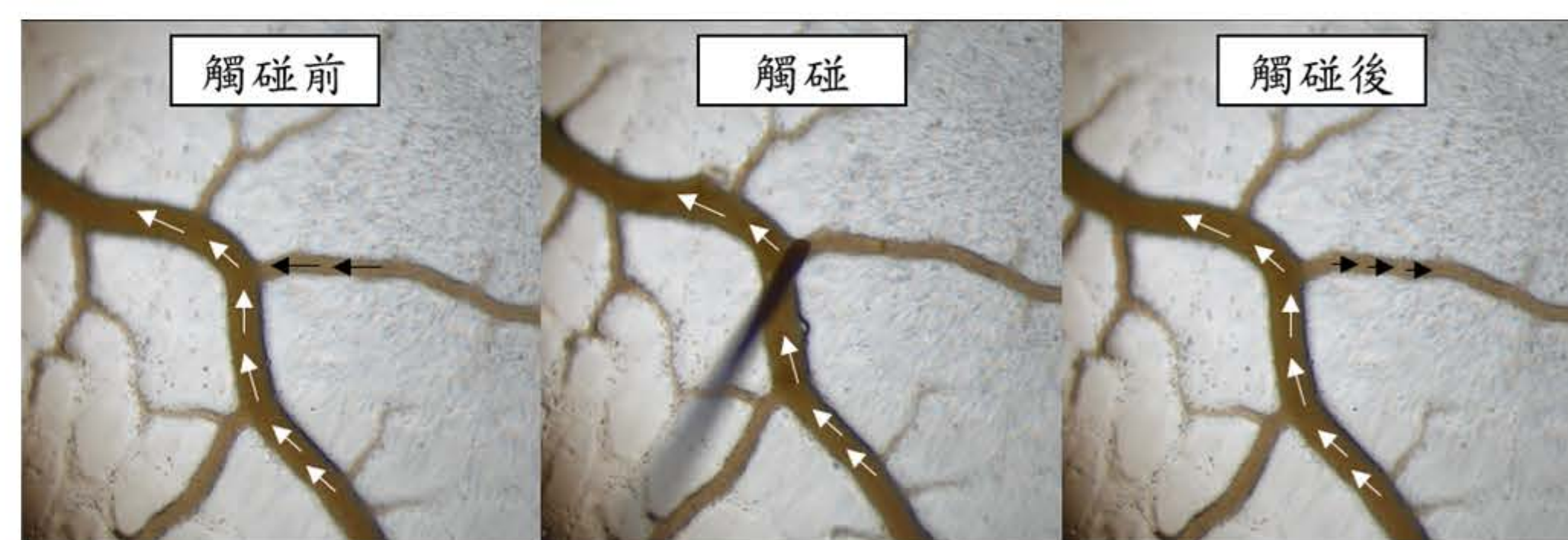


圖45. 黏菌觸碰前後細胞質流變化 第三作者拍攝

六、本研究貢獻與前人研究的差異性

	前人研究	本研究貢獻
關於黏菌作為電線之電阻	無研究	本研究驗證黏菌電線屬於非歐姆式導體
黏菌電線連結寬度對於通過電流的影響	無研究	當連結寬度變大，黏菌電線通過電流變大且電阻值越小
影響黏菌電線電阻的因素	無研究	探討環境溫度、取食物質對黏菌電線影響
黏菌電線電流測量裝置	將黏菌直接培養於洋菜膠上導電進行檢測	將銅片作為電極使用，避免膠體干擾
奈米鐵對黏菌電線的影響	僅討論黏菌對鐵粉的偏好，並未探討對黏菌的影響	Fe_3O_4 和Fe能增加黏菌電線的通過電流
黏菌體內細胞質流動	無研究	利用Tracker計算黏菌體內細胞質流動速度，並探討影響其流動速度的因素

圖46. 本研究與前人研究差異性比較 第一作者整理

研究結論

- 黏菌與電壓呈正相關，且電阻並非定值為一種非歐姆導體
- 黏菌連接處愈寬，通過的電流量愈大且電阻值愈小，但連接處越寬，連結時間越長
- 溫度會影響黏菌電線，當溫度愈高其電阻值就愈大
- 黏菌取食Fe及 Fe_3O_4 在12hr顏色發生改變，Fe造成黏菌接近褐色； Fe_3O_4 則為墨綠色
- Fe及 Fe_3O_4 可以降低多頭絨泡黏菌及盤頭絨泡黏菌的電阻
- 黏菌細胞質流動速度約為每秒19um，且流動速度會受到外力觸碰影響
- 黏菌電線可應用於電路中的串聯及並聯，且可以利用其特性調控電器

未來展望

未來我們會嘗試使用金、銀、銅等金屬粉末進行實驗，此外黏菌具有自我修復的能力，這意味著它們可以在特定條件下彼此連接，這種自組裝特性可以應用於製造微小的電子元件或電路，在微型化電路方面有其應用價值。在研究中我們也發現，黏菌能作為溫度感測裝置，可以隨環境溫度改變，其調控LED燈的亮度，我們可以將這個特性運用在培養箱或是電風扇等電器上，進而利用溫度調控電器。

參考文獻

- Andrew Adamatzky (2013). Physarum wires: self-growing self-repairing smart wires made from slime mould .UNCONVENTIONAL COMPUTING CENTRE, UNIVERSITY OF THE WEST OF ENGLAND, BRISTOL, BS16 1QY, UNITED KINGDOM
- Jasmine Lu and Pedro Lopes (2022). Integrating Living Organisms in Devices to Implement Care-based Interactions. UIST '22, October 29–November 02, 2022, Bend, OR, USA