

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

第一名

030309

菇 GO!背地一「站」

學校名稱：桃園市私立新興高級中學(附設國中)

| | |
|---------------------------------|------------------|
| 作者： 國二 陳柏熙 國二 陳柏詠 | 指導老師： 陳俐蓉 |
|---------------------------------|------------------|

關鍵詞：地心引力、向地性、蕈菇

得獎感言

做任何事都要持之以恆

我們從七年級就開始做這個實驗，總共花了快兩年的時間，其中當然要感謝很多人，像我們的父母總是在背後默默的給予我們鼓勵與支持，還有也要感謝指導老師陳俐蓉老師以及我們的班級導師祝惠珍老師總是不厭其煩的帶領我們通往科學的大門，也感謝學校的校長、主任、組長行政提供我們在這次的科展中所需要的器材後援，另外特別感謝清華大學楊樹森教授、元智大學黃麗芬教授給予我們在實驗和報告上的指點，和中央大學附屬中壢高中林哲猷老師在我們深陷「旋轉器」製造的愁雲慘霧之中指點迷津，讓我們原本的實驗構思可以繼續向前。

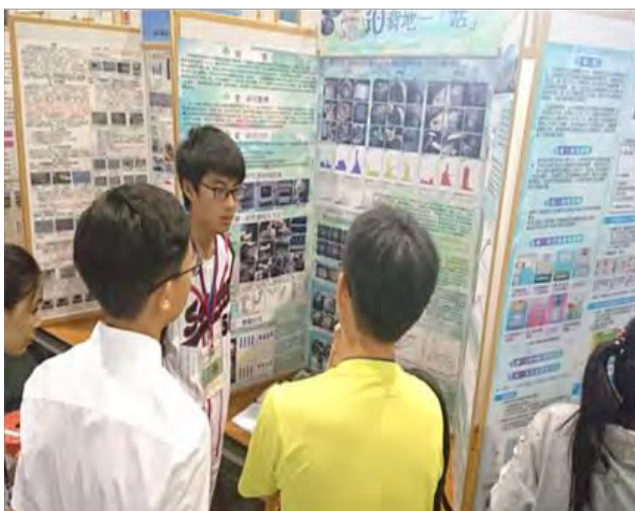
在來到全國賽的現場，心情其實是十分複雜的，一想到兩年來的努力要在現場和大家分享，心中既是雀躍又有一種莫名的緊張感，中途雖然經過許多波折，但可以把我們的作品表現出來，心中總有一種無法用言語表達的喜悅。

回想過去兩年，我們每天中午休和課餘時間都去實驗室做實驗，我們一開始為了尋找科展的題目，花費許多心力，在經過不同的題目更換下，我們終於找到了現在的蕈菇感應重力的題材，所以我們著手設計實驗架構，開始一步一步向前走，為了取得實驗所需的數據，我們每節下課都去實驗室做測量。而其中一項實驗，我們為了觀察蕈菇在改變重力條件下的生長情形，我們在旋轉器的製作花費了大量的思緒以及時間，在完成實驗後，為了展現我們的成果，我們在市賽和全國賽前每天練習演說將近四小時，在得知我們打進全國賽的當下覺得之前所做的這一切真的十分值得。

我們覺得參加這次的科展獲益良多，得獎不是目的，最重要的是在這樣的實驗過程中，我們投入科學的懷抱，得到了一次寶貴的經驗，從這次的科展我們學到了做任何事都要持之以恆，如果當初我們因為過程太過艱辛而中途放棄，那就連發表的機會都沒有了，在現實中很多事情也是如此，凡事就是要去勇於嘗試、永不放棄才有成功的機會，也希望我們未來也秉持這種精神，走向人生中每一個里程碑！



得知得獎後開心舉起獎盃合照



兩位作者在第四天介紹作品給參觀的民眾

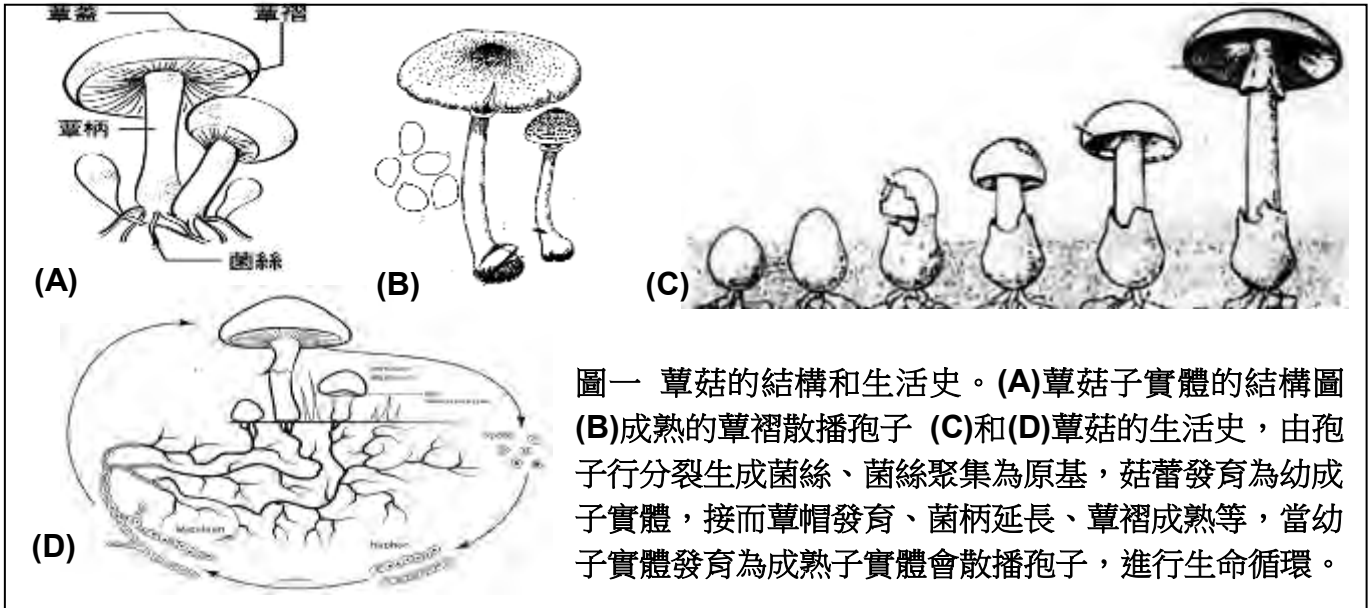
摘要

本實驗研究蕈菇如同植物具有「向地性」，蕈柄生長過程受到地心引力刺激會產生「背地一站」現象。我們利用柳松菇太空包以倒立方式發現蕈柄彎曲角度可超過 150 度，彎曲生長主要發生在距離蕈柄頂端 20-30%處，因為近地側細胞生長相較遠地側大約有 2 倍長度的差異，和遠地側有較大的重力生長曲率，造成蕈柄得以發生背地彎曲；當完全切除蕈帽則無法表現「向地性」，我們推測蕈帽和蕈柄間的細胞似乎可以感應重力刺激，使蕈柄得以「背地一站」以利散播孢子。我們進一步自製離心器，以旋轉方式改變重力場強度，發現蕈菇子實體「向地性」表現強度產生改變，我們期待本實驗的重力向量對蕈菇發育的基礎研究可以應用於失重的外太空培植之可能價值用途。

壹、研究動機

有一次意外地發現，在窗台培植的蕈菇太空包，在不小心被弄倒的情況下，蕈菇的子實體竟出現彎曲向上，難道蕈菇和植物一樣也會有「背地一站」的向性反應嗎？我們上網查閱文獻得知台南女中在第五十四屆台南市科展發表一篇「『菇』注一『植』」，內容關於蕈菇也有背地彎曲的生長現象，另外國外文獻有報導指出蕈菇在子實體發育過程會受到光源刺激產生向光性的反應 (Corrochano,2011)，蕈菇似乎存在一套感知系統，可以接受外界環境因子的刺激，然而我們好奇蕈菇的「向上」反應和「地心引力」刺激因子的是否具有相關，且蕈菇又如何感應地心引力的刺激存在，以及在不同的生長時期對應地心引力的刺激會有相同的反應強度嗎？

最近蕈類子實體和菌絲體之營養成分變化受矚目，也研究特多，但是關於蕈菇的向性研究較為罕見，然而在探討蕈類子實體發育關於向性表現的機制是非常基礎的研究課題。我們企圖探討蕈菇的感知部位和子實體發育過程中感應的時間點，其對地心引力刺激產生向地性之間的相關聯性，尋找出蕈菇「向地性」的反應機制是我們所要探討的方向！



圖一 蕈菇的結構和生活史。(A)蕈菇子實體的結構圖 (B)成熟的蕈褶散播孢子 (C)和(D)蕈菇的生活史，由孢子行分裂生成菌絲、菌絲聚集為原基，菇蕾發育為幼成子實體，接而蕈帽發育、菌柄延長、蕈褶成熟等，當幼子實體發育為成熟子實體會散播孢子，進行生命循環。

| | | |
|--|--|---------------------------------------|
| <p>(A)秀珍菇 (多孔菌科) 學名 <i>Pleurotus ostreatus</i> : 又名蠔菇、平菇，蕈柄不位於蕈傘的正中央，而是著生在蕈傘的邊緣一側，且蕈柄較短(0-3公分)。</p> | <p>蕈傘表面光滑，呈褐色，似牡蠣狀</p> | <p>緊密延生的柔軟奶油色蕈褶</p> <p>蕈柄短,位於蕈傘邊緣</p> |
| <p>(B)珊瑚菇 (多孔菌科) 學名 <i>Pleurotus citrinopileatus</i> : 又名金頂側耳菇，子實體一般密集成簇，蕈柄(1-5公分)接近中央，延伸的蕈褶連在一起形成網狀。</p> | <p>蕈傘表面平滑，呈喇叭狀</p> <p>米色的蕈柄帶有蕈傘的顏色</p> | <p>蕈柄接近中央，網狀的延生蕈褶</p> |
| <p>(C)柳松菇 (囊傘科) 學名 <i>Agrocybe cylindracea</i> : 又名柱狀田頭菇，子實體成叢或單獨出現，蕈柄(8-15公分)上有發達的蕈環，會漸由米色變色褐色。</p> | <p>平滑凸狀菌傘在乾燥情況下會龜裂</p> | <p>淺灰褐色蕈褶直生</p> <p>蕈柄上有發達的蕈環</p> |

圖二 實驗對象我們由食用菌菇中選擇了三種蕈柄不同類型，包括(A)秀珍菇、(B)珊瑚菇和(C)柳松菇。

貳、研究目的

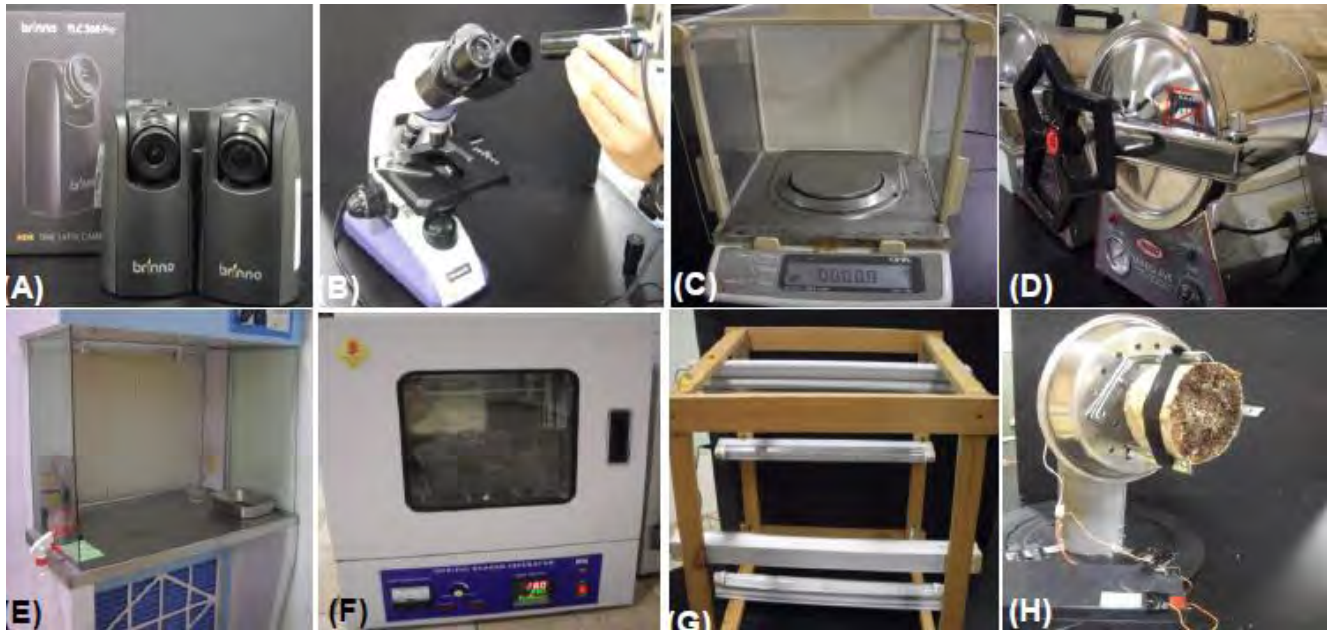
本研究目的以太空包栽培菌菇為研究對象，探討菌菇生長發育過程中是否感應地心引力刺激產生向性反應，並進一步研究菌菇感應重力刺激和發生彎曲的部位。

- 一、觀察太空包栽培菌菇在不同方向感應地心引力的背地性生長現象。
- 二、以組織分離培養和太空包栽培方式，探討菌菇在不同生長時期感應地心引力的向性差異表現。
 - (一)利用PDA觀察菌絲細胞受地心引力影響之向性生長。
 - (二)利用PDB觀察菌絲形成菌絲球體受重力影響的聚集差異。
 - (三)利用太空包觀察菌菇子實體在不同生長時期受地心引力影響之向性反應。
- 三、探討菌菇子實體的菌柄背地彎曲速率和重力生長曲率表現。
- 四、探討菌菇感應地心引力產生負向地性的感應部位。
 - (一)切除菌帽不等比例觀察子實體菌柄感應地心引力的向性彎曲表現。
 - (二)環切菌柄頂部或基部觀察子實體菌柄感應地心引力的向性彎曲表現。
- 五、以旋轉(離心)方式，改變重力場向量和強度對菌菇生長發育的差異表現，和討論可能在失重狀態下的向性表現。

參、研究設備與器材

一、儀器設備：

| | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------|
| 縮時攝影機(BrinnoTLC200,Pro) | 控溫震盪培養箱 (ORBITAL) | 熱風循環烘箱 (Evernew) |
| 無塵無菌操作台 (Evernew) | 數位相機(PENTAX) | 高壓蒸氣滅菌釜鍋 (TOMIN) |
| 複式光學顯微鏡 (HAMLAT) | 電子目鏡(DinoLite,AM423X) | 四位數精密電子分析天秤 |
| 數位式照度計(TES,1330A) | 自製LED實驗光屋 | 自製離心旋轉台裝置 |



圖三 實驗儀器設備 (A)縮時攝影機 (B)複式顯微鏡和電子目鏡 (C)精密數位式電子天秤 (D)高壓蒸氣滅菌釜鍋 (E)無菌操作台 (F)控溫震盪培養箱 (G)自製木製LED光屋:白光LED燈管(億光)和LED專用空拍 (H)自製離心旋轉台。

二、研究器材、藥品和生物材料

(一)馬鈴薯洋菜培養基 (PDA,Potato Dextrose Agar和PDB)：馬鈴薯、蔗糖、洋菜粉。

(二)藥品：精製酒精(購自台糖公司)、甲基藍染液、碘液。

(三)其他：酒精燈、解剖刀、鋁箔紙、鑷子、燒杯、量筒、培養皿、錐形瓶、玻璃棒、自製接種環、滅菌指示帶、解剖盤、抽氣過濾裝置(過濾錐形瓶、白瓷漏斗、過濾紙)、載玻片、蓋玻片。

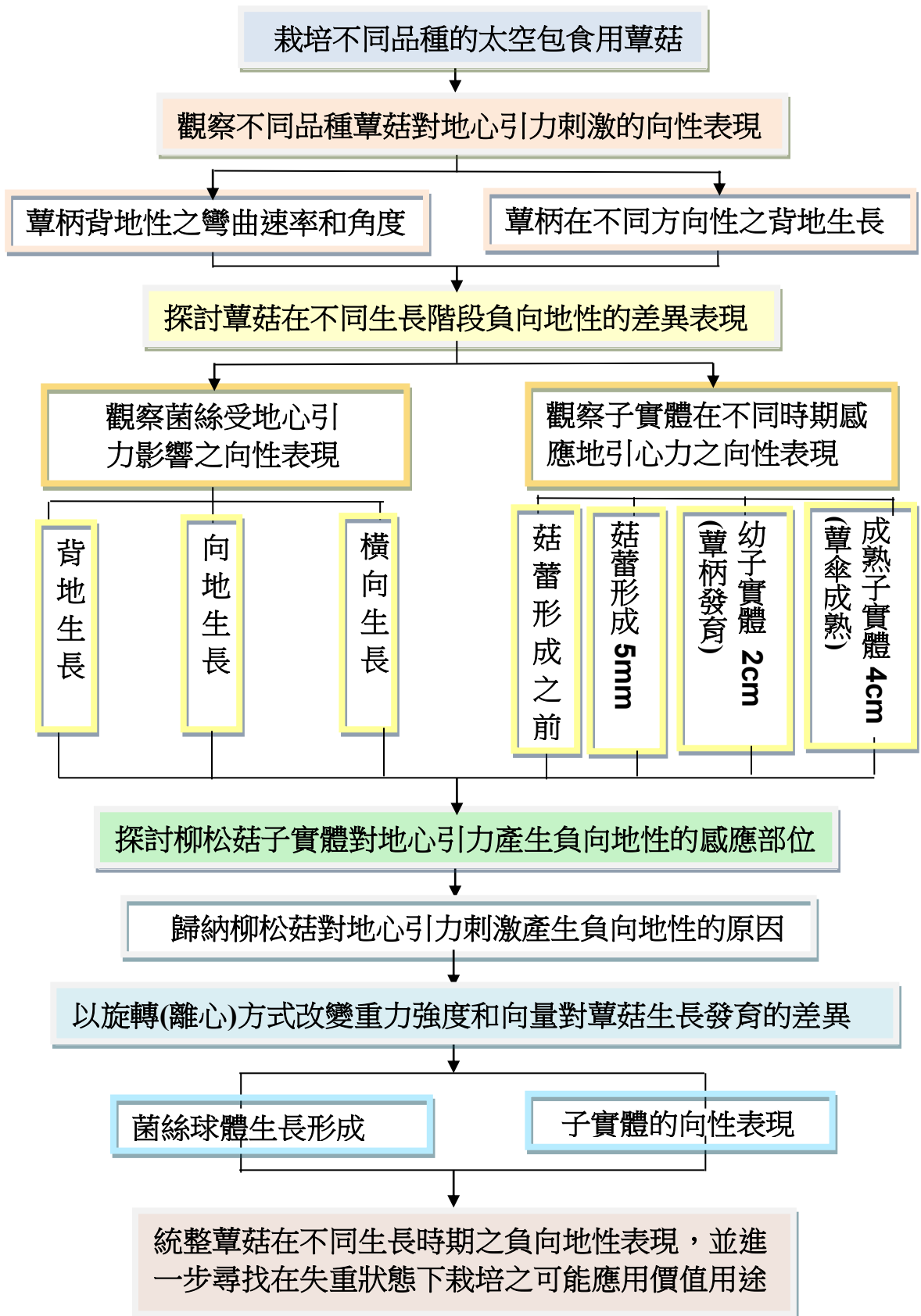
三、生物材料

珊瑚菇(*Pleurotus citrinopileatus*)、秀珍菇(*Pleurotus ostreatus*)、柳松菇 (*Agrocybe cylindracea*)



圖四 實驗器材和藥品(A)培養基配製和消毒種菌用 (B)組織細胞切片用 (C)抽氣過濾裝置。

肆、研究過程與方法



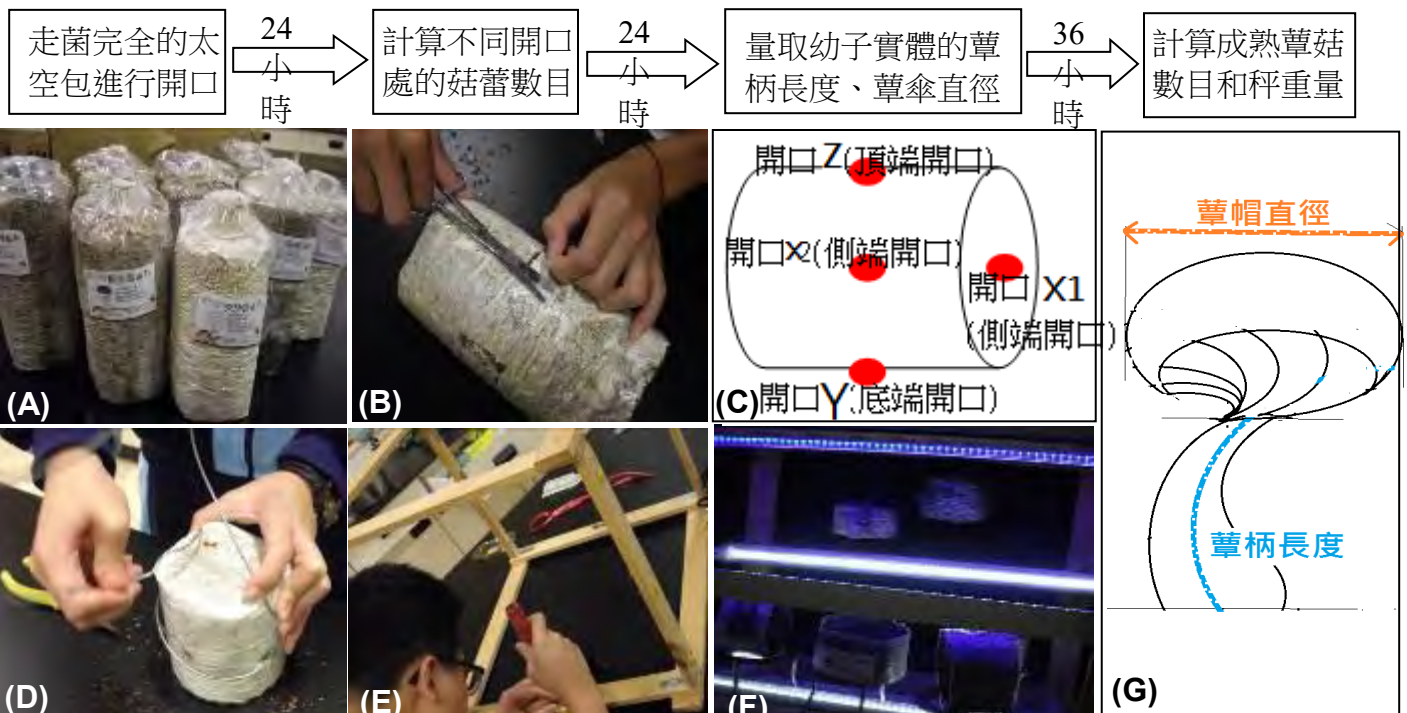
一、不同蕈菇太空包對地心引力刺激的感應生長發育之觀察

(一)觀察重力對太空包栽培蕈菇在不同方向性的出菇之影響：

- 1.太空包於低溫狀態走菌完成後，將一太空包在不同面向作等面積開口處理(開口Z為頂端開口、開口Y為底端開口、開口X1和開口X2為側端開口，圖五B)，以鐵絲懸掛置於自製木架光屋中。
- 2.自製LED光屋：先量測抬燈燈架的長、寬、高，依此數據裁切木條，再以螺絲進行接合組裝，準備四個燈架安置於木架的上方、下方和兩側方向，將燈源線與LED白光燈管專用的T8空台相連接，再將LED白光燈管裝入燈架。以光照計測量發光強度($100\mu\text{mole m}^{-2}\text{S}^{-1}$)以符自然光下的照度，且為避免不同方向性光源干擾，採上、下、側方皆有光源供應屏除「向光性」變因。
- 3.架置縮時攝影機拍攝並記錄觀察在不同方向性的蕈菇之原基(菇蕾)形成情形，並紀錄之。
- 4.開口後，24小時內計數菇蕾的數目和生長的面積，求得不同開口(開口X~開口Z)單位面積出菇數目。以「開口Z(頂端開口)」出菇數目作為比值「1，(100%)」，其他開口菇蕾數目相較「開口Z(頂端開口)」菇蕾數之比值，得「出菇百分比值」。重複實驗三次求得平均值做統計圖。

(二)觀察重力對太空包栽培蕈菇在不同方向性的子實體發育之影響：

- 1.接續上述實驗(一)觀察太空包不同方向性的蕈菇子實體的生長情形，每隔12小時拍照記錄發育過程，至蕈帽成熟散播孢子，包括子實體發育過程中的蕈帽直徑大小、蕈柄長度和圍長，其中蕈柄可能因為實驗彎曲生長，我們以棉線順彎曲蕈柄(中軸)量取長度，量取部位由蕈褶基部(蕈褶和蕈柄連接處)至蕈柄基部，再以尺還原成毫米(mm)，進行連續觀察長度的變化。約菇蕾形成60小時進行採收發育成熟子實體(孢子散播)，紀錄單位面積的蕈菇數目和子實體重量。
- 2.重複實驗三次，求得平均值。將資料數據進行統計處理，製作統計圖以分析。



圖五 太空包栽培蕈菇感應地心引力刺激的生長發育實驗 (A)太空包(購自豐年農場) (B)在太空包不同方向做等面積開口處理 (C)開口示意圖 (D)以鐵絲懸吊進行蕈菇生長觀察 (E)自製木架實驗屋，並在其上方、側方和下方設置LED白光 (F)實驗屋中的太空包試驗 (G)實驗測量的變因因子。

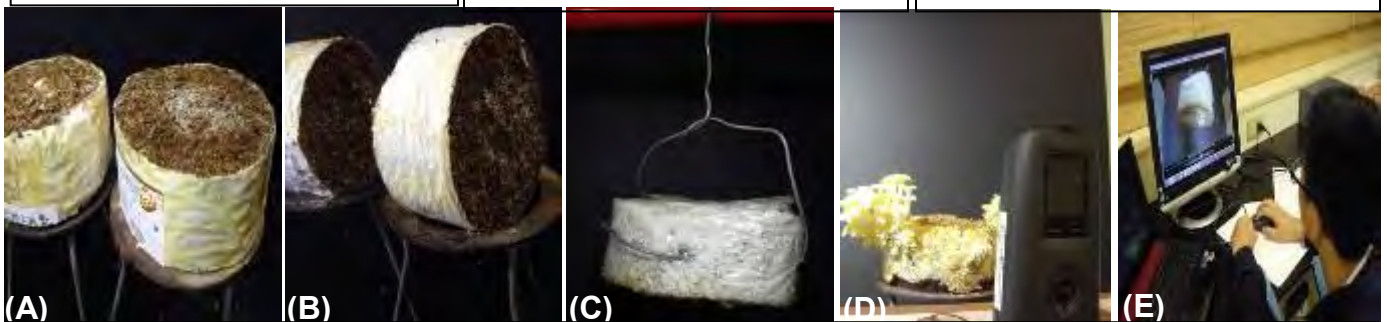
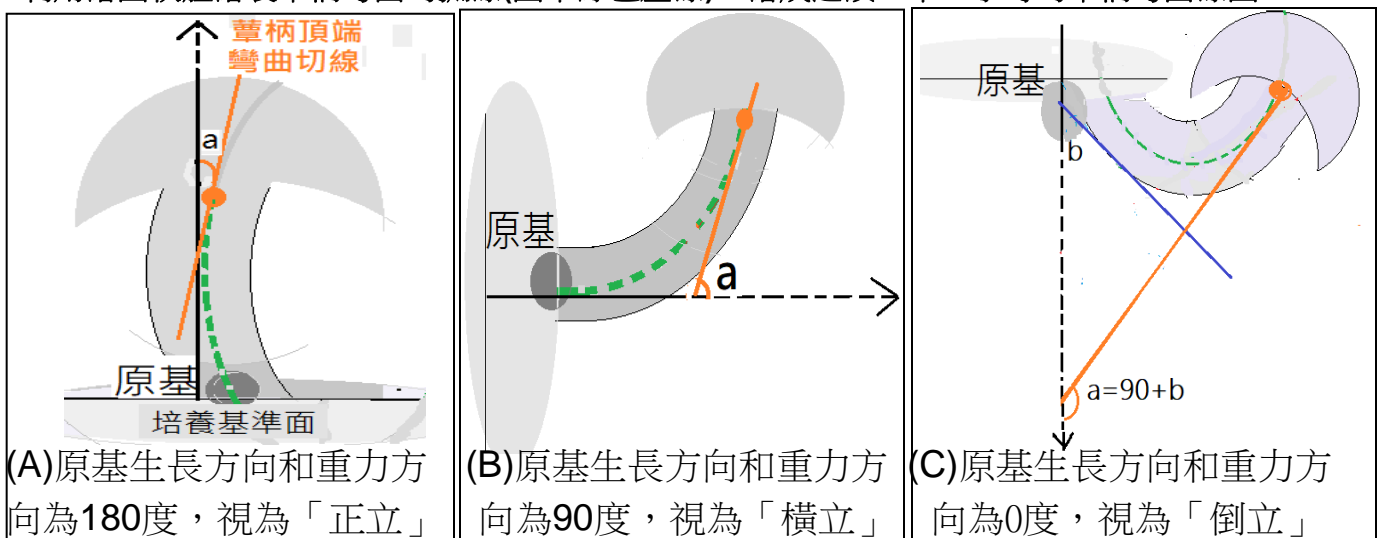
二、探討太空包栽培蕈菇對應重力刺激產生的向性表現

(一)觀察重力對不同蕈菇子實體在不同方向性彎曲生長之背地表現：

- 1.太空包於低溫狀態走菌完成後，將一太空包做切割處理之後，以不同方向置放(正立、橫立)或置掛(倒立)進行觀察。
- 2.不同方向性處理之定義：「正立」為原基(小菇蕾)生長方向和重力方向為**180度**，而原基(小菇蕾)生長方向和重力方向為**90度**，則視為「橫立」，「倒立」為原基(小菇蕾)生長方向和重力方向為**0度**(如圖六)，連續觀察**48小時**蕈柄的彎曲向性表現。

(二)探討子實體蕈柄感應地心引力產生背地彎曲之重力生長：

- 1.測量方式：架置縮時攝影機連續拍攝兩天，由發育的菇蕾開定義為「**0小時**」，每隔六小時由影片中擷取圖片，由於子實體蕈柄可能因為實驗彎曲生長，我們以量角器量取子實體蕈柄頂端的彎曲角度 (a 角，蕈柄頂部中軸線和原基方向之夾角)，和以棉線順彎曲蕈柄 (中軸)量取長度，量取部位為蕈褶基部(蕈褶和蕈柄連接處)至蕈柄基部，再以尺還原成毫米(mm)，不同的蕈菇作編碼進行連續觀察以紀錄蕈柄頂端彎曲角度和蕈柄長度的變化。
- 2.重力生長曲率：單位時間內(6小時)的角度變化除以長度變化【 $(a角 - 前6小時的a角) / (長度 - 前6小時的長度)$ 】，將數據進行整理製作統計圖以分析比較。
- 3.利用縮時攝影機連續拍攝兩天，觀察子實體蕈柄彎曲表現，每隔三十分鐘由影片中擷取圖片，利用繪圖軟體繪製蕈柄彎曲的弧線(圖中綠色虛線)，繪成連續二十四小時的蕈柄彎曲線圖。



圖六太空包蕈柄不同方向性重力刺激實驗 (A)正立(B)橫立(C)倒立(D)縮時攝影紀錄 (E)繪圖統計。

三、探討柳松菇在不同生長階段的向地性之差異表現

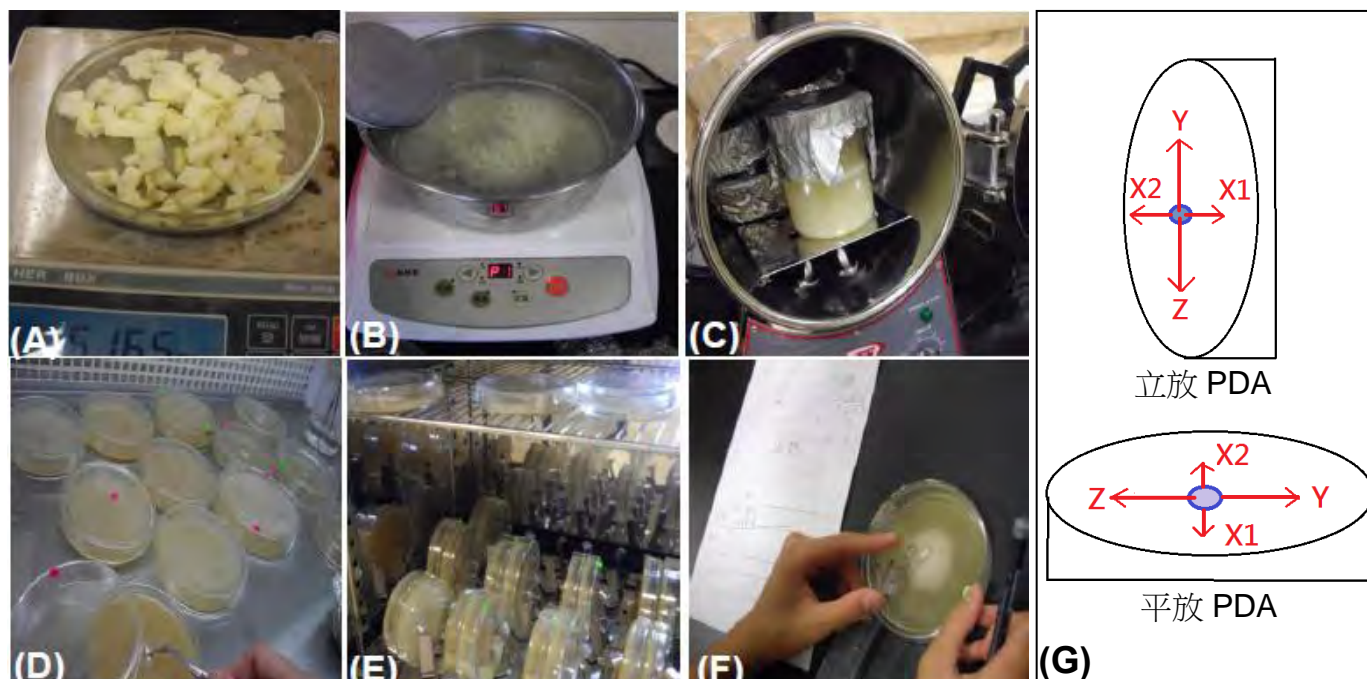
(一)觀察菌絲(組織分離培養)感應重力產生的差異生長：

1.配置馬鈴薯洋菜培養基 (potato dextrose agar, PDA)：

- (1)將馬鈴薯削皮切丁，取200 克置於鍋中，加入800ml 的水，以電磁爐煮沸再沸騰約30分鐘。
- (2)利用濾網過濾出高溫的汁液，再加入30 克蔗糖及20 克洋菜，以利將洋菜溶解，加水定量成1公升之比例配置完成 (依需求情況調整之)。
- (3)將培養基置於高溫高壓殺菌釜進行殺菌 (121°C, 1.2kg / cm²) 20 分鐘後，在無菌操作台將滅菌完成的的培養基趁熱倒入培養皿中(約培養皿1/3高度)，待培養基冷卻凝固即完成PDA。

2.重力因子影響蕈菇之組織分離培養菌絲的向性生長之觀察：

- (1)操作台以紫外燈殺菌一小時。
- (2)解剖用具和器皿置於高溫高壓殺菌釜進行殺菌 (121°C, 1.2kg / cm²)，實驗過程中所有器具，如鑷子、解剖刀等用75%酒精消毒，再用酒精燈烤過。
- (3)在自製無菌操作台內，取新鮮柳松菇浸泡在75%酒精30秒，以滅菌後之解剖刀切開柳松菇的子實體(蕈傘和蕈柄交接處)撕開進行組織分離，取下約1cm³菇體，切九宮格取中間一段，再切九宮格，以滅菌鑷子夾取內部乾淨無菌之菇肉約3mm³塊，接種於PDA 培養基上。
- (4)將接種菇肉的培養皿以「平放」和「立放」置放於控溫培養箱中(維持36°C)，培養14天內觀察不同方向性(X、Y、Z)菌絲生長情形，並以量尺量取菌絲生長長度，而拍照紀錄生長變化。(「Y-Z」垂直地平線(和重力方向平行)，Y為逆重力，Z為順重力。)



圖七 配置 PDA 組織分離培養實驗 (A)切丁的馬鈴薯秤重 (B)將馬鈴薯煮沸 30 分鐘 (C)待用培養基以高壓蒸氣殺菌釜滅菌 (D)取菌絲進行種菌 (E)種菌完成的 PDA 平放或立放於恆溫培養箱(F)觀察 PDA 菌絲生長並以量尺量取不同方向性的生長長度 (G)PDA 上 X-Y-Z 方向性之定義。

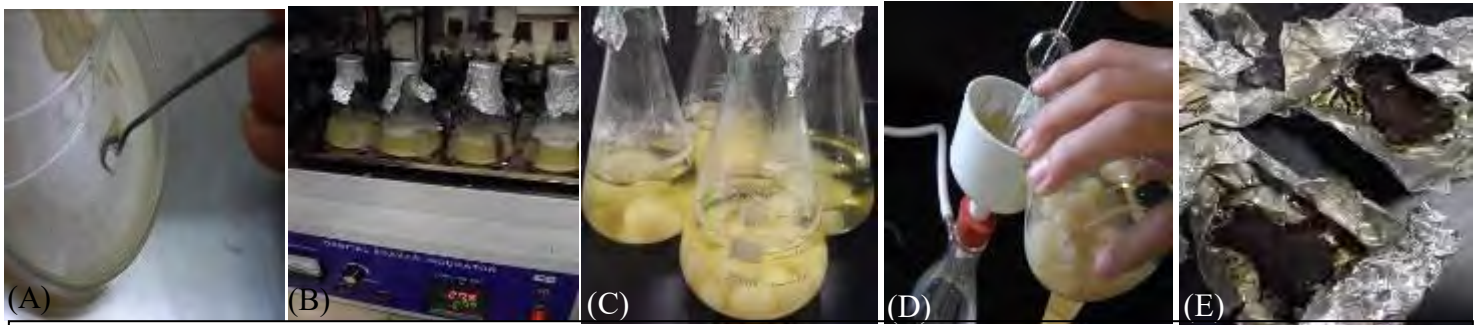
(二)研究旋轉離心對菌絲球體生長的影響



1. 在自製無菌檯內，以活化柳松菇的菌絲體，利用自製接種環由 PDA 中刮取一完整無污染分離菌絲體 3mm 正方塊入 100ml PDB 液體培養基錐形瓶中，恆溫振盪培養，觀察菌絲球體生長情形。(附註：「將培養基裝入培養瓶中，於其中接入發育洋菜培養基上的菌絲(約 3mm 方塊，連同洋菜塊一起挖取)，注意不要使菌絲體浮出液面」，以免菌絲體於液面生長成菌絲球，停止生長產生其它菌絲體，最後在 20°C 進行靜置或震盪培養，靜置培養需較長時間，震盪培養則約為 6~8 天。)

2. 菌絲球體乾重之測定

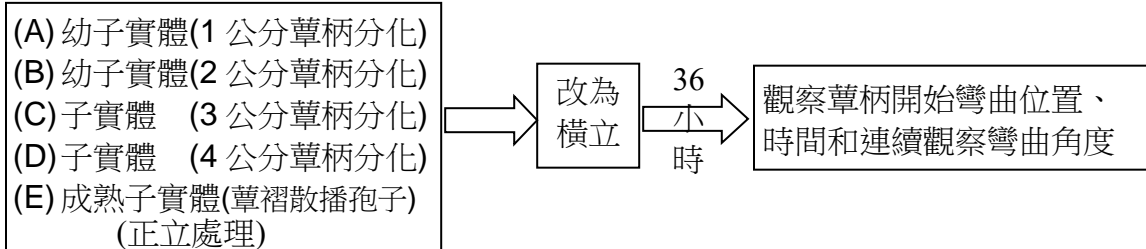
- (1) 以過濾瓶組裝過濾裝置，利用抽氣過濾將 PDB 培養基進行過濾，濾得其菌絲體。
- (2) 用鋁箔紙摺出小盒子，將過濾後濕的菌絲體用藥勺刮入已標記的鋁箔紙盒，精秤總重、記錄，鋁箔紙盒放入乾燥箱 105~110°C 乾燥六小時。
- (3) 將過濾物質乾燥完成後，並精秤乾重即可換算出乾菌絲體質量。



圖八 活化菇菌絲體和乾重測試實驗(A)以自製接種環在 PDA 取下一小塊柳松菇菌絲接種至 PDB (B)恆溫震盪以特定轉速培養菌絲球體 (C)PDB 中的菌絲球體 (D)抽氣過濾絲球體 (E)烘箱乾燥後菌絲體。

(三)觀察柳松菇子實體在不同生長時期感應重力的差異向地性表現

1. 太空包於低溫狀態走菌完全後進行切割，依下表不同組別的處理方式：



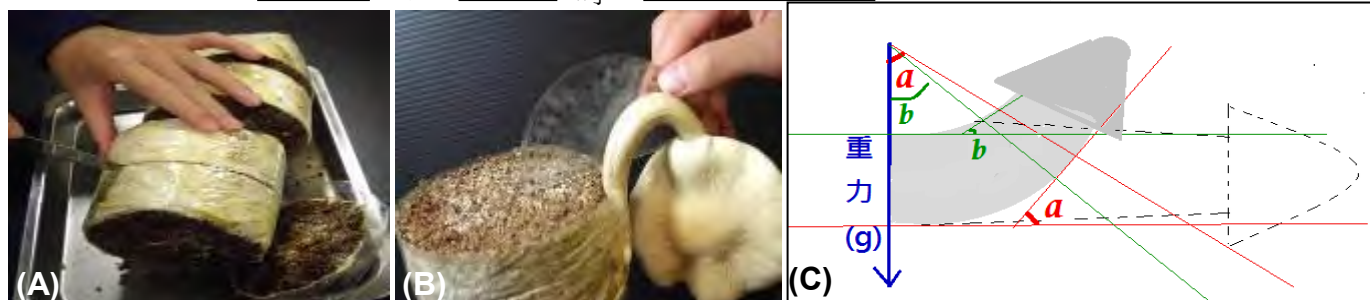
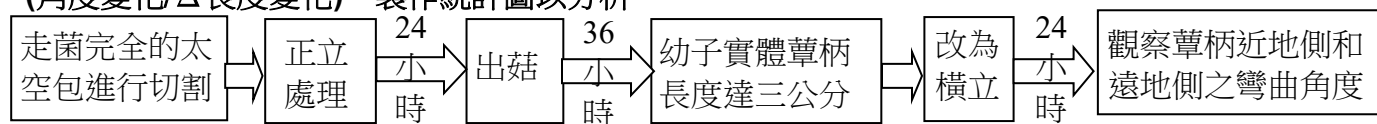
2. 以食用色素在葶柄頂端和葶帽之間做記號，利用縮時攝影機連續拍攝兩天，觀察子實體葶柄頂端彎曲表現和葶柄生長長度，每隔六小時由影片中擷取圖片，分別以量角器量取發育中子實體的彎曲角度，並以棉線順彎曲葶柄(中軸)量取葶柄的長度。

3. 重力生長曲率：單位時間內(6小時)的角度變化除以長度變化【(a角-前6小時的a角)/(長度-前6小時的長度)】，將數據進行整理製作統計圖以分析比較。另外，將葶柄頂端彎曲角度和葶柄增加長度的資料數據進行統計處理，製作X-Y分布統計圖以進行分析。

四、探討子實體蕈柄背地彎曲表現之基礎機制

(一) 觀察蕈柄感應地心引力產生背地彎曲之速率探討：

1. 柳松菇太空包於低溫狀態走菌完全後進行切割，待24小時出菇之後以正立處理36小時，待幼小子實體發育至蕈柄長度達3公分，改為「橫立」處理。並以紅色食用色素在蕈柄頂端和蕈褶之間做標記，以縮時攝影機記錄連續觀察紅色記號在蕈柄生長階段和彎曲過程的位置變化。
2. 分別以量角器量取子實體蕈柄近地側(外側)和遠地側(內側)的彎曲角度 (a角-近地側的彎曲角度和b角-遠地側的彎曲角度)，並以棉線順彎曲蕈柄(近地側和遠地側)量取蕈柄的長度，將蕈菇作編碼進行連續觀察以紀錄蕈柄彎曲角度和長度的變化。
3. 將資料數據進行統計處理，計算蕈柄生長變化率(= Δ 長度變化/前一小時長度)和重力生長曲率(角度變化/ Δ 長度變化)，製作統計圖以分析。



圖九 蕈柄感應重力產生向上彎曲的角度觀察(A)切割太空包 (B)(C)量取角度(外側 a 角和內側 b 角)。

(二) 探討蕈柄最大曲率點的重力影響和蕈柄細胞型態之測定：

1. 取新鮮柳松菇子實體的彎曲蕈柄，針對最大彎曲部位分別取近地側和遠地側的兩側部位切取 4-5mm 切片，此切片於置有濕濾紙的培養皿內以解剖刀進行縱切，取得 3-4mm 寬的菌絲束展開在載玻片上並壓碎，滴入甲基藍液待十分鐘後，蓋上蓋玻片後置入複式顯微鏡載物台上，配合數位式電子目鏡，在電腦螢幕上進行觀察，利用 DINO 軟體擷取照片。
2. 分別計數近地側和遠地側組織切片中單位面積內的細胞數目、細胞的長度和寬度以測微尺計測，測量三十個細胞，重複兩次各 60 個數據進行統計分析，以細胞長度為 X 軸和體積為 Y 軸作 X-Y 分布統計圖。

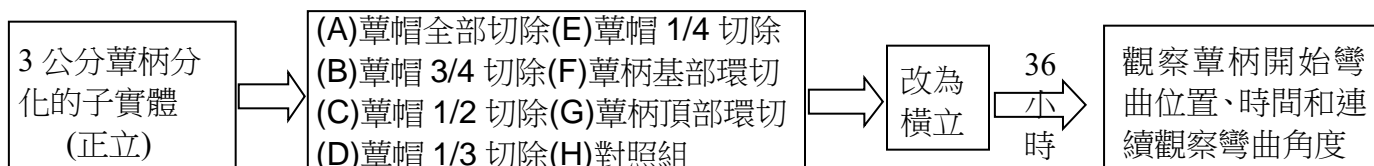


圖十 彎曲蕈柄細胞型態的顯微觀察 (A)以解剖刀分別取近地側和遠地側菌絲組織 (B)將組織置放載玻片，以甲基藍染料進行染色 (C)利用複式光學顯微鏡觀察 (D)DINO 軟體擷取圖片量測細胞長度。

五、探討蕈菇子實體對地心引力產生背地性的感應部位

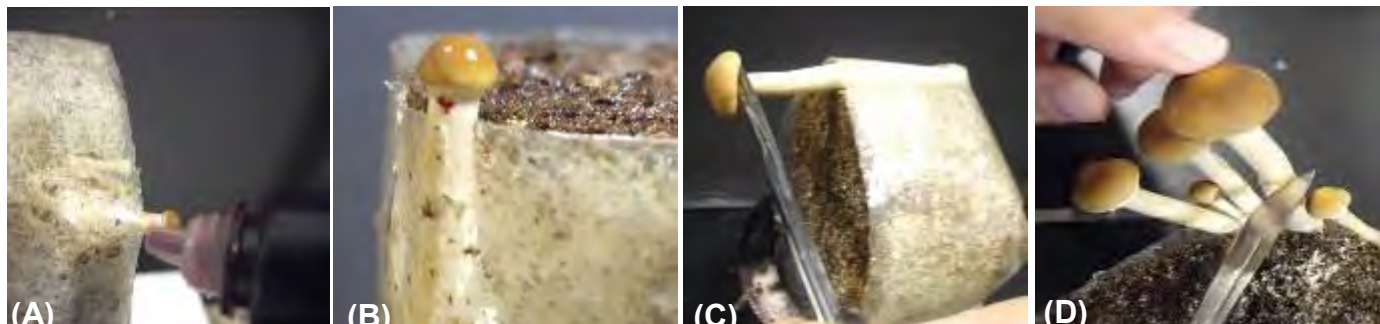
(一)研究子實體感應重力產生蕈柄彎曲的感應系統

1.太空包於低溫狀態走菌完全後進行切割，依下表不同組別的處理方式：



2.以食用色素在蕈柄頂端和蕈帽之間做記號，利用縮時攝影機連續拍攝兩天，觀察子實體蕈柄頂端彎曲表現和蕈柄生長長度，每隔六小時由影片中擷取圖片，分別以量角器量取發育中子實體的彎曲角度，並以棉線順彎曲蕈柄(中軸)量取蕈柄的長度。

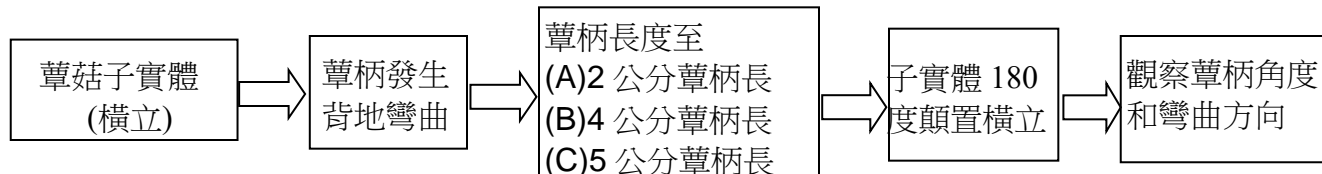
3.重力生長曲率：單位時間內(6小時)的角度變化除以長度變化【(a角-前6小時的a角)/(長度-前6小時的長度)】，將數據進行整理製作統計圖以分析比較。另外，將蕈柄頂端彎曲角度和蕈柄增加長度的資料數據進行統計處理，製作X-Y分布統計圖以進行分析。



圖十一 蕈柄感應重力的彎曲彎曲 (A)以紅色食用色素做標記定位 (B)蕈柄頂端的紅色記號 (C)切除蕈帽作背地彎曲觀察 (D)解剖刀環切蕈柄基部作背地彎曲觀察，比較彎曲角度和決定彎曲時間、位

(二)研究子實體重新感應重力方向產生蕈柄彎曲的回復性：

1.太空包於低溫狀態走菌完全後進行切割，依下表不同組別的處理方式：



2.以食用色素在蕈柄頂端和蕈帽之間做記號，利用縮時攝影機連續拍攝兩天，觀察子實體蕈柄頂端彎曲表現和蕈柄生長長度，每隔六小時由影片中擷取圖片，分別以量角器量取發育中子實體彎曲角度，並以棉線順彎曲蕈柄(中軸)量取蕈柄的長度。

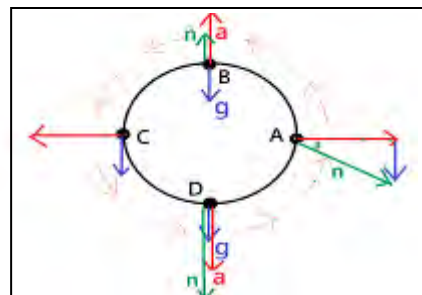
3.重力生長曲率：單位時間內(6小時)的角度變化除以長度變化【(a角-前6小時的a角)/(長度-前6小時的長度)】，將數據進行整理製作統計圖以分析比較。另外，將蕈柄頂端彎曲角度和蕈柄增加長度的資料數據進行統計處理，製作X-Y分布統計圖以進行分析。

六、探討旋轉離心對蕈菇的生長發育和向性表現之影響

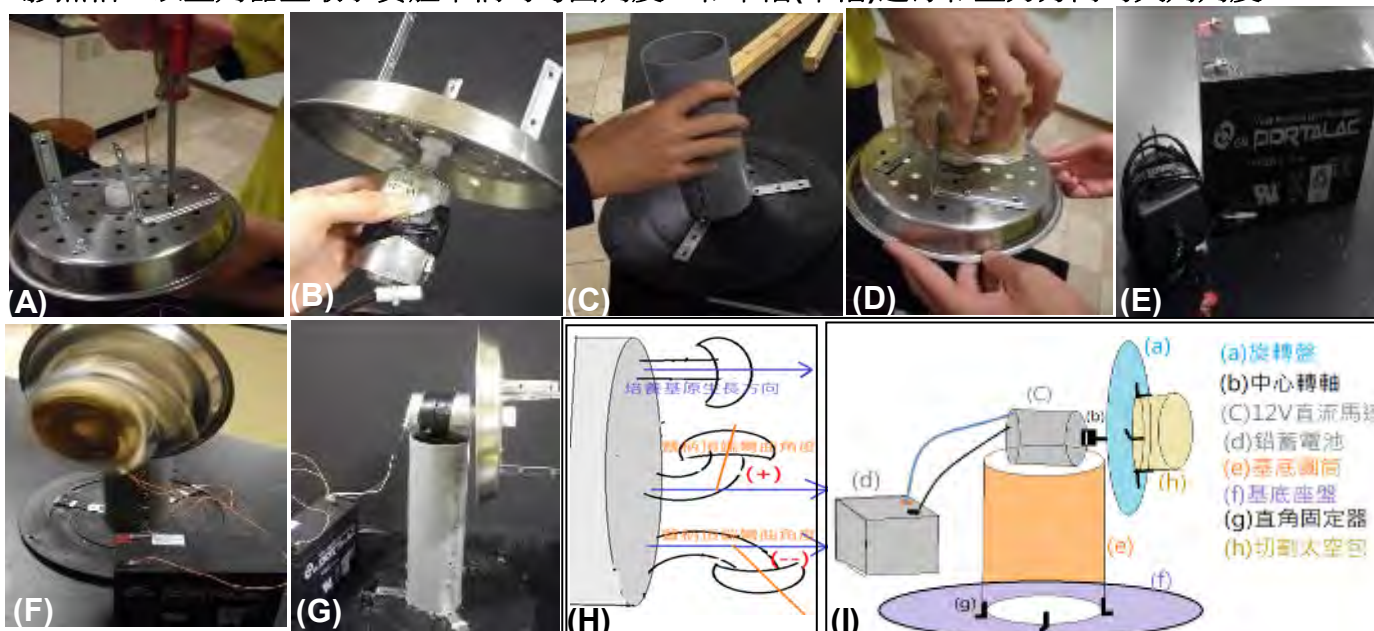
1.自製離心旋轉器：將中心轉軸**(b)**和12伏特直流馬達**(c)**以螺絲扭轉器固定於旋轉盤**(a)**，再將直角固定器**(g)**藉螺絲置於旋轉盤(配件見圖十三I)，以利蕈菇太空包的置放，完成離心旋轉盤的製作(圖十三B)。同樣利用直角固定器將塑膠基底圓筒**(e)**和底座盤**(f)**固定(圖十三C)完成基座，再將離心旋轉盤置放在底座上，最後離心旋轉器製作完成(圖十三G)。我們利用直流馬達以轉扭固定於旋轉鐵盤，驅動旋轉盤轉動，藉由12伏特鉛蓄電池連接直流馬達，以每分鐘**210**圈轉速 (210 r.p.m.)使旋轉盤上的蕈菇太空包進行旋轉(圖十三F)。

2.旋轉盤($r=6\text{cm}$)上的蕈菇會產生額外的G力(為gravity force，地球產生重力加速度)，因為物體在旋轉過程會產生的加速度稱之為「向心加速度」，旋轉的物體一直會對旋轉中心施加一個反向的力量，這個力量就是向心加速度造成的向心力 ($F=ma$, a 是向心加速度)，物體旋轉的速度(v)愈快，向心力就愈大，物體旋轉的半徑(r)愈小，向心加速度也愈大，向心加速度的計算公式 $a=v^2/r=4\pi^2r/T^2=(4\times(3.14)^2\times 0.06)/(2/7)^2=28.9872\text{m/s}^2=3\text{G}$)。因為向心加速度產生的G-force方向是和旋轉中心相反的「離心」方向(常被叫做「離心力」)，這時向心加速度產生3G的力，當蕈菇旋轉至旋轉盤的頂端時這個力是朝上的，減掉1G的重力向下，蕈菇仍受到1G的力向上；在旋轉盤底部時這個2G的方向也是向下的，蕈菇會受到3G的重力向下，因此圓形旋轉盤上的每一個位置，蕈菇受到G force重力大小和方向都持續快速在變化。

3.選取在「正立」生長的子實體蕈柄長度達3公分，將太空包置放於旋轉器上，分別以「正立」方向和「橫立」方向進行旋轉，觀察子實體蕈柄頂端彎曲表現和蕈柄生長長度，每隔一小時攝影照相，以量角器量取子實體蕈柄的彎曲角度，和蕈帽(蕈褶)邊緣和重力方向的夾角角度。



圖十二直立旋轉盤蕈菇受理解圖
g:重力加速度,a:向心加速度,n 總加速度

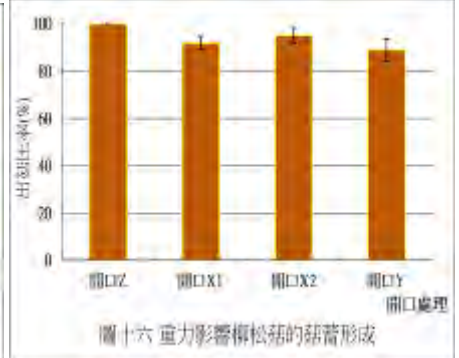
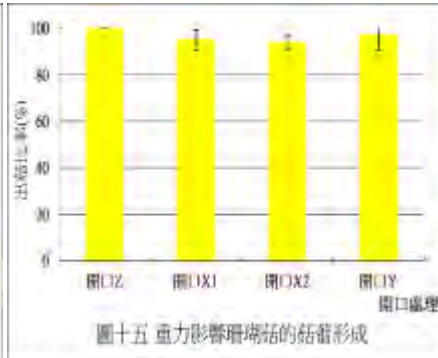
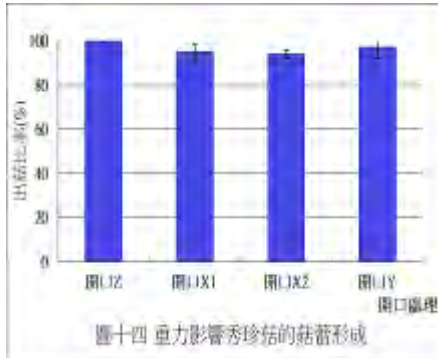


圖十三 離心旋轉器的製作 (A)用螺絲將直角固定器固定於旋轉鐵盤上 (B)直流馬達以中心轉軸和旋轉盤連接，完成離心旋轉盤製作 (C)圓筒以直角固定器作連接固定完成基座 (D)切割太空包置於旋轉盤上的直角固定器內 (E)鉛蓄電池和充電變壓器 (F)12 伏特鉛蓄電池連接直流馬達，驅動旋轉盤太空包 210r.p.m.轉動 (G)自製的離心旋轉器 (H)蕈柄彎曲角度測量(I)離心旋轉器結構設計簡圖。

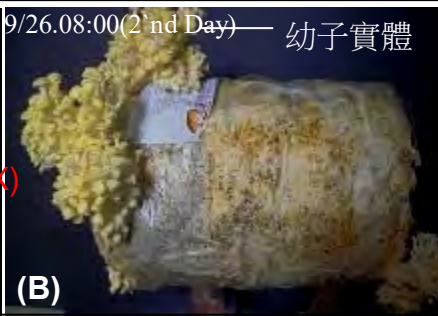
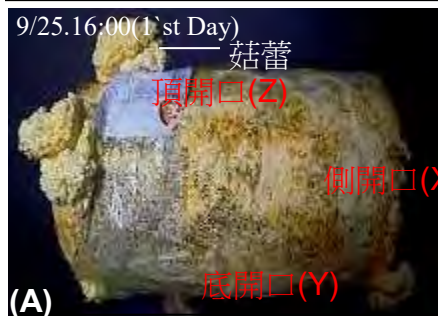
伍、實驗結果

一、地心引力對太空包栽培不同蕈菇子實體生長之研究：

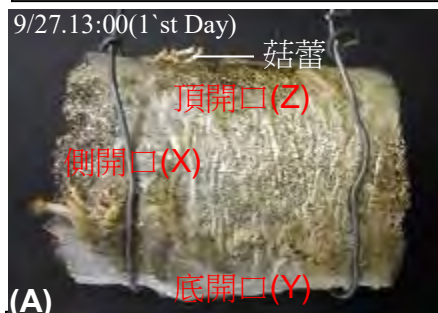
(一)地心引力對秀珍菇、珊瑚菇、柳松菇菇蕾形成的影響



圖十七秀珍菇太空包栽培在不同開口方向的成長發育過程：(A)菇蕾(B)幼子實體(C)成熟子實體。



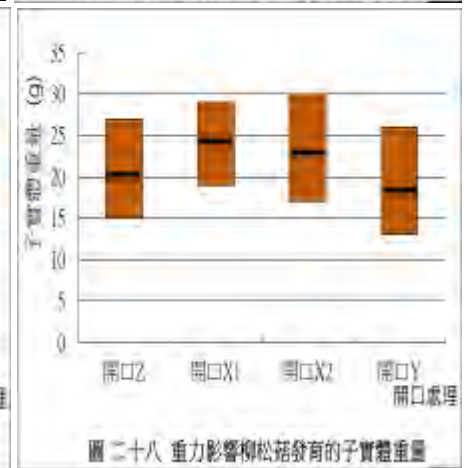
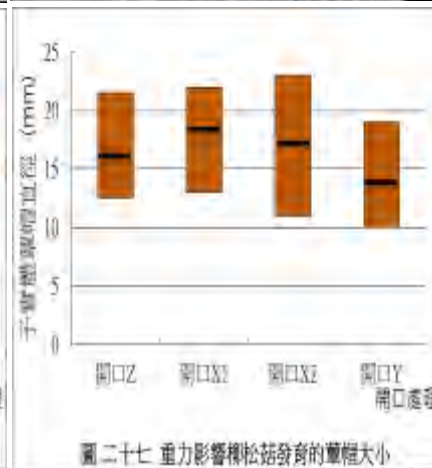
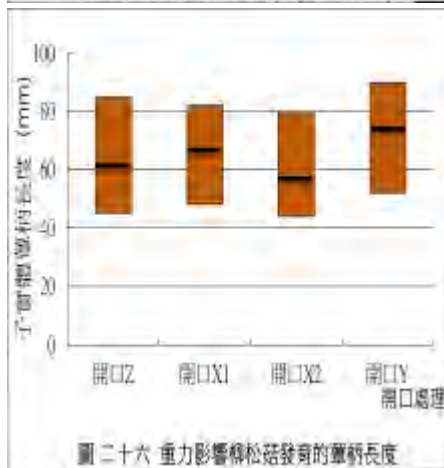
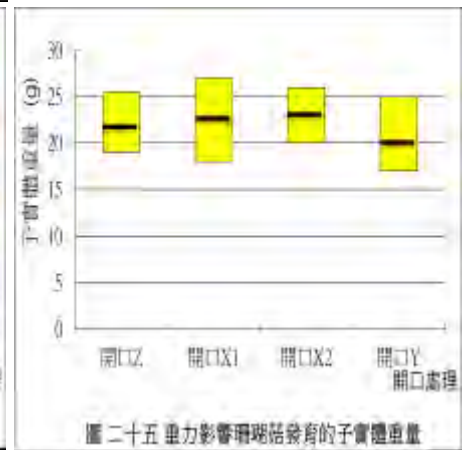
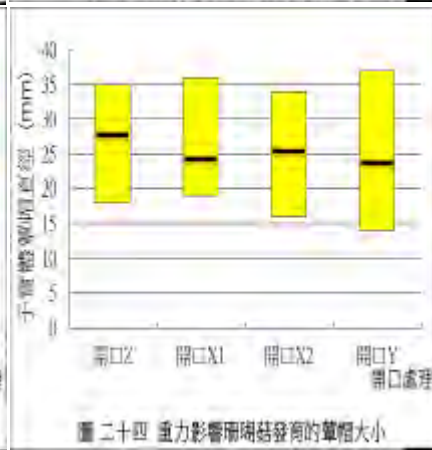
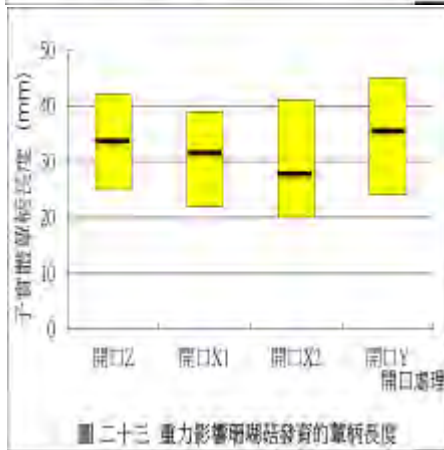
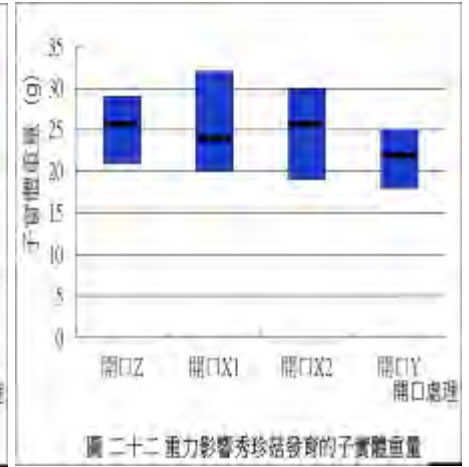
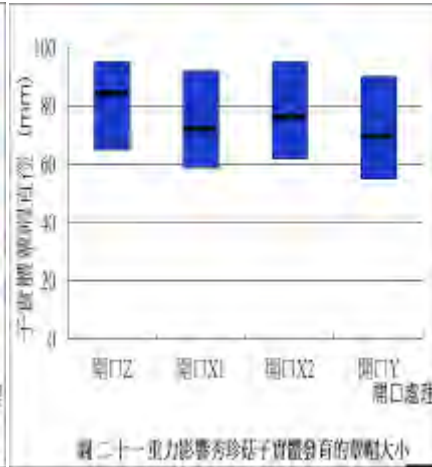
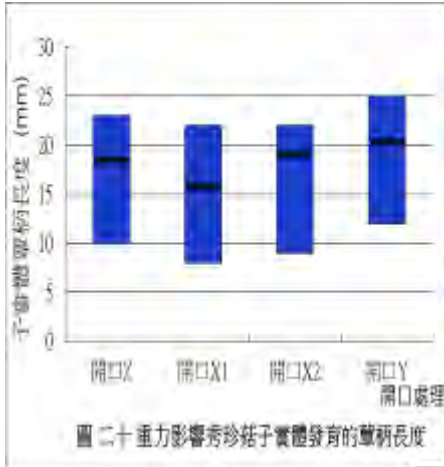
圖十八珊瑚菇太空包栽培在不同開口方向的成長發育過程：(A)菇蕾(B)幼子實體(C)成熟子實體。



圖十九柳松菇太空包栽培在不同開口方向的成長發育過程：(A)菇蕾(B)幼子實體(C)成熟子實體。

實驗結果發現太空包不同方向的開口，蕈菇發育過程中的菌絲聚集所形成的菇蕾數目，不論是在 X(側端)、Y(底端)或 Z(頂端)開口沒有顯著的差異，表示地心引力的刺激不影響秀珍菇、珊瑚菇和柳松菇的菇蕾生長，換言之地心引力對於蕈菇在早期階段的生長速率沒有產生任何影響。

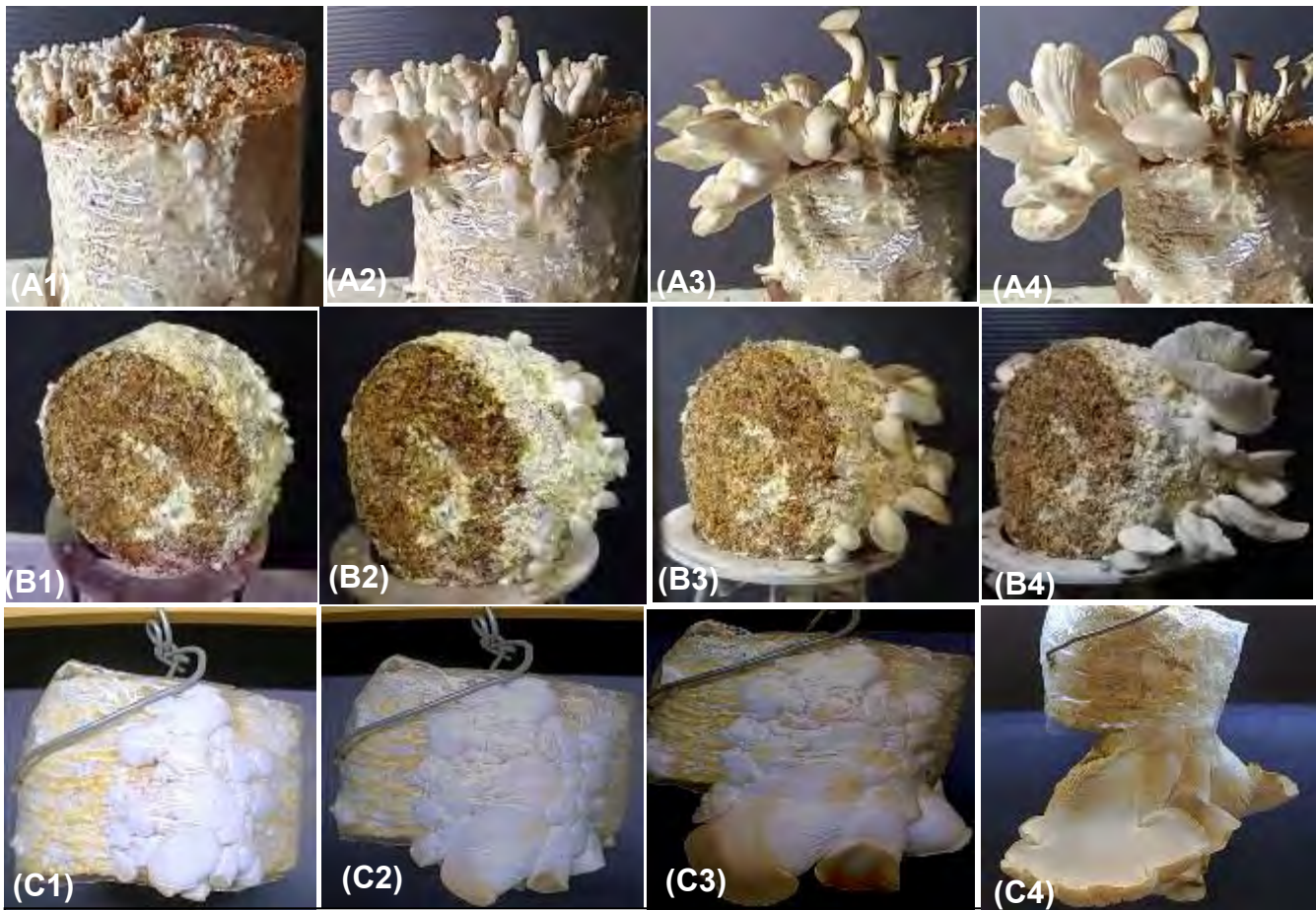
(二)地心引力對秀珍菇、珊瑚菇、柳松菇子實體發育的影響



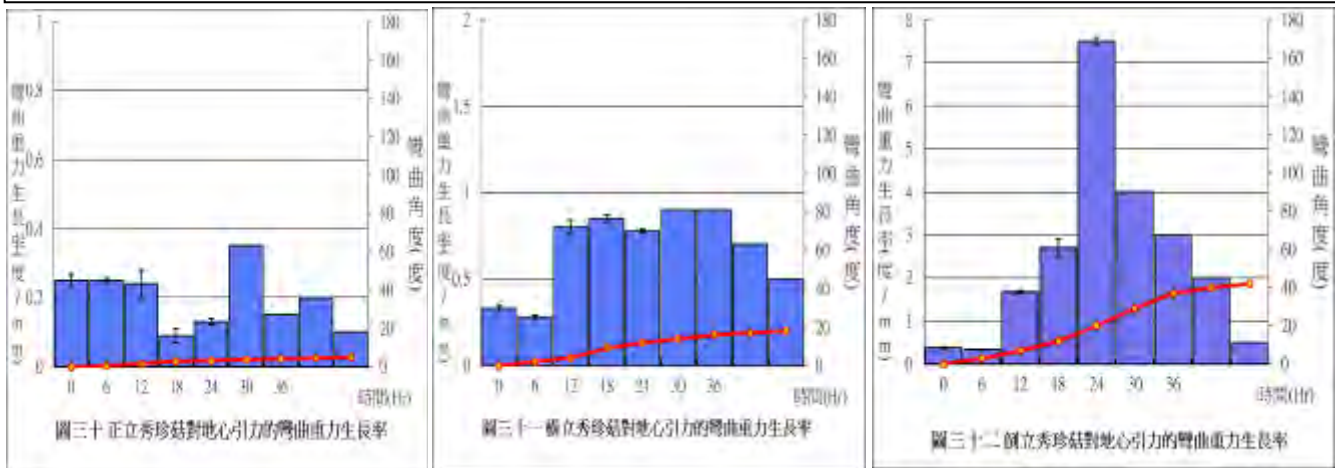
不論是秀珍菇、珊瑚菇或柳松菇太空包，在 X、Y 和 Z 方向的子實體生長發育過程中，無明顯的生長差異，包括菇蕾發育至幼子實體的莖柄長度和莖帽大小，甚至至成熟子實體的重量，在實驗結果統計上的平均值皆無顯著差異，但我們觀察到不論是 X 方向、Y 方向和 Z 方向的子實體莖柄皆出現「向上」的反應，其似乎暗示地心引力的刺激雖然不影響蕈菇生長，但有向性的表現，在光源四面分布均勻的光環境中，首先蕈菇原基垂直生長，最小的子實幼體垂直地從它們的基底生長，而後遠離其出現的表面，與重力方向似乎相關，莖柄的生長方向「遠離」重力方向。

二、探討太空包栽培蕈菇對應重力刺激產生的向性表現：

(一)觀察地心引力對秀珍菇子實體蕈柄在不同方向性彎曲生長之背地表現：

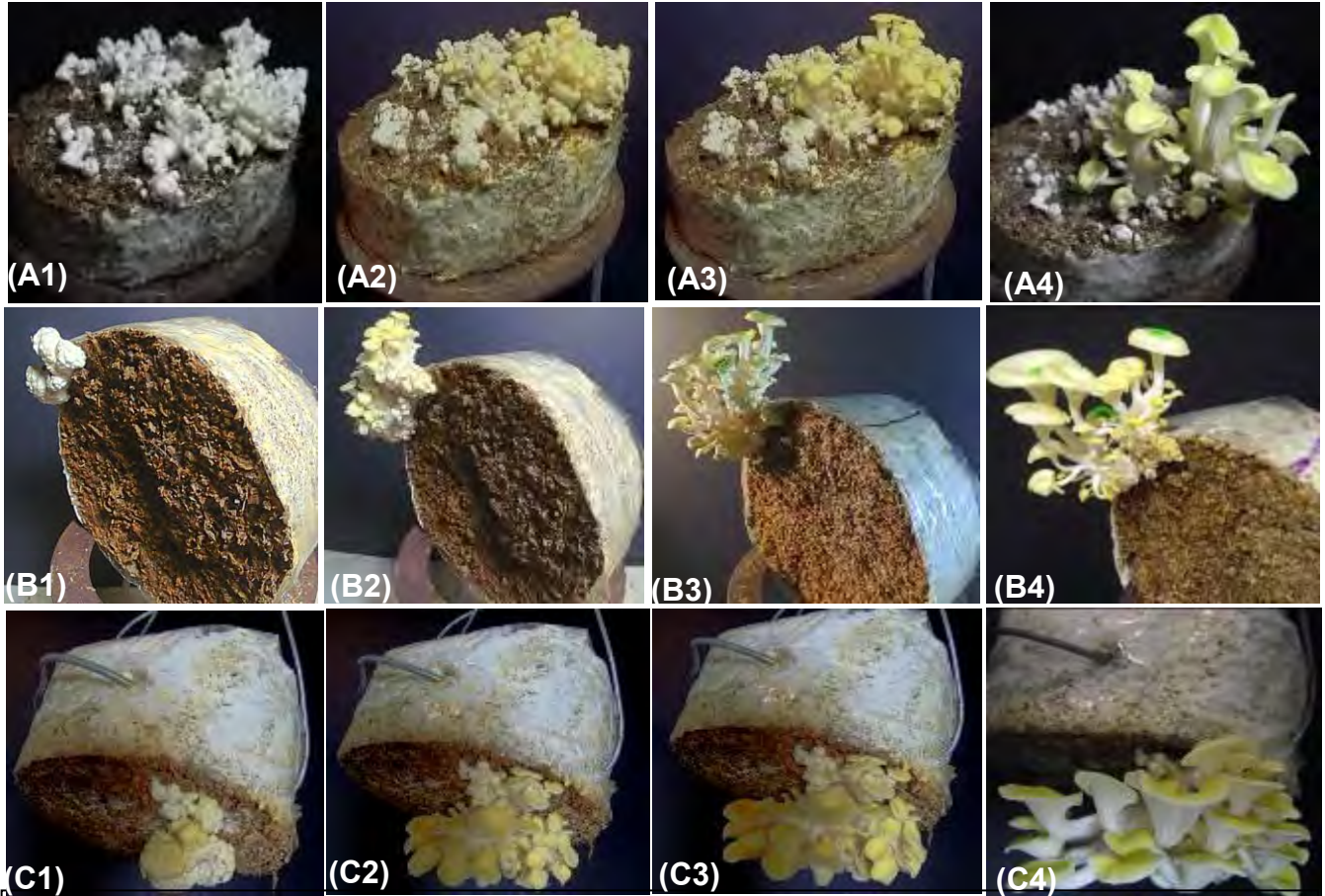


圖二十九秀珍菇太空包在「正立」「橫立」「倒立」中蕈柄彎曲向性表現 (A1)~(A4)「正立」太空包，(B1)~(B4)「橫立」太空包，(C1)~(C4)「倒立」太空包；(A1)(B1)(C1)第二天菇蕾形成，(A2)(B2)(C2)第三天幼子實體發育，(A3)(B3)(C3)第四天成熟子實體，(A4)(B4)(C4)孢子散播。

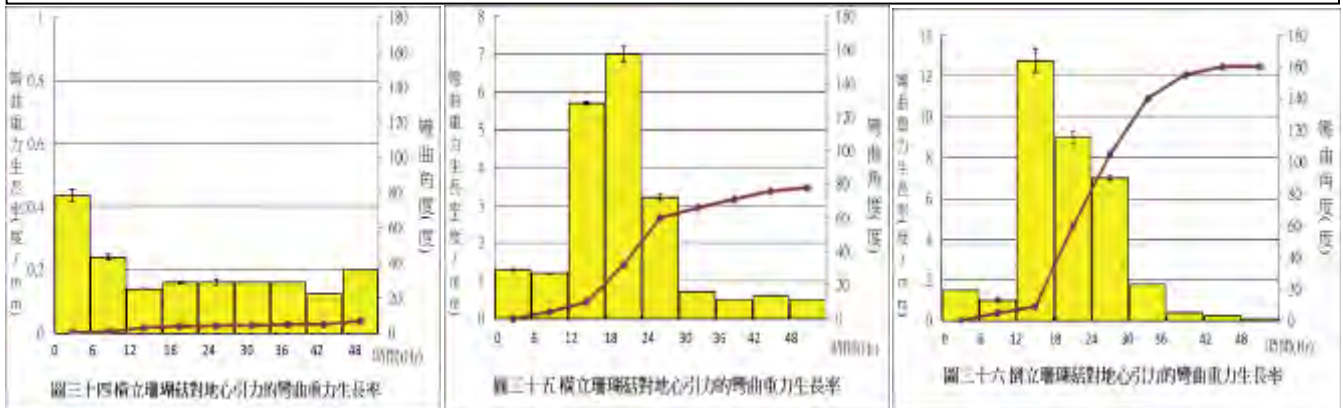


觀察秀珍菇子實體的向性表現，因為秀珍菇的蕈柄極短，只有1~3公分，結果發現不論是「倒立」組或「橫立」組在子實體發育早期蕈柄以增長為主，彎曲重力生長率不及1度/mm，蕈柄沒有明顯向上表現，「倒立」組蕈柄彎曲角度最大約只有40度，轉彎發生在菇蕾出現後24~36小時，接而蕈柄直徑增加，蕈帽快速變大，蕈褶發育顯著且向上，蕈帽最大彎曲角度超過60度，顯示子實體受到重力感應因為蕈柄短沒有明顯「負向地性」反應，但寬大的蕈帽補足「向上」表現。

(二)觀察地心引力對珊瑚菇子實體菌柄在不同方向性彎曲生長之背地表現：

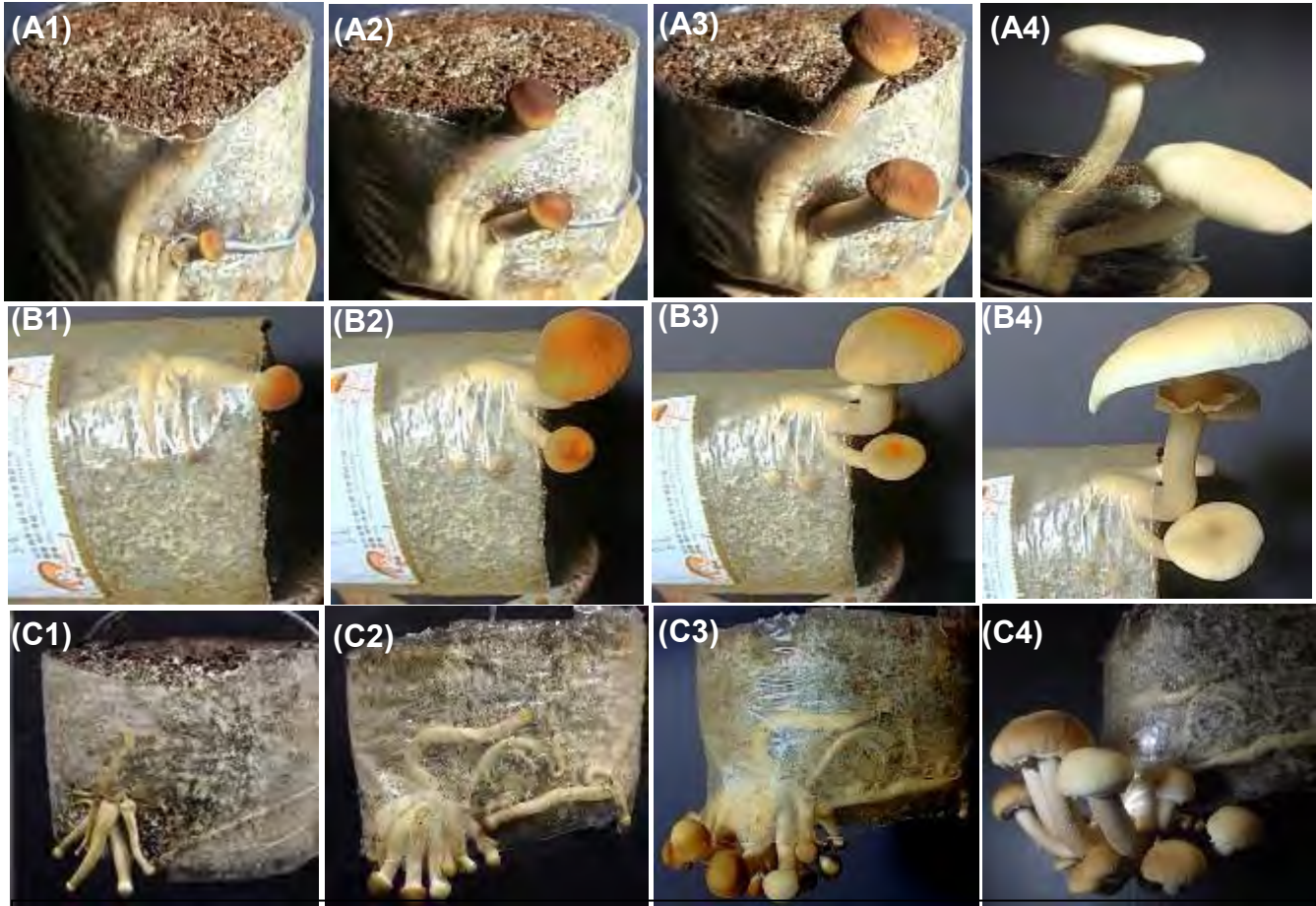


圖三十三珊瑚菇太空包在「正立」「橫立」「倒立」中菌柄彎曲向性表現 (A1)~(A4)「直立」太空包，(B1)~(B4)「橫立」太空包，(C1)~(C4)「倒立」太空包；(A1)(B1)(C1)第二天菇蕾形成，(A2)(B2)(C2)第三天幼子實體發育，(A3)(B3)(C3)第四天成熟子實體，(A4)(B4)(C4)孢子散播。

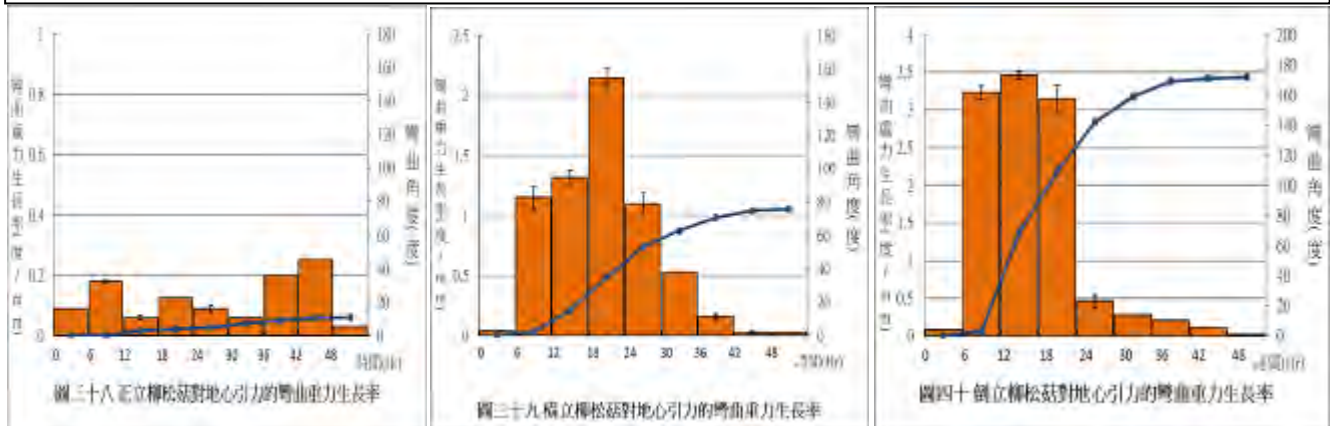


珊瑚菇子實體因菌柄較長，在觀察菌柄彎曲的向性實驗中容易觀察，結果發現「倒立」組的菌柄在菇蕾生成 12 小時(幼子實體的菌柄達 1 公分)開始出現彎曲，再經過 12 小時後菌柄彎曲角度達 100 度以上，彎曲重力生長曲率為 7.2 度/mm，約在菇蕾生成 30 小時的菌柄已達最大彎曲角度(近 160 度)，而「橫立」組菌柄也在菌柄發育階段時開始彎曲向上，24 小時內出現彎曲角度約 85 度，顯示子實體菌柄在早期發育過程受到重力感應即產生「負向地性」反應。

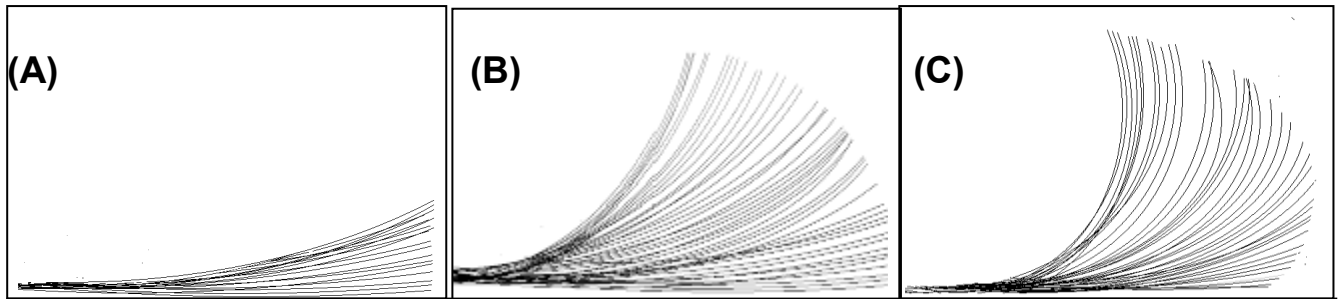
(三)觀察地心引力(重力)對柳松菇子實體菌柄在不同方向性彎曲生長之背地表現



圖三十七 柳松菇太空包在「正立」「橫立」「倒立」中菌柄彎曲向性表現 (A1)~(A4)「直立」太空包，(B1)~(B4)「橫立」太空包，(C1)~(C4)「倒立」太空包；(A1)(B1)(C1)第二天菇蕾形成，(A2)(B2)(C2)第三天幼子實體發育，(A3)(B3)(C3)第四天成熟子實體，(A4)(B4)(C4)孢子散播。



由於柳松菇生長以叢聚或分生方式，和子實體的菌柄長度長，非常適合作為觀察菌菇向性的表現，我們發現而「橫立」組菌菇的向性表現和珊瑚菇相似，菇蕾發育成子實體出現 1 公分以上長度的菌柄，漸漸開始彎曲向上，彎曲重力生長曲率為 1.32 度/mm 增加至 18 小時的 2.15 度/mm，彎曲幅度超半，30 小時時已達最大彎曲角度約 85 度。「倒立」組在菇蕾生成 12 小時內菌柄長度增加慢但明顯彎曲，之後菌柄出現急速彎曲角度達 100 度以上，彎曲重力生長曲率 3.2 度/mm，約在菇蕾出現後的 36 小時子實體的菌柄已達最大彎曲角度(近 80 度)，和地平線近乎垂直，結果似乎表示幼子實體在發育階段中菌柄即受到重力感應就能產生「負向地性」表現。

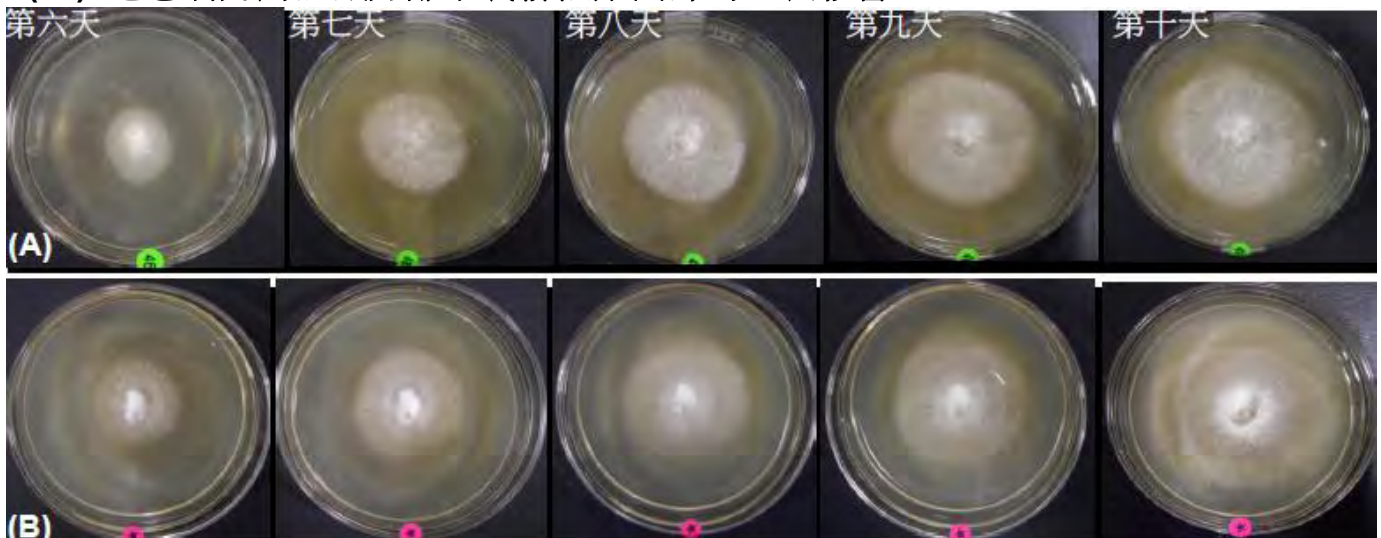


圖四十一不同蕈菇蕈柄彎曲的背地性表現。在「橫立」組實驗的向性過程中以縮時攝影拍攝影像，每 30 分鐘連續 24 小時，以繪圖軟體繪製蕈柄彎曲的曲線成圖。(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)柳松菇。

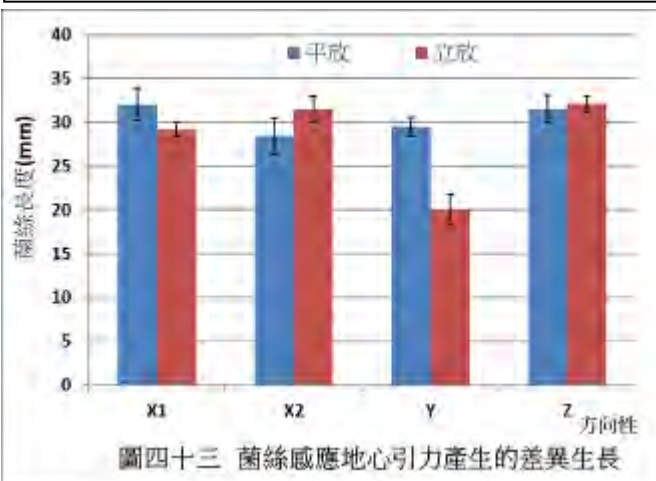
不同蕈菇置於水平面的方向，以電腦軟體繪製蕈柄彎曲變化，我們發現蕈柄的背地彎曲表現以叢生和單獨生長的柳松菇彎曲角度大而明顯，但是密集成簇的珊瑚菇在蕈柄彎曲易被壓迫，有趣的是秀珍菇的蕈柄短且背地角度小，其主要是藉由成熟的蕈褶向上引領蕈帽的背地表現，使孢子由蕈褶垂直落下。我們可以利用此圖像模型做為蕈柄彎曲角度的預測，進一步我們以蕈柄較長且多單獨生長的柳松菇做為容易觀察的實驗對象，探討柳松菇在不同生長階段感應重力的向性反應和子實體如何感應重力刺激產生背地彎曲的機制。

三、探討柳松菇在不同生長階段對地心引力刺激的向性表現：

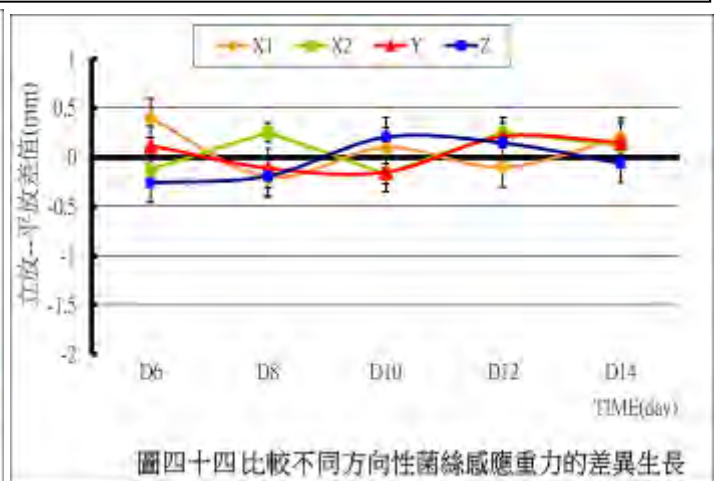
(一) 地心引力對組織分離培養柳松菇菌絲的生長影響



圖四十二 地心引力影響柳松菇蕈菇組織分離培養之菌絲生長 (A)平放 (B)立放。



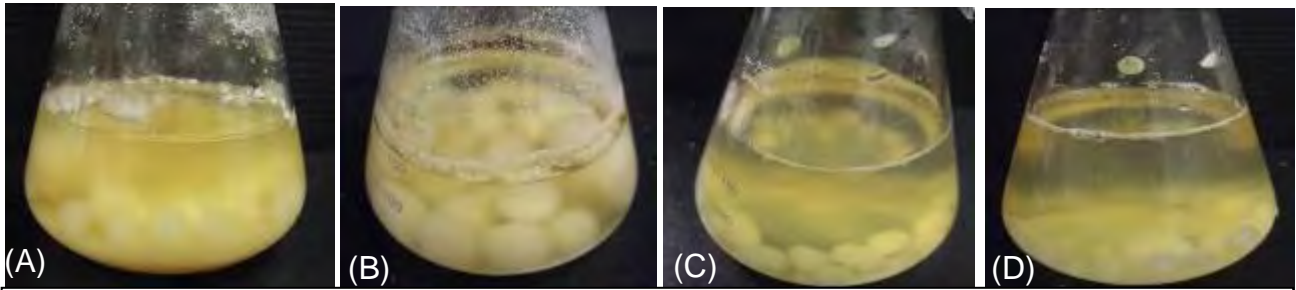
圖四十三 菌絲感應地心引力產生的差異生長



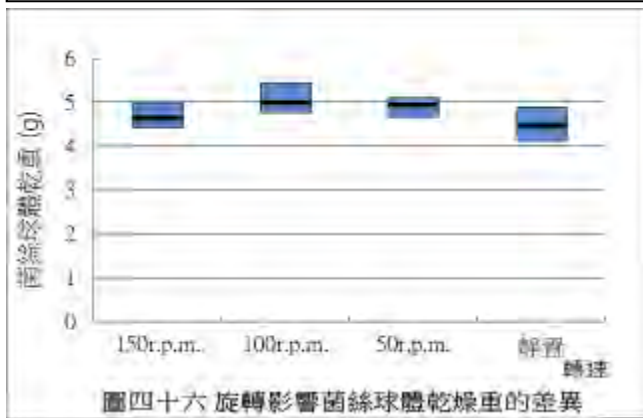
圖四十四 比較不同方向性菌絲感應重力的差異生長

我們利用柳松菇組織分離培養實驗，研究蕈菇在早期的菌絲生長時期是否會感應重力的刺激出現向性反應，在「平放」組別中，不論是 X1、X2、Y 和 Z 方向接受地心引力的刺激強度是相同，菌絲生長的速度在不同的方向性無明顯差異，似乎是隨機，沒有朝向特定的方向；而「直立」組別的「Y 方向」菌絲在初期階段(前八天)生長速度和其他方向相比亦無具明顯差異性，之後的菌絲生長長度和其他方向性相比，似乎也沒有差異的趨勢。實驗結果似乎暗示蕈菇在菌絲生長階段並無「負向地性」或「正向地性」的反應，在聚集形成菌絲球體之前的菌絲生長時期不受「重力」影響，不會發生向性反應，似乎暗示柳松菇在發育形成子實體階段才能感應重力，使的蕈柄發生重力彎曲的反應。

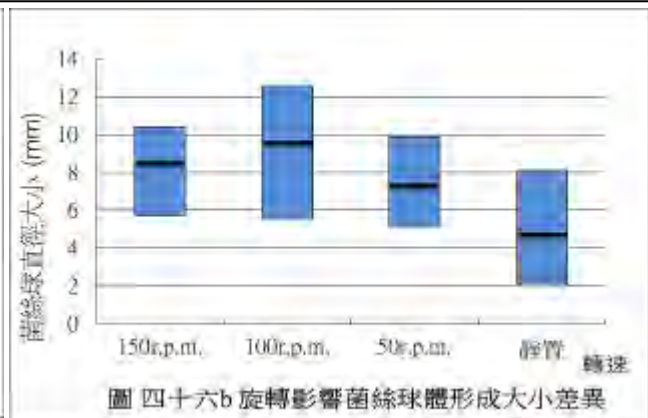
(二)旋轉對蕈菇菌絲球體生長的影響



圖四十五 不同轉速影響菌絲球體生長的 PDB 試驗。(A)高速 150r.p.m.轉速，(B)中速 100r.p.m.轉速，(C)低速 50r.p.m.轉速，(D)靜置。



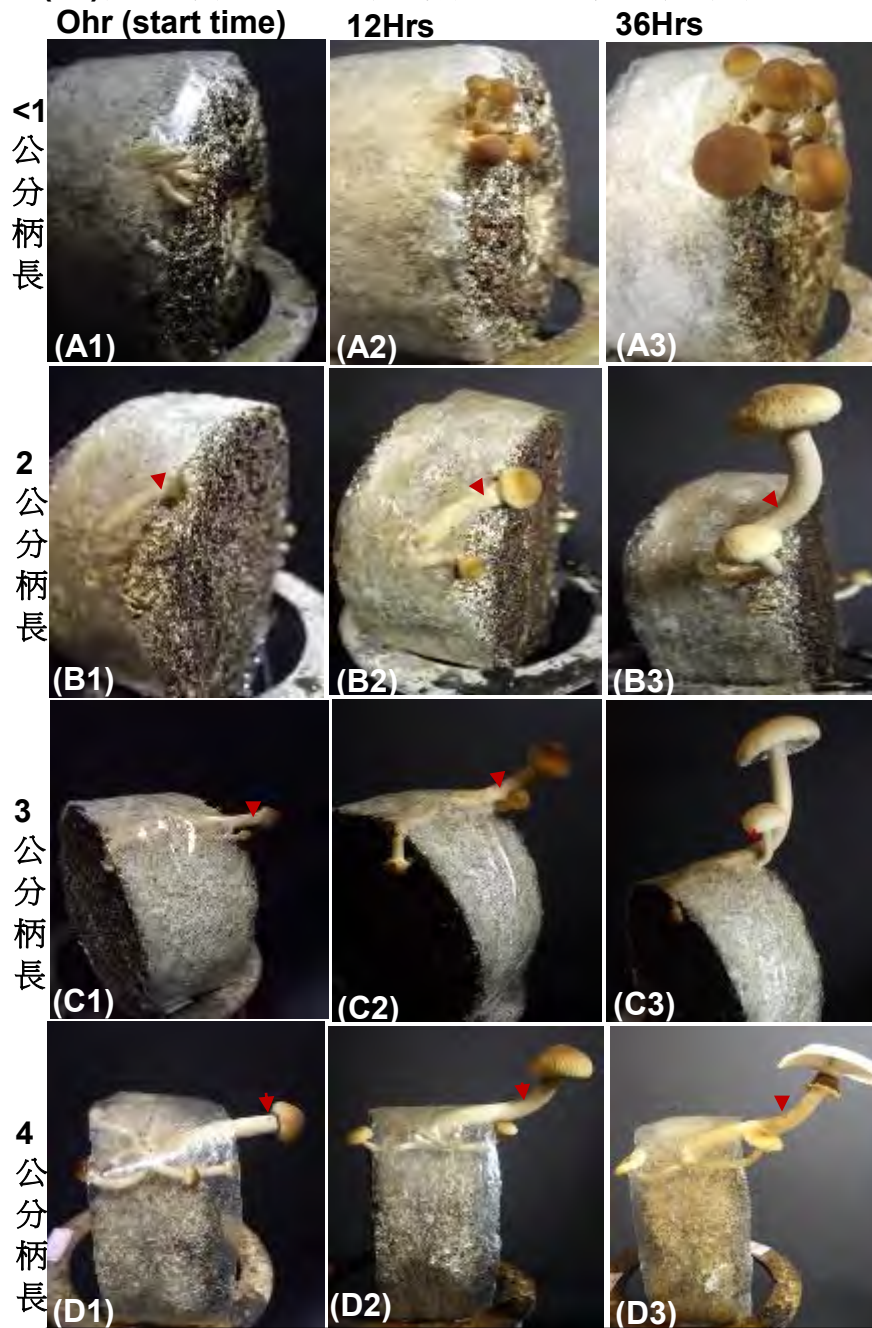
圖四十六 旋轉影響菌絲球體乾重之差異



圖四十六b 旋轉影響菌絲球體形成大小差異

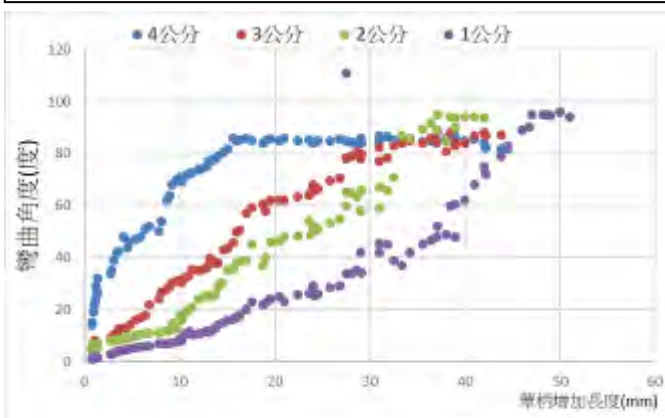
我們好奇柳松菇菌絲分裂聚集而成產生菌絲球體的階段，菌絲球的形成是否會受到重力的變化產生改變。柳松菇菌絲在不同轉速的培養液中進行活化，實驗結果發現活化菌絲球體第三天，旋轉組的菌絲球體已完全包覆形成球狀體，瓶中同時有一點一點的小菌絲球體形成，而靜置組約在第五天出現類似的現象，至活化的第七天，小菌絲球體已明顯增長為清楚的菌絲球體，快速旋轉組的菌絲球體數量多但體積不大。雖然旋轉速度大小可能使得菌絲受重力的程度有所差異，我們發現不同轉速組別形成菌絲球體的型態皆為球狀大致相同，進一步以抽氣過濾烘乾得到菌絲球體的乾重，我們發現不論轉速大小皆不影響菌絲球體乾重，三者之間無顯著的差異，但靜置組菌絲球體產量略低，可能是因為養分沉澱無法充分提供生長需求導致。綜合以上結果我們得知蕈菇生活史的菌絲階段不受重力影響產生向性，甚至菌絲聚集形成菌絲球體也沒有受到重力改變而有所差異，這似乎暗示蕈菇需要發育分化成子實體才會受到地心引力的刺激而有向性的表現，接著我們進一步研究子實體發育在不同階段過程中，蕈柄生長至不同長度時感應重力的程度。

(三)探討蕈菇不同生長時期的向地性差異表現

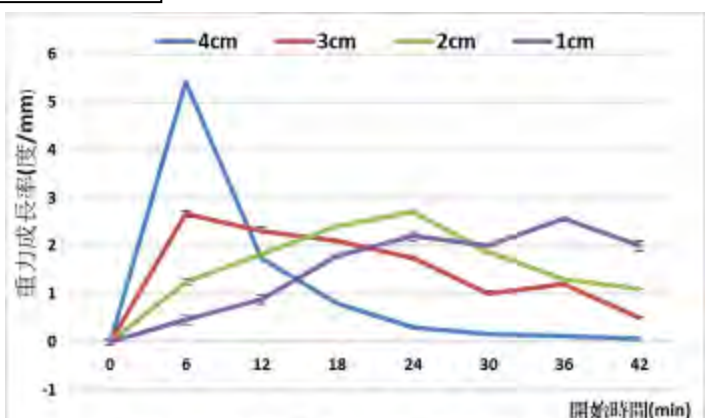


圖四十七 不同生長時期子實體對重力感應的背地彎曲表現。

我們好奇子實體發育不同階段過程中，不同長度蕈柄的子實體感應重力的程度是否具有差異。我們以不同長度蕈柄的子實體作為實驗對象，實驗結果中蕈柄生長小於 1 公分(蕈帽只有 0.2 公分) 的柳松菇幼子實體由正立轉為橫立後六小時內尚未明顯表現向地性反應，在反應 12 小時後重力成長曲率達 1.12 度/mm，36 小時之後當蕈柄長度大於 5 公分以上蕈柄彎曲角度大於 80 度，蕈帽已成熟狀態。蕈柄愈長組別產生向性反應的時間愈早，2 公分長蕈柄在 6 小時後重力成長率達 1.43 度/mm 以上，和 3 公分長蕈柄向性表現更明顯已達 2.73 度/mm，4 公分長的組別在 6 小時內蕈柄已背地彎曲角度達 65 度，重力成長率達 5.83 度/mm，24 小時之後蕈柄增長至 8 公分，暗示愈長蕈柄愈能感應重力產生向性反應。但是蕈帽發育成熟直徑達 4 公分，則蕈柄不再進行彎曲，我們推測蕈帽的向下運動已將蕈褶帶回「垂直」，若當蕈帽成熟才改變重力刺激方向則柳松菇蕈柄不再出現向地反應，因為蕈帽成熟當擔孢子在重力的影響下已自由落下，則蕈帽無需將蕈褶「重新」向下。蕈帽和蕈柄頂端(紅色記號標記)在向上背地過程，似乎具有「引導」角色功能，細胞的增長導致記號位置以上的蕈柄部位向上延伸，使蕈褶近乎「垂直」。



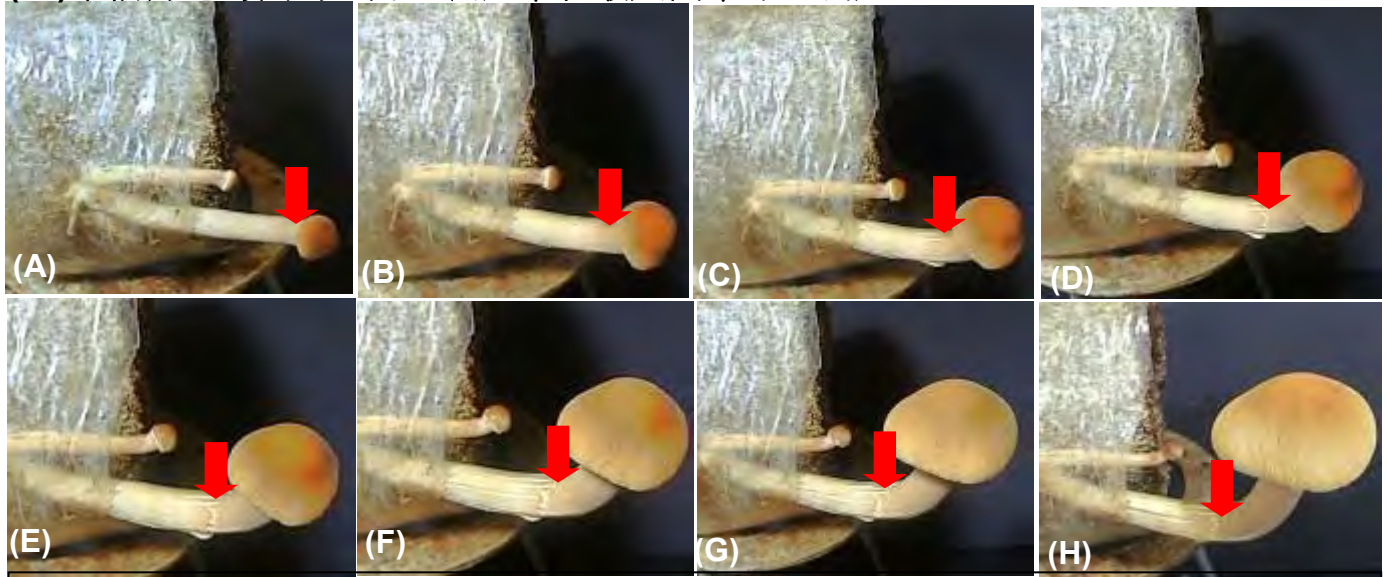
圖四十八 不同長度蕈柄長感應重力的反應程度



圖四十九 不同蕈柄長度背地性的重力成長率

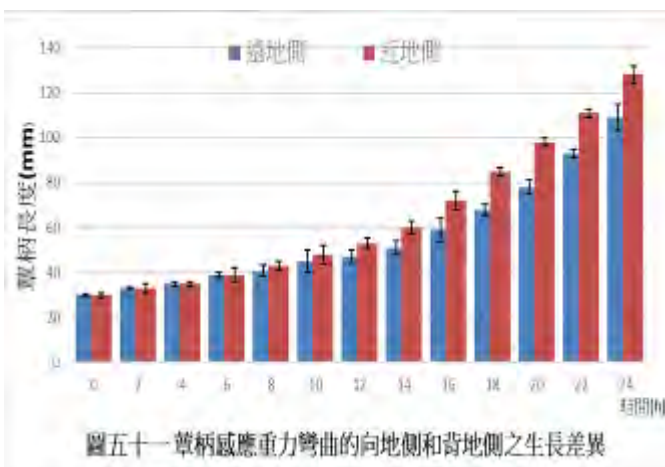
四、探討蕈柄感應地心引力的曲率點背地表現的機制探討

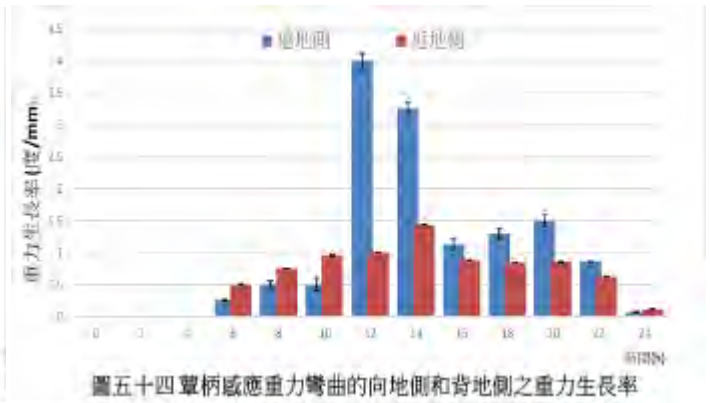
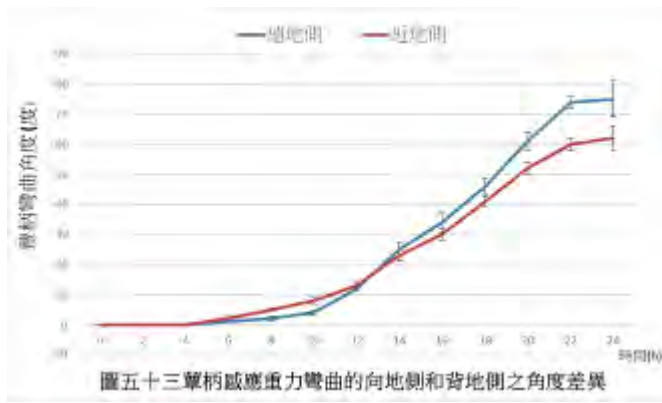
(一) 蕈柄背地彎曲的重力生長速率和最大曲率點之測定



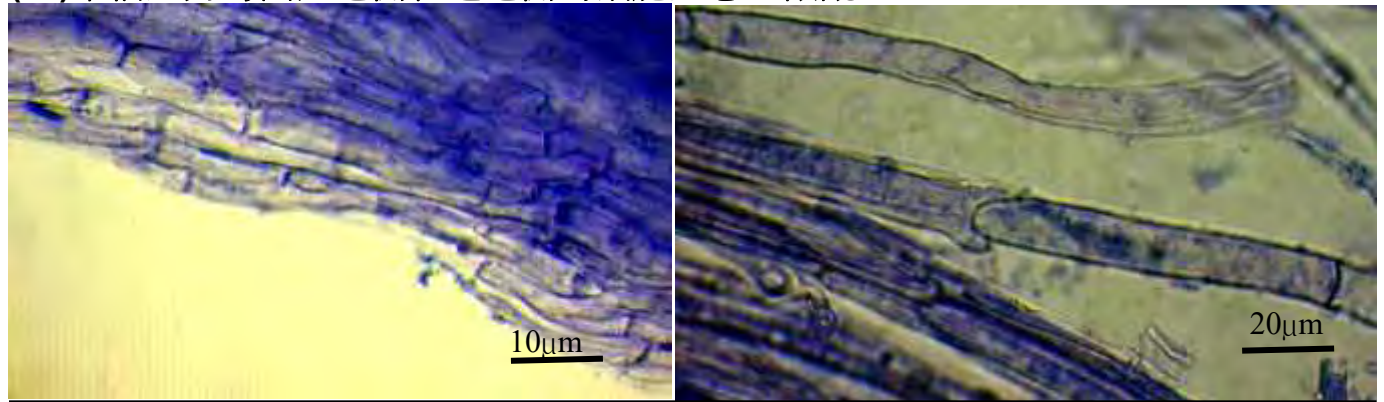
圖五十 柳松菇蕈柄背地彎曲。實驗過程中由縮時攝影拍攝紀錄影像，由影像中擷取圖片(A)~(H)為每隔 4 小時之蕈柄彎曲過程。(紅色箭頭為紅色色素標記位置)

我們選擇 3 公分蕈柄長的子實體探討蕈菇感應地心引力產生向性彎曲的機制。由連續觀察發現柳松菇子實體蕈柄在向性反應進行彎曲生長，彎道發生在蕈柄頂點附近(紅色色素標記)，似乎由蕈柄頂端開始出現向性轉彎。之後曲率漸大，子實體發生重力彎曲過程，蕈柄中間及頂端部位長度快速伸長達平均每個小時延伸長度 6.6mm，我們猜測蕈柄快速延長可能是細胞長度或體積增加造成，而且觀察到蕈柄近地側(外側) 在 2 小時內加速到最大生長率，蕈柄生長期達 1/2 階段時，蕈柄重力彎曲率達最大，尤其遠地側細胞似乎開始決定彎曲角度。當蕈柄快速生長期達 3/4 階段時，蕈柄之中間部位的細胞包括近地側持續維持快速高生長率，最後蕈柄兩側面以大致相同的速率向上伸長，但當子實體發育至蕈傘直徑 35mm 時，蕈柄長度停止延長。由此向性過程得知「近蕈柄頂端」約 20%-30%之處開始發生轉彎，而後蕈柄向上延伸長度，使蕈褶「垂直」。

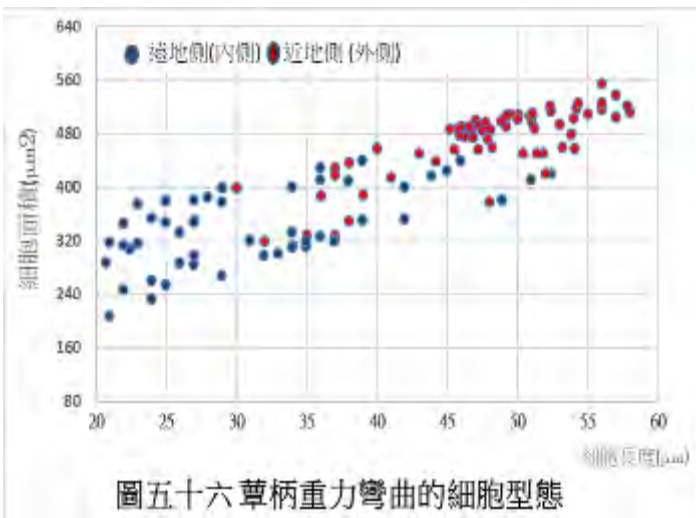




(二) 蕈柄重力彎曲遠地側和近地側的細胞型態之微觀：



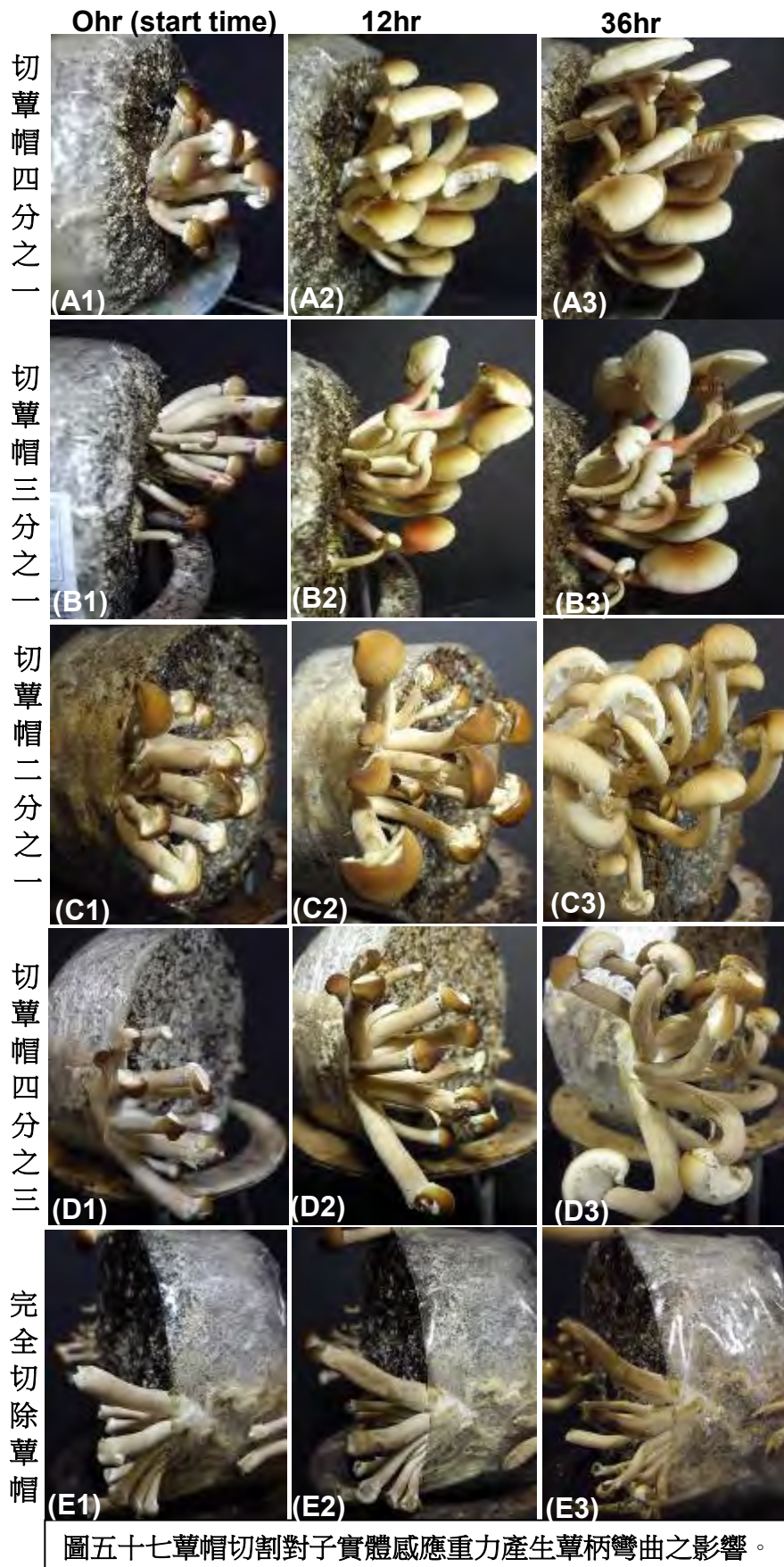
圖五十五 柳松菇蕈柄背地彎曲之遠地側和近地側之細胞型態。(A) 遠地側(內側)，(B) 近地側(外側)。



藉由顯微實驗觀察蕈柄彎曲處的細胞型態，我們取最大彎曲處的蕈柄遠地一側和近地一側的組織進行縱切和染色，觀察兩側細胞的長度、面積變化。子實體發育時，在蕈柄彎曲處的近地側細胞相較遠地側細胞有較快延長生長速率，但顯微實驗結果觀察在蕈柄兩側的細胞數目並無顯著差異，而近地側(外側)細胞的長度相對遠地側(內側)細胞約有 2-3 倍的差異性，且近地側的細胞面積也明顯大於遠地側細胞，我們推測蕈柄兩側細胞生長速率差異造成細胞大小不同使得蕈柄發生背地彎曲的向性表現。我們也進一步想探討蕈柄細胞感應重力的機制原因，是否如同植物根細胞感應重力因為澱粉體沉澱而有向地性表現，在細胞顯微實驗中藉由碘液染色並無觀察到不同背地彎曲階段，蕈柄細胞中有澱粉體出現(Data not shown)，但是我們猜測可能其他成分的物質分布在背地一側，訊號分子的累積導致向性的發生。

五、探討蕈菇感應重力的系統部位

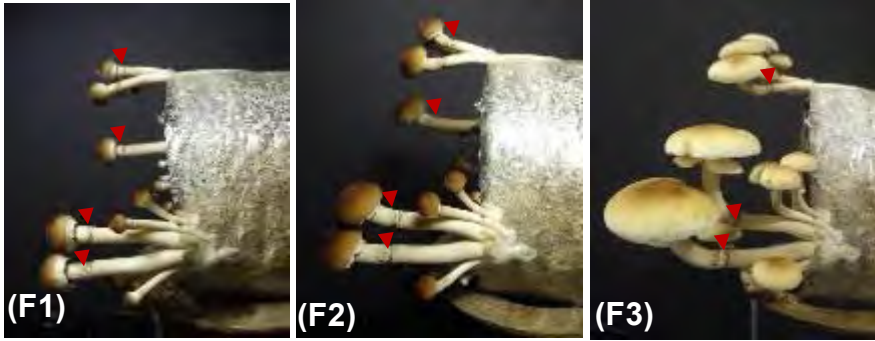
(一) 蕈菇感應重力刺激的反應系統：



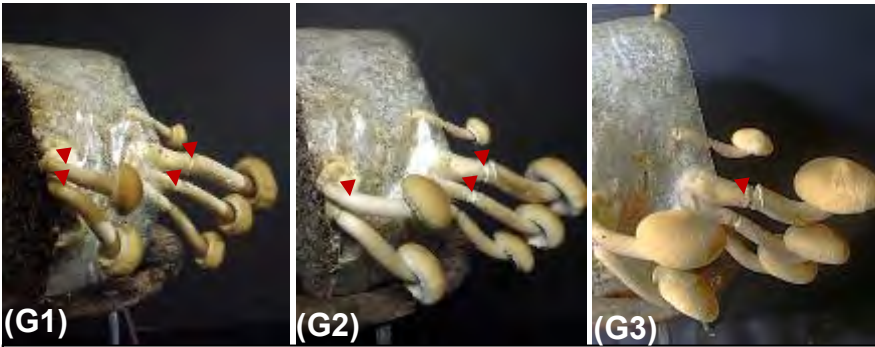
圖五十七蕈帽切割對子實體感應重力產生蕈柄彎曲之影響。

蕈菇感應重力產生向地性生長由蕈柄頂端彎曲表現，然而訊號分子的傳送是由子實體何者部位產生是我們要進一步探討的，我們藉由切割蕈帽或者環切蕈柄觀察蕈柄的背地彎曲的影響性。以蕈柄三公分長度的子實體作為實驗對象，分別切割蕈帽四分之一、三分之一、二分之一、四分之三和整個蕈帽的蕈菇，由正立轉橫立進行實驗觀察蕈柄的彎曲角度和方向。實驗發現切割蕈帽四分之一、蕈帽三分之一組別，其蕈柄的重力生長率和對照組相似約在 $2.4\sim 2.7$ 度/mm，一開始蕈柄基部固定首先由頂端彎曲，隨後曲率雖然減小，但仍繼續彎曲最後頂點幾乎完全平直，甚至到達垂直位置時並沒有停止，向心曲率的最終角度超過 90 度，此現象在切割蕈帽二分之一組別更為顯著，且重力生長率在後期達 4.9 度/mm。我們發現切割蕈帽四分之三的組別，其蕈柄彎曲方向略顯雜亂，出現向上時間點延後，可能受損的蕈帽在控制「重新分配」蕈柄彎曲受阻，且蕈柄「一致」彎曲程度降低，似乎蕈帽的完整性在蕈柄彎曲向上的控制表現有一定的影響性，當我們將整個蕈帽切除，子實體的發育遲滯，蕈柄亦無出現「向上」彎曲，由此結果推測子實體感應重力向量進行「重新分配」使蕈柄得以轉彎進行「向上」表現過程中，蕈帽為了「正確定位」發揮重要的影響力，可能和感應重力刺激產生重要訊號分子有關，使蕈柄細胞內物質分子重新分配得以使蕈柄轉彎，蕈褶可以「垂直」，確保孢子落下。

蕈柄頂部環切

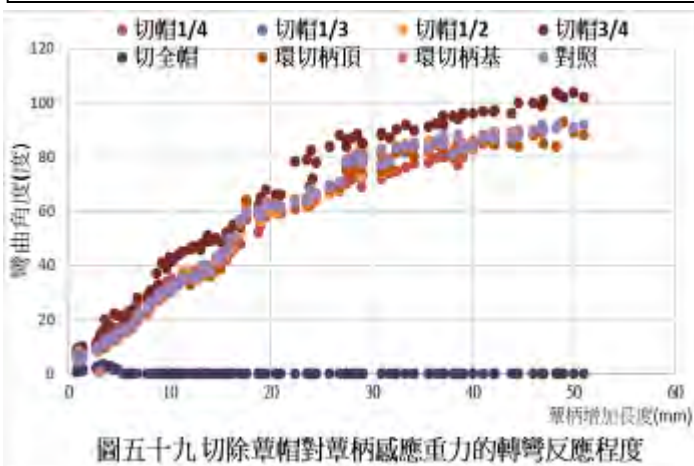


蕈柄基部環切

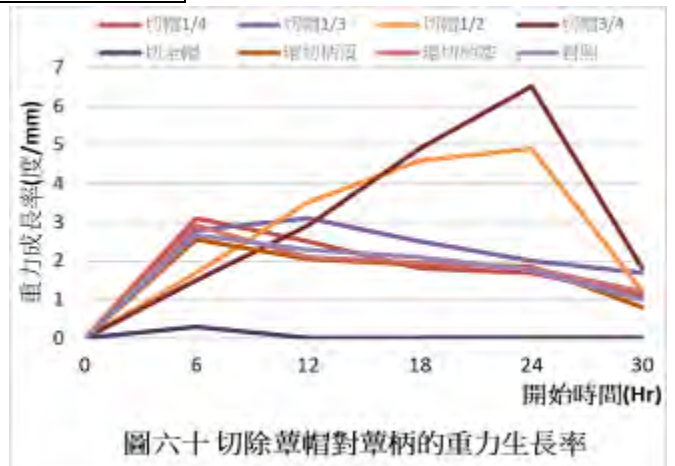


圖五十八蕈柄的環割對子實體感應重力產生蕈柄彎曲之影響。

進一步我們好奇訊號分子的傳送過程，蕈柄是否具有影響性，我們分別環切蕈柄的頂端和基部，觀察蕈柄的向上彎曲是否具有差異。實驗結果發現蕈柄仍會受到重力向量的改變在六小時內進行轉彎，不論是環切頂部或基部的重力生長率和對照組相似達 2.4~2.7 度/mm，首先由頂端彎曲，最後頂端再次幾乎平直使蕈褶可以「垂直」。綜合以上結果，我們推測蕈菇子實體的蕈帽在向性表現過程具有掌控性，部分的蕈帽存在得以產生訊號分子，控制蕈柄頂部因應重力方向重新分配以「向上」表現。

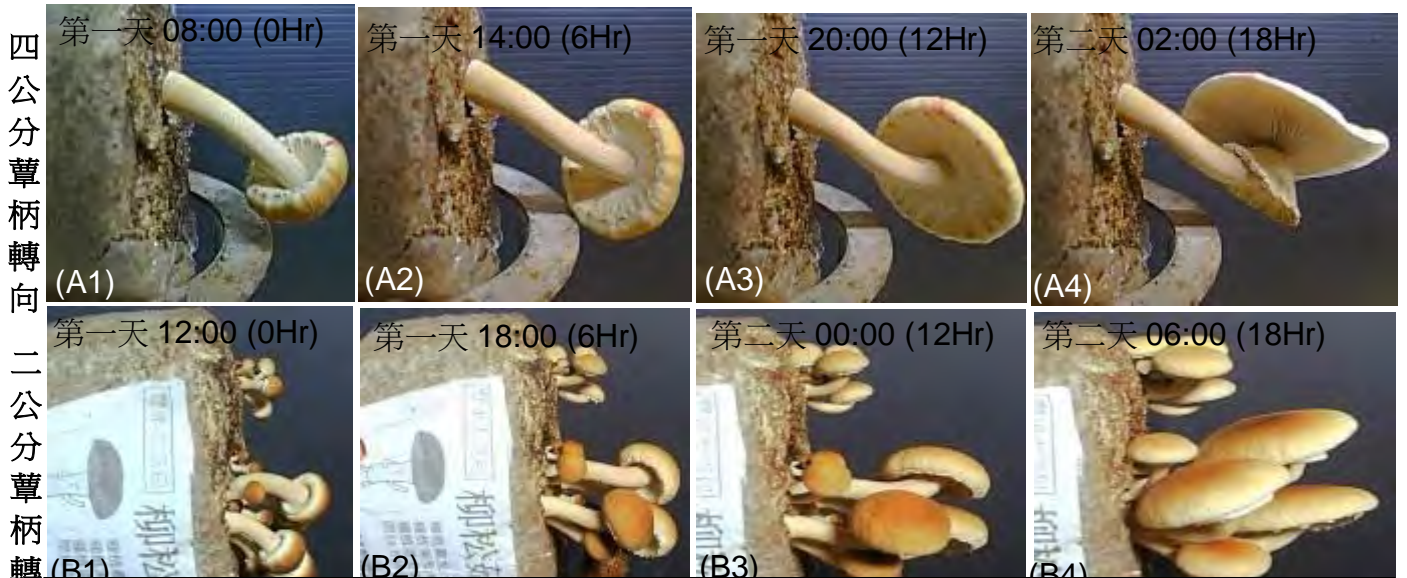


圖五十九 切除蕈帽對蕈柄感應重力的轉彎反應程度



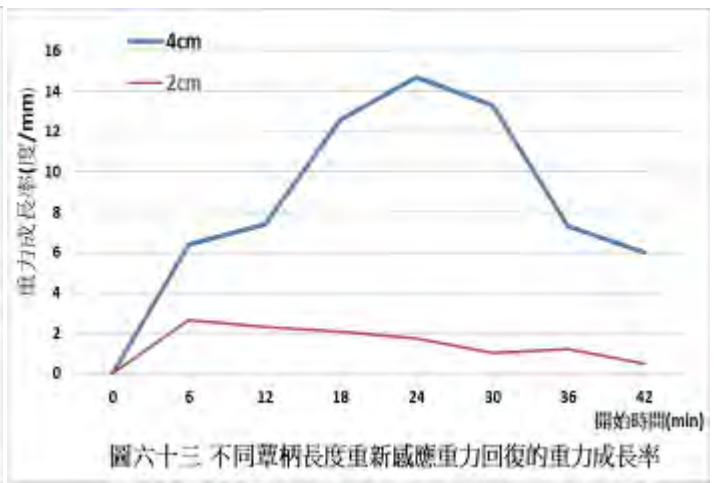
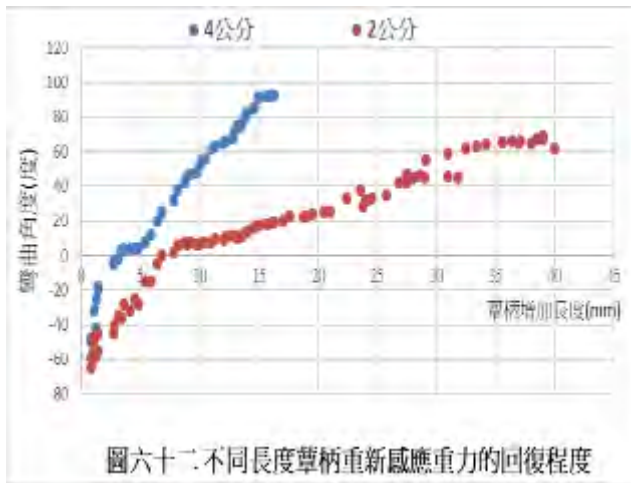
圖六十 切除蕈帽對蕈柄的重力生長率

(二) 探討蕈柄重新感應重力背地彎曲的回復性：



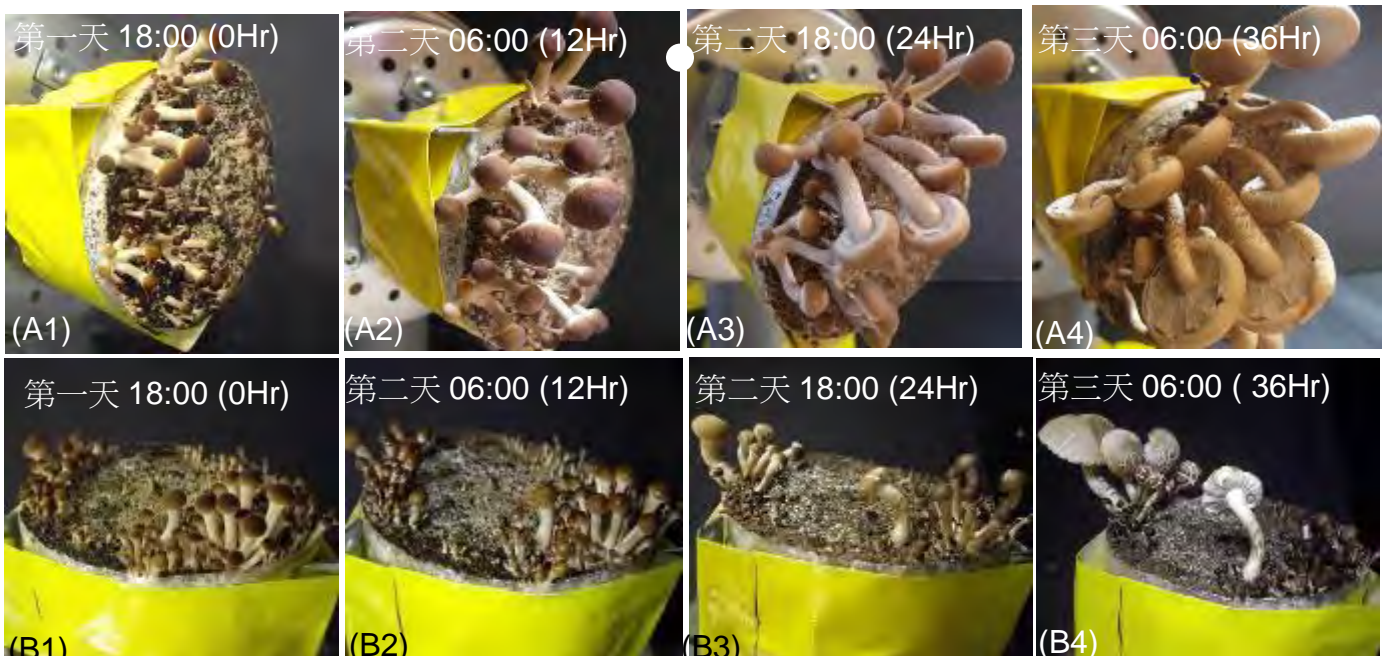
四公分蕈柄轉向
二公分蕈柄轉向

圖六十一 彎曲蕈柄再重新定位的回復性試驗。(A1)~(A4)四公分彎曲蕈柄，(B1)~(B4)二公分彎曲蕈柄。

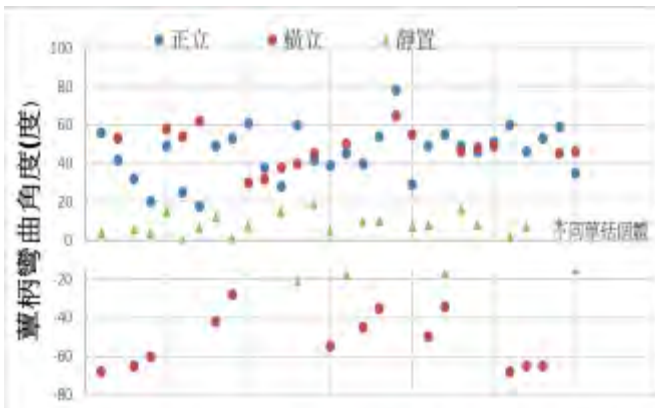


為使孢子沿著重力向量落下，菌菇似乎會重新感應重力方向，原本菌柄的重力曲率改變，菌柄頂部「重新分配」，再次重新向上彎曲之後開始變直，幾乎完全「垂直」，不論是兩公分菌柄的幼子實體或四公分菌柄的子實體，都能在有效時間內感應重力向量的轉換，尤以兩公分的菌柄頂部藉由細胞的延長明顯再度表現彎曲向上。而四公分的菌柄受限成長的空間和時間，菌柄頂部快速藉由延長的細胞帶動菌帽改變方向，菌褶由直向外彎而擴展成橫向形成菌帽開傘的樣子，最大的曲率發生在菌褶而非菌柄，得以利用最後的彎曲時間得以確保菌褶的「垂直」，使孢子沿重力向量自由落下。如果菌柄長度和菌帽發育已達成熟階段，則菌柄無法再藉由細胞的延長因應重力重新進行轉彎。

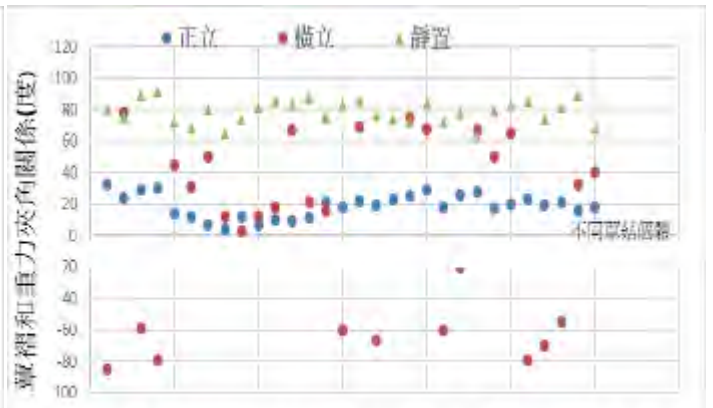
六、探討菌菇在旋轉狀態下感應重力的表現



圖六十四 菌菇在旋轉中子實體菌柄的彎曲表現。(A1)~(A4)「橫立」旋轉，(B1)~(B4)「正立」旋轉。



圖六十五 旋轉中蕈柄感應重力的向性表現



圖六十六 旋轉中蕈帽感應重力的向性表現

為了確定蕈柄的彎曲是受到重力的感應，我們設計了一台旋轉台，以離心旋轉的方式來檢查重力向量對蕈菇蕈柄重力彎曲的影響，實驗結果發現蕈菇子實體在持續轉速 210r.p.m. 旋轉 30 小時情況下，「正立」狀態旋轉的蕈柄皆背離重力方向生長，但出現蕈柄彎曲的現象，且彎曲的方向雖然不一致，發現皆有朝向「內部圓心」方向的生長趨勢。我們更進一步發現「橫立」狀態旋轉的子實體蕈柄頂部和蕈帽的生長，有朝向地心引力和背離地心引力的不同方向(圖 A4)，在旋轉中蕈柄的「背地向性」表現似乎消失了，同時我們也發現這些彎曲的蕈柄在旋轉的干擾中也出現「向心」方向的生長表現。綜合以上實驗結果，我們推測蕈柄在旋轉的干預下改變重力場強度，原本蕈柄遠離重力的生長方向出現紊亂，可能因為旋轉導致重力場中產生「離心力」，蕈柄頂端為「遠離」離心力方向而重新分配，出現蕈柄「向心」彎曲、蕈帽「平行」重力(非垂直)的表現。

陸、討論

一、重力效應對蕈菇的向性表現之角色：

蕈菇不能運動，不能簡單地將蕈褶移動到正確的位置，蕈菇以仿似植物方式處理這個問題，朝向或遠離刺激生長，稱為向性機制。向性是生物觀察到的自然規律，描述了當它們試圖在地球重力場中要正確定位時，或感應光源等其他刺激因子，蕈菇的蕈柄或蕈帽和植物的一些部分包括莖或根，會進行彎曲讓有機體正確地將其自身「正確地」定位。這種反應已經演變了數百萬年，並發揮了很好的作用，生物體尖端部位的彎曲將非常快速地將尖端（莖頂、根尖或蕈菇帽）恢復正確的曲向。文獻報導也指出蕈菇在確定「方向」之後，這有機體會試圖獲得更優化的形狀，最後將大部分曲率集中在基部附近，並使蕈柄頂部區域再次直線表現(Greening,1997)。我們的實驗讓原基在重力方向改變的狀態下，發現蕈菇的原基不論以正立、橫立或倒立置放，幼小子實體的蕈柄垂直地從它們的基底生長，而後遠離其出現的表面，與重力方向似乎相關(圖十五~十六)。蕈柄的「背地」直立目的是為了散播孢子，然而蕈類和植物不同就是子實體長度有限，不像植物會一直生長，所以蕈類的生殖策略，是必須利用「有限」的蕈柄長度為孢子提供最佳的散播環境。Rachel 報告指出蕈菇可以主動製造氣流傳播孢子，以達到傳宗接代的目的，其透過水分蒸發製造出氣流以傳播方式，因為蒸發耗用熱量，冷空氣密度大於暖空氣，所以有流動和向外擴散的傾向，同時蒸發也產生密度低於空氣的水蒸氣，這兩種力量協助孢子脫離菇類，抬升孢子，這與先前人們認為它們是藉助風力被動地傳送孢子的情況不同。蕈菇利用「造風」能力使孢子有機會找到和降落在新的潮濕地點，並進一步生長發育(Rachel Nuwer,2014)。

感應重力產生向性生長方向的主要調節似乎是由蕈菇的蕈柄所控制，起初由蕈柄的頂端感應重力，產生最直接的向地性反應，重力生長曲率侷限於蕈柄的正常生長區，似乎取決於可用生長資源的重新分配，如果子實體在蕈柄生長發育的晚期重新定向，它可能不能完全感應(圖二十五)。即使如此，我們的實驗發現在這些情況下，蕈柄受限成長的空間和時間，頂端的蕈柄快速藉由延長細胞帶動蕈帽改變方向，蕈帽的向下運動仍然把蕈褶帶回「垂直」，以確保擔孢子在重力的影響下沿著重立向量自由地落下。報導指出植物或蕈菇的重新定位到適當的位置從「尖端」開始，在子實體發育早期，這種「矯直」反應很快開始發生，頂部先開始彎曲，而後蕈柄頂部延長，很快因為感應而開始進行彎曲，隨後頂部的延長導致彎曲和曲率集中於距離蕈柄頂部20-40%附近(基部)時，使頂部回到垂直方向(Moore,1997)。

二、蕈柄的重力彎曲之發生過程：

在蕈菇的生活史過程中，我們的實驗指出菌絲爬行階段並不具有對重力向量感應產生向性(圖二十一)，當漸漸以原基出現時會遠離菌絲出現的表面，這可能與光和重力無關，但不久之後重力和光的刺激感應對幼子實體向性表現變得顯著。我們為避免光刺激方向不均勻的干擾，我們設計一個實驗光屋，其光源從四面八方均勻進入，以清楚確認只有重力向量對蕈柄彎曲的反應。子實體發育時，蕈柄中間及頂端部位之細胞長度跟隨子實體發育而增加，當重力方向改變時，蕈

菇子實體的蕈柄在向性反應進行彎曲生長，首先由蕈柄頂端附近感應重力出現彎曲，而後平均每小時細胞延伸長度 **6.6mm**(圖二十七)，快速生長速度有助於增加細胞體積，而且蕈柄彎曲處的外側(近地)細胞相較內側(遠地)細胞有較快延長生長速率，但在細胞數目上的比較並無顯著差異，主要是因為生長速率的差異造成蕈柄的彎曲，蕈柄的「向上」彎曲顯然是由於細胞的反應定位於「近地側」，且不僅僅只是蕈柄的一側，而是「正確的一側」以確保向上的曲率，我們的實驗結果得知近地側(外側)細胞的長度相對遠地側(內側)細胞有 **2-3** 倍的差異性。**Moore** 的文獻指出灰蓋鬼傘蕈菇子實體發育時，蕈柄的頂端細胞長度由 **86 μ m** 增加至 **156 μ m**，而中段細胞長度則由 **123 μ m** 增加至 **463 μ m**，但是子實體蕈傘直徑發育至 **6-8** 公分時則停止生長，而其細胞不再變長，蕈柄增長時，細胞寬度也加大(**Moore,1997**)。在向性的表現過程中，蕈菇在重力變動中通常恢復正確的方向是複雜的，也是非常協調的反應。通常蕈柄的彎曲是從靠近蕈柄的頂部開始(圖二十八)，我們猜測該頂尖區域似乎是產生開始彎曲的傳播信號往基部運輸，蕈柄的頂部還負責調節彎曲的補償，以便使尖端垂直(**Moore,1991**)。雖然有關向性的文獻報導仍尚未清楚，有待繼續釐清。但我們從實驗發現蕈柄頂端下部位區域對於它們的重力感應方向看起來不那麼敏感，大部分是從「向上」轉向，它們確實有一些它們自己的敏感性，有助於在方向受到嚴重干擾的情況下做出更快的反應，以確定蕈柄如何在反應期間局部曲率的分佈改變，我們基於曲線模型(圖二十五)觀察到，基部固定的蕈柄首先從頂點附近彎曲，但是隨後該部分的曲率減小，並且在後期階段中，蕈柄頂點再次幾乎完全平直，**Moore** 的文獻報導亦指出位於從基部的蕈柄長度的三分之一處是確定最終曲率的主要部分，在一定彎曲時間之後也開始變直，在它們到達垂直位置時並沒有停止，我們在「倒立」組試驗中看見向心性曲率的最終角度可以超過 **180°**。

Moore 報導指出蕈柄的頂點是產生感應重力的最直接向地反應，我們的實驗結果發現柳松菇蕈柄 **4** 公分長的成熟子實體相較於幼子實體有較敏銳地向性反應，在 **6** 小時內蕈柄已明顯背地彎曲角度達 **65** 度，重力成長率達 **5.83** 度/mm，蕈柄受限於成長的空間和時間，頂部的細胞快速延長以帶動蕈帽改變方向，蕈褶由直向外彎而擴展成橫向形成蕈帽開傘狀，得以利用最後的彎曲時間確保蕈柄或蕈褶的「垂直」(圖五十二)。因為重力彎曲出現在蕈柄頂點附近，我們企圖尋找蕈柄感應重力的敏感區域是否和頂端有關，當我們環切蕈柄頂端或移除部分蕈帽則不影響向地表現，意味蕈柄大部分的位置可以感應重力產生背地性，但是當完全切除蕈帽，則蕈柄不表現向上彎曲，且出現發育遲滯的現象，我們的實驗似乎可以證實蕈帽在子實體發育過程的「正確定位」扮演關鍵角色，蕈帽可能是「定位系統」或產生定位的，「訊號」分子，使蕈柄兩側細胞重新分配得以向上彎曲 (圖二十八)。

三、蕈菇產生向地性的重力感應機制之探討：

在動、植物系統中對於重力的感應機制研究，包括了在我們所有的人中，深入我們的內耳構造，這種前庭系統含有液體且充滿微小的石狀顆粒稱為耳石的碳酸鈣填充的囊組成，這些耳石小囊受到壓力時會產生神經衝動，將訊號往大腦處理產生平衡感和方向位置，當我們旋轉時，耳石

顆粒全部移動產生一種感覺的定向障礙，甚至眩暈。另外，植物根系包含有澱粉顆粒，這些顆粒分布的壓力梯度可能以某種方式產生反應，導致根系中生長素的差異分布，刺激根系的遠地側(上表面)延伸造成根部向下彎曲。由於蕈菇也清楚反應了重力，那它們怎麼感覺？它們如何從「下」知道「上」？關於蕈菇的重力彎曲機制方面，菌絲細胞通常不含有澱粉顆粒，也沒有發現生長素在重力彎曲上出現作用，我們查閱報導指出幾種實驗已經證明細胞骨架可能在重力活動中發揮關鍵作用(Moore,1991)。Monzer 的研究得出結論，真菌細胞感應重力中，菌絲細胞核作為真菌耳石(otolith)，核是內含蛋白質肌動蛋白組成細胞的細絲內部“骨架”(細胞骨架)，隨著這些細胞核沉降，它們拔下肌動蛋白細絲，然後在細胞上拖曳牆上的附著點，這種張力觸發細胞變化響應重力，並在近地側的細胞感受重力，微泡開始填補膨脹，液泡膨脹，和整個過程導致了擴張菌絲細胞，最終的結果是蕈菇蕈柄彎曲遠離重力方向。Moore 的實驗結果中也發現細胞骨架微絲的干擾參與感知， Ca^{2+} 運輸和鈣調蛋白介導的 Ca^{2+} 攝取抑制劑對重力感知沒有任何影響，只是顯著影響向性的表現程度，但使用肌動蛋白抑制劑處理蕈柄則導致對重力的感應產生延遲的反應，這說明了細胞骨架的元素可能直接參與蕈柄對重力的感應，而 Ca^{2+} 介導的信號轉導可能參與指導生長差異，產生重力感應的向性反應(Bunyard,2012；Monzer,1996；Moore,1991)。

我們為了確定蕈柄的彎曲是受到重力的感應，我們設計了一台迴轉台，以離心旋轉的方式來檢查重力向量和重力強度對蕈菇蕈柄重力彎曲的影響。蕈菇太空包在旋轉盤上分別以水平軸線(正立)和垂直軸線(橫立)以相同的速度提供圓周旋轉，當每次旋轉掃過 360° ，蕈菇經歷連續移位不同方向的重力向量和重力強度在 $1g\sim 3g$ 重力場變化刺激 24 小時後，發現蕈菇不表現向地性(反地心引力)，異常顯示出不同的重力型態反應，在多重向量力的作用下蕈柄朝向旋轉中心點方向生長(反旋轉離心)，甚至蕈帽的轉向帶動蕈褶「平行」重力方向，其暗示旋轉的干擾導致生長的更新，產生適當重新定向到新的空間位置的子實體結構。Moore 的研究報導指出在旋轉中生長的灰蓋鬼傘雖然能夠產生明顯的子實體，靠近固定頂點的子部分的彎曲在它們到達垂直位置時並沒有停止，但是發育過程中不能產生孢子，會中止生長發育，似乎蕈柄的向地性和孢子的形成之間有明確的相關聯性，蕈褶處減數分裂形成孢子途徑需要「重力」向量的刺激存在，並以某種方式將其和子實體生長發育聯繫起來(Moore,1991)。

四、未來展望：

光和重力是影響真菌發育重要的環境刺激，對真菌光形態發生和引力反應的研究集中在對光和重力反應的描述和表徵。目前研究文獻已經鑑定了光受體和光形態發生所需的基因，並且在某些情況下已經被分離蛋白和其功能性表徵說明。然而，真菌重力分子的研究基礎仍然是初步的。我們的研究在這裡提出了重力感應模式系統和重力感測的可能機制。我們希望未來深入分子生物學與模型系統的結合將有助於明白真菌生物引力的複雜性。光和重力以複雜的方式相互作用，以引導植物體生長發育，可能在感光體系本身的水平基因，在蕈菇中可能共享這些基因元素，期望未來的研究進一步確定光與重力之間可能的關係是真菌發育，生長和外觀的主要信號。

柒、結論

1. 蕈菇會因應外界環境因子的變化而產生「向性」，不同種類的蕈菇包括秀珍菇、珊瑚菇和柳松菇在生長發育過程，會受到地心引力的刺激而有「背地一站」的現象。
2. 蕈菇生長發育過程因應種重力向量，蕈柄出現不同角度彎曲，以「倒立組」的彎曲角度達 150 度，蕈柄頂端感應重力約在 20-30%之處出現彎曲生長。
3. 蕈柄的生長速度約每小時 6.6mm 來延伸長度，由細胞顯微觀察外側(近地側)細胞相較內側(遠地側)細胞有較大的重力生長曲率，造成兩側細胞之間有 2-3 倍細胞長度的差異，透過細胞生長速度和重力曲率的差異，造成背地彎曲的向性表現。
4. 蕈菇生長早期的菌絲和菌絲球體階段不受重力影響而有向性表現，當分化發育為子實體階段時即能感應地心引力刺激表現負向地性，而且在幼子實體生長階段，蕈柄長度達 1 公分以上在「橫放」60 分鐘後開始出現彎曲生長，但是當蕈帽成熟蕈褶散播孢子就不再感應重力。另外在幼子實體發育過程中切除蕈帽，也無法表現「向性」，我們推測蕈帽和蕈柄相接處似乎具有感應重力刺激的系統，引發蕈柄「背地一站」。
5. 利用自製離心器，以旋轉(離心)方式改變重力強度和向量，我們發現蕈柄的「負向地性」表現強度減弱，其以此基礎研究以應用於太空失重狀態下培植蕈菇之可能價值用途。

捌、參考文獻

- 一、陳隆鐘、蘇秋建 (2005)。香菇子實體發育期間之細胞行為及細胞核變化之研究，Fung. Sci.20 (3-4):P123-144。
- 二、Nuwer R.,(2014)。蘑菇自力更「升」。科學人雜誌 145：P24。
- 三、Moore, D.,(2005)。Principles of Mushroom Developmental Biology. International Journal of Medicinal Mushrooms,7:P79-101。
- 四、Britt A.Bunyard (2012)。Which way is up ? Mushroom Gravitropism. Fung. 5(4):P26-28。
- 五、Greening J.P., C. Sanchez, and D. Moore(1997)。Coordinated cell elongation alone drives tropic bending in stems of the mushroom fruit body of *Coprinus cinereus*. Can J. Bot.75:P1174-1181。
- 六、Kher,K, J.P.,Greening, J.P.,Hatton, L.A.,Novak Frazer,and D.Moore(1992)。Kinetics and mechanics of stem gravitropism in *Coprinus cinereus*. Mycological Research, 96：P817-824。

【評語】 030309

本作品探究類子實體的「負向地性」反應。研究主題明確且聚焦，控因及變因清楚且能有助於吾人對菇類像的性反應的瞭解，更有進一步探討作用機制的潛力。



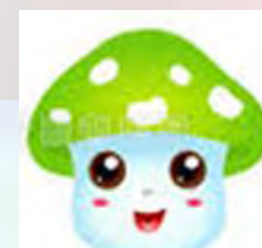
摘要

本實驗研究蕈菇如同植物具有負「向地性」，其蕈柄生長過程受到地心引力刺激會產生「背地一站」現象。我們利用太空包蕈菇以正立、橫立和倒立方式比較蕈柄彎曲的角度，倒立組彎曲角度達150度，彎曲生長主要發生在距離蕈柄頂端20-30%之處，因為近地側細胞生長相較遠地側大約有2倍長度的差異，和遠地側有較大的重力生長率，造成蕈柄得以背地彎曲；當完全切除蕈帽則無法表現「向地性」，我們推測蕈帽和蕈柄間的細胞似乎可以感應重力的刺激，使蕈柄得以「背地一站」以利散播孢子。我們進一步自製離心器，以旋轉方式來改變重力場強度，發現蕈菇子實體的「向地性」表現強度產生改變，我們企圖深入探討重力向量對蕈菇發育的基礎研究以應用於失重的外太空培植之可能價值用途。



壹、研究動機

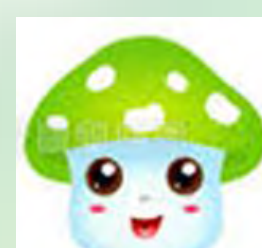
有一次意外發現室內窗台培植的蕈菇太空包，在不小心被弄倒的情況下，蕈菇的子實體竟出現彎曲向上，難道蕈菇和植物也會有「背地一站」的向性反應嗎？我們查閱文獻關於蕈菇的向性研究較為罕見，報導指出蕈菇在子實體發育過程會受到光源刺激產生向光性的反應 (Corrochano, 2011)，蕈菇似乎存在一套感知系統，可以接受外界環境因子的刺激，我們好奇蕈菇的「向上」反應和「地心引力」刺激因子的是否具有相關，且蕈菇又如何感應地心引力的刺激存在，以及在不同的生長時期對應地心引力的刺激會有相同的反應強度嗎？



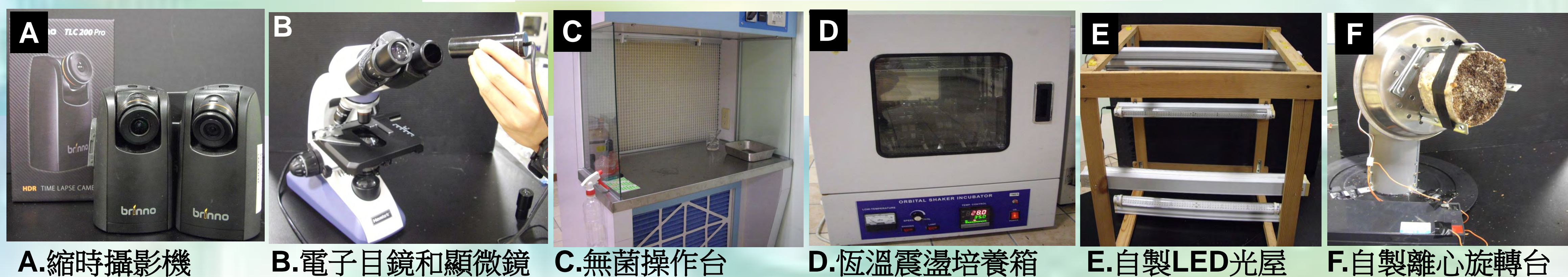
貳、研究目的

本研究目的以太空包栽培蕈菇為研究對象，探討蕈菇生長發育過程中是否感應地心引力刺激產生向性反應，並進一步研究蕈菇感應刺激和發生的部位。

- 一、觀察太空包栽培蕈菇在不同方向感應地心引力的背地性生長現象。
- 二、探討蕈菇子實體的蕈柄背地彎曲速率和重力生長曲率表現。
- 三、探討蕈菇在不同生長階段對地心引力感應的向性差異表現和產生向性的感應部位。
- 四、以旋轉方式產生離心力，改變重力刺激對蕈菇向性表現的差異，和討論可能在失重狀態下的生長發育。



參、研究器材與設備



肆、研究過程及方法

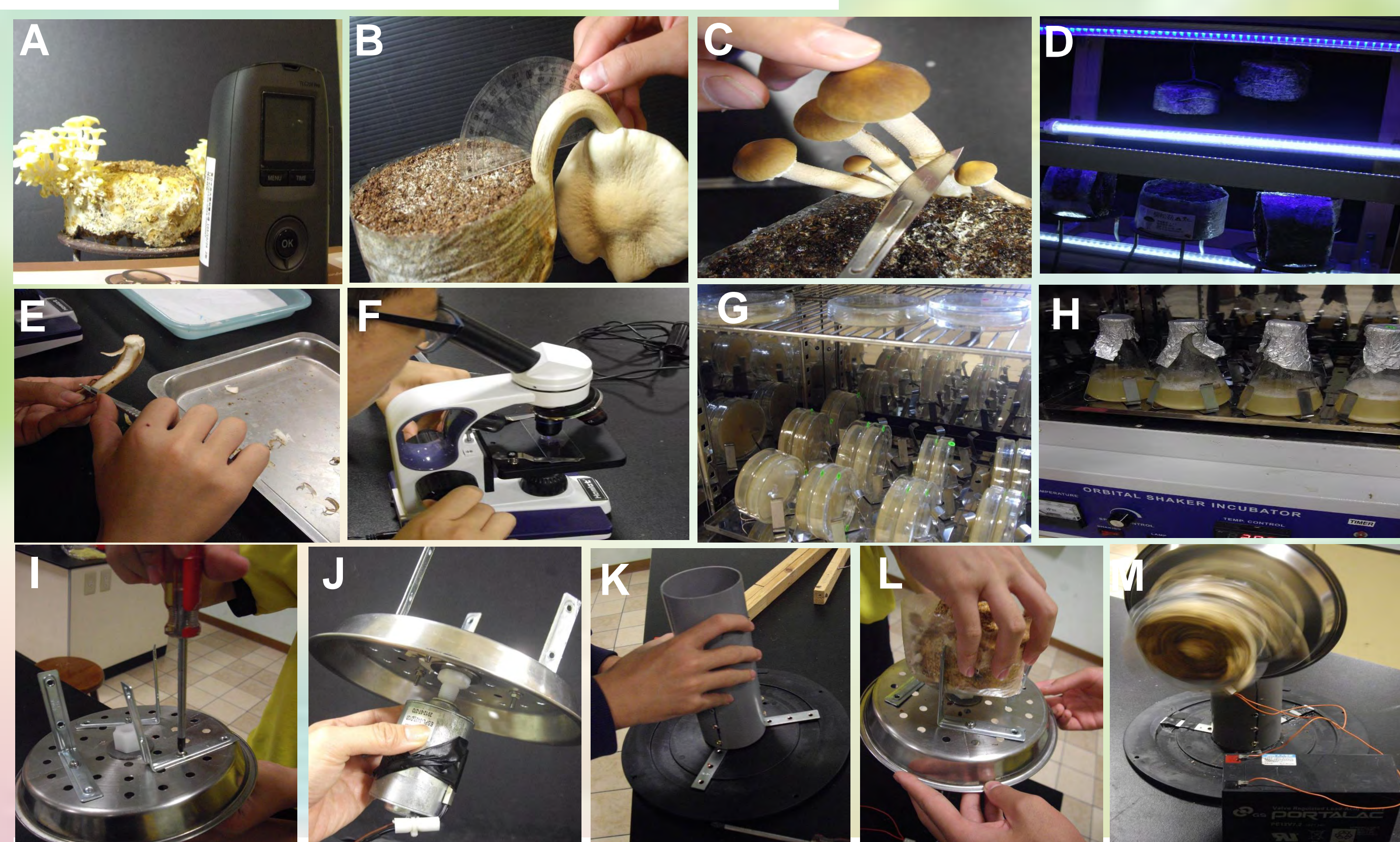
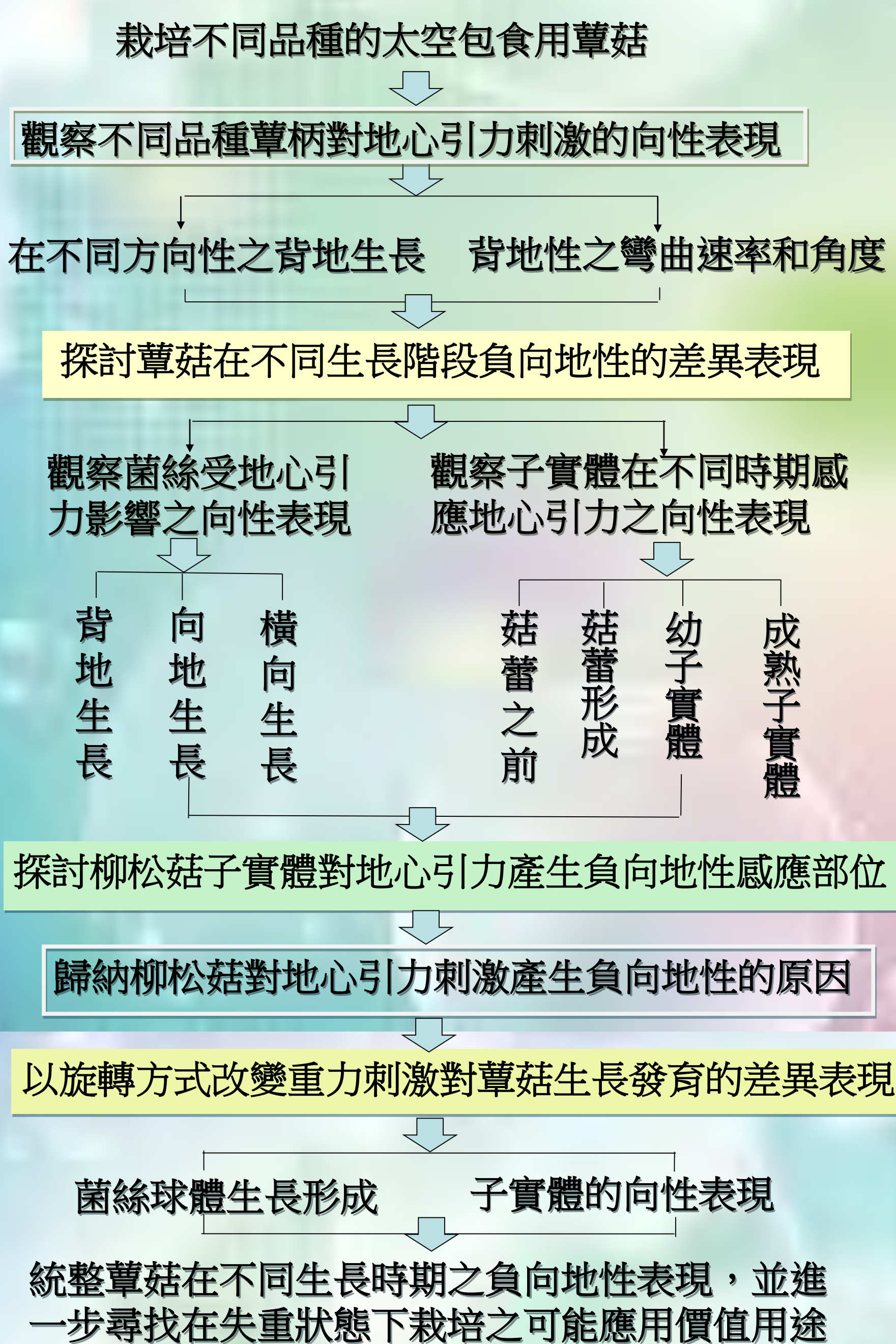


Fig1. 本研究的蕈菇向性表現的過程試驗。A. 縮時攝影拍攝, B. 量測彎曲角度, C. 環切蕈柄, D. LED光屋實驗, E. 取菌絲組織進行染色, F. 顯微觀察菌絲細胞, G. PDA實驗, H. PDB實驗, I. 旋轉器製作: I. 旋轉盤固定器, J. 直流馬達連接旋轉盤, K. 底座製作, L. 置菇, M. 旋轉啟動。

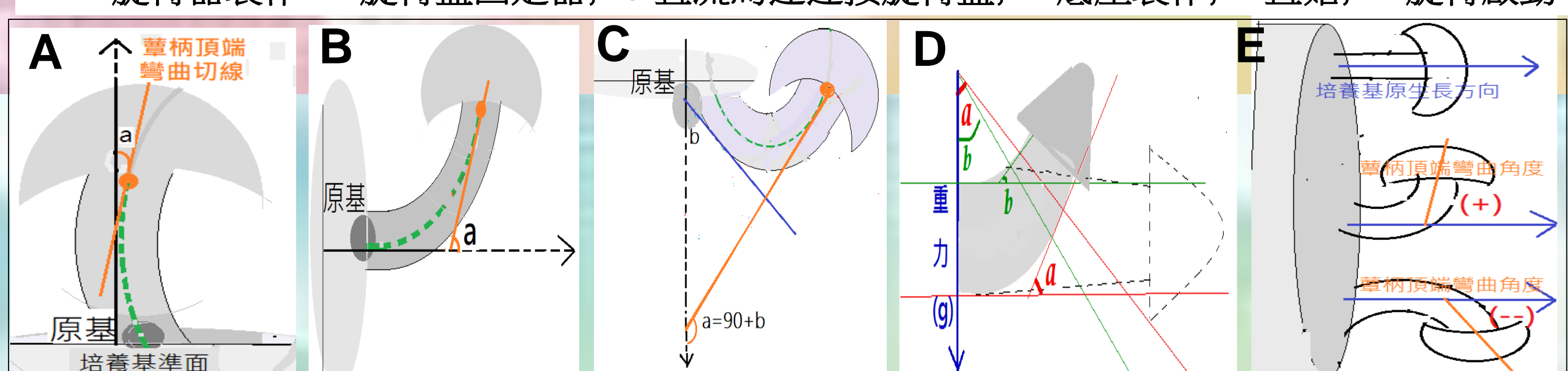
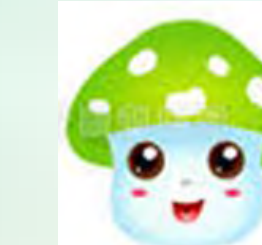
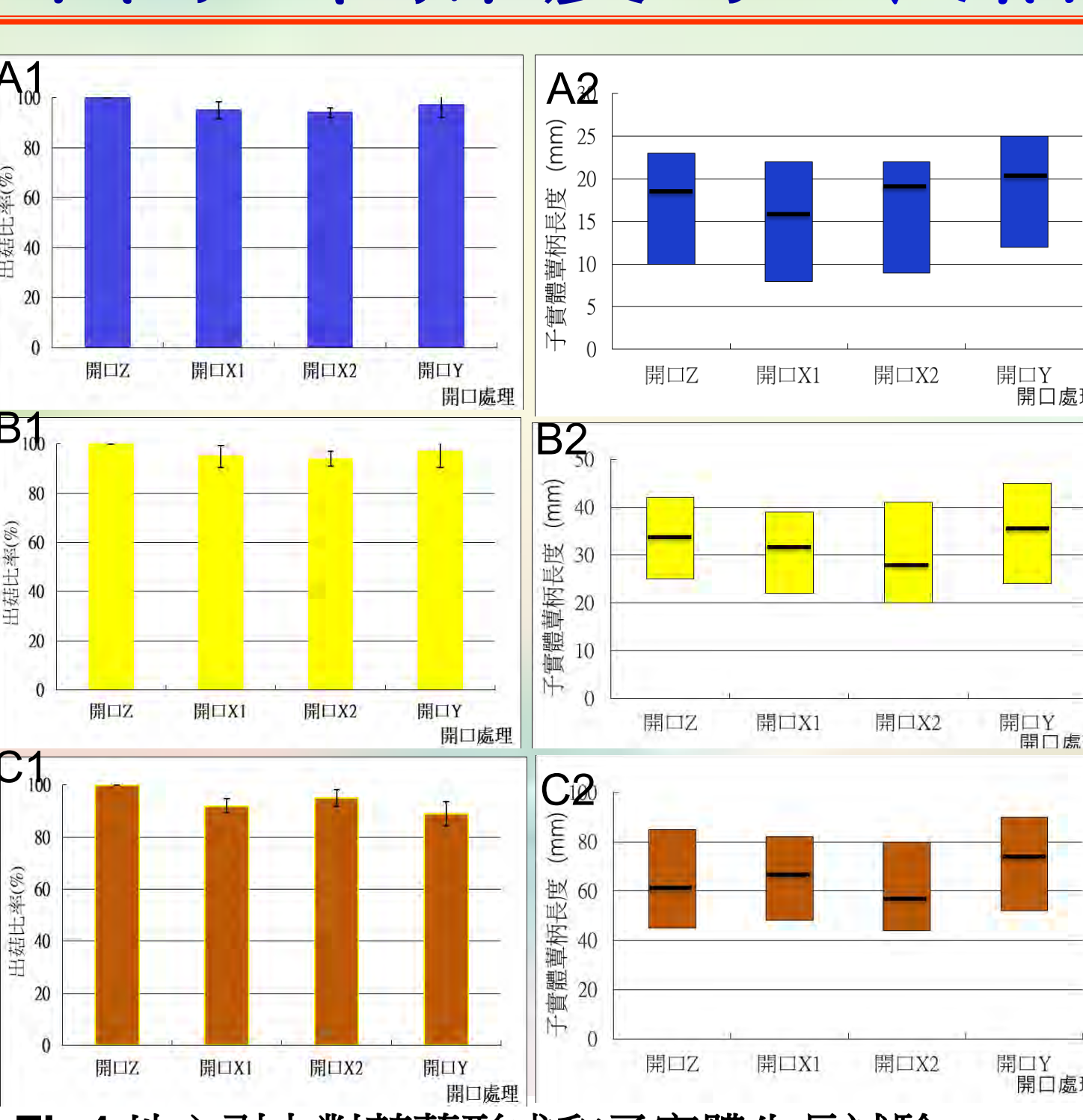
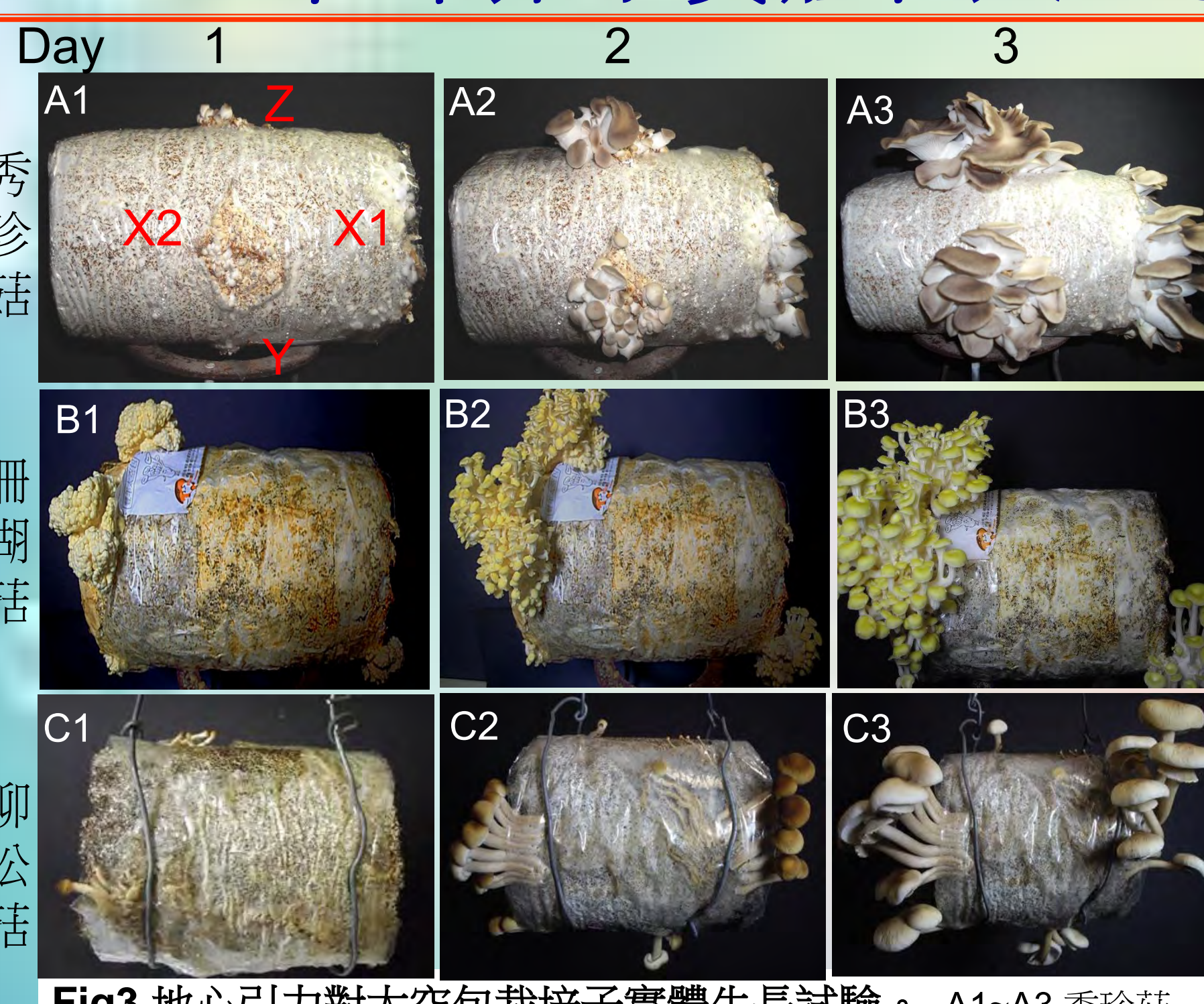


Fig2. 蕈柄彎曲角度量測標準。A. 正立 B. 橫立 C. 倒立 D. 近地(a)和遠地側(b) E. 旋轉盤上各種轉向蕈柄



伍、實驗結果

一、三種蕈菇子實體在太空包不同空間維度的生長相似

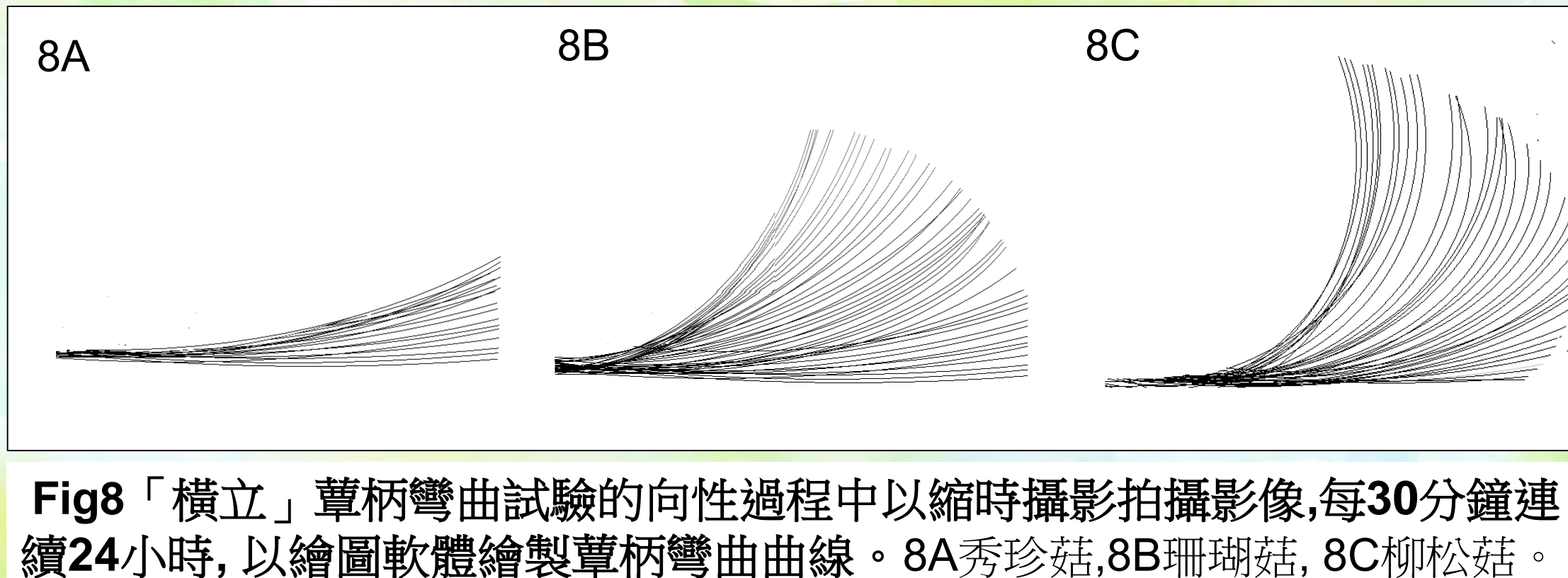
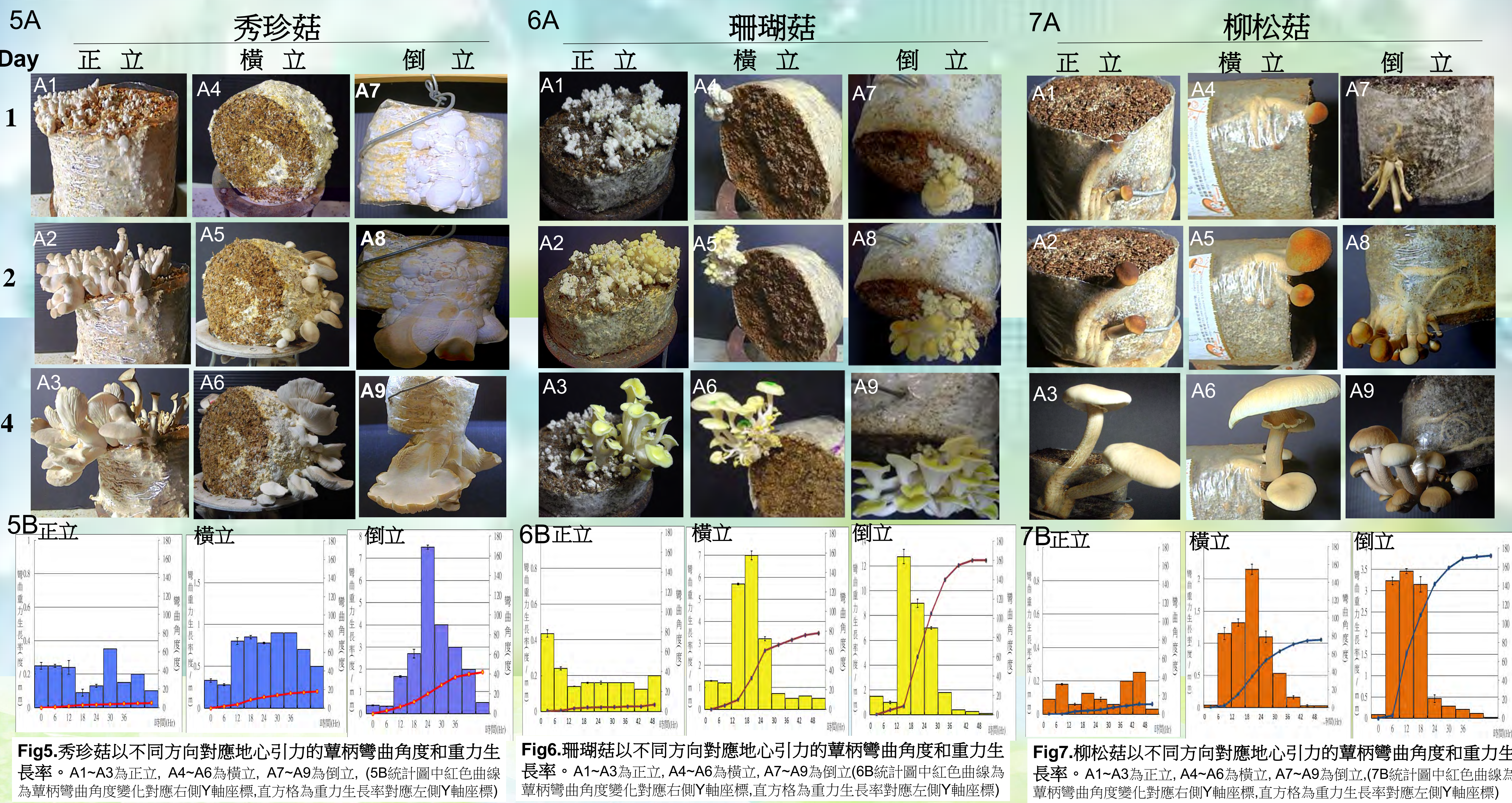


1. 不論是在X(側端)、Y(底端)或Z(頂端)開口出菇數目沒有顯著的差異，表示地心引力的刺激不影響秀珍菇、珊瑚菇和柳松菇的菇蕾生長。
2. 子實體生長發育也無明顯的生長差異，包括蕈柄長度和蕈帽大小，甚至成熟子實體的重量，在統計上的平均值皆無顯著差異。
3. 太空包不同空間維度開口的子實體蕈柄皆出現「向上」的向性反應，首先蕈菇原基垂直從基底生長，而後遠離其現的表面，與重力方向似乎相關，蕈柄的生長方向「遠離」重力方向。

Fig3. 地心引力對太空包栽培子實體生長試驗。A1~A3 秀珍菇, B1~B3 珊瑚菇, C1~C3 柳松菇; A1.B1.C1 菇蕾 Day1, A2.B2.C2 幼子實體 Day2, A3.B3.C3 成熟子實體 Day3。

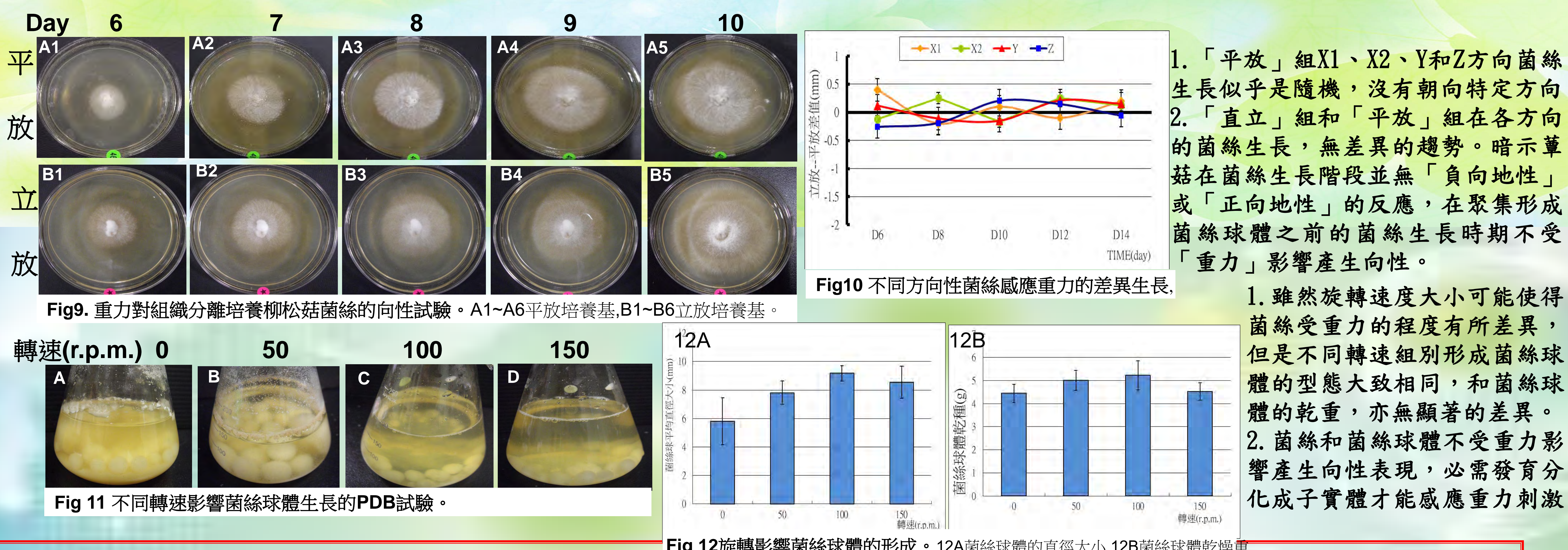
Fig4. 地心引力對菇蕾形成和子實體生長試驗。A1.B1. C1不同空間維度中菇蕾形成的出菇比率, A2.B2.C2不同空間維度子實體發育蕈柄的長度。A1~A2 秀珍菇, B1~B2 珊瑚菇, C1~C2 柳松菇。

二、橫立和倒立的柳松菇對應重力刺激, 菌柄表現彎曲重力生長的變化最大



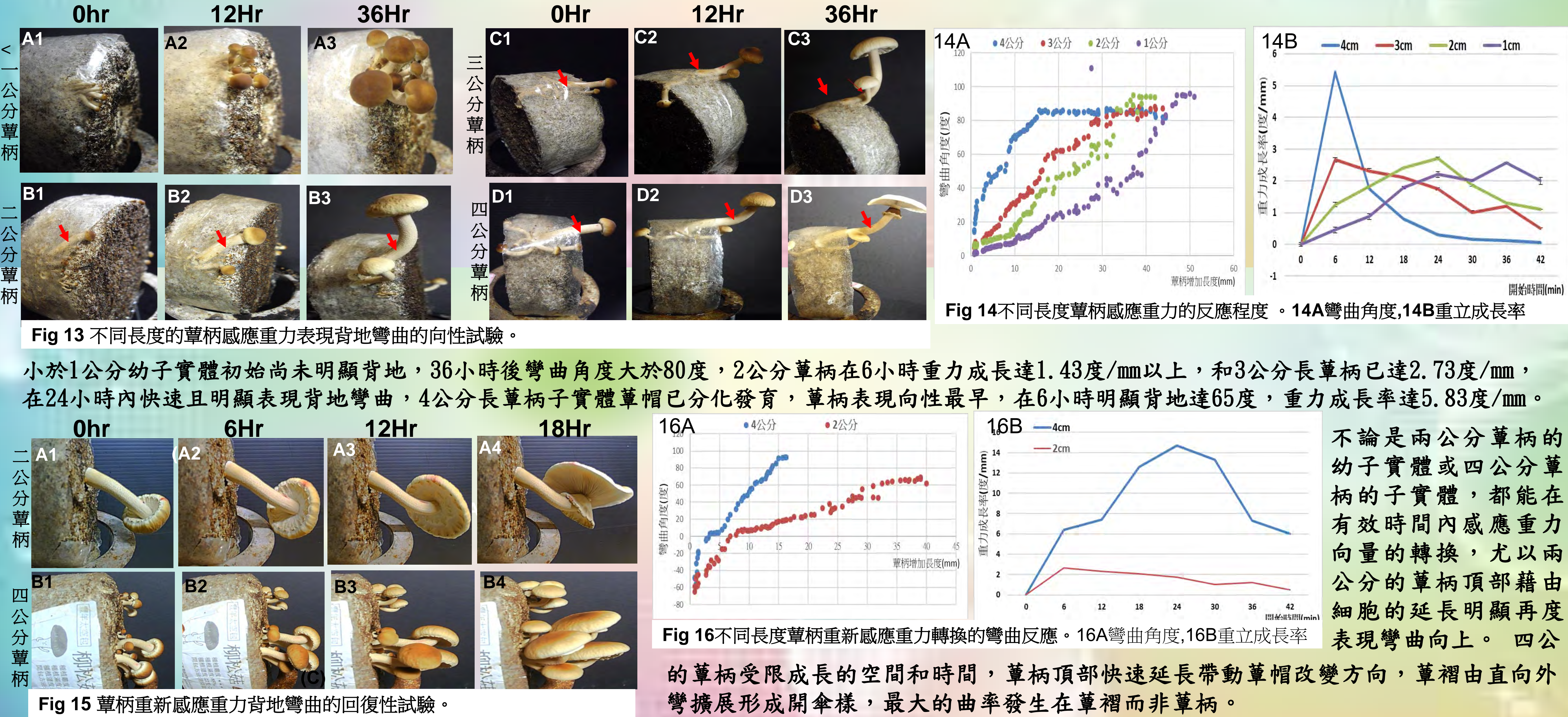
1. 秀珍菇菌柄極短只有1~3公分, 彎曲重力生長率不及1度/mm, 菌柄沒有明顯向上表現, 最大約只有40度, 藉菌褶顯著向上, 菌帽最大彎曲超過60度, 補足「向上」表現。
2. 珊瑚菇菌柄較長, 菌蕾生成12小時開始出現彎曲, 早期發育受到重力感應即產生「負向地性」反應, 「倒立」組菌柄彎曲可達100度以上, 彎曲重力生長率7.2度/mm。
3. 柳松菇「橫立」組彎曲重力生長率在18小時達2.15度/mm, 彎曲幅度超半, 「倒立」組的彎曲重力3.2度/mm, 菌柄達最大彎曲角度, 和地平線近乎垂直接近180度, 因為叢生和分生柳松菇彎曲角度大又明顯, 我們以柳松菇探討菌柄感應重力產生背地彎曲機制。

三、柳松菇在菌絲階段對地心引力刺激在各方向的向性生長相似



1. 「平放」組X1、X2、Y和Z方向菌絲生長似乎是隨機, 沒有朝向特定方向。
 2. 「直立」組和「平放」組在各方向的菌絲生長, 無差異的趨勢。暗示菌絲在菌絲生長階段並無「負向地性」或「正向地性」的反應, 在聚集形成菌絲球體之前的菌絲生長時期不受「重力」影響產生向性。
1. 雖然旋轉速度大小可能使得菌絲受重力的程度有所差異, 但是不同轉速組別形成菌絲球體的型態大致相同, 和菌絲球體的乾重, 亦無顯著的差異。
 2. 菌絲和菌絲球體不受重力影響產生向性表現, 必需發育分化成子實體才能感應重力刺激。

四、柳松菇發育成子實體的向性表現



小於1公分幼子實體初始尚未明顯背地, 36小時後彎曲角度大於80度, 2公分菌柄在6小時重力成長達1.43度/mm以上, 和3公分長菌柄已達2.73度/mm, 在24小時內快速且明顯表現背地彎曲, 4公分長菌柄子實體菌帽已分化發育, 菌柄表現向性最早, 在6小時明顯背地達65度, 重力成長率達5.83度/mm。

不論是兩公分菌柄的幼子實體或四公分菌柄的子實體, 都能在有效時間內感應重力向量的轉換, 尤以兩公分的菌柄頂部藉由細胞的延長明顯再度表現彎曲向上。四公分的菌柄受限成長的空間和時間, 菌柄頂部快速延長帶動菌帽改變方向, 菌褶由直向外彎擴展形成開傘樣, 最大的曲率發生在菌褶而非菌柄。

五、菌柄感應地心引力的最大曲率點位置

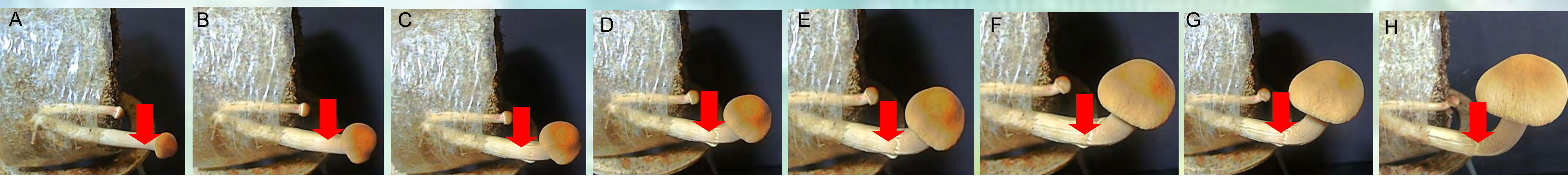


Fig17 柳松菇菌柄背地彎曲。實驗過程中由縮時攝影拍攝紀錄影像，由影像中擷取圖片(A)~(H)為每隔8小時之菌柄彎曲過程。(紅色箭頭為紅色色素標記位置)

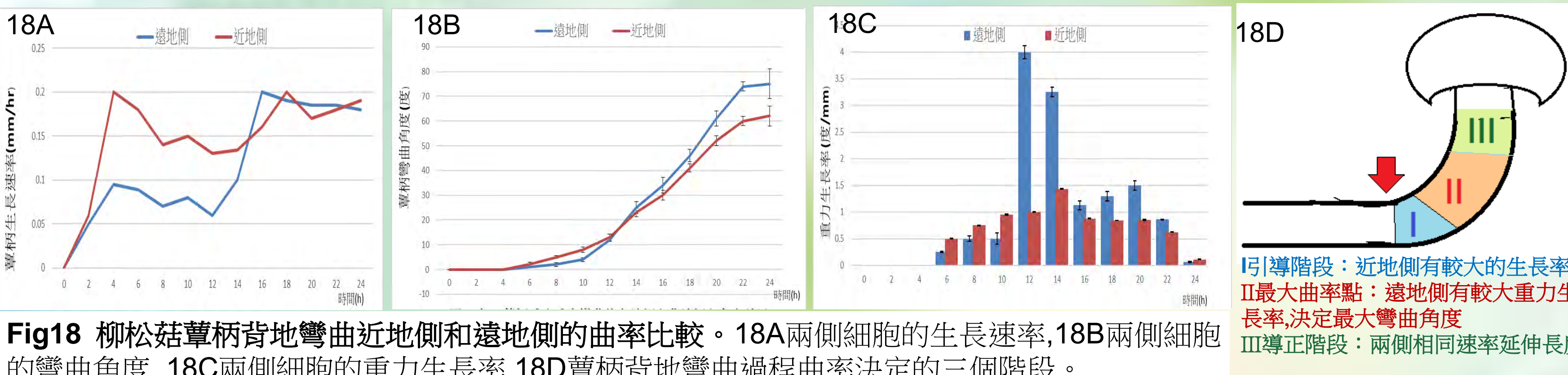


Fig18 柳松菇菌柄背地彎曲近地側和遠地側的曲率比較。18A兩側細胞的生長速率,18B兩側細胞的彎曲角度,18C兩側細胞的重力生長率,18D菌柄背地彎曲過程曲率決定的三個階段。

「近菌柄頂端」是發生轉彎開始處，而最大曲率主要發生在菌柄頂端20%-30%之處。頂端近地側在早期加速到最大生長速率，達1/2階段時重力彎曲率達最大，而遠地側細胞似乎決定彎曲角度。

引導階段：近地側有較大的生長率
II最大曲率點：遠地側有較大重力生長率，決定最大彎曲角度
III導正階段：兩側相同速率延伸長度

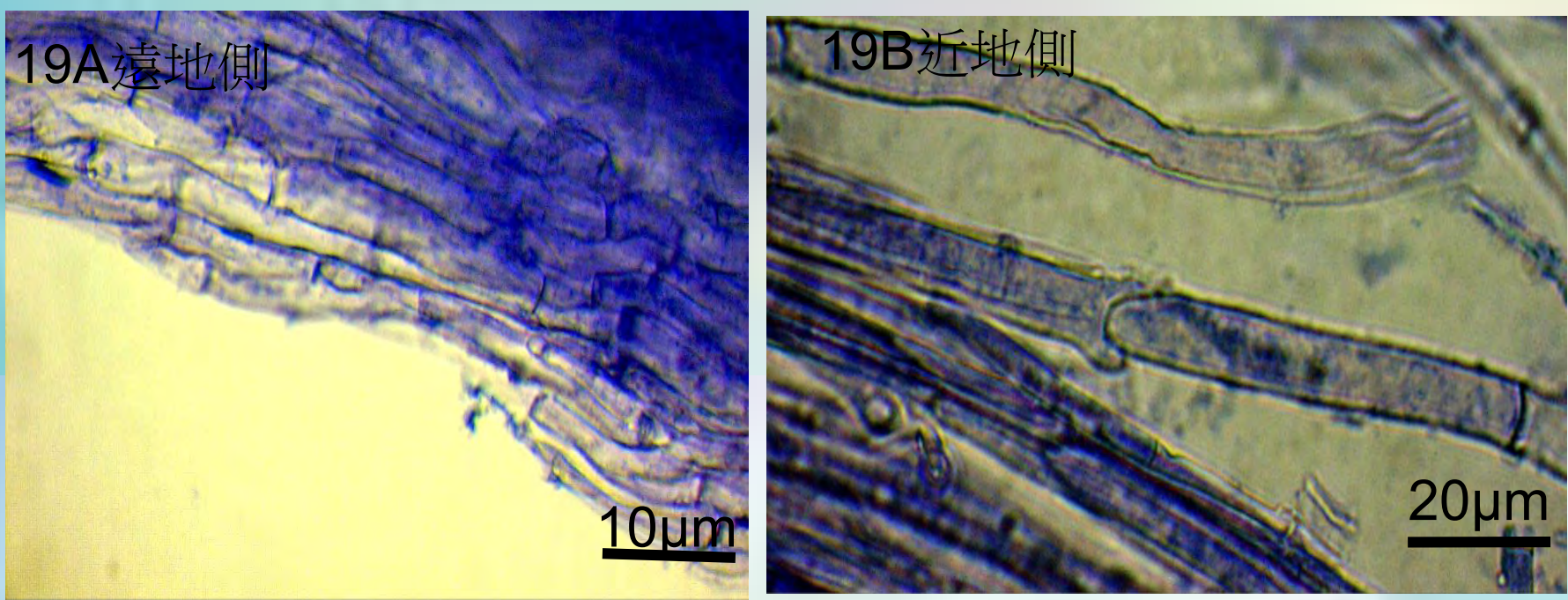


Fig19.微觀菌柄背地彎曲之細胞型態。19A遠地(內側),19B近地側(外側)

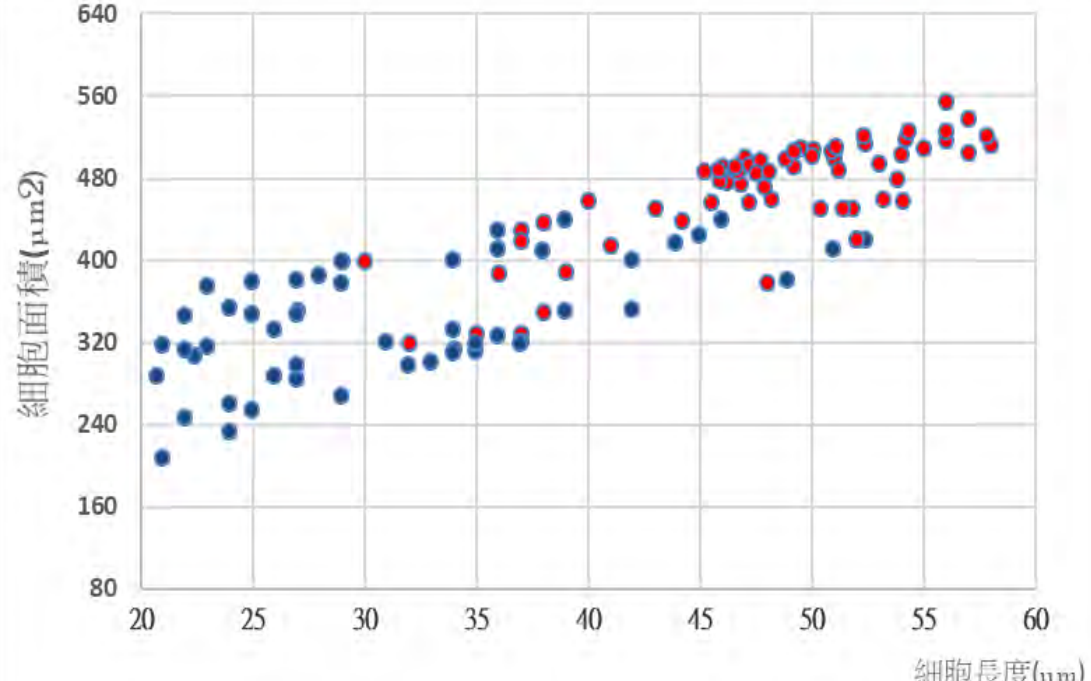


Fig20.菌柄背地彎曲兩側細胞比較。

藉由顯微實驗觀察菌柄彎曲處的細胞型態，發現在菌柄兩側的細胞數目並無顯著差異，而近地側(外側)細胞的長度相對遠地側(內側)細胞有2-3倍的差異性，且近地側的細胞面積也明顯大於遠地側細胞，我們推測菌柄兩側細胞生長速率差異造成菌柄背地彎曲的向性表現。

六、菌帽是感應重力的重要系統部位

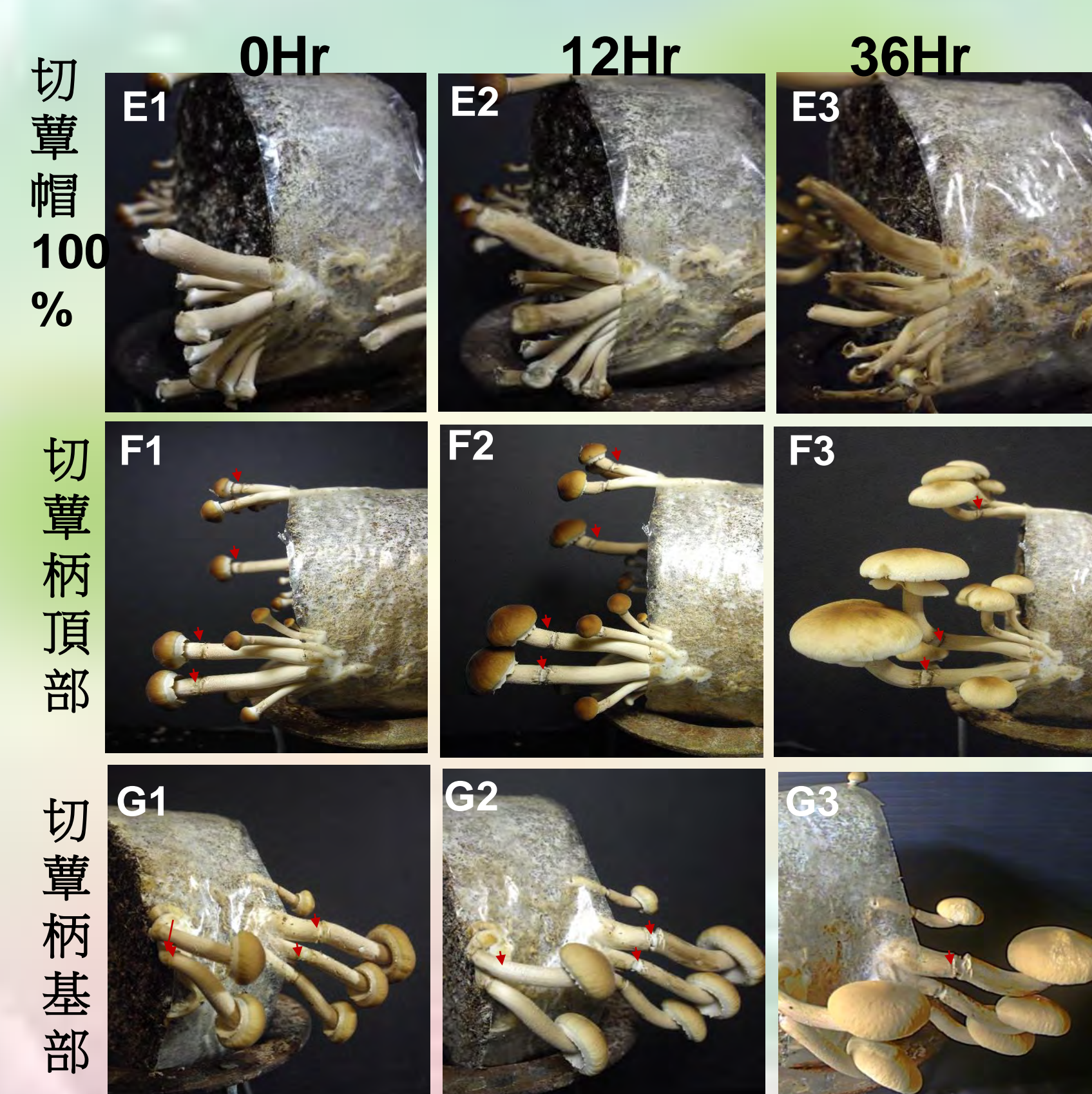
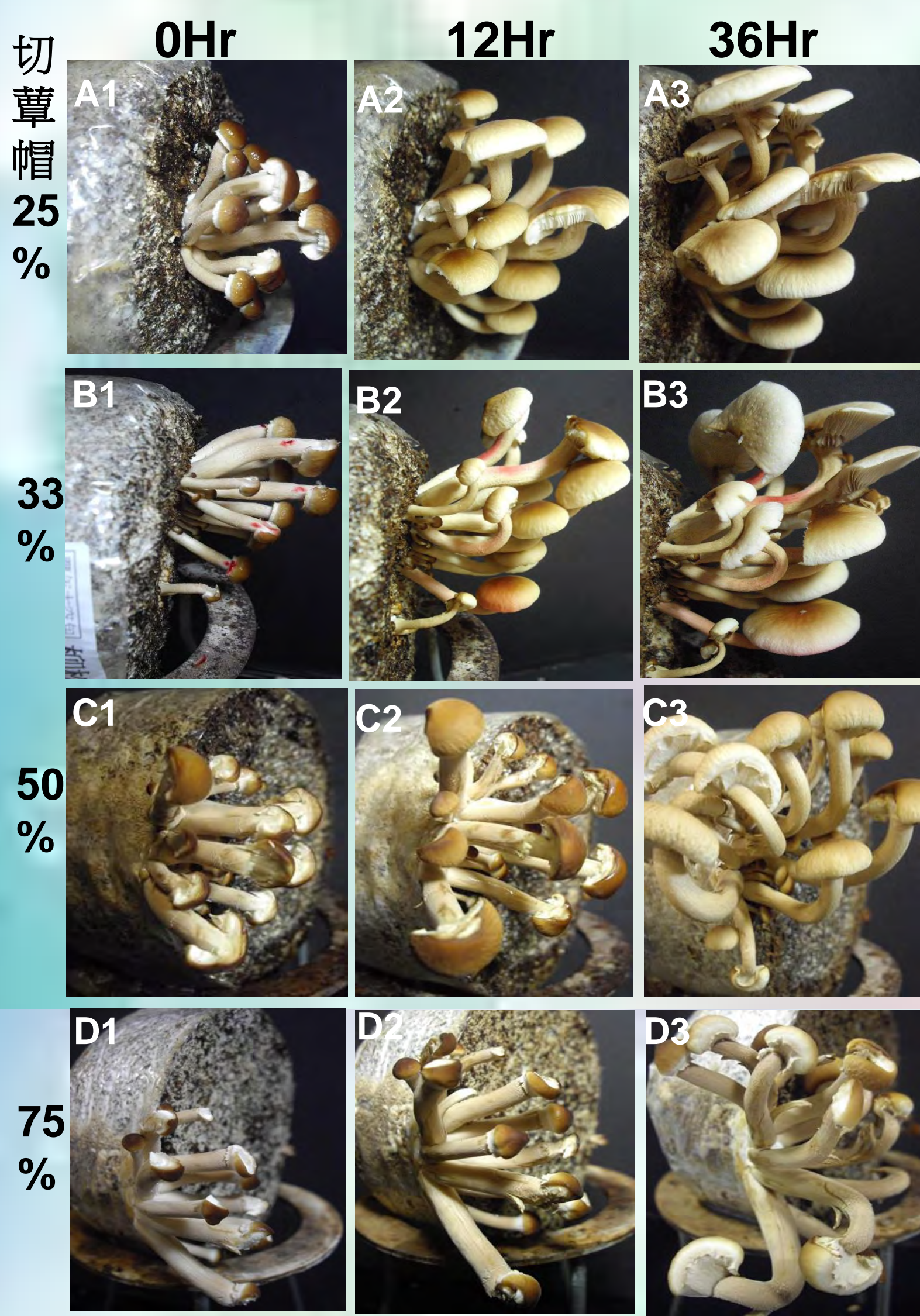


Fig21.切割菌帽或環切菌柄對子實體感應重力的背地彎曲影響。A~E切割菌帽不等比例,F~G環切菌柄頂部或基部

- 1.切割菌帽1/4、1/3的菌柄重力生長相似對照組達2.4~2.7度/mm，曲率角度超過90°。
- 2.切割菌帽3/4菌柄彎曲略顯雜亂，可能受損菌帽在控制「重新分配」菌柄彎曲受阻。
- 3.整個菌帽切除，菌柄無「向上」彎曲，表示菌帽扮演重要控制菌柄背地彎曲功能。

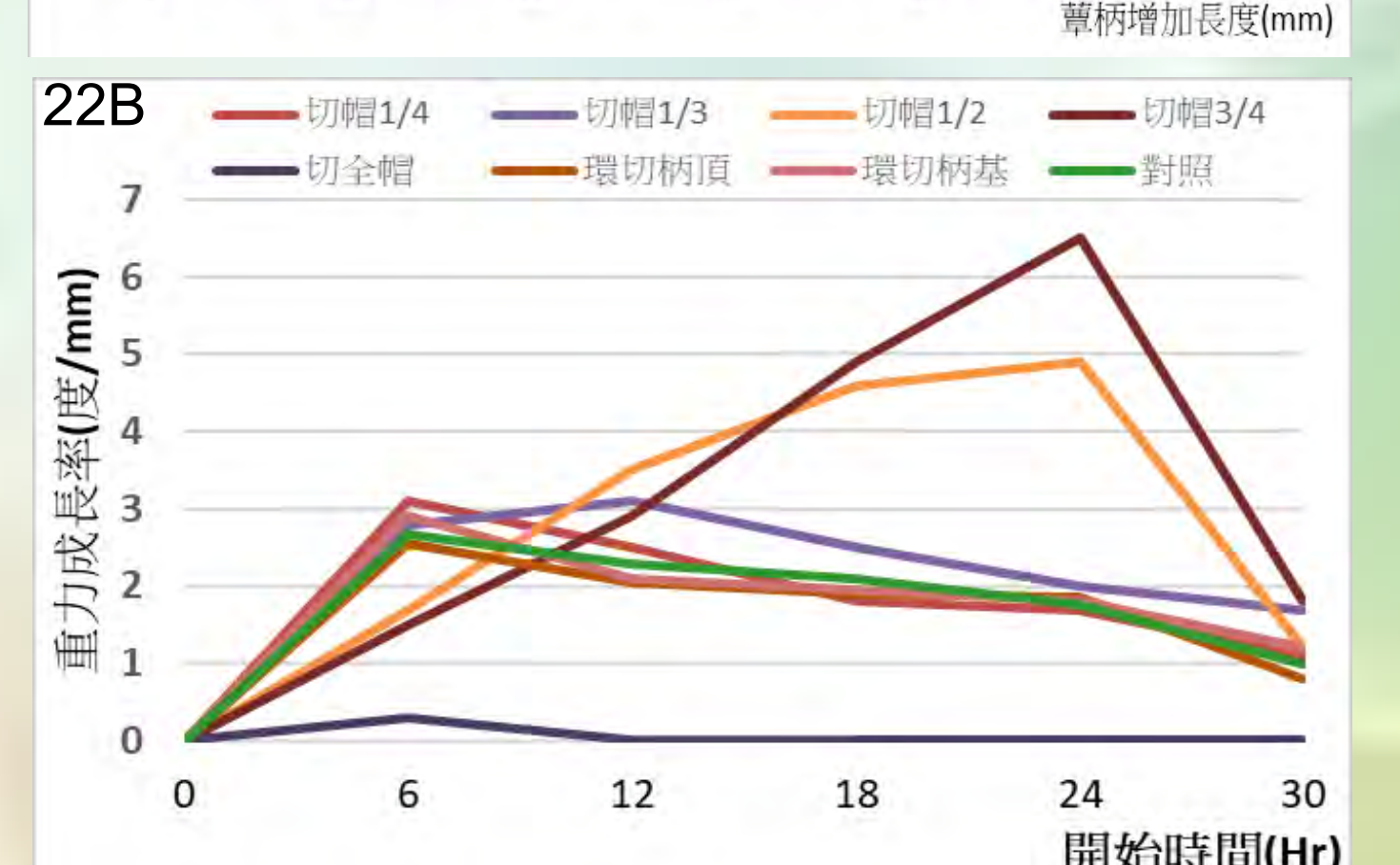
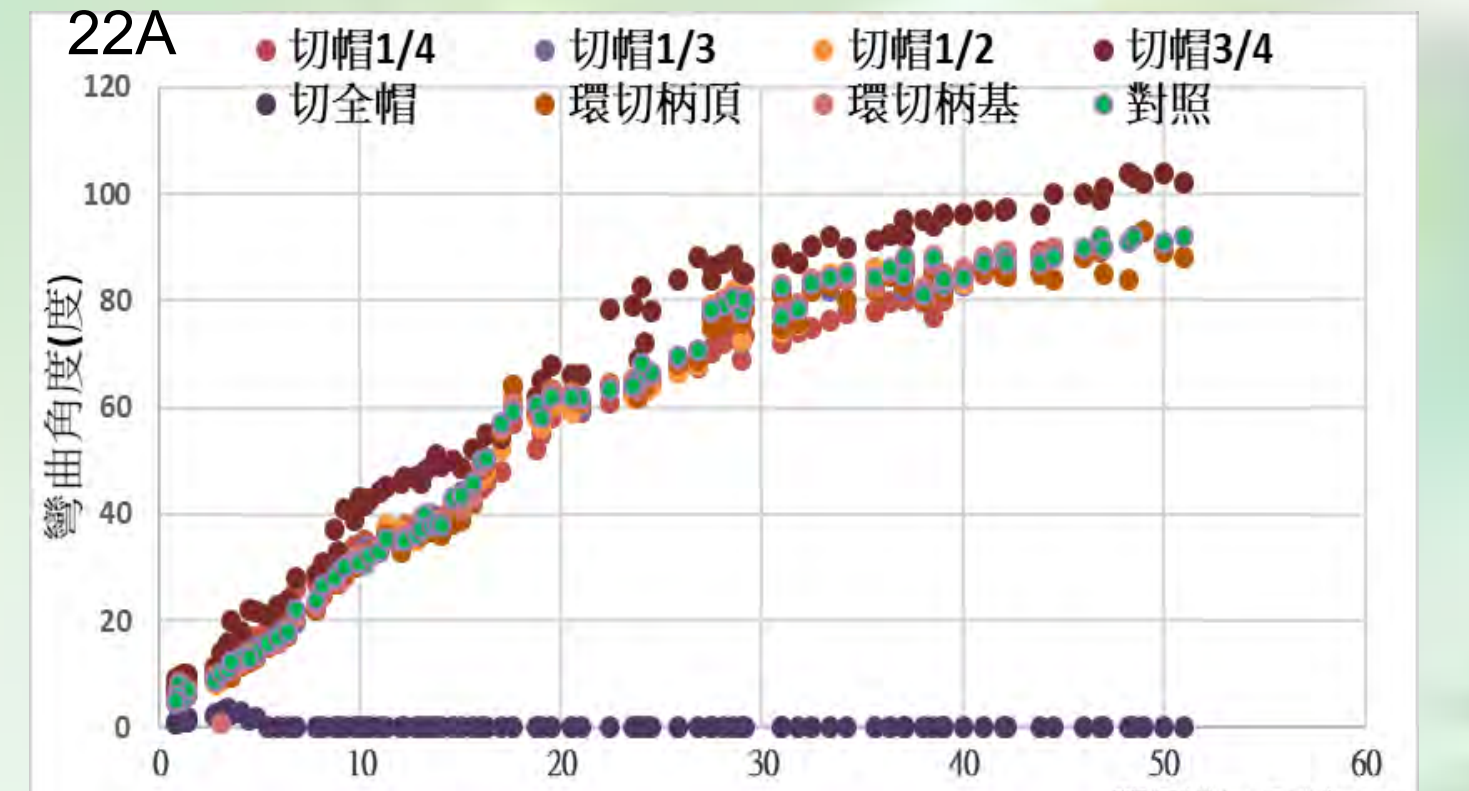


Fig22.切割菌帽或環切菌柄對菌柄彎曲和重力生長率的影響。22A 菌柄彎曲角度,22B重力生長率。

七、在旋轉狀態下子實體改變向性表現

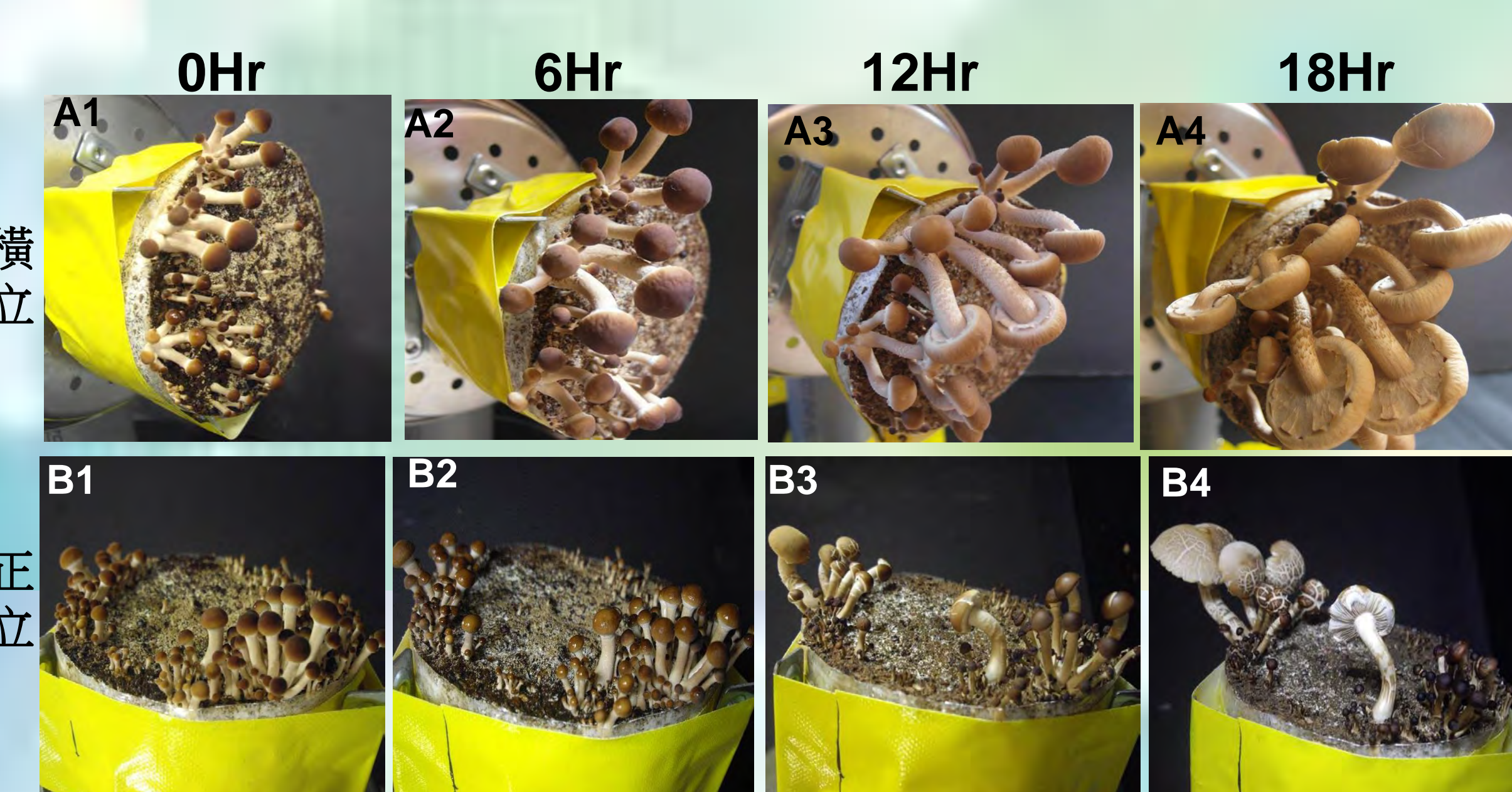


Fig23.橫立和正立在旋轉中子實體菌柄的彎曲表現。A1~A4橫立旋轉,B1~B4正立旋轉

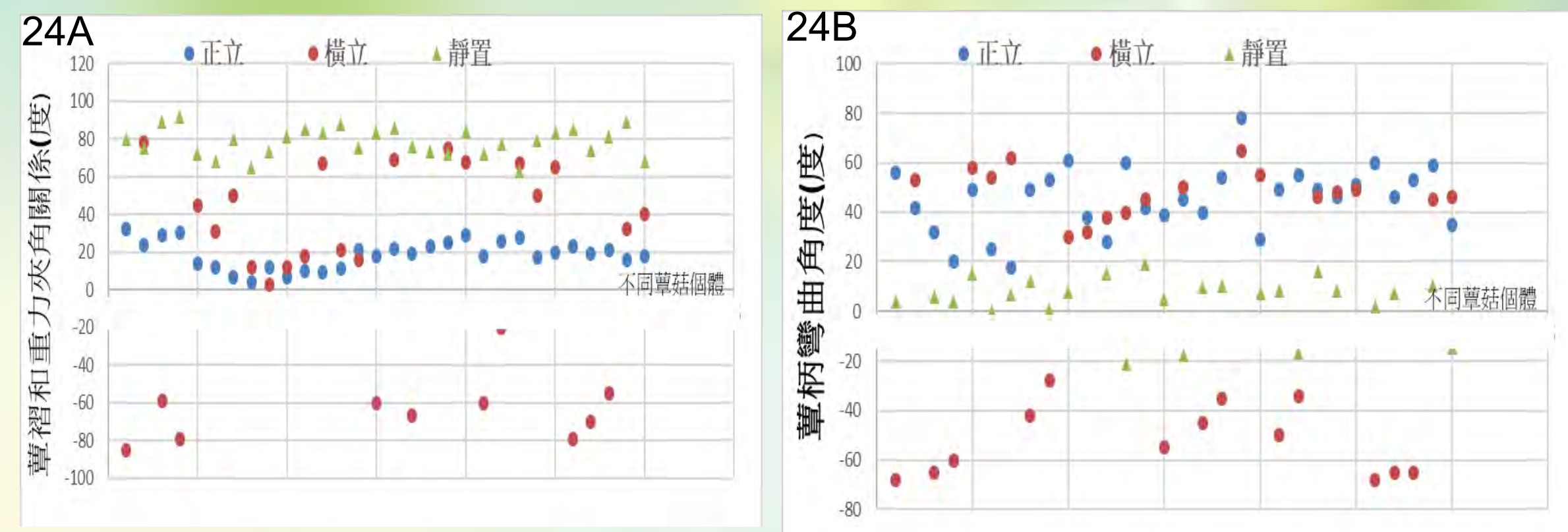


Fig24.以橫立和正立方式,在旋轉中子實體菌帽和菌柄的彎曲角度。

- 1.「正立」旋轉的菌柄皆背離重力生長，但出現菌柄彎曲不一致方向的現象，發生朝向「內部圓心」生長，暗示菌柄會感應重力之外的其他外力。
- 2.「橫立」旋轉菌柄的「背地向性」表現消失了，彎曲菌柄在旋轉的干擾中，受到離心外力的影響也出現「向心」方向的表現。

陸、討論和結論

討論一、菌菇感應重力的背地向性只有發生在子實體發育階段，我們發現菌絲生長時期和菌絲聚集形成菌絲球體不會感應地心引力產生向性表現，而菌類的生殖策略是利用「有限」的菌柄長度為孢子提供最佳的散播環境，報導指出菌菇在確定「方向」並確保「正確一側」向上的曲率之後使菌柄頂部區域再次直線表現以試圖獲得更優化的形狀 (Moore et al.,1997)。

討論二、本實驗結果發現菌菇在重力向量變動產生菌柄的彎曲是由頂部開始，文獻報導該頂尖區域似乎是產生開始彎曲的傳播信號往基部運輸，透過「近地側」快速延長菌柄以「向上」正確定位，而**菌帽和產生定位的「訊號」分子相關**，文獻報導細胞骨架可能參與菌柄對重力的感應，而Ca²⁺介導信號轉導可能參與生長差異產生向性(Bunyard,2012; Monzer,1996; Moore,1991)。

討論三、菌菇將生長資源「重新分配」以使菌柄彎曲遠離重力方向，但是旋轉的菌菇在多重向量力的作用下，**菌柄朝向旋轉中心方向生長(反旋轉離心)**，甚至菌帽的轉向帶動菌褶「平行」重力方向，其暗示旋轉的干擾導致生長的更新，產生適當重新定向到新的空間位置的子實體結構。Moore指出旋轉的灰鬼傘蓋不能產生孢子，因為菌褶處分裂形成孢子可能需要「重力」向量。

結論一、菌菇在幼子實體時期菌柄頂部就能感應重力方向，菌帽在子實體發育過程扮演「正確定位」的關鍵角色，

結論二、菌柄彎曲主要發生在距離頂端20-30%處，因「重新分配」使菌柄兩側細胞生長速率差異得以彎曲「向上」，使菌褶「垂直」。

結論三、菌柄可以感應重力之外的其他外力，旋轉中菌柄會朝向旋轉中心生長(反旋轉離心)，菌帽的轉向帶動菌褶「平行」重力。

柒、參考文獻

- 一、Nuwer R., (2014)。蘑菇自力更「升」。科學人雜誌 145：P24。
- 二、Britt A. Bunyard (2012)。Which way is up? Mushroom Gravitropism. Fung. 5(4):P26-28。
- 三、Greening J.P., C. Sanchez, and D. Moore(1997)。Coordinated cell elongation alone drives tropic bending in stems of the mushroom fruit body of Coprinus cinereus. Can J. Bot. 75:P1174-1181。