

屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：生物科

組 別：國小組

作品名稱：彩葉草的求生術-不定根之生理啟動與力學驗證

關 鍵 詞：彩葉草、不定根、遮光效應

編號：A4027

摘要

本研究旨在探討彩葉草（*Coleus scutellarioides*）不定根的誘導機制及其在力學固著與生理運輸上的實質功能。研究分為三個階段：首先，透過水培實驗驗證頂芽優勢與節點再生能力；其次，利用自創的「改良式空中壓條法」，系統性分析「生理位置（高/低位）」與「環境因子（遮光/不遮光）」對發根率的影響；最後，藉由物理拉力測試與紅墨水示蹤法，量化不定根的功能性。

研究發現：

- 一、誘導最佳化：「低位節點」結合「遮光處理」為最強發根組合。低位組在觀察第 26 天即達成 80% 生根率，顯著優於高位組（60%），證實靠近基部之成熟組織具備較高分化潛力；遮光環境則有效防止生長素光解，加速強勢根系（>10 根）之形成。
- 二、力學固著表現：物理測試顯示原生根抗拉力（130g）最強，水培根（80g）次之，人工誘導根（50g）雖較細嫩，但相較於無根對照組（0g），能提供關鍵的初期定錨力，顯著提升植株穩定性。
- 三、生理功能驗證：透過「莖部包覆技術」排除滲透干擾，實驗證實誘導根具備功能完整之木質部。在莖部無法吸水的情況下，誘導根能獨立支撐植株水分需求，避免其因脫水導致莖部萎縮與組織凋萎。

結論：彩葉草展現了極強的生理韌性，透過精準的「生理啟動」可快速誘導出具備實質支撐與吸收功能的「求生根」。本研究所建立之標準化誘根流程，不僅具備園藝育苗價值，更為高大草本植物之防災加固提供了科學實證基礎。

目錄

壹、前言(含研究動機、目的、文獻回顧)	P.1
貳、研究設備及器材.....	P.3
參、研究過程或方法.....	P.4
肆、研究結果.....	P.9
伍、討論.....	P.27
陸、結論.....	P.29
柒、參考資料及其他.....	P.29

壹、前言

一、研究動機

九月份開學之際，我們意外發現教室前的彩葉草竟在空氣中萌發了密集的「根」(如圖一)。這令我們深感困惑：「根不是應該向地生長嗎？為何會裸露在空氣中？」彩葉草身為常見的草本植物，並非如榕樹般具備典型的氣生根構造。這幅異樣的生長畫面，引發了我們腦海中一連串的科学疑問：到底是什麼原因促使彩葉草在空氣中啟動了「不定根」的生長機制？是暑假期間長期乾旱、缺乏水分供應的「生存逆境」？還是颱風過境後，土壤過度潮濕導致根部缺氧的應激反應？這些在節點處悄然萌發的根，是否正是植株發出的「求救訊號」。



圖一:彩葉草密集的「根」

為了揭開彩葉草這套獨特的「求生術」，我們決定展開科學探究，從生理位置、環境因子到力學與運輸功能，一步步解析這份來自大自然的求生密碼。

二、研究目的

1. 了解彩葉草不定根的環境適應與轉化效率。
2. 探討彩葉草不同部位插穗於不同介質下之生長與發根影響。
3. 觀察彩葉草水培轉土培的存活與生長表現。
4. 不同條件對彩葉草不定根誘導之影響。
5. 測試彩葉草的不定根能承受的最大拉力值。
6. 不定根之水分運輸生理功能檢測。

三、文獻回顧

(一) 名詞解釋

1. 彩葉草(*Coleus blumei*)

(1) 繁殖方式

繁殖育苗：播種在春季進行，好光性，播後略蓋薄沙，稍遮蔭，播種後10天左右即可發芽。

(2) 栽培方式：彩葉草夏季可置放於半陰涼處，需要通風環境，土壤不可積水。生長溫度建議控制在 $15-30^{\circ}\text{C}$ 之間，夏、秋季開花。不耐寒，冬季生長不良。夏季高溫可移至較陰涼之地，但若光線太弱，會讓彩色花紋轉為嫩綠色以行光合作用，宜使用砂質土壤種植。

(3) 形態特徵：彩葉草為唇形科多年生草本，以色彩斑斕的葉片為主要觀賞特色。其莖呈四方形且肉質，全株被細毛。葉對生，呈卵形至心形，葉緣具鋸齒或波浪狀，葉色變化極大，包含紅、黃、綠、紫等鑲嵌色。花為小型總狀花序，呈淡藍色或紫色。

2. 不定根（Adventitious roots）：指所有從莖上或葉上發生的根，亦即非從種子胚根生出的根，校園內彩葉草從莖上長出許多不定根(如圖二、圖三)。本研究指的不定根都是由校園內彩葉草莖上所生長的根。



圖二: 彩葉草莖節上所生的不定根。



圖三: 靠近彩葉草基底所生的不定根。

[照片由研究者自行拍攝]

3. 改良式空中壓條法

本研究參考傳統農業「空中壓條」技術，針對彩葉草嫩莖特性進行改良。主要操作包含：以濕潤棉花取代傳統介質、使用保鮮膜包覆以維持高濕度微環境，並透過黑色紙包覆進行遮光處理，後文簡稱為「包覆誘根」。

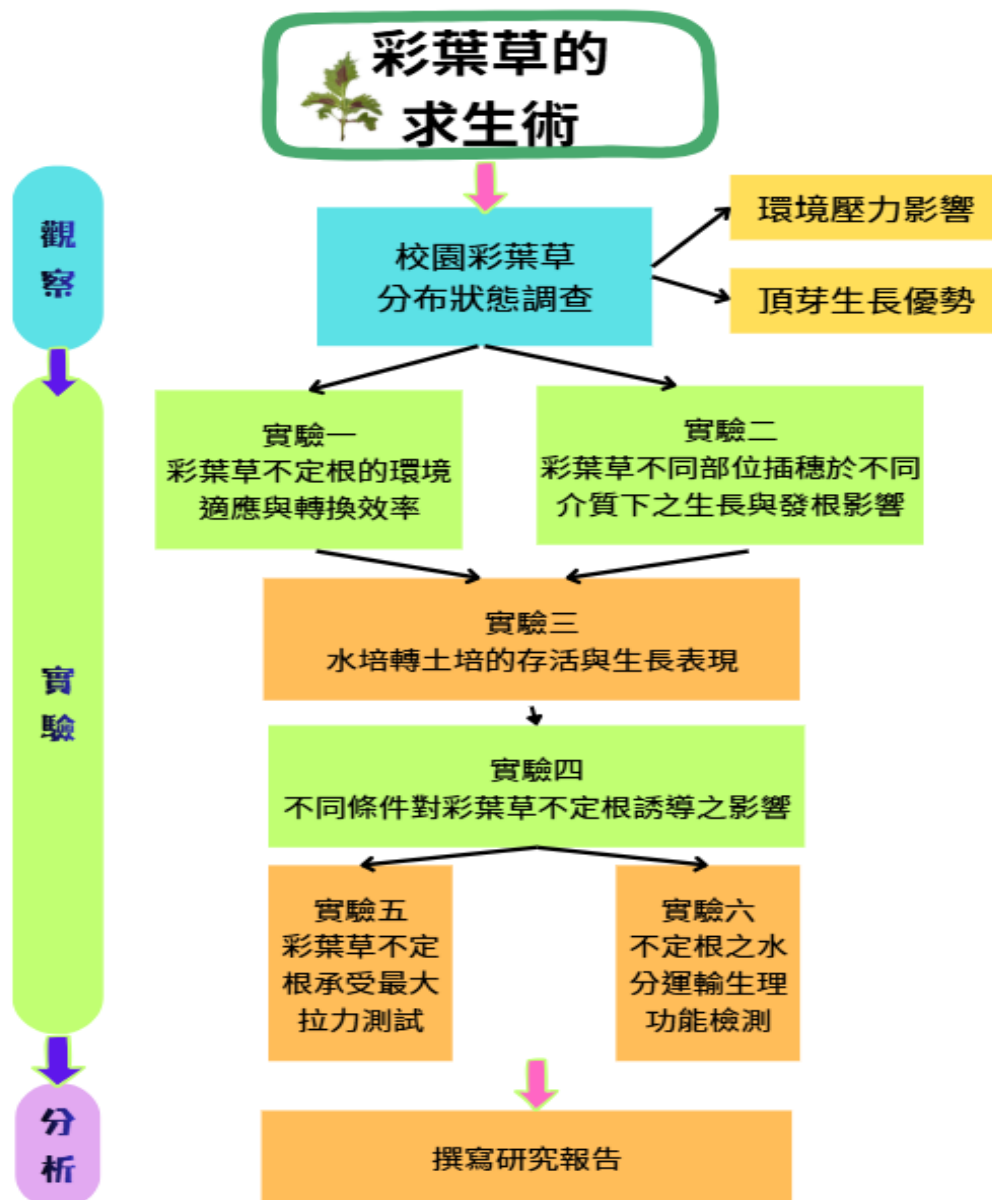
貳、研究設備及器材

一、實驗器材

類別	器材名稱	用途說明
培育類	彩葉草植株、一寸盆、試管、試管架、燒杯、鑷子、剪刀、植物剪刀、鏟子、水、澆水器、噴瓶、砂質土壤、椰纖土、珍珠石、培養土、水苔	基礎植株生長與對照組建立
誘導類	馬克筆、圓形貼紙、橡皮筋、直尺、捲尺、黑紙、保鮮膜、棉花	執行「改良式空中壓條法」之核心器材
檢測類	手持式電子行李秤、小夾子、尼龍繩	進行「實驗五：不定根拉力測試」
檢測類	紅墨水、顯微鏡、膠帶、試管、試管架	進行「實驗六：水分運輸切片觀察」
紀錄類	手機、電子秤、捲尺	數據量化與生長歷程紀錄

參、研究過程及方法

一、研究流程圖



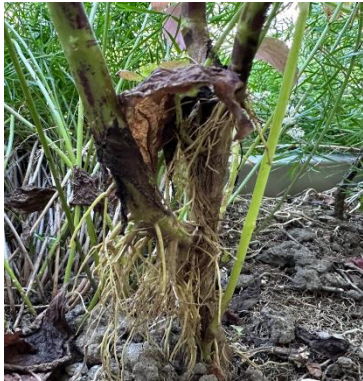
[研究者自行繪圖]

二、實驗方法

本研究採實驗研究法，先調查學校彩葉草生態分布，發現了異常樣本(第 12 盆)，有八個盆栽都是面北，但生長異常好，調查原因是有補土和重新扦插，經過長期追蹤紀錄，進而引發後續實驗，嘗試找出彩葉草產生不定根的原因，進一步進行植物生態復育。

(一) 校園環境初步觀察

本次調查校園彩葉草皆生長於二樓教室前方花台，每個花台長 310 公分、寬 30 公分、高 50 公分，都是同樣的尺寸。但經過兩個月漫長的暑假，開學後我們發現彩葉草的莖節處都長出了不定根(如下圖三~五)

		
圖四:Y 字型彩葉草不定根	圖五:靠近土壤處長出許多不定根	圖六:離地 15 公分處也長出不定根

[照片由研究者自行拍攝]

這是以前從未發生過的狀況，經調查後整理成下表一。

表一：校園彩葉草生長分布狀態調查

盆栽	第 1 盆	第 2 盆	第 3 盆	第 4 盆	第 5 盆	第 6 盆	第 7 盆	第 8 盆	第 9 盆	第 10 盆	第 11 盆	第 12 盆	總計
彩葉草總數量	13	33	15	6	26	16	11	14	8	24	13	10	189
有不定根數量	8	17	4	0	14	7	9	7	3	13	10	0	92
有不定根比例	61.5%	51.5%	26.7%	0.0%	53.8%	43.8%	81.8%	50.0%	37.5%	54.2%	76.9%	0.0%	48.7%
觀枯死數量	1	3	4	2	12	14	9	6	4	11	2	0	68
枯死比例	7.7%	9.1%	26.7%	33.3%	46.2%	87.5%	81.8%	42.9%	50.0%	45.8%	15.4%	0.0%	36.0%
是否有其他植物	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	武竹 6 叢	
盆栽面向	面東	面東	面東	面東	面北	面北	面北	面北	面北	面北	面北	面北	

根據調查結果，我們發現：

1. 環境壓力的影響：面向東（第 1-4 盆），不定根平均比例約為 34.9%，枯死平均比例約為 19.2%。面向北（第 5-12 盆），不定根平均比例約為 49.7%，枯死平均比例約為 44.3%。面東的盆栽日照充足，且通風良好。面北的盆栽陽光不會直射，因前方有教室擋住，但通風還是很良好。

面北的盆栽不定根的生成率和枯死率，似乎都比面東高。
我們覺得很奇怪，這是否代表北側的環境壓力比較大呢？

2. 「求生訊號」的特徵：第 7 盆的不定根比例高達 81.8%，同時枯死比例也是第二高（81.8%）。相較之下第 12 盆雖然面向北，但兩項數據皆為 0%。第 12 盆是因為班級導師有補土，也有重新扦插彩葉草，因此該盆彩葉草生長狀況良好。其他盆栽有長出不定根彩葉草的盆栽內泥土都被武竹的球狀根給佔據，整片土非常硬，連用鏟子都很難拔起。

彩葉草重新扦插，還有補土似乎可以讓彩葉草長得更好，這個又讓我們產生好奇，究竟引發不定根生長的原因是什麼？可以幫助彩葉草「救命」嗎？



圖七:第 12 盆內的土壤，有一塊一塊的土塊，雖然根武竹同盆，但看不見武竹的根。



圖八:第 7 盆內的土壤，緊緊的被武竹的根包覆，明顯看見球狀根在表面。

[照片由研究者自行拍攝]

(二) 莖部包覆技術實驗方法

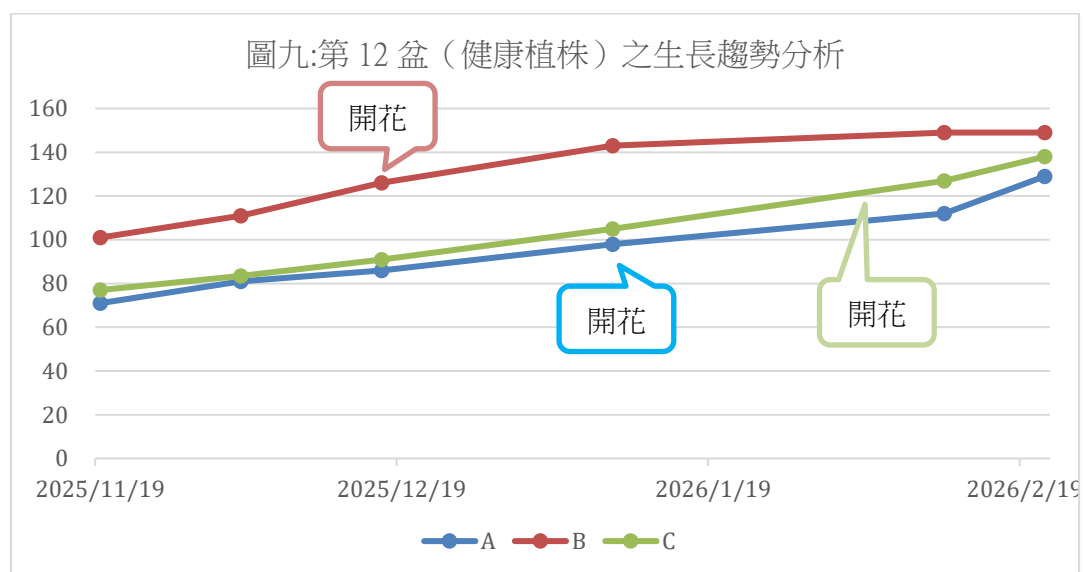
本技術採用多重密封機制，目的在徹底阻斷莖部吸水，確保水分僅能經由「不定根」進入植株。

表: 莖部密封包覆技術標準作業程序 SOP

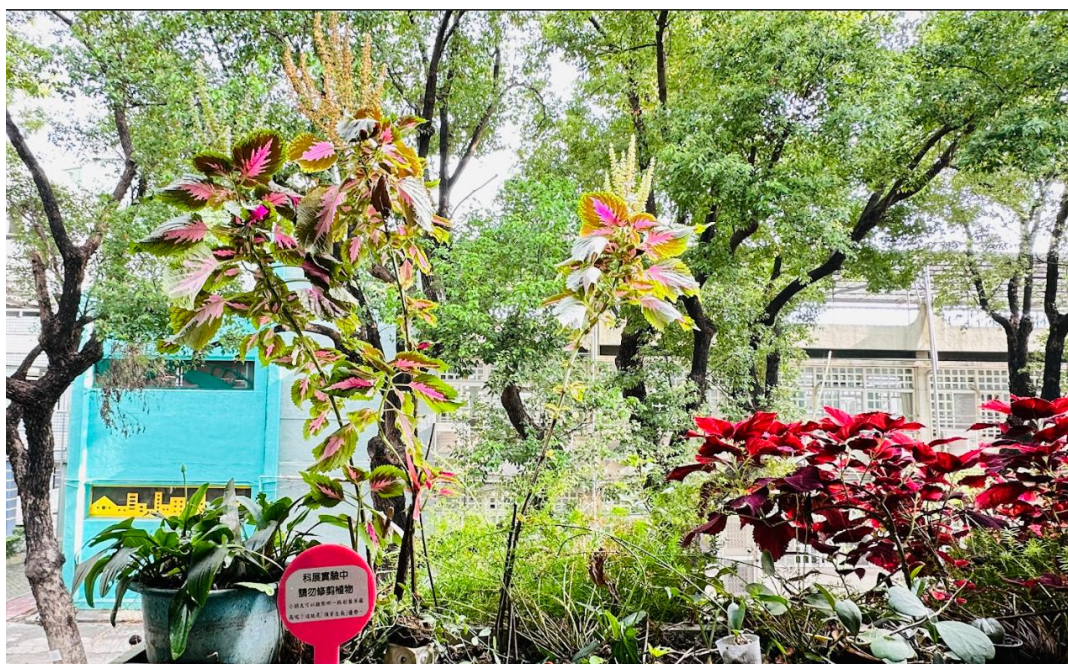
步驟	階段名稱	操作要點	照片	科學目的
Step 1	凡士林化學阻隔	在莖部切口處及預計浸泡部位均勻塗抹一層凡士林。		利用油脂不溶於水的特性，填補組織孔隙，達到首層防水。
Step 2	保鮮膜物理密封	使用保鮮膜由下往上「層層封起」緊密纏繞，覆蓋塗有凡士林的部位。		建立物理屏障，防止液體分子滲透接觸莖部皮層。
Step 3	膠帶加強固定	於保鮮膜外層及接縫處使用膠帶環繞加壓，確保包覆層不因重力下滑。		強化密封壓力，防止因長時間浸泡導致水分由縫隙滲入。
Step 4	液位標定與對位	緩慢置入紅墨水中，調整深度使紅墨水液位不超過包覆層上緣，但確保根部完全接觸紅墨水。如果根無法碰到墨水則用棉花輔助，讓根透過棉花吸取水分。		精確控制變因，排除液面溢入的可能性，確保根部吸水效率。
Step 5	浸置與生理觀察	靜置 12-24 小時後移除包覆層，觀察葉脈顏色變化並進行莖部橫切片。		驗證不定根是否具備逆勢向上運輸水分的生理功能。

(三) 彩葉草頂芽生長優勢-標竿對照組

透過對第 12 盆長達四個月的追蹤，我們發現當彩葉草處於健康土壤時，其他植物的根系競爭因素會降低，其頂端優勢能得到最大程度的發揮。因此將其定義成「標竿對照組」，如下圖九。



根據第 12 盆的成功，推測「健康土壤」與「頂芽扦插」是關鍵，進而引發後續實驗。



[照片由研究者自行拍攝]

肆、研究結果

一、實驗一：彩葉草不定根的環境適應與轉化效率

(一) 實驗目的

針對已經長出來的不定根，在接觸不同介質（水和土）後，其轉化為功能性根系的效率為何？分成水培和土培兩組，各擷取有葉和無葉樣本。

(二) 實驗結果

組別	初始狀態	生根天數 (初見)	第 5 天 根長/數量	第 22 天 根長/狀態	新芽/新 葉	存活狀態	
水 A	有葉	5 天	5 根 / 約 3cm	約 13cm / 茂密細長	持續生長	優良	
水 B	無葉	5 天	3 根 / 約 3cm	約 12cm / 根部發達	有 (節點處)	良好	
土 A	有葉	較慢	不明顯	> 10cm / 具側根	穩定	良好	
土 B	無葉	無	無	枯死	無	失敗	
							
圖 1-1: 水 A		圖 1-2: 水 A		圖 1-3: 水 B		圖 1-4: 土 A	
5 天即生根，且長出 許多細白根。		22 天後長出更完整的根 系。		在側邊節點處 長出新生葉片		22 天後也長出細長的 細白根。	

(三) 實驗小結

1. 莖部的能量儲存策略：水 B 組的重生證明彩葉草的莖部（尤其是節點處）含有足夠的再生細胞與儲存物質。在純水低壓力的環境下，植物優先將能量用於「發根」，再啟動「芽點」進行營養生長。
2. 介質環境決定生死：同樣是無葉片，**水培能存活**而土培枯死，顯示環境阻力是關鍵，也證實彩葉草生命力強盛。
3. 根系發展差異：雖然水培組根長 13 公分領先，但土 A 組在土壤中也達到了 10 公分。後續應觀察兩者在轉栽後的適應力，探討「水生根」與「土生根」的生理功能差異。
4. **葉子+水**是關鍵因素，可以讓具有不定根的彩葉草達到 100%的轉化率。

二、實驗二：探討彩葉草不同部位插穗於不同介質下之生長與發根影響

(一) 實驗說明

從實驗一結果得知葉片是彩葉草生長很重要的因素，查詢資料後得知彩葉草扦插可用頂芽和中段扦插，為了豐富校園彩葉草生態。設計此實驗，用不同介質(水苔、水培)剪取校園中健康的彩葉草頂芽和中段作為扦插，想了解生根狀況。



圖 2-1 水培 A、B 組



圖 2-2 水苔 C、D 組

(二) 實驗結果

表 2-1 根部發育與植株生長對照表

組別	扦插位置與介質	首次觀察到生根	最終根部平均數量	初始莖平均長度	最終莖平均長度	葉片增長情況
A 組	頂芽 + 水培	第 11 天	15 根以上 (*)	6 cm	5.3 cm	穩定 (約 7-8 片)
B 組	中段 + 水培	第 14 天	2.2 根	10 cm	9.6 cm	差 (掉葉嚴重)
C 組	頂芽 + 水苔	第 11-14 天	難以計數 (*)	4 cm	7.8 cm	極佳 (翻倍成長)
D 組	中段 + 水苔	第 14 天後	1.8 根	7 cm	10.0 cm	不穩定
註：「*」表示根系已形成網絡，與介質（水苔）緊密結合或數量過多，具備極強吸收力。						

由表 2-1 得知

1. A、C 兩組(頂芽組)發根速度最快，根的平均數量最多，根系發展最好，葉片生長也較佳。
2. C、D 兩組(水苔組)莖的生長速度最快，植物明顯長高。
3. A、B 兩組(水培組)莖的長度為負成長，是因為實驗過程中有些因實驗操作不慎導致折斷，有些莖底部發黑需剪除，保留剩餘莖段繼續觀測其再生能力，因此才會出現負成長的數據。

水培 頂芽	水培 中段	水苔 頂芽	水苔 中段
 圖 2-3: A1 組雖然底部莖發黑剪除，但是仍然有長根，為同時間根系最長代表。	 圖 2-4: B2 中段扞穗雖然保有部分葉子，但是生根效果不佳，葉片生長也不多。	 圖 2-5: C1 生長良好，根有抓住水苔，但無法準確算數量與長度。	 圖 2-6: D3 有長出細微小根。

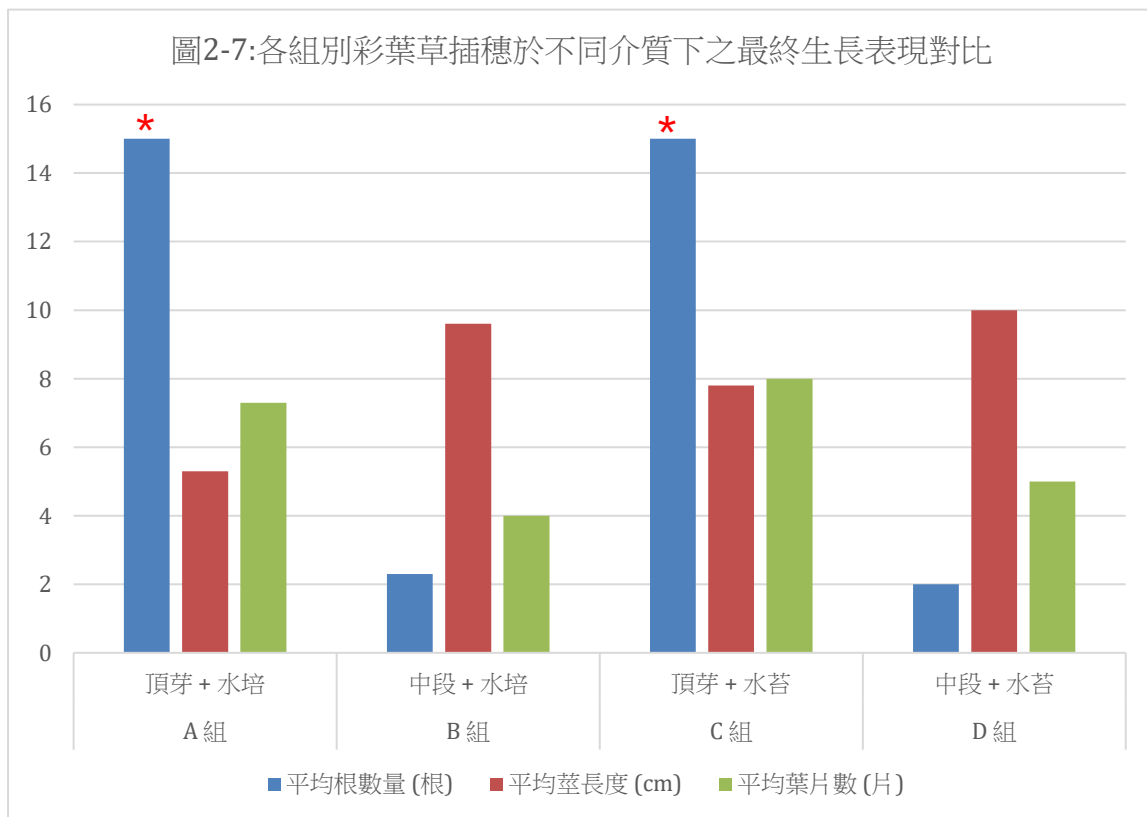
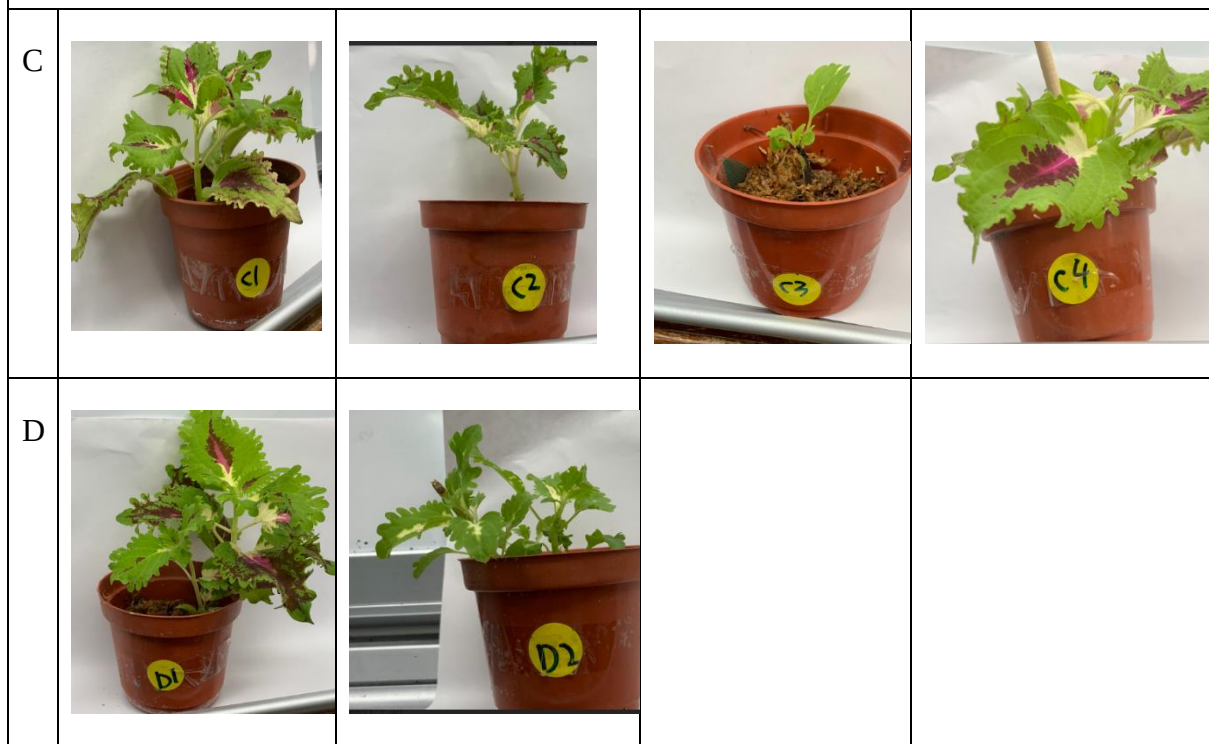
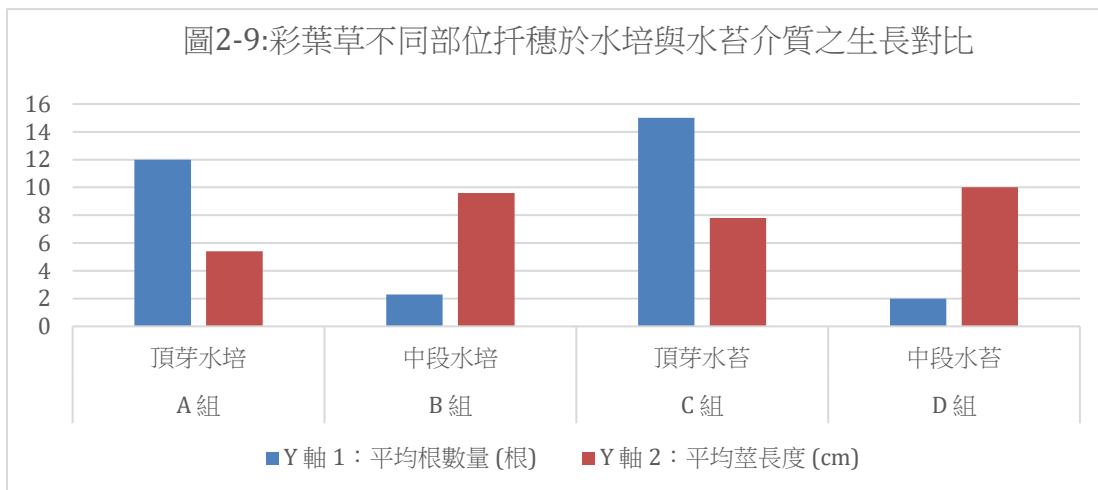


圖 2-8 水苔組最終生長狀況(12 月攝影)



[照片由研究者自行拍攝]

圖2-9:彩葉草不同部位扦插於水培與水苔介質之生長對比



1. 根據長條圖顯示，**頂芽插穗 (A, C)** 在根部發育上展現絕對優勢，其平均生根數為中段組的 6 至 7 倍。
2. 雖然中段組 (B, D) 在莖部長度上明顯領先（平均約 9.8 cm），但觀察發現其長度增加主要來自於初始切取時的長度，而非新生長；反觀頂芽組雖莖部較短，但根系發達，且 C 組（水苔）在後期展現出明顯的莖部伸長趨勢。這證明了**根部的健全發育是支持莖部向上生長的前提**。

(三) 實驗小結

1. 本實驗證實了彩葉草扦插繁殖的成功關鍵在於「頂端優勢」。頂芽插穗因具備活躍的分生組織，能持續供應生長素，使其在水培 11 天內即產生大量具吸收功能的白色不定根。且觀察 3 個月後的結果發現，頂芽組 A、C 兩組存活率皆為 100%。
2. 中段插穗因缺乏頂芽，導致發根遲緩且伴隨掉葉，顯示其再生能力受限，且觀察 3 個月後的結果發現中段插穗 B 組存活率為 75%、D 組為 50%，都比頂芽組低。
3. 在介質選擇上，水苔因兼具保濕與通氣性，使頂芽組在第 21 天後展現出比水培組更強的生長勢，是本研究中推薦的最佳扦插方案。但因為我們聚焦在不定根系探討，需要觀察到根的生長狀況，利用水苔當介質時，根會緊緊抓住水苔，無法觀察到根的長度與數量，因此後續研究選擇一樣存活率是 100%的水培育根為主。

三、 實驗三：水培轉土培的存活與生長表現

(一) 實驗說明

我們將實驗一和實驗二的結果得知水培頂芽扦插方案根系生長效果最佳，也容易觀察，因此將實驗一和二優勢組挑出，加上一些不定根組，與其介質轉化成「土培」想知道彩葉草在水培下生根後轉土培的效果，以便後續改善校園彩葉草生態。

1. 土培育苗方式

本次土培的土為椰纖泥炭土(2)、砂質土(2)、珍珠石(1)，比例均勻攪拌而成的育苗土。

2. 移植組別說明

原組別	不定根水 A	不定根水 B	原生不定根	原生不定根	細白根水培 A3	細白根水培 A4	新增頂芽	新增中段	水培 B2	水培 B1
生長條件	有葉 有根	無葉 有根	有葉 有根	無葉 有根	有葉 有根	有葉 有根	有葉 無根	有葉 無根	有葉 有根	有葉 有根
描述	同時有細白根跟不定根。	實驗意外，不小心把葉子剪掉了。	從校園剪取原生不定根有葉植株。	從校園剪取原生不定根植株移除葉片。	此樣本在水培 A 根的生長狀態良好。	此樣本在水培 A 根的生長狀態良好。	新增組	新增組	此樣本在 B 水培根的生長狀態良好。	此樣本在 B 水培根的生長狀態良好。
轉土培組別	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
照片										

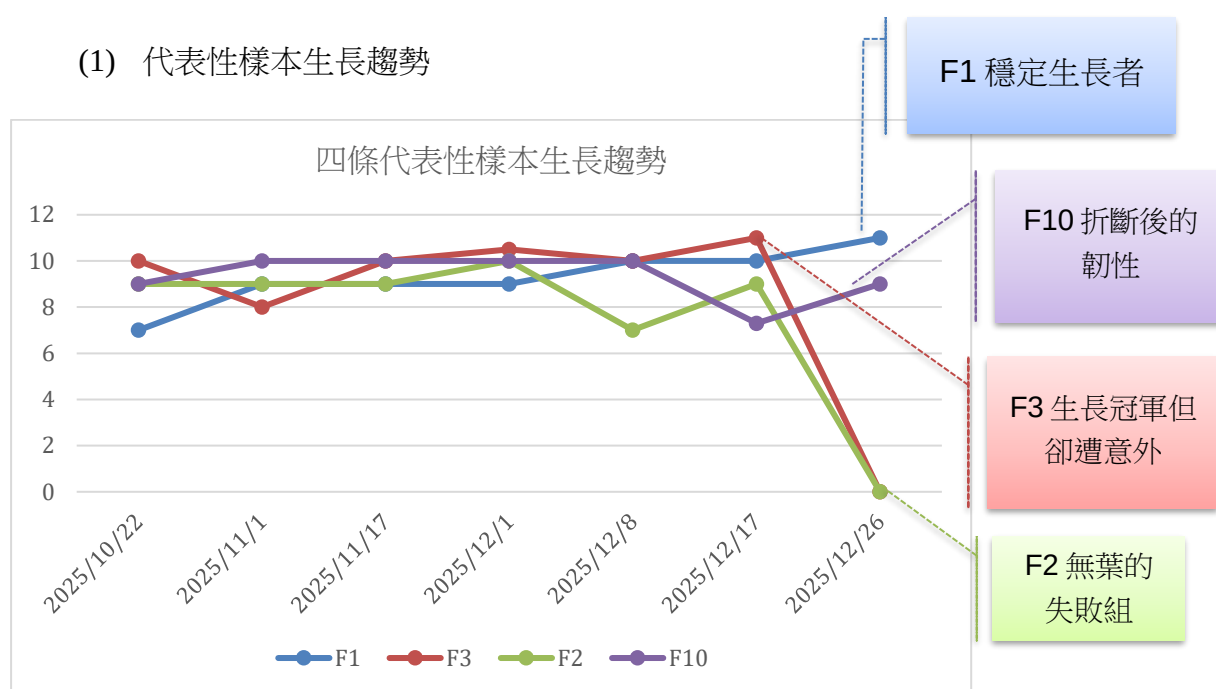
(二) 實驗結果

1. 移植一個月內存活率表現

組別類別	樣本編號	存活狀態	存活率
有葉組（優勢組）	F1, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10	7 存活 / 1 死亡 (F3)	87.5%
無葉/弱勢組	F2, F8	0 存活 / 2 死亡	0%

2. 移植三個月生長趨勢觀察

(1) 代表性樣本生長趨勢



上圖選取四個最具代表性的樣本，也說明彩葉草在校園環境中可能遇到的四種情境：

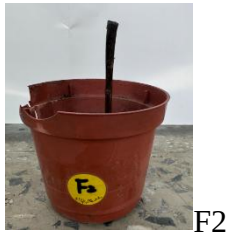
編號	生長特色	說明
F1	穩定生長者	代表「標準成功案例」，顯示穩定的水培生根後轉土培，是改善校園植栽最可靠的路徑。
F3	高峰後夭折	代表「環境風險」，即便前期生長優勢最強（葉片高達 18 片），在面對 12 月底的低溫時，仍有死亡風險。
F2	無葉失敗者	代表「生理限制」，證明了沒有葉片的插穗，即便有莖部，在轉土培後也難以維持生命。
F10	意外重生者	代表「意外後的再生」，雖然被折斷但是這證明彩葉草具備極強的傷口修復能力，只要根系已在土中穩固，即便上方莖部受損，仍能嘗試重新發育。

(2) 生存天數排行榜

戰力名次	編號	初始特徵與優勢	存活天數	最終狀態	生長狀態描述
1	F1、F5、F6	有葉有根	73 天 +	健康	完全適應：均衡的根葉比例，成功度過轉植和蟲害的難關。
	F7	有葉無根			雖然原本無根，但是因為頂芽優勢，後來長出根系，故生長良好。
2	F10	有葉有根	73 天 +	健康	韌性奇蹟：12/17 遭人折斷，頂端發黑。靠著強大原根系支撐生長，證明健康根系的重要性。

2	F9	有葉有根	73 天 +	健康	抗病表現：莖上端雖發黑變褐色，但及時停止壞死，維持基部生命力。
3	F2、F4	無葉有根	65 天	死亡	先天不良：因為缺乏葉片行光合作用，無法產生養分，後來能量耗盡，最早死亡。
3	F3	有葉有根	65 天	死亡	人為破壞：12/26 莖折斷且被連根拔起。長勢最旺(18 片葉)，卻因意外而死亡。
4	F8	有葉無根	33 天	死亡	轉植障礙：缺乏水培預發根，無法吸收土壤水分，最早死亡。

下表為植物存活照片說明

第一名 健康 長壽組 73+				
第二名 健康 長壽組 73+				
第三名 能量耗盡組 65 天	 F2	 F3	 F4	
第四名 短命組 33 天	 F8			

(三) 實驗小結

1. F8 是全部樣本中最早死亡的，雖與 F7 同為新增無根組，但是 F7 有頂芽生長優勢，故長出新生根，得以維持生命。F8 缺乏健康根系，待其養分耗盡後死亡。
2. F2 和 F4 皆為「無葉有根」，雖然可以從根系吸收土壤水分，但是缺乏葉片行光合作用產生養分，因此能量耗盡後死亡。
3. F3 原先具有「有葉有根」的優良生長條件，且強勢生長趨勢，但卻因人為破壞折斷而死亡，這也代表校園內彩葉草可能面臨的危機。

四、實驗四：不同條件對彩葉草不定根誘導之影響

(一) 實驗說明：

目前校園內的彩葉草植株高度平均已達約 50 公分以上。根據文獻與初步自然觀測，彩葉草的不定根多生長於靠近地面的低處節點。為進一步驗證環境因子與空間位置的關係，我們設計了此實驗，試圖在植株不同高度的人為誘導生根。本研究特別提出「位置是否影響不定根生長」之因子，是因為觀察到原生不定根在自然界多發生於低處。我們試圖探討人為介入（遮光）是否能克服高位節點在自然條件下不易發根的限制。

(二) 實驗變因設計：

操縱變因	節點位置	H 組	選定植株頂端生長點下方之嫩綠節點。
		L 組	選定距離地面 10 公分之成熟節點。
	光照條件	A 組	遮光，利用黑色紙包覆阻絕光線。
		B 組	不遮光，維持保鮮膜透明狀態。
控制變因	等量濕棉花包覆、方形保鮮膜（10*10cm）、每組樣本數 10 株、相同的砂質土環境（用於後續拉力測試）		
對照組	僅在相同位置做記號，不進行任何包覆處理		

(三) 「改良式空中壓條法」sop 步驟：

步驟	階段名稱	操作重點	照片	科學目的
Step 1	生理位置選定	優先選擇植株中下部之成熟節點。		利用低位節點較高的細胞分化潛力。
Step 2	濕潤介質設置	取適量純淨棉花包裹節點，並噴灑適量蒸餾水維持濕度。		提供根部原始體萌發所需的水分與濕氣。
Step 3	物理包覆密封	使用透明保鮮膜嚴密包裹棉花，確保水分不流失。		建立穩定的高濕度微環境 (Micro-environment)。
Step 4	避光環境建立	於保鮮膜外層包覆黑色紙遮光。		避免生長素 (Auxin) 受光分解，加速誘導效率。
Step 5	動態追蹤觀測	每 3-5 天檢查棉花濕度，補水與更換棉花並記錄根尖萌發情形。		監測生理啟動時程，確保誘導品質。
註：本方法之創新點在於排除土壤介質之重量負擔，並透過精準遮光提升生根率。				

(四) 實驗結果

表 5-1：彩葉草不定根誘導成功率與質量統計表

表格說明： 本表呈現生理位置（高/低位）與環境因子（遮光/不遮光）對發根之影響。

組別	處理條件	觀察天數	生根樣本數 (N=10)	生根率	強勢發根率(>10)*	實驗結果
LA	低位 / 遮光	26 天	8/10	80%	40%	表現最優。在最短天數內達成最高生根率與強勢發根比例。
HA	高位 / 遮光	30 天	6 / 10	60%	40%	表現次之。表現次之。雖有遮光補助，但受限於生理位置，總成功率較低。
LB	低位 / 不遮光	26 天	3/10	30%	10%	生根率雖不及遮光組，但較高位組不遮光高。
HB	高位 / 不遮光	30 天	1/10	10%	10%	誘導效果較不明顯。
C	無包覆 對照	30 天	0 / 10	0%	0%	證明無保濕包覆環境下無法誘發不定根。
*註：「強勢發根」定義為單一節點生成之不定根數量超過 10 根，代表該誘導環境極利於根系發育。						

表 5-2：不定根生長里程碑時間紀錄表

表格說明：紀錄各組別首次觀測到生根的天數，展現遮光與位置的加速效應。

觀測里程碑	LA (低遮)	HA (高遮)	LB (低不遮)	HB (高不遮)	C 組 (對照)
首次觀測生根 (Day)	Day 5	Day 9	Day 5	Day 16	未發生
照片					
	LA9	HA5	LB3	HB8	C10
強勢發根期 (Day)	Day22	Day 26	Day 26	Day 30	未長根
最大根長 (cm)	>3	>3	>3	>3	0
照片	  	  			

(五) 實驗小結

本實驗透過 26 至 30 天的嚴謹對照，成功找出誘導彩葉草不定根的最佳模型。核心發現如下：

1. **生根率低位組優於高位組：**低位組 (LA) 在觀察第 26 天即達到 80% 的生根率；而高位組 (HA) 即便觀察至第 30 天，生根率仍僅有 60%。
2. **生根率遮光組優於不遮光組：**透過對比可知，遮光組 (A 組) 在發根啟動速度與最終生根率上均優於不遮光組。
3. **強勢發根 (>10 根) 期：**本研究觀察到 LA 組與 HA 組中，均有 40% 的樣本發展出超過 10 根的密集根系。LA 發根最快、其次是 LB、HA，最後才是 HB。HB 組只有 1 組誘根成功，且強勢發根，因其位置不佳又無遮光。
4. **總結最佳誘導策略：**綜合位置與環境因子，本研究確認「**低位節點結合遮光處理**」為誘導彩葉草不定根的最優方案。此結果將作為後續「實驗六：拉力測試」的基礎，預期 LA 組所產生的高質量根系將提供最強大的植株固著力。

五、 實驗五：彩葉草不定根承受最大拉力測試

(一) 實驗說明

本實驗延續實驗五，採用生根良好的樣本(如圖 5-1、5-2)進行拉力測試，為了公平比較高位組與低位組的差異，我們先剪取強勢發根的植株，保留棉花與根系，再將其修剪成長度統一的莖。接著把莖貼上編號，將樣本埋入砂質土中，壓實補水後靜置 1 天。最後用電子秤進行拉力測試。



圖 5-1 彩葉草拉力測試實驗組樣本



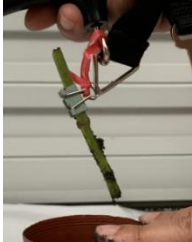
圖 5-2 彩葉草拉力測試對照組樣本

表 5-1 拉力測試組別來源與根系特徵

來源組別	低位遮光組 LA	高位遮光組 HA	對照組 無根 C	原生不定根 O	細白根 W
來源	實驗五保鮮膜誘導	實驗五保鮮膜誘導	實驗五保鮮膜誘導	母株基部自然生長	實驗三頂芽水培
樣本代號	LA3 LA4 LA9	HA7 HA9 HA10	C2 C3 C4	O1 O2 O3	W1 W2 W3
根系特徵	白色、新生組織、細嫩	白色、新生組織、細嫩	白色、新生組織、細嫩	褐色、木質化程度高、粗壯	白色、長度長、具韌性

(二) 實驗結果

表 6-2 不同組別樣本的最大拉力值與類型描述

樣本組別	平均發根數	最大拉力值 (g)	結果類型/ 百分比	實驗照片	類型描述
LA (低遮)	>10	50g	A:67% B:33%		LA3 成功測得數據，根系與砂土結合極佳，被拉起時根上還帶有沙土。
HA (高遮)	>10	< 1g	A:33% B:67%		拉起時有感覺到力，但電子秤上顯示不出來。
C (對照)	0	<1g	D:100%		僅靠莖部摩擦力，幾乎不具備抗拔能力。

O (原生)	3	130g	A:100%		原生不定根，抗拉力表現良好，是目前測得最大值。
W (細白)	>10	100g	A:100%		水培細白根，抗拉力表現次之。
類型 A: 根部完整被拔出，根上帶著很多砂土。 類型 B: 根斷在土裡了。 類型 C: 根還在土裡，但莖斷了。 類型 D: 無根，莖輕鬆被拔起。					

(三) 實驗小結

1. LA 組有 33%成功被拉起，且根上帶有很多砂土，表示植物根系發展健全，與莖部連接好，但拉力常超過新生根系之組織抗拉強度。
2. HA 組 67%都是類型 B(斷根)，棉花和根都在土裡，推測因根系較疏，較易被完整拔出。
3. 對照組 C，測得數據皆<1g，顯示僅靠莖部摩擦力，幾乎不具備抗拔能力。
4. 原生不定根 O 組，測得拉力值平均值為 120g，這是一個重大發現，原先以為顯示原生的不定根不具有抓地力，但是拉力測試值反而是最大的。

六、 實驗六：不定根之水分運輸生理功能檢測

(一) 實驗說明

本實驗樣本取自實驗四之誘導根、O 組原生不定根加上 C 組無根的莖做為對照組，將所有樣本的莖底部完整包覆密封，阻隔水分透過莖部運輸，讓不定根成為唯一的水分吸收路徑，用來測試不定根之水分運輸能力。實驗目的如下：

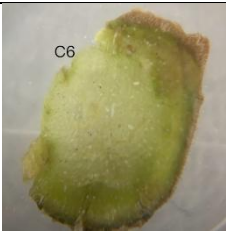
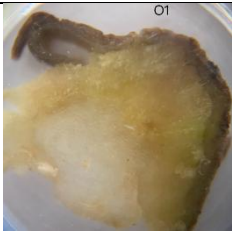
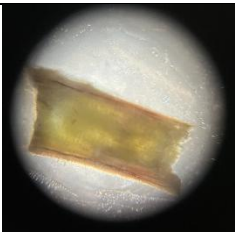
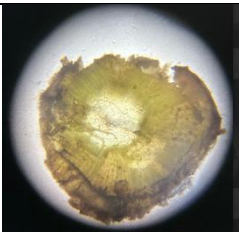
1. 驗證根系生理功能：透過紅墨水示蹤法，確認不定根是否具備吸收水分並向上運輸至莖部的功能。
2. 排除莖部吸收干擾：透過莖部完整包覆技術，阻隔水分經由莖部皮層滲透的可能性，從而精確測試「根部」單一器官的吸水貢獻。。

(二) 實驗步驟

1. 準備實驗四之誘導根樣本、O 組與 C 組樣本。
2. 所有樣本均依據「參、研究過程中莖之包覆技術 SOP」進行莖部完整包覆。
3. 將樣本浸泡於紅墨水中，靜置 24 小時
4. 進行切片觀察

(三) 實驗結果

表 6-1:彩葉草不定根吸水紅墨水測試結果

組別	LA1 (有根)	LA5 (有根)	LA10 (有根)	C6 (對照組/無根)	O1 (有根)
實驗前莖部切片照片					
紅墨水顯微照片					
觀測結果	維管束出現鮮紅染色點	維管束出現鮮紅染色點	維管束出現鮮紅染色點	完全無紅色反應	維管束出現鮮紅染色點

[照片為研究者攝影，圖表為研究者自繪]

(四) 實驗小結

1. 實驗結果顯示，所有透過人工誘導產生之不定根和原生不定根均能成功吸收紅墨水並運輸至莖部。這證明這些根系內部已發育出成熟的木質部，能進行水分運輸，能實質幫助植株在缺水或逆境下生存。
2. 對照組在莖部完整包覆狀態下，即便長時間浸泡，其內部組織仍維持原始色澤。這有力地證明了彩葉草的莖部不具備直接吸收外部液體的能力，水分的取得必須依賴根系。但我們也發現靜置 24 小時候，植物的莖部會有些許萎縮，顏色也會逐漸轉成褐色。

陸、討論

一、實驗一:彩葉草不定根的環境適應與轉化效率

實驗中我們發現已長出不定根的彩葉草在「水培」環境下根系生長極快（5 天即長出 3cm），且「葉片」是存活的必要條件。這可能是因為葉片行光合作用產生的養分，以及頂芽分泌的生長素，向下運輸至莖部激發了不定根的細胞分裂。

二、實驗二：探討彩葉草不同部位插穗於不同介質下之生長與發根影響

1. **莖部節點再生能力強：**實驗過程中發現部分頂芽（A 組）易受蟲害導致發黑。經截莖處理後，雖然莖長度顯著縮短，但其發根能力並未消失。這顯示彩葉草的生根能量不僅存在於頂端，莖部節點亦具備高度的再生潛力。
2. **關於物理損傷：**部分樣本因折斷而截短，觀察發現截短後的插穗雖然失去頂芽，但若節點完整，仍可誘導出不定根，唯發根速度較完整頂芽組慢。

三、實驗三：水培轉土培的存活與生長表現

1. **健康長壽組生長條件：**F1、F5、F6、F7 共同生長條件為「有葉」，顯示葉片對於植物生長的重要性，缺乏葉片就無法行光合作用，生命會提早結束。而 F1、F5、F6 這三個樣本除了「有葉」，還「有根」代表完整根系可以從土壤吸收水分及養分，是植物的生命之本。但 F7 雖然先天條件無根，但有頂芽葉片的優勢，種植幾天後成功生根，也成了「有葉」、「有根」的健康植株，生命得以延續生長。
2. **樣本 F10 之意外損傷與再生觀察：**在 12 月中旬，樣本 F10 因人為因素導致莖部折斷，長度由原先預估值 10cm 驟降至 7.3cm。然而，觀察紀錄顯示 F10 並未因此枯死，反而在此後維持了穩定的存活狀態。此發現得以驗證實驗二頂芽 A 組莖部節點再生能力強之論點。

四、實驗四：不同條件對彩葉草不定根誘導之影響

1. **生理位置為決定發根成功率的首要因子：**實驗結果顯示，即便在同樣具備遮光條件下，低位組 (LA) 在觀察第 26 天即達到 80% 的生根率；而高位組 (HA) 即便觀察至第 30 天，生根率仍僅有 60%。這有證明了靠近基部的成熟組織具備更強的細胞分化潛力，發根表現優於頂端嫩綠組織，與我們實際觀察到原生彩葉草的不定根相符。
2. **遮光環境能提高誘導根部生長的效率：**雖然 LA 和 LB 都是低位組有生理位置優勢，但是 LB 生根率低於高位組 HA，這證實了避光環境能有效保護生長素 (Auxin) 不被光解，從而促進根原始體的形成與發育，故遮光是重要條件。

3. **強勢發根 (>10 根) 展現高品質成果**：本研究觀察到 LA 組與 HA 組中，均有 40% 的樣本發展出超過 10 根的密集根系。然而，LA 組達成此質量的速度更快（少於 HA 組 4 天），顯示「**低位 + 遮光**」的組合不僅能提高成功率，更能加速強勢根系的成熟。

五、實驗五：彩葉草不定根承受最大拉力測試

本研究發現，承受最大拉力測試原生不定根組(130g)>水培細白根組(80g)>誘導不定根組(50g)，分別探究如下

1. **根部木質化越高，抗拉強度提高**：原生不定根組因為組織成熟度，細胞壁積聚了較多的木質素，使其抗拉強度最高。
2. **水培組 (83g) 優於誘導組 (50g) 的原因**：可能是因為水培組在試管中擁有充足的空間與水分，根系得以完全伸展，形成的根系網較大，抓地面積較廣。
3. **誘導組 (50g) 雖然只有 50g，但是相較於對照組 0g，仍是有抗拉性，也顯示誘導根亦有抓地力。**

六、實驗六：不定根之水分運輸生理功能檢測

1. 在水分運輸實驗中，最常見的誤差來源是水分直接由莖部的切口或皮層滲入。本研究特別採取「莖部完整包覆」技術，其目的並非否定莖部的吸收能力，而是為了「純化觀測對象」。透過此設計，我們成功證實了當莖部吸收受阻時（模擬自然環境中莖部被土壤或表皮保護的情況），人工誘導出的不定根能獨立承擔起整株植株的水分供應任務。
2. 根部吸收的主動性與必要性
 - (1) **對照組的意義**：對照組（無根且包覆）在 24 小時後出現的莖部萎縮，證明了即便環境中水分充足，若缺乏功能性根系，植株仍會面臨生理性乾旱。而這個發現跟實驗三 F8 生長狀態一致，缺乏根系之植株會乾枯死亡。
 - (2) **誘導根的生理地位**：誘導根組（LA）在同樣包覆莖部的情況下，維管束依然出現明顯紅點反應。這說明了這些新生的細白根不僅是形態上的增生，更是高效的水分採集器官，其吸收效率足以跨越包覆層的限制，將水分逆勢向上運輸。
3. 本實驗雖證實了根部的吸水功能，但需注意到在實際操作中，包覆層若有些微縫隙，亦可能造成微量干擾。然而，對照組完全無紅點反應的結果，反向印證了本實驗之包覆效果良好，足以支持「水分經由誘導根吸收」之結論。未來研究可進一步比較『單純莖部吸收』與『根部 + 莖部吸收』在吸收速率上的定量差異。

柒、結論

本研究透過一系列實驗，系統性地探討了彩葉草不定根的誘導機制、力學強度及生理功能，綜合研究結果得出以下結論：

一、 最佳誘導組合：「低位節點」搭配「遮光處理」

實驗證實，生理位置是影響生根率的首要關鍵。靠近基部的低位節點具備更強的細胞分化潛力。而在環境因子中，遮光處理能有效保護生長素（Auxin）不被光解，顯著提升發根速度與質量。本研究確認「低位＋遮光」為誘導彩葉草不定根的最佳方式，能於 26 天內達成 80% 的生根率及最高比例的強勢發根。

二、 證實「節點再生能力」為生存韌性之核心

即便在植株面臨物理損傷（如莖部折斷或頂芽受損）的情況下，只要保留完整的莖部節點，彩葉草仍具備強大的再生能量，能誘導出不定根以延續生命。此發現解釋了草本植物在自然環境遭受破壞後的強大修復機制。

三、 誘導根具備「力學支撐」與「生理運輸」雙重功能

本研究透過物理與生物檢測，全方位驗證了人工誘導根的實質效能：

- (一) 力學固著：雖然新生誘導根的抗拉強度（50g）尚不及成熟原生根（130g），但相較於無根組（0g），能顯著提升植株的抓地力與抗倒伏能力。
- (二) 生理運輸：紅墨水實驗（結合莖部包覆技術）證實，誘導根具備功能完整的維管束系統。在莖部無法吸水的情況下，誘導根能獨立支撐植株的水分需求，避免植株發生生理性乾旱而萎縮。

四、 建立了「水培育苗與空中誘根」之標準化技術

本研究成功開發一套低成本、高效率的彩葉草繁殖技術。從「頂芽水培」的高速育苗（3 天發根），到「空中誘根」的力學補強，提供了一套從室內培育到戶外固強的完整生理調控流程，具備高度的園藝應用與生態修護潛力。

五、 未來展望

本研究雖已確認位置與遮光的影響，未來可進一步探討不同介質（如珍珠石、蛭石）對誘導根本質化程度的影響，以期開發出拉力更強、甚至能媲美原生根的「強化型不定根」，為高大植物的防災固土提供更精準的生理策略。

捌、參考資料及其他

1. 不定根中的激素代謝相互作用，網址：<https://zh-cn.botany.one/hormone-metabolic-interactions-in-adventitious-roots/>。搜尋日期：114 年 9 月 24 日
2. 瑞興國小植物學習網站-支柱根，網址：
https://affairs.kh.edu.tw/1296/bulletin/msg_view/53。搜尋日期：114 年 9 月 24 日。
3. 農業知識入口網（空中壓條法），網址：
https://kmweb.moa.gov.tw/theme_data.php?theme=pedia&sub_theme=km&id=318。搜尋日期：115 年 1 月 29 日
4. 顛覆經典的植物賀爾蒙理論：生長素訊息傳導中的神秘第二信使，網址：
<https://vocus.cc/article/67cbb0cefd89780001bf6bdd>。搜尋日期：115 年 2 月 20 日