

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 植物學科

第三名

052105

水逆退散！探討颱風草葉的收合與恢復機制

學校名稱：桃園市立武陵高級中等學校

作者： 高二 龍俊瑋	指導老師： 蔡靜宜 石正嘉
-------------------	-----------------------------

關鍵詞： 颱風草、缺水、收合恢復形變

作品名稱：水逆退散！探討颱風草葉的收合與恢復機制

摘要

颱風草葉片在脫水時會收合並於加水後恢復，其過程如同摺扇。野外觀察發現有些颱風草葉片具有皺紋。有皺紋的葉子脫水與恢復速度都較無皺紋的葉子慢，但縱摺角度變化較為穩定均勻，推測皺紋的功能可能與穩定葉片結構有關。觀察颱風草葉片橫切面可見上表皮的泡狀細胞位於縱摺凹處，脫水過程為中央泡狀細胞寬度會增加，最終減少，且相鄰兩側細胞寬度縮小變化不對稱，推測與其鄰近大維管束有關；下表皮的泡狀細胞均勻分布於縱摺凸處，旁邊不具大維管束，脫水過程為中央泡狀細胞寬度會增加，最終減少，但相鄰兩側的細胞寬度會對稱縮小。本研究歸納出颱風草葉片收合與恢復機制，並依實驗結果自製仿生模型，在仿生研究上具有應用潛力。

壹、研究動機

過去曾有研究指出，棕櫚樹的葉片呈波紋狀，脫水時葉片會自動折疊，有助於減少水分流失並保護葉子免受惡劣環境的影響，該研究並據此折疊構造研發出仿生可折疊軟體機器(Suresh et al., 2024[1])。在找尋科展題目的過程中，我們驚喜的觀察到颱風草葉片也具有類似效應！颱風草為台灣原生種，生長在全島低海拔山地路旁、疏林內，為台灣山區常見的野草，為多年生草本植物，在台灣具演化適應力，非常容易取得。加上植株體型較小容易栽培，且葉片小方便進行實驗、反應速度相對較快等優點，於是我們決定以颱風草為研究材料，師法自然。

野外觀察颱風草發現，生長在不同環境的颱風草葉片型態雖然幾乎相同，但仔細觀察後我們發現有仍有些微的不同－有些颱風草葉片具有「皺紋」的構造，這也引發我們高度的好奇心，究竟「皺紋」具有甚麼功能呢？查閱過往文獻，關於颱風草皺紋的研究，僅有探討生長在不同光環境下的颱風草皺紋數量不同(廖, 2014[2])，但並沒有針對「皺紋功能」探討的相關文獻。因為皺紋的橫向結構類似瓦楞紙，所以我們推測皺紋極可能與颱風草葉片脫水時的結構支撐相關，於是我們展開了本研究計畫，以期回答下列問題：颱風草葉片皺紋的功能與葉片脫水恢復過程的關聯？以及探討颱風草葉片的收合恢復機制？



《颱風草植株》
(作者自行拍攝)

一、 颱風草的文獻回顧

颱風草(*Setaria palmifolia*)是禾本科狗尾草屬多年生大型草本植物，為台灣常見之大型禾草，因原住民會利用颱風草預測颱風侵襲次數與時間，故命名之。因其葉大如船型，且葉片上具與葉脈平行、摺扇般的縱向紋路，相似於棕櫚科植物葉形，又有船仔草、棕葉狗尾草等別稱(黃, 2005[3])。颱風草主要分布於舊世界熱帶地區，如印度、東南亞、台灣等地，常見生長在森林下或遮蔭處(Hsu et al., 2000[4])。有別於其他 C4 植物多生長於高溫高光度的環境中，颱風草不僅可以生長於開闊地，亦可生長於遮蔭環境等多樣的光環境(廖, 2014[2])。

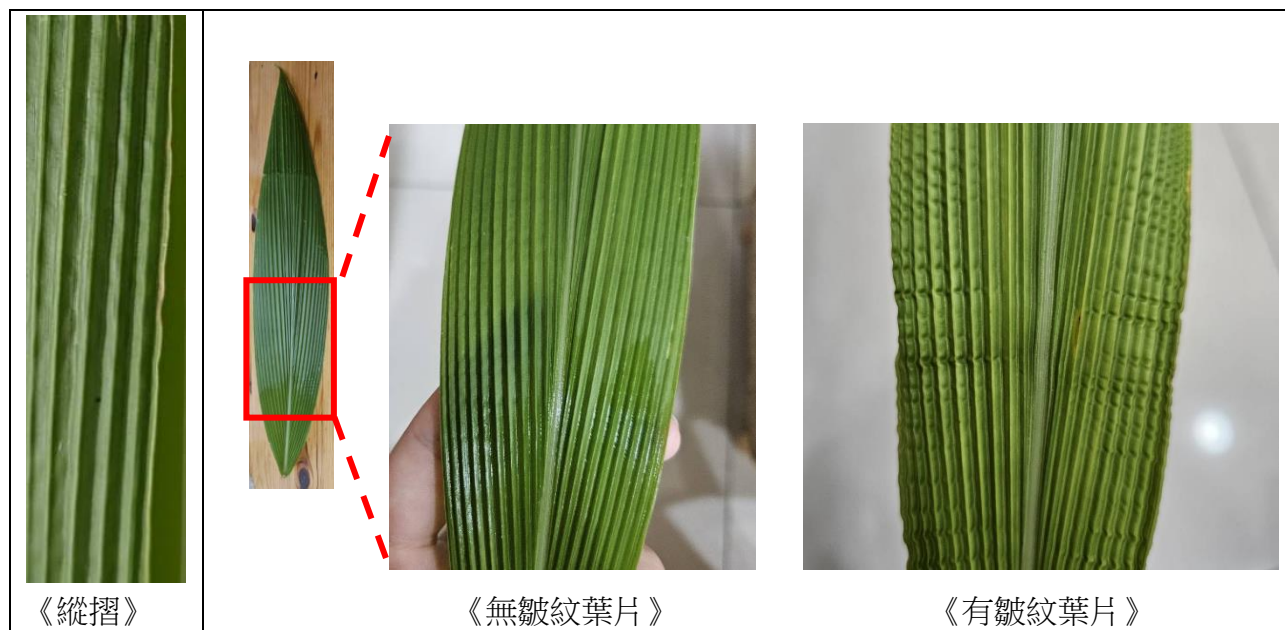
二、 颱風草的葉片型態

(一) 縱摺

颱風草為狗尾草屬中 *Ptychophyllum* 亞屬植物，本屬特徵是植物的葉片寬大，且葉片具有縱向與葉脈平行的摺扇狀構造(黃, 2005[3])。縱摺具折疊的峰線和谷線，顯而易見。葉子縱向延伸，凹凸峰谷交錯排列，布滿颱風草葉。所有颱風草葉子都具縱摺，但每片葉子縱摺數量可能有所不同。

(二) 皺紋

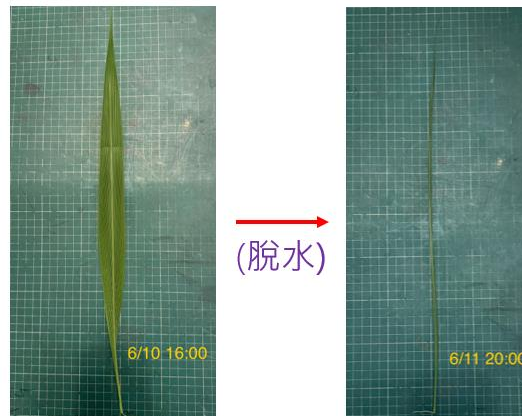
有些颱風草葉子表面具有橫向於葉身皺起的紋路，使得葉子表面稍微凹陷，稱之「皺紋」。值得注意的是，並非所有颱風草葉子皆有皺紋，而且每片有皺紋葉子的皺紋數量、皺紋凹陷的深度、皺紋在葉子上的分布部位皆有所不同，葉身中間到葉鞘連接處的比例較多，需仔細觀察才能發現。皺紋形成可能和環境因子或遺傳特性有關，在林下遮蔭處的植株具皺紋的葉片較空曠環境生長的植株多，顯示颱風草葉子的皺紋數量可能會受環境因子而影響(廖, 2014[2])。



(以上圖片皆為作者自行拍攝)

三、 前測實驗

(一) 脫水實驗：颱風草脫水後可完全收摺如同摺扇。



《颱風草葉片脫水後的變化》

(以上圖片皆為作者自行拍攝)

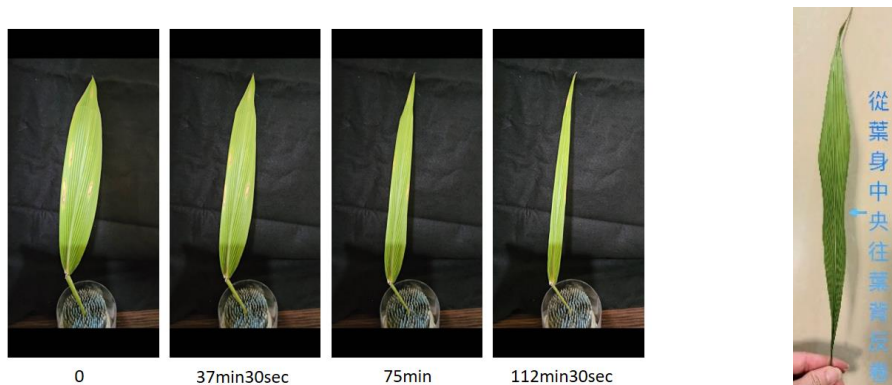
(二) 脫水後加水恢復：颱風草脫水時葉片會收合，並於加水後恢復，葉片形變具有可恢復性。



《颱風草葉片形變具有可恢復性》

(以上圖片皆為作者自行拍攝)

(三) 縮時攝影：颱風草葉最早發生的收合部位是在大約 1/2 葉身處，並連帶往上(葉尖)與往下(葉基)一起收合，收合過程是由葉緣(葉的兩側)往中脈靠攏。



《颱風草脫水時的縮時攝影》

《開始收合部位》

(以上圖片皆為作者自行拍攝)

四、 仿生應用

當打開雨傘時雨傘的布會繃緊，維持這個結構的力是巨大的，只要其中的一根金屬條折斷雨傘就無法繼續使用。相較而言，颱風草葉的摺扇模型能夠沿著葉脈周圍的脈絡不帶力的展開，一旦展開葉子就保持平坦使葉片能夠順承風向，維持其柔韌性（Fournier, 2018[5]）。摺扇構造相關仿生目前已經應用於航空航太工業，例如設計太陽翼，未來也可應用於如遮雨棚的設計、醫療材料所使用的人工皮、電路板等。

五、 泡狀細胞的文獻回顧

查詢文獻後，我們得知生長於乾旱環境的禾本科植物，其葉片表皮常具有泡狀細胞（bulliform cell）。泡狀細胞壁薄，輪廓圓，液泡佔細胞比例大。當植株水份過度散失時，葉片會捲起或發生葉的型態變化，以利適應乾旱脫水狀態。

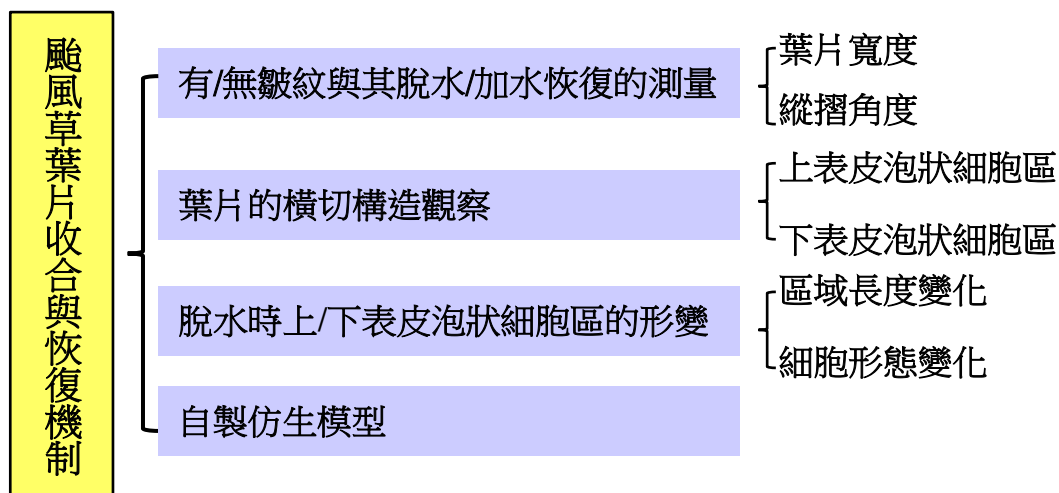
泡狀細胞在表皮組織的肋間成群出現，每群在橫切面上有 3 個以上泡狀細胞。泡狀細胞相互連接，與葉脈平行排列，從葉基到葉尖的泡狀細胞的型態變化不大（Jane et al.,1991[6]）。因為泡狀細胞的體積、液泡佔細胞比例皆比一般表皮細胞大，而且泡狀細胞不同於一般表皮細胞扁平，所以泡狀細胞脫水時會有明顯的體積萎縮，而水分充足時會有明顯的體積增長（Jane et al.,1991[6]）。另外，相鄰兩個泡狀細胞之間的細胞壁，比其他表皮細胞壁更厚，而且具有最少的原生質絲。原生質絲將提供水從除其相鄰泡狀細胞之外的細胞進入或離開泡狀細胞的快速運動（Jane et al.,1991[6]）。

貳、 研究目的

一、 研究目的：

- （一）颱風草葉片的皺紋是否與葉片脫水恢復過程有關聯
- （二）推測颱風草葉片的收合與恢復機制

二、 研究流程：



參、研究設備及器材

一、 颱風草採集地點：

新北市中和區烘爐地登山步道、竹東五指山開闊荒地、桃園龜山福源山步道

二、 實驗器材與藥品：(光學複式顯微鏡與手機規格詳見 玖、附錄)

游標尺、捲尺、方格墊板、剪刀、美工刀、雙面刀片、手套、光學複式顯微鏡、載玻片、蓋玻片、物鏡測微器、燒杯、培養皿、滴管、鑷子、紙巾、相機(手機)、手機架、針毡、2M 蔗糖水溶液、海綿、氣球、塑膠軟管、打氣幫浦、萬用強力膠、橡皮筋、蘇丹四號

肆、研究過程或方法

《註》在前測實驗中，我們觀察到颱風草葉最早發生的收合部位是在大約 1/2 葉身處，並連帶往上(葉尖)與往下(葉基)一起收合，因此以下實驗我們選擇該處進行測量。

一、 有/無皺紋與其脫水/加水恢復的測量

(一) **葉片寬度**：將颱風草葉脫水乾燥，使其摺疊(收合)。再將其加水恢復，使其展開(恢復)。測量脫水與加水過程中，葉子總長 1/2 處的每小時葉寬變化。

《註》**葉寬定義**：葉子垂直於中脈之寬幅。例如：「1/2 處寬度」表示葉子一半總長的部位，垂直於中脈的寬度。

$$\text{葉寬縮短百分比} = \frac{\text{原始葉寬} - \text{收合後葉寬}}{\text{原始葉寬}} \times 100\%$$

$$\text{葉寬增長百分比} = \frac{\text{恢復後葉寬} - \text{原始葉寬}}{\text{原始葉寬}} \times 100\%$$

1. 用剪刀剪斷葉柄，以隨機取得多片颱風草葉，盡量保留其葉柄。
2. 用捲尺，將各片葉測量其長度與初始 1/2 處寬度，並記錄。
3. 將葉子脫水乾燥 1 小時，並記錄脫水乾燥 1 小時之後的 1/2 處寬度。
4. 再將葉子加水恢復，每一小時記錄一次 1/2 處寬度，直到加水 3 小時為止。
5. 仿照步驟 3~4，將葉子改為脫水乾燥 2、3、4 小時，重複實驗。

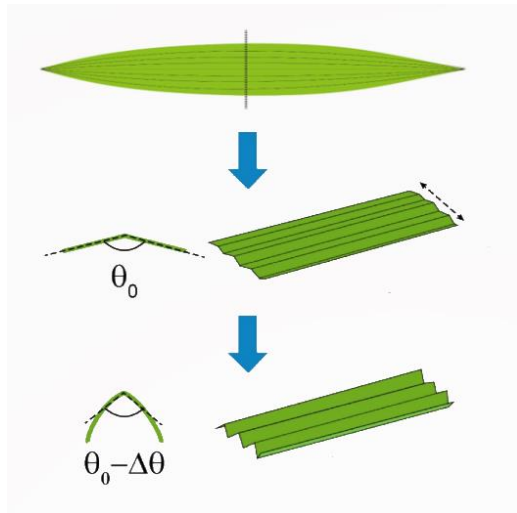


《將已脫水收合的葉子葉柄基部置入水中使其加水恢復》(作者自行拍攝)

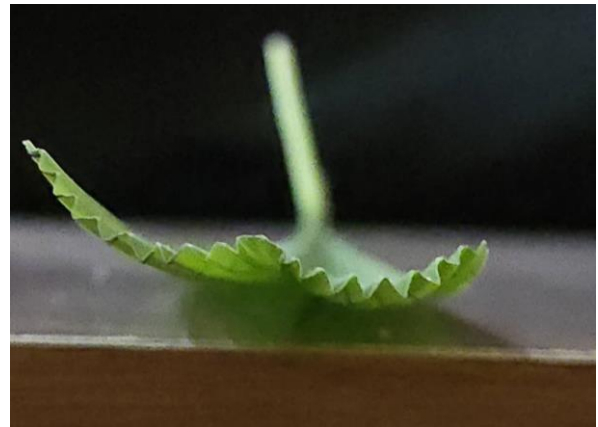
(二) **縱摺角度**：將颱風草葉脫水乾燥，使其摺疊(收合)。再將其加水恢復，使其展開(恢復)。測量脫水與加水過程中，每小時 1/2 處每個縱摺夾角變化。

《註》**縱摺角度定義**：由於颱風草葉橫切面為凹凸交錯(凹凸交錯為每個縱摺排列而形成的)，因此每個縱摺都有夾角。

1. 用剪刀剪斷葉柄，以隨機取得多片颱風草葉，盡量保留其葉柄。
2. 用捲尺，將各片葉測量其長度與初始 1/2 處寬度，並記錄。
3. 剪刀剪開葉的 1/2 處，保留葉基的一半葉片。將葉片平放於桌上，相機對準 1/2 處橫切面，使用微距(小花模式)功能，並拍攝，作為縱摺夾角的初始狀態。
4. 使該一半葉片脫水乾燥，每一小時相機對準 1/2 處橫切面拍攝一次，直到脫水四小時為止。
5. 脫水乾燥四小時後，將其葉柄插入自來水中(即為加水恢復)，每一小時拍攝一次，直到加水 2~3 小時。
6. 將現有照片傳至 Image J，測量每個縱摺橫切面的角度。



《葉片縱摺角度測量示意圖》
(Suresh et al., 2024[1])



《縱摺為凹凸交錯排列》
(作者自行拍攝)

二、葉片的橫切構造觀察

準備颱風草葉，用雙面刀片切出 1/2 處的葉切片，切片橫貫葉緣至中脈，製成水埋玻片，置於顯微鏡下。準備相機，分別以二種倍率 40x 與 400x 逐段拍攝。將各段拍攝照片以 PowerPoint 排列與連接起來，形成完整橫貫葉緣至中脈的橫切面。

三、脫水時上/下表皮泡狀細胞區的形變

(一) 區域長度變化：

$$\text{變化率} = \frac{\text{收縮後區域長度} - \text{切片原始區域長度}}{\text{切片原始區域長度}} \times 100\%$$

變化率若為正值，表示泡狀細胞區域長度比原始狀態(尚未加蔗糖水)來得大。變化率若為負值則反之。

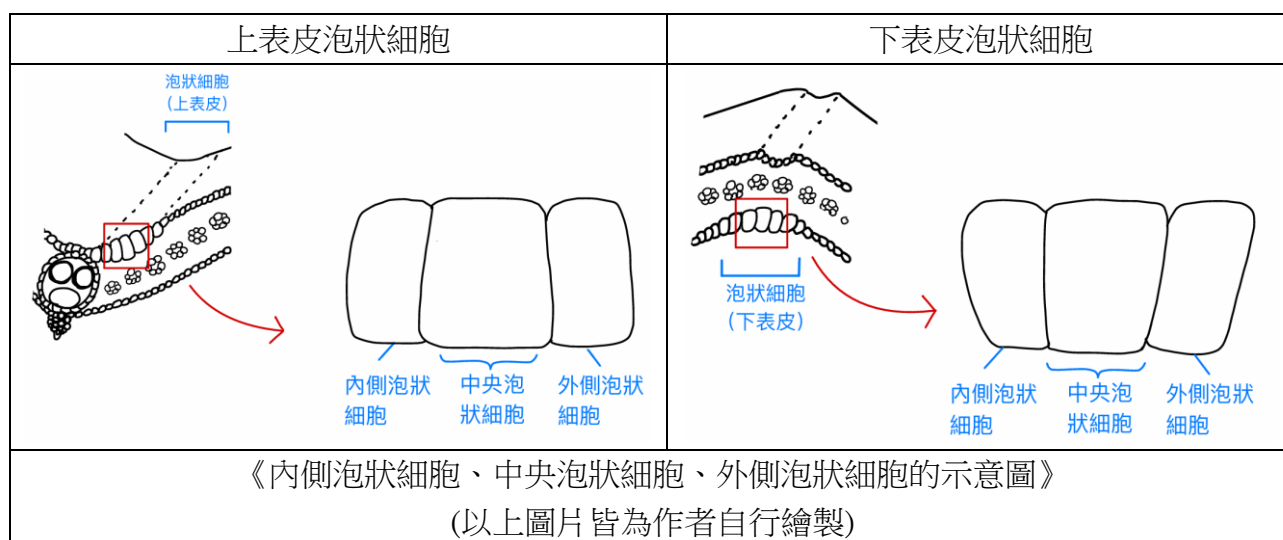
1. 保留顯微鏡視野照片，確保所有照片皆清楚標示目鏡測微器的刻度。
2. 以卷尺測量照片中目鏡測微器的刻度。
3. 以卷尺分別測量照片中未脫水葉子切片的內、外側弧長，並換算成目鏡測微器的刻度。
4. 以卷尺分別測量照片中加蔗糖水葉子切片的內、外側弧長，並換算成目鏡測微器的刻度。
5. 統整測量的數據，計算切片內、外側弧長的變化率。

(二) **細胞形態變化**：用複式顯微鏡觀察颱風草的泡狀細胞，加 2M 蔗糖水使其收縮，並測量其寬度。本實驗將比較有/無皺紋葉子的泡狀細胞、上表皮泡狀細胞、下表皮泡狀細胞差異。有/無皺紋葉子的泡狀細胞另以番紅進行染色觀察。

$$\text{變化率} = \frac{\text{收縮後細胞寬度} - \text{泡狀細胞原始細胞寬度}}{\text{泡狀細胞原始細胞寬度}} \times 100\%$$

變化率若為正值，表示泡狀細胞寬度比原始狀態(尚未加蔗糖水)來得大。變化率若為負值則反之。

1. 用物鏡測微器確認顯微鏡的視野尺寸。
2. 準備颱風草葉，用雙面刀片對葉子切片，製成水埋玻片，置於顯微鏡下觀察並拍攝，作為初始環境下泡狀細胞的結果。
3. 將顯微鏡下的玻片取下，暫時移走蓋玻片，用紙巾吸走自來水，再用滴管添加 2M 蔗糖水溶液於葉切片，並等待 10 分鐘。
4. 10 分鐘後，重新蓋上蓋玻片，置於顯微鏡下觀察，並拍攝，作為蔗糖高張環境下泡狀細胞的結果。
5. 將現有照片傳至 Image J，測量三個中央相鄰排列的泡狀細胞(靠近中脈的定義為內，靠近葉緣的定義為外)的細胞寬度。



四、 自製仿生模型

依照本實驗觀察到的細胞型態變化，設計此仿生模型。模型以氣球作為泡狀細胞，海綿作為葉肉組織，氣球一端以塑膠軟管接上打氣幫浦，由幫浦打出氣體模擬水分進入泡狀細胞；氣球洩氣是由打氣幫浦抽氣，模擬水分離開泡狀細胞。



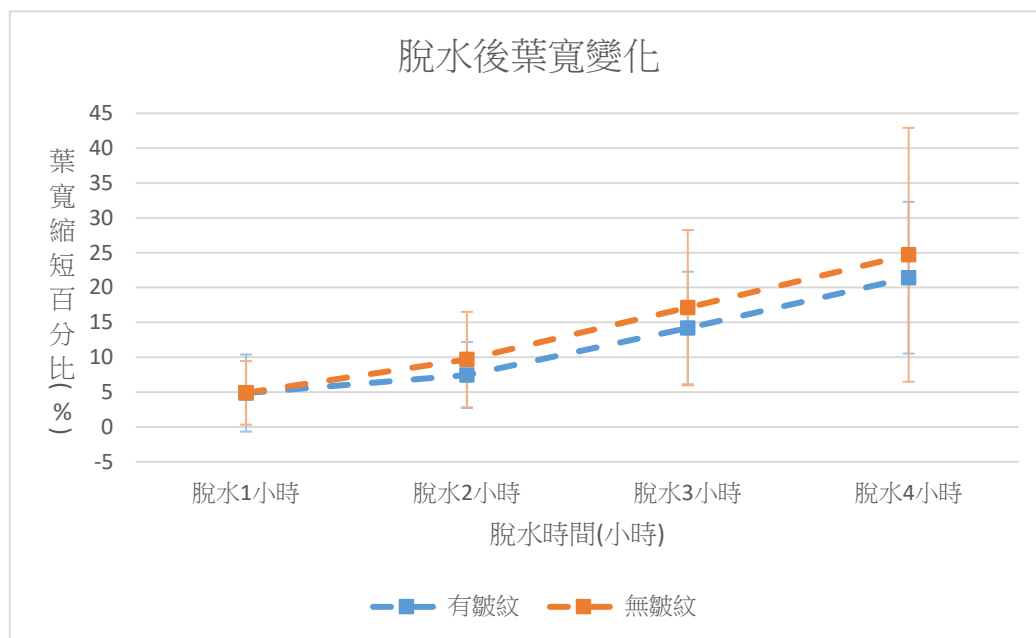
《仿生模型》
(作者自行拍攝)

伍、研究結果

一、有/無皺紋與其脫水/加水恢復的測量

(一) 葉片寬度

1. 無或有皺紋葉片隨脫水時間的葉寬變化



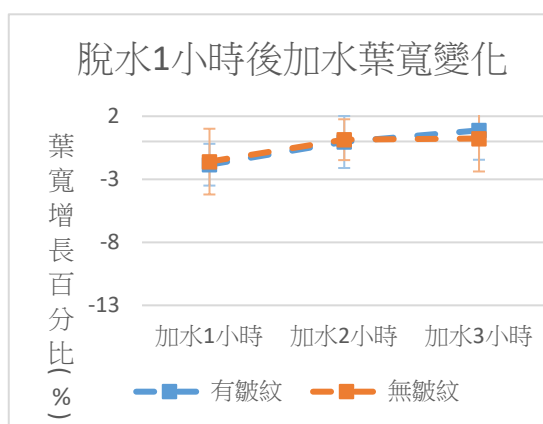
圖一 無或有皺紋葉片隨脫水時間的葉寬變化
(作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：

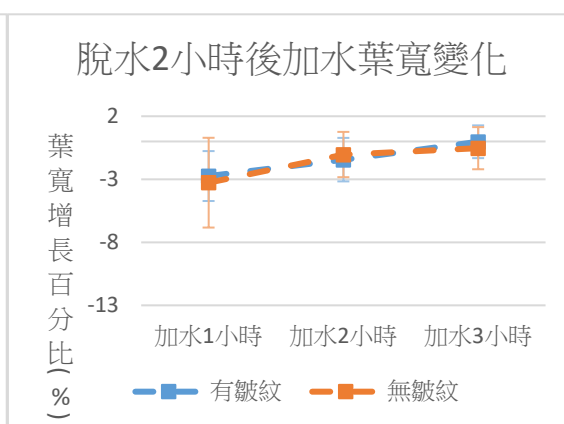
脫水 1 小時，有皺紋與無皺紋的葉寬平均縮短百分比幾乎相同。脫水 2~4 小時後，有皺紋與無皺紋的差距隨時間漸大，且無皺紋的平均縮短百分比較有皺紋的多，因此無皺紋葉子的收合速率較快。

2. 無或有皺紋葉片在加水恢復過程的葉寬變化

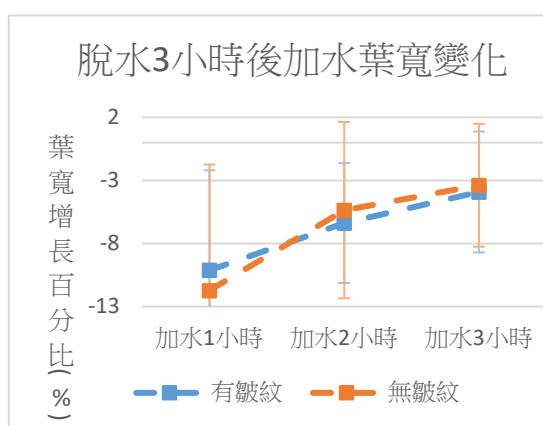
A



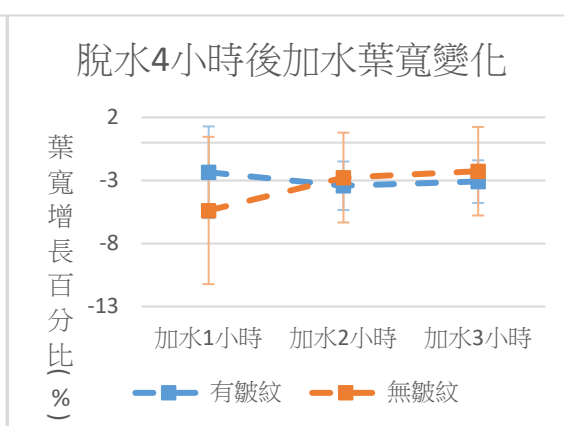
B



C



D



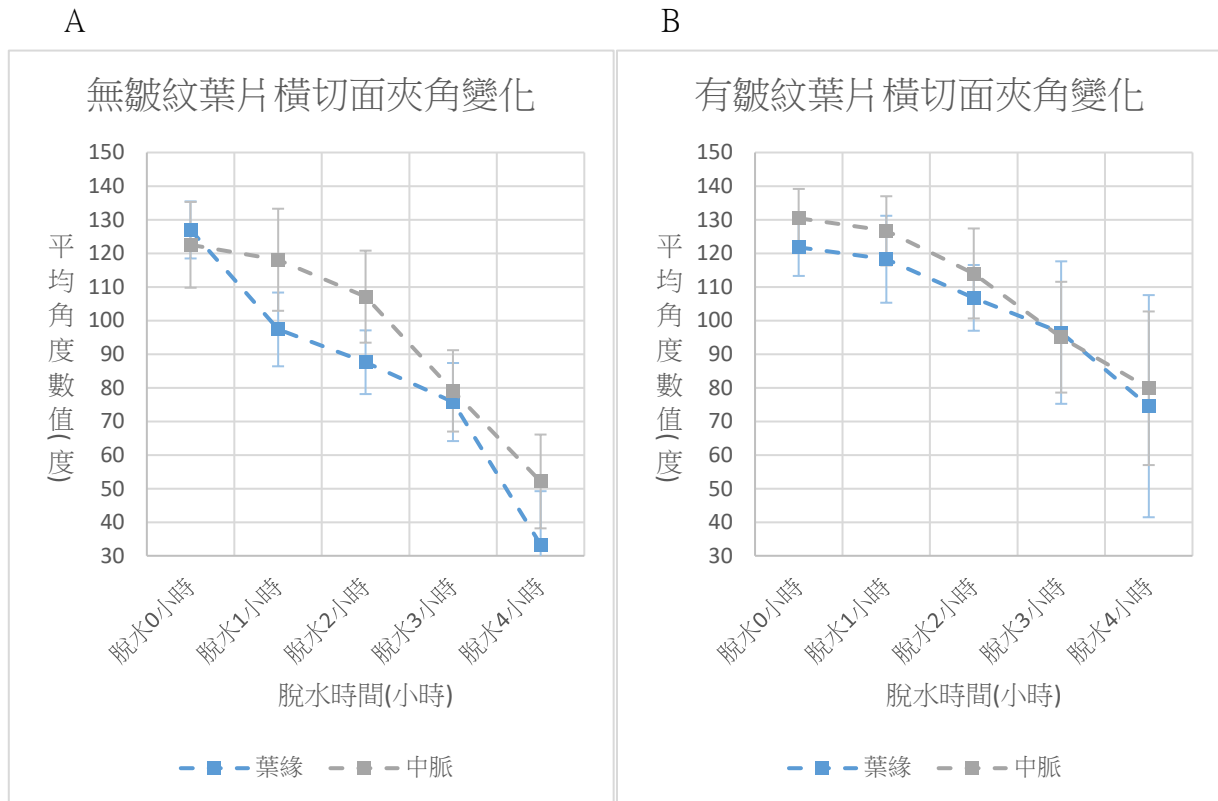
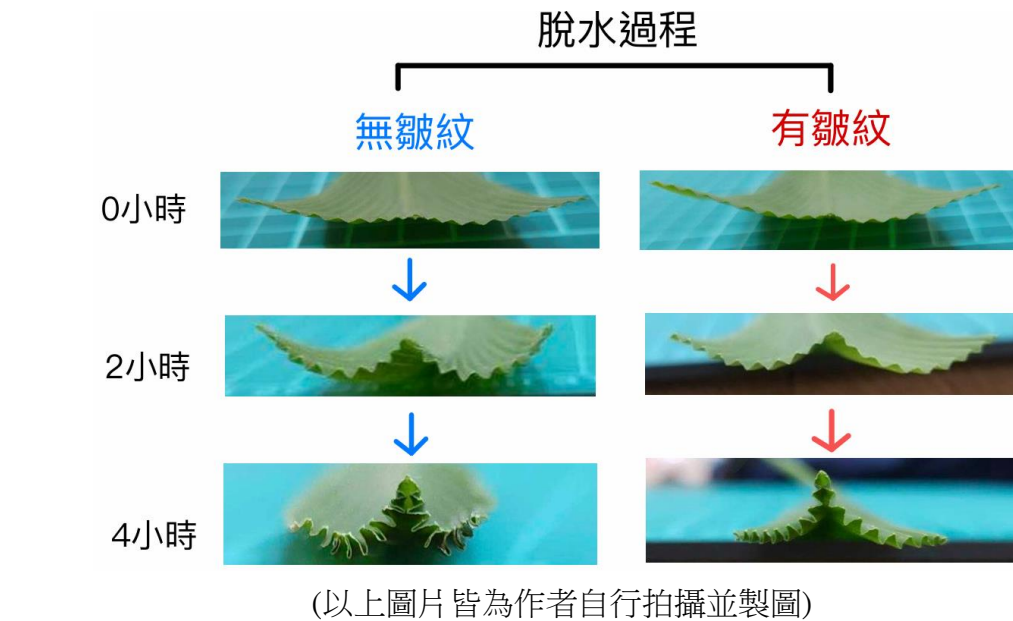
圖二 無或有皺紋葉片在加水恢復過程的葉寬變化
(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：

相同脫水與加水時間下，有皺紋與無皺紋的葉寬平均增長百分比差異不大。

(二) 縱摺角度

1. 脫水時縱摺角度變化



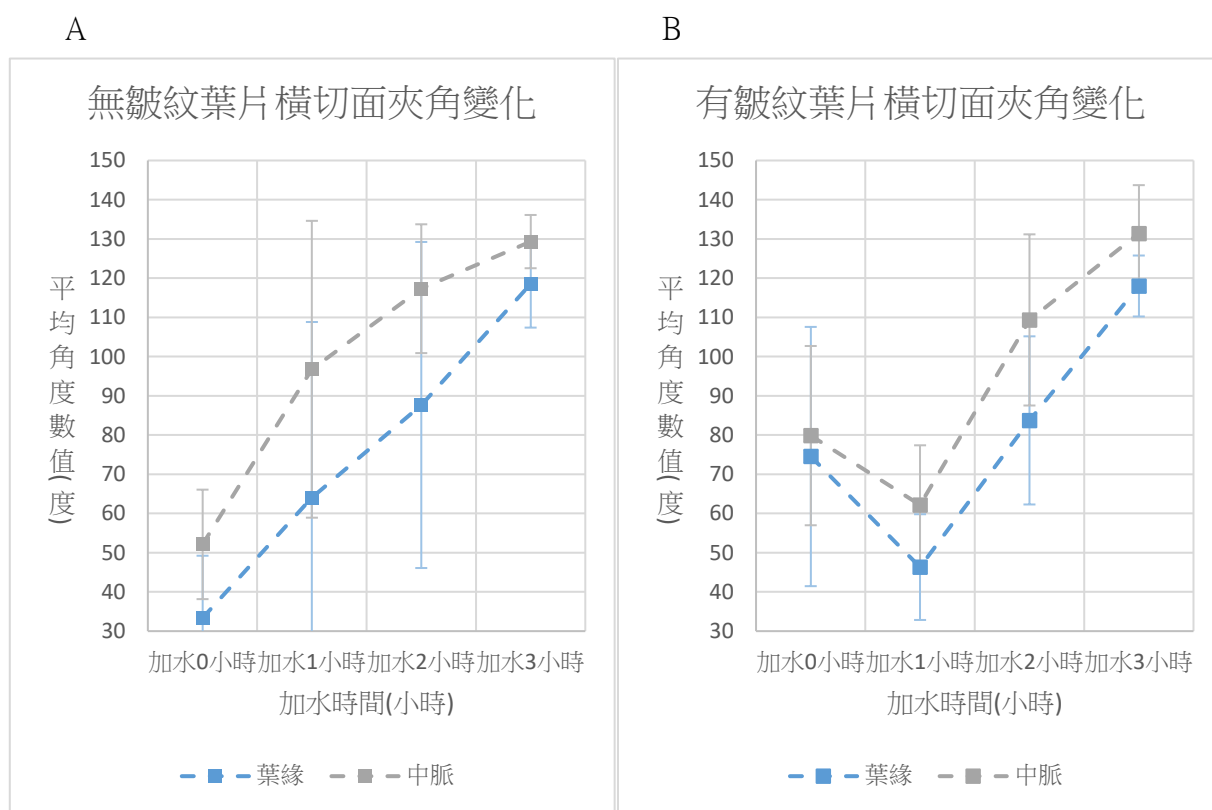
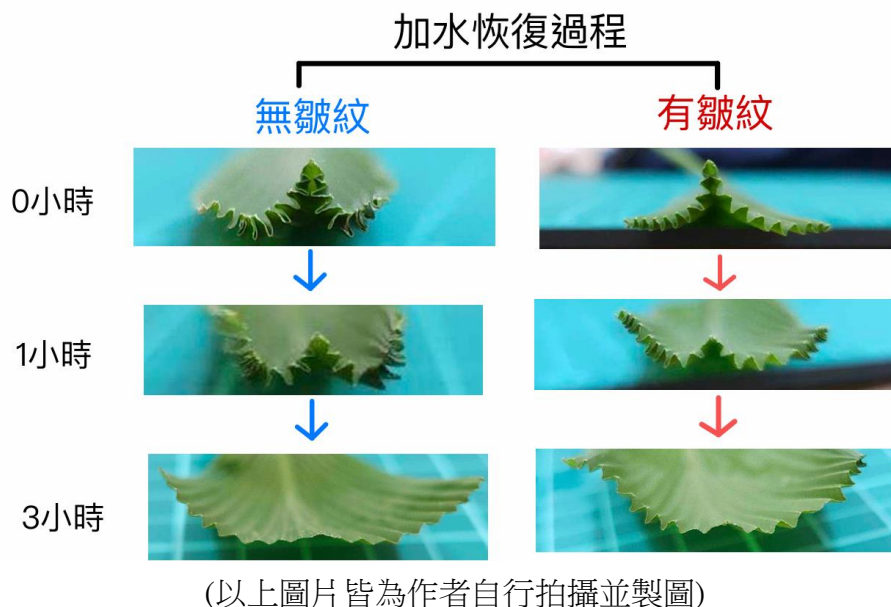
圖三 無或有皺紋葉片脫水時縱摺角度變化

(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：

- (1) 無皺紋的葉子收合速率比有皺紋的快，而且脫水 4 小時後無皺紋的縱摺角度會急速下降。
- (2) 靠近葉緣的縱摺收合速率比靠近中脈的縱摺快。

2. 加水時縱摺角度變化



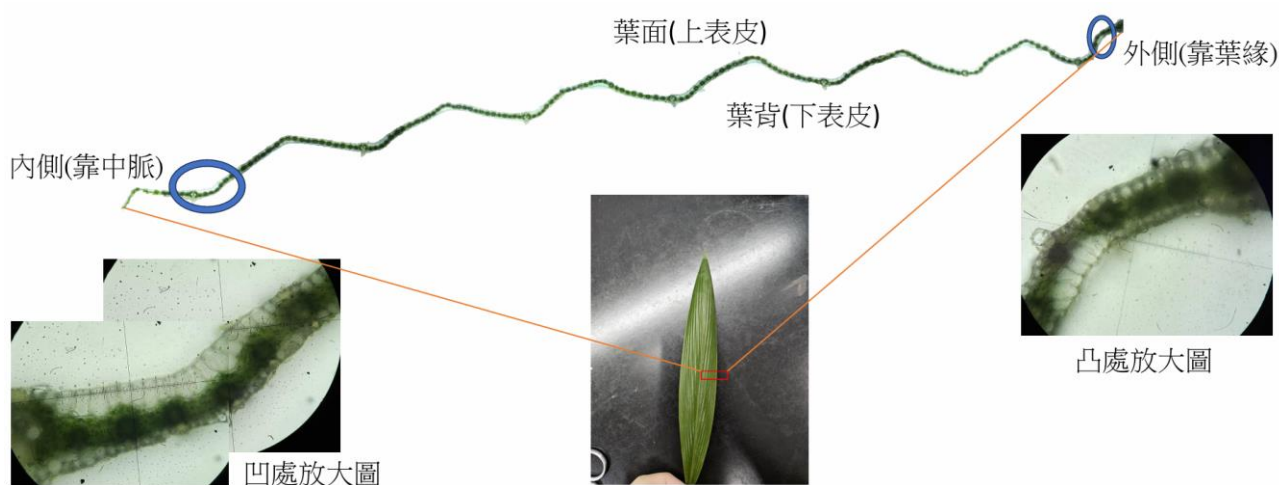
圖四 無或有皺紋葉片加水時縱摺角度變化

(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

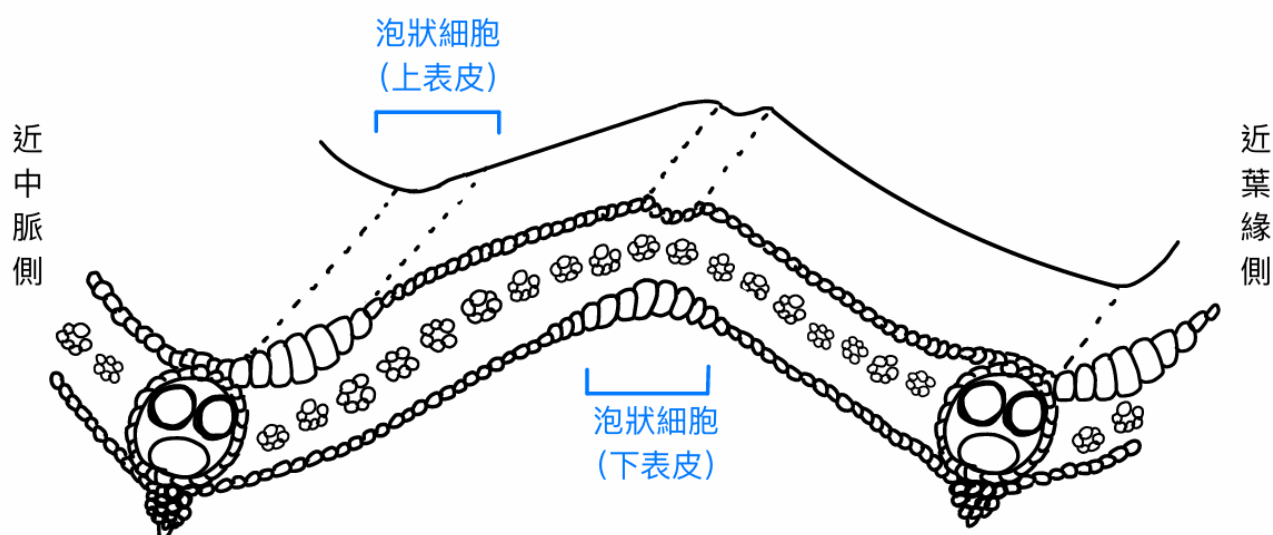
實驗結果：

- (1) 無皺紋的恢復速率比有皺紋的快，但兩者的縱摺角度最終會趨近一致。
- (2) 有皺紋的葉子，加水 1 小時後的縱摺角度比脫水 4 小時(加水 0 小時)小，加水 2 小時後方能測得角度變大。無皺紋的葉子加水 1 小時後角度就變大。
- (3) 靠近中脈的縱摺恢復速率比靠近葉緣的縱摺快。

二、葉片的橫切構造觀察



圖五 颱風草葉片橫切面排列照片(40x)與橫切面局部放大照片(400x)
(以上圖片皆為作者自行拍攝並製圖)



圖六 颱風草葉片橫切面手繪圖
(作者自行繪製)

實驗結果：

泡狀細胞分布於凹處的上表皮與凸處的下表皮。葉肉無柵狀或海綿組織分化。

(一) 上表皮泡狀細胞區(凹處)

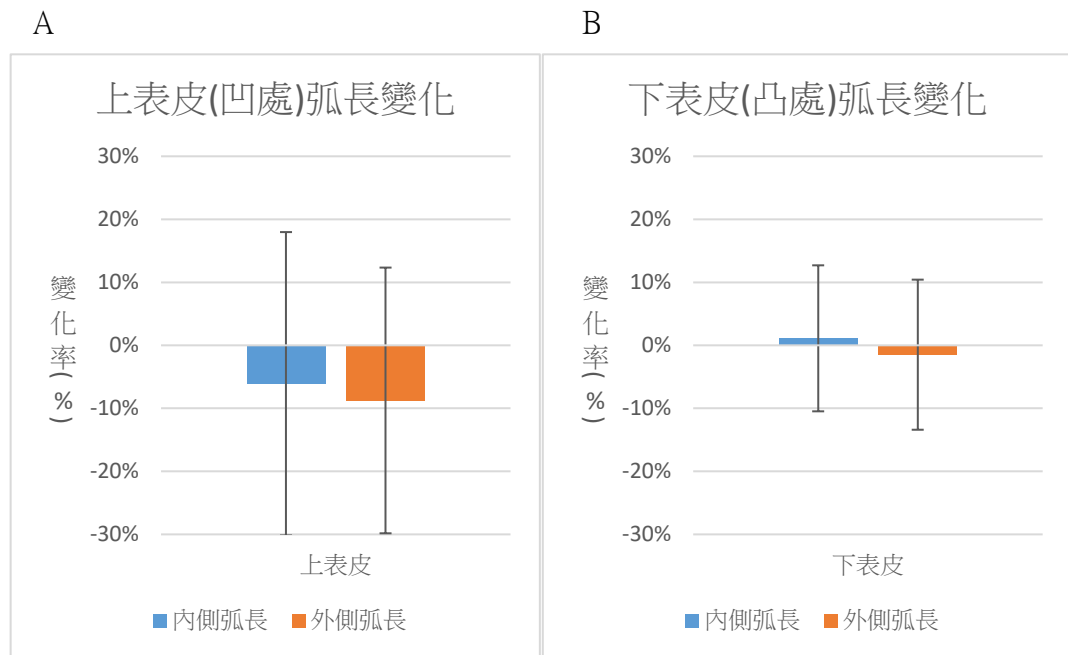
近中脈側具有大維管束，大維管束不位於彎折地帶，其所在位置會往中脈一側偏離，導致該處泡狀細胞的排列與縱摺不對稱。本區的泡狀細胞可能有皺紋或無皺紋，在有無皺紋部位的平行葉脈切面並沒有觀察到明顯的細胞種類或構造上差異。

(二) 下表皮泡狀細胞區(凸處)

不具大維管束，該處泡狀細胞的排列與縱摺對稱。

三、 脫水時上/下表皮泡狀細胞區的形變

(一) 區域長度變化：

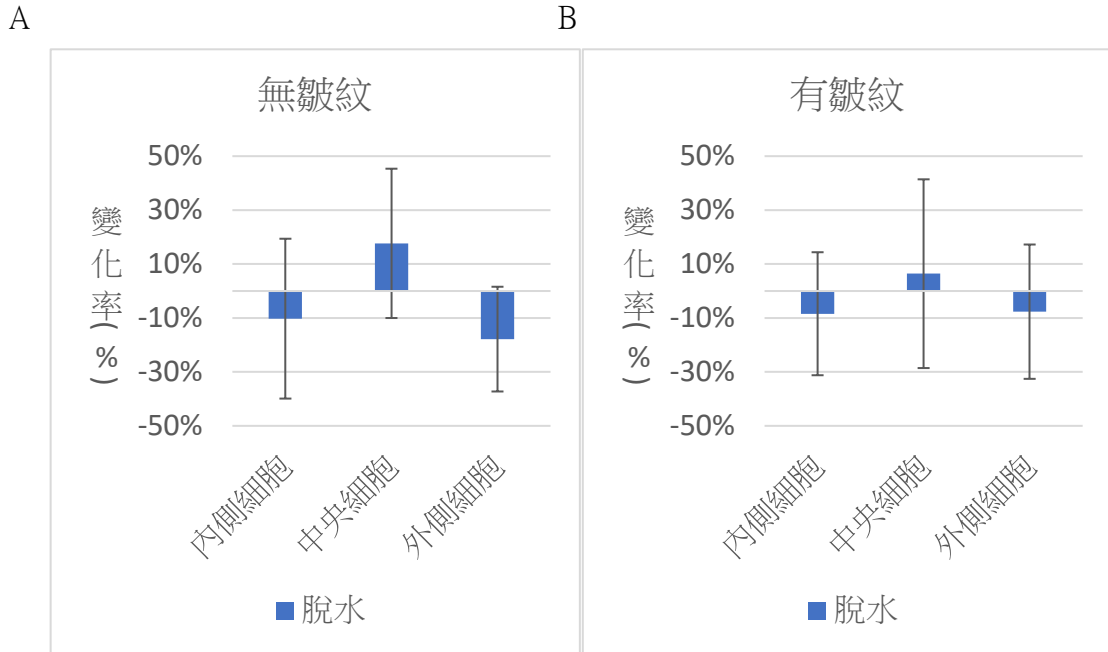


圖七 凹處及凸處的內側和外側在脫水前後的弧長變化
(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：變化率為負值代表弧長變化率減小。

- (1) 上表皮(凹處)除了內側弧長會縮短之外，外側弧長也會縮短，因此上表皮(凹處)可更有效率進行折疊。
- (2) 不論內側弧長或外側弧長，上表皮(凹處)內與外側弧長變化均較下表皮(凸處)短，因此上表皮泡狀細胞區均較下表皮泡狀細胞區更具形變功能。

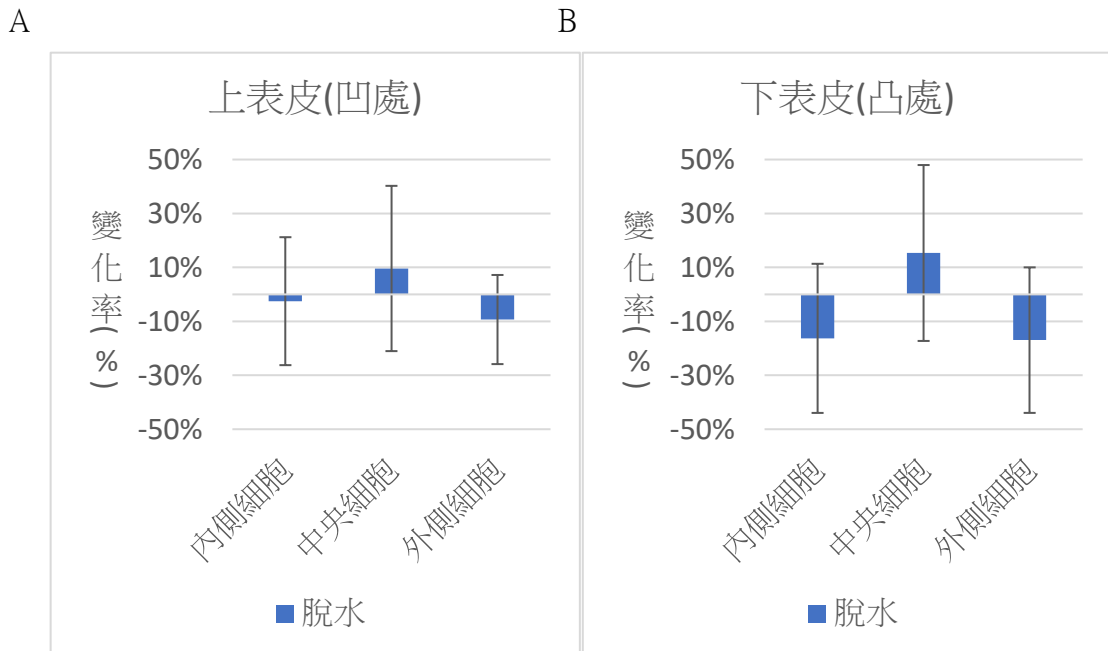
(二) 細胞形態變化



圖八 無或有皺紋葉片脫水時泡狀細胞寬度變化
(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：

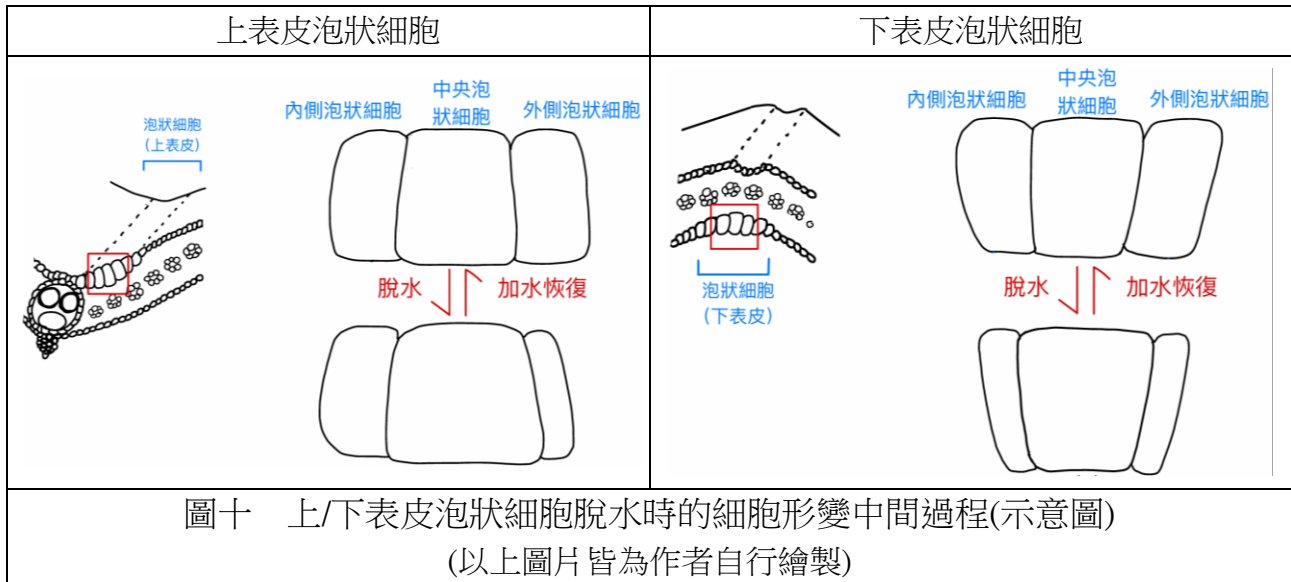
- (1) 脫水後，中央泡狀細胞的寬度會增加，但兩側泡狀細胞的寬度會變窄。
- (2) 同一收縮時間下(10 分鐘)，無皺紋葉子的泡狀細胞變化率較有皺紋的大。



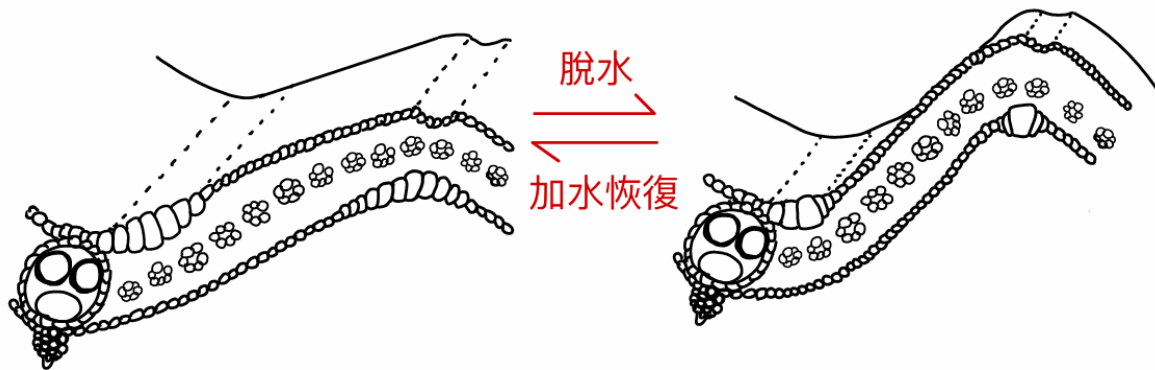
圖九 上/下表皮泡狀細胞脫水時的寬度變化
(以上圖片皆為作者自行測量數據並製圖)

實驗結果：

- (1) 脫水後，中央泡狀細胞的寬度會增加，但兩側泡狀細胞的寬度會變窄。
- (2) 同一收縮時間下(10 分鐘)，下表皮的泡狀細胞變化率較大。
- (3) 下表皮泡狀細胞中，因其兩側泡狀細胞的變化率相近，得知該群泡狀細胞的收縮會與縱摺對稱。



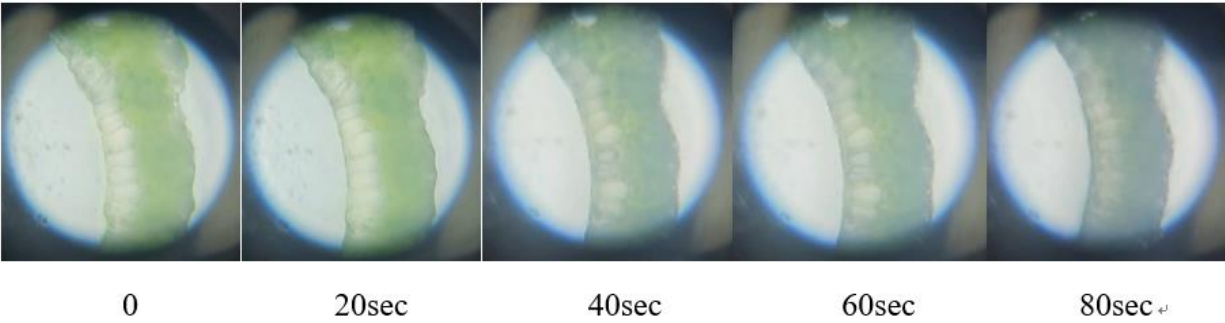
由前面「區域長度變化」與「細胞形態變化」實驗數據，我們歸納出以下結論：



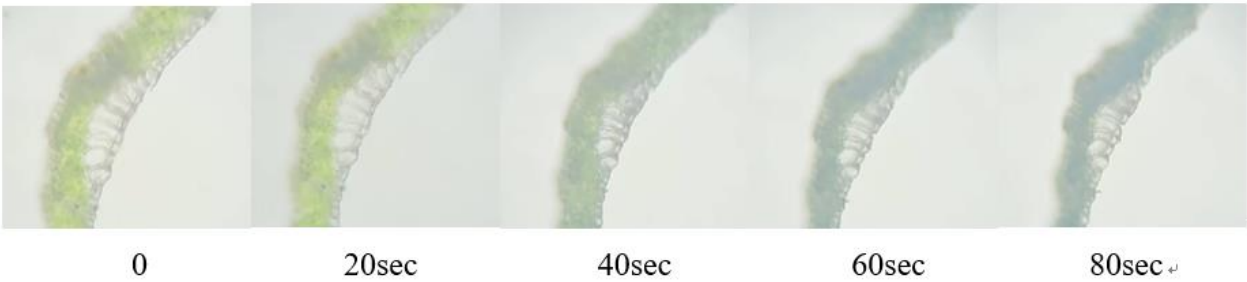
圖十一 颱風草葉收合與恢復的中間過程(手繪圖)
(作者自行繪製)

讓區域直接脫水，不採用 2M 蔗糖：

由於「區域長度變化」與「細胞形態變化」實驗採用高張蔗糖使葉子切片脫水，然而高張蔗糖對泡狀細胞相對溫和，該環境下細胞形變不明顯，故我們改採用直接脫水(讓葉切片暴露於空氣中使之蒸發脫水)，使細胞劇烈形變，並且全程錄影。



圖十二 有皺紋葉橫切面直接脫水錄影截圖

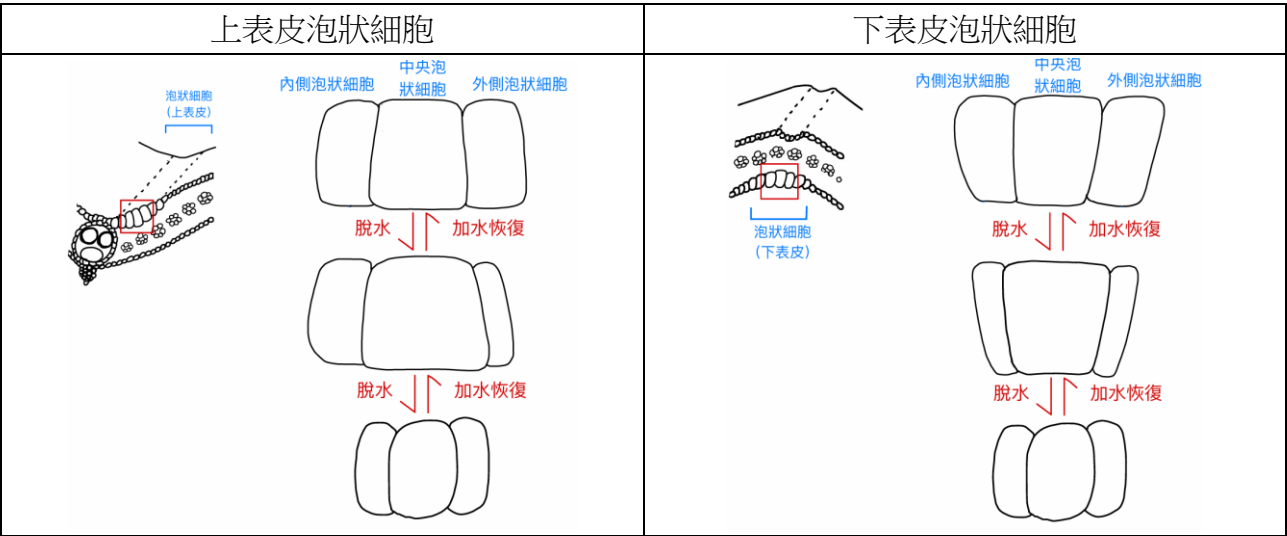


圖十三 無皺紋葉橫切面直接脫水錄影截圖

(以上圖片皆為作者自行拍攝)

實驗結果：

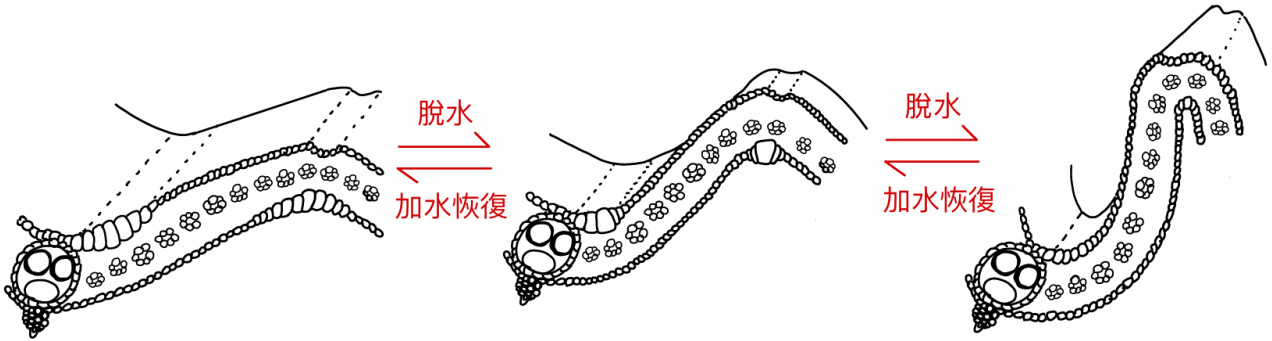
- (1) 不論有無皺紋，泡狀細胞在開始脫水後 20 秒，需要仔細觀察，可發現中央泡狀細胞寬度微幅增加，隔壁的兩側泡狀細胞寬度微幅減少。
- (2) 不論有無皺紋，泡狀細胞在開始脫水後 40 秒可看見水分移動的動態：水分會滲出泡狀細胞，並主要往葉肉組織方向流動，少數則往葉肉組織反方向移動。
- (3) 不論有無皺紋，水分滲出後，亦即開始脫水後 80 秒可看見所有泡狀細胞皆萎縮，細胞寬度、長度皆有所減少。
- (4) 無皺紋葉子的泡狀細胞萎縮得較有皺紋嚴重。



圖十四 上/下表皮泡狀細胞脫水時的細胞形變 (示意圖)
(以上圖片皆為作者自行繪製)

實驗總結：

根據以上的實驗數據與結果，我們歸納出颱風草葉的收合與恢復機制如下圖：

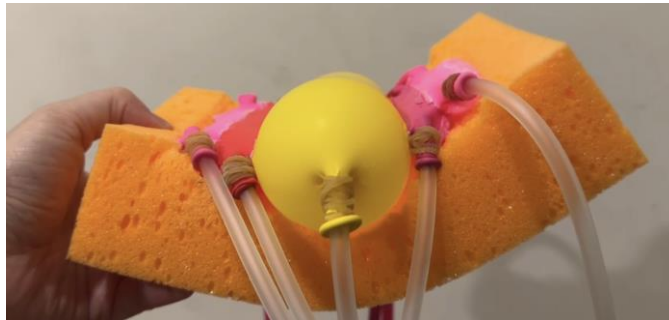


圖十五 颱風草葉的收合與恢復完整機制(手繪圖)
(作者自行繪製)

四、 仿生模型



洩氣(脫水)↓↑充氣恢復(加水恢復)



洩氣(脫水)↓↑充氣恢復(加水恢復)



圖十六 自製仿生模型的折疊過程
(以上圖片皆為作者自行拍攝)

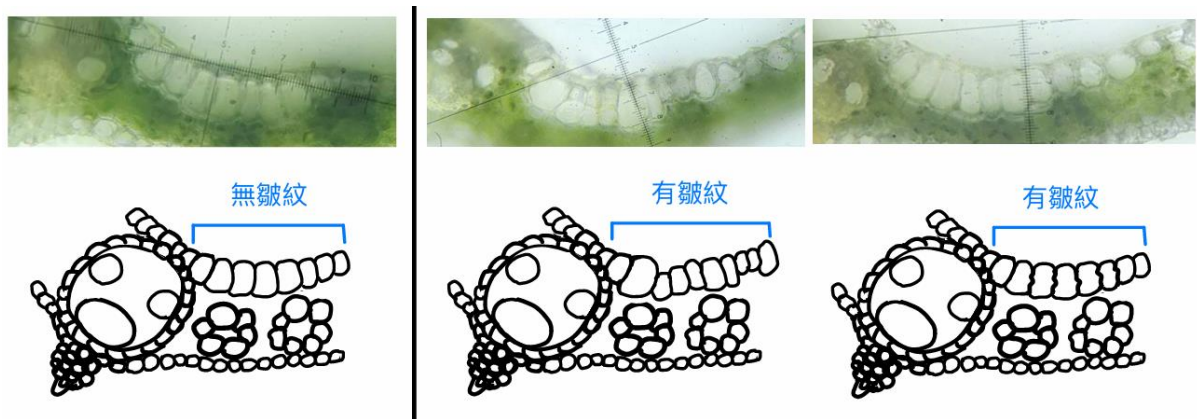
陸、討論

皺紋的形態：

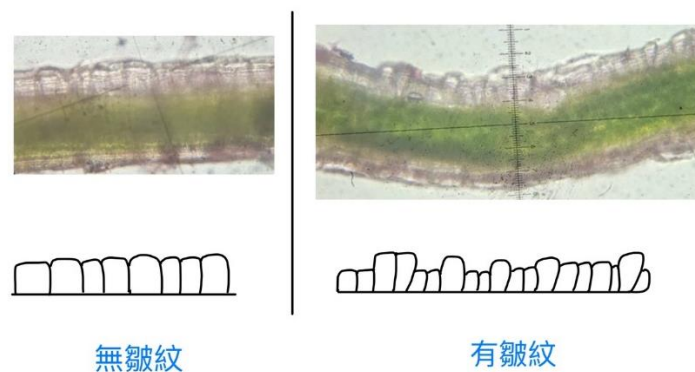
文獻中曾提及相鄰兩個泡狀細胞之間的細胞壁，比其他表皮細胞壁更厚，而且具有最少的原生質絲（Jane et al.,1991[6]）。因此我們想利用番紅與蘇丹四號染劑比較有無皺紋的颱風草葉片，其皺紋處細胞型態或角質層的厚度是否有區別。實驗結果不論是染番紅或蘇丹四號，有無皺紋區域染色後皆不具明顯差異。

微觀來看，無皺紋葉片橫切面的整群泡狀細胞，長寬大小相近，其細胞邊緣平整(圖十七左)；然而有皺紋葉片的橫切面出現兩種情況：其一是泡狀細胞有大有小，而且大維管束旁的一顆泡狀細胞較其餘的大(圖十七中)，另一種情況是泡狀細胞大小相近，但其細胞邊緣不平整(圖十七右)。進一步觀察有無皺紋葉的縱切面，可看見無皺紋的表皮細胞大小高度較為平均(圖十八左)，而有皺紋葉的表皮細胞大小高度不一(圖十八右)。

總結：由圖十七及圖十八的顯微觀察，我們推測大小不一的泡狀細胞，以及泡狀細胞其褶皺的細胞邊緣，使得葉片表層產生凹凸不平的表面，即為「皺紋」的型態。



圖十七 有無皺紋橫切面泡狀細胞形態之差異



圖十八 有無皺紋縱切面泡狀細胞形態之差異（蘇丹四號染色）
(以上圖片皆為作者自行拍攝或繪製)

皺紋的功能：

野外觀察時我們發現颱風草的葉子具有皺紋和無皺紋兩型，我們對皺紋的功能深感好奇。經實驗發現有皺紋的颱風草葉不論脫水或是加水恢復，速度都較慢。若經仔細觀察可以看出無皺紋的葉子雖然脫水與加水恢復的速度較快，但其角度不均勻且容易造成歪斜；而有皺紋的葉子在脫水的過程中雖然速度較慢，但縱摺角度變化較為穩定均勻，因此我們推測皺紋的功能與穩定葉片結構有關。

文獻中曾提及野外的颱風草植株常見皺紋的構造，但在溫室生長全光照環境種植的颱風草葉片極少出現皺紋，顯示颱風草生長環境的光度可能會影響葉片上皺紋產生的數量，且族群間可能有差異（廖, 2014[2]）。我們的採樣地點為竹東五指山開闊荒地、龜山福源山步道（皆為照光度高）與中和烘爐地（照光度低）。在進行野外田野調查時，我們發現相較於無遮光荒地，生長於步道旁遮光林下的颱風草更容易形成皺紋。我們猜測遮光林下水分相對充足不易散失，林下光線較少因此具有皺紋的葉片更有助於支撐葉子的形狀，以利進行光合作用。

葉片的構造與收合恢復機制：

測量縱摺角度實驗中，脫水時，靠近葉緣的縱摺先收合；加水時，靠近中脈的縱摺先恢復。推測可能與水分在葉片的分布有關。脫水時，葉緣的水分会橫向運輸至中脈，導致葉緣失去水分而先收合；加水時，中脈優先吸收由根部運輸上來的水分，再橫向運輸給兩側的維管束，因此靠近中脈的維管束較早獲得水分，導致近中脈的縱摺先恢復。

颱風草葉片橫切面可以觀察到泡狀細胞分布於上表皮與下表皮。上表皮的泡狀細胞位於縱摺凹處，旁邊具有大維管束，泡狀細胞微幅偏離縱摺，分布與縱摺不對稱；而下表皮的泡狀細胞均勻分布於縱摺凸處，旁邊不具大維管束，分布與縱摺對稱。

葉片脫水初始，下表皮(凸處)的泡狀細胞，正中央的中央泡狀細胞寬度會增加但相鄰的內側與外側細胞寬度皆會變小，於是縱摺角度變小並且向腹面(葉背)凸起，如圖三；然而，上表皮(凹處)的泡狀細胞，中央泡狀細胞寬度也增加，但相鄰兩側的細胞表現不對稱：內側(近中脈側)細胞寬度變化率很小，但靠近外側(近葉緣側)的泡狀細胞寬度減少較多。我們推測可能與凹處上表皮的泡狀細胞較靠近大維管束，具較多厚壁細胞，質地較硬，受其牽制而無法造成太多形變有關。凸處下表皮泡狀細胞區附近無大維管束，內側與外側隔壁細胞的細胞寬度變化率因而相近。未來若能藉由細胞膨壓的測量，可進一步確認我們的推測。

但是葉片脫水時間一久，不論上表皮(凹處)與下表皮(凸處)，其所有泡狀細胞皆會明顯萎縮：細胞寬度、高度、面積皆減少，就連中央泡狀細胞也會減少寬度。我們藉由全程錄影，觀察出上述現象，以及水分会往葉肉組織方向流出泡狀細胞。

另外，上表皮(凹處)的內側與外側弧長均變短，外側弧長並不會變長，代表縱摺結構不會遭受破壞，再搭配大維管束如同骨架支撐的結構，該構造深具仿生意義與未來應用。

柒、結論

- 一、 颱風草葉脫水時會收合，加水後具有可恢復性。
- 二、 有皺紋的葉子脫水收合與加水恢復速度皆較慢，但皺紋可使葉結構更穩定。
- 三、 泡狀細胞分布於凹處的上表皮與凸處的下表皮。凹處的上表皮泡狀細胞可能具有皺紋或無皺紋，近中脈側具有大維管束，初始脫水時中央泡狀細胞寬度增加，兩側泡狀細胞寬度變小、形變不對稱，脫水後期的所有泡狀細胞寬度皆減少；凸處的下表皮泡狀細胞旁不具大維管束，初始脫水時中央泡狀細胞寬度增加，兩側泡狀細胞寬度變小、形變對稱，脫水後期的所有泡狀細胞寬度皆減少。
- 四、 颱風草葉脫水時，葉身中央的葉緣處最先發生變化。颱風草脫水時，泡狀細胞形變，帶動葉肉組織一起往內凹摺，使得縱摺的夾角變小，縱摺間距離逐漸縮短，葉子收合；加水時，泡狀細胞逐漸恢復原樣，帶動葉肉組織一起往外張開，使得縱摺的夾角增大，縱摺間距離逐漸變長，由中脈往葉緣舒展恢復。
- 五、 上表皮(凹處)的內側與外側弧長均變短，搭配大維管束的結構，可更有效率支持與進行收合摺疊。
- 六、 依照颱風草葉的收合與恢復機制所設計的自製模型，可進行折疊，具仿生效能。

捌、參考資料及其他

- Suresh, S., Guo, K., Liu, M., Vella, D., & Hsia, K. J. (2024). Dehydration-induced corrugated folding in *Rhapis excelsa* plant leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(17). <https://doi.org/10.1073/pnas.2320259121>
- 廖顯淳 (2014)。颱風草葉片皺摺與葉子對光環境的反應〔碩士論文，國立臺灣大學〕。華藝線上圖書館。<https://doi.org/10.6342/NTU.2014.00048>
- 黃文博 (編) (2005)。南瀛植物探索。台南縣政府。
- Hsu, C.C, W.C. Lin, C.-S. Kuoh, C.-H. Chen and H.-Y. Liu. 2000. Gramineae (Poaceae). pages 318-654 In: Huang, T.-C. and Editorial Committee of the Flora of Tarwan, eds. *Flora of Tarwan*. Vol. 5. 2nd ed. Department of Botany, National Taiwan University, Taipei, Taiwan: Editorial Committee of the Flora of Taiwan.
- Fournier, M. (2018)。仿生高科技：源於自然的科技靈感 (潘文柱譯)。楓樹林出版社。
- Jane, W., & Tsai-Chiang, S. (1991)。Morphology and development of bulliform cells in *Arundo formosana* Hack. *Taiwania*, 36, 85 – 97。 <https://doi.org/10.6165/tai.1991.36.85>

玖、附錄

一、光學複式顯微鏡與手機規格

光學複式顯微鏡: Motic RED100 (廠牌: Motic，型號:RED100，隸屬於高中生物實驗室)

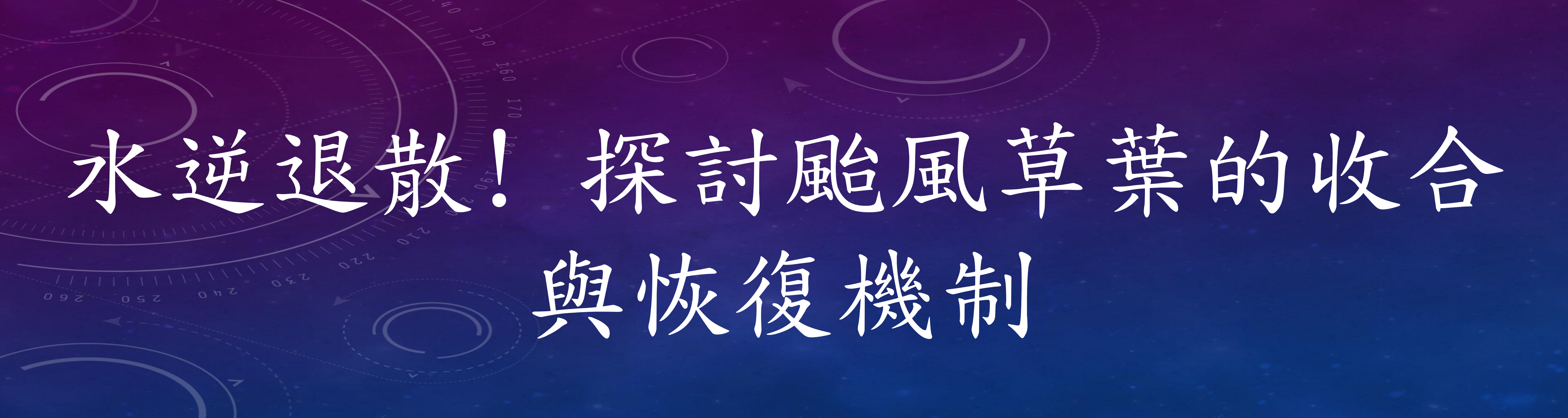
手機(作為相機): Samsung Galaxy S23 (廠牌: Samsung，型號:SM-S9110)

全文完

【評語】 052105

1. 本研究主要目的在解析颱風草葉片脫水與恢復的摺疊機制，並比較有無皺紋葉片在動作上的差異，結果推測皺紋有助於結構穩定。並進一步透過解剖觀察泡狀細胞的變化，發現葉片收合涉及細胞層次的不對稱變形，與維管束分布相關。
2. 本研究除了探討植物動態形變的機制外，亦成功製作出仿生模型，整體設計合理，兼具基礎理解與應用價值。
3. 圖表結果含有統計結果平均值及標準差，但無統計顯著性分析，可增加相關數據分析及說明，用以支持結果及結論。
4. 仿生模型設計頗有創意，清楚地闡釋颱風草葉脫水時會收合，加水後具有可恢復性的特性。如可數據化地測量變化，深入探討不同細胞步葉片收合的影響，以及增加皺折設計/調整左右邊洩氣(脫水)及充氣恢復(加水恢復)的不同速度，更可以完整展現颱風的收合與恢復機制。也可進一步利用此數據，建議預測模型，模擬颱風的收合與恢復機制，將可提升此研究深度。

作品海報



水逆退散！ 探討颱風草葉的收合 與恢復機制

摘要

颱風草葉片在脫水時會收合並於加水後恢復，其過程如同摺扇。野外觀察發現有些颱風草葉片具有皺紋。有皺紋的葉子脫水與恢復速度都較無皺紋的葉子慢，但縱摺角度變化較為穩定均勻，推測皺紋的功能可能與穩定葉片結構有關。觀察颱風草葉片橫切面可見上表皮的泡狀細胞位於縱摺凹處，脫水過程為中央泡狀細胞寬度會增加，最終減少，且相鄰兩側細胞寬度縮小變化不對稱，推測與其鄰近大維管束有關；下表皮的泡狀細胞均勻分布於縱摺凸處，旁邊不具大維管束，脫水過程為中央泡狀細胞寬度會增加，最終減少，但相鄰兩側的細胞寬度會對稱縮小。本研究歸納出颱風草葉片收合與恢復機制，並依實驗結果自製仿生模型，在仿生研究上具有應用潛力。

壹、前言

研究動機與文獻回顧

過去曾有研究指出，棕櫚樹的葉片脫水時會折疊，該團隊並據此構造研發出仿生可折疊軟體機器。我們觀察到在台灣常見的颱風草葉片也具有類似效應。颱風草具有容易栽培、葉片小、反應速度快等優點，因此我們選擇以颱風草做為研究對象，以期回答颱風草葉片的收合恢復機制。此外，我們也發現有些颱風草葉片具有橫向於葉脈的「皺紋」構造，這也引發我們好奇。查閱過往文獻，並沒有針對皺紋功能的研究探討，於是我們展開了本研究計畫，以期找出颱風草葉片的皺紋與其葉片收合恢復過程的關聯。

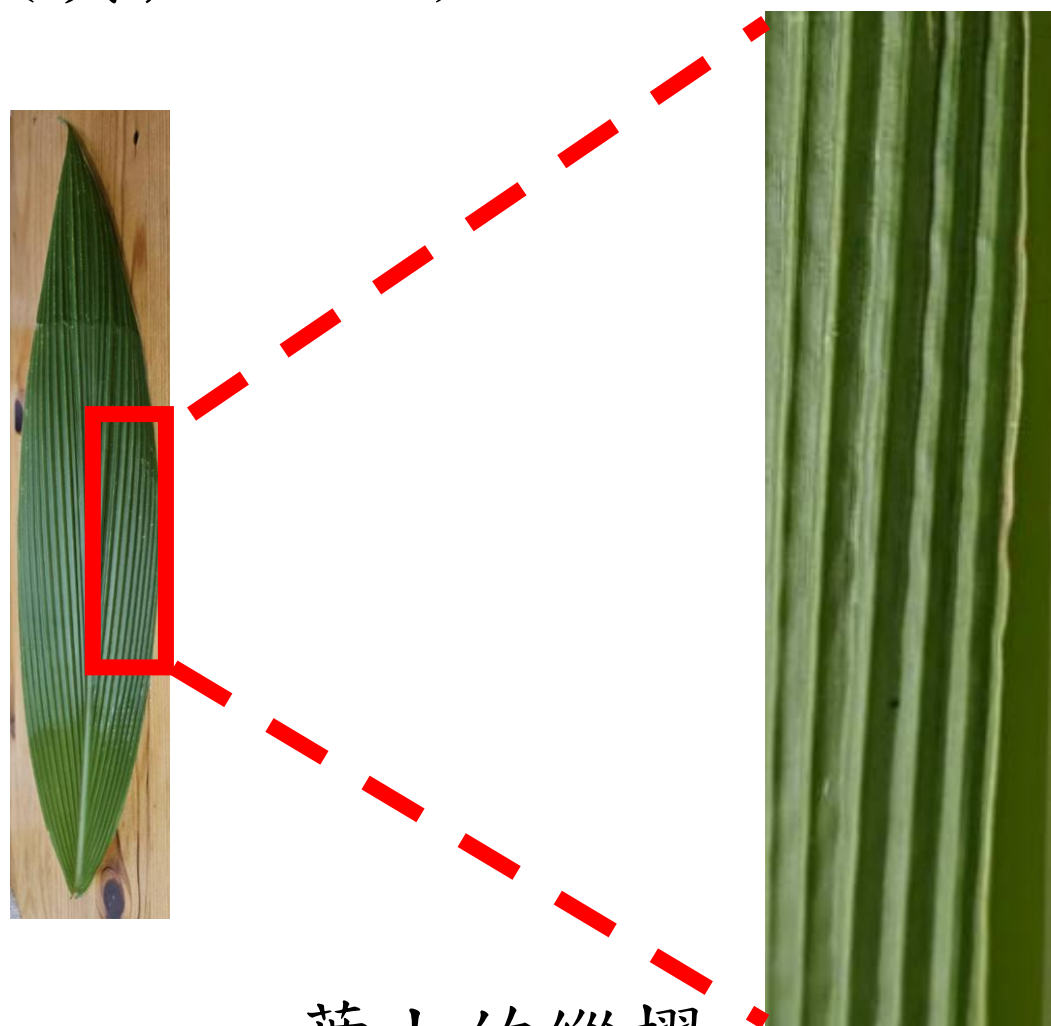
此外生長於乾旱環境的禾本科植物，其葉片表皮常具有泡狀細胞（bulliform cell）。當植株水份過度散失時，葉片會捲起或發生葉的型態變化，以利適應乾旱脫水狀態（Jane et al., 1991）。



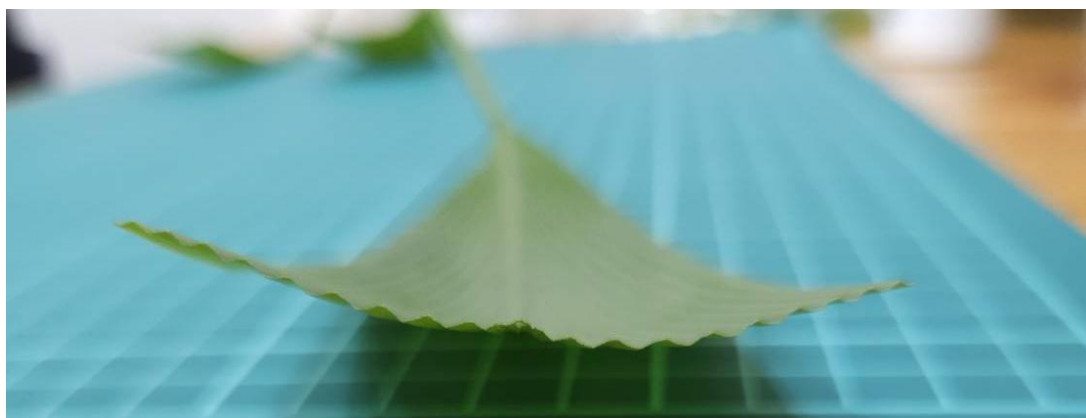
颱風草
(作者自行拍攝)

縱摺

為颱風草葉片縱向與葉脈平行的摺扇狀構造（黃，2005）。



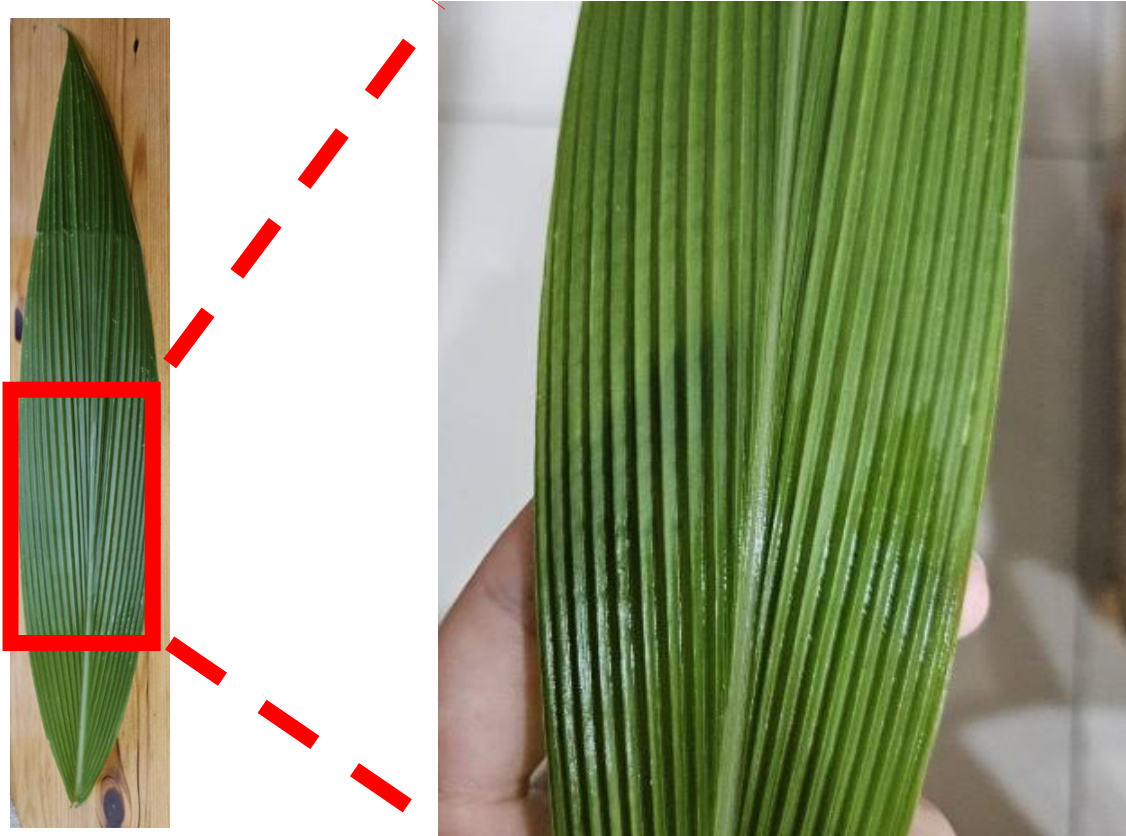
葉上的縱摺



縱摺橫切面照

皺紋

有些颱風草葉子表面具橫向於葉身皺起的紋路，皺紋的有無可能與環境因子有關（廖，2014）。



無皺紋葉片



有皺紋葉片

(以上照片皆為作者自行拍攝)

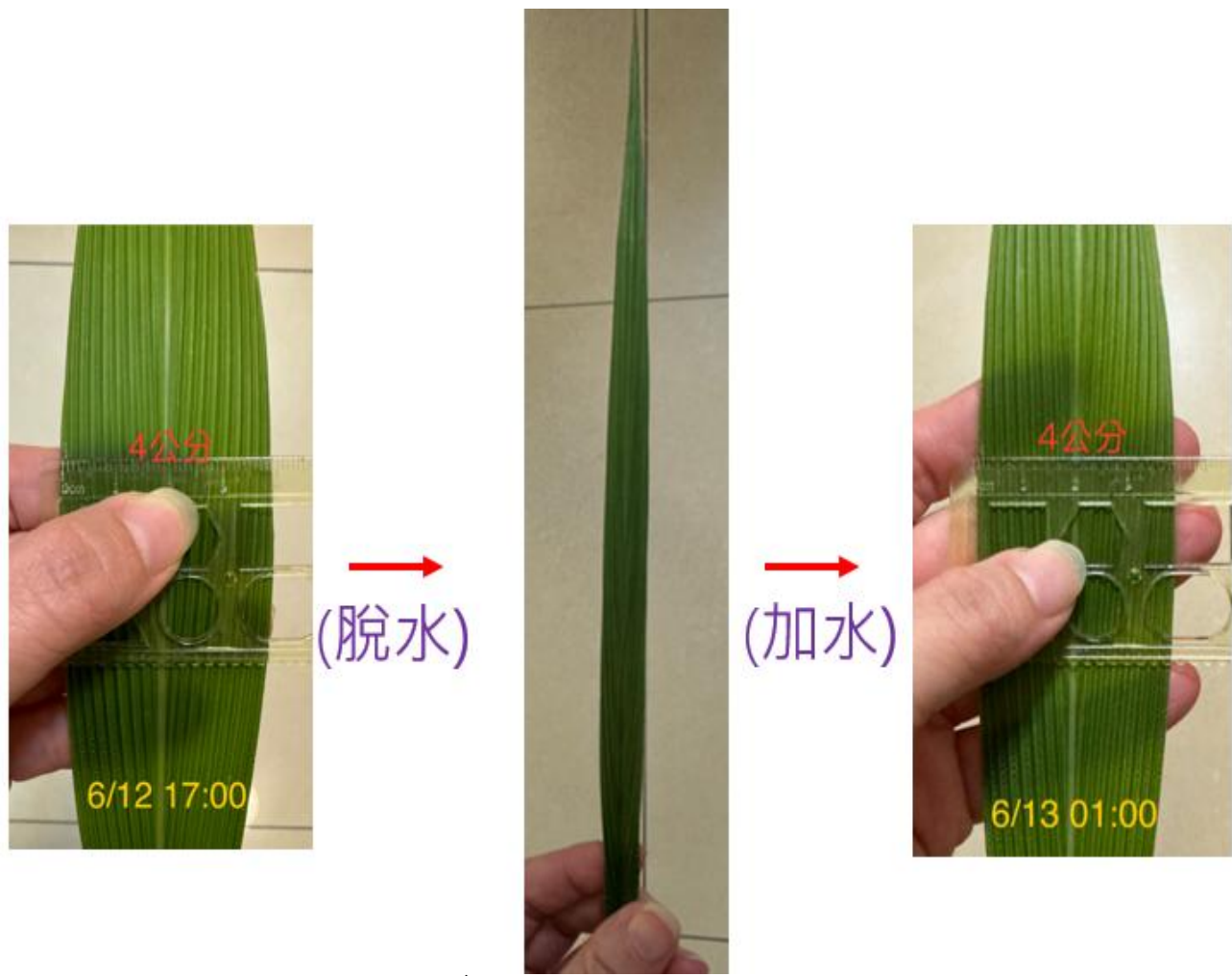
泡狀細胞

泡狀細胞在表皮組織的肋間成群出現，細胞脫水時會有明顯的體積萎縮（Jane et al., 1991）。



颱風草的脫水收合

颱風草葉片的脫水收合具有可恢復性，且最早收合部位是在1/2葉身處。



(以上照片皆為作者自行拍攝)



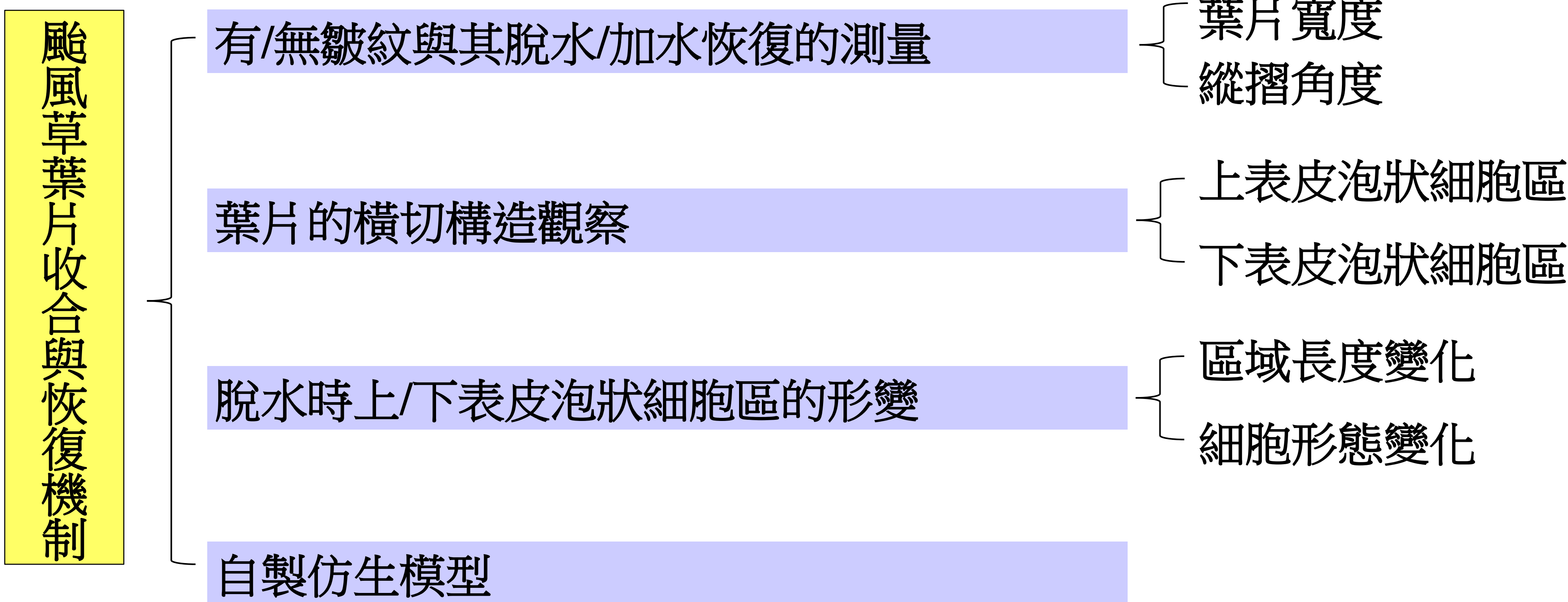
貳、研究目的

- 一、 颱風草葉片的皺紋是否與葉片脫水恢復過程有關聯
- 二、 推測颱風草葉片的收合與恢復機制

參、研究設備及器材

- 一、 颱風草採集地點：新北中和烘爐地登山步道、竹東五指山開闊荒地、桃園龜山福源山步道
- 二、 實驗器材、藥品與分析軟體：
游標尺、光學複式顯微鏡、目鏡測微器、相機(手機)、2M蔗糖水溶液、蘇丹四號、中性紅、塑膠軟管、打氣幫浦、ImageJ。

肆、研究架構圖

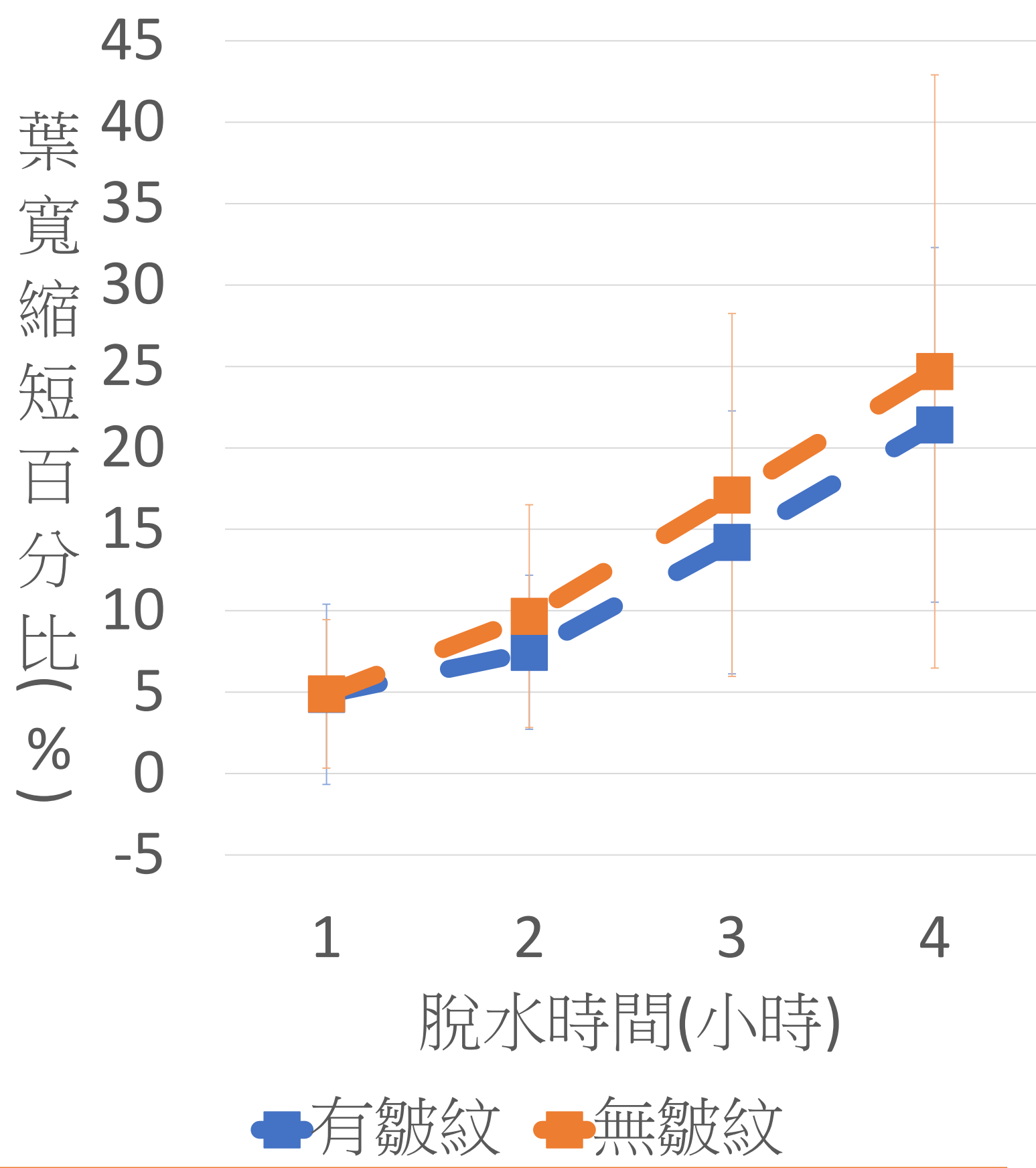


伍、 研究結果

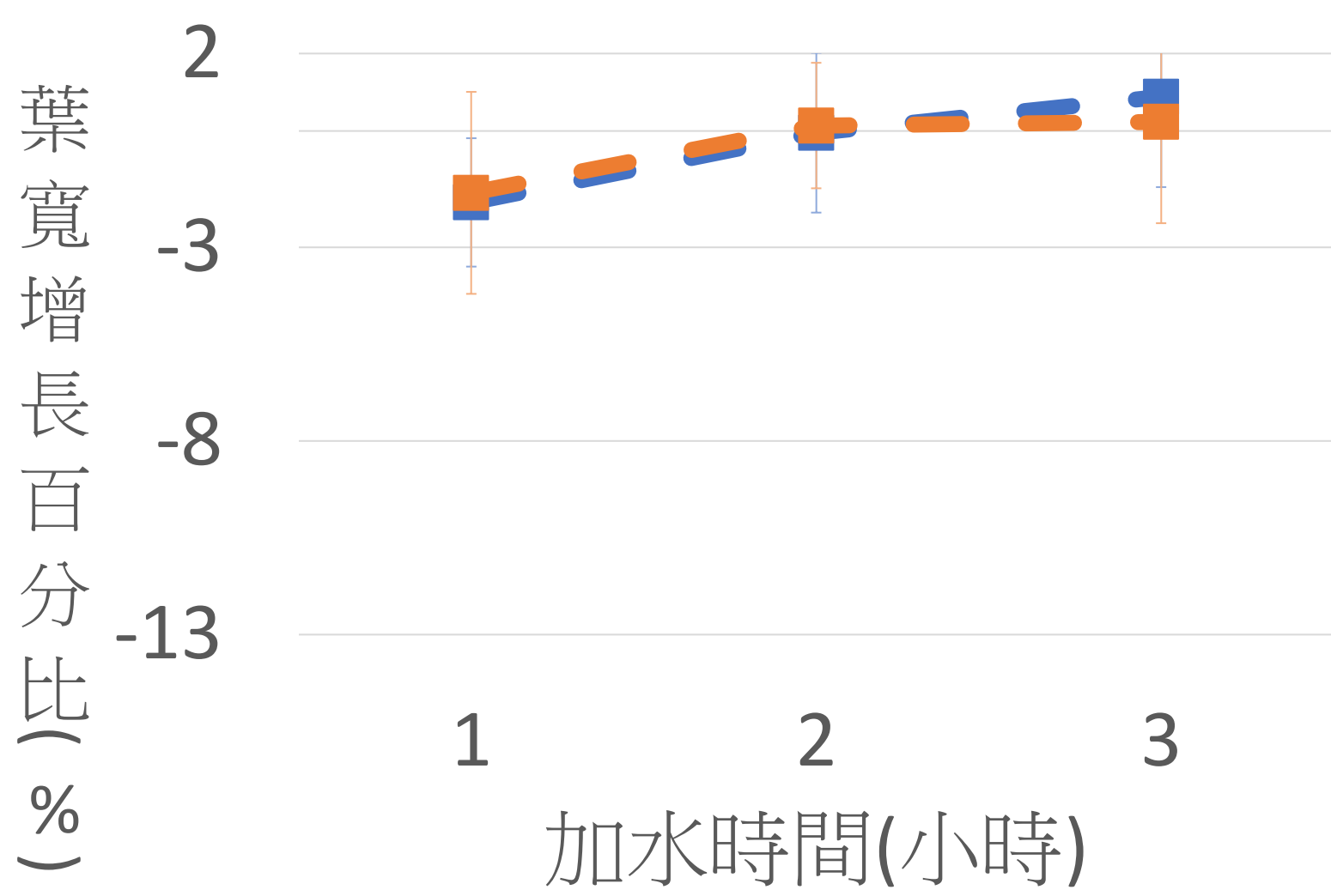
一、 有/無皺紋與其脫水/加水恢復的測量

(一) 葉片寬度變化

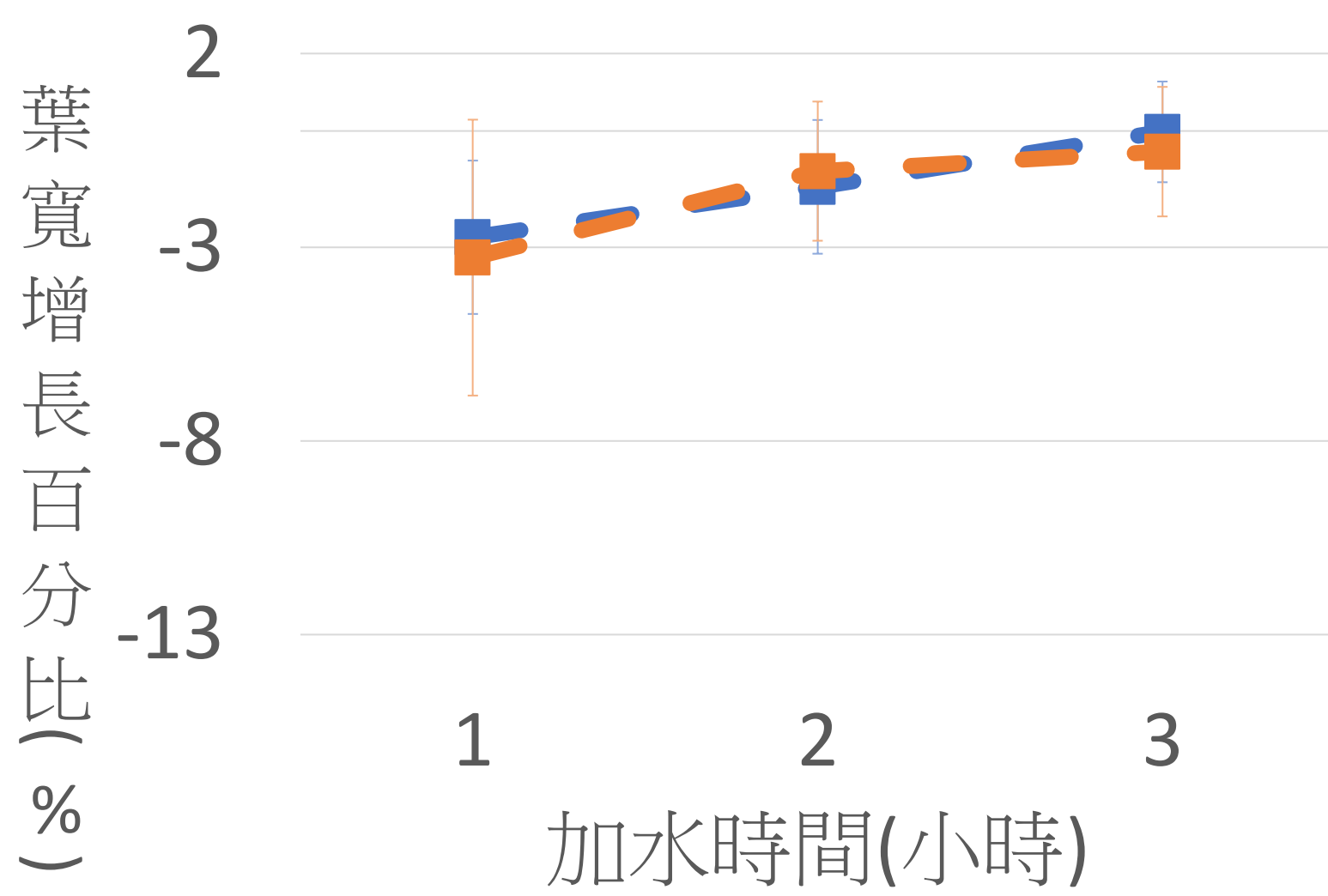
脫水後葉寬變化



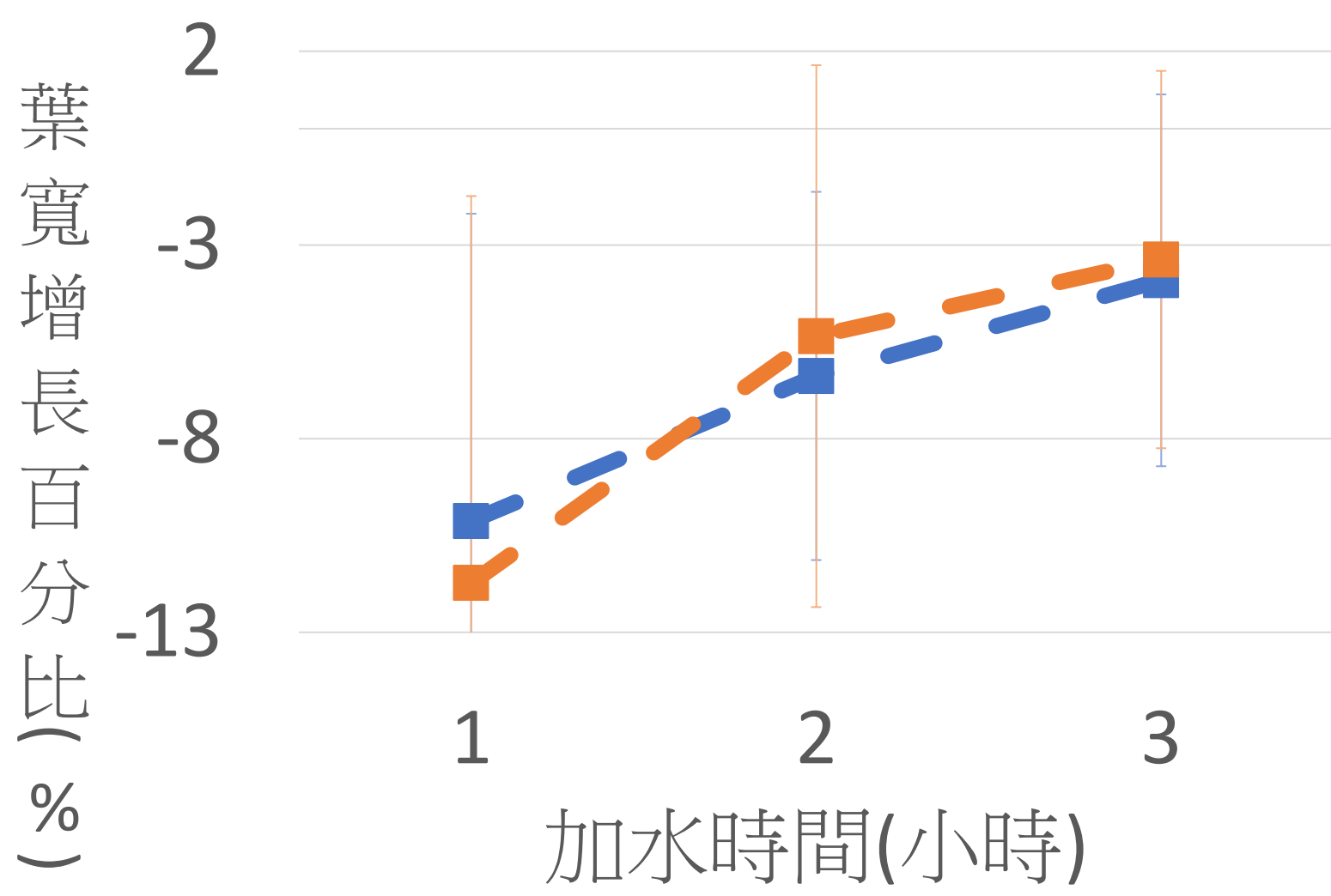
脫水1小時後加水



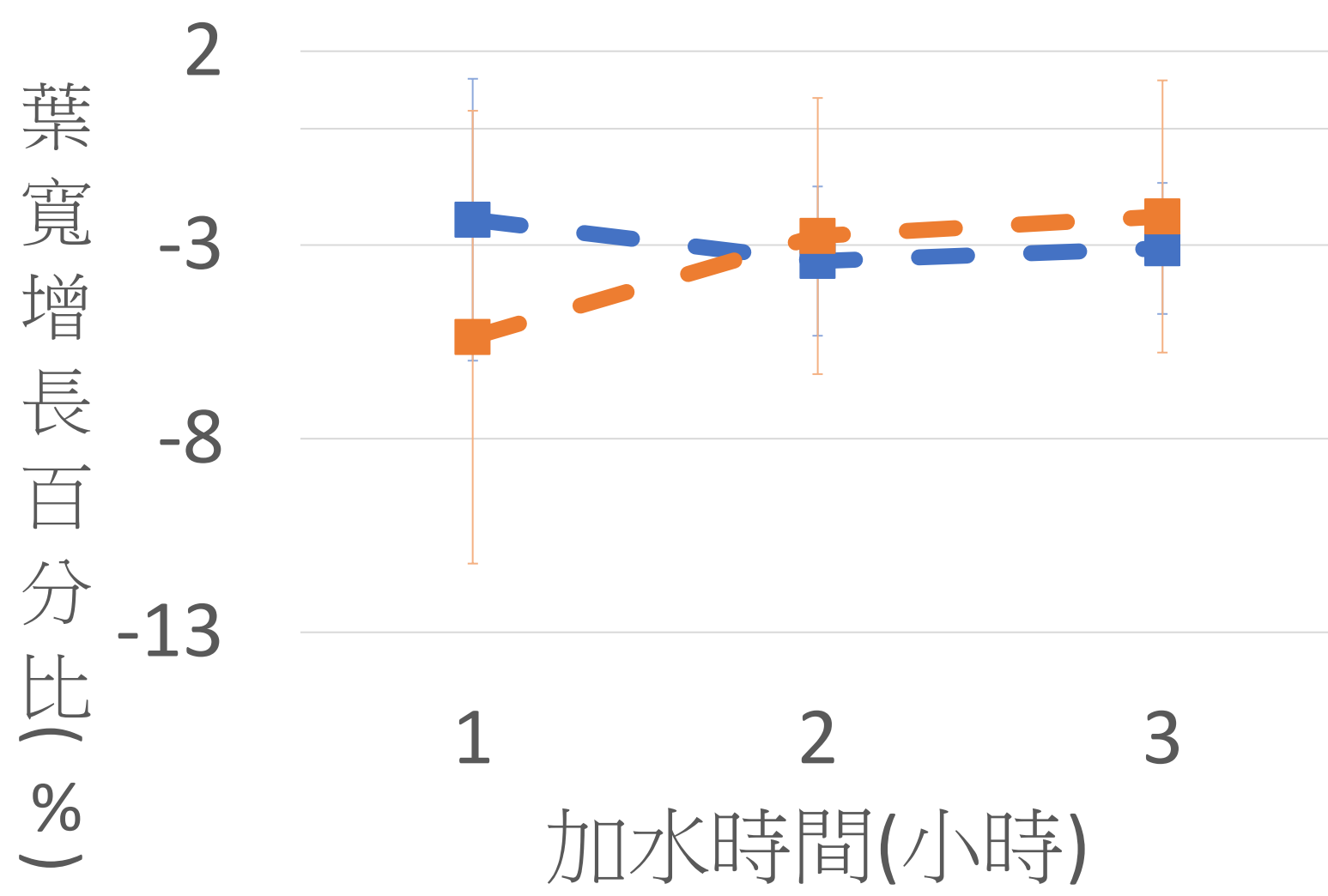
脫水2小時後加水



脫水3小時後加水

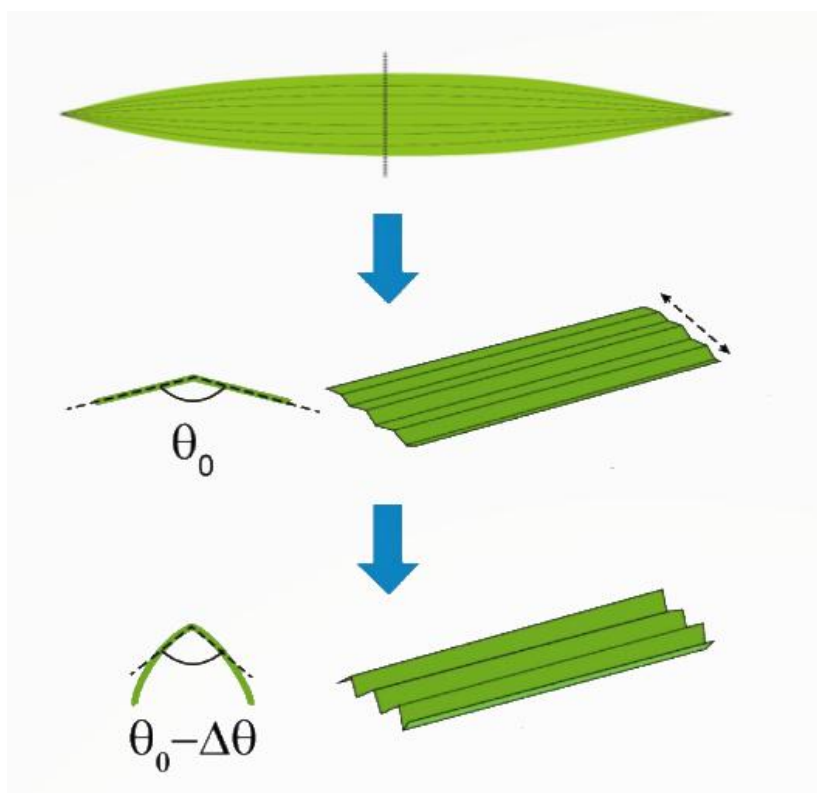


脫水4小時後加水

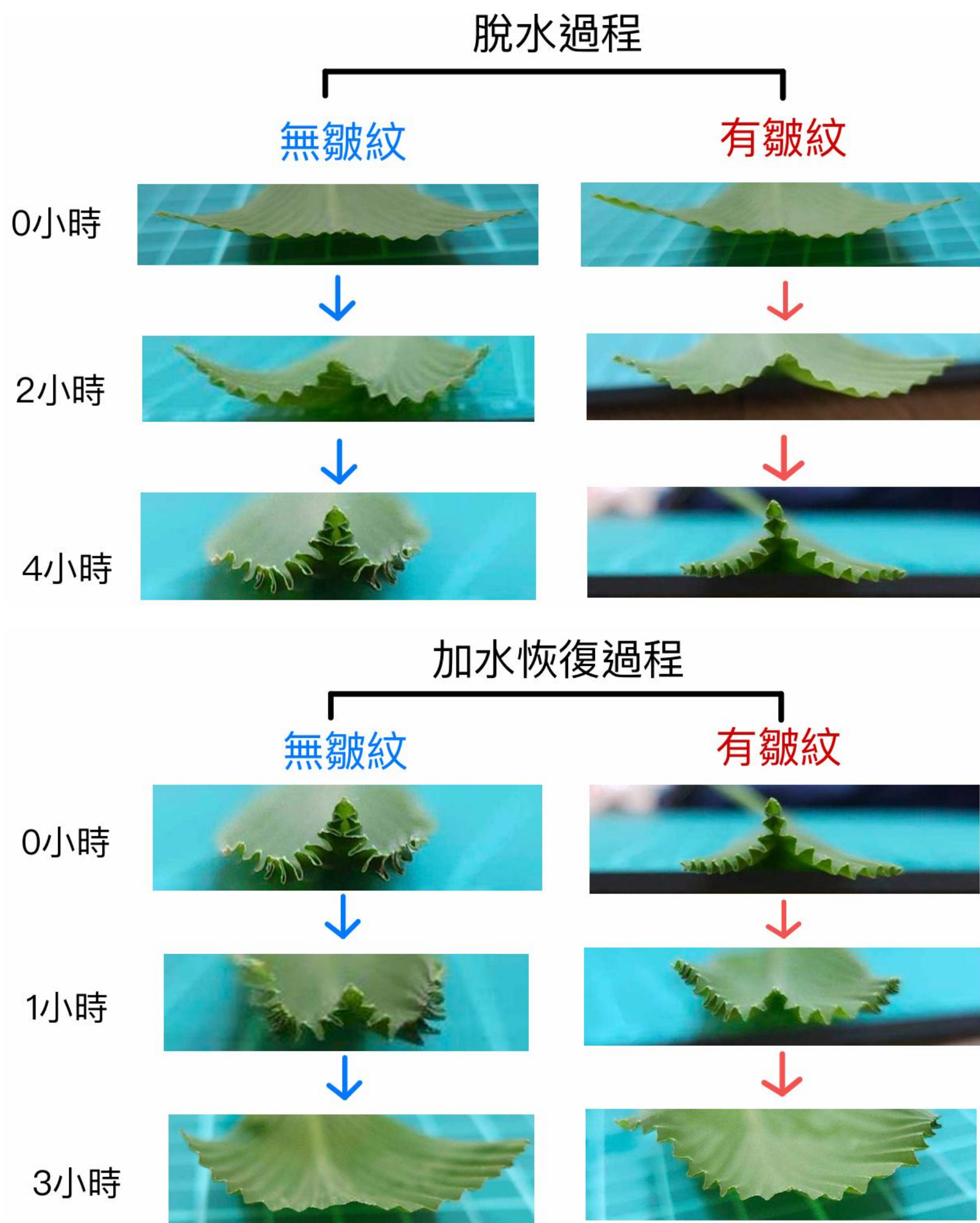


(以上皆為作者自行測量數據並製圖)

(二) 縱摺角度變化

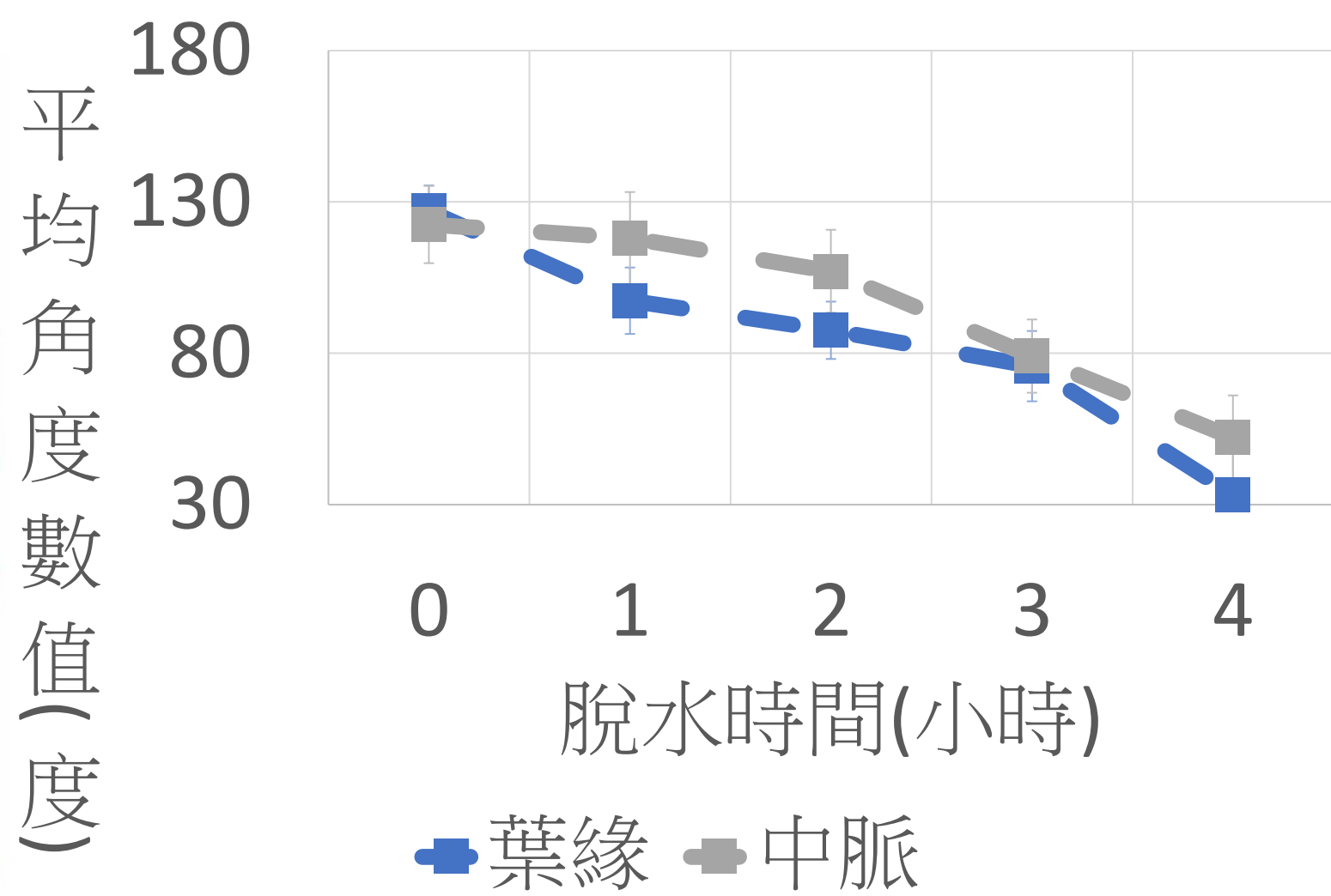


縱摺角度示意圖(Suresh et al., 2024)

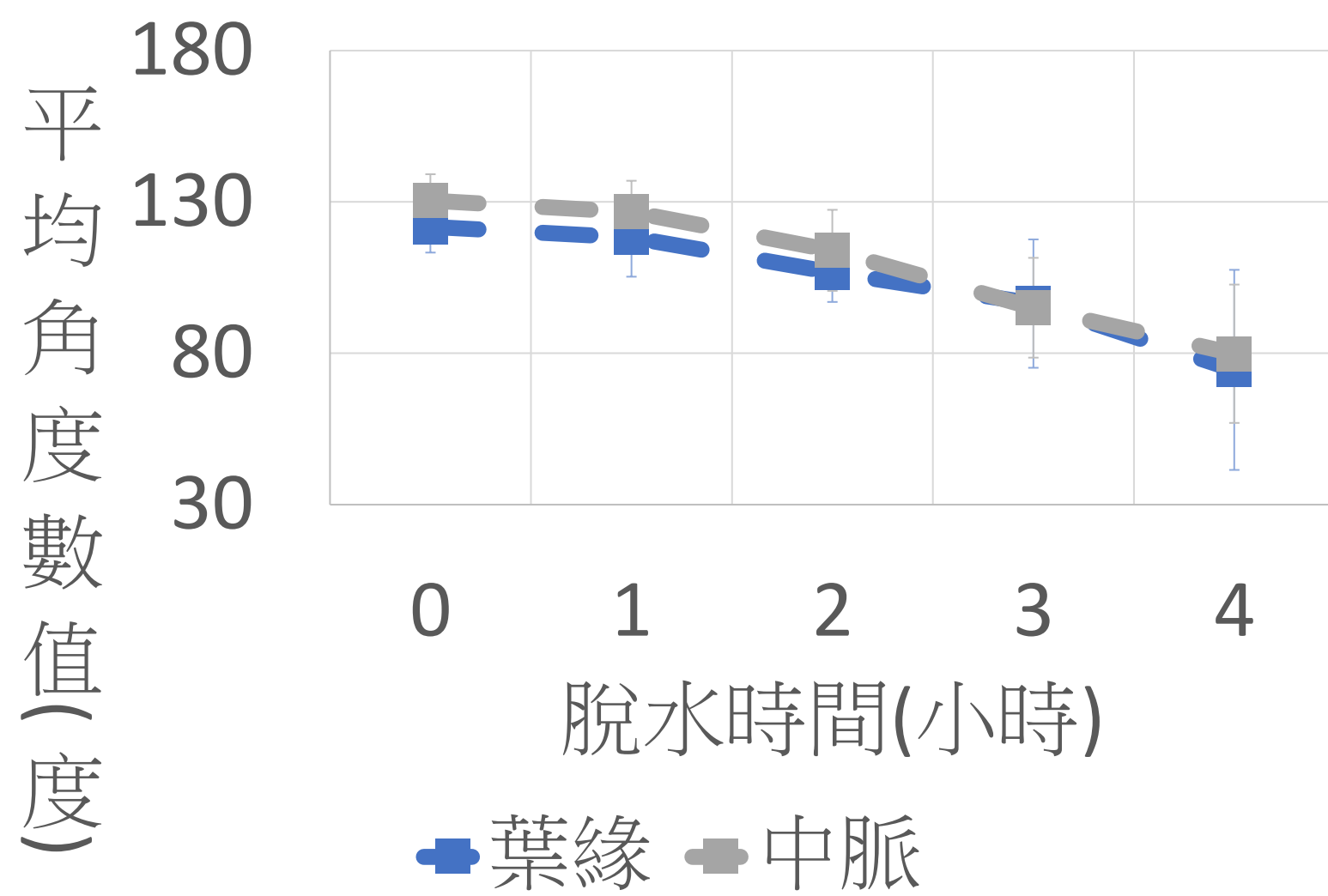


(以上皆為作者自行攝影並製圖)

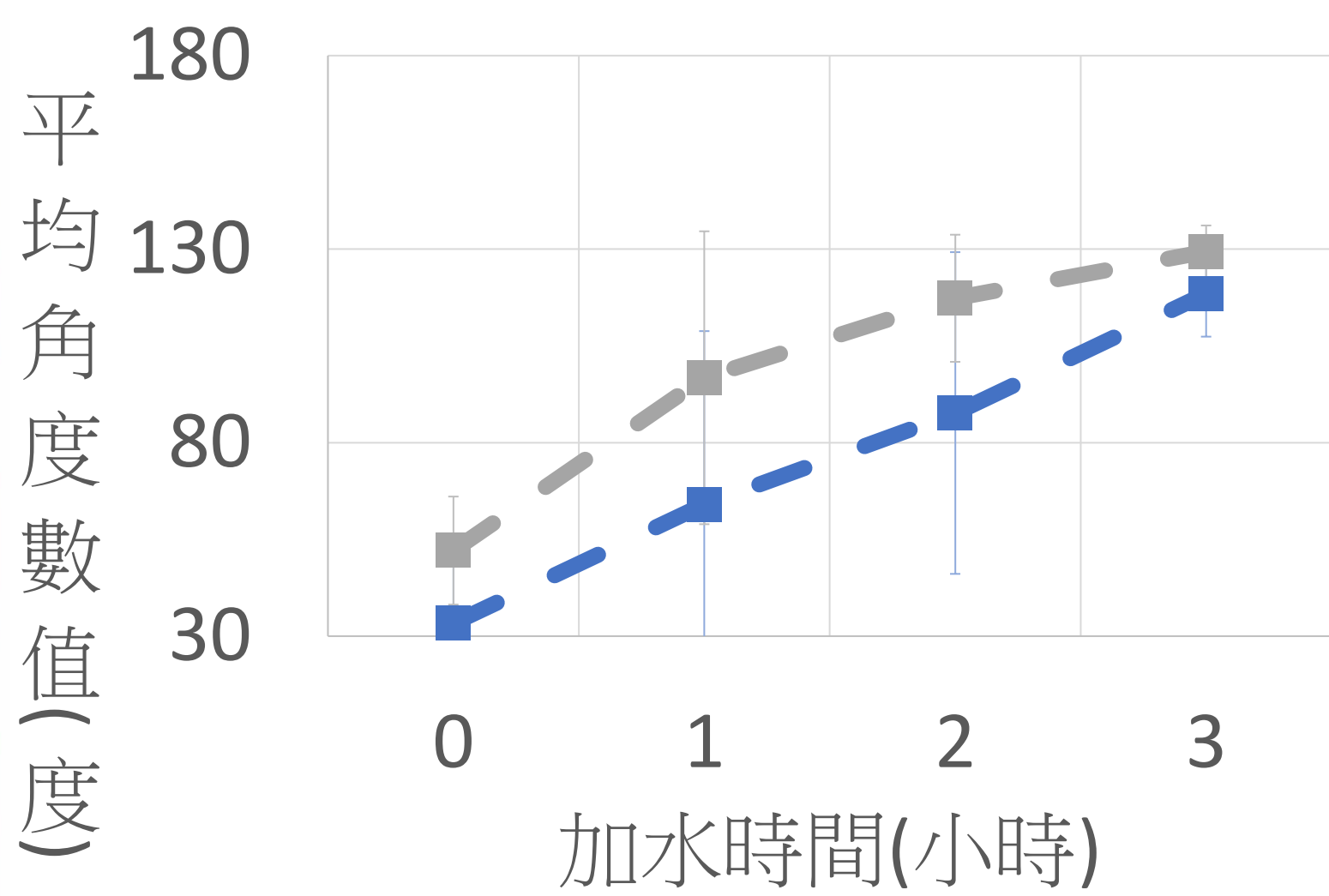
無皺紋葉片脫水



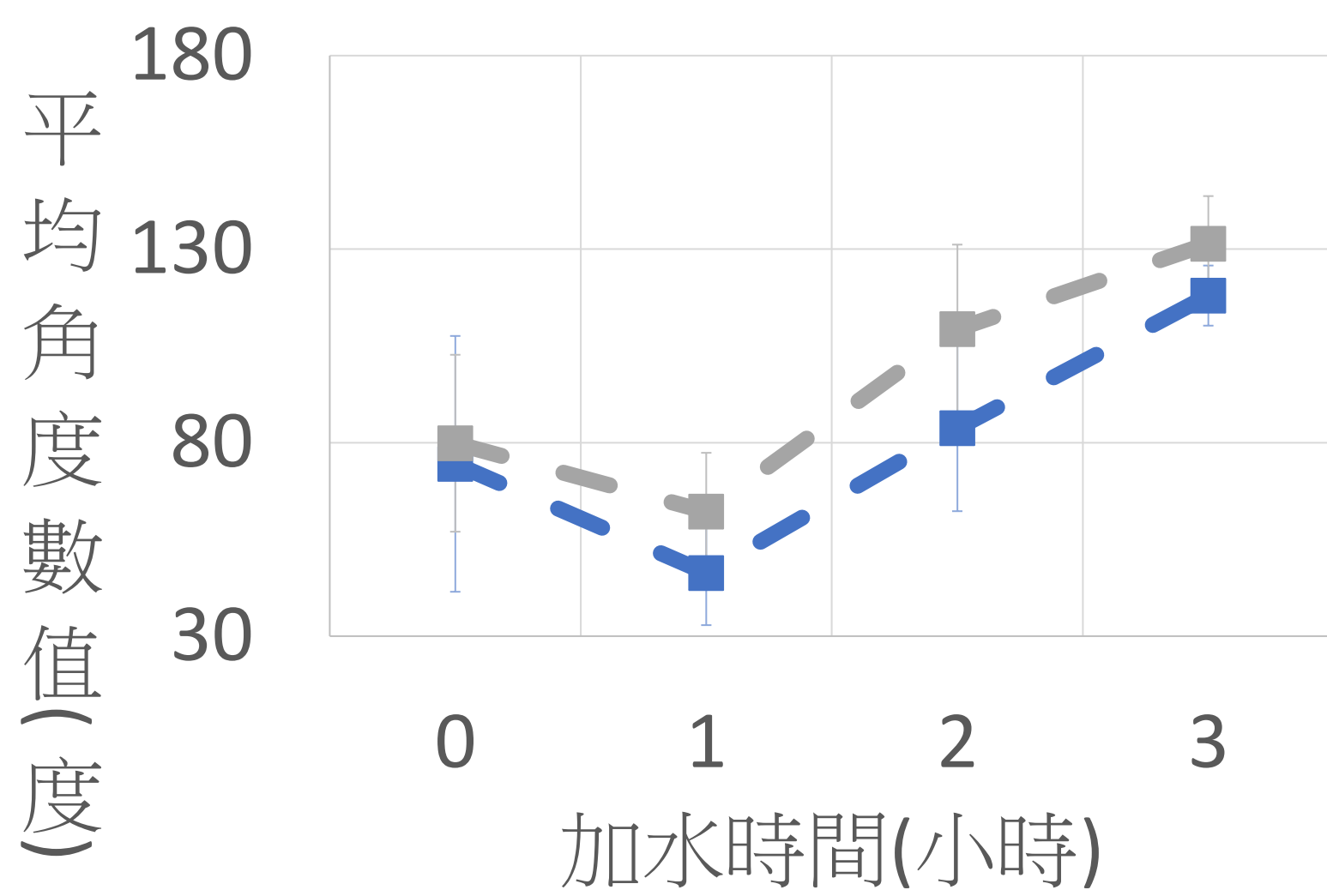
有皺紋葉片脫水



無皺紋葉片加水

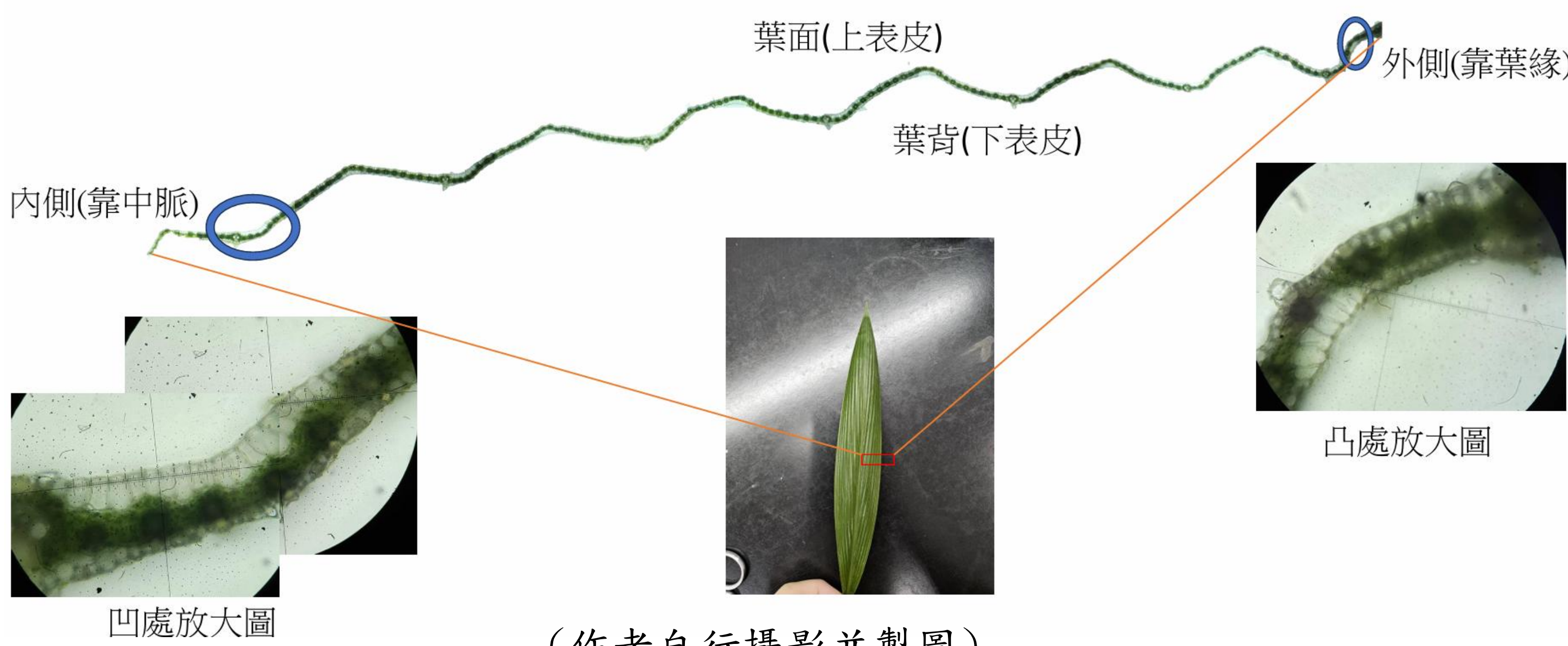


有皺紋葉片加水

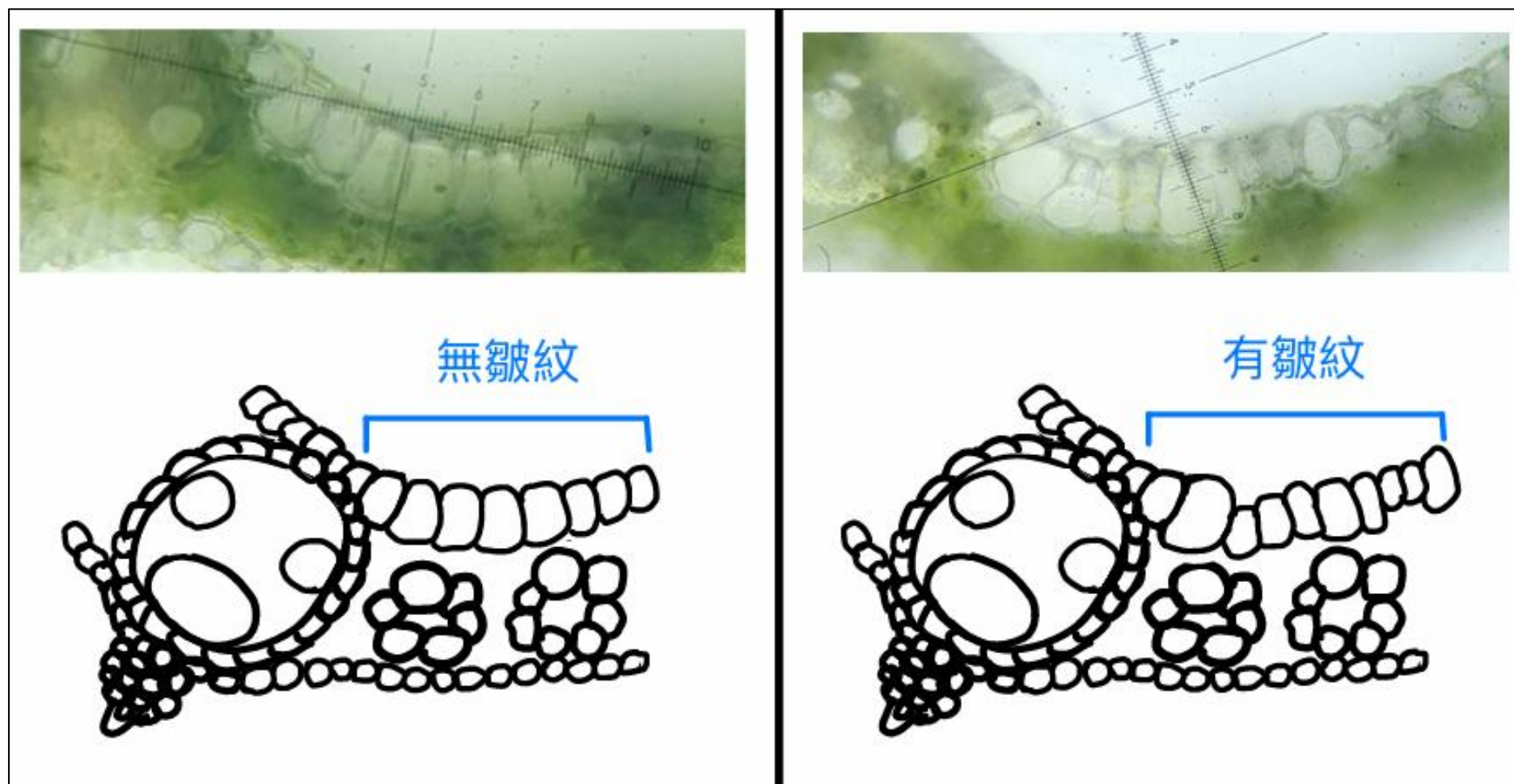


(以上皆為作者自行測量數據並製圖)

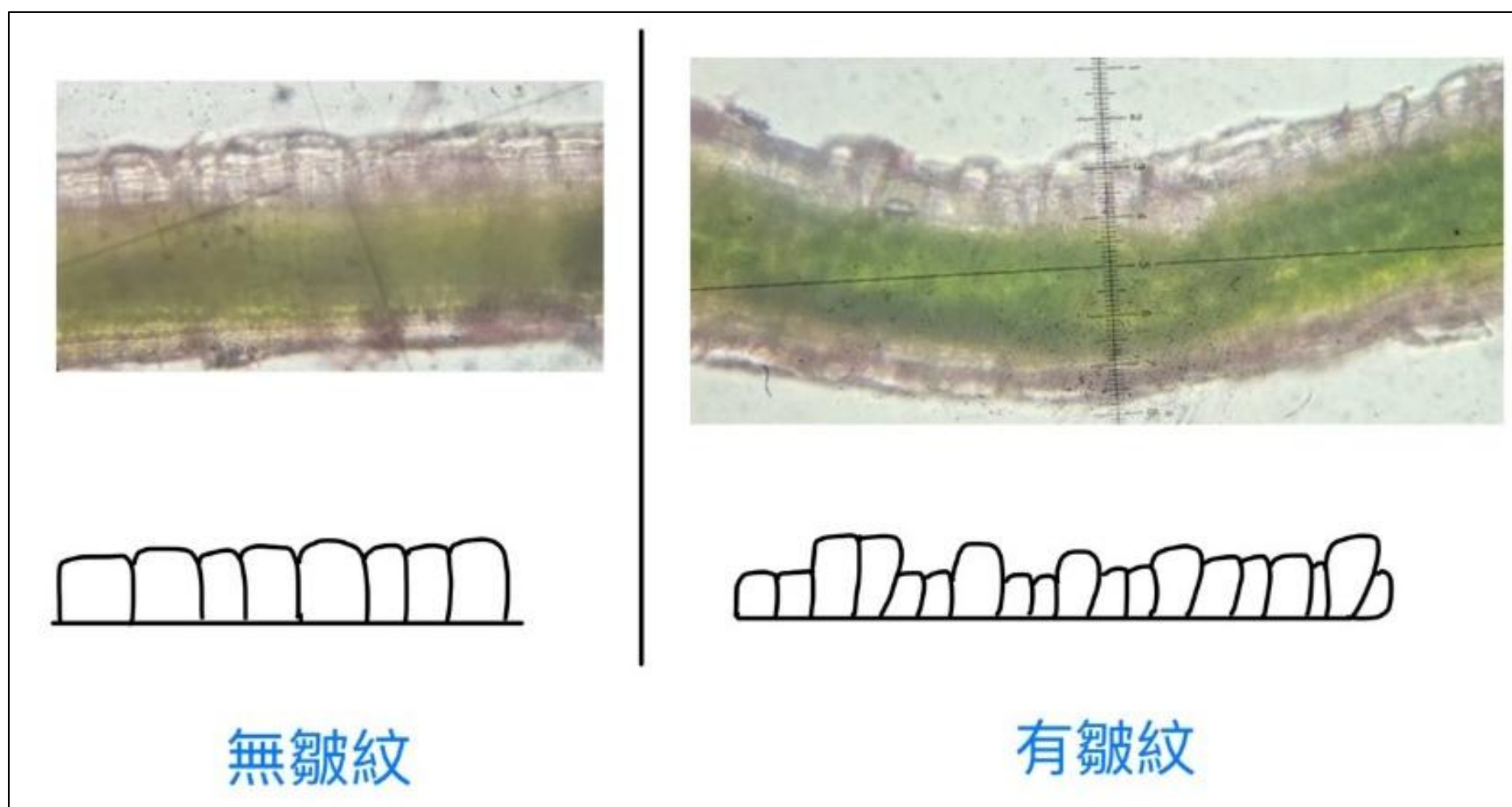
二、 葉片的橫切構造觀察



(作者自行攝影並製圖)



橫切面泡狀細胞之差異



縱切面泡狀細胞之差異

(以上皆為作者自行攝影與繪製)

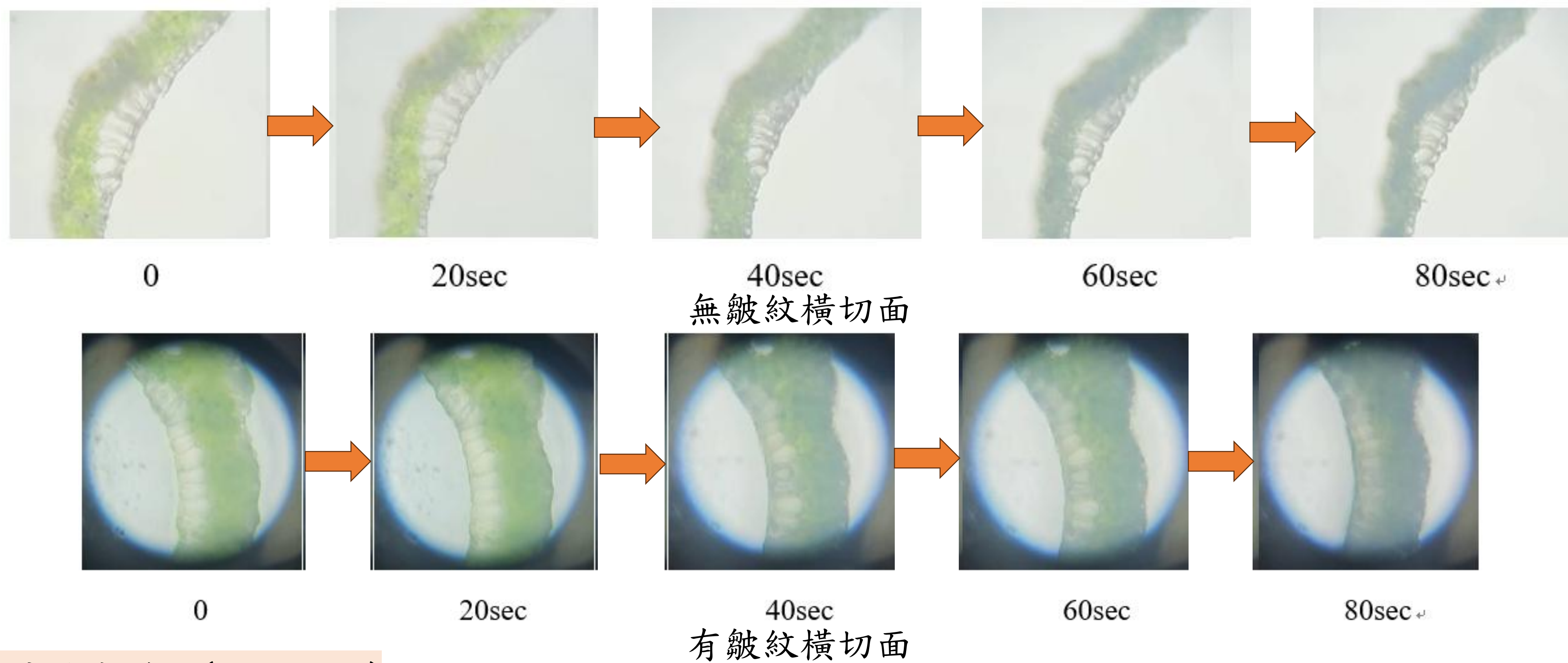
近中脈側

近葉緣側

(作者自行繪製)

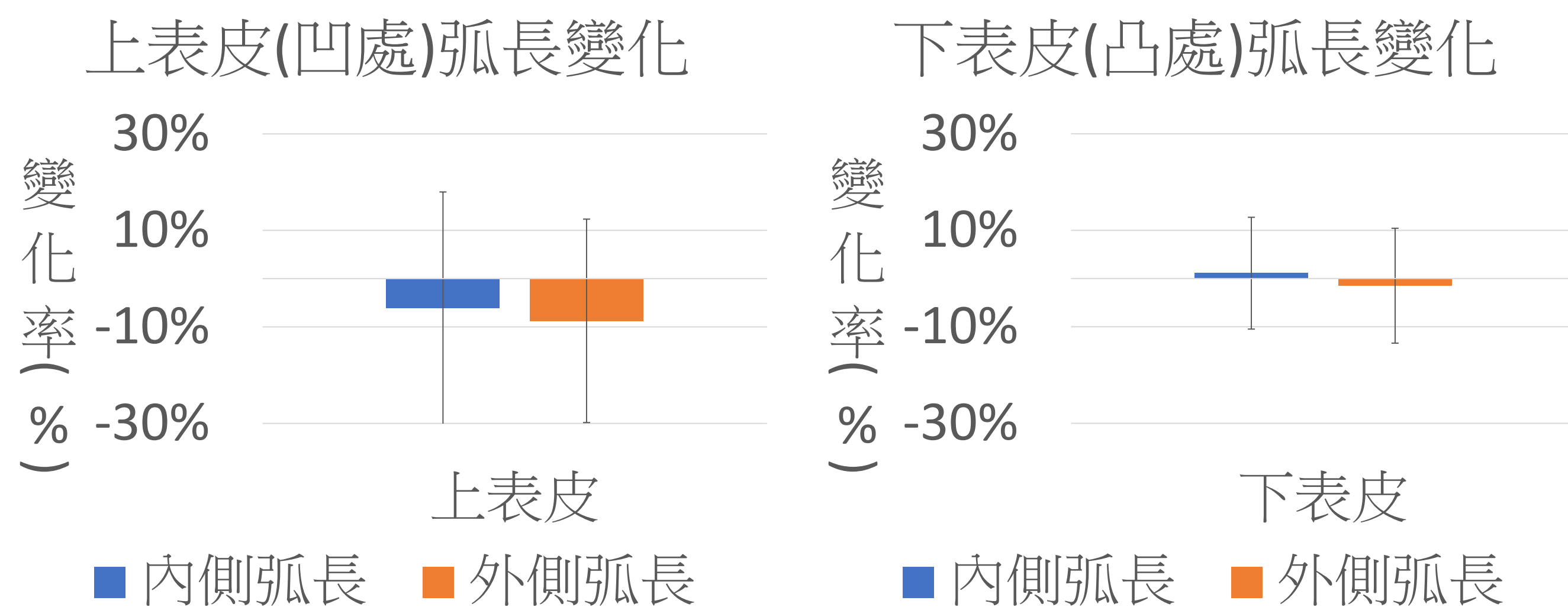
三、 脫水時上/下表皮泡狀細胞區的形變

脫水過程

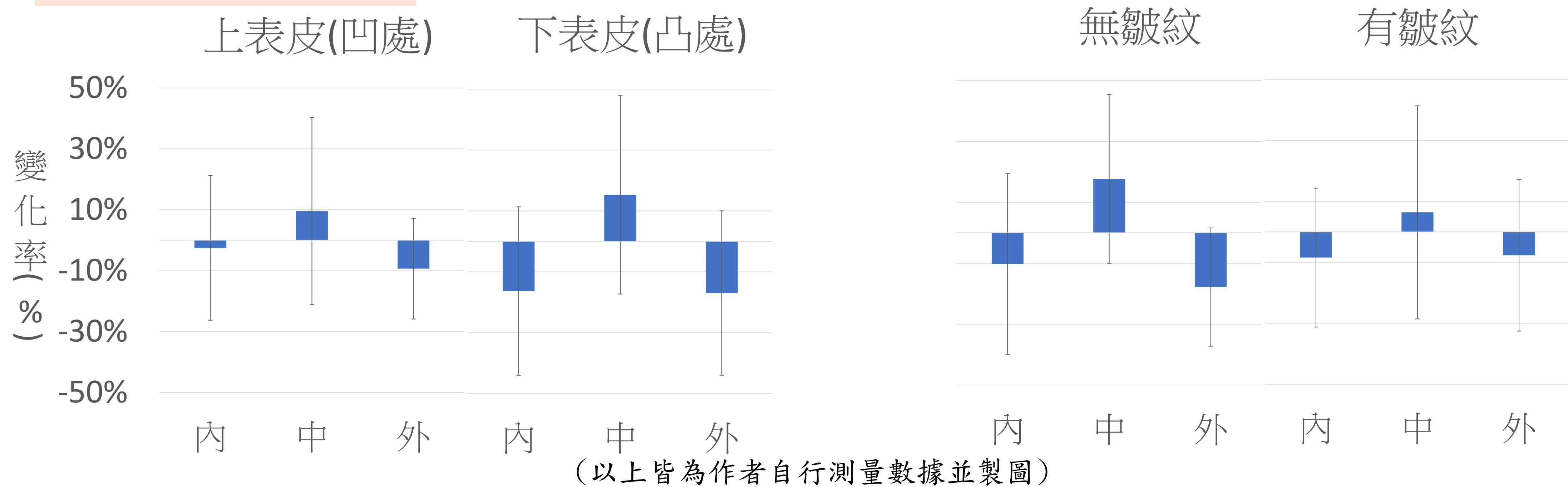


區域長度變化(脫水初期)

(以上皆為作者自行攝影並製圖)



細胞形態變化(脫水初期)



陸、 討論

- 一、 有皺紋的葉子在脫水的過程中雖然速度較慢，但縱摺角度變化較為穩定均勻，生長於步道旁遮光林下的颱風草更容易形成皺紋。我們推測林下光線較少，因此有皺紋的葉片更有助於支撐葉子的形狀，皺紋的功能與穩定葉片結構有關。
- 二、 下表皮(凸處)的泡狀細胞形變對稱；然而，上表皮(凹處)的相鄰兩側泡狀細胞表現不對稱。我們推測可能與上表皮(凹處)的泡狀細胞較靠近大維管束，具較多厚壁細胞，質地較硬，受其牽制而無法造成太多形變有關。
- 三、 上表皮(凹處)的內側與外側弧長均變短，外側弧長並不會變長，代表縱摺結構不會遭受破壞，具仿生意義。

柒、 結論



- 一、 颱風草葉脫水時會收合，加水後具有可恢復性。
- 二、 有皺紋葉子脫水收合與加水恢復速度皆較慢，但皺紋可使葉結構更穩定。
- 三、 凹處的上表皮近中脈側具有大維管束，脫水初期泡狀細胞形變與縱摺不對稱；凸處的下表皮泡狀細胞則反之。
- 四、 颱風草葉脫水時，葉身中央的葉緣處最先發生變化。脫水時，泡狀細胞形變，帶動葉肉組織一起往內凹摺，使得縱摺夾角變小，縱摺間距離逐漸縮短，葉子收合；加水時則反之。

捌、 參考資料

1. Suresh, S., Guo, K., Liu, M., Vella, D., & Hsia, K. J. (2024). Dehydration-induced corrugated folding in *Rhapis excelsa* plant leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(17).
2. 廖顯淳 (2014)。颱風草葉片皺摺與葉子對光環境的反應〔碩士論文，國立臺灣大學〕。華藝線上圖書館。黃文博(編)(2005)。南瀛植物探索。台南縣政府。
3. Hsu, C.C, W.C. Lin, C.-S. Kuoh, C.-H. Chen and H.-Y. Liu. 2000. Gramineae (Poaceae). pages 318-654 In: Huang, T.-C. and Editorial Committee of the Flora of Tarwan, eds. *Flora of Tarwan*. Vol. 5. 2nd ed. Department of Botany, National Taiwan University, Taipei, Taiwan: Editorial Committee of the Flora of Taiwan.
4. Fournier, M. (2018)。仿生高科技：源於自然的科技靈感(潘文柱譯)。楓樹林出版社。
5. Jane, W., & Tsai-Chiang, S. (1991)。Morphology and development of bulliform cells in *Arundo formosana* Hack. *Taiwania*, 36, 85–97。