

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科(二)

032903

Banana「波~內納」-運用非破壞性電阻抗法檢測超音波催化效果之研究

學校名稱： 臺北市立北政國民中學

作者： 國二 林芋浩 國二 鄭曉襄 國二 謝向淳	指導老師： 謝欣倫 謝志斌
---	-----------------------------

關鍵詞： 非破壞性電阻抗法、超音波、香蕉

作品名稱：Banana「波~內納」-運用非破壞性電阻抗法檢測超音波 催化效果之研究

摘要

本研究探討以電阻抗作為非破壞性檢測指標，評估芭蕉與香蕉的成熟度，並分析超音波對澱粉酶活性催化之影響。傳統品質分析多為破壞性，本實驗以 LCR 儀測量水果在不同成熟階段的等效電路的並聯電阻（ R_P ）、並聯電容（ C_P ）、串聯電阻（ R_S ）及總阻抗（ Z_{AB} ），比較在有無超音波發射下的變化。實驗結果顯示，隨成熟度提升， R_P 與 Z_{AB} 值穩定上升，超音波實驗組百分比上升幅度較大，推測其加速澱粉酶催化作用，促進成熟；芭蕉因果皮較薄，反應更顯著。本研究顯示超音波具催熟效果，電阻抗可作為成熟度評估依據，具智慧農業應用與自動化品質監控之潛力。團隊亦設計超音波催熟箱，供業界與家庭參考。

壹、前言(含研究動機、目的、文獻回顧)

一、研究動機

呼吸躍變型水果，果農常採用化學方式催熟，多少會影響果實營養成分，我們想用物理的超音波方式來做催熟，希望維持甚至有可能提升果實的營養價值。傳統的水果品質評定方法主要是化學分析法，需要耗費相當的化學試劑，檢測分析過程煩瑣，速度慢，而且檢測時必須破壞水果。如圖 1 所示研究指出水果甜度與其阻抗相關，我們選擇芭蕉及香蕉來做測試，用較精密之 LCR 測試儀器，可分別測出香蕉等效阻抗如圖 15 的 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} ，由於芭蕉及香蕉成熟之甜度會與澱粉酶催化有關，在國中生物學到植物澱粉與酵素觀念下，我們想證實超音波是否會影響芭蕉及香蕉果肉中澱粉酶的活性催化，因此我們對芭蕉及香蕉發射超音波，測試是否會影響芭蕉及香蕉的成熟度阻抗。

二、研究目的

傳統水果成熟檢測多為破壞性，為避免損傷水果，本實驗採用非破壞性電阻抗法檢測芭蕉及香蕉在有無超音波發射下，分析等效電路阻抗的變化情形。本研究目的有三：

- (一) 非破壞性電阻抗法採用銅箔檢測芭蕉及香蕉的成熟度運用，驗證阻抗變化是否如文獻所提(採用電極片檢測)，天數越多阻抗越大。
- (二) 進行有無超音波發射於芭蕉及香蕉的實驗，比較阻抗變化的百分比，來分析超音波是否有催化效果。
- (三) 開發超音波催熟水果新技術，未來應用於家庭與農產品產銷用，製作超音波催熟裝置。

三、文獻回顧

一、電阻抗譜 (EIS) 做非破壞性水果檢測(Marta et al.,2021[1])

在非破壞性檢測技術中，電阻抗譜 (EIS) 已被證實是可行的有效方法，可將測量的生物阻抗和水果物理化學變化之間做成聯繫。然而，由於缺乏精確的預測方法，無法在水果品質和成熟度和生物阻抗響應之間建立直接關係，因此生物阻抗分析在水果品質控制中的應用目前受到嚴重限制。(Marta et al.,2021[1])

※本研究的目標之一是建立一個香蕉成熟的創新式測試方法(運用銅箔優異的導電性取代圖 4 的傳統電極片)。

二、水果甜度與阻抗研究(Rahmondia et al., 2019[2])

在頻率為 100 Hz 左右時，0% 溶液中的阻抗約為 6 k Ω ，10% 溶液中的阻抗約為 8 k Ω ，19% 溶液中的阻抗約為 9.5 k Ω ，30% 溶液中的阻抗約為 12 k Ω 。濃度每增加 10%，阻抗就會增加 2 k Ω 。測量圖表如圖 1 所示。

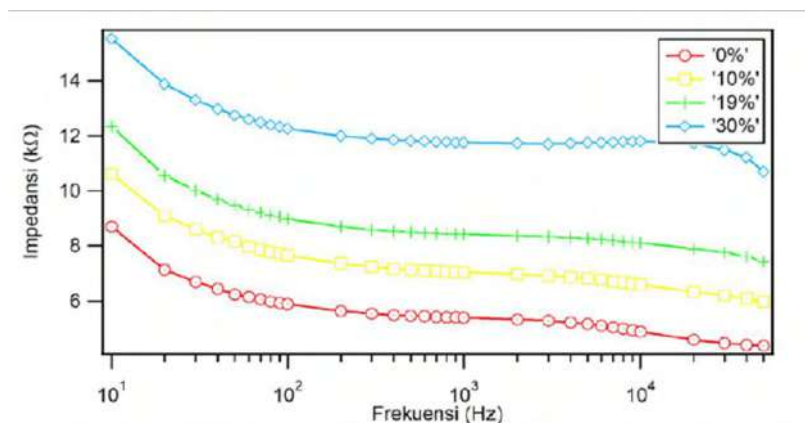


圖 1. 組成水果甜度的糖溶液的阻抗測量結果

資料來源：(Rahmondia et al., 2019[2]圖 4)

三、香蕉成熟過程中澱粉酶與纖維素酶活性變化幅度(Theji Mohan et al., 2014[3])

從表 1 可知在嫩果階段，澱粉酶的活性很低（ 4.8 ± 0.26 單位），在進入成熟期第 90 天（ 14.00 ± 0.86 單位）活性仍維持低水平，但當香蕉在 90 天後開始成熟時，澱粉酶的活性在第 92 天增加到約 10 倍（ 103.40 ± 8.20 單位），然後逐漸降低。在第 102 天活性（ 5.78 ± 0.37 單位）。



圖 2.香蕉從長出嫩果到成熟照片

圖來源(Theji Mohan et al., 2014[3])

表 1 香蕉澱粉酶活性來源(Theji Mohan et al., 2014[3])

樣本 編號	成熟度 (天數)	澱粉酶比活性 (單位)	樣本 編號	成熟度 (天數)	澱粉酶比活性 (單位)	樣本 編號	成熟度 (天數)	澱粉酶比活 性(單位)
1	10	4.8 ± 0.26	6	60	3.50 ± 0.15	11	94	$51.50 \pm 3.35^*$
2	20	2.90 ± 0.20	7	70	4.40 ± 0.26	12	96	$51.78 \pm 2.26^*$
3	30	1.46 ± 0.18	8	80	7.50 ± 0.28	13	98	$24.48 \pm 2.8^*$
4	40	1.38 ± 0.20	9	90	$14.00 \pm 0.86^*$	14	100	$12.67 \pm 1.30^*$
5	50	2.27 ± 0.21	10	92	$103.40 \pm 8.20^*$	15	102	5.78 ± 0.37

四、電阻抗譜法(EIS)檢測香蕉越成熟阻抗越高的研究文獻(Atanu Chowdhure et al., 2016[4])

(一)兩極式(a)與四極式(b)檢測法

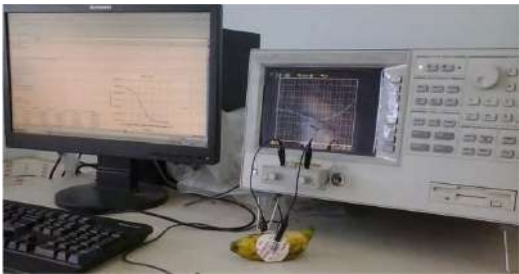
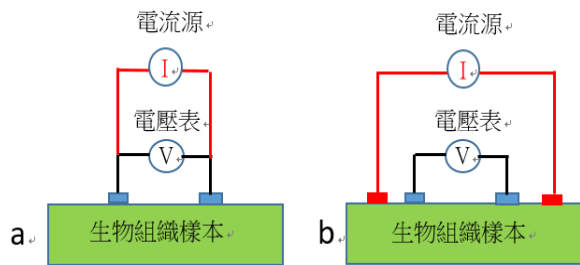


圖 3.電阻抗側接法圖式

圖來源(Atanu Chowdhure et al., 2016[4])
作者自行改繪成中文版本

圖 4.電阻抗側兩極式檢測照片

圖來源(Atanu Chowdhure et al., 2016[4])

(二) 電阻抗譜法(EIS)檢測香蕉阻抗曲線

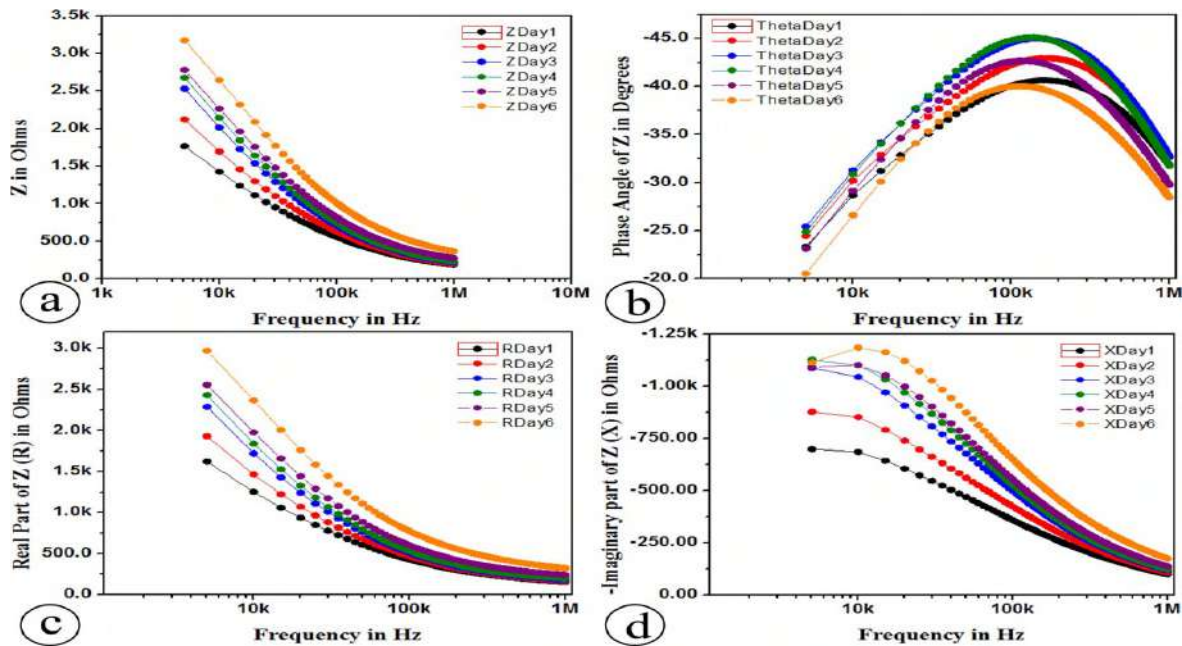


圖 5.香蕉 6 天測試阻抗曲線圖

圖來源(Atanu Chowdhure et al., 2016[4])

說明：a 圖是 Z 阻抗值(Ω)，b 圖是 Z 阻抗相位角度($^\circ$)，c 圖是 Z 阻抗實部 R 電阻值(Ω)，d 圖是 Z 阻抗虛部 X 電抗值(Ω)負值是表示電容特性阻抗

分析：此研究運用改變頻率(f)3kHz-1MHz 做測試，因為香蕉等效電路有電容特性，電容抗 $X_C = 1/2\pi fC$ ，頻率(f)越大電容抗 X_C 越小，如 d 圖所示。

從 a、c、d 圖中可知天數越多天是香蕉越成熟時候，其阻抗也越大，符合圖 1 結果。

五、超音波影響酵素反應的因素(Altab Khan et al., 2021[5])

(一) 超音波頻率

超音波的頻率是酵素反應的重要因素。超音波頻率對空化泡的破裂有直接影響。以最佳頻率對酵素進行超音波照射可以引起酵素蛋白質結構的構象變化，從而導致其活性發生變化。研究了超音波頻率對纖維素酶活性的影響，結果表明，短時間的低頻超音波會導致纖維素酶活性增加（De Carvalho Silvello et al., 2020）。研究人員觀察到，頻率為 18、20、24 和 26 kHz 時，固定化纖維素的催化活性分別增加了 6.6%、14.8%、17.8% 和 10.4%。因此，使用最佳頻率的超音波照射有助於改善結果（Xiao et al., 2011）。

(二) 超音波功率或強度

超音波強度是一個重要因素，在增強或抑制超音波對酵素活性的影響中起主要作用(孫等人的研究)。Wang 等(2019)進行了超音波強度對 β -d-葡萄糖苷酶催化活性影響的實驗，發現隨著超音波強度的增加，活性增加，最高可達 181.5 W/cm^2 。然而，在該研究中，作者發現酶活性在 181.5 W/cm^2 之後開始下降。（Subhedar et al., 2014）。

六、細胞膜電特性(Lea et al., [6])

電生理學家經常將細胞描述為等效電路，即電阻器和電容的組合。

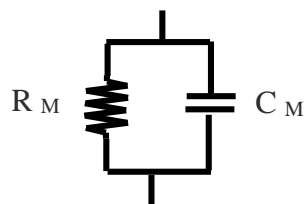


圖6. 細胞膜電特性等效電路(作者自行繪製)

(一) 膜電阻 R_M

細胞膜由雙層脂質層組成，將細胞外空間中的離子與細胞質中的離子和帶電蛋白質分開。雖然純脂質膜是極佳的電絕緣體，但真正的細胞膜由密集的蛋白質和脂質鑲嵌組成。許多這些蛋白質跨越膜並充當允許電荷通過的通道。這些蛋白質降低了膜的高

電阻，對電生理學有重大影響。假設我們想透過用電極注入電流來在細胞膜上施加電壓。根據歐姆定律，維持此電壓所需的電流由膜電阻決定：電壓 = 電阻 * 電流（或 $V = R * I$ ）。我們可以看到，膜電阻越高，維持給定膜電壓所需的電流越低。

(二) 膜電容 C_M

由於膜是分隔細胞內外相反電荷的電絕緣體，因此細胞膜不僅具有電阻，而且還具有膜電容。因此，要改變膜電壓，就必須對電容充電。施加的電荷 (Q) 除以膜電容 (C_M) 即可得出膜電壓 (V_m)： $V_m = Q / C_M$ 。我們可以看到，對於給定量的施加電荷，膜電容越小，膜電壓變化就越大。

(出處詳：參考文獻資料八)

貳、研究設備及器材

一、LCR (電感電容電阻)測試儀



圖7.LCR (電感電容電阻)測試儀(作者自行拍攝)

二、訊號產生器(發射超音波訊號給超音波喇叭)



圖8. 訊號產生器(作者自行拍攝)

三、超音波喇叭(發射超音波)



A. 正面(作者自行拍攝)



A. 背面(作者自行拍攝)

圖9. 超音波喇叭 X 4

參、研究過程或方法

一、研究流程

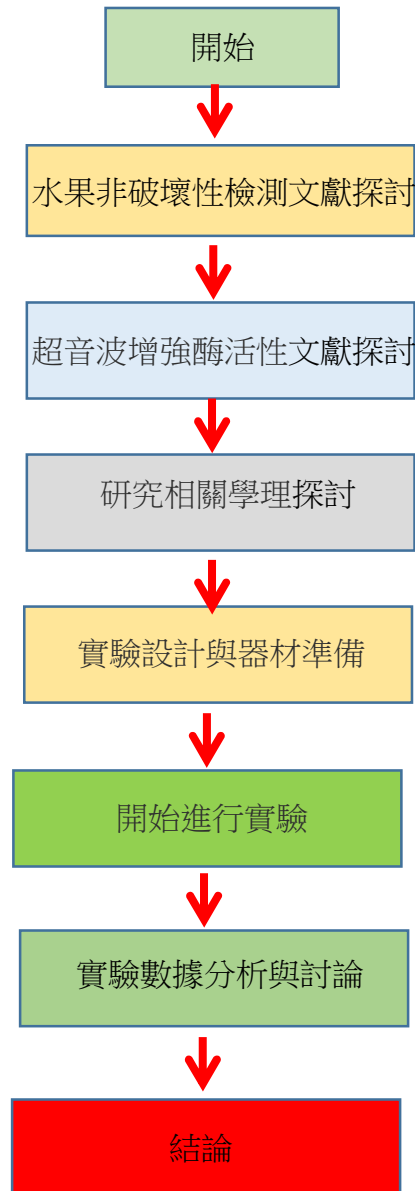


圖10. 研究流程圖(作者自行繪製)

二、研究原理

(一)電阻

電阻 (resistance) 是一個物體對於電流通過的阻礙能力，以方程式定義為：

$R = V/I$ 其中， R 為電阻， V 為物體兩端的電壓， I 為通過物體的電流。

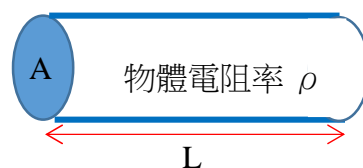



圖11. 圓柱長條物體圖(作者自行繪製)

$R = \rho L/A$ 其中， ρ 為電阻率， L 為物體兩端的長度， A 為物體截面積

本研究香蕉視為上圖之物體在銅箔包覆下 L 與 A 為定值，唯一會改變的是果肉果皮的電阻率，在成熟過程中 ρ 在改變，電阻也隨之改變。

電阻的電路符號繪製成 

(二)電容(C)

兩導電平行板 A 面積相距 d ，中間介質

ϵ 電容率

電容值 $C = \epsilon A/d$

電容抗 $= -jX_c = -j/(2\pi fC)$

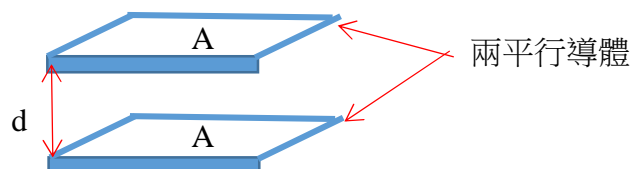


圖12. 電容結構圖(作者自行繪製)

(三)阻抗分析基礎觀念：電阻與電容並聯

電導 G 是電阻 R 倒數、電容納 B_c 是 X_c 電容抗倒數、及導納 Y 為阻抗 Z 的倒數

$$\begin{aligned}\bar{Y} = Y \angle \theta_Y &= \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_c} = \bar{G} + \bar{B}_c = G + jB_c \quad (\text{西門子, S}) \\ &= \sqrt{G^2 + B_c^2} \angle \tan^{-1} \frac{B_c}{G} \\ Y &= \sqrt{G^2 + B_c^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (2\pi fC)^2} \quad (\text{西門子, S})\end{aligned}$$

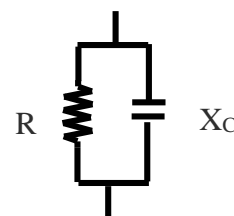


圖13. 電阻與電容抗並聯圖(作者自行繪製)

(上面式子取自台科大圖書出版的基本電學)

(四)水果的等效電路文獻(Pietro et al., 2020[7])

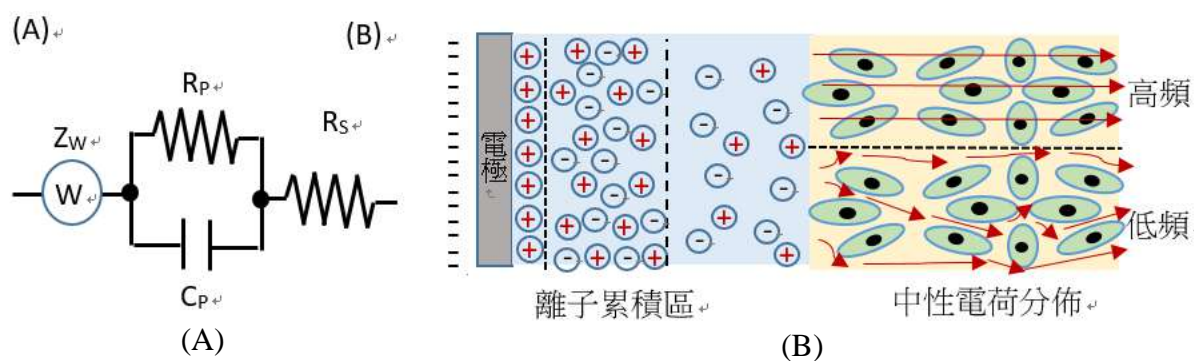


圖14.水果的等效電路與果肉離子分布
參考文獻[7]中之圖4(作者自行中文繪製)

圖 14.提出的等效電路模型（圖 A）和果實組織中的一般電流（圖 B）。左側表示感測器果實介面處的離子積累區域，而右側表示在高頻和低頻下中性電荷分佈區域中的電流流動。該電路的設計目的是提供阻抗數據的最佳擬合，同時最大限度地降低其複雜性（即元件數量），同時簡化阻抗輸出的生物學解釋。在電路中添加了電極元件，以類比水果表面和電極之間的介面。

(五)本研究等效電路(電極採用導電性極佳之銅箔所以忽略圖 14 之 ZW)

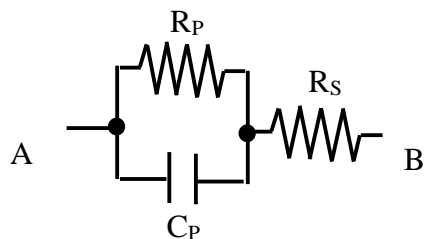


圖15. 本研究等效電路(作者自行繪製)

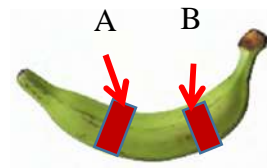


圖16. 香蕉測試電極設計示意圖(作者自行繪製)

$Z_{AB} = Z_P + R_S$, $Z_P = R_P (-jX_P) / (R_P - jX_P)$; Z_P 是電容 C_P 容抗 $-jX_P$ 與 R_P 並聯

三、實驗設計

從文獻[5]中知道超音波頻率 24kHz 催化效率較高，因此我們選用 24kHz 超音波做實驗，運用四顆超音波喇叭，喇叭距香蕉及芭蕉 10 公分發射 90dB 強度 24kHz 超音波，LCR 測試條件：DC1V，頻率 1kHz。

(一) 分兩組，第一組 A 蕉：對芭蕉及香蕉發射 24kHz 超音波，第二組 B 蕉：未發射超音波
做 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 測試，每天早上、中午、下午測試，

- 1.實驗 1：早上 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} (檢測頻率 1kHz)設定每秒記錄一次，每次紀錄 60 秒。
- 2.實驗 2：中午 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} (檢測頻率 1kHz)設定每秒記錄一次，每次紀錄 60 秒。
- 3.實驗 3：下午 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} (檢測頻率 1kHz)設定每秒記錄一次，每次紀錄 60 秒。

四、實驗步驟(以芭蕉為例)

(一) 芭蕉中取固定間距(4 公分)貼一圈 1.5 公分寬銅箔 (二)焊接兩銅箔電極測試導線



圖17. 芭蕉測試電極照片
(作者自行拍攝)



圖18. 芭蕉測試電極和測試導線照片
(作者自行拍攝)

(三)LCR 測試儀器可設定測 R_P 及 R_S



圖 19. LCR 設定測 R_P 及 R_S 照片
(作者自行拍攝)

(四)LCR 測試儀器可設定測 Z 及 C_P



圖 20. LCR 設定測 Z 及 C_P 照片
(作者自行拍攝)

(五)LCR 測試夾夾上 AB 兩電極

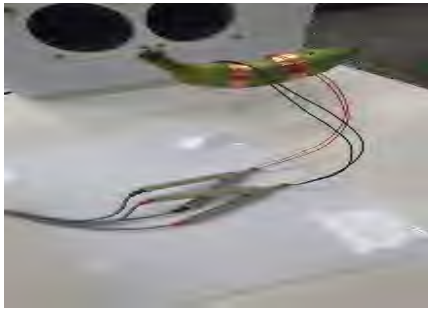


圖 21.夾上 AB 兩電極照片
(作者自行拍攝)

(六)LCR 測試儀器 USB 電腦連線測試設定

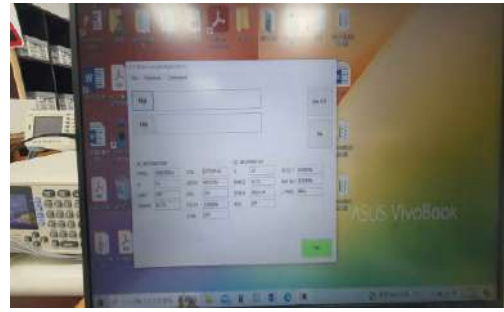


圖 22. LCR 測試電腦連線測試設定照片
(作者自行拍攝)

(七)24kHz 超音波測試 (A 芭蕉)

1.訊號產生器設定 24kHz 訊號



圖 23. 訊號產生器測試訊號照片
(作者自行拍攝)

2.驅動訊號接上超音波喇叭



圖 24. 驅動訊號接上超音波喇叭照片
(作者自行拍攝)

3. 選擇芭蕉距超音波喇叭約 10 公分(約 90dB)



圖 25. 芭蕉距超音波喇叭約 10 公分照片
(作者自行拍攝)

4.AB 電極接上 LCR 測試夾

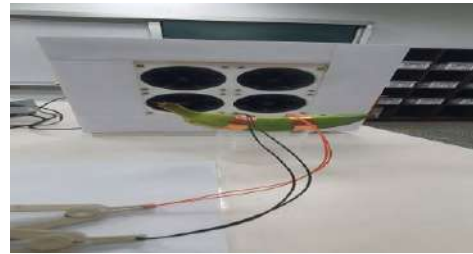


圖 26.測試夾夾上 AB 兩電極照片
(作者自行拍攝)

5.LCR 與電腦做連線測試



圖27. .LCR 與電腦做連線測試照片(作者自行拍攝)

(八)無超音波測試 (B 芭蕉)

1.AB 電極接上 LCR 測試夾

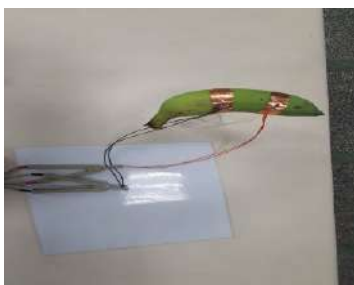


圖 28 . AB 電極接上測試夾照片
(作者自行拍攝)

2.LCR 與電腦做連線測試



圖 29. LCR 與電腦做連線測試照片
(作者自行拍攝)

肆、研究結果

一、第一次芭蕉實驗(溫度在 25°C-23°C 濕度 50-60%)

(一) 10 月 4 日-9 日 6 天實驗，發射 24kHz 超音波為芭蕉 A，未發射超音波為芭蕉 B













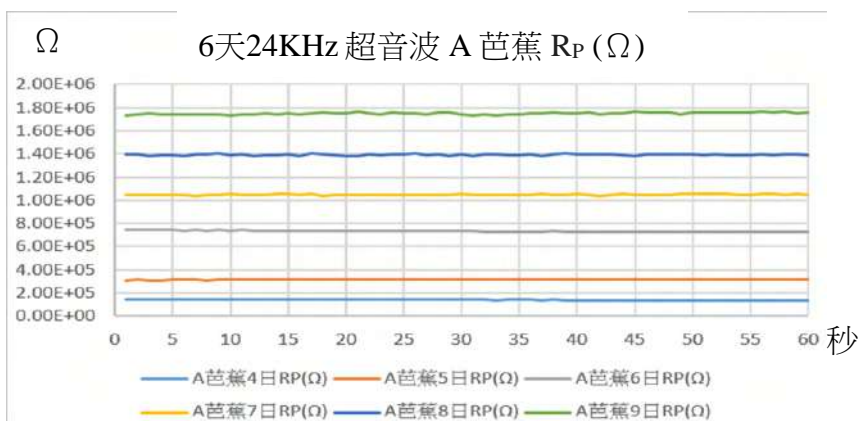
A 第一天 	A 第二天 	A 第三天 	A 第四天 	A 第五天 	A 第六天 
B 第一天 	B 第二天 	B 第三天 	B 第四天 	B 第五天 	B 第六天 

圖30. 10月4日-9日6天實驗芭蕉 A 及 B 照片(作者自行拍攝)

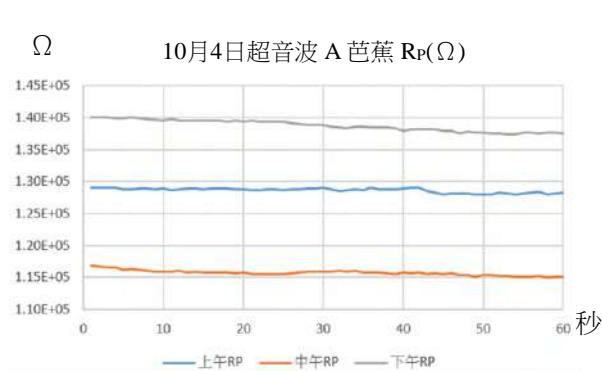
有發射超音波的芭蕉 A 在第五天開始變黃，比未發射超音波的芭蕉 B 早一天變黃。

(二)發射超音波 A 芭蕉 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 測試，10 月 4 日-9 日實驗 1 至實驗 3(60 秒測試)

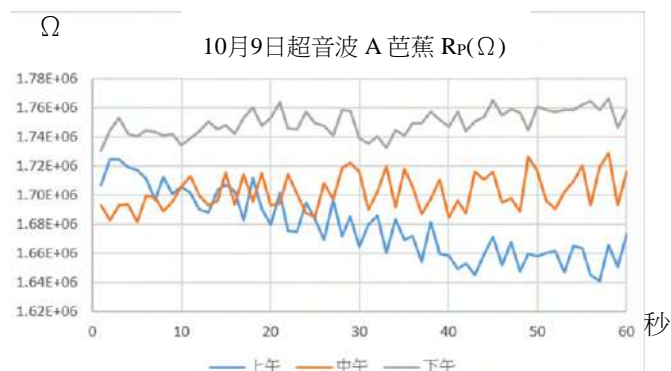
1. R_P



分析： R_P 電阻值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日(越成熟甜度增加電阻值也增加)



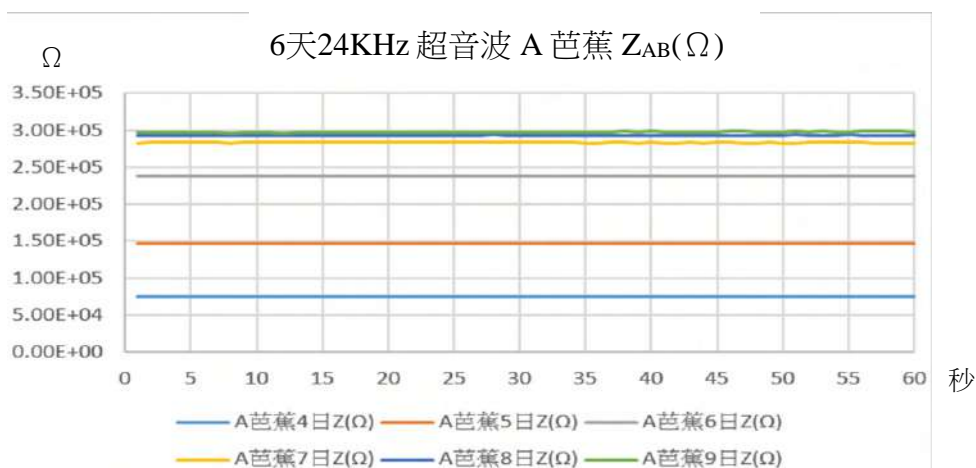
曲線1 R_P -A-2(第一天)



曲線1 R_P -A-3 (第六天)

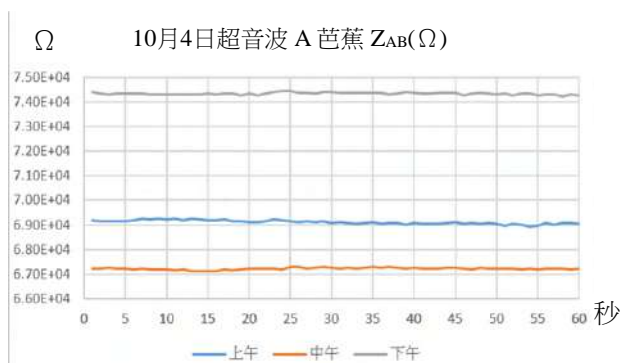
分析：第一天($10^5 \Omega$)與最後一天($10^6 \Omega$) R_P 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

2. Z_{AB}

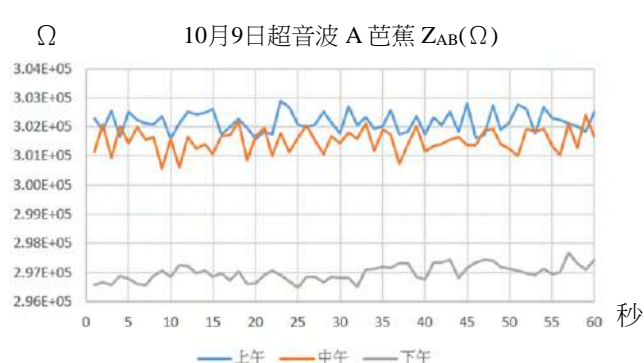


曲線1 Z_{AB} -A-1

分析： Z_{AB} 阻抗值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日(越成熟甜度增加阻抗值也增加)



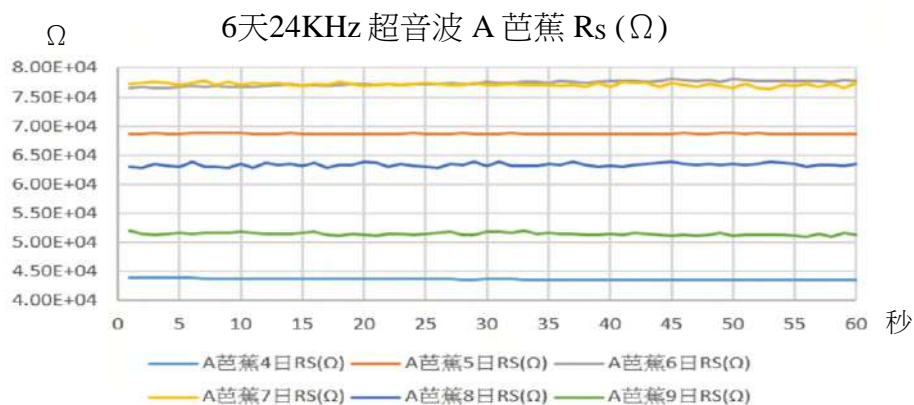
曲線1 Z_{AB} -A-2(第一天)



曲線1 Z_{AB} -A-3(第六天)

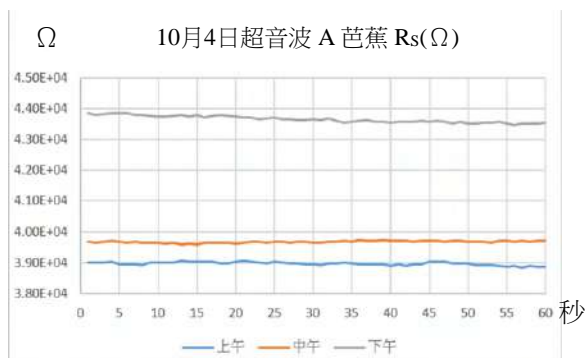
分析：第一天($10^4 \Omega$)與最後一天($10^5 \Omega$) Z_{AB} 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

3. R_s

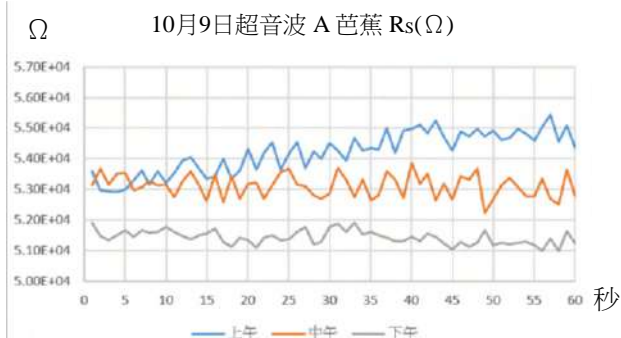


曲線1 R_s -A-1

分析： R_s 電阻值：7日 > 6日 > 5日 > 8日 > 9日 > 4日



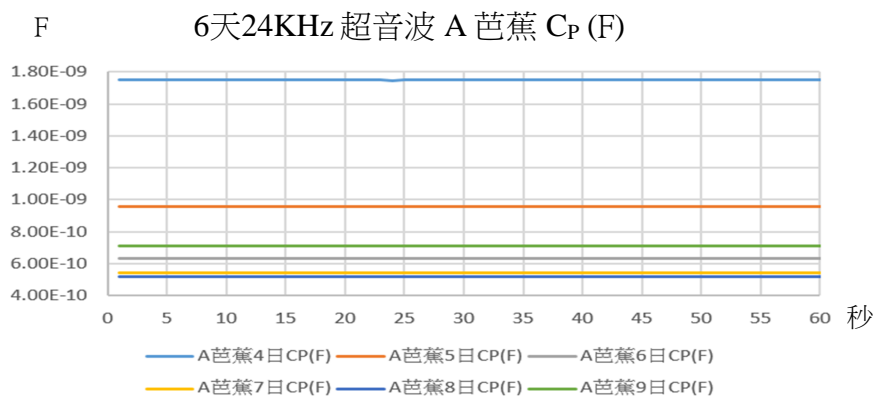
曲線1 R_s -A-2(第一天)



曲線1 R_s -A-3(第六天)

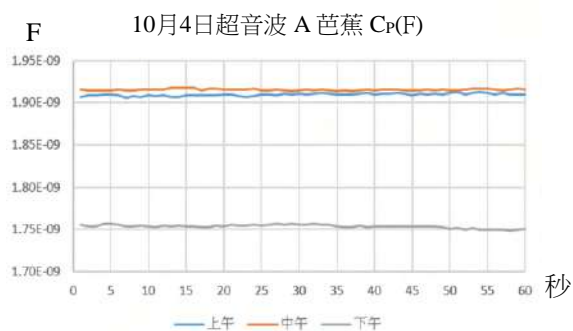
分析：第一天($10^4 \Omega$)與最後一天($10^4 \Omega$) R_s 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

4. C_p

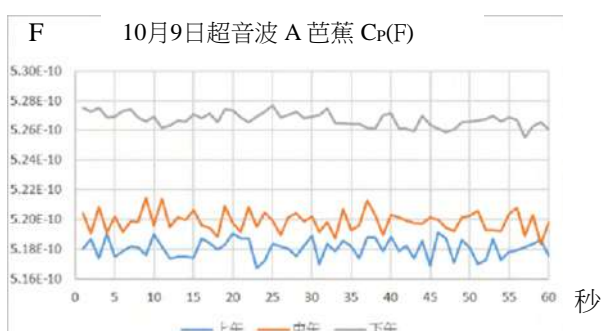


曲線1 C_p -A-1

分析： C_p 電阻值：4日 > 5日 > 9日 > 6日 > 7日 > 8日(越成熟細胞膜改變電容值下降)



曲線1Cp -A-2(第一天)



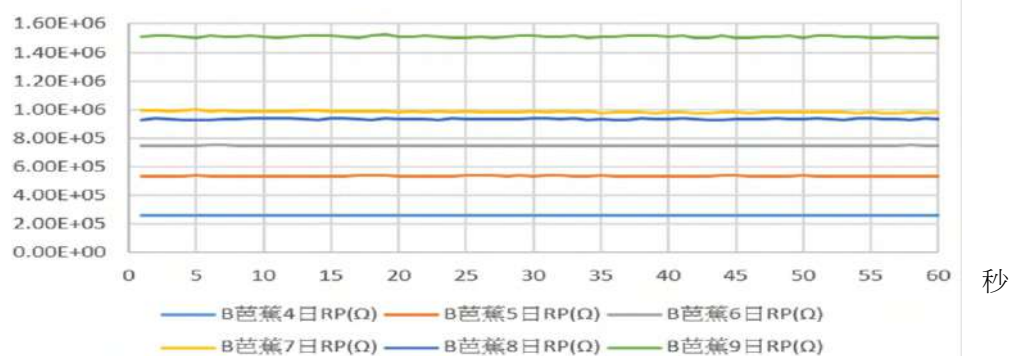
曲線1Cp -A-3(第六天)

分析：第一天(10^{-9} F)與最後一天(10^{-10} F)Cp曲線較不容易看出變化值差異

(三)未發射超音波 B 芭蕉 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 測試，10月4日-9日實驗4至實驗6(60秒測試)

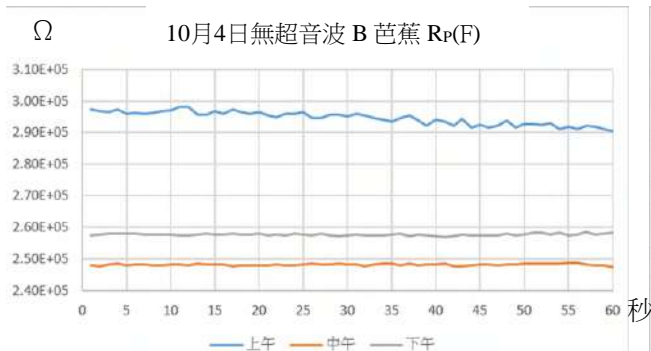
1. R_P

Ω 6天24KHz 無超音波 B 芭蕉 R_P (F)



曲線1Rp-B-1

分析： R_P 電阻值：9日 > 7日 > 8日 > 6日 > 5日 > 4日，8日與7日電阻接近



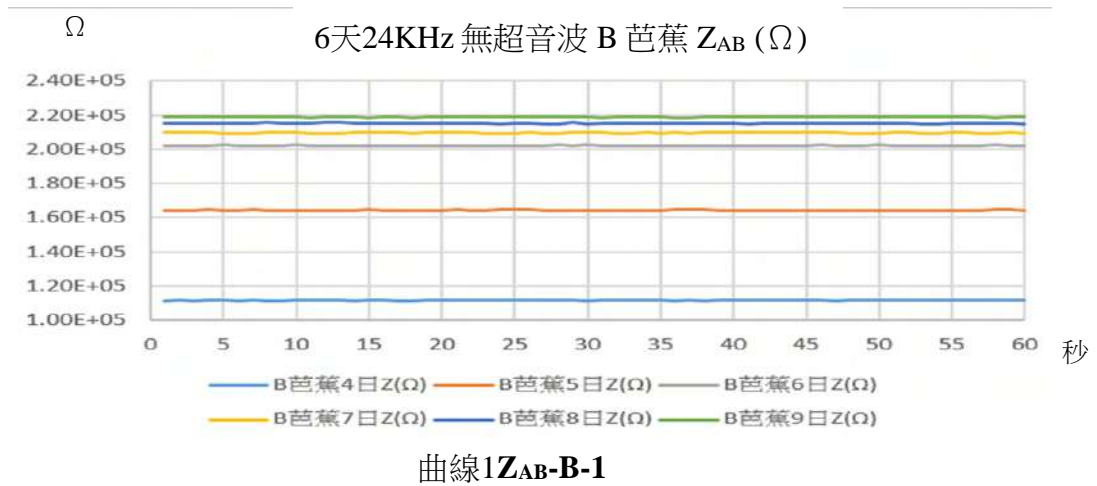
曲線1Rp-B-2(第一天)



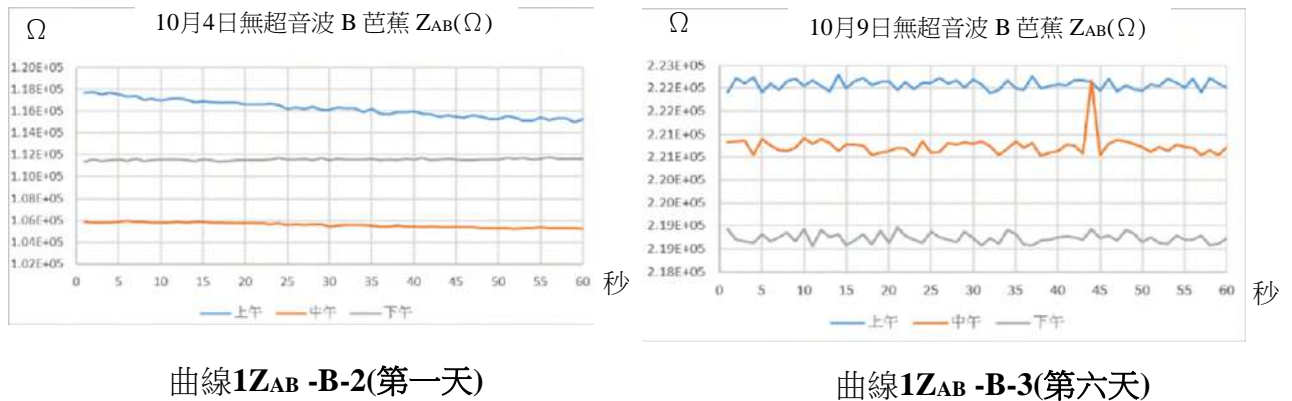
曲線1Rp-B-3(第六天)

分析：第一天($10^5 \Omega$)與最後一天($10^6 \Omega$) R_P 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

2. Z_{AB}

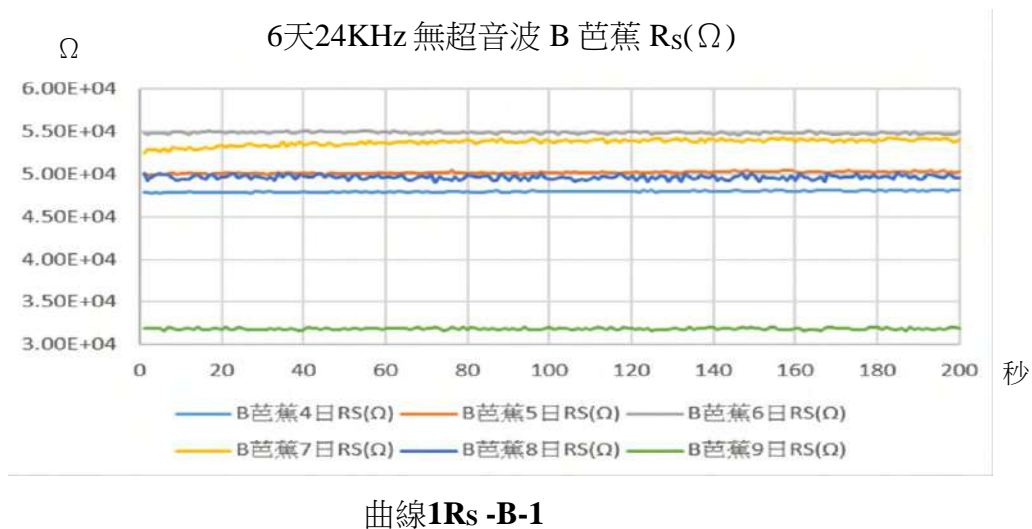


分析： Z_{AB} 阻抗值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日，9日與8日電阻值接近

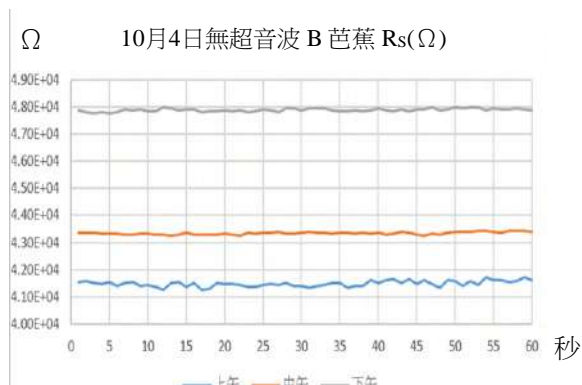


分析：第一天($10^5 \Omega$)與最後一天($10^5 \Omega$) Z_{AB} 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

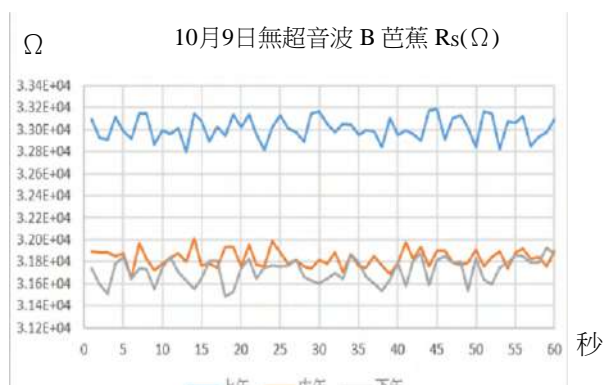
3. R_s



分析： R_s 電阻值：6日 > 7日 > 5日 > 8日 > 4日 > 9日，5日與8日電阻值接近



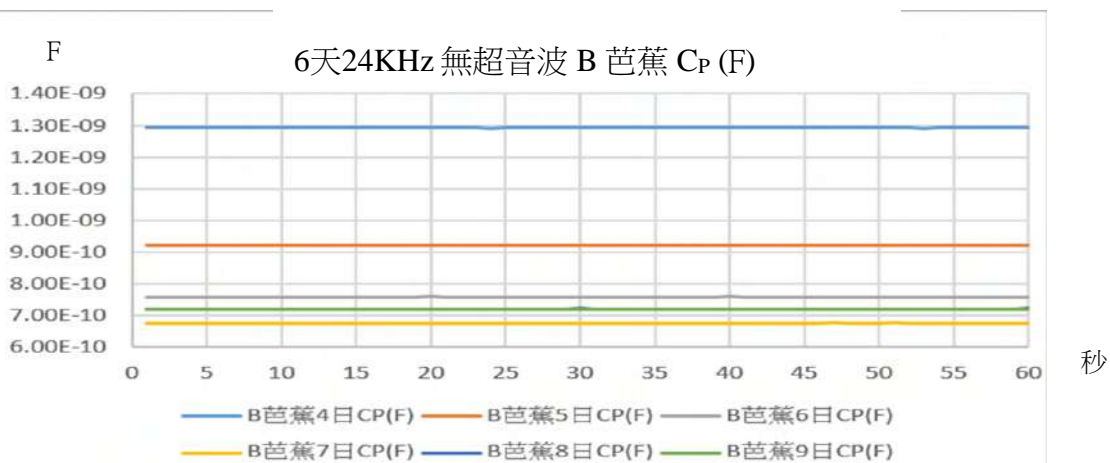
曲線1Rs -B-2(第一天)



曲線1Rs -B-3(第六天)

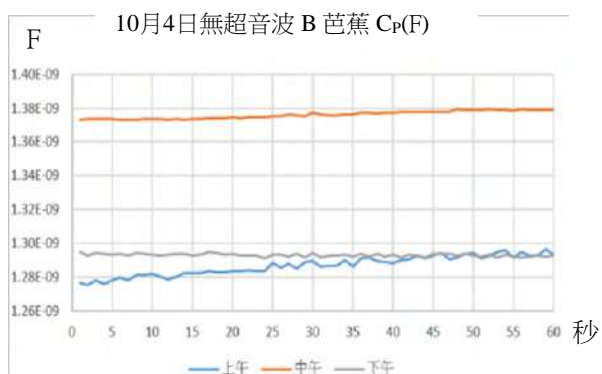
分析：第一天($10^4 \Omega$)與最後一天($10^4 \Omega$)Rs 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

4. Cp

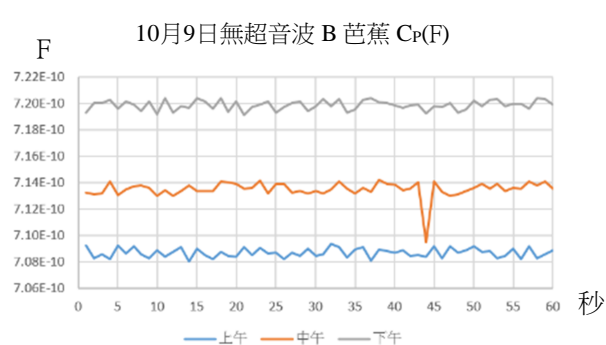


曲線1Cp -B-1

分析：CP 電容值：4 日 > 5 日 > 6 日 > 8 日 趨近 9 日 > 7 日，8 日 與 9 日線幾乎重疊



曲線1Cp -B-2(第一天)



曲線1Cp -B-3(第六天)

分析：第一天($10^{-9}F$)與最後一天($10^{-10}F$)Cp 曲線較不容易看出變化值差異

(四)發射超音波 A 芭蕉與未發射超音波 B 芭蕉 10 月 4 日-9 日 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 60 秒平均值均值

表2

20241004 芭蕉實驗分析(60 秒平均值)

日期時間 順序	$R_P(\Omega)$		$R_S(\Omega)$		$Z_{AB}(\Omega)$		$C_P(PF)$		備註
	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	
11	127341	289370	38804	41665	68941	114129	1913	1303	10/4 上午
12	114991	247147	39618	43425	66947	104967	1921	1382	10/4 中午
13	131202	258530	42787	47986	74138	111409	1754	1295	10/4 下午
21	255446	486025	63742	48397	126241	153708	1092	982	10/5 上午
22	281737	516693	64917	49485	135351	159738	1031	947	10/5 中午
23	311144	535159	68691	50192	146504	164247	959	922	10/5 下午
31	627860	758487	76919	51990	223324	199081	669	773	10/6 上午
32	661312	753479	78499	53822	226404	200297	658	764	10/6 中午
33	728902	750304	77616	54874	238294	202309	631	757	10/6 下午
41	947709	840510	74272	52342	265516	209601	575	735	10/7 上午
42	1011536	949037	77267	53812	277818	226212	550	682	10/7 中午
43	1050684	974778	77007	53770	283347	228978	541	675	10/7 下午
51	1211662	847580	68612	52458	291278	210891	531	731	10/8 上午
52	1398092	904207	62419	50501	293371	214211	529	722	10/8 中午
53	1414367	934007	62810	49648	300624	215138	518	720	10/8 下午
61	1660848	1496125	54810	33001	302046	222060	518	709	10/9 上午
62	1718818	1527521	52739	31840	301583	220655	520	714	10/9 中午
63	1761056	1509634	51165	31725	298055	218743	525	720	10/9 下午

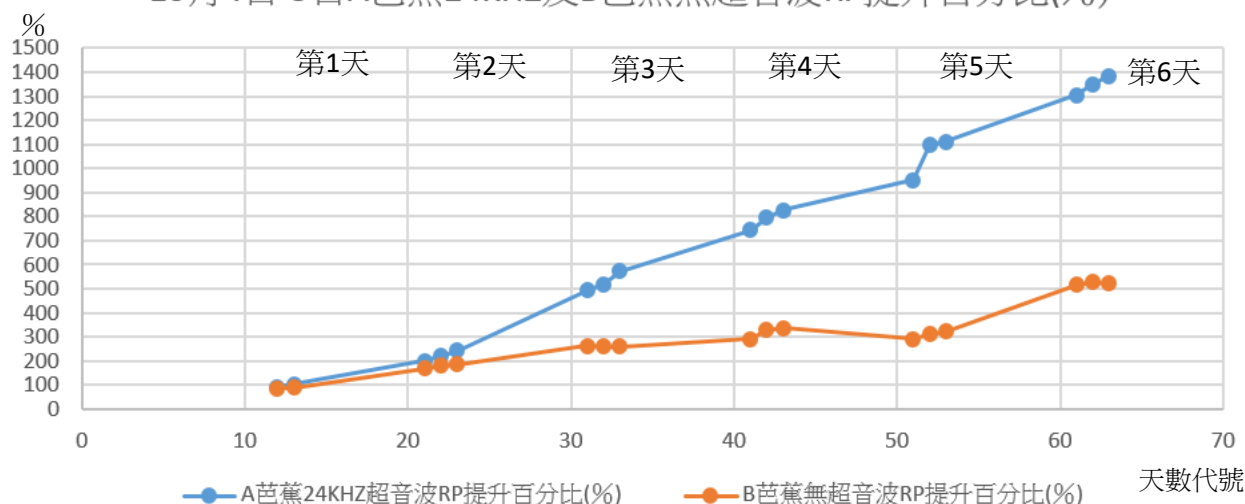
(五)發射超音波 A 芭蕉與未發射超音波 B 芭蕉 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 值，以 4 日上午為基準值
做百分比分析(大於 100%為提升小於 100%為衰減)

表 3.

20241004 芭蕉實驗分析(60 秒平均值提升百分比)

日期時間 順序	$R_P(\%)$		$R_S(\%)$		$Z_{AB}(\%)$		$C_P(\%)$		備註
	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	
11	100	100	100	100	100	100	100	100	10/4 上午
12	90.3	85.4	102	104	97.1	91.9	100.4	106	10/4 中午
13	103	89.3	110	115	107.5	97.6	91.7	99.4	10/4 下午
21	200	168	164	116	183	134.6	57	75.3	10/5 上午
22	221	179	167	119	196	140	53.9	72.6	10/5 中午
23	244	185	177	120	212.5	144	50.1	70.7	10/5 下午
31	493	262	198	125	323.9	174	35	59.3	10/6 上午
32	519	260	202	129	328	175.5	34.4	58.6	10/6 中午
33	572	259	200	132	345.6	177	33	58	10/6 下午
41	744	290	191	126	385	183.6	30	56.4	10/7 上午
42	794	327	199	129	402	198	28.7	52.3	10/7 中午
43	825	337	198	129	411	201	28.2	51.6	10/7 下午
51	951	292	177	126	423	185	27.7	56.1	10/8 上午
52	1098	312	161	121	425	188	27.6	55.4	10/8 中午
53	1110	323	162	119	436	189	26.7	55.2	10/8 下午
61	1304	517	141	79	438	195	27	54.4	10/9 上午
62	1350	528	136	76.4	437	193	27.2	54.8	10/9 中午
63	1383	522	132	76.1	432	192	27.4	55.2	10/9 下午

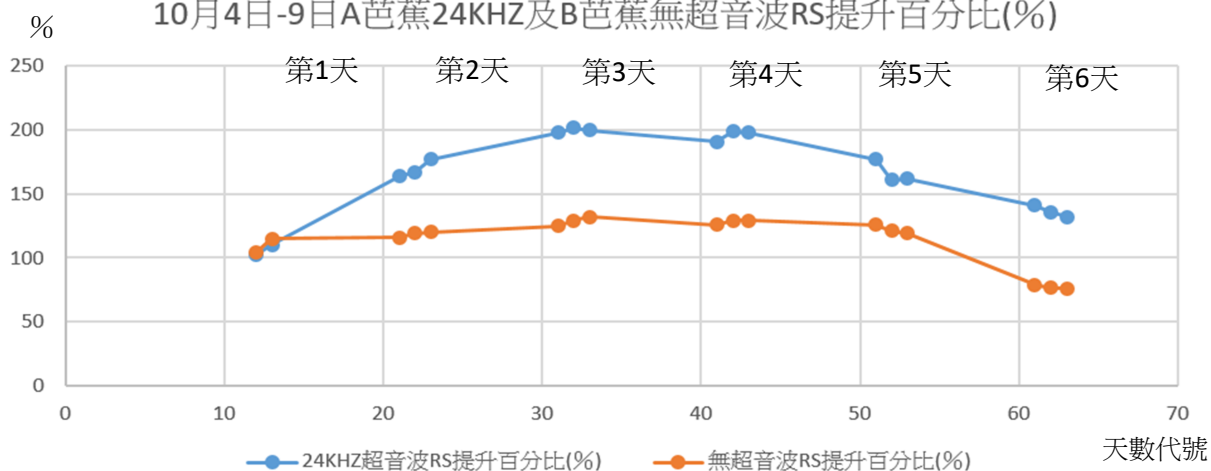
10月4日-9日A芭蕉24KHZ及B芭蕉無超音波RP提升百分比(%)



曲線1AB-R_P-1

分析：R_P 電阻值變化百分比 A 芭蕉高於 B 芭蕉 (超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值)。

10月4日-9日A芭蕉24KHZ及B芭蕉無超音波RS提升百分比(%)



曲線1AB-R_S-1

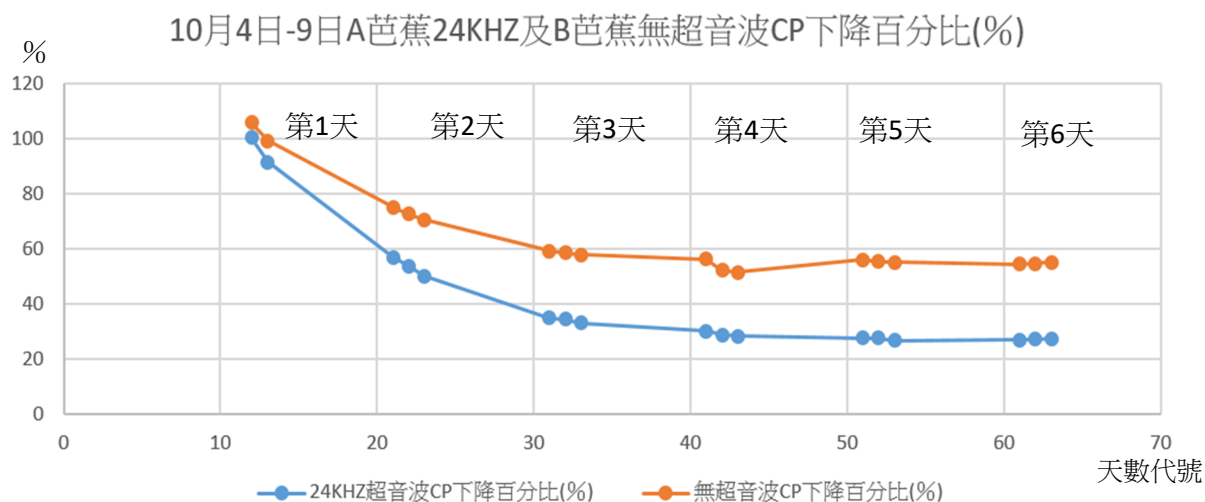
分析：R_S 電阻值變化百分比 A 芭蕉高於 B 芭蕉 (超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值)

10月4日-9日 A 芭蕉24KHz 及 B 芭蕉無超音波 Z_{AB} 提升百分比(%)



曲線1AB-Z_{AB}-1

分析：Z_{AB} 阻抗值變化百分比 A 芭蕉高於 B 芭蕉 (超音波提升澱粉酶活性增加甜度及阻抗值)。



曲線1AB-CP-1

分析：C_p 電容值變化百分比 A 芭蕉低於 B 芭蕉 (推估是超音波能量讓細胞膜通透性改變較大造成)。

二、第二次香蕉實驗(因為天氣冷香蕉成熟較慢) 溫度 17-18°C 濕度 50-60%

(一) 1月18日-25日8天實驗，發射 24kHz 超音波為香蕉 A，未發射超音波為香蕉 B

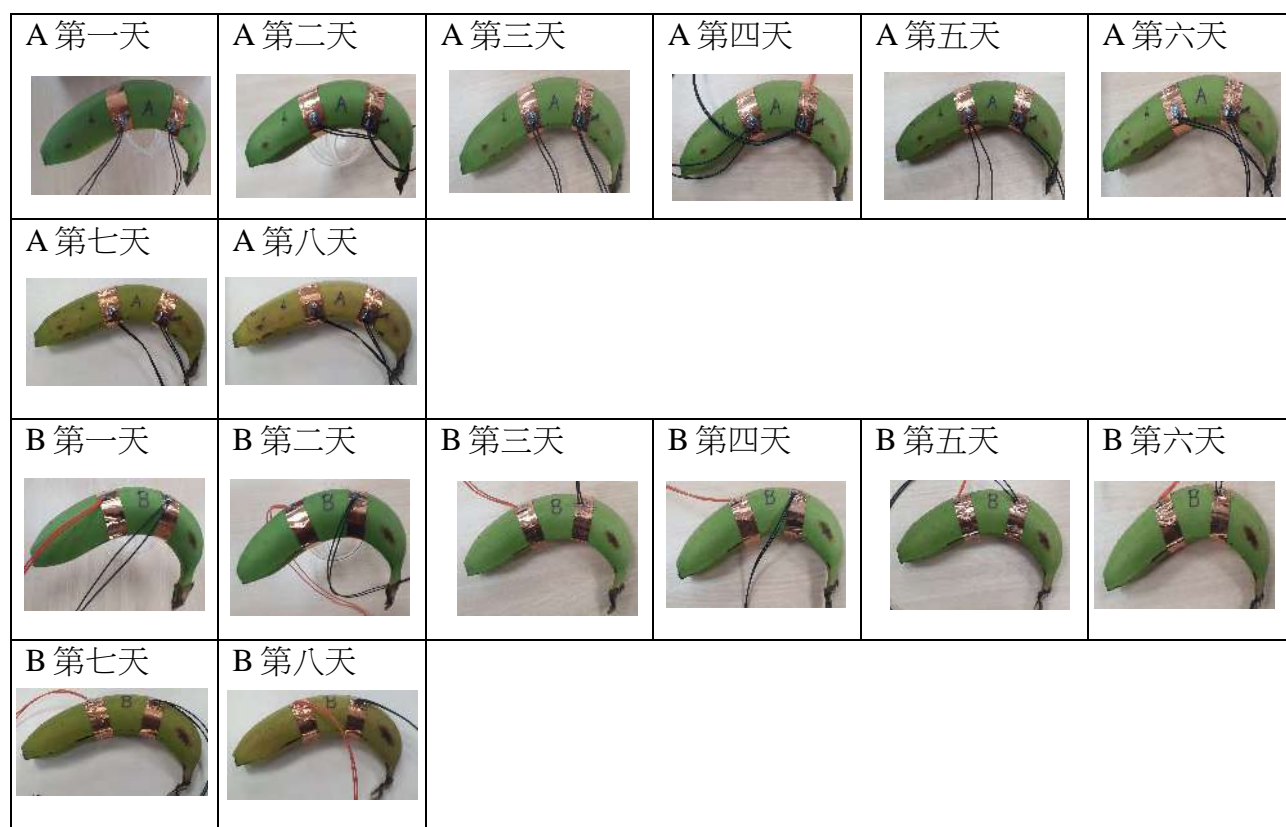
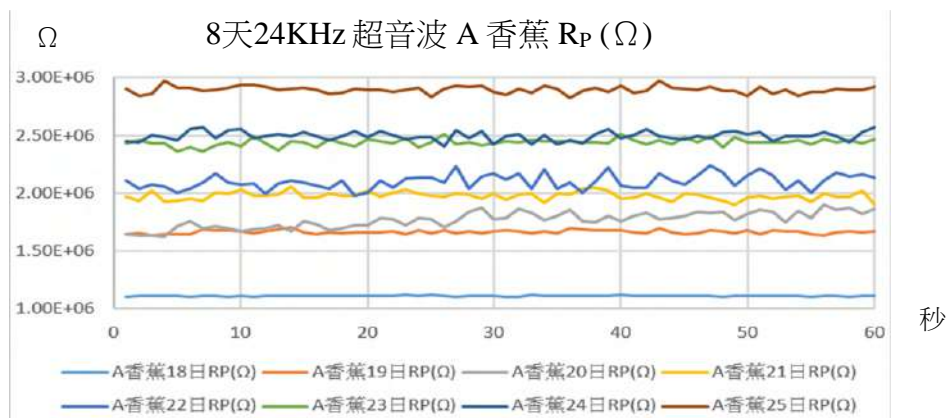


圖31. 1月18日-25日8天實驗香蕉 A 及香蕉 B 照片(作者自行拍攝)

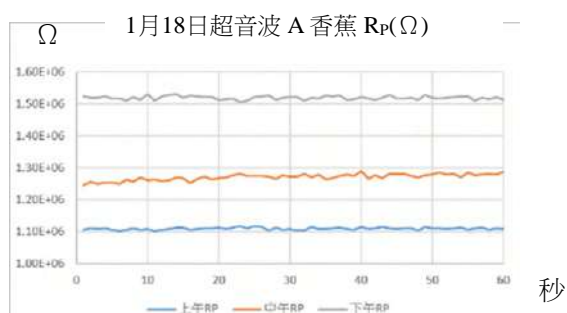
(二)發射超音波 A 香蕉 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 測試，1月18日-25日實驗1至實驗3(60秒測試)

1. R_P

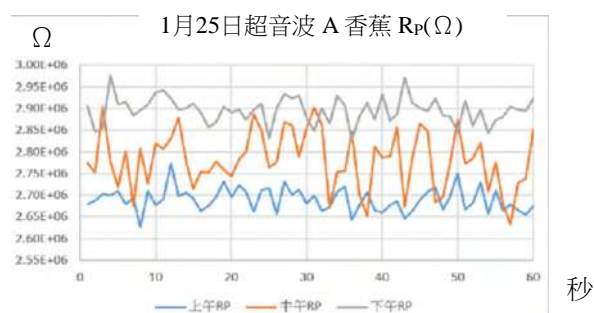


曲線2 R_P -A-1

分析： R_P 電阻值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日(24日近23日)



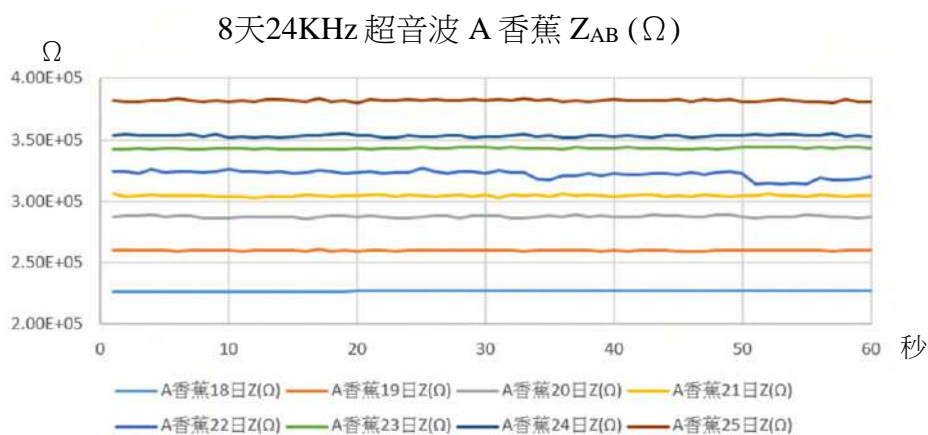
曲線2 R_P -A-2(第一天)



曲線2 R_P -A-3(第八天)

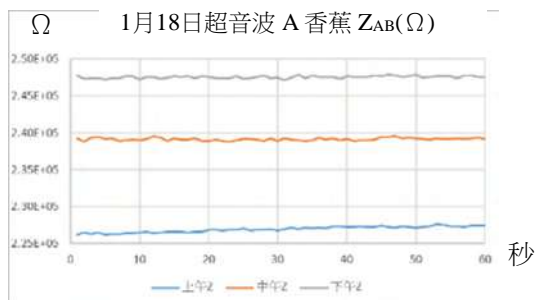
分析：第一天($10^6 \Omega$)與最後一天($10^6 \Omega$) R_P 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

2. Z_{AB}

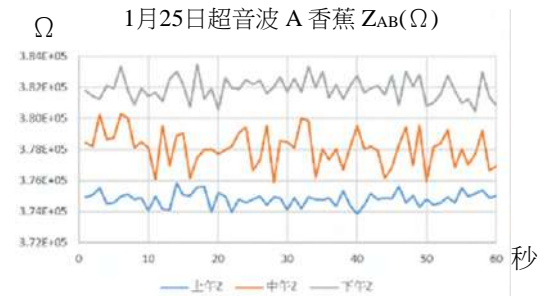


曲線2 Z_{AB} -A-1

分析： Z_{AB} 阻抗值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日



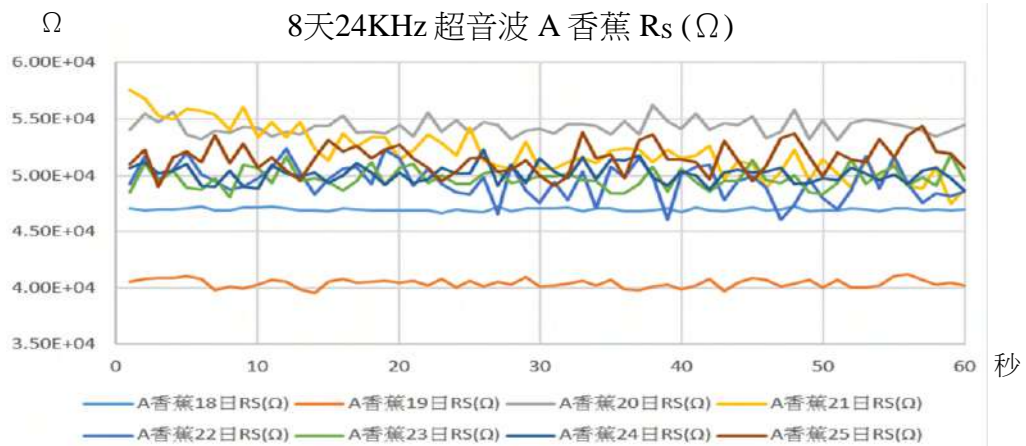
曲線2 Z_{AB} A-2(第一天)



曲線2 Z_{AB} -A-3(第八天)

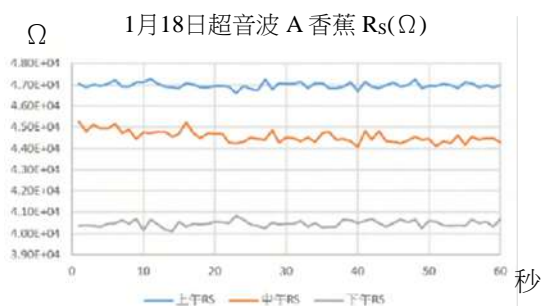
分析：第一天($10^5 \Omega$)與最後一天($10^5 \Omega$)Z_{AB}曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗差異

3. R_s

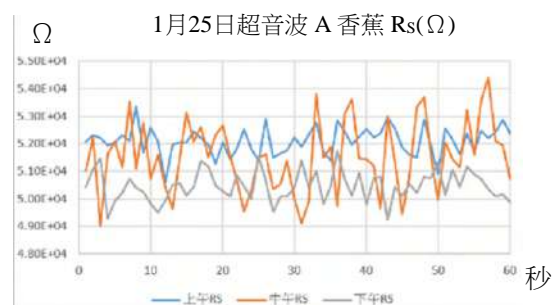


曲線2 R_s-A-1

分析：R_s 電阻值：20日 > 21日 > 25日 > 24日 > 23日 趨近22日 > 18日 > 19日



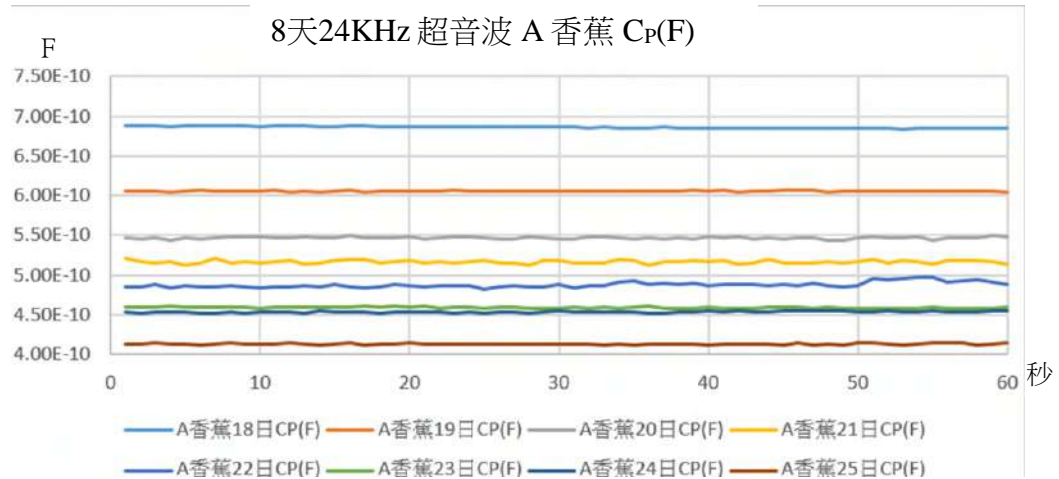
曲線2 R_s-A-2(第一天)



曲線2 R_s-A-3(第八天)

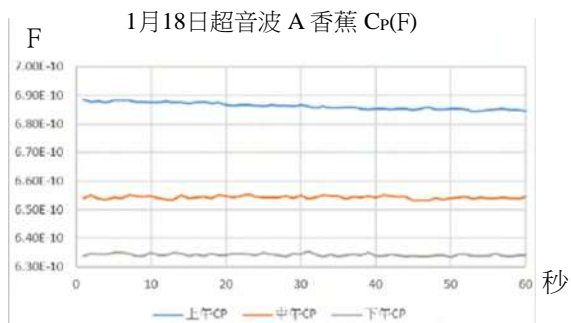
分析：第一天($10^4 \Omega$)與最後一天($10^4 \Omega$)R_s曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

4. C_P

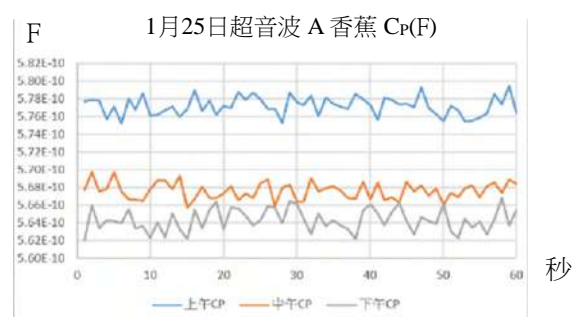


曲線2 C_P -A-1

分析： C_P 電容值：18日 > 19日 > 20日 > 21日 > 22日 > 23日 > 24日 > 25日



曲線2 C_P -A-2(第一天)

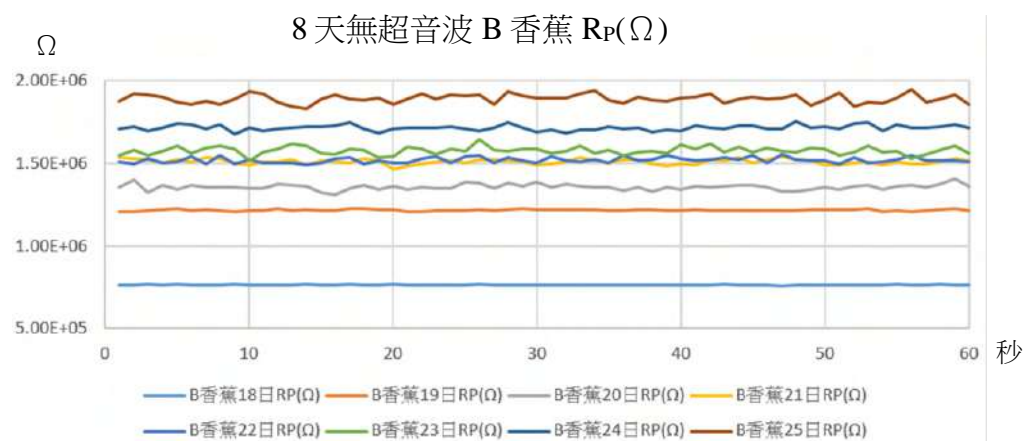


曲線2 C_P -A-3(第八天)

分析：第一天($10^{-10}F$)與最後一天($10^{-10}F$) C_P 曲線可看出電容量的變化值差異

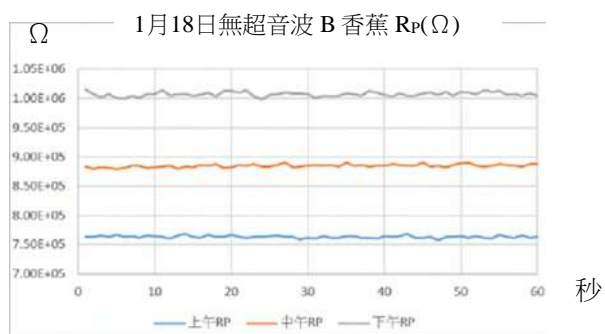
(三)未發射超音波 B 香蕉 R_P 、 C_P 、 R_S 及 Z_{AB} 測試，10月4日-9日實驗4至實驗6(60秒測試)

1. R_P

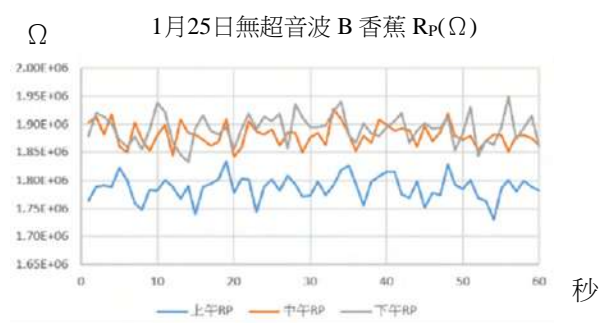


曲線2 R_P -B-1

分析： R_P 電阻值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日，22日 近 21日



曲線2 R_P -B-2(第一天)

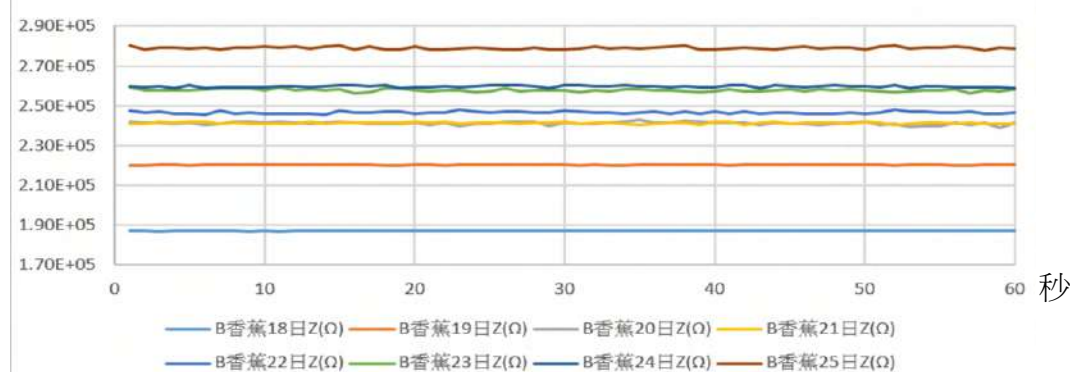


曲線2 R_P -B-3(第八天)

分析：第一天($10^6 \Omega$)與最後一天($10^6 \Omega$) R_P 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

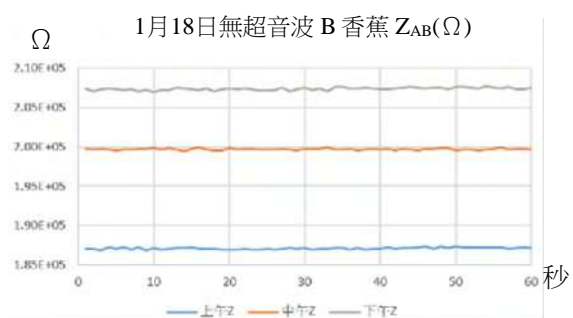
2. Z_{AB}

8 天無超音波 B 香蕉 $Z_{AB}(\Omega)$



曲線2 Z_{AB} -B-1

分析： Z_{AB} 阻抗值：25 日 > 24 日 > 23 日 > 22 日 > 21 日 > 20 日 > 19 日 > 18 日



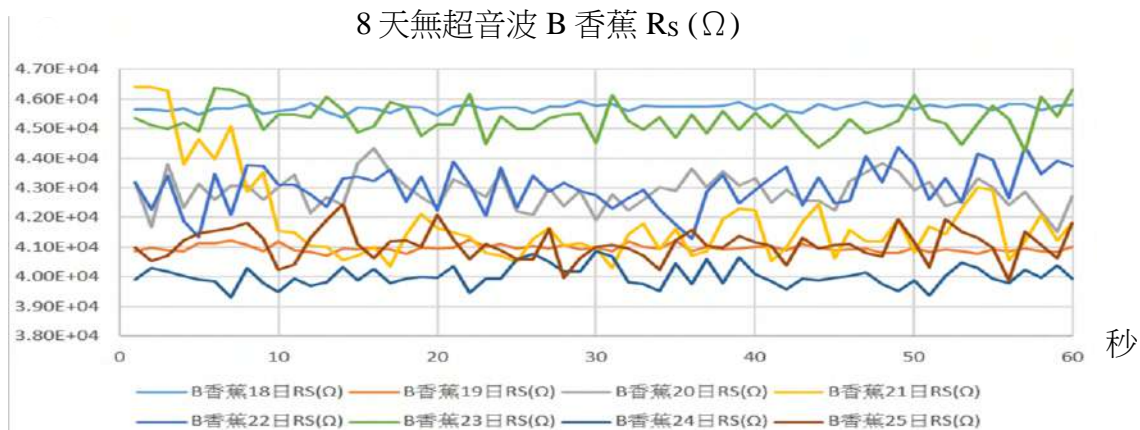
曲線2 Z_{AB} -B-2(第一天)



曲線2 Z_{AB} -B-3(第八天)

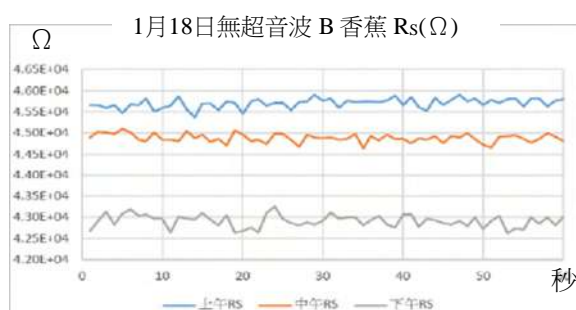
分析：第一天($10^5 \Omega$)與最後一天($10^5 \Omega$) Z_{AB} 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差

3. R_s

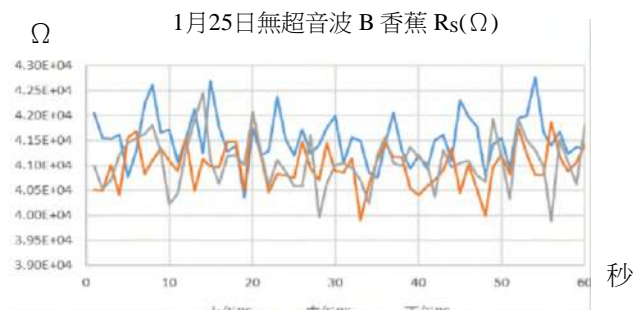


曲線2 R_s -B-1

分析： R_s 電阻值：18日 > 23日 > 22日 > 20日 > 21日 > 25日 > 19日 > 24日



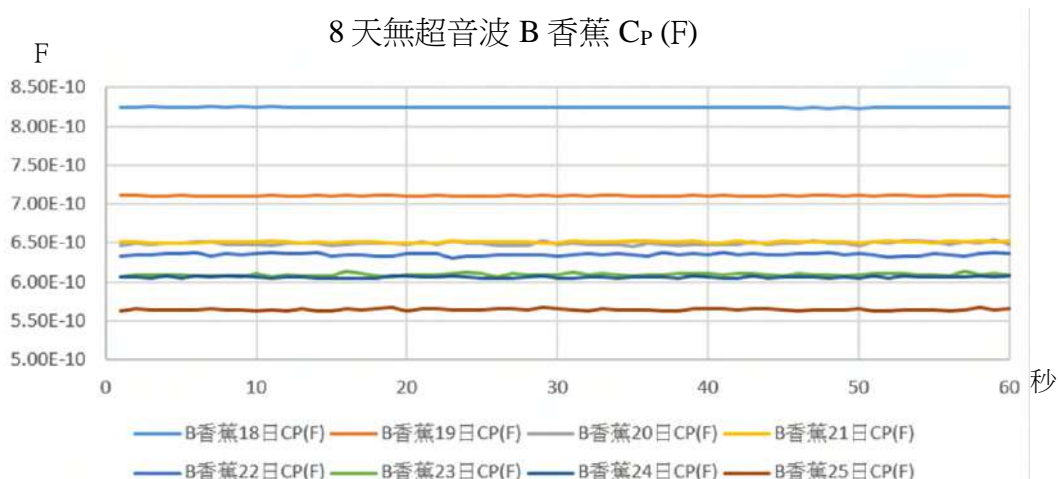
曲線2 R_s -B-2(第一天)



曲線2 R_s -B-3(第八天)

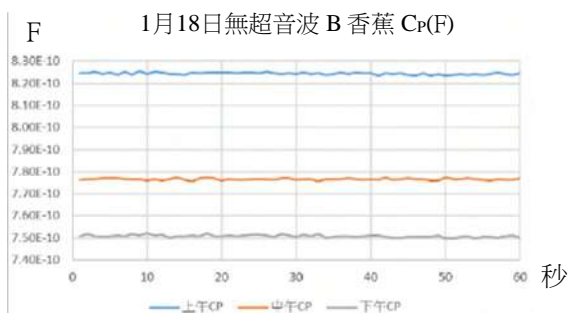
分析：第一天($10^4 \Omega$)與最後一天($10^4 \Omega$) R_s 曲線可看出澱粉酶活性變化所產生的阻抗值差異

4. C_p

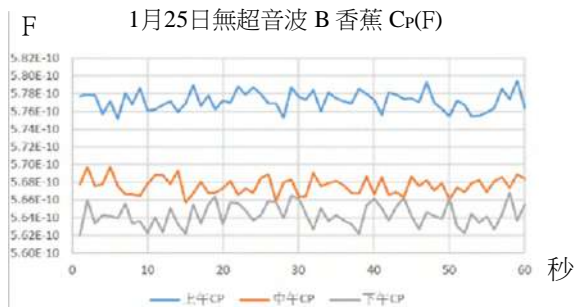


曲線2 C_p -B-1

分析： C_p 電容值：18日 > 19日 > 20日 近21日 > 22日 > 23日 > 24日 > 25日



曲線2 Cp-B-2(第一天)



曲線2 Cp-B-3(第八天)

分析：第一天(10^{-10} F)與最後一天(10^{-10} F) C_p 曲線可看出電容量的變化值差異

(四)發射超音波 A 香蕉與未發射超音波 B 香蕉 1 月 18 日-25 日 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 60 秒平均值均值

表4.

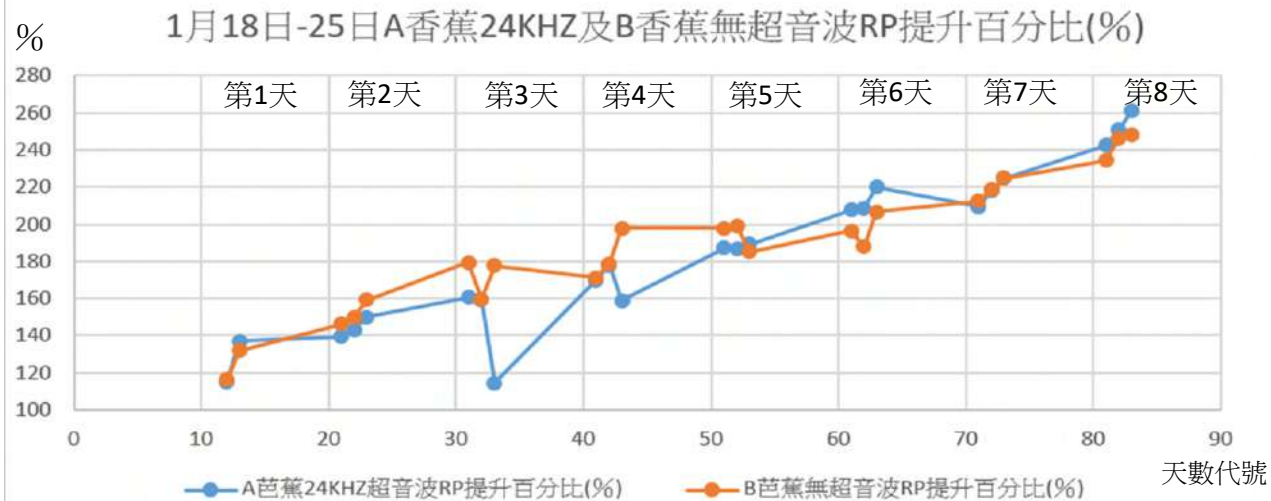
2025 年 1 月 18 日-23 日香蕉實驗分析(60 秒平均值)									
日期時間 順序	$R_p(\Omega)$		$R_s(\Omega)$		$Z(\Omega)$		$C_p(PF)$		備註
	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	
11	1109073	763166.4	46965.02	45704.09	226906.3	187080.4	686.3	824	1/18 上午
12	1270505	885019	44562.14	44881.23	239143.3	199695.4	654.3	776.6	1/18 中午
13	1520139	1007262	40454.47	42909.16	247594.2	207382.9	634.2	750.7	1/18 下午
21	1544841	1114785	40750.06	40273.22	250324.2	212720.2	627.2	734.7	1/19 上午
22	1585456	1143038	42310.96	40958.6	254345	216128.7	617	723	1/19 中午
23	1664575	1215913	40371.53	39939.38	259589.3	220301.7	605.6	710.7	1/19 下午
31	1781004	1368434	43872.03	40267.03	277812.9	234461	564.4	668.8	1/20 上午
32	1767681	1217460	46536.26	45510.35	287612.3	235672.4	546.8	662.7	1/20 中午
33	1268514	1356378	54281.47	42869.67	256878.4	241120.8	605.3	649.5	1/20 下午
41	1884303	1307114	46849.95	42054.28	297516.6	234648.7	528.1	667.1	1/21 上午
42	1974564	1362775	46913.25	41873.18	304511	238740.1	516.6	655.9	1/21 中午
43	1763394	1510417	52128.12	38574.64	304269.6	241238.3	516.6	651.1	1/21 下午
51	2076497	1508718	47638.55	39211.33	313361.4	243273.97	501.6	645.2	1/22 上午
52	2071221	1519582	49149.5	40353.92	319791.7	248081.4	491.7	633.3	1/22 中午
53	2099858	1413311	49439.94	43016.85	322141	246547.2	487.8	635.3	1/22 下午
61	2304100	1499715	48243.72	42697.49	332565.8	252286.8	473.5	621.6	1/23 上午
62	2315294	1433785	49720.7	45298.59	340255.4	254662.7	462.8	615	1/23 中午
63	2438332	1576861	48217.96	42022.26	343242.7	257763.7	459	609.3	1/23 下午
71	2322993	1622166	50743.71	40200.27	343081.7	255528.3	458.8	615	1/24 上午
72	2418206	1667858	49745.75	40022.71	347291.3	258332.5	453.6	608.7	1/24 中午
73	2494443	1715244	50118.04	39295.38	353245.6	259641.1	455.9	605.9	1/24 下午
81	2689737	1786999	52099.62	41535.56	374811.2	272462.3	420.6	577.2	1/25 上午
82	2780990	1880510	51529.53	40983.66	378103.6	277272.4	417	567.6	1/25 中午

(五)發射超音波 A 香蕉與未發射超音波 B 香蕉 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 值，以 18 日上午為基準值做百分比分析(大於 100%為提升小於 100%為衰減)

表5.

2025 年 1 月 18 日-23 日香蕉實驗分析(60 秒平均值提升百分比)

日期時間 順序	Rp(%)		Rs(%)		Z(%)		Cp(%)		備註
	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	A(24KHZ)	B(無超音波)	
11	100	100	100	100	100	100	100	100	1/18 上午
12	114.6	116	95	98.2	105.4	106.7	95.3	94.2	1/18 中午
13	137	132	86	93.9	109.1	110.9	92.4	91.1	1/18 下午
21	139.2	146.1	86.8	88.1	110.3	113.7	91.4	89.2	1/19 上午
22	143	149.8	90.1	89.6	112.1	115.5	89.9	87.7	1/19 中午
23	150.1	159.3	86	87.4	114.4	117.8	88.2	86.3	1/19 下午
31	160.6	179.3	93.4	88.1	122.4	125.38	82.2	81.2	1/20 上午
32	159.4	159.5	99.1	99.6	126.8	126	79.7	80.4	1/20 中午
33	114.4	177.7	115.6	93.8	113.2	128.9	88.2	78.8	1/20 下午
41	169.9	171.3	99.8	92.0	131.1	125.4	76.9	80.9	1/21 上午
42	178.0	178.6	99.9	91.6	134.2	127.6	75.3	79.6	1/21 中午
43	159	197.9	111	84.4	134.1	128.9	75.3	79.0	1/21 下午
51	187.2	197.7	101.4	85.8	138.1	130.0	73.1	78.3	1/22 上午
52	186.8	199.1	104.7	88.3	140.9	132.6	71.6	76.9	1/22 中午
53	189.3	185.2	105.3	94.1	142	131.8	71.1	77.1	1/22 下午
61	207.8	196.5	102.7	93.4	146.6	134.9	69	75.4	1/23 上午
62	208.8	187.9	105.9	99.11	150	136.1	67.4	74.6	1/23 中午
63	219.9	206.6	102.7	91.9	151.3	137.8	66.9	73.9	1/23 下午
71	209.5	212.6	108.0	87.9	151.2	136.6	66.9	74.6	1/24 上午
72	218.0	218.5	105.9	87.6	153.1	138.1	66.1	73.9	1/24 中午
73	224.9	224.8	106.7	85.9	155.7	138.8	66.4	73.5	1/24 下午
81	242.5	234.2	110.9	90.9	165.2	145.6	61.3	70.0	1/25 上午
82	250.7	246.4	109.7	89.7	166.6	148.2	60.8	68.9	1/25 中午
83	261.1	247.9	107.4	89.9	168.3	149.1	60.2	68.5	1/25 下午



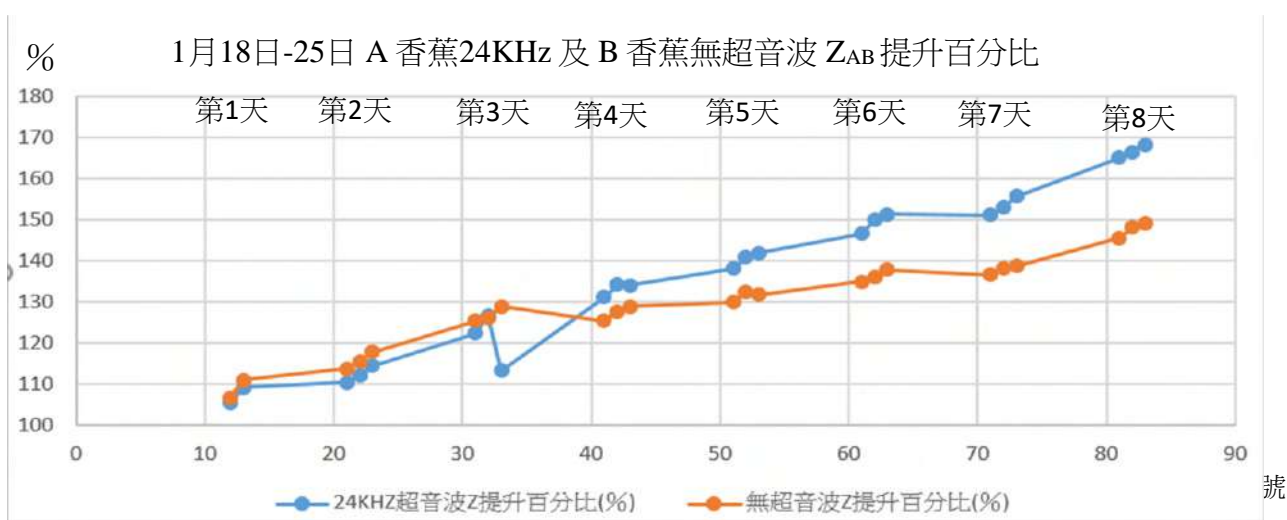
曲線2AB-Rp-1

分析：Rp 電阻值變化百分比 A 香蕉接近 B 香蕉第8天較高(可見超音波仍有提升甜度及電阻值)。



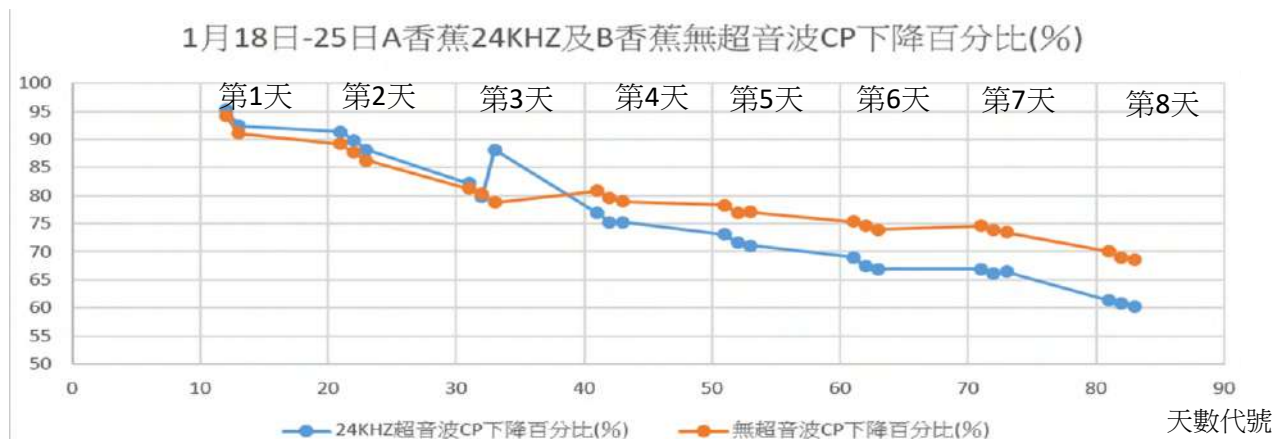
曲線2AB-Rs-1

分析： R_s 電阻值變化百分比 A 香蕉高於 B 香蕉 (超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值)。



曲線2AB- Z_{AB} -1

分析： Z_{AB} 阻抗值變化百分比 A 香蕉高於 B 香蕉 (超音波提升澱粉酶活性增加甜度及阻抗值)。



曲線2AB- C_P -1

分析： C_P 電容值變化百分比 A 香蕉低於 B 香蕉 (推估是超音波能量讓細胞膜通透性改變較大造成)。

三、超音波催熟箱設計(分四個面向發射超音波)

(一)控制裝置設計方塊圖

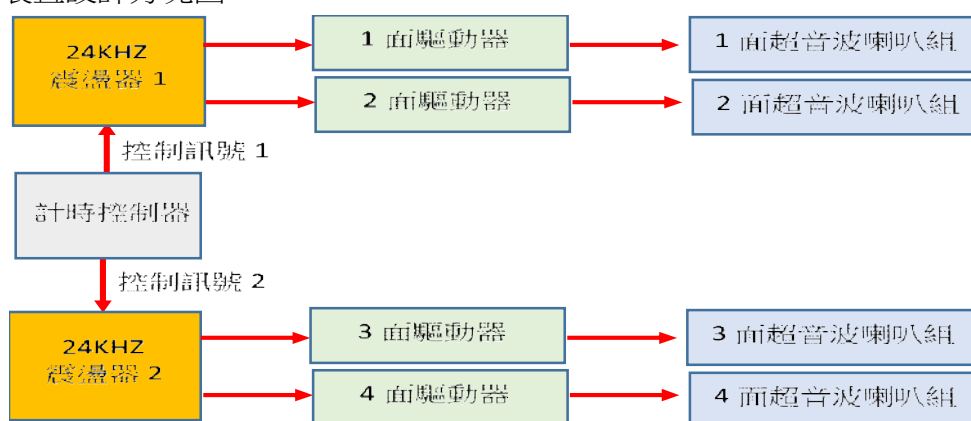


圖32. 控制裝置設計方塊圖(作者自行繪製)

1. 24kHz 震盪器分兩組分別驅動兩組垂直面超音波喇叭組。

2. 計時器：設計每 10 分鐘分別控制震盪器 1 及 2 震盪訊號，讓兩組超音波喇叭組交替朝不同方向發射超音波。(第 1、2 面互成垂直，第 3、4 面互成垂直)

(二) 實際作品



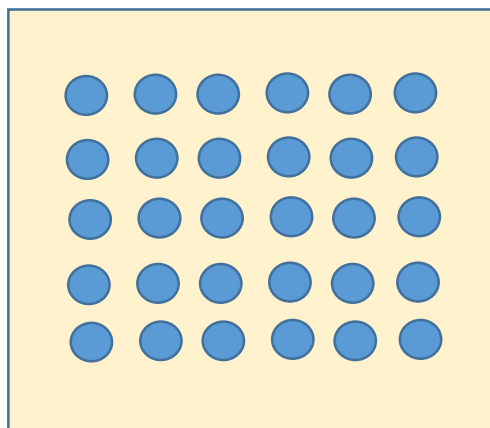
(A) 左邊是由 4 面均由 1 個大超音波喇叭及 4 個中型 超音波組成，右邊是超音波發射面相控制器

圖33. 超音波催熟箱(作者自行拍攝)

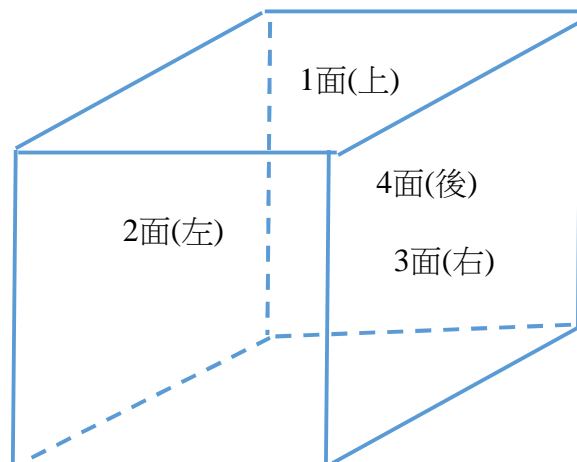
(三) 超音波催熟室示意圖(供業界參考)

1. 牆面依大小採用超音波陣列方式

2. 分四個牆面設計



(A) 牆面超音波陣列示意圖



(B) 四個牆面設計示意圖

圖34. 超音波催熟室(作者自行繪製)

伍、討論

一、芭蕉及香蕉 A 與 B 起始 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 為何不同？

說明：兩蕉尺寸有差異，銅箔貼的位置也會有誤差。

二、芭蕉 A 與芭蕉 B 六天測試之 R_p 及 Z_{AB} 與圖 5 是否相同？

說明：我們測試儀器是採固定頻率在 1kHz 值，從測試曲線及表 2

芭蕉 A

從曲線 **1R_P-A-1** 可知 **R_P** 電阻值：9 日 > 8 日 > 7 日 > 6 日 > 5 日 > 4 日

從曲線 **1Z_{AB}-A-1** 可知 **Z_{AB}** 阻抗值：9 日 > 8 日 > 7 日 > 6 日 > 5 日 > 4 日

芭蕉 B

從曲線 **1R_P-B-1** 可知 **R_P** 電阻值：9 日 > 8 日 > 7 日 > 6 日 > 5 日 > 4 日

從曲線 **1Z_{AB}-B-1** 可知 **Z_{AB}** 阻抗值：9 日 > 8 日 > 7 日 > 6 日 > 5 日 > 4 日

與圖 5 是相同的結果。

三、香蕉 A 與香蕉 B 八天測試之 **R_P** 及 **Z_{AB}** 與圖 5 是否相同？

香蕉 A

從曲線 **2R_P-A-1** 可知 **R_P** 電阻值：25 日 > 24 日 > 23 日 > 22 日 > 21 日 > 20 日 >

19 日 > 18 日，24 日近 23 日。隨著並聯電阻值增加，香蕉成熟度也提升。

從曲線 **2Z_{AB}-A-1** 可知 **Z_{AB}** 阻抗值：25 日 > 24 日 > 23 日 > 22 日 > 21 日 > 20 日 >

19 日 > 18 日。隨著總阻抗值增加，香蕉成熟度也提升。

香蕉 B

從曲線 **2R_P-B-1** 可知 **R_P** 電阻值：25 日 > 24 日 > 23 日 > 22 日 > 21 日 > 20 日 >

19 日 > 18 日，22 日近 21 日

從曲線 **2Z_{AB}-B-1** 可知 **Z_{AB}** 阻抗值：25 日 > 24 日 > 23 日 > 22 日 > 21 日 > 20 日

> 19 日 > 18 日，21 日近 20 日

與圖 5 是相同的結果。

四、觀察芭蕉與香蕉從 **R_P**、**C_P**、**R_S** 及 **Z_{AB}** 第一天測試曲線到最後一天測試曲線的每秒變動率較大是否與成熟過程有關？

說明：推估曲線每秒變動率較大應與酵素作用有關，越成熟作用越明顯。

五、發射超音波 A 芭蕉與未發射超音波 B 芭蕉差異分析

說明：從曲線 **1AB-R_P-1**、曲線 **1AB-R_S-1**、曲線 **1AB-Z_{AB}-1**，可看出發射超音波 A 芭蕉與阻抗值變化率百分比均高於未發射超音波 B 芭蕉，可見超音波有影響芭蕉酵素催化用。

六、發射超音波 A 香蕉與未發射超音波 B 香蕉差異分析

說明：從曲線 **2AB-R_S-1**、曲線 **2AB-Z_{AB}-1**，可看出發射超音波香蕉電阻與阻抗值變化率百分比均高於未發射超音波 B 香蕉，可見超音波有影響香蕉酵素催化作用。但 **2AB-R_P-1** 則 AB 兩香蕉變化率百分比接近。(研判是測試時室溫約 17°C 與芭蕉測試時室溫約 28°C 有差異)

陸、結論

本研究運用非破壞性阻抗檢測法，檢測記錄芭蕉及香蕉從第 1 天青蕉開始到成熟情況(芭蕉 6 天及香蕉 8 天)，其中 Z_{AB} 與 R_p 變化值均與國外文獻之研究一致，而我們也做了有無超音波發射於芭蕉及香蕉，其成熟阻抗值提升百分比之比較。從第一天及最後一天的阻抗曲線變化，其電阻與阻抗值百分比提升率高於無超音波芭蕉及香蕉，證實超音波有加速芭蕉及香蕉酵素催化作用。依實驗結果，我們建構小型超音波催熟箱作呼吸躍變型水果催熟用，供業界及家庭參考，可減少使用化學氣體催熟方式，未來擬申請專利。[我們用「超音波催熟水果」關鍵字查中華民國專利得到(檢索無結果)]

柒、參考文獻資料

- 一、Marta Lilja Di Lascio, Davide Ferrari. BIOFRUIT (New directions in statistical methods for BIO-impedance analysis of FRUIT ripeness). Project Duration:07/2020 – 12/2021.
參考網址：https://sensingtechnologies.groups.unibz.it/?page_id=3881
- 二、Rahmondia N Setiadi, Lazuardi Umar. Fruit sweetness characterization using impedance spectroscopy method. SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya Volume 4, Issue 2, August 2019
- 三、Theji Mohan, Rajesh PN, Fathimathu Zuhra and Vijitha . Magnitude of Changes in the Activity of Amylases and Cellulase and its Association with the Biochemical Composition during Maturation and Ripening of Banana. Biochem Physiol 2014, 3:2.
- 四、Atanu Chowdhure, Tushar Kanti Bera, Dibyendu Ghosha L and Badal Chakraborty. Electrical Impedance Variations in Banana Ripening: An Analytical Study with Electrical Impedance Spectroscopy. Journal of Food Process Engineering ISSN 1745 – 4530 , 2016
- 五、Altab Khan, Mohd Riyaz Beg and Pramod Waghmare. Intensification of biokinetics of enzymes using ultrasound-assisted methods: a critical review. Biophysical Reviews (2021) 13:417 – 423
- 六、Lea Goetzl and Christian Wilms. Understanding the cell as an electrical circuit. UCL, London, UK, Scientifica Ltd, Uckfield, UK 參考網址：<https://www.scientifica.uk.com/learning-zone/understanding-the-cell-as-an-electrical-circuit>
- 七、Demelash Abera, Giuseppe Cantarella, Luisa Petti, Paolo Lugli. Bio-impedance and circuit parameters: An analysis for tracking fruit ripening. Postharvest Biology and Technology. Volume 159, January 2020, 110978. 參考網址：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925521419304983>
- 八、參考網址：<https://www.scientifica.uk.com/learning-zone/understanding-the-cell-as-an-electrical-circuit>

【評語】 032903

本作品探討以超音波催熟香蕉，並測定並聯電阻（RP）、並聯電容（CP）、串聯電阻（RS）及總阻抗（ZAB），並作出結論認為 RP 與 ZAB 為合適的熟度指標。以下建議供同學參考：

1. 既然使用 LCR 分析儀，除了電阻(R)、電容(C)之外，亦應論述電感(L)的部分。
2. 量測時為何僅選擇 1 kHz 為檢測頻率？建議應量測並報導完整頻譜（如 Nyquist plot、Bode plot 等），並完整以 LCR 等效電路探究數據。若僅有單一頻率的量測，如何能以單一量測數值解析出電阻與電容兩個數值？於裝設電極時，也應測定香蕉測定區域大小、銅片電極固定方式、固定位置等變因對數值的影響。
3. 圖 30 為何有些資料僅有灰色色塊？
4. 相較於文獻回顧提及的「研究人員觀察到，頻率為 18、20、24 和 26 kHz 時，固定化纖維素的催化活性分別增加了 6.6%、14.8%、17.8% 和 10.4%。因此，使用最佳頻率的超音波照射有助於改善結果 (Xiao et al., 2011)。」且結論

中「ZAB 與 RP 變化值均與國外文獻之研究一致」本研究在科學上的新發現不甚明確。

5. 目前實驗僅有對兩種香蕉，各有一個有超音波催熟與一個無超音波照射的對照樣品，無法呈現可能的實驗誤差或樣品間的差異。建議同學需要於不同時日對不同批次的樣品重複實驗，檢視所觀察到的結果是否有再現性，並確實有科學上的差異。
6. 皮的厚度與果實直徑差異頗大，宜採用來源產地不同之香蕉或芭蕉，進行多重測試比較。
7. 實驗應可結合感官品評對熟度給予判定，以利提出合適香蕉熟度的數據範圍，並分析不同的蕉種之間的異同性。

作品海報

Banana 「波~內納」-運用非破壞式電阻抗法

檢測超音波催化效果之研究

一、研究動機

呼吸躍變型水果，果農常採用化學方式催熟，多少會影響果實營養成分，我們想用物理的超音波方式來做催熟，希望維持甚至有可能提升果實的營養價值。傳統的水果品質評定方法主要是化學分析法，需要耗費相當的化學試劑，檢測分析過程煩瑣，速度慢，而且檢測時必須破壞水果。如圖1所示研究指出水果甜度與其阻抗相關，我們選擇芭蕉及香蕉來做測試，用較精密之LCR測試儀器，可分別測出香蕉等效阻抗如圖15的 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} ，由於芭蕉及香蕉成熟之甜度會與澱粉酶催化有關，在國中生生物學到植物澱粉與酵素觀念下，我們想證實超音波是否會影響芭蕉及香蕉果肉中澱粉酶的活性催化，因此我們對芭蕉及香蕉發射超音波，測試是否會影響芭蕉及香蕉的成熟度阻抗。

二、研究目的

傳統水果成熟檢測多為破壞性，為避免損傷水果，本實驗採用非破壞性電阻抗法檢測芭蕉及香蕉在有無超音波發射下，分析等效電路阻抗的變化情形。本研究目的有三：

- (一) 非破壞性電阻抗法採用銅箔檢測芭蕉及香蕉的成熟度運用，驗證阻抗變化是否如文獻所提(採用電極片檢測)，天數越多阻抗越大。
- (二)進行有無超音波發射於芭蕉及香蕉的實驗，比較阻抗變化的百分比，來分析超音波是否有催化效果。
- (三)開發超音波催熟水果新技術，未來應用於家庭與農產品產銷用，製作超音波催熟裝置。

三、文獻回顧

- (一)電阻抗譜 (EIS) 做非破壞性水果檢測(Marta et al.,2021[1])
- (二)水果甜度與阻抗研究(Rahmondia et al., 2019[2])
濃度每增加 10%，阻抗就會增加 2 kΩ。測量圖表如圖 1 所示。
- (三)香蕉成熟過程中澱粉酶與纖維素酶活性變化幅度(Theji Mohan et al., 2014[3])
當香蕉在 90 天後開始成熟時，澱粉酶的活性在第 92 天增加到約 10 倍
- (四)電阻抗譜法(EIS)檢測香蕉越成熟阻抗高的研究文獻(Atanu Chowdhure et al., 2016[4])

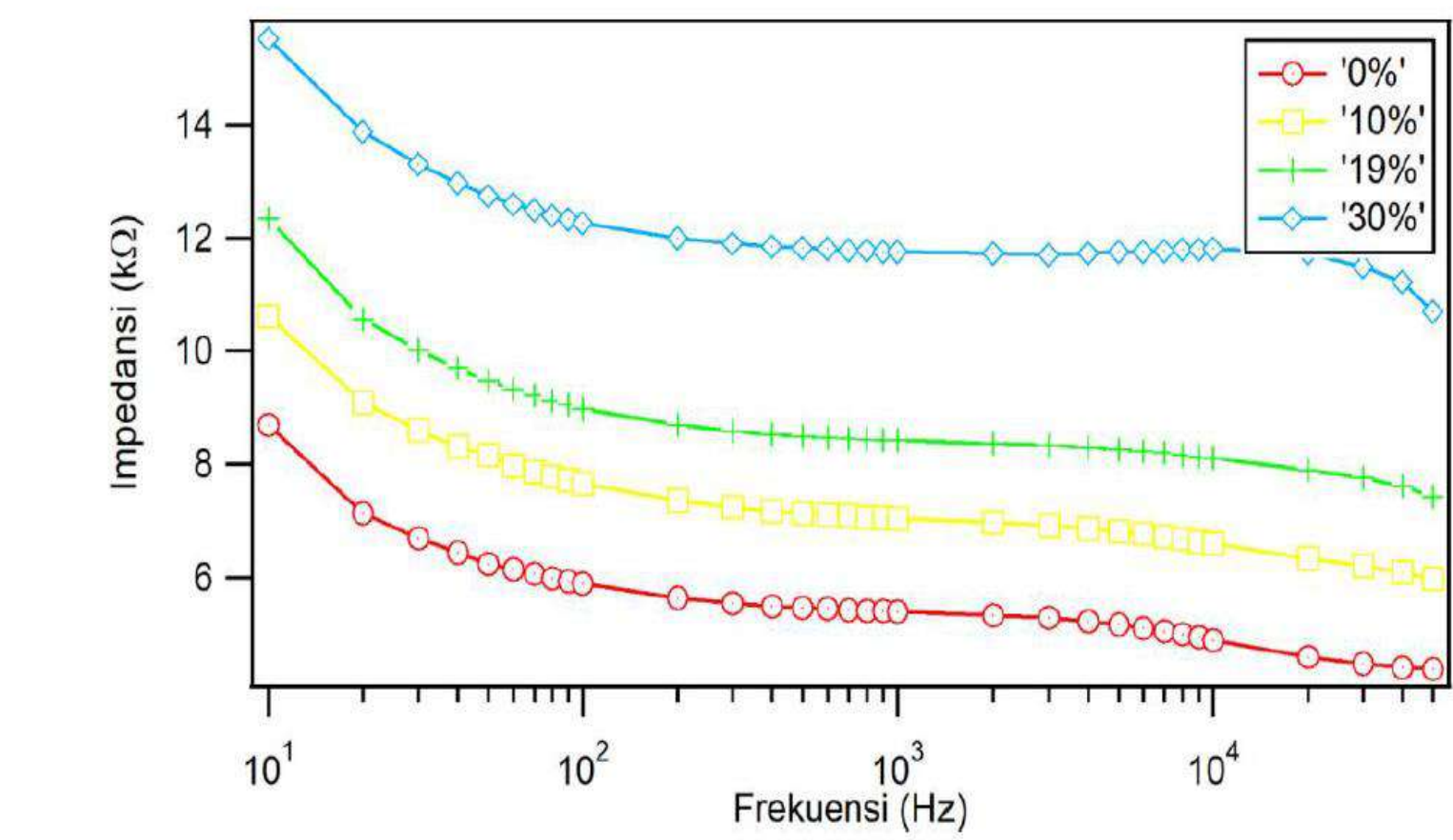


圖 1. 組成水果甜度的糖溶液的阻抗測量結果。
圖來源(Rahmondia *et al.*, 2019[2])

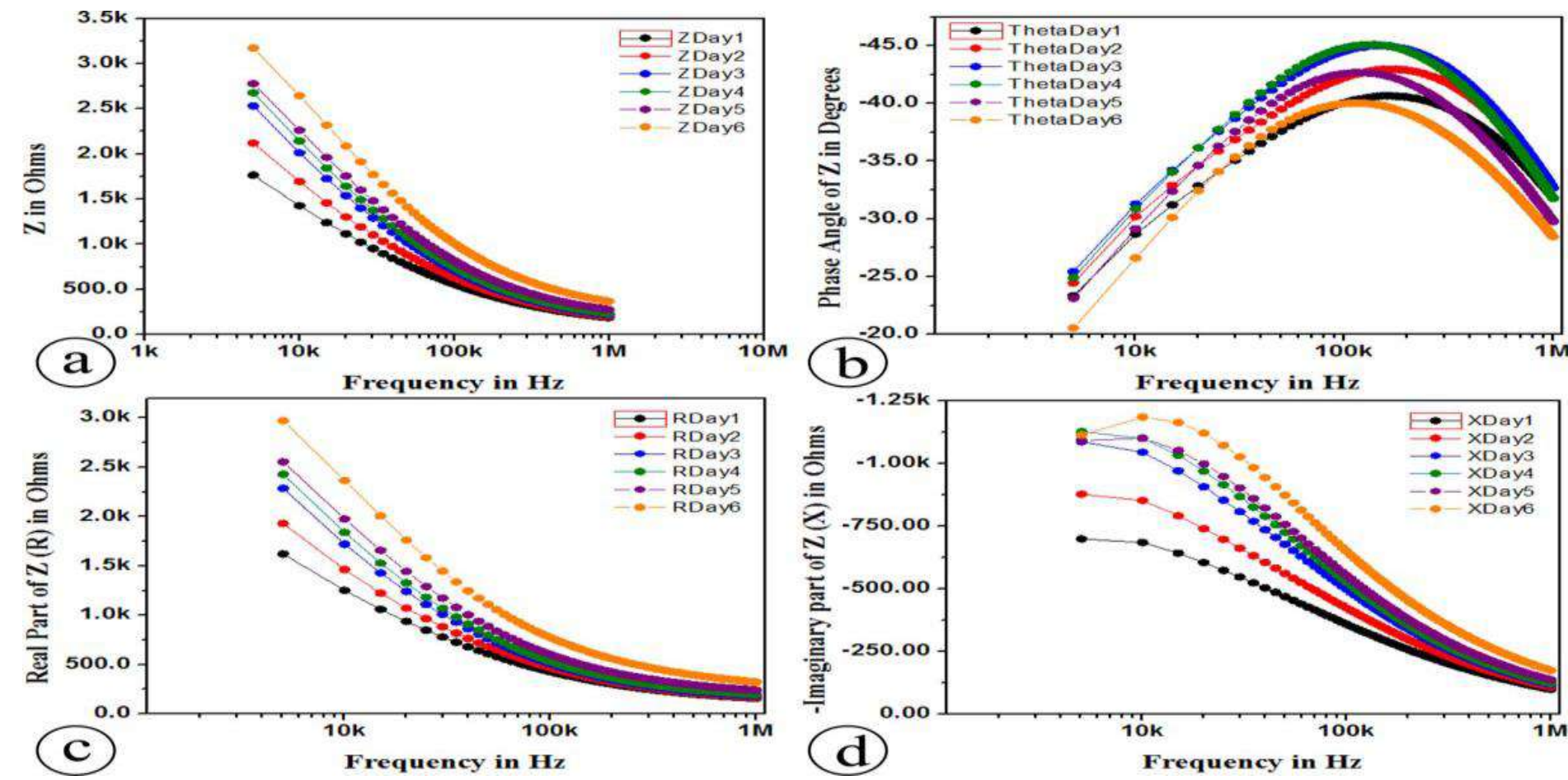


圖5.香蕉6天測試阻抗曲線圖
圖來源(Atanu Chowdhure *et al.*, 2016[4])

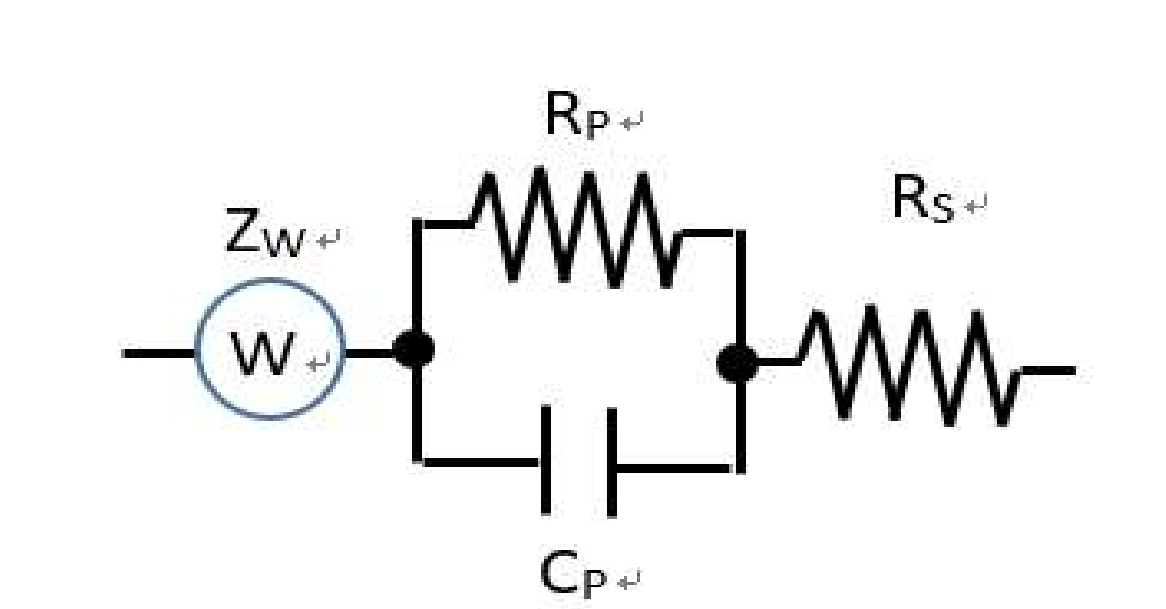


圖14.水果的等效電路參考文獻 (Pietro et al., 2020[7]) 中之圖4 作者自行用中文繪製

(五)超音波影響酵素反應的因素(Altab Khan et al., 2021[5])

- 1.超音波頻率:超音波的頻率是酵素反應的重要因素。研究人員觀察到，頻率為 24KHz 時，固定化纖維素的催化活性分別增加了 17.8% 最大。
- 2.超音波強度:發現隨著超音波強度的增加，活性增加，但是超過某些強度活性開始下降。

(六)水果的等效電路文獻(Pietro et al., 2020[7])

貳、研究設備及器材 (圖7-圖9均作者自行拍攝)

一、LCR (電感電容電阻)測試儀



圖7.LCR (電感電容電阻)測試儀

二、訊號產生器(發射超音波訊號)



圖8. 訊號產生器

三、超音波喇叭(發射超音波)



圖9. 超音波喇叭X 4

參、研究過程

一、本研究等效電路 (圖15-圖16均作者自行繪製)

(電極採用導電性極佳知銅箔所以忽略圖14之 Z_W)

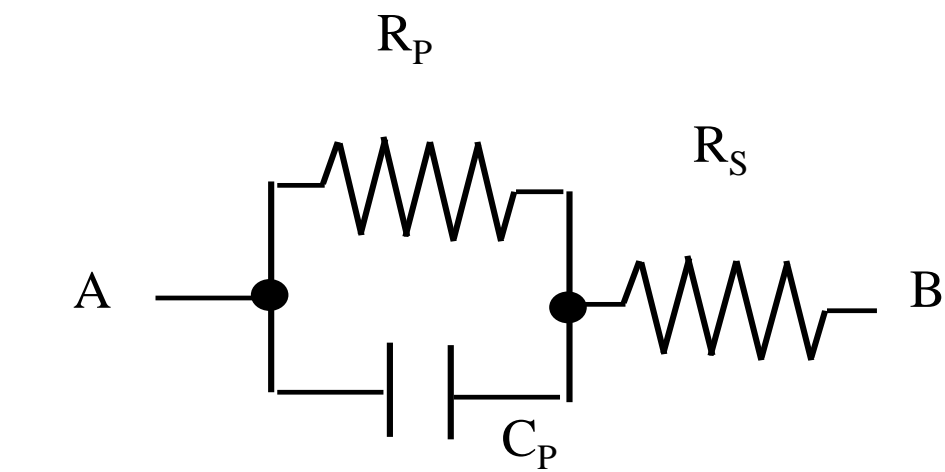


圖15. 本研究等效電路

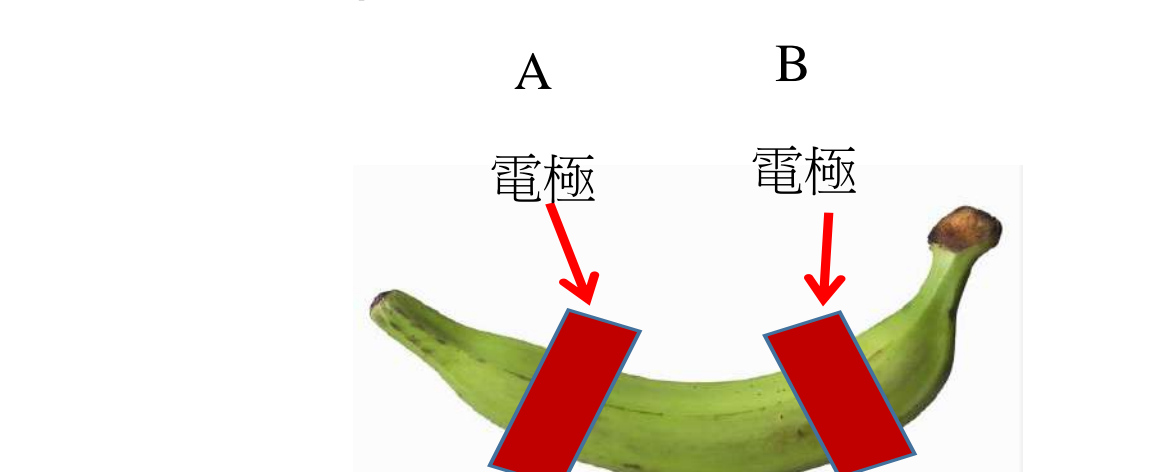


圖16. 香蕉測試電極設計示意圖

二、實驗設計

從文獻[5]中知道超音波頻率24kHz催化效率較高，因此我們選用24kHz超音波做實驗，運用四顆超音波喇叭，喇叭距香蕉及芭蕉10公分發射90dB強度24kHz超音波，LCR測試條件：DC1V，檢測頻率1kHz。

(一)分兩組，第一組A蕉：對芭蕉及香蕉發射24kHz超音波，第二組B蕉：未發射超音波

- 1.實驗1：早上 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 設定每秒記錄一次，每次紀錄60秒。
- 2.實驗2：中午 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 設定每秒記錄一次，每次紀錄60秒。
- 3.實驗3：下午 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 設定每秒記錄一次，每次紀錄60秒。

三、實驗步驟(以芭蕉為例) (圖17-圖27均作者自行拍攝)

- (一)芭蕉中取固定間距(4公分)貼一圈1.5公分銅箔
- (二)焊接兩銅箔店及測試導線



圖17.芭蕉測試電極照片



圖18.測試電極和測試導線照片

(三)LCR設定測 R_p 及 R_s



圖19.LCR設定測 R_p 及 R_s 照片

(四)LCR設定測Z及 C_p



圖20.LCR設定測Z及 C_p 照片

(五)LCR測試夾夾上AB兩電極



圖21.測試夾夾上AB兩電極照片

(六)LCR測試儀器電腦連線測試

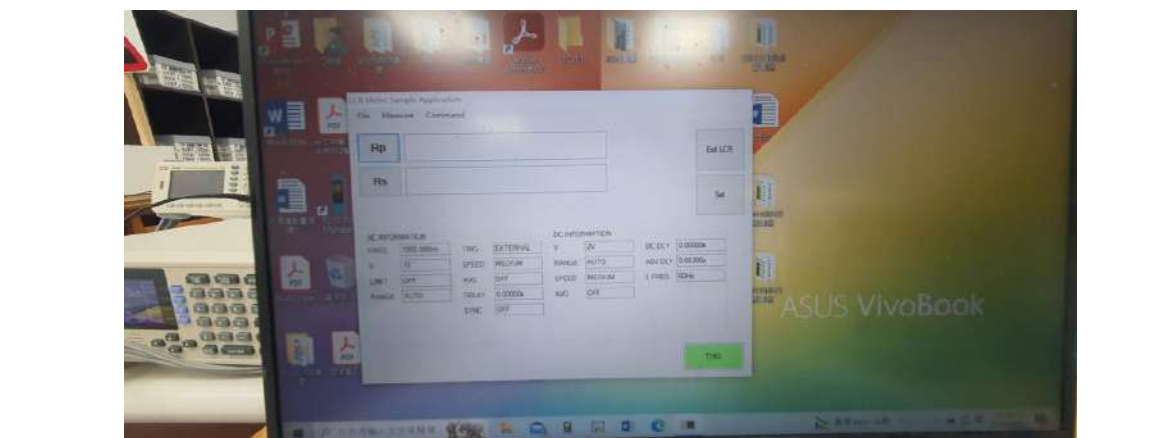


圖22.LCR測試儀器USB電腦連線測試設定照片

(七)24KHZ超音波測試 (A芭蕉) (圖23-圖27均作者自行拍攝)

- 1.訊號產生器設定24KHZ訊號
- 2.驅動訊號接上超音波喇叭
3. 芭蕉距喇叭約10公分(90dB)
- 4.AB電極接上LCR測試夾
- 5.LCR與電腦做連線測試
- 1.AB電極接上LCR測試夾
- 2.LCR與電腦做連線測試



肆、研究結果

一、第一次芭蕉實驗(溫度在23°C-25°C)

(一) 10月4日-9日6天實驗，發射24KHZ超音波為芭蕉A，未發射超音波為芭蕉B

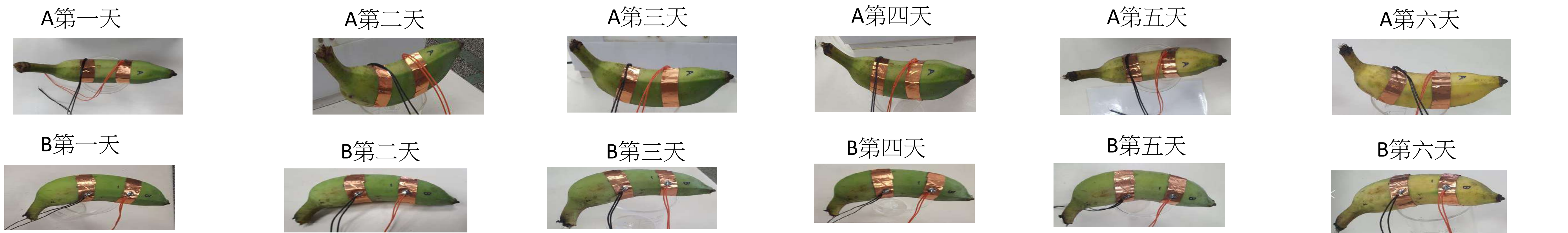
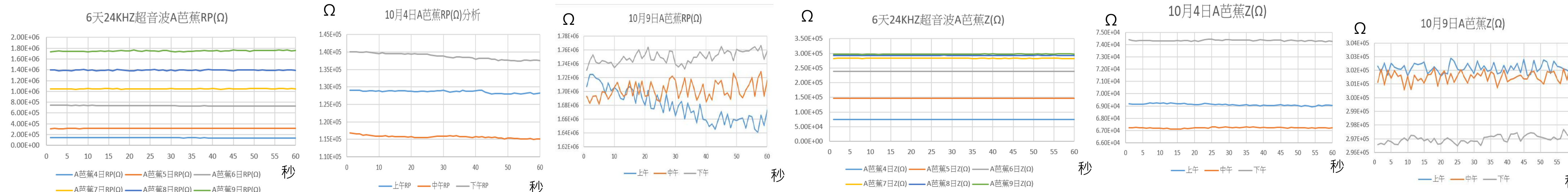


圖28. 10月4日-9日6天實驗芭蕉A及B照片(作者自行拍攝)

發射超音波為芭蕉A在第五天開始變黃，比未發射超音波為香蕉B早一天

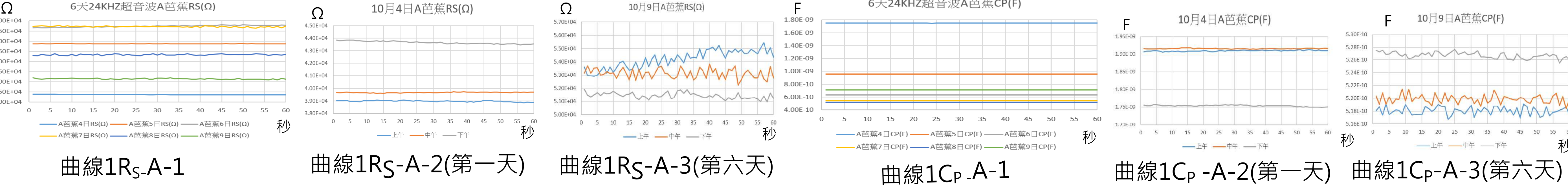
(二)發射超音波A芭蕉 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 測試，10月4-9日實驗1-至實驗(60秒測試)

1. R_p
2. Z_{AB}



分析： R_p 電阻值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日(越成熟甜度增加電阻值也增加) 分析： Z_{AB} 阻抗值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日，A芭蕉8日就變黃了

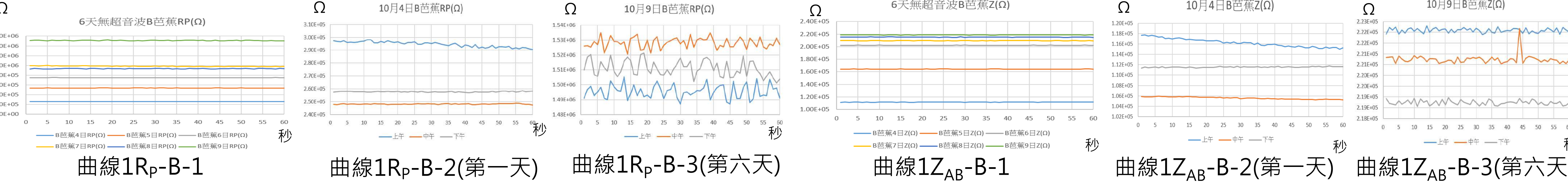
3. R_s
4. C_p



分析： R_s 電阻值：7日 > 6日 > 5日 > 8日 > 9日 > 4日 分析： C_p 電阻值：4日 > 5日 > 9日 > 6日 > 7日 > 8日

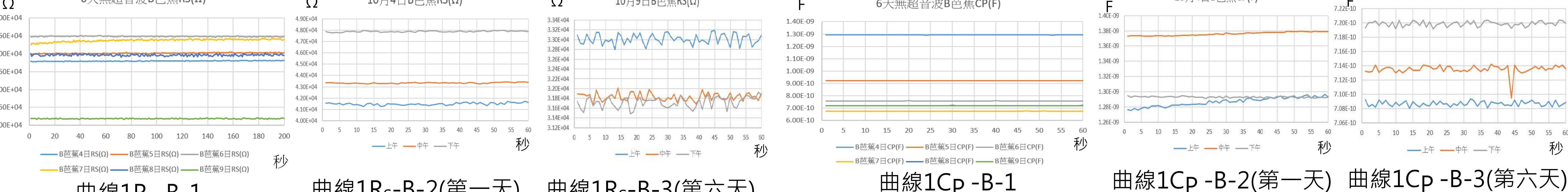
(三)未發射超音波B芭蕉 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 測試，10月4日-9日實驗1至實驗3(60秒測試)

1. R_p
2. Z_{AB}



分析： R_p 電阻值：9日 > 7日 > 8日 > 6日 > 5日 > 4日，8日與7日電阻接近 分析： Z_{AB} 阻抗值：9日 > 8日 > 7日 > 6日 > 5日 > 4日，9日與8日電阻值接近

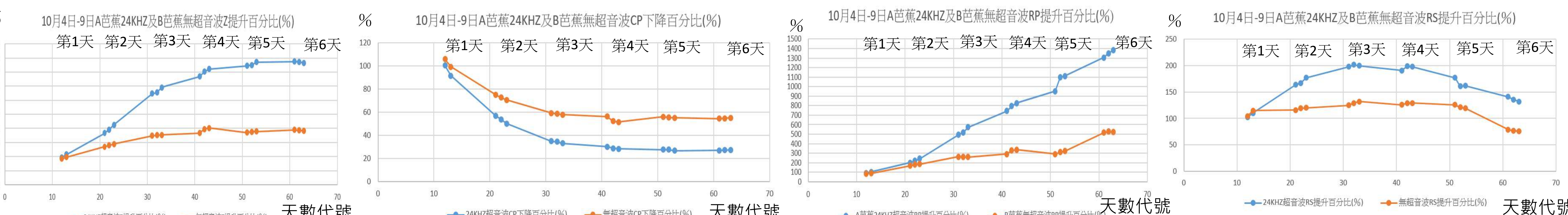
3. R_s
4. C_p



分析： R_s 電阻值：6日 > 7日 > 5日 > 8日 > 4日 > 9日，5日與8日電阻值接近 分析： C_p 電容值：4日 > 5日 > 6日 > 8日 趨近 9日 > 7日

(四)發射超音波A芭蕉與無射超音波B芭蕉 R_p 、 C_p 、 R_s 及 Z_{AB} 值，以4日上午為100%基準值做百分比分析

1. Z_{AB}
2. C_p
3. R_p
4. R_s



分析： Z_{AB} -阻值變化百分比A芭蕉高於B芭蕉 分析： C_p 電容值變化百分比A芭蕉低於B芭蕉 分析： R_p 電阻值變化百分比A芭蕉高於B芭蕉 分析： R_s 電阻值變化百分比A芭蕉高於B芭蕉
超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值 超音波能量讓細胞膜通透性改變較大造成 超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值 超音波提升澱粉酶活性增加甜度及電阻值

二、第二次香蕉實驗(因為天氣冷 溫度17°C-18°C香蕉成熟較慢)

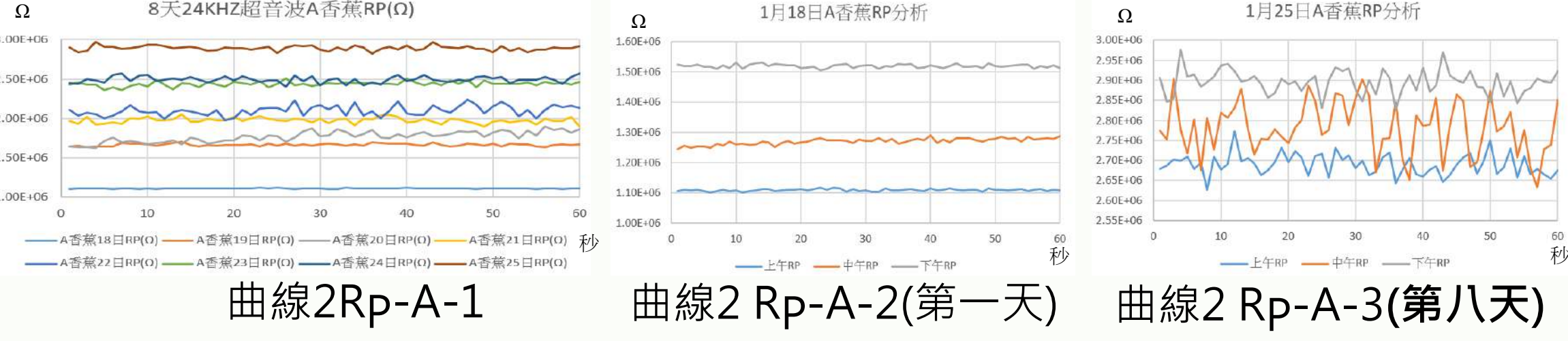
(一) 1月18日- 25日8天實驗，發射24KHZ超音波為香蕉A，未發射超音波為香蕉B



圖29.1月18日-25日8天實驗香蕉A及B照片(作者自行拍攝)

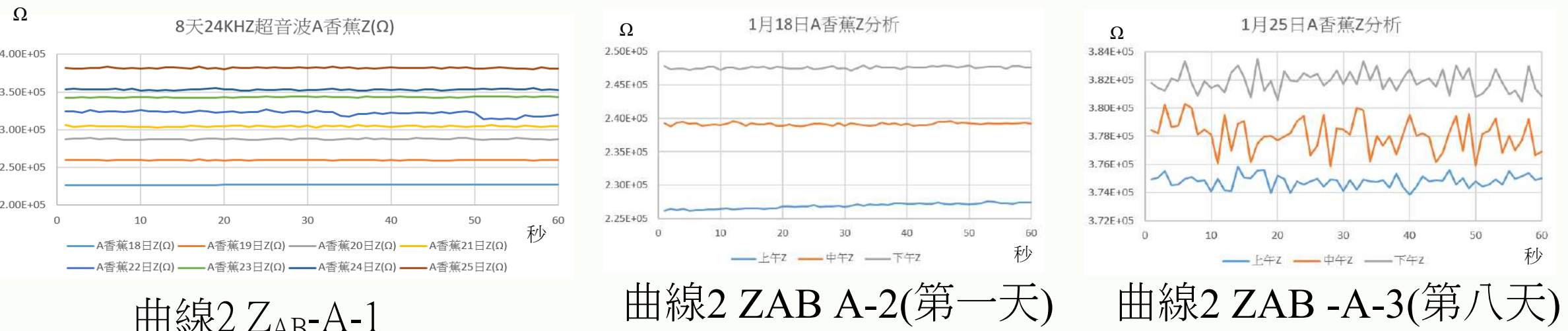
(二)發射超音波A香蕉Rp、Cp、RS及ZAB 測試，1月18日-25日實驗1至實驗3(60秒測試)

1. Rp



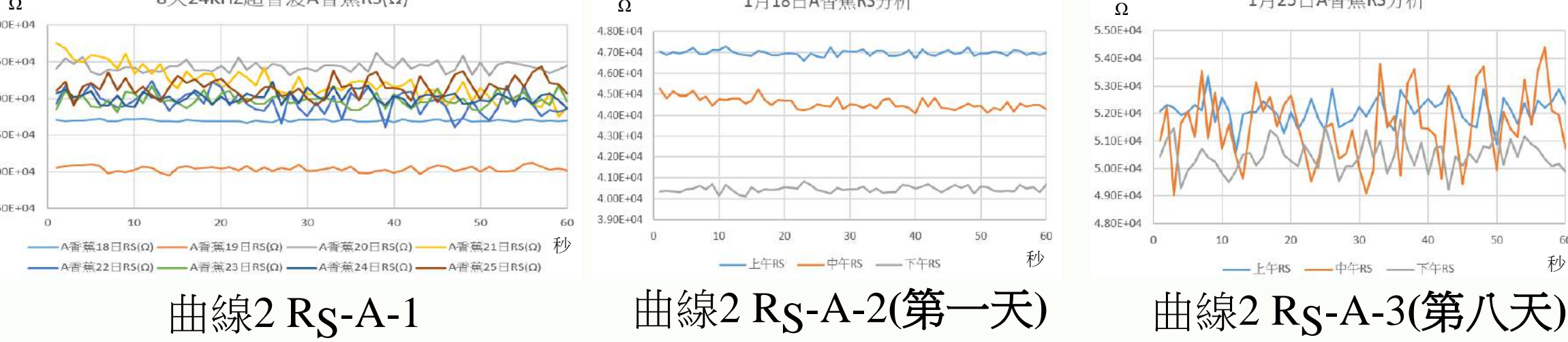
分析：Rp電阻值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日

2.ZAB



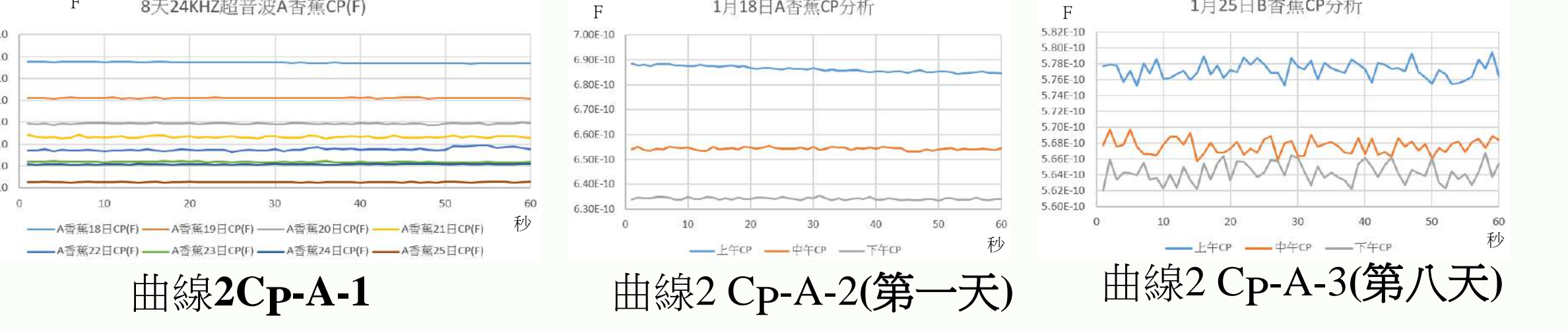
分析：Z_{AB}阻抗值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日

3.RS



分析：RS電阻值：20日 > 21日 > 25日 > 24日 > 23日 近22日 > 18日 > 19日

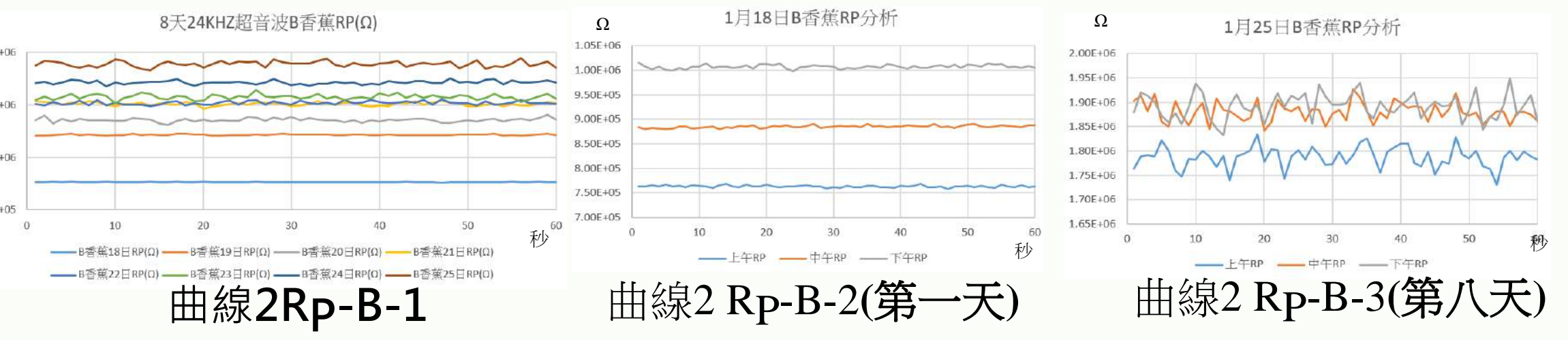
4.Cp



分析：Cp電容值：18日 > 19日 > 20日 > 21日 > 22日 > 23日 > 24日 > 25日

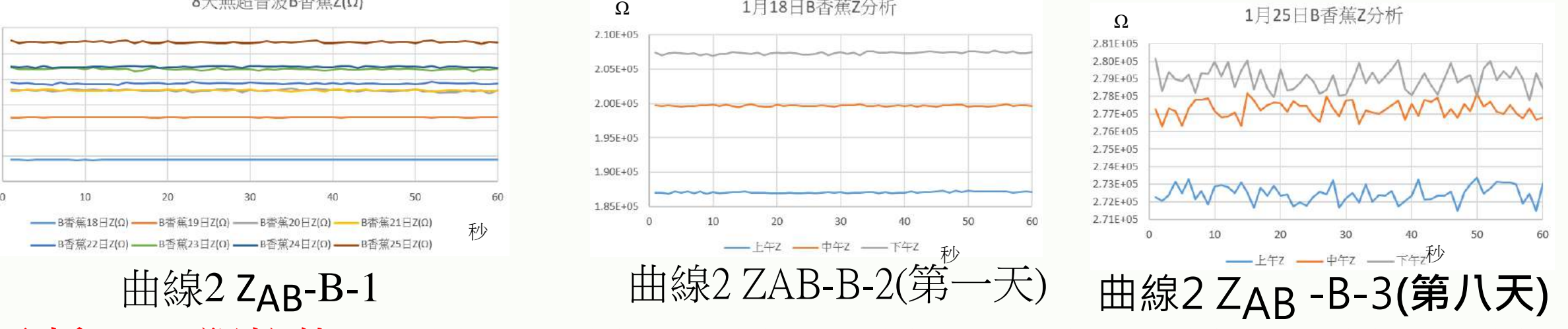
(三)未發射超音波B香蕉Rp、Cp、RS及ZAB 測試，10月4日-9日實驗1至實驗3(60秒測試)

1. Rp



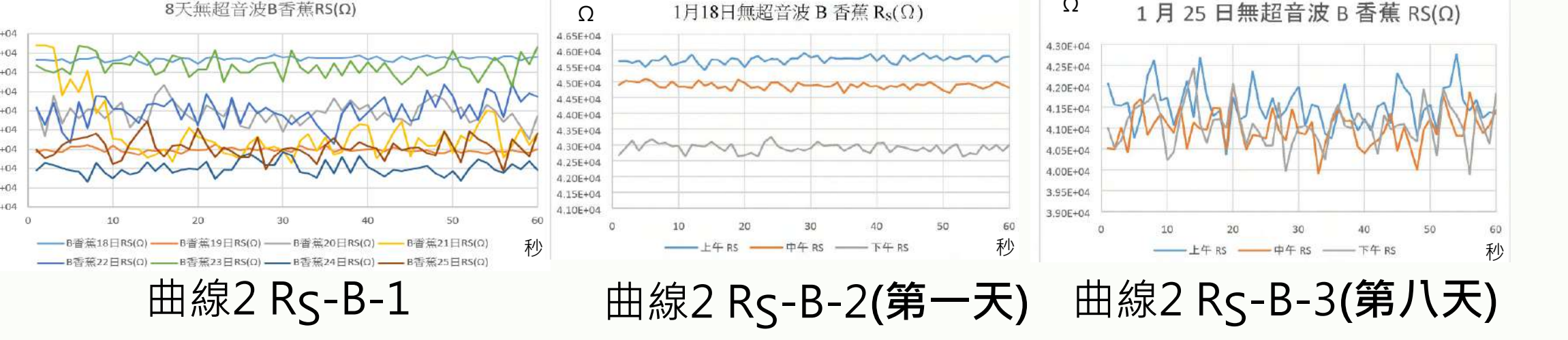
分析：RP電阻值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日，22日 近21日

2 ZAB



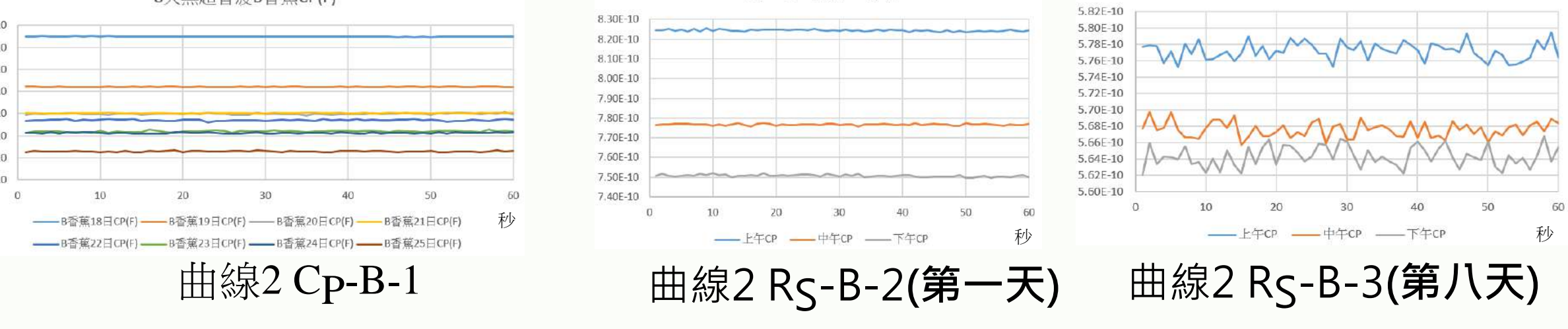
分析：Z_{AB}阻抗值：25日 > 24日 > 23日 > 22日 > 21日 > 20日 > 19日 > 18日

3. RS



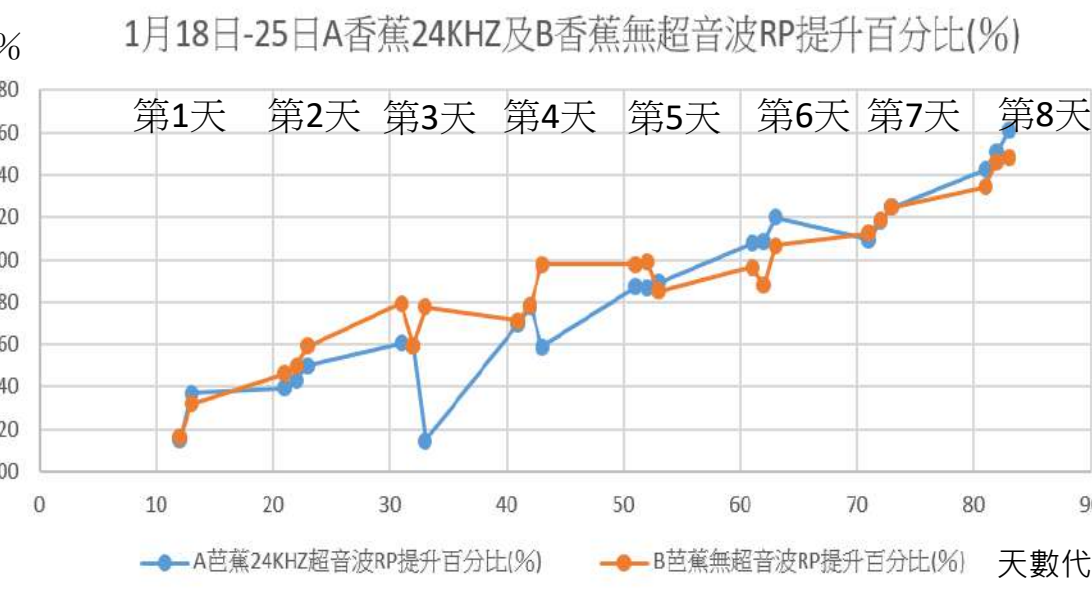
分析：RS電阻值：18日 > 23日 > 22日 > 20日 > 21日 > 25日 > 19日 > 24日

4. Cp



分析：Cp電容值：18日 > 19日 > 20日 近21日 > 22日 > 23日 > 24日 > 25日

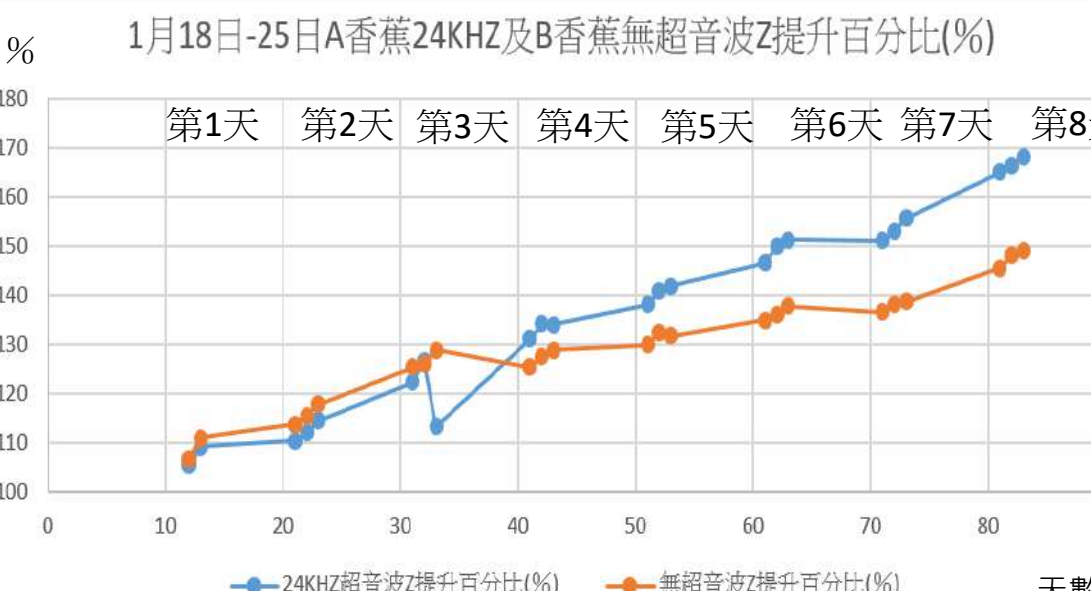
(四)發射超音波A香蕉與未發射超音波B香蕉Rp、Cp、RS及ZAB 值，以18日上午為準值做百分比分析



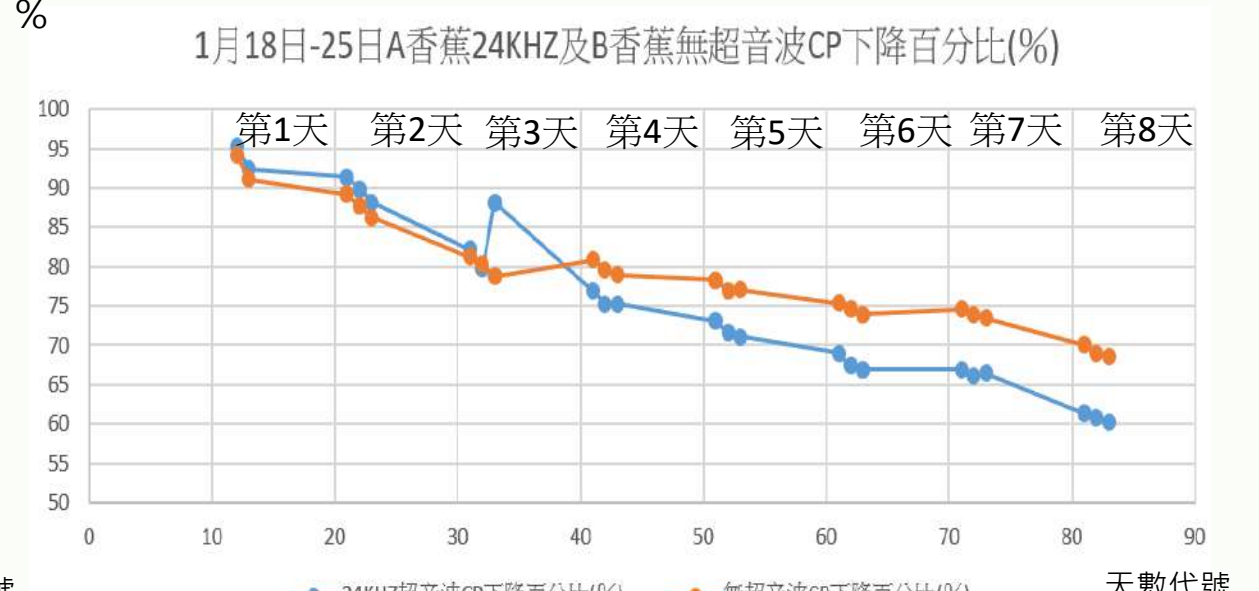
分析：Rp 電阻值變化百分比A香蕉與B香蕉接近。但A仍高於B



分析：RS 電阻值變化提升百分比A香蕉高於B香蕉(電阻值是變小)，表示超音波有影響。



分析：Z_{AB} 阻抗值變化提升百分比A香蕉高於B香蕉，表示超音波有影響。



分析：Cp 電容值變化下降百分比A香蕉高於B香蕉，表示超音波有影響。

三、超音波催化箱設計(分四個面向發射超音波)

(一)控制裝置設計方塊圖

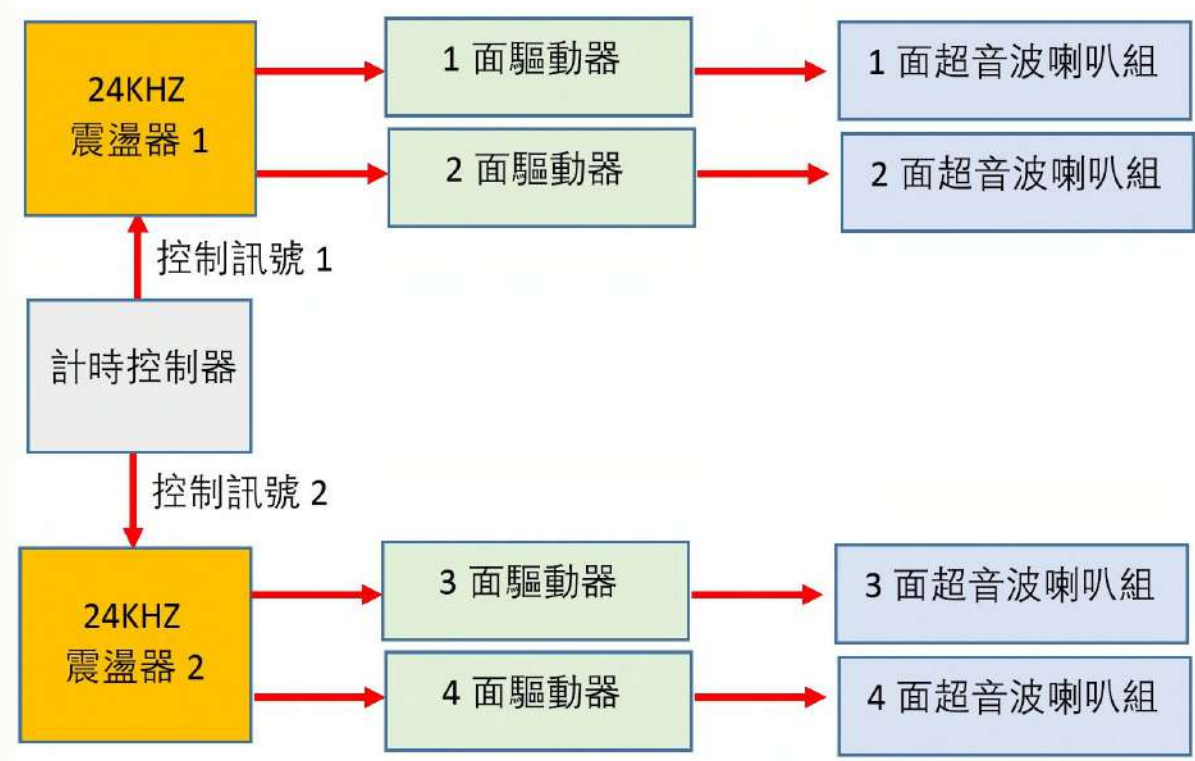
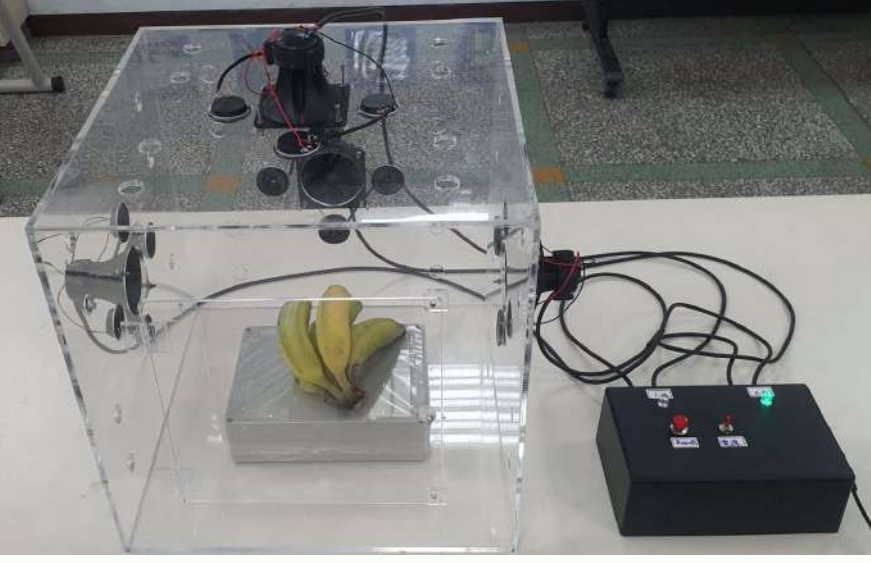
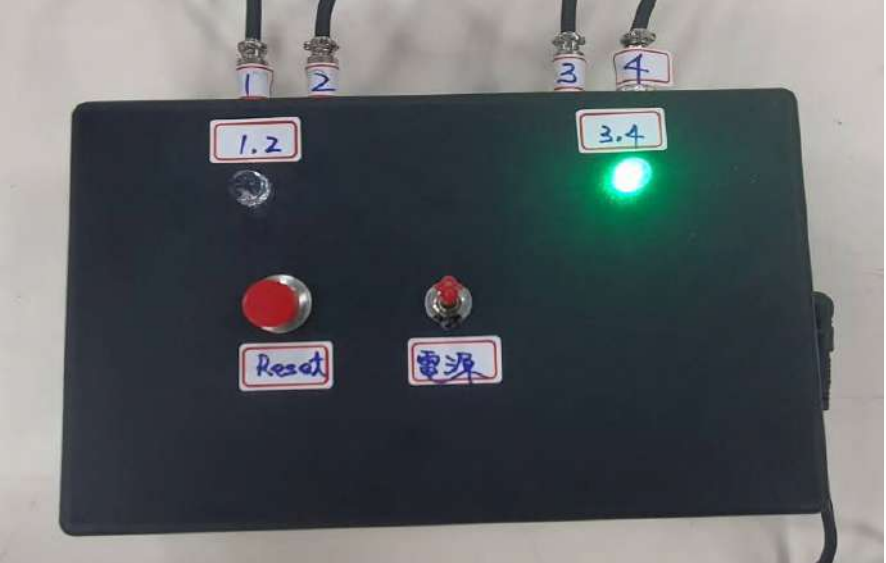


圖30 控制裝置設計方塊圖(作者自行繪製)

(二)實際作品



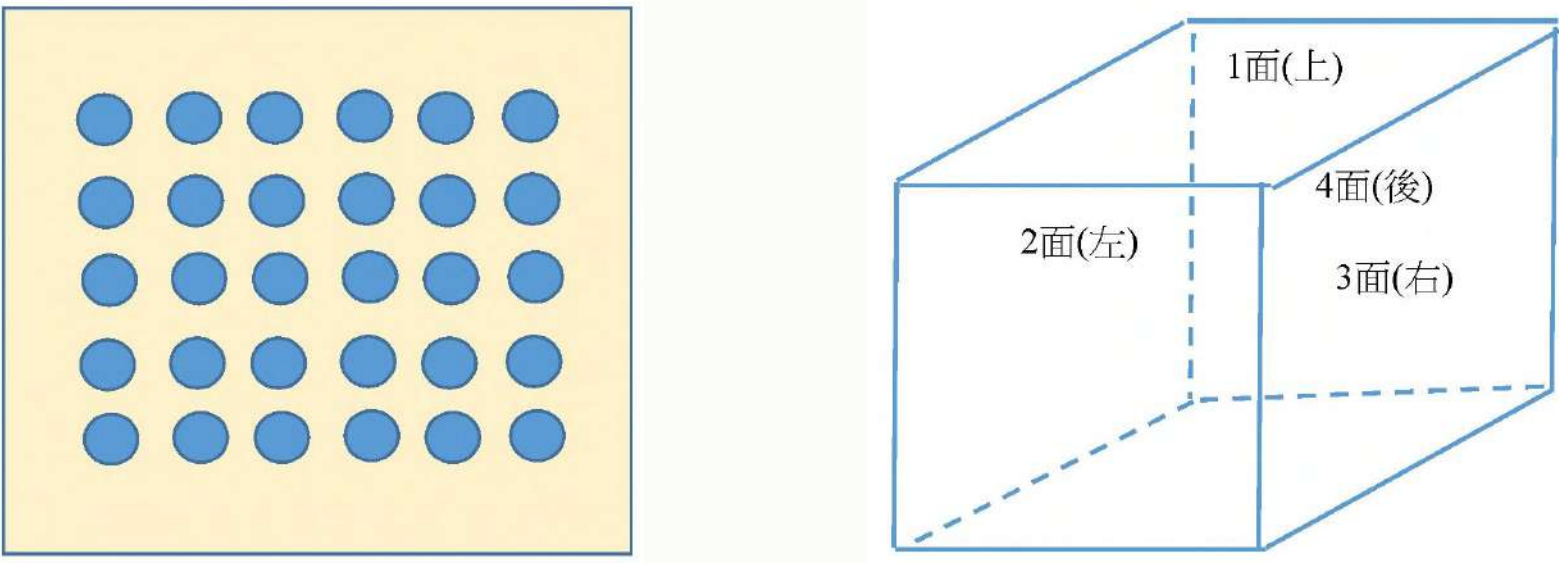
(A)左邊是由4面均由1個大超音波喇叭及4個中型超音波組成，右邊是超音波發射面相控制器



(B)控制器綠燈亮表示第3及第4面發射超音波

圖31 超音波催熟箱(作者自行拍攝)

(三)超音波催熟室示意圖



(A)牆面超音波陣列示意圖(B) 四個牆面設計示意圖

圖32. 超音波催熟室(作者自行繪製)

陸、結論

本研究運用非破壞式阻抗檢測法，檢測記錄芭蕉及香蕉從第1天青蕉開始到成熟情況(芭蕉6天及香蕉8天)，其中Z_{AB}與Rp值均與國外研究變化一樣，而我們多做了有加超音波與無超音波芭蕉及香蕉成熟阻抗值提升率比率比較，也證實超音波有加速芭蕉及香蕉酵素催化作用，其電阻與阻抗值百分比提升率高於無超音波芭蕉及香蕉，建構小型超音波催熟箱作呼吸躍變型水果催熟用，減少使用化學氣體催熟方式，並申請專利。(我們用「超音波催熟水果」關鍵字查中華民國專利得到[檢索無結果])