

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

(鄉土)教材獎

030503

以太陽視運動軌跡探討農地種電

學校名稱：彰化縣立彰興國民中學

| | |
|---|-----------------------------|
| 作者： 國一 陳弈全 國一 陳宥安 國一 李承宥 | 指導老師： 陳俊仁 楊賀鈞 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：太陽能發電、太陽視運動軌跡、與農爭地

摘要

近年來全球大力推廣太陽能發電，台灣太陽能板數量急遽上升，然而也逐漸衍生出「與農爭地」問題。我們以太陽視運動軌跡來探討如何架設太陽能板才能使太陽能發電和農業生產能夠共存共榮。我們發現農地種電時所架設太陽能板應採用斑馬線方式排列，且應朝向正南方。太陽能板寬度與架設間隔距離之和越小，其所需架設高度可越低。若以市面常見太陽能板尺寸而言，在太陽能板遮蔽率 30%、40%與 50%情況下，可得出最低架設高度均低於 3 公尺，確實可適用於棚架與溫室，極具可行性。同時我們也發展出一太陽能板架設高度儀，使農民能夠輕易計算出太陽能板應架設的高度，能夠確實改善「與農爭地」這一現象，促使太陽能發電與農業更有可能共存。

壹、研究動機

隨著太陽能科技的發展以及對環境品質的要求越來越高，彰化到處各地都看到太陽能發電系統的架設，小的從幾十瓦的太陽能路燈，到數十千瓦的校舍屋頂，乃至彰濱的 100 百萬瓦[1]。隨著可合法裝置太陽能發電的屋頂越來越小，農地或魚塢上架設太陽能發電系統變為必要考量。目前台灣已有多處農地或魚塢上架設太陽能發電系統，但延伸出“與農爭地”的問題。探究其根本原因在於架設太陽能板會遮住陽光，使太陽能板下方無法進行農業生產，僅太陽能板間隔中才有機會進行農業生產，大大降低可種植面積與生產效率[2]-[4]。

所以，本研究想依據太陽視運動軌跡來探討如何架設太陽能板，達到同時可同時兼具太陽能發電與農業生產。本研究除了同時使用數值計算(電子試算表 Excel)與縮小模型量測方式來探討在不同太陽能板寬度與間隔距離下，其架設高度為多少，才能確保能地上每個地方之累積日照量均一致，使農業生產成為可行。

貳、研究目的

- 一、 探討太陽視運動軌跡與太陽照射角度之關係。
- 二、 探討太陽照射角度與太陽能板遮蔽之關係。
- 三、 探討太陽能板寬度、間隔距離與架設高度對累積日照量的影響。
- 四、 探討如何求得太陽能板最佳架設高度，確保可兼顧太陽能發電與農業生產。
- 五、 設計太陽能板架設標示儀，使業者與農民能輕易地架設正確高度，確保可兼顧太陽能發電與農業生產。

參、研究設備及器材

| | | | | | |
|--------|---|------|---|------|---|
| 照度計 |  | 指南針 |  | 地球儀 |  |
| 鐵架 |  | 量角器 |  | 電子羅盤 |  |
| 木板 |  | 自製模型 |  | GPS |  |
| 農地種電模型 |  | 控制板 |  <p> 紅外線感測器、轉角器、數位開關 其他類比訊號感測器 超音波感測器 WiFi通訊 GPS全球定位 藍牙 超音波感測器 WiFi通訊 GPS全球定位 其他類比訊號感測器 紅外線感測器、轉角器、數位開關 </p> <p> 影像處理模組、LCD螢幕 3D印表機、電子羅盤 PM2.5、顏色感測器 直流馬達 電源 直流馬達 </p> | | |

肆、研究過程與方法

一、研究步驟

如圖 3-1 所示為本研究流程與步驟。首先，收集相關資料並研讀之，主要是學習所需使用的數學知識、天文知識與電腦軟體工具。接著，探討太陽光線入射角與太陽能板遮蔽之關係，以求得一整天太陽軌跡下之累積日照量。接下來，以電腦數值運算模擬探討不同太陽能板架設下之影響與結果，更進一步探討太陽能板寬度、架設間隔距離與架設高度之關係，並得出最低所需太陽能板架設高度。最後，實際模擬架設一農地重電系統，實際量測光照量並與電腦數值比較之，用以得出太陽能板最佳架設高度之系統方法，並據此研製太陽能板架設高度儀，協助業者與農民能輕易地架設正確高度，確保可兼顧太陽能發電與農業生產。

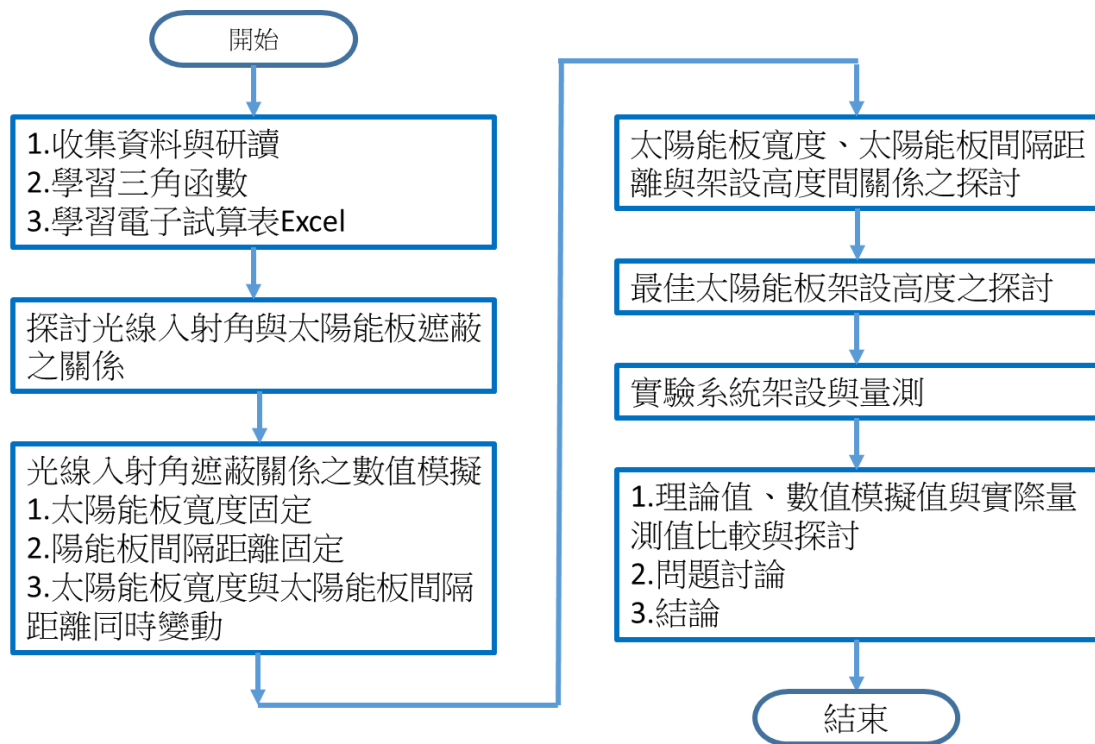


圖 3-1 研究流程與步驟

二、研究背景

隨著能源轉型的必要發展，世界各國均投入相當多的人力與資源進行綠電的建置與發展。其中又以太陽能發電最為普及，累計至 2018 年，裝置容量已超過 500GW，並快速繼續增加，單單 2018 年一年就新架設約 100GW 的容量，如圖 3-2 所示[5]。100GW 有多大？若以台灣核一廠 0.66GW 發電機組來算，2018 年一年全世界的太陽發電裝置容量約等於 151 座核一廠 0.66MW 發電機組。而台灣 2016 年太陽發電裝置容量約 1.2GW，

預計到 2025 年會成長到 20GW[6]。依估計要發展 20GW 的太陽能估計至少要 2 萬公頃的面積。

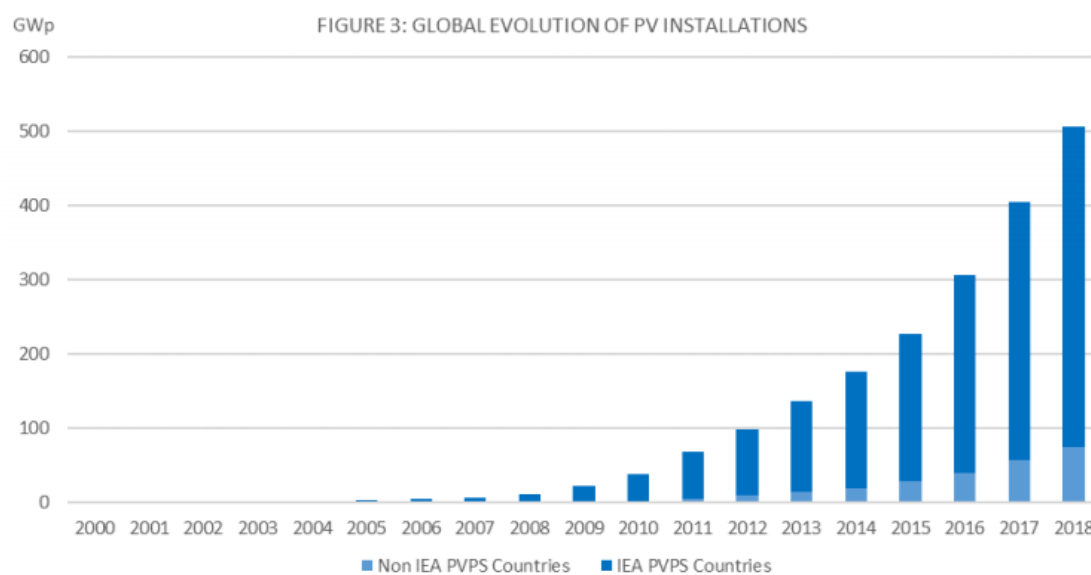


圖 3-2 全球太陽能發電系統裝置容量歷史圖

隨著可合法裝置太陽能發電的屋頂越來越小，農地或魚塭上架設太陽能發電系統變為必要考量。台灣農委會於 2013 年 10 月修訂〈申請農業用地作農業設施容許使用審查辦法〉，特定農業區與一般農業區的農業生產設施可以申設附屬的綠能設施，許多農地上紛紛搭起一塊塊的太陽能板。日本農林水產省則早在同年 3 月底發布農地可利用支柱裝設太陽能板的「一時轉用許可」，期待藉由「農電共享 (Solar sharing)」，讓佔了日本農地 8% 休耕地能夠獲得有效利用、貢獻農村經濟[2]。目前台灣已有多處農地或魚塭上架設太陽能發電系統，但延伸出“與農爭地”的問題。探究其根本原因在於架設太陽能板會遮住陽光，嚴重影響靠陽光進行光合作用的植物生長，如圖 3-3 所示。



圖 3-3 太陽能板下方植物生長情形

這看似一場零和遊戲，魚與熊掌不可兼得。然亞利桑那大學(University of Arizona)葛瑞格·巴倫-蓋佛(Greg Barron-Gafford)教授領導的一項研究指出，有一些關係可以為太陽能產業和農業都帶來利益[3]。農試所鳳山分所指出，光電溫室上方具有遮蔽，會影響葉菜類生長，因此選擇光需求相對較低的蔬菜種類及品種相當重要。高度也是必須考量的重點，農試所合作的光電溫室高度達 6 公尺，由於實驗的光電溫室高度足夠，光線進入後沒有明顯的陰影處，因此對作物影響不大，太陽能板遮蔽率 40%及 30%也無太大差異[4]。但相對一般溫室高度不會超過 3 公尺，在空曠的農田中，6 公尺高的溫室真的太高了，受風面積大，很容易被強風或颱風所吹垮。故本研究想探討太陽能板寬度、間隔距離與架設高度對累積日照量的影響，期能在盡可能壓低太陽能板架設高度，使光電溫室變為可行。

三、理論介紹

如圖 3-4(a)所示為一太陽能發電系統中太陽能板與光照之示意圖。可看出，位於太陽能板下方靠中間位置，會因太陽能板之遮蔽而不易曬到太陽，致使植物生長不佳，甚至無法生長。第一個解決方式是縮小太陽能板寬度，如圖 3-4(b)所示。故建議農地之太陽能板不應採傳統區塊架設方式，如圖 3-5(a)所示，而應採斑馬線架設方式，如圖 3-5(b)所示，如此可有效縮小太陽能板架設寬度。基於上述理由，本計畫擬以斑馬線架設方式為討論對象。第二個解決方式是增加太陽能板架設高度，如圖 3-4(c)所示。故本研究探討太陽能板寬度、間隔距離與架設高度對累積日照量的影響，找出太陽能板架設高度，使農地種電變為可行。

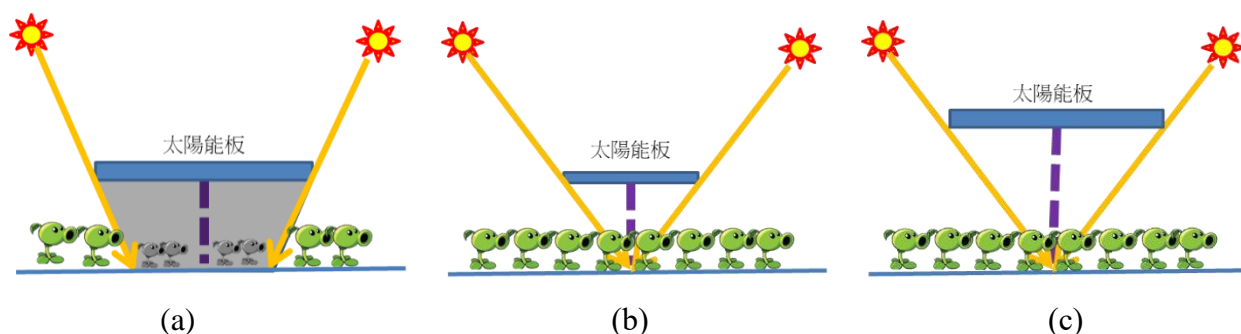


圖 3-4 (a)太陽能板下方曬不到陽光、(b) 縮小太陽能板寬度、(c) 增加太陽能板架設高度

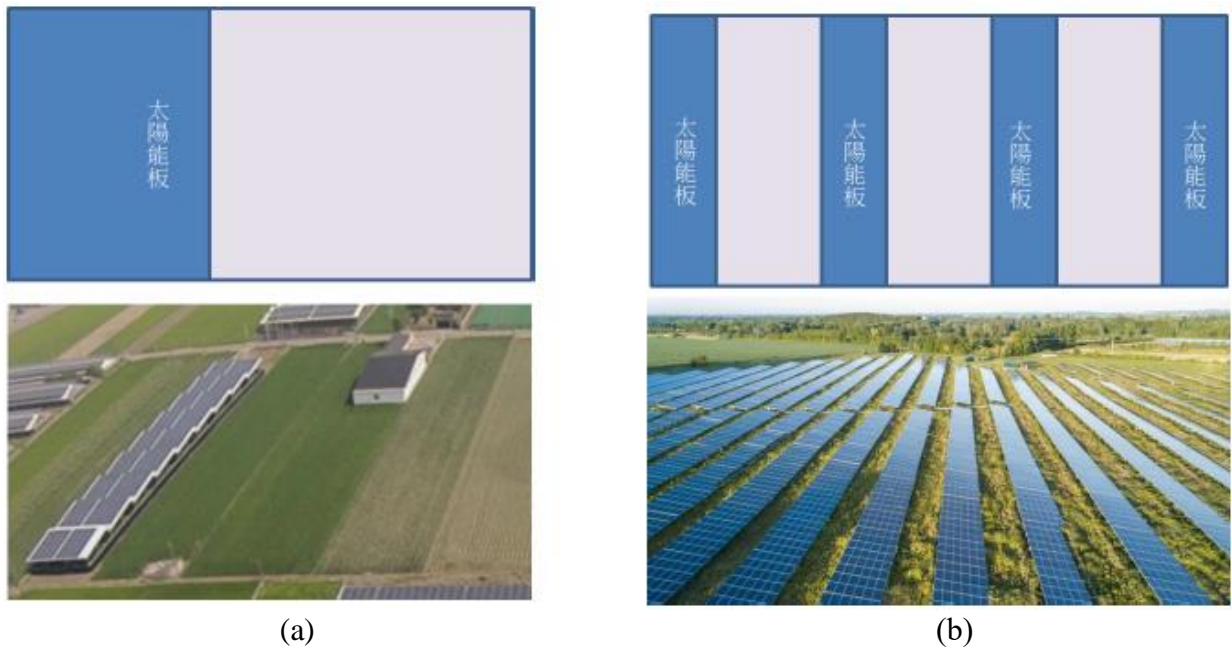


圖 3-5 (a) 區塊架設方式與(b) 斑馬線架設方式

如圖 3-6 所示為本研究太陽能架設之示意圖，假設其架設為南北向，太陽能板的寬度定為 L_s ，太陽能板的架設間距定為 L_d 。而太陽能板正下方會是日累積日照量最低的地方，而太陽能板間隔中間會是日累積日照量最高的地方。也就是說太陽能板正下方的農作物會因日照不足而生長不好，甚至無法耕種。相反的，太陽能板間隔中間就無此問題。所以本研究要探討如何架設太陽能板，使太陽能板正下方與太陽能板間隔中間的日累積日照量是相同的，進而解決太陽能發電與農地耕種無法並存之問題。

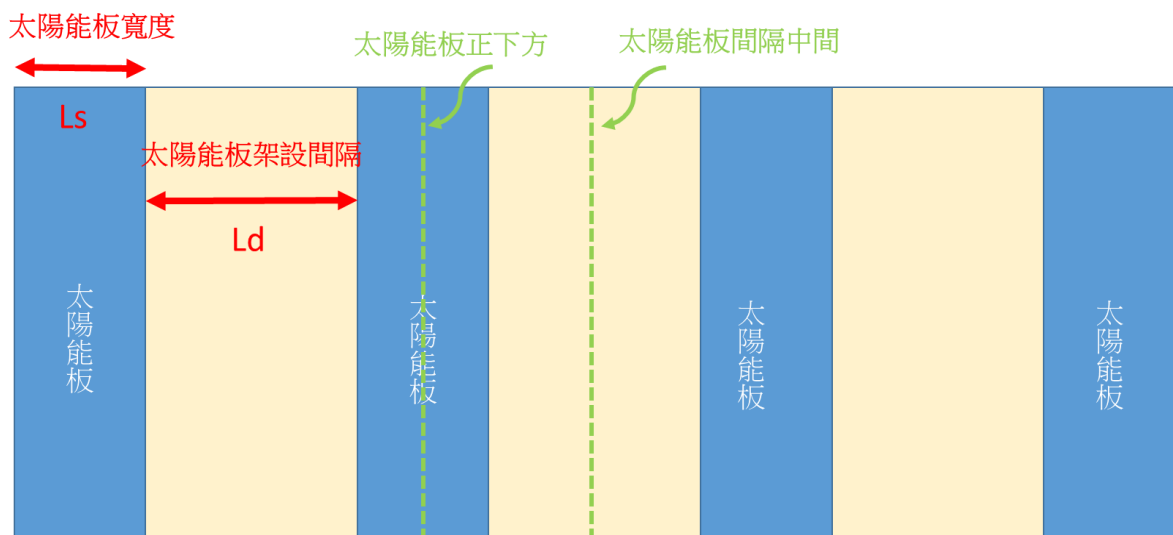


圖 3-6 本研究太陽能架設之示意圖

圖 3-7 為太陽能板架設的示意圖，其架設高度為 H ，A 點為太陽能板中間，B 點為太陽能板中間正下方。從圖可看出，當太陽光與直線 AB 夾角介於 0 度 (即太陽在太陽能板正上方) 與 θ_1 度時，太陽能板中間正下方 B 點處，無陽光照射。如圖 3-8(a) 所示，當太陽光與直線 AB 夾角等於 θ_1 度時，太陽能板中間正下方 B 點處開始會照到陽光。如圖 3-8(b) 所示，當太陽光與直線 AB 夾角等於 θ_2 度時，太陽能板中間正下方 B 點處開始不會照到陽光。也就是，太陽光與直線 AB 夾角於 $[\theta_1, \theta_2]$ 區間時，太陽能板中間正下方 B 點處會有陽光照射。

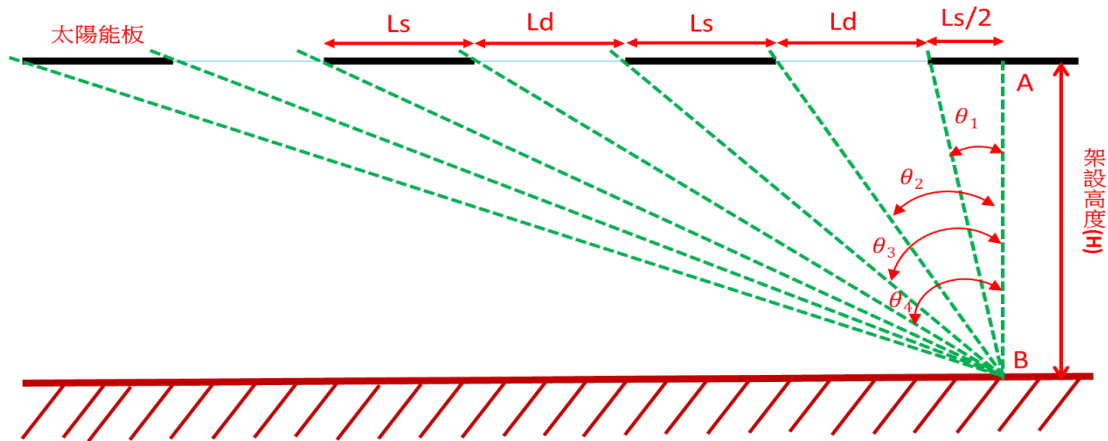


圖 3-7 太陽能板架設的示意圖

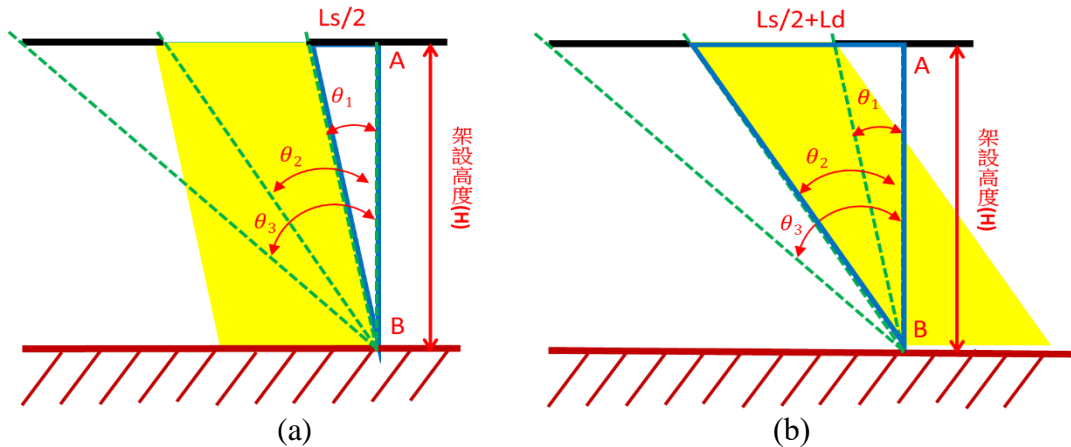


圖 3-8 太陽光與直線 AB 夾角等於 θ_1 度(a)與 θ_2 度(b)時之照射情形

觀察圖 3-8(a) 中之藍色三角形可看出，其可使用三角函數正切 \tan 關係來描述太陽能板的寬度為 L_s 、太陽能板的架設間距為 L_d 、太陽能板架設高度 H 與角度之關係 θ_1 如下式所示：

$$\tan(\theta_1) = \frac{L_s/2}{H} \quad (3-1)$$

觀察圖 3-8 (b)中之藍色三角形可看出，其可使用三角函數正切 \tan 關係來描述太陽能板的寬度為 L_s 、太陽能板的架設間距為 L_d 、太陽能板架設高度 H 與角度之關係 θ_2 如下式所示：

$$\tan(\theta_2) = \frac{\frac{L_s}{2} + L_d}{H} \quad (3-2)$$

同理，如圖 3-9 所示，當太陽光與直線 AB 夾角等於 θ_3 度時，太陽能板中間正下方 B 點處開始會照到陽光。如圖 3-10 所示，而當太陽光與直線 AB 夾角等於 θ_4 度時，太陽能板中間正下方 B 點處開始不會照到陽光。也就是，太陽光與直線 AB 夾角於 $[\theta_3, \theta_4]$ 區間時，太陽能板中間正下方 B 點處會有陽光照射。觀察圖 3-9 與 3-10 中之藍色三角形可看出，太陽能板的寬度為 L_s 、太陽能板的架設間距為 L_d 、太陽能板架設高度 H 與角度之關係 θ_3 與 θ_4 如下式所示：

$$\tan(\theta_3) = \frac{\frac{L_s}{2} + L_d + L_s}{H}, \quad (3-3)$$

$$\tan(\theta_4) = \frac{\frac{L_s}{2} + L_d + L_s + L_d}{H} \quad (3-4)$$

依此類推可整理出，當太陽光與直線 AB 夾角介於 θ_{2k-1} 度與 θ_{2k} 度時($k \in N$)，太陽能板中間正下方 B 點處，有陽光照射。當太陽光與直線 AB 夾角介於 θ_{2k} 度與 θ_{2k+1} 度時($k \in N$)，太陽能板中間正下方 B 點處，無陽光照射，如圖 3-11 所示。也就是說，如圖 3-12 所示，在角度區間 $[\theta_1, \theta_2], [\theta_3, \theta_4], [\theta_5, \theta_6], [\theta_7, \theta_8], \dots$ 太陽能板正下方可曬到太陽，將上述角度區間的日照功率累積起來即可得到太陽能板正下方之日照量。

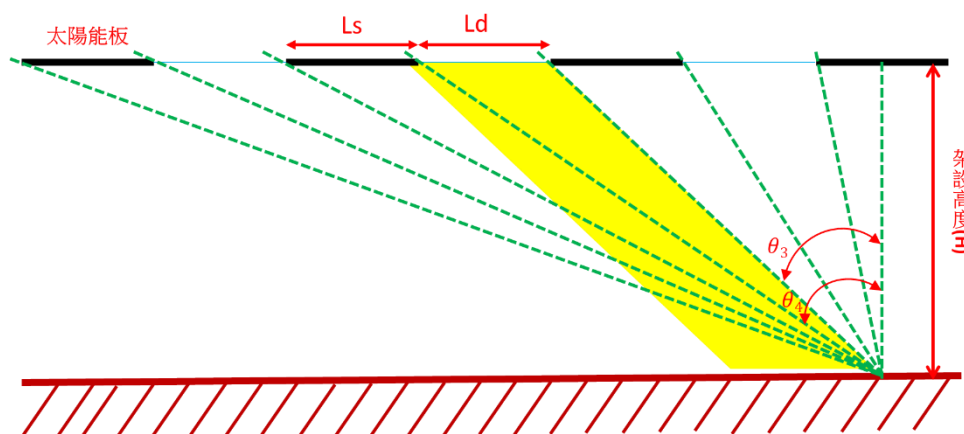


圖 3-9 陽光與直線 AB 夾角等於 θ_3 時之照射情形

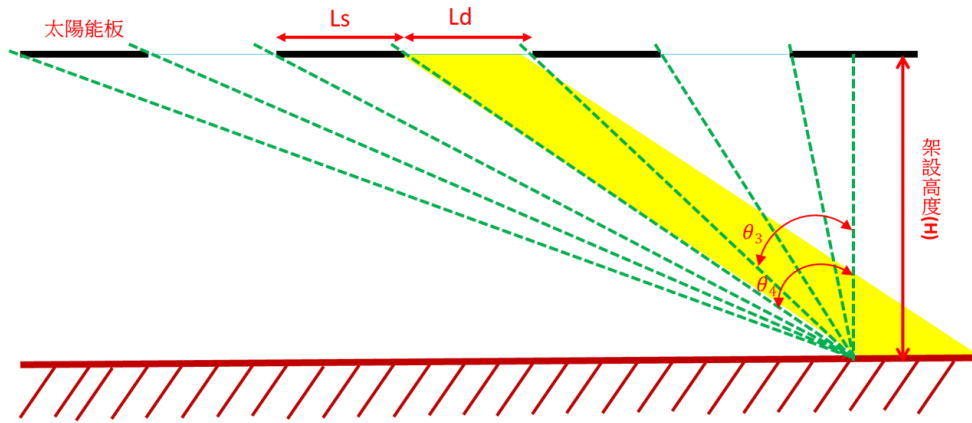


圖 3-10 陽光與直線 AB 夾角等於 θ_4 時之照射情形

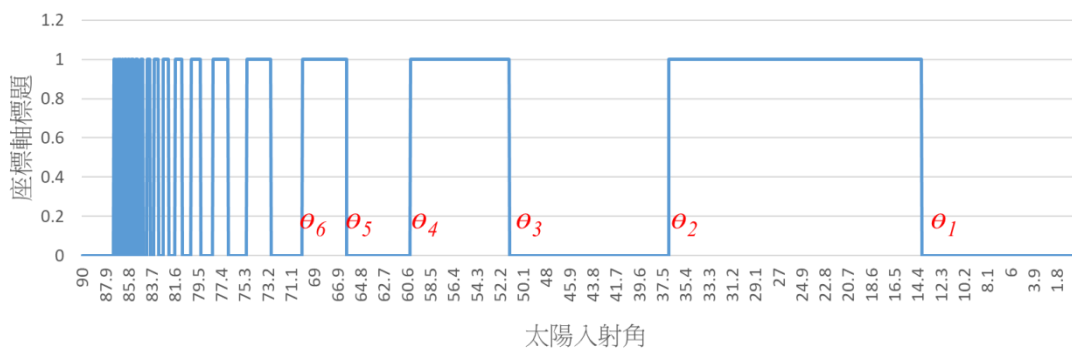


圖 3-11 太陽能板中間正下方 B 點陽光照射情形(1 表有照射到，0 表無照射到)

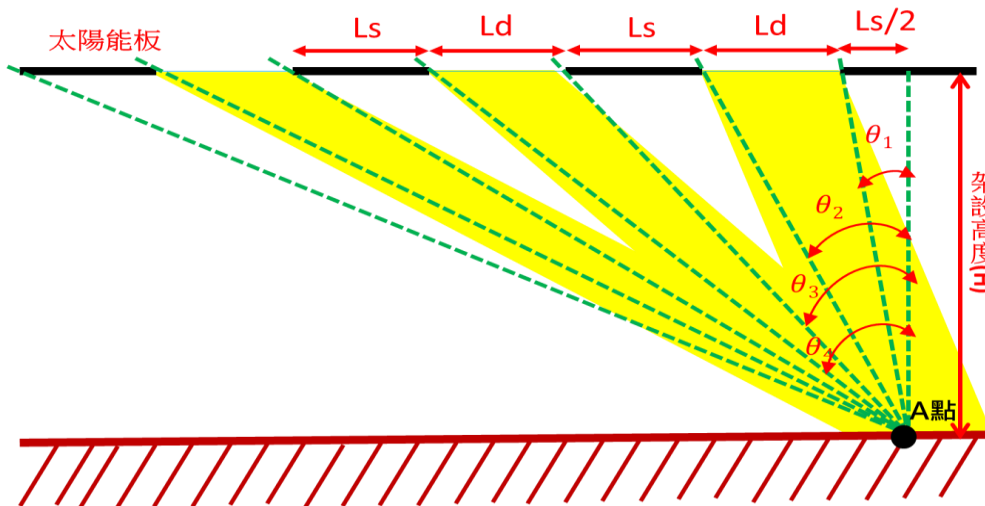


圖 3-12 太陽能板中間正下方 B 點處日照情況

已有一些文獻探討光線入射角對太陽能發電效率之影響[7]，可得知太陽的實際照度 L_{act} 表示為：

$$L_{act} = 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN}) \quad (3-5)$$

其中 1000 是指太陽光的能量在地球表面視為 1000 W/m^2 、 θ_{EW} 為東西向太陽入射角、 θ_{SN} 為南北向太陽入射角。所以太陽能板中間正下方 B 點處之日照量會如圖 3-13(a)所示。同理，重複一遍上述的探討可以得出太陽能板間隔中間正下方之日照量會如圖 3-13(b)所示。如此，只要將圖 3-13(a)與圖 3-13(b)的日照量累積起來，就可分別得出太陽能板中間正下方與太陽能板間隔中間正下方之日累積日照量。依據此數據即可探討太陽能板面向正南方架設情況下，如何求得太陽能板最佳架設高度。

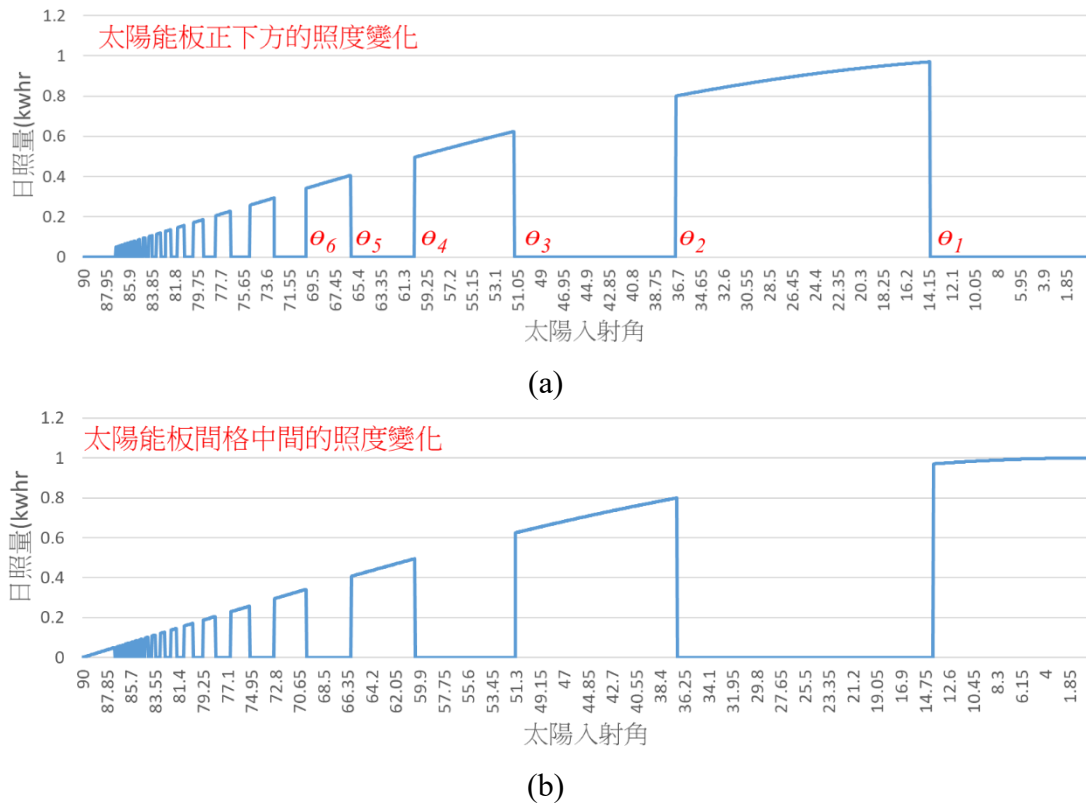


圖 3-13 (a)太陽能板中間正下方日照量和(b)太陽能板間隔中間正下方之日照量

本計畫採用太陽東西向入射角 θ_{EW} 與南北向入射角 θ_{SN} 來表示太陽的位置(θ_{EW} , θ_{SN})來描述太陽視運動軌跡。圖 3-14 為台灣在春分、夏至、秋分、冬至時於日出、中天與日落時之太陽入射角座標。每天東西向入射角 θ_{EW} 從 90° 變化至 -90° ，而南北向入射角 θ_{SN} 與東西向會隨季節不同而改變。以台灣所在北緯 23.5° 位置而言，南北向入射角 θ_{SN} 變化量為 23.5° ，且於中天時其南北向入射角 θ_{SN} 最大。又東西向入射角 θ_{EW} 與南北向入射角 θ_{SN} 呈餘弦 \cos 關係[7]，故南北向入射角一天的變化可表示為 $23.5 \cdot \cos(\theta_{EW})$ 。而當天於中天時其南北向入射角 $\theta_{SN,0}$ 可由天文資料之中天仰角 $\theta_{A,0}$ 得出，因中天仰角 $\theta_{A,0}$ 與中天南北向入射角 $\theta_{SN,0}$ 為互餘關係($\theta_{SN,0} = 90 - \theta_{A,0}$)。故南北向入射角 θ_{SN} 可描述為：

$$\theta_{SN} = \theta_{SN,0} - 23.5 + 23.5 \cdot \cos(\theta_{EW}) \quad (3-6)$$

例如，在夏至時其中天仰角 $\theta_{A,0}$ 為 90° ，故其中天南北向入射角 $\theta_{SN,0}$ 為 0° ，當天南北向入射角 θ_{SN} 描述為 $-23.5 + 23.5 \cdot \cos(\theta_{EW})$ 。

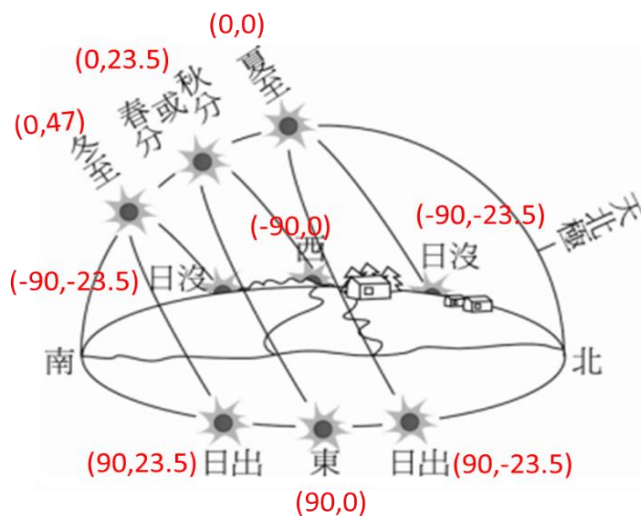


圖 3-14 台灣位置之太陽視運動軌跡與太陽入射角座標

四、模型製作

為驗證所提方法之可行性與正確性，我們使用電腦製圖與雷射切割機設計並製作了一個模型，並觀察並記錄太陽能板正下方與架設間隔中央之照射情況。首先使用 MetalCut 軟體繪製所要加工之尺寸，如圖 3-15(a)所示。接著，使用雷射切割機進行切割與組裝，如圖 3-15 (b) 所示。最後完成模型之正視圖與俯視圖如圖 3-15 (c) 與 3-15 (c)所示。

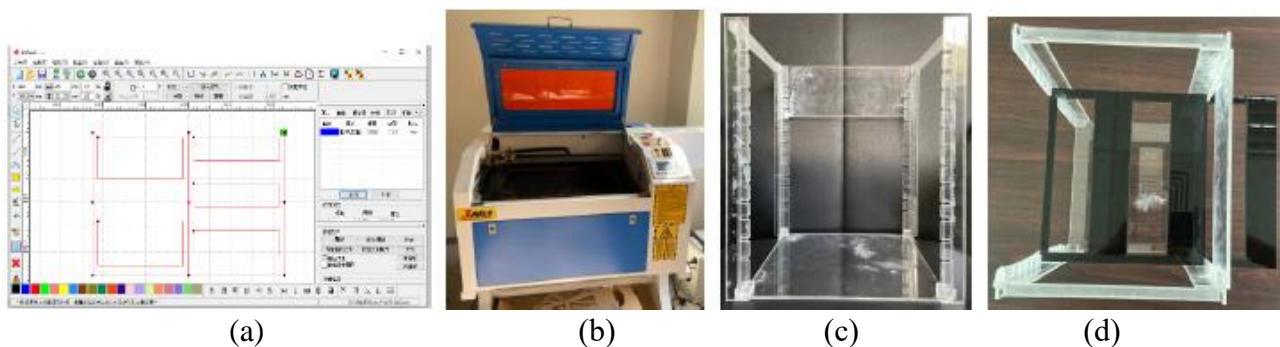


圖 3-15 太陽運行軌跡模型：(a)電腦製圖、(b)雷射切割、(c)正視圖、(d) 俯視圖

五、架農地種電實驗系統

為驗證所提方法之可行性與正確性，我們以珍珠板與木板當太陽能板，實際架設模擬農地種電之情況，並使用照度計量測記錄太陽能板正下方與架設間隔中央之照度，如圖 3-16 所示，最後使用電子試算表 Excel 繪製其變化及其累積發電量。

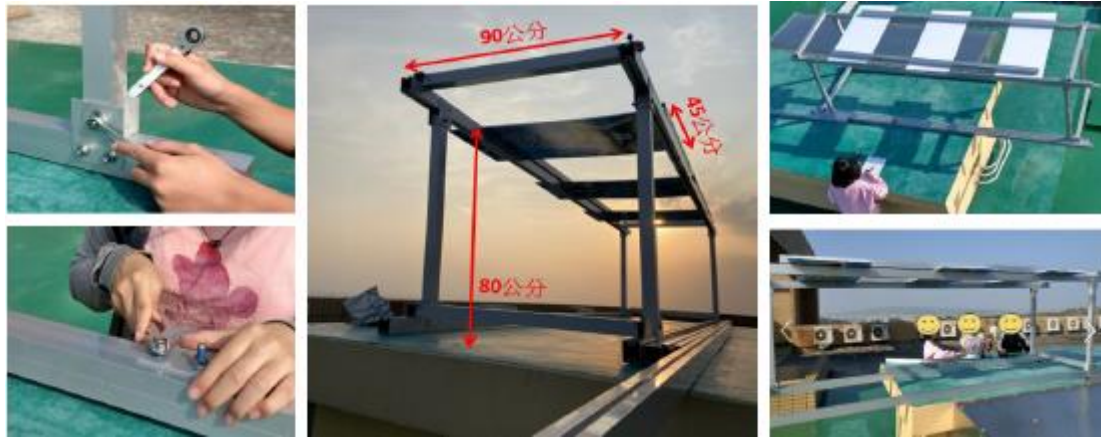


圖 3-16 實際架設太陽能發電系統

六、數值計算與實驗資料整理

為方便計算，使用 Excel 來計算一天太陽能板正下方與架設間隔中央之累計發電量。首先，使用如(3-1)-(3-4)式等算出在不同高度底下的太陽光入射角 θ_1 、 θ_2 、...，如圖 3-17 所示。圖中角度算式 $\text{ATAN}(\text{SUM}(\$A\$8:\$A10)/(\$G\$7))*180/3.141596$ 說明如下：ATAN 為反正切函數 \tan^{-1} ，用以求出 $\text{SUM}(\$A\$8:\$A10)/(\$G\$7)$ 之正切角，其中 $\text{SUM}(\$A\$8:\$A10)$ 為太陽在東西向之投影距離， $G\$7$ 為太陽能板架設高度。最後乘上 $180/3.1425926$ 是將徑度量轉為度度量。接著，使用(3-5)式算出不同太陽入射角下之光照度，如圖 3-18 所示。圖中角度算式 $\text{COS}(\text{RADIANS}(\$A88))*\text{COS}(\text{RADIANS}(-23.5+23.5*\text{COS}(\text{RADIANS}(\$A88))))$ 說明如下：RADIANS 函數是將度度量轉為徑度量供 COS 函數使用，而 $23.5+23.5*\text{COS}(\text{RADIANS}(\$A88))$ 是用來求出南北向入射角，其中 $A88$ 為太陽東西入射角。最後，將每角度的日照量累積起來，即可得出不同架設高度的累積日照量，如圖 3-19 所示。圖中累積日照量計算式多乘上 $0.05/15$ 是因為太陽東西向入射角每一度走 $1/15$ 小時，又本 Excel 試算表是每 0.05 度計算一次。

| G10 | | =ATAN(SUM(\$A\$8:\$A10)/(\$G\$7))*180/3.141596 | | | | | | | | | |
|-----|------|--|---|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | 架設方位角 | | 180 度 | | | | | | | |
| 3 | | 太陽能板寬度(cm) | | 100 公分 | | | | | | | |
| 4 | | 太陽能板架設間隔(cm) | | 200 公分 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | 不同架設高度 | |
| 7 | | | | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| 8 | Ls/2 | 50 | 1 | 68.19851787 | 51.34014 | 39.80553 | 32.00535 | 26.56502 | 22.61984 | 19.6538 | 17.35401 |
| 9 | Ld | 200 | 2 | 85.42598774 | 80.90964 | 76.50419 | 72.25525 | 68.19852 | 64.35893 | 60.75111 | 57.3807 |
| 10 | Ls | 100 | 3 | 86.72941969 | 83.48011 | 80.27234 | 77.11122 | 74.05453 | 71.07528 | 68.19852 | 65.43276 |
| 11 | | 200 | 4 | 87.91734107 | 85.84027 | 83.77408 | 81.72402 | 79.69507 | 77.6919 | 75.71882 | 73.77973 |
| 12 | | 100 | 5 | 88.23751499 | 86.47845 | 84.72601 | 82.98341 | 81.25375 | 79.54001 | 77.84498 | 76.17127 |

圖 3-17 電子試算表 Excel 畫面：不同架設高度之太陽光入射角

| G88 | | 光照度計算式 =工作表1!G137*COS(RADIANS(\$A88))*COS(RADIANS(-23.5+23.5*COS(RADIANS(\$A88)))) | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | |
| 83 | 85.95 | 4.05 | 0.065558 | 0 | 0 | 0.065558 | 0 | 0.065558 | 0 | 0.065558 | 0.065558 | 0 | |
| 84 | 85.9 | 4.1 | 0.066375 | 0 | 0 | 0.066375 | 0 | 0.066375 | 0 | 0 | 0.066375 | 0 | |
| 85 | 85.85 | 4.15 | 0.067193 | 0 | 0 | 0.067193 | 0 | 0.067193 | 0.067193 | 0 | 0.067193 | 0 | |
| 86 | 85.8 | 東 | 4.2 | 0.068011 | 0.068011 | 0 | 0.068011 | 0 | 0 | 0.068011 | 0 | 0.068011 | |
| 87 | 85.75 | 西 | 4.25 | 0.068829 | 0.068829 | 0 | 0.068829 | 0.068829 | 0 | 0.068829 | 0 | 0.068829 | |
| 88 | 85.7 | 向 | 4.3 | 0.069647 | 0.069647 | 0 | 0.069647 | 0.069647 | 0 | 0.069647 | 0.069647 | 0 | |
| 89 | 85.65 | 人 | 4.35 | 0.070465 | 0.070465 | 0 | 0.070465 | 0.070465 | 0 | 0 | 0.070465 | 0 | |
| 90 | 85.6 | 射 | 4.4 | 0.071284 | 0.071284 | 0 | 0 | 0.071284 | 0 | 0 | 0.071284 | 0.071284 | |
| 91 | 85.55 | 角 | 4.45 | 0.072102 | 0.072102 | 0 | 0 | 0.072102 | 0.072102 | 0 | 0.072102 | 0.072102 | |
| 92 | 85.5 | | 4.5 | 0.072921 | 0.072921 | 0 | 0 | 0.072921 | 0.072921 | 0 | 0 | 0.072921 | |
| 93 | 85.45 | | 4.55 | 0.07374 | 0.07374 | 0 | 0 | 0.07374 | 0.07374 | 0 | 0 | 0.07374 | |
| 94 | 85.4 | | 4.6 | 0 | 0.074559 | 0.074559 | 0 | 0 | 0.074559 | 0.074559 | 0 | 0 | |
| 95 | 85.35 | | 4.65 | 0 | 0.075378 | 0.075378 | 0 | 0 | 0.075378 | 0.075378 | 0 | 0 | |
| 96 | 85.3 | | 4.7 | 0 | 0.076198 | 0.076198 | 0 | 0 | 0.076198 | 0.076198 | 0 | 0 | |

圖 3-18 電子試算表 Excel 畫面：不同太陽入射角下之光照度

| E1804 | | 累積日照量計算式 =(0.05/15)*SUM(E2:E1802) | | | | | | | | | |
|-------|------|-----------------------------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | |
| 1794 | 0.4 | 89.6 | 0.999975631 | 0.999976 | 0.999976 | 0.999976 | 0.999976 | 0.999976 | 0.999976 | 0.999976 | |
| 1795 | 0.35 | 東 | 89.65 | 0.999981342 | 0.999981 | 0.999981 | 0.999981 | 0.999981 | 0.999981 | 0.999981 | |
| 1796 | 0.3 | 西 | 89.7 | 0.999986292 | 0.999986 | 0.999986 | 0.999986 | 0.999986 | 0.999986 | 0.999986 | |
| 1797 | 0.25 | 向 | 89.75 | 0.999990481 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | |
| 1798 | 0.2 | 人 | 89.8 | 0.999993908 | 0.999994 | 0.999994 | 0.999994 | 0.999994 | 0.999994 | 0.999994 | |
| 1799 | 0.15 | 射 | 89.85 | 0.999996573 | 0.999997 | 0.999997 | 0.999997 | 0.999997 | 0.999997 | 0.999997 | |
| 1800 | 0.1 | 角 | 89.9 | 0.999998477 | 0.999998 | 0.999998 | 0.999998 | 0.999998 | 0.999998 | 0.999998 | |
| 1801 | 0.05 | | 89.95 | 0.999999619 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 1802 | 0 | | 90 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 1803 | | | | | | | | | | | |
| 1804 | | | 3.55342394 | 3.06925 | 2.640593 | 2.343213 | 2.156487 | 2.047352 | 1.984532 | 1.945486 | |
| 1805 | | | | | | | | | | | |

圖 3-19 電子試算表 Excel 畫面：累積照射能量

如圖 3-20 為最終數值計算之繪圖結果，其中橙色曲線表示太陽能板正下方的累積照射能量，藍色曲線表示太陽能板正下方的累積照射能量。可看出當架設高度約為 200 公分時，太陽能板正下方的累積照射能量同於太陽能板間格中間之累積照射能量。

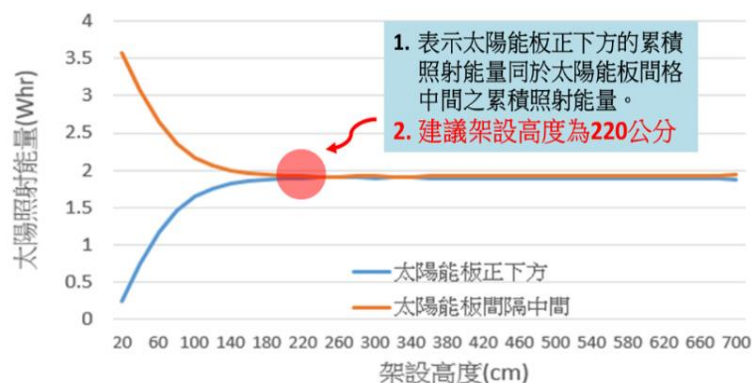


圖 3-20 太陽能板寬度 100 公分在架設間隔 100 公分下之數值計算結果

七、農地種電太陽板架設高度儀

最後我們研製農地種電太陽板架設高度儀，系統方塊圖如圖 3-21 所示，其主要由 Arduino 控制器(BrainGo 控制板)、GPS、電子羅盤、LCD 顯示器、鍵盤與紅外線距離感測器所構成。系統由 GPS 得知所在位置之北緯，由電子羅盤得知太陽能板所面朝之方位角，並根據北緯、方位角與輸入之太陽能板寬度與架設間隔距裡來運算出太陽能最佳架設高度，並顯示在 LCD 螢幕上。當農地種電太陽系統架設時，亦可使 BrainGo 紅外線距離感測器來量測所架設之間隔與高度是否正確。

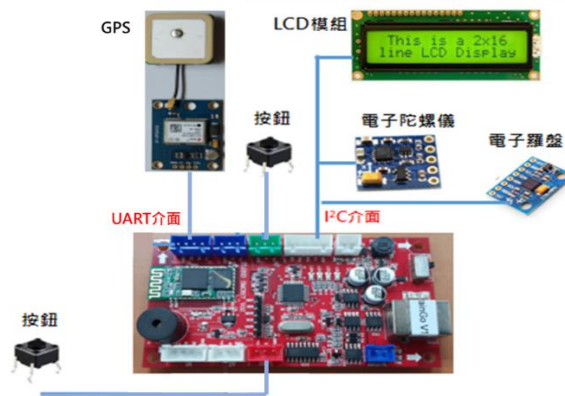


圖 3-21 農地種電太陽板架設高度儀之系統方塊圖

伍、研究過程與探討

一、太陽光入射角探討

如圖 4-1(a)所示，使用投影機模擬太陽，並使用所製作的模型來進行太陽光入射角與太陽能板遮蔽關係之觀測。實驗結果如圖 4-1(b)與 4-1(c)所示，紅線所標示的是應該投影的位置，然可看出其有明顯之出距。此說明使用投影機模擬太陽，無法模擬太陽入射角與太陽能板遮蔽之關係。

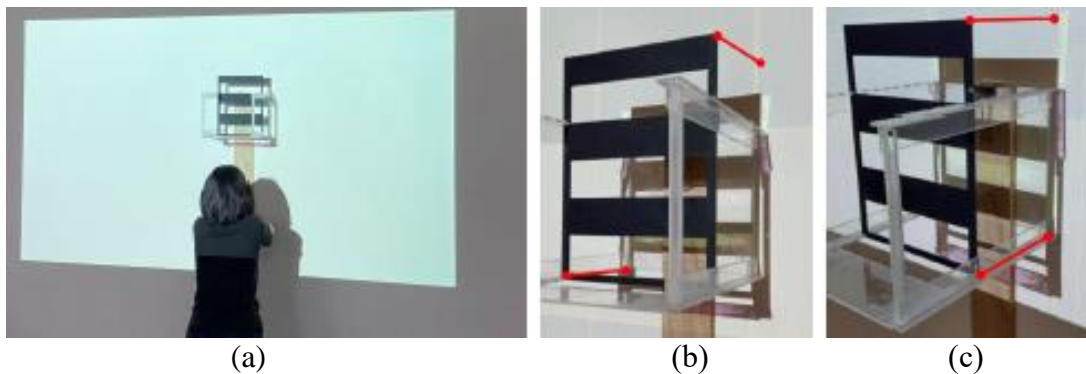


圖 4-1 (a)使用投影機模擬太陽實驗之示意圖，(b)、(c)為使用投影機模擬太陽實驗之結果

探討：使用投影機模擬太陽看起來可得到大面積均勻的光，很像日照。另因地球距離太陽約 1.5 億公里，因此照射到地球的光線可視為為平行光。然如圖 4-2 所示為實驗進行之示意圖，可看出投影機光線明顯非平行光不同於太陽光。故改為至太陽下進行太陽光入射角之觀測與紀錄，如圖 4-3 所示。量測前須將模型面向太陽光方向，用以模擬太陽能板面向正南方，其可藉由觀察影子來確定之，如圖 4-3(a)所示。接著即可進行觀察與量測，如圖 4-3(b)所示，其量測結果如表 4-2 所示。從表 4-2 中可看出，在不同高度下所測之入射角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 與 θ_4 分別與理論值比較，其誤差均小於 3.2 度以內。此說明本研究所提太陽光入射角計算方法正確且確實可用於後續探討。

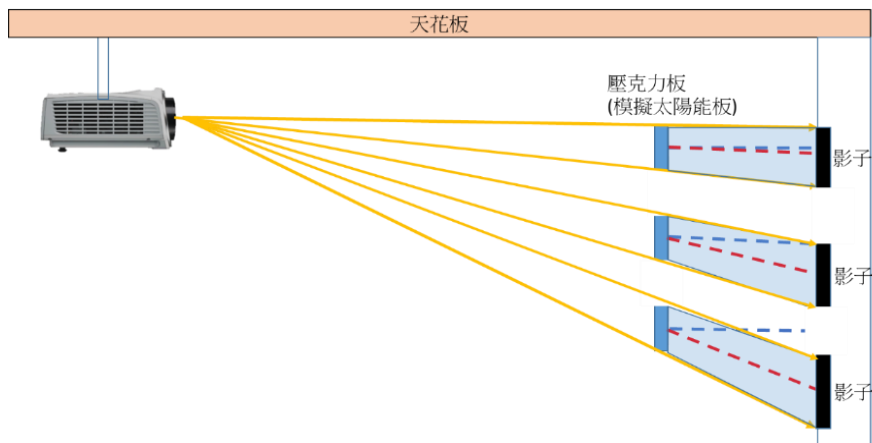


圖 4-2 使用投影機模擬太陽實驗之示意圖

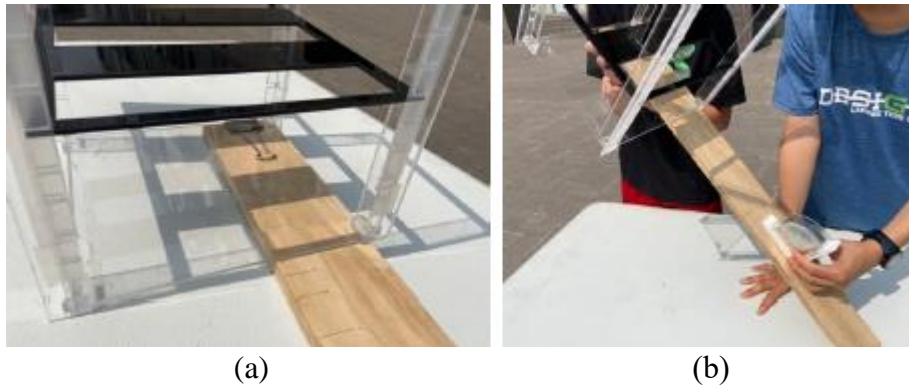


圖 4-3 太陽下進行光入射角量測：(a)面向太陽調整、(b)觀測角度

表 4-1 太陽下進行光入射角量測結果

| 寬度 50mm 間隔 50mm | θ_1 | | | θ_2 | | | θ_3 | | | θ_4 | | |
|--------------------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|
| | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 |
| 高度 | | | | | | | | | | | | |
| 43mm | 30.2° | 30° | -0.2° | 60.2° | 57° | -3.2° | 71.0° | 70° | -1° | 76.2° | 73 | -3.2 |
| 89mm | 15.6° | 14° | -1.6° | 40.0° | 40° | 0° | 54.5° | 52° | -2.5° | 63.0° | 60° | -3° |
| 123mm | 11.5° | 11° | 0.5° | 31.4° | 31° | -0.4° | 45.5° | 44° | -1.5° | 54.9° | 54° | -0.9° |
| 163mm | 8.7° | 8° | -0.7° | 24.7° | 25° | 0.3° | 37.5° | 35° | -2.5° | 47° | 45° | -2° |
| 203mm | 7.0° | 6° | -1.0° | 20.3° | 19° | -1.3° | 31.6° | 30° | -1.6° | 40.7° | 38° | -2.7° |
| 243mm | 5.9° | 5° | -0.9° | 17.2° | 15° | -2.2° | 27.2° | 24° | -3.2° | 35.7° | 33° | -2.7° |

二、光照量實驗與探討

在知道太陽入射角座標(θ_{EW}, θ_{SN})下，可以使用投影法，如圖 4-4 所示，其可用面積之比與三角函數表示出有效日照量L，單位為W/m²。

$$L = 1000 \cdot \frac{L \cdot L}{L_1 \cdot L_2} = 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN}) \quad (4-1)$$

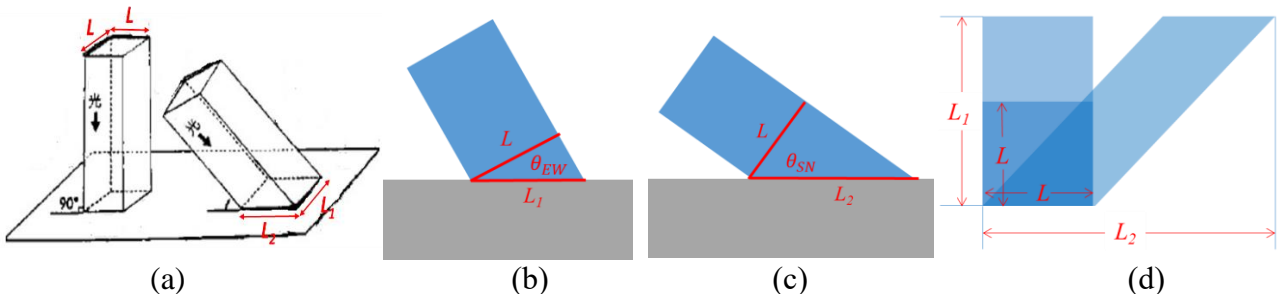


圖 4-4 投影法：(a)示意圖、(b)東西向日射角示意圖、(c)南北向日射角示意圖、(d)投影圖

圖 4-5 所示，為使用一個邊長 10 公分之中空正方柱體來進行實驗，並在正方柱體中放入肥皂泡。圖 4-5(a)為中空正方柱體垂直放入水槽中，模擬光線垂直照射，確實可看

出其如圖 4-4(d)所示，形狀為一正方形。圖 4-5(b)為中空正方柱體傾斜一角度放入水槽中，模擬光線東西向入射角為 θ_{EW} ，確實可看出其如圖 4-4(d)所示，形狀為一長方形。圖 4-5(b)為中空正方柱體傾斜放入水槽中，模擬光線東西向入射角為 θ_{EW} ，南北向入射角為 θ_{SN} ，確實可看出其如圖 4-4(d)所示，形狀為一平行四邊型。

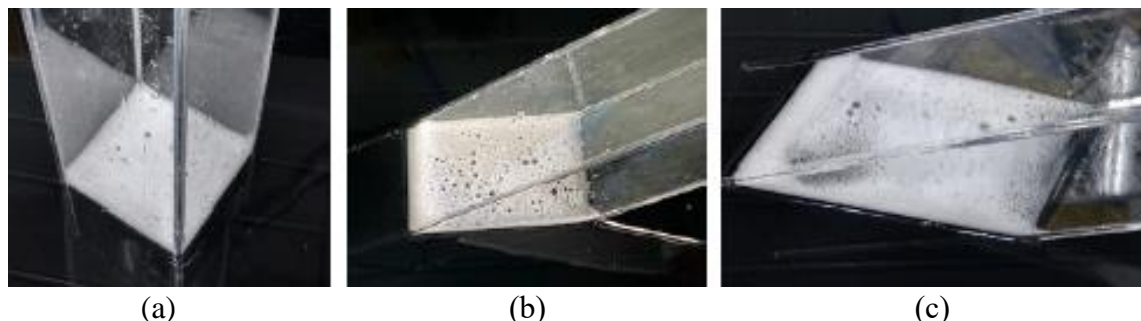


圖 4-5 模擬光線照射面積：(a) 垂直照射、(b)傾斜西向入射角 θ_{EW} 、(c) 西向入射角為 θ_{EW} 與南北向入射角 θ_{SN}

接著，使用投影機模擬太陽，並使用三腳架左右方向旋轉來模擬東西向太陽入射角 θ_{EW} 變化。實驗場景如圖 4-6(a)所示，並量測其光照量且紀錄之。圖 4-6(b)為其理論計算值(藍色線)與實驗量測值(橘色線)之曲線圖。圖中之理論值公式如(4-2)式所示，因使用投影機當作太陽，公式(3-5)中之 $1000W/m^2$ 需修正為 $23.8W/m^2$ ，且南北向入射角 θ_{SN} 為 0 。從圖 4-5(b)可看出，理論計算值與實驗量測值是一致的，說明本研究採用之公式正確可行。

$$L = 23.8 \cdot \cos(\theta_{EW}) \quad (4-2)$$

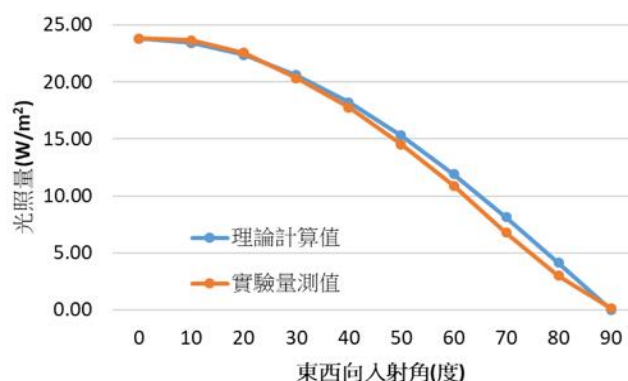


圖 4-6 (a)光照量實驗場景及其(b)實驗結果

三、相同寬度之太陽能板架設不同間隔距離之比較

圖 4-7 為使用相同寬度 L_s 之太陽能板來架設不同間隔距離 L_d 之示意圖。而圖 4-8

為太陽能板寬度 100 公分，架設間隔分別為 100 公分、200 公分、300 公分與 500 公分之 Excel 模擬計算結果，在此模擬中，我們假設中天時之南北下入射角為 0 度。由圖中可看出，不管哪一個間隔距離 L_d 當架設高度達到一定高時，太陽能板正下方的累積照射能量會同於太陽能板間格中間之累積照射能量。此說明了本研究所提方法的可行性，也就是太陽能正下方的植物會與太陽能板架設間隔中間的植物生長一樣，有機會兼顧太陽能發電與農業生產。為觀察一年四季不同太陽能板架設間隔距離 L_d 之影響，我們針對春分/秋分、夏至與冬至進行模擬。模擬得出之架設高度以及日累積日照量表列如表 4-2，並將其關係圖繪出如圖 4-9。由圖 4-9 看出，當太陽能板來架設間距越大時，累積日照越多，亦需架設更高的高度。而當夏至時，其太陽能板來架設高度最高，且累積日照最大。



圖 4-7 使用相同寬度 L_s 之太陽能板來架設不同間隔之示意圖

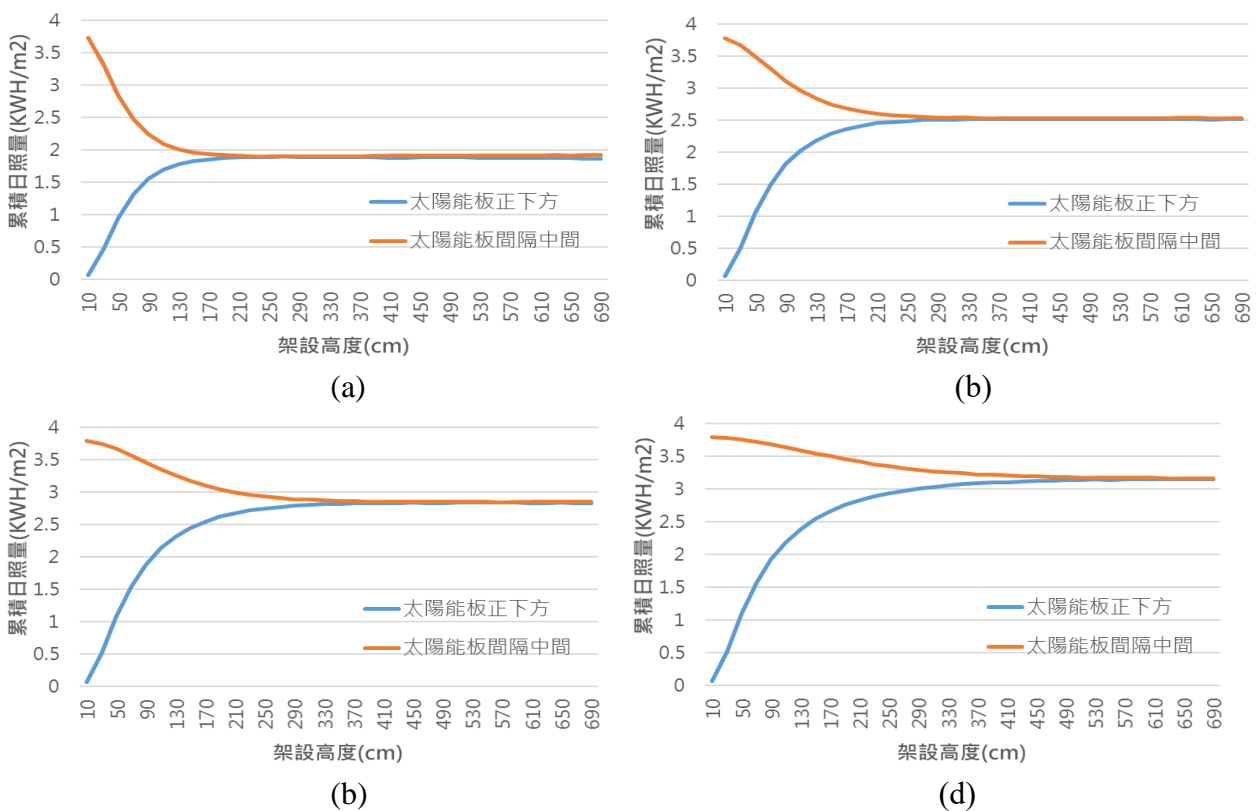


圖 4-8 為太陽能板寬度 100 公分，架設間隔分別為 100 公分、200 公分、300 公分與 500 公分之 Excel 模擬計算結果

表 4-2 太陽能板寬度 100 公分在不同架設間隔距離之比較

| Ld | 累積日照量(KWh/m ²) | | | 架設高度(cm) | | | Ld/(Ls+Ld) |
|-----|----------------------------|------|------|----------|-----|-----|------------|
| | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | |
| 50 | 1.19 | 1.25 | 0.93 | 142 | 144 | 130 | 0.33 |
| 100 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 192 | 200 | 175 | 0.50 |
| 150 | 2.15 | 2.26 | 1.68 | 243 | 254 | 216 | 0.60 |
| 200 | 2.39 | 2.51 | 1.87 | 284 | 288 | 259 | 0.67 |
| 250 | 2.56 | 2.69 | 2 | 320 | 339 | 296 | 0.71 |
| 300 | 2.69 | 2.82 | 2.1 | 368 | 379 | 324 | 0.75 |
| 350 | 2.79 | 2.93 | 2.18 | 399 | 417 | 359 | 0.78 |
| 400 | 2.87 | 3.02 | 2.25 | 436 | 453 | 396 | 0.80 |
| 450 | 2.93 | 3.08 | 2.3 | 474 | 486 | 421 | 0.82 |
| 500 | 2.99 | 3.14 | 2.34 | 507 | 535 | 457 | 0.83 |
| 550 | 3.04 | 3.19 | 2.38 | 543 | 557 | 493 | 0.85 |
| 600 | 3.07 | 3.23 | 2.41 | 567 | 597 | 521 | 0.86 |
| 650 | 3.11 | 3.27 | 2.43 | 609 | 630 | 539 | 0.87 |
| 700 | 3.14 | 3.3 | 2.46 | 636 | 660 | 577 | 0.88 |

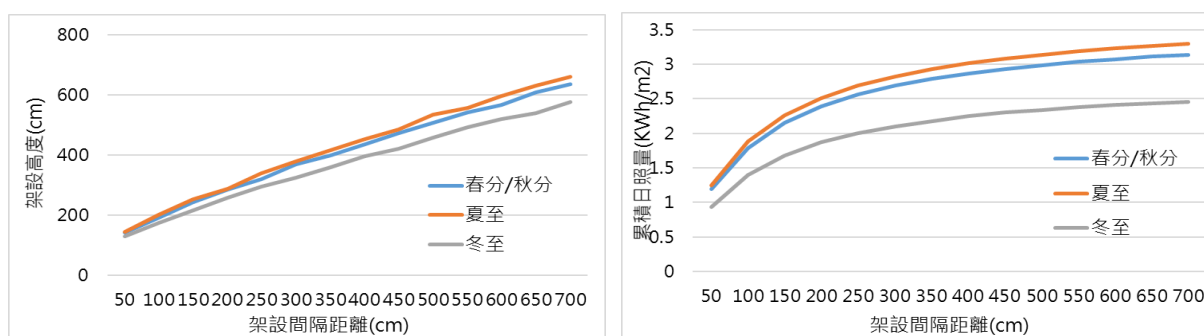


圖 4-9 (a) 太陽能板在不同架設間隔距離下之(a)所需架設高度與(b)累積日照量

四、不同寬度之太陽能板架設相同間隔距離之比較

圖 4-10 為使用不同太陽能板寬度 L_s 之太陽能板來架設相同間隔距離 L_d 之示意圖。而圖 4-11 為太陽能板架設間隔距離 100 公分，太陽能板寬度分別為 50 公分、100 公分、200 公分與 300 公分之 Excel 模擬計算結果，在此模擬中，我們假設中天時之南北下入射角為 0 度。由圖中可看出，不管哪一個太陽能板寬度 L_s ，當架設高度達到一定高時，太陽能板正下方的累積照射能量會同於太陽能板間格中間之累積照射能量。為觀察一年四季不同太陽能板寬度 L_s 之影響，我們針對春分/秋分、夏至與冬至進行模擬。模擬得出之架設高度以及日累積日照量表列如表 4-3，並將其關係圖繪出如圖 4-12。由圖 4-12 看出，當太陽能板寬度 L_s 越大時，累積日照越小，亦需架設更高的高度。而當夏至時，其太陽能板來架設高度最高，且累積日照最大。

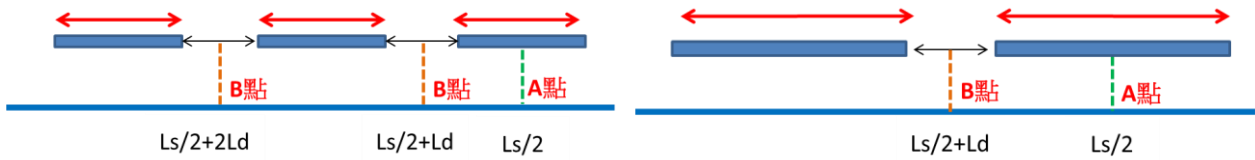


圖 4-10 使用相同寬度 L_s 之太陽能板來架設不同間隔之示意圖

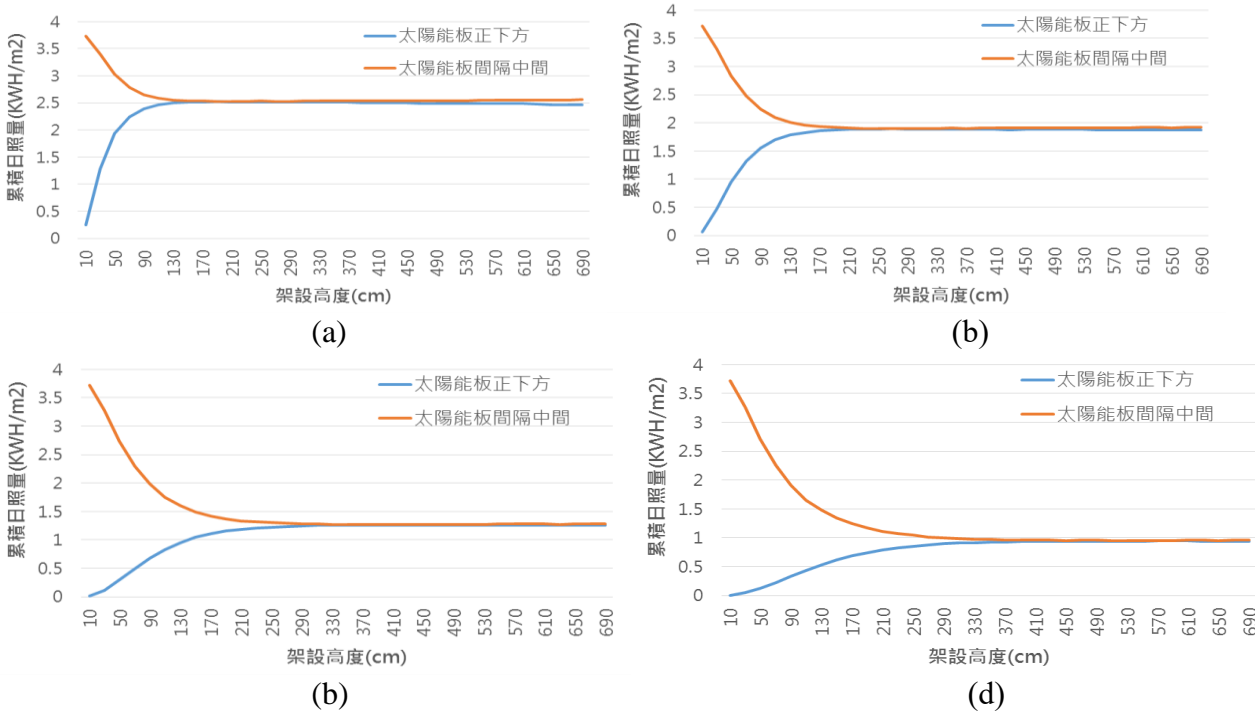


圖 4-11 為太陽能板寬度 100 公分，架設間隔分別為 50 公分、100 公分、200 公分與 300 公分之 Excel 模擬計算結果

表 4-3 太陽能板架設間隔距離 100 公分在不同太陽能板寬度之比較

| Ls(cm) | 架設高度(cm) | | | 累積日照量(KWh/m ²) | | | Ld/(Ls+Ld) |
|--------|----------|-----|-----|----------------------------|------|------|------------|
| | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | |
| 50 | 142 | 144 | 130 | 2.39 | 2.51 | 1.87 | 0.33 |
| 100 | 192 | 200 | 175 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 0.50 |
| 150 | 243 | 254 | 216 | 1.43 | 1.5 | 1.12 | 0.60 |
| 200 | 284 | 288 | 259 | 1.19 | 1.25 | 0.93 | 0.67 |
| 250 | 320 | 339 | 296 | 1.02 | 1.07 | 0.79 | 0.71 |
| 300 | 368 | 379 | 324 | 0.89 | 0.94 | 0.69 | 0.75 |
| 350 | 406 | 417 | 359 | 0.79 | 0.83 | 0.61 | 0.78 |
| 400 | 436 | 453 | 396 | 0.67 | 0.74 | 0.55 | 0.80 |
| 450 | 474 | 486 | 421 | 0.64 | 0.67 | 0.5 | 0.82 |
| 500 | 507 | 535 | 457 | 0.59 | 0.62 | 0.46 | 0.83 |
| 550 | 543 | 557 | 493 | 0.54 | 0.57 | 0.42 | 0.85 |
| 600 | 567 | 597 | 521 | 0.5 | 0.53 | 0.39 | 0.86 |
| 650 | 609 | 630 | 539 | 0.47 | 0.49 | 0.36 | 0.87 |
| 700 | 636 | 660 | 577 | 0.43 | 0.46 | 0.33 | 0.88 |

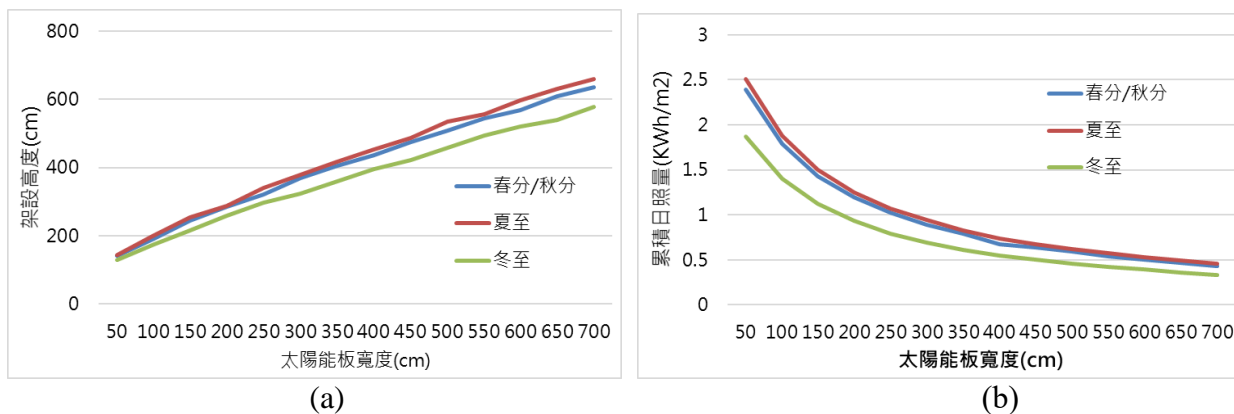


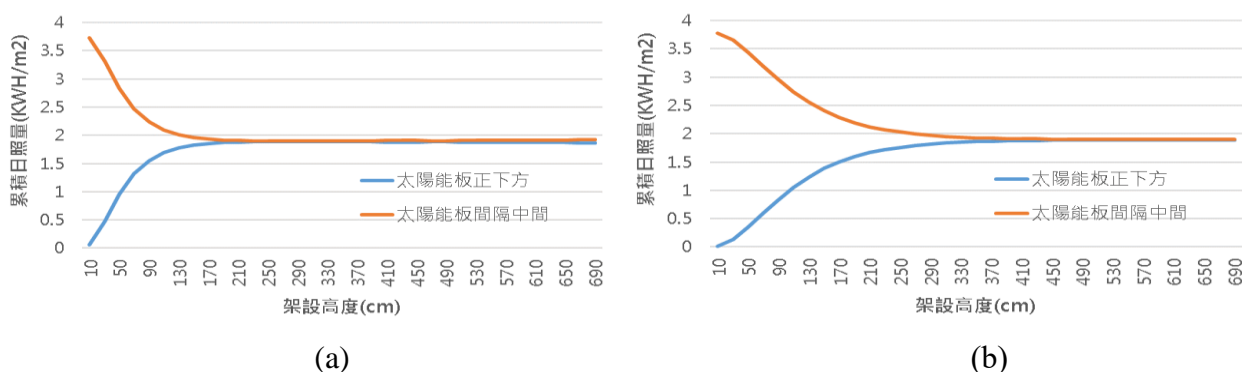
圖 4-12 不同太陽能板寬度下之(a)所需架設高度與(b)累積日照量

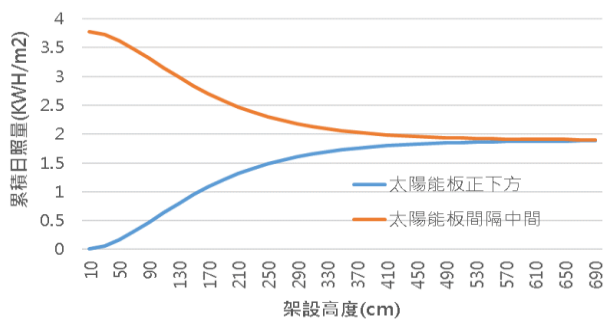
六、不同寬度之太陽能板架設不同間隔距離之比較

圖 4-13 為使用不同寬度 L_s 之太陽能板來架設不同間隔距離 L_d 之示意圖，為便於探討，在此實驗中，我們設太陽能板寬度 L_s 與架設間隔距離 L_d 相同($L_s=L_d$)。而圖 4-14 為太陽能板寬度與太陽能板架設間隔距離同時分別為 100 公分、200 公分、300 公分與 500 公分之 Excel 模擬計算結果，在此模擬中，我們假設中天時之南北下入射角為 0 度。由圖中可看出，不管哪一個太陽能板寬度與架設間隔距，當架設高度達到一定高時，太陽能板正下方的累積照射能量會同於太陽能板間格中間之累積照射能量。為觀察一年四季不同太陽能板寬度與太陽能板不同架設間隔距離之影響，我們針對春分/秋分、夏至與冬至進行模擬。模擬得出之架設高度以及日累積日照量表列如表 4-3，並將其關係圖繪出如圖 4-15。由圖 4-15 看出，當太陽能板寬度與架設間隔距離越大時，累積日照不變，但需架設更高的高度。而當夏至時，其太陽能板來架設高度最高，且累積日照最大。

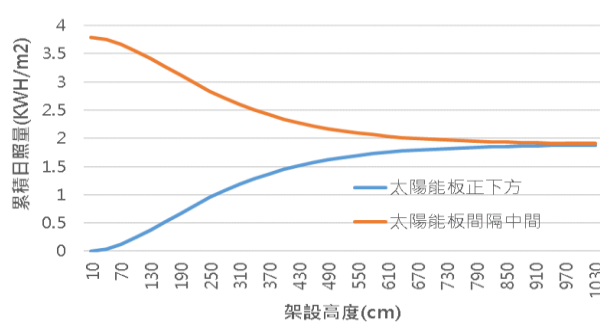


圖 4-13 使用相同寬度 L_s 之太陽能板來架設不同間隔之示意圖





(b)

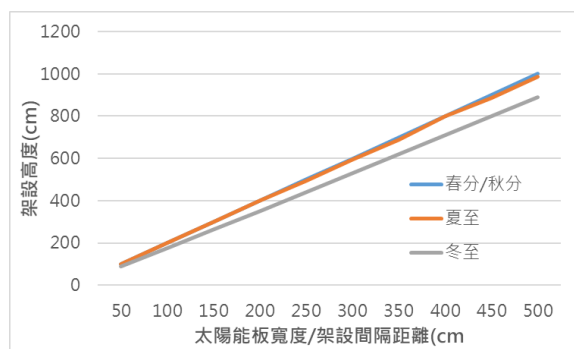


(d)

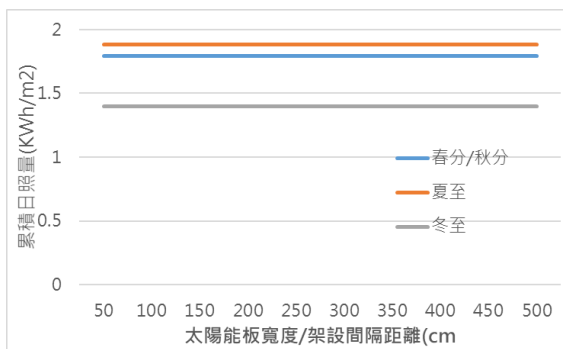
圖 4-14 為太陽能板寬度 100 公分，架設間隔分別為 100 公分、200 公分、300 公分與 500 公分之 Excel 模擬計算結果

表 4-4 不同太陽能板寬度與太陽能板架設間隔之比較

| | 累積日照量(KWh/m ²) | | | 架設高度(cm) | | | Ls/(Ls+Ld) |
|-----|----------------------------|------|-----|----------|-----|-----|------------|
| | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | |
| 50 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 100 | 100 | 89 | 0.5 |
| 100 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 200 | 200 | 175 | 0.5 |
| 150 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 300 | 300 | 266 | 0.5 |
| 200 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 400 | 400 | 350 | 0.5 |
| 250 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 500 | 494 | 441 | 0.5 |
| 300 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 600 | 595 | 532 | 0.5 |
| 350 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 700 | 690 | 621 | 0.5 |
| 400 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 800 | 800 | 710 | 0.5 |
| 450 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 900 | 886 | 800 | 0.5 |
| 500 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 1000 | 988 | 890 | 0.5 |



(a)



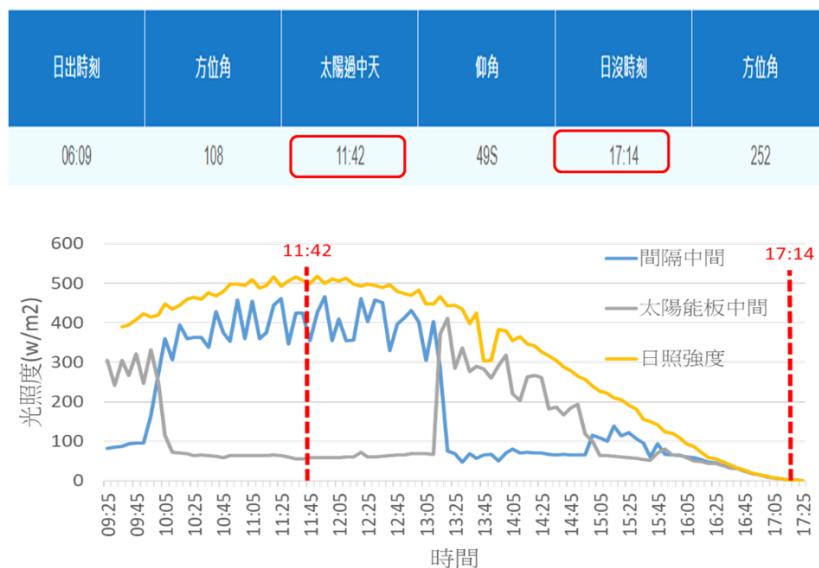
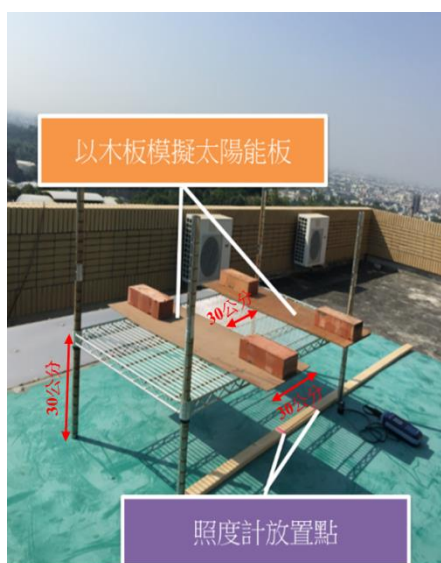
(b)

圖 4-15 不同太陽能板寬度下之(a)所需架設高度與(b)累積日照量

八、實驗量測驗證與討論

圖 4-16(a)為本研究實驗設置之照片，首先使用 30 公分寬的長型木板模擬太陽能板的遮蔽現象，間隔距離也是 30 公分，並至於一高 30 公分鐵網置物架。圖 4-16(b)為 11/10(日)從 9:25 開始，每隔 5 分鐘紀錄一筆日照量，直到 17:25 為止之實驗結果。從中央氣象局網站查詢當天的基本天文資料[8]可得知，太陽過中天時間與日沒時間分別為 11:42 與 17:14。比對實驗紀

錄確實可發現在 11:42 附近時太陽日照量最大，而過 17:14 時，日照量已低於 10，與所查詢之天文資料吻合。



(a) 本研究實驗設置之照片與 (b) 當天的基本天文資料和實驗紀錄

探討：為什麼沒被太陽能板遮蔽到之光照度比在太陽底下之日照強度數值相對小？

原因是在搭建實驗設備時是使用鐵網置物架，如圖 4-17(a)所示，其是由直徑約 3.8mm 之鐵條間隔 20mm 所構成。又因光感測元件受光面為直徑 16mm 之圓形，如圖 4-13(b)所示，故會因鐵條的陰影使量測值變小。



(a) 使用之鐵網置物架(a)與光照計之光感測元件(b)

探討：為什麼實際量測之光照度數值跳動大，而在量太陽底下之日照強度數值相對波動小？

原因是在搭建實驗設備時是使用鐵網置物架，如圖 4-17(a)所示，其是由直徑約 3.8mm 之鐵條間隔 20mm 所構成。又因光感測元件受光面為直徑 16mm 之圓形，如圖 4-17(b)所示，故會因鐵條的陰影使量測值有明顯跳動。

為解決上述鐵網置物架所造成之問題，改使用組合式鋁支架重新架設一農地種電實驗系統，如圖 4-18(a)所示，其模擬太陽能板寬 45 公分、架設間隔距離 45 公分、架設高度 80 公分。於 2 月 23 日實測之太陽日照量、太陽能板正下方日照量與太陽能板間隔中間日照量如圖 4-18(b)所示。相較於圖 4-16(b)之量測結果可清楚看出，沒被太陽能板遮蔽到之光照度和在太陽底下之日照強度數值幾乎一樣，且所量測之數值跳動相對小很多，順利解決上述鐵網置物架之問題。

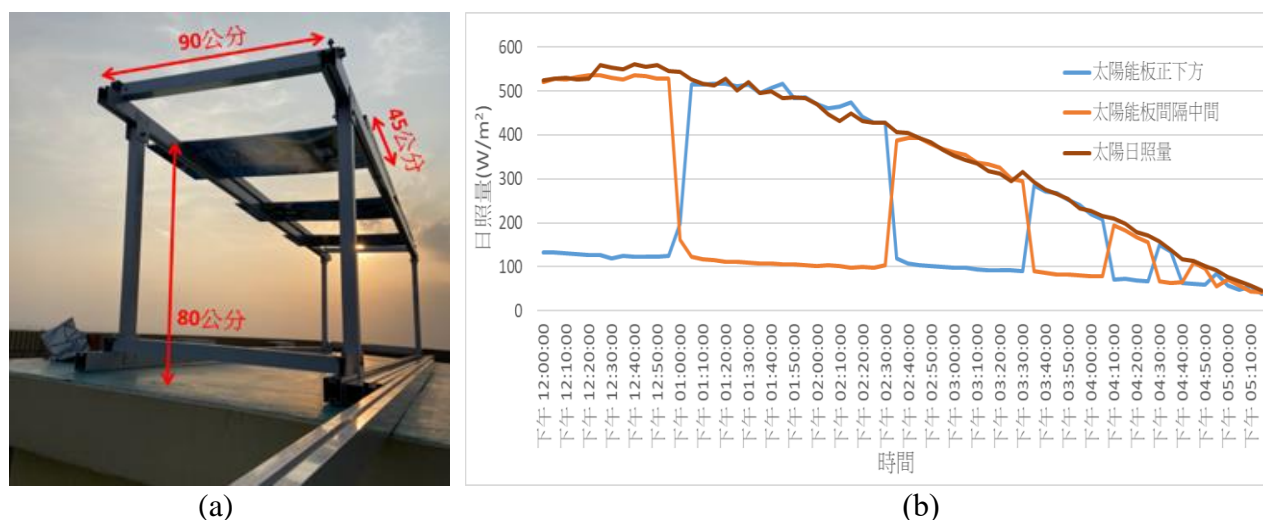


圖 4-18 (a)農地種電實驗系統，(b)實驗量測結果

圖 4-15 為數值計算與實驗量測結果之比較。到中央氣象局網站查詢 2 月 23 日當天的基本天文資料[8]可得知，太陽過中天時間與日沒時間分別為 12:11 與 17:57。也就是太陽東西向入射角從 12:11 到 17:57 共 346 分鐘內，從 0 度變化至 90 度，故每分鐘變化 $90/346$ 度。據此，算出在 12:10 與 17:15 分時其太陽東西向入射角分別為 0 度與 79 度。此兩時間點為數值計算的與實驗量測結果之時間與太陽東西向入射角對準點，如此才能進行比較。由圖 4-14 之結果可看出，數值計算與實驗量測在 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、...是吻合的。

探討：觀察數值模擬與量實測值之日照量有明顯不同，例如中天時(時間:12:11)數值模擬約為 $830W/m^2$ ，而實測值是 $540W/m^2$ ，原因為何?

這是因為太陽日射量可分直接太陽輻射 (direct solar radiation) 及太陽漫射 (diffuse solar radiation) 兩種。在進行數值模擬計算時，我們假設日照量為 $1000W/m^2$ ，其是包含太陽直接輻射及太陽漫射兩種，也就是全天空日射量 (global solar radiation)。然實驗所用之日照計僅能量太陽直接輻射，故有落差。若按照文獻[9]所述：「台灣地區當雲量少於 5/10 時，太陽漫

射量為全天空日射量之 0.356 倍，...而在全陰天時地面上所接收到之全天空日射量幾乎皆為太陽漫射量」。則中天時(12:11)之太陽直接輻射應為 $830 \times 0.644 = 534 \text{ W/m}^2$ ，與實測值 544 W/m^2 頗接近。

探討：當太陽光被太陽能板遮蔽時，日照量數值模擬是 0 W/m^2 ，但實際日照量實測值約明顯不為 0 W/m^2 ，原因為何？

這是因為太陽日射量可分直接太陽輻射及太陽漫射兩種，在水平面所接收到兩者的總和稱為全天空日射量 [9]。在進行數值模擬計算時，僅考量直射光，故被太陽能板遮蔽時日照量為 0 W/m^2 。然實際量測時，被太陽能板遮蔽時依然會量測到太陽漫射量，故日照量不為 0 W/m^2 。如前面探討所述，太陽漫射量為全天空日射量之 0.356 倍，則以中天時(12:11)時，全天空日射量 830 W/m^2 時，其陰影處之漫射量應為 295 W/m^2 ，所用之日照計僅能量太陽直接輻射，故為 $295 \times 0.644 = 190 \text{ W/m}^2$ ，雖與實測值 139 W/m^2 尚有差距，但已可解釋太陽光被太陽能板遮蔽時，實際日照量實測值約明顯不為 0 W/m^2 之原因。

經由上述探討，圖 4-15 為引入“太陽漫射量為全天空日射量之 0.356 倍”的數值模擬結果，可看出數值模擬結果明顯與實測值更為相符。

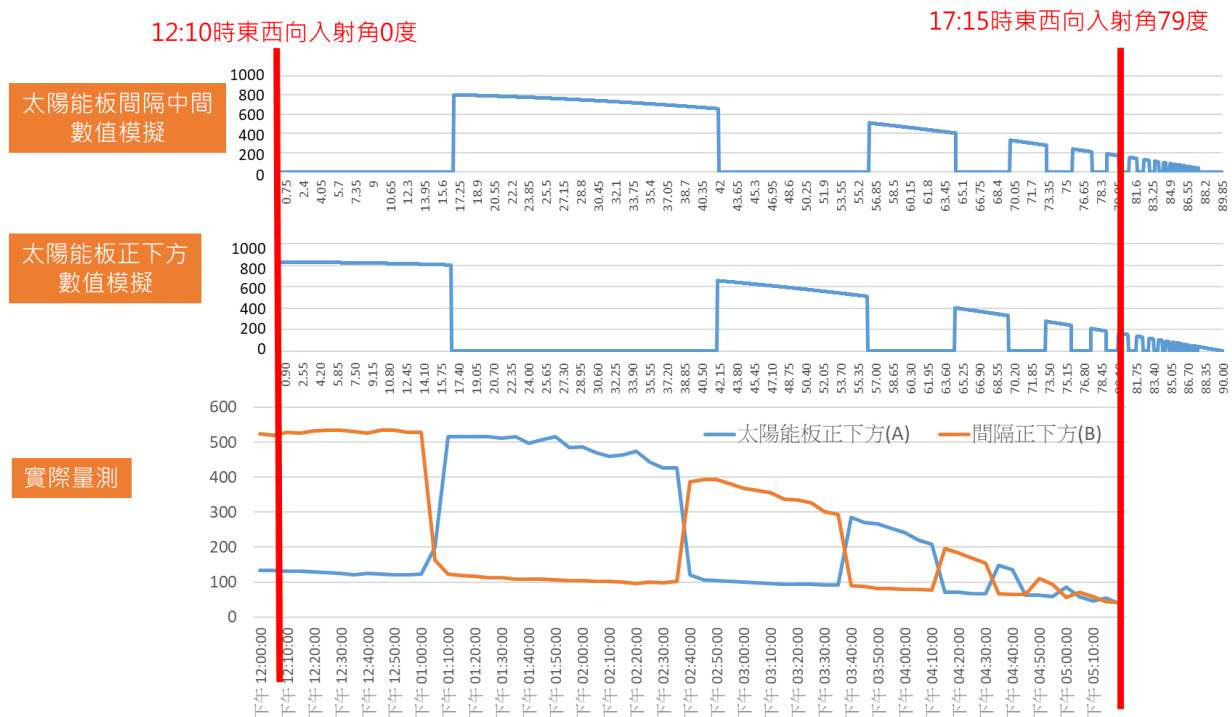


圖 4-19 數值計算與實驗量測結果比較

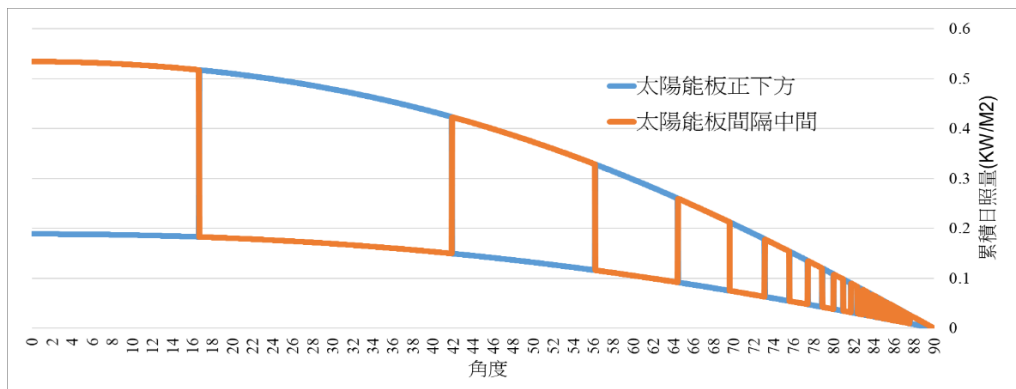


圖 4-20 引入“太陽漫射量為全天空日射量之 0.356 倍”的數值模擬結果

九、討論

(一) 太陽能板寬度與架設間隔距離之比會直接決定日累積日照量？

將太陽能板寬度與架設間隔距離之比當橫軸座標，日累積日照量當縱軸座標，重新繪製如圖 4-21，可看出太陽能板寬度與架設間隔距離之比與日累積日照量確實有一定關係。利用該關係圖，可依所種植之農作物所需之陽光來決定太陽能板寬度與架設間隔距離之比[10]。

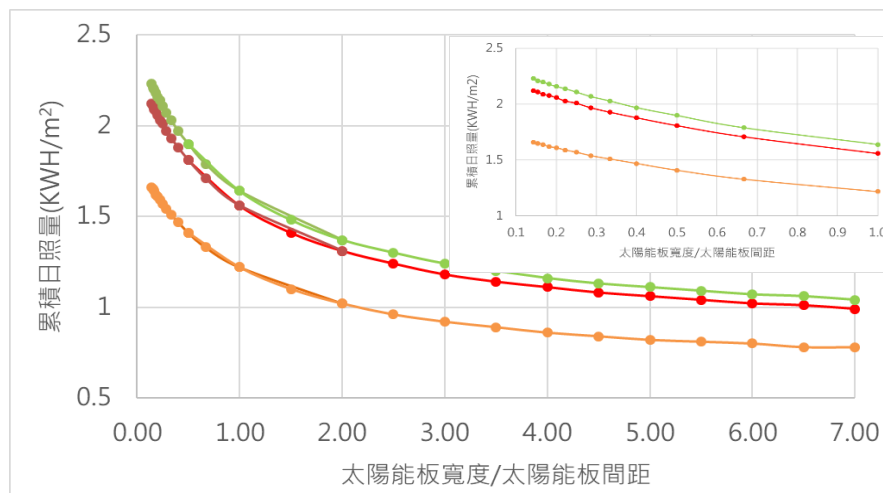


圖 4-21 太陽能板寬度與架設間隔距離之比與日累積日照量之關係圖

(二) 太陽能板寬度與架設間隔距離之比會影響架設高度嗎？

如下圖為太陽能板寬度加太陽能板架設間距距離之合固定，但太陽能板寬度與架設間隔距離之比例不同下之所需太陽能板架設高度。可看出太陽能板寬度與架設間隔距離之比，確實會影響太陽能架設高度。又可看出，當 $Ls/(Ls+Ld)=0.5$ ，也就是太陽能板寬度等於太陽能板架設間距時，其所需之架設高度最高。

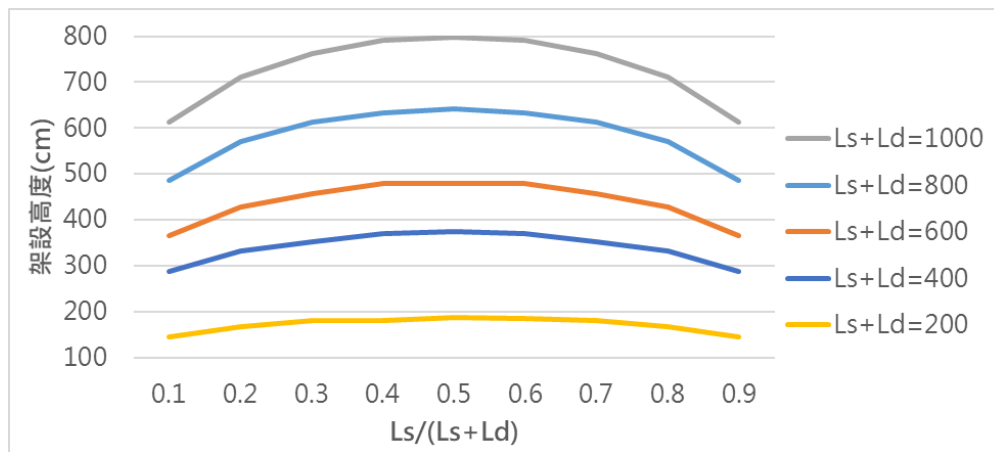


圖 4-22 太陽能板寬度與架設間隔距離之比與架設高度之關係

(三) 春、夏、秋、冬四季之結果不一致，該如何決定太陽能板架設高度？

觀察圖 4-9、4-12、4-15 可看出春分/秋分、夏至與冬至在不同太陽能板寬度與架設間隔距離下，夏至時所需之架設高度最高，故架設時應以夏至時之結果為依據，使一年四季均能達到農作物生長。

(四) 若太陽能板架設時有傾斜角，是否會影響探討結果？

如下頁表 4-5 所示，為太陽東西向入射角 0° 、 10° 、 20° 之分別在太陽能板架設傾斜角為 0° 、 15° 、 35° 時之情形。觀察其影子變化可發現，太陽能板架設傾斜角僅影響到影子的長短，對何時太陽能板正下方與太陽能板間隔中間何時曬到太陽無影響，故對整日的累積日照量也會無影響。由以上的實驗結果可知，太陽能板架設傾斜角不會影響本研究之探討結果。

(五) 若太陽能板架設非正南方時，本研究方法是否可行？

如圖 4-16(a)所示，其為太陽能板架設非正南方時之示意圖，圖中表示其與正南方偏轉了 θ_e 。故等效於架設正南方之太陽能系統，其等效太陽能板寬度 L_{ss} 與太陽能板間隔距離 L_{dd} 另用三角函數可表示為： $L_{ss}=L_s/\cos(\theta_e)$ 與 $L_{dd}=L_d/\cos(\theta_e)$ 。經過上述轉換，本研究方法即可適用於太陽能板架設非正南方時之情況。圖 4-16(b)為太陽能板寬度與架設間隔距離均為 100 公分時，架設不同方位角下，太陽能板所需之最低架設高度。從圖中可看出，當太陽能板架設正南方時(方位角為 180°)，可以有最低的架設高度，隨著偏移正南方越大，所需之太陽能板架設高度也越大。仔細觀察可看出，當太陽能板架設方位角位於 210° - 150° 之間，其所需架設高度變化不大，但超過此範圍，架設高度明顯增高。故建議太陽能板架設方位角位應位於於 210° - 150° 之間，才能節省建築費用。

(六) 若以市面標準太陽能板 100cm*165cm，有無架設建議？

首先應以架設面向正南方為考量，若以市面常見太陽能板尺寸大部分長約 165 公分、寬約 100 公分而言，在太陽能板遮蔽率 30%、40%與 50%情況下，可得出最低架設高度分別為 268 公分、208 公分與 168 公分。並得到日累積日照量 1.95KWh/m²、1.79KWh/m²、1.64 KWh/m²。三個架設高度均低於 3 公尺，低於一個樓層高度，確實可適用於棚架與溫室，極具可行性。

表 4-5 太陽能板架設時有傾斜角時之模型量測結果

| | 太陽能板架設傾斜角 0° | 太陽能板架設傾斜角 15° | 太陽能板架設傾斜角 35° |
|------------|--------------|---------------|---------------|
| 東西向入射角 0° | | | |
| 東西向入射角 10° | | | |
| 東西向入射角 20° | | | |

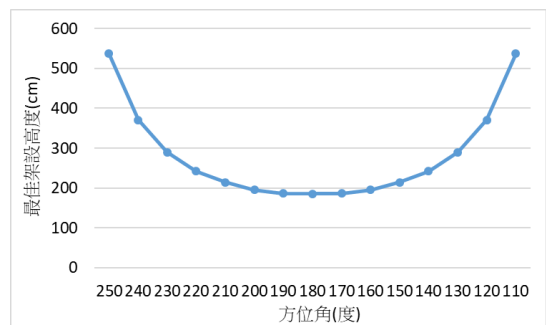
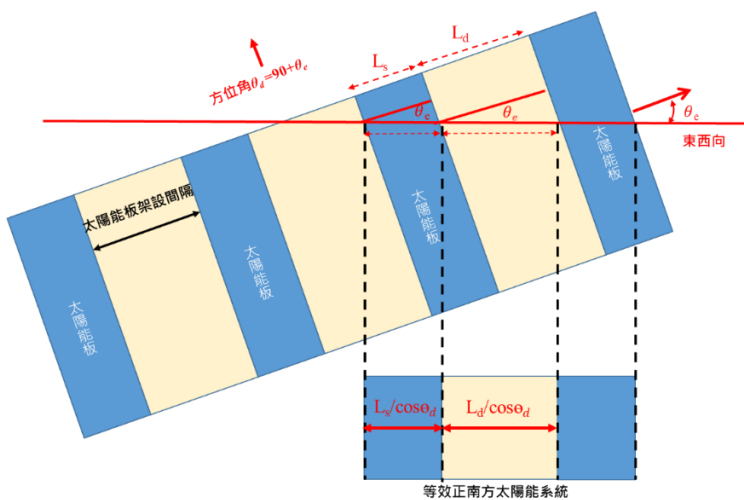


圖 4-23 (a)太陽能板架設非正南方時之示意圖；(b)不同方位角之架設高度

陸、結論與應用

一、結論

本科展作品首先利用太陽視運動軌跡來探討太陽照射角度與太陽能板遮蔽之關係，進而得出利用三角函數來探討太陽能板寬度、太陽能板架設間隔距離與架設高度對累積日照量的影響之方法。利用該方法可以求得太陽能板所需最低架設高度，該最低架設高度可確保太陽能正下方與太陽能板間隔中間之累積日照量一致，進而可確保農作物之一至性正常生長。

由實驗結果可知，農地種電時所架設太陽能板應採用斑馬線方式排列，且應朝向正南方。太陽能板寬度與架設間隔距離之和越小，其所需架設高度可越低；又太陽能板遮蔽率會與日累積日照量成反比。若以市面常見太陽能板尺寸大部分長約 165 公分、寬約 100 公分而言，在太陽能板遮蔽率 30%、40%與 50%情況下，可得出最低架設高度分別為 268 公分、208 公分與 168 公分，並得到日累積日照量 1.95KWh/m^2 、 1.79KWh/m^2 、 1.64KWh/m^2 。三個架設高度均低於 3 公尺，低於一個樓層高度，確實可適用於棚架與溫室，極具可行性。

最後，我們設計一太陽能板架設高度儀，只要輸入太陽能板遮蔽率，太陽能板架設高度儀就會利用電子羅盤得知方位角，並算出太陽能板最低架設高度，使業者與農民能輕易地架設正確高度，確保可兼顧太陽能發電與農業生產。

二、未來改善與發展

- (一) 目前當太陽能板面向非正南方時，僅探討太陽能板平放(架設傾斜角=0°)，未來可拓展探討到太陽能板任意架設傾斜角。
- (二) 目前人工量測很不便利，未來可研製一自動量測系統，不僅可大幅增進量測時之便利性，也可大幅降低人工操作儀器之誤差。
- (三) 目前的實測數據是用木板與珍珠板等進行實驗的，未來可用實際的太陽能板來進行實驗。
- (四) 為了探討太陽能寬度、間距與架設高度對植物生長的影響，我們於 6 月開始培養浮萍，以實驗不同的遮蔽物架設方式對實際上植物生長的影響，預計將於 7 月呈現浮萍實驗之成果。

柒、參考資料

- [1] 全台最大地面太陽能電廠完工！台電彰濱年發電 3.4 億度可供 4 萬家庭
<https://www.bnext.com.tw/article/55058/taipower-100-mw-solar-power-plant-in--changhua>
- [2] <https://www.newsmarket.com.tw/blog/72368/>
- [3] <https://reurl.cc/zyK69k>
- [4] https://www.agriharvest.tw/theme_data.php?theme=article&sub_theme=article&id=1909
- [5] <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/pvps-report-a-snapshot-of-global-photovoltaics-markets-2019>
- [6] <https://www.ey.gov.tw/File/3B2B1097239AF08?A=C> 行政院綠能科技產業創新推動方案
- [7] 真的是 23.5 度嗎？－以天文及氣象資料探討固定型太陽能板最佳架設傾斜角，第 59 屆中小學科學展覽會
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030506.pdf>
- [8] 中央氣象局-每日天文現象 https://www.cwb.gov.tw/V8/C/K/astronomy_day.html
- [9] 嘉義太陽漫射量之研究 <http://ir.lib.ctu.edu.tw/bitstream/310909700/2666/1/Co10.pdf>
- [10] 太陽光電溫室栽培之候選作物
https://www.agriharvest.tw/theme_data.php?theme=article&sub_theme=article&id=1161&fb_comment_id=1055218147914238

【評語】 030503

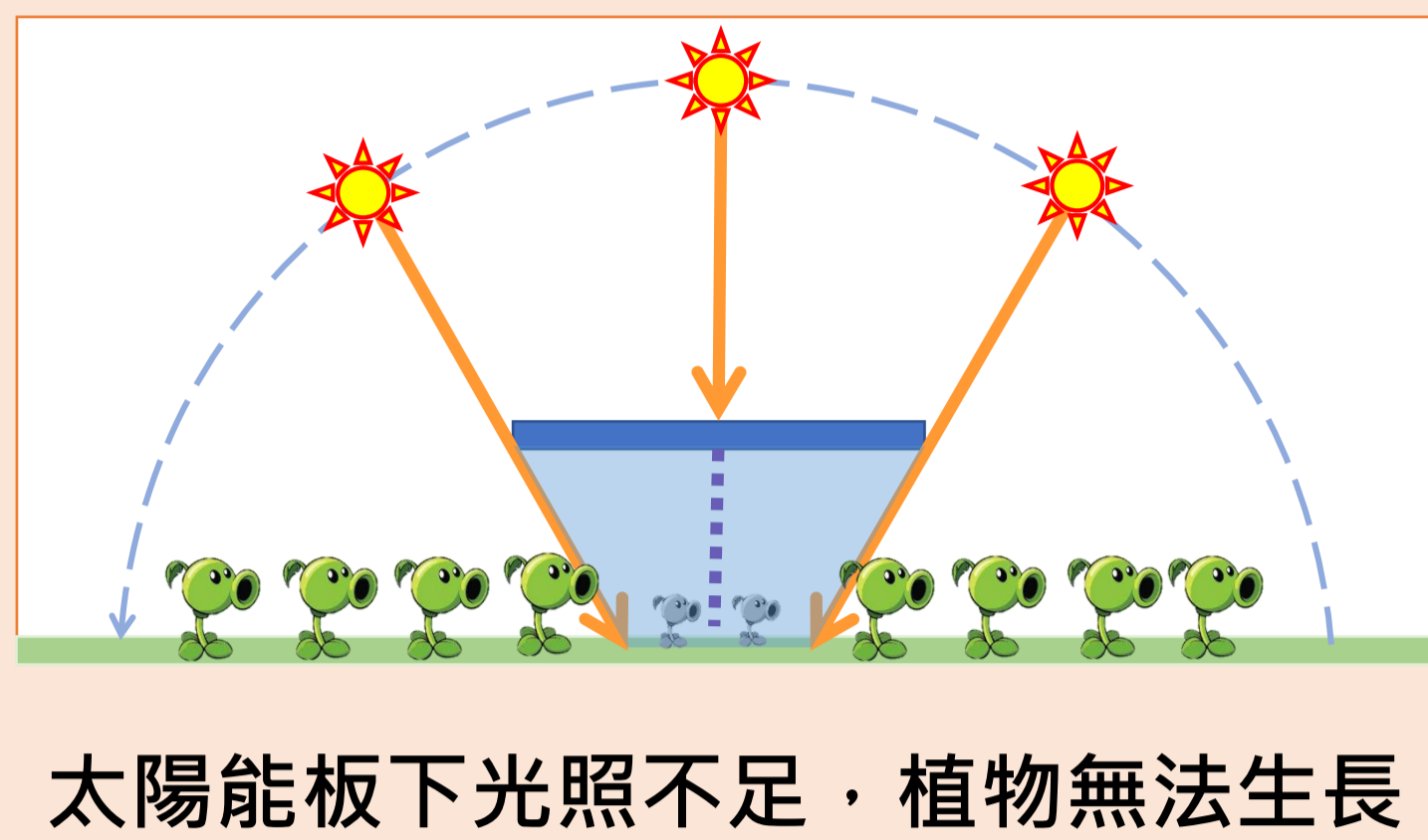
此作品研究主題與鄉土相關性，且為兼具科學性與實用性的專題研究。在實驗設計的控制變因及操弄變因上清楚且適當。大致能了解與作品相關之基本科學原理，且表達清晰。對於目前相關主題的發展宜多加了解，以擴大研究結果的應用範圍。

研究摘要

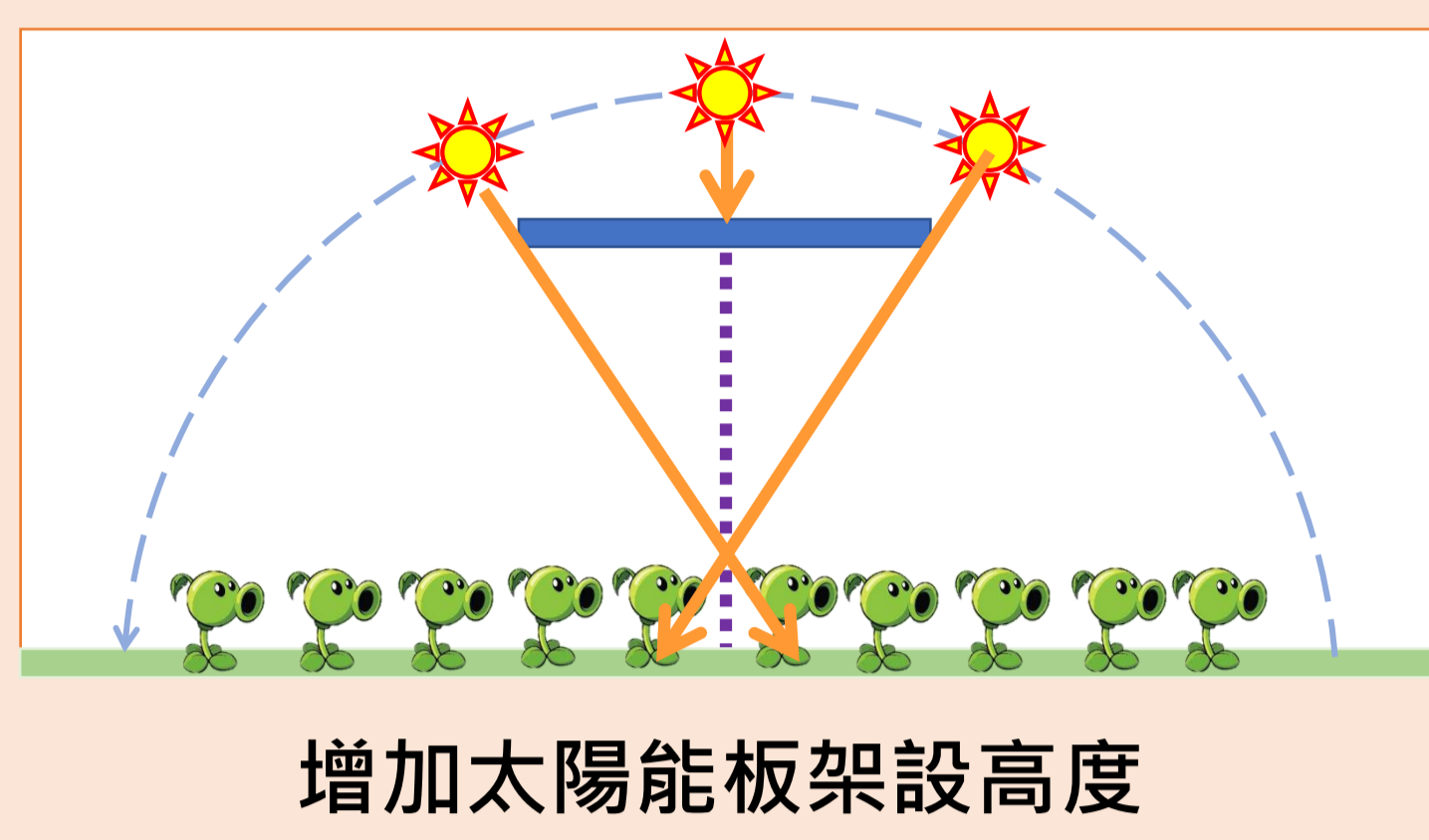
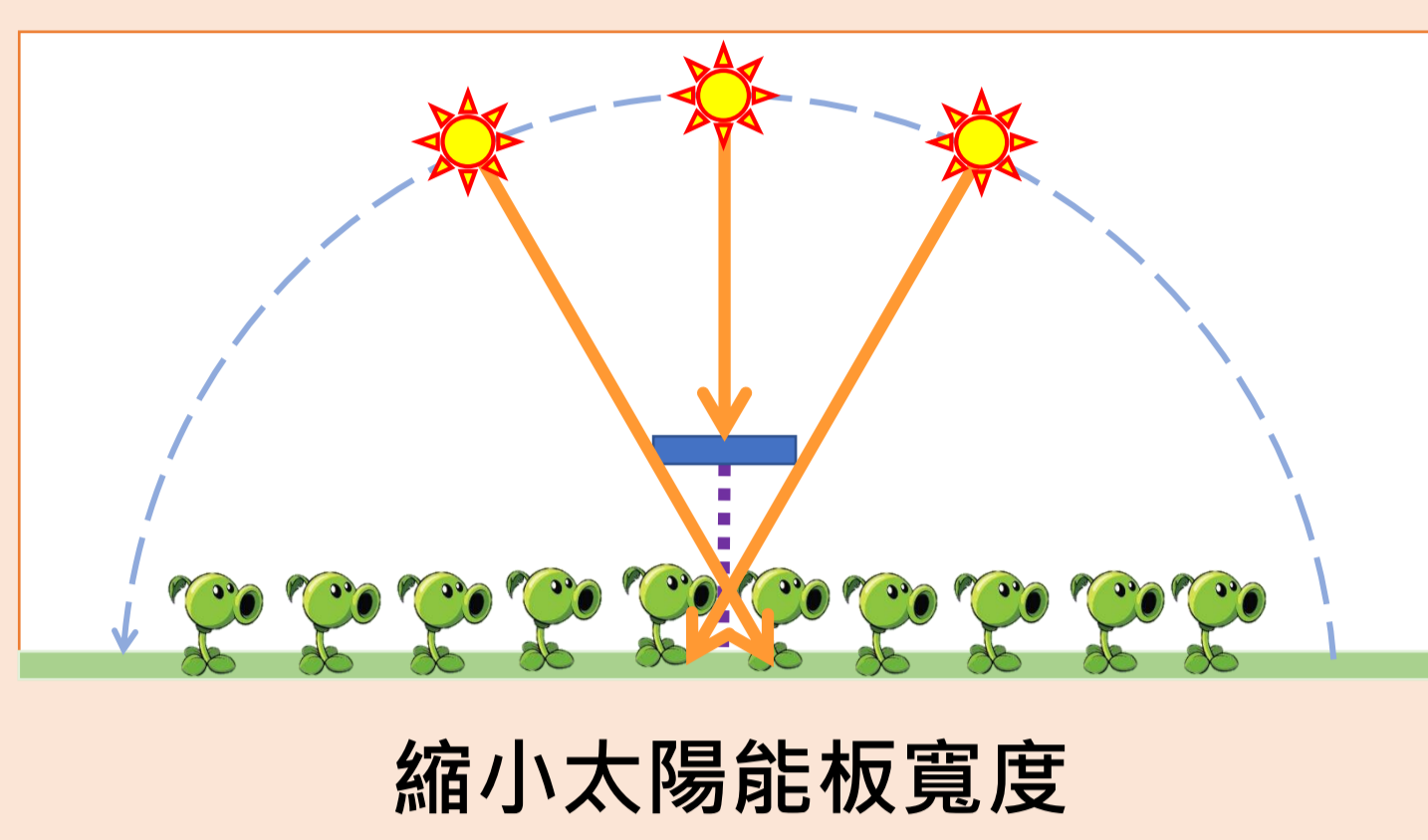
台灣近年來積極發展太陽能發電，時常可見在建築物屋頂架設太陽能板，近來也有越來越多農地上出現太陽能板，卻也衍生出**太陽能種電「與農爭地」**的問題。研究運用**天球概念和太陽視運動**，來推算**太陽能板最低架設高度**。我們發現可以藉由調整太陽能板的架設高度，就能使**太陽能板下光照均勻**，並促進農作物生長，兼顧農業生產及架設成本。我們發現若架設市面常見的太陽能板，在**太陽能板遮蔽率30%、40%與50%**的情況下，可得出**最低架設高度分別為168公分、208公分與268公分**，均低於一個樓層3公尺高度，確實可適用於棚架與溫室。我們亦設計一**太陽能板架設高度儀**，能算出**太陽能板最低架設高度**，使業者與農民能輕易架設正確高度，確保**兼顧太陽能發電與農業生產**。

研究動機

太陽能板與農業生產的衝突



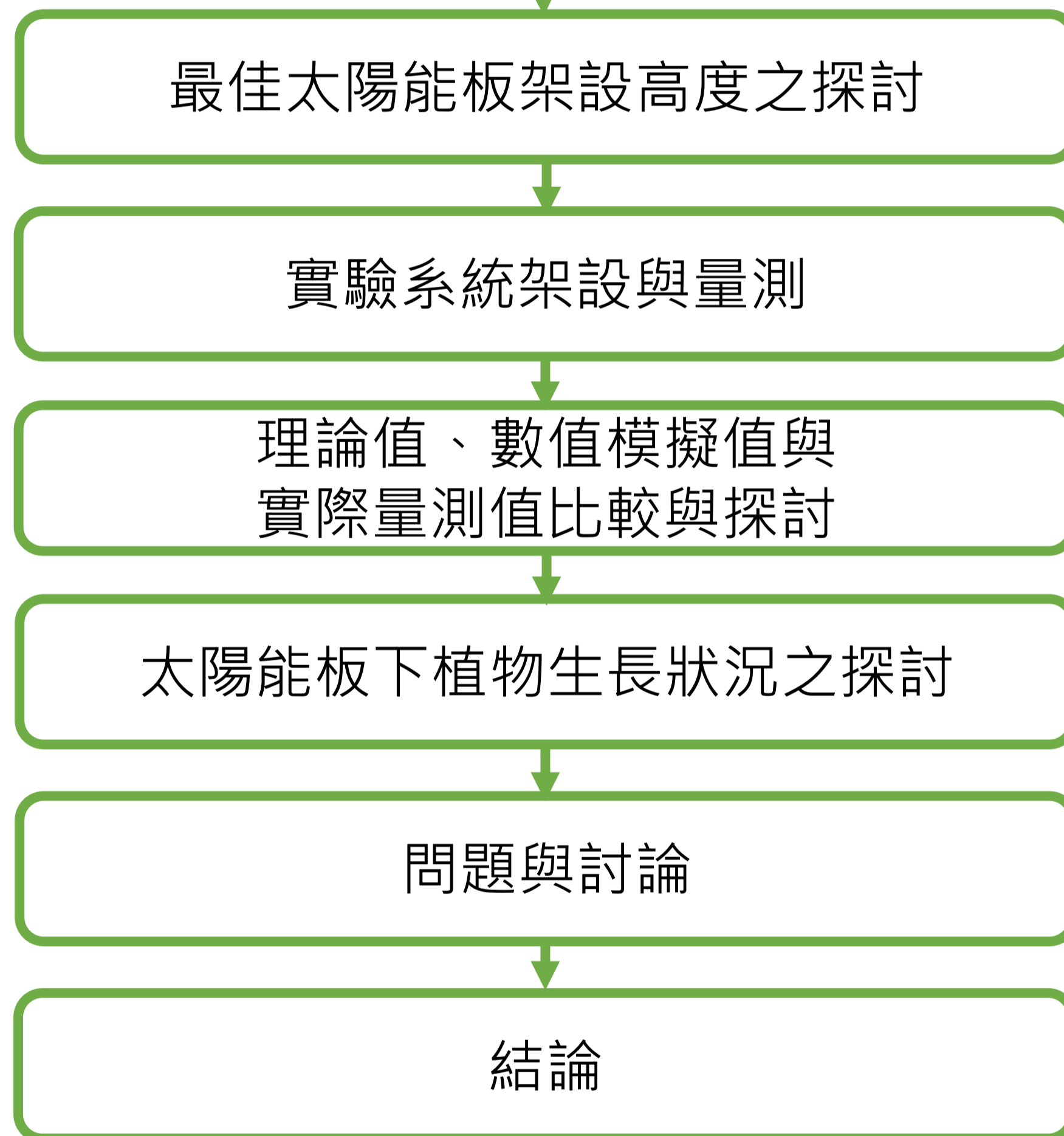
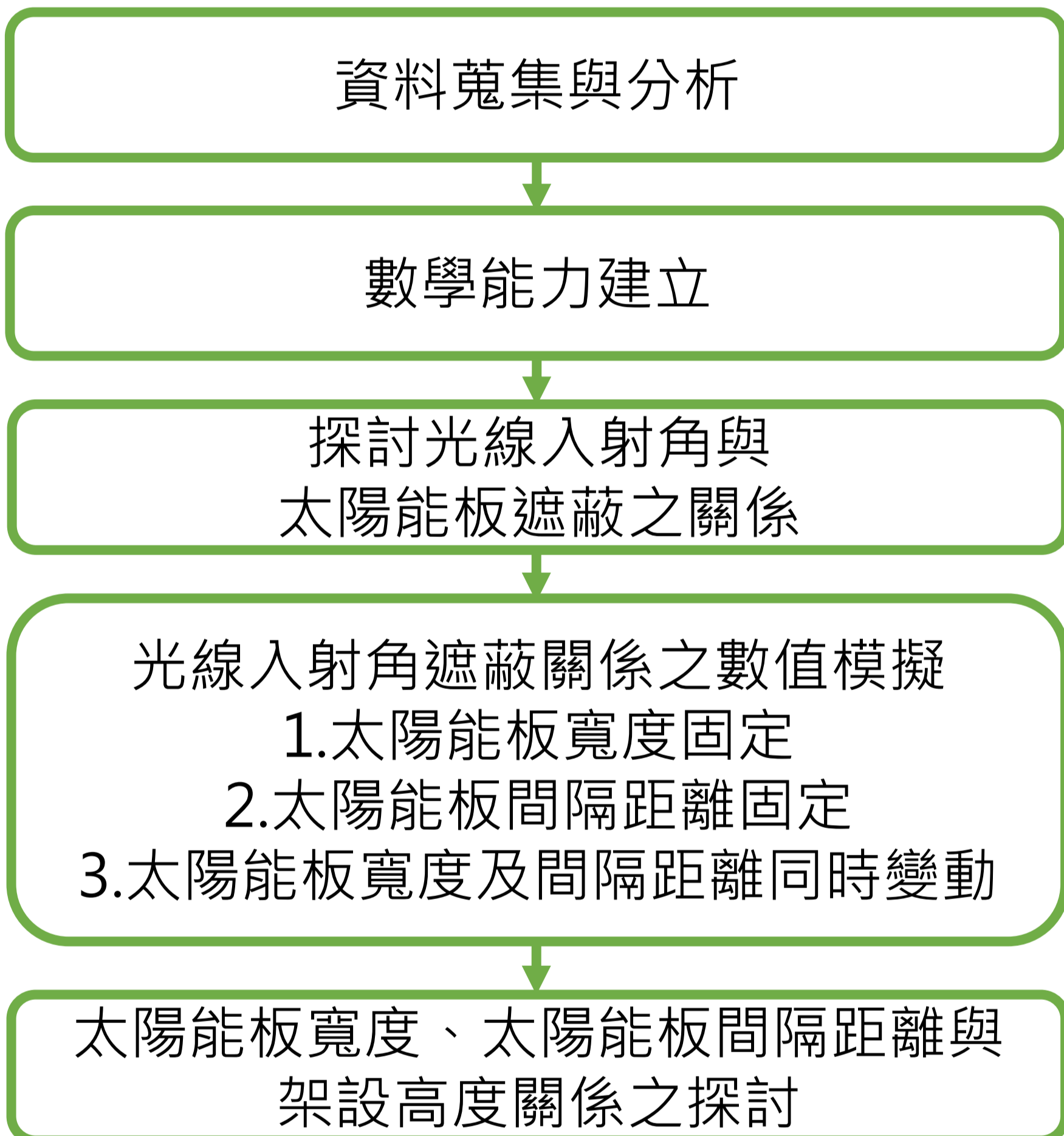
可能的解決方式



研究目的

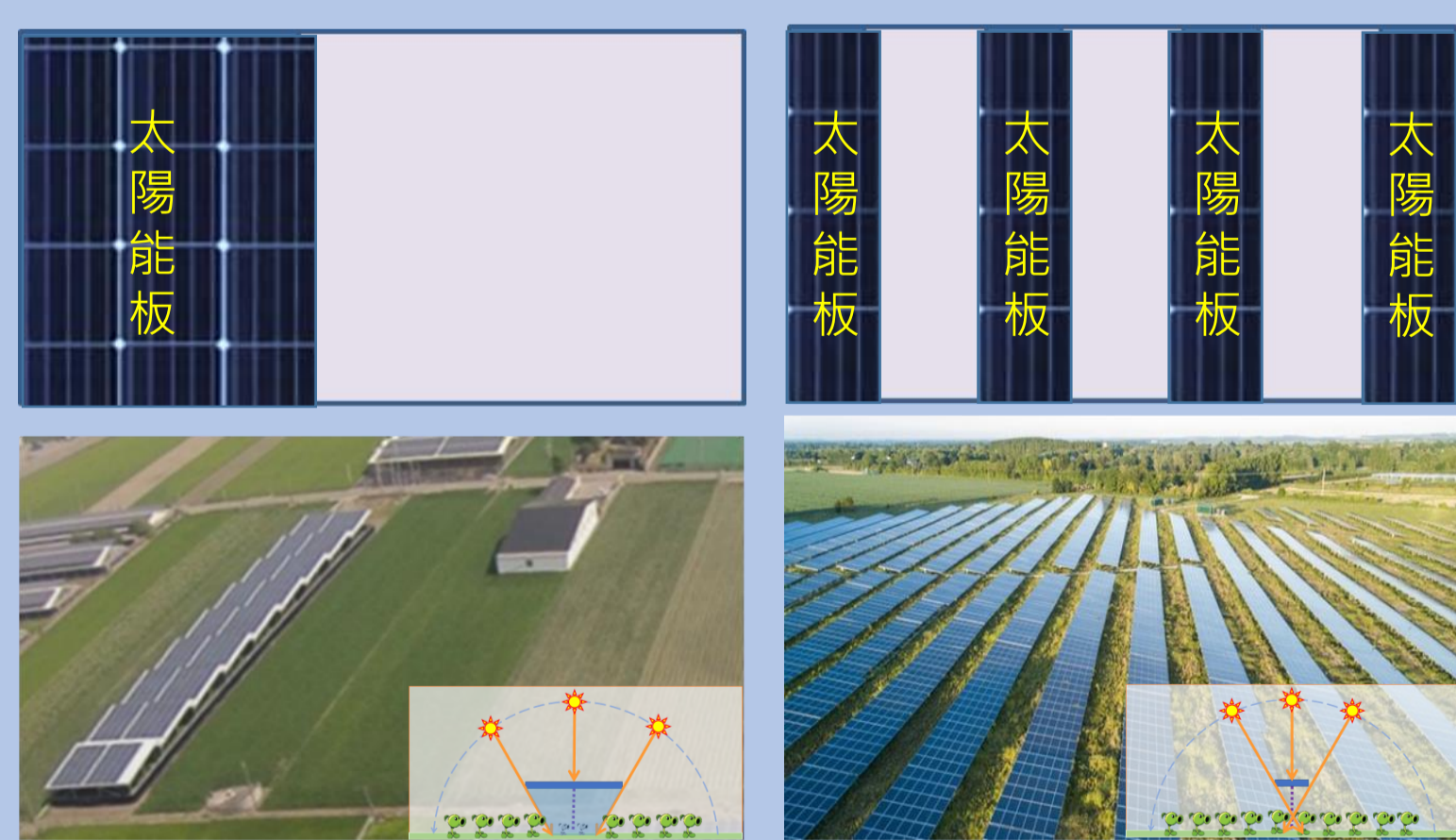
- 探討太陽能板寬度、間隔距離與架設高度對累積日照量的影響。
- 探討如何求得**太陽能板最佳架設高度**，確保可兼顧**太陽能發電與農業生產**。
- 設計**太陽能板架設標示儀**，使業者與農民能將**太陽能板架設到正確高度**。

研究方法

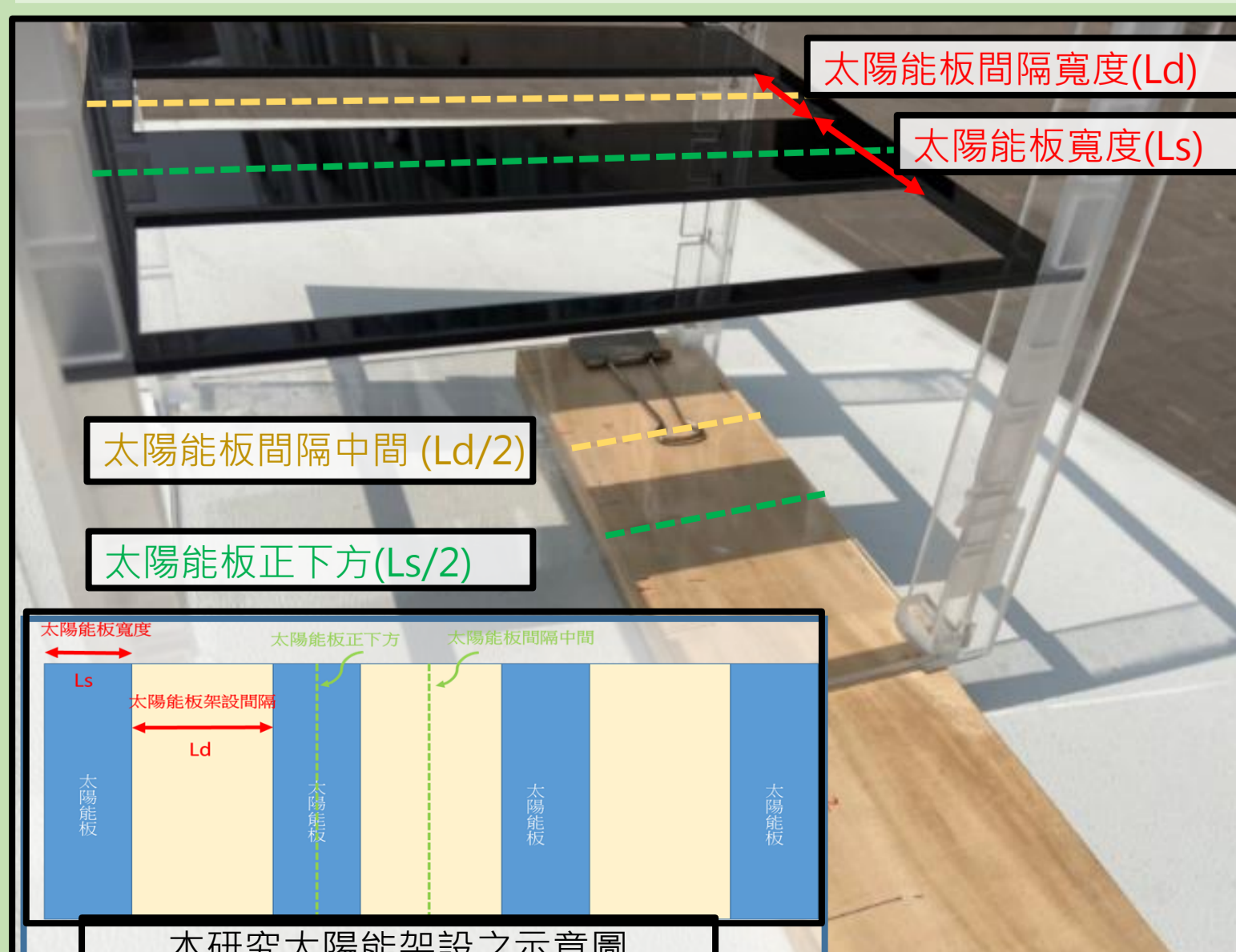


探討光線入射角與太陽能板遮蔽關係

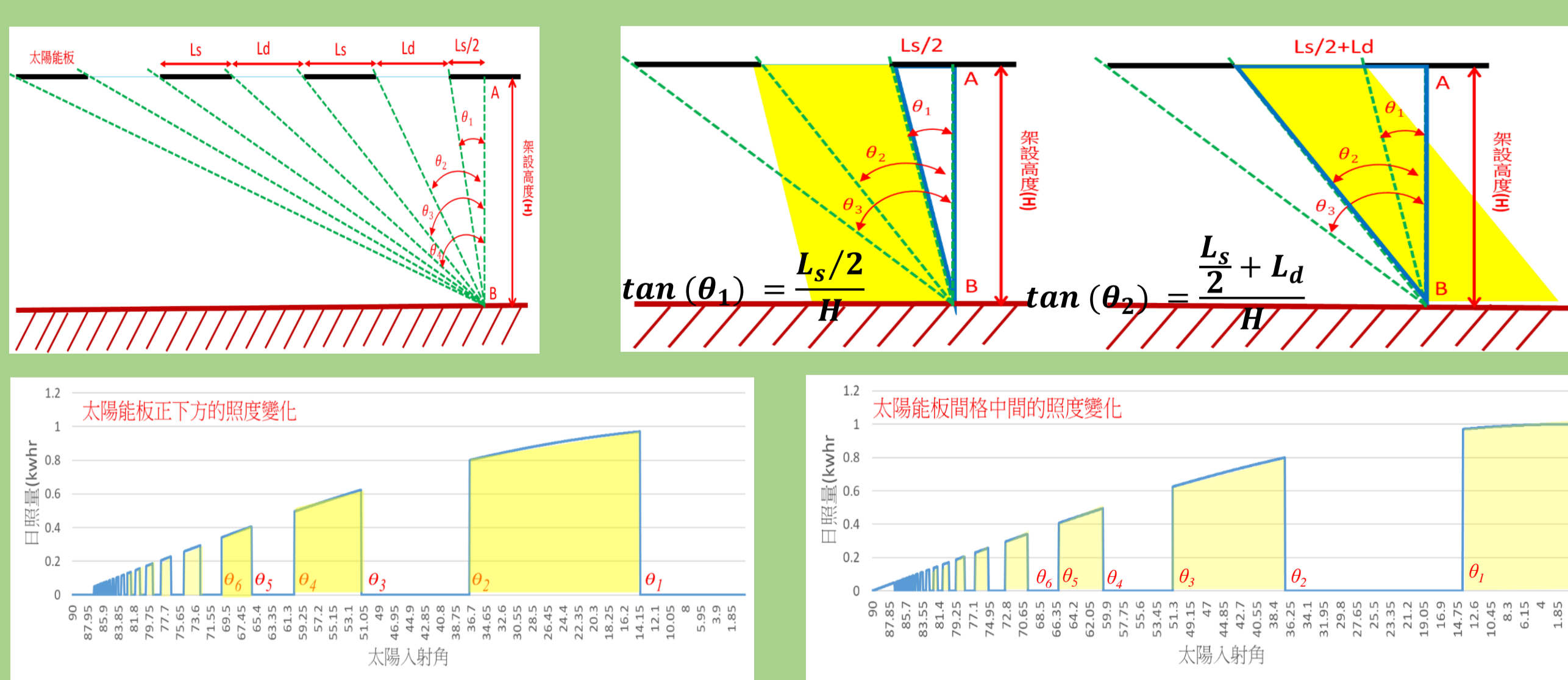
太陽能板設置方式



以模型模擬太陽能板



以Excel程式模擬，哪些入射角區間會使Ls/2和Ld/2照光



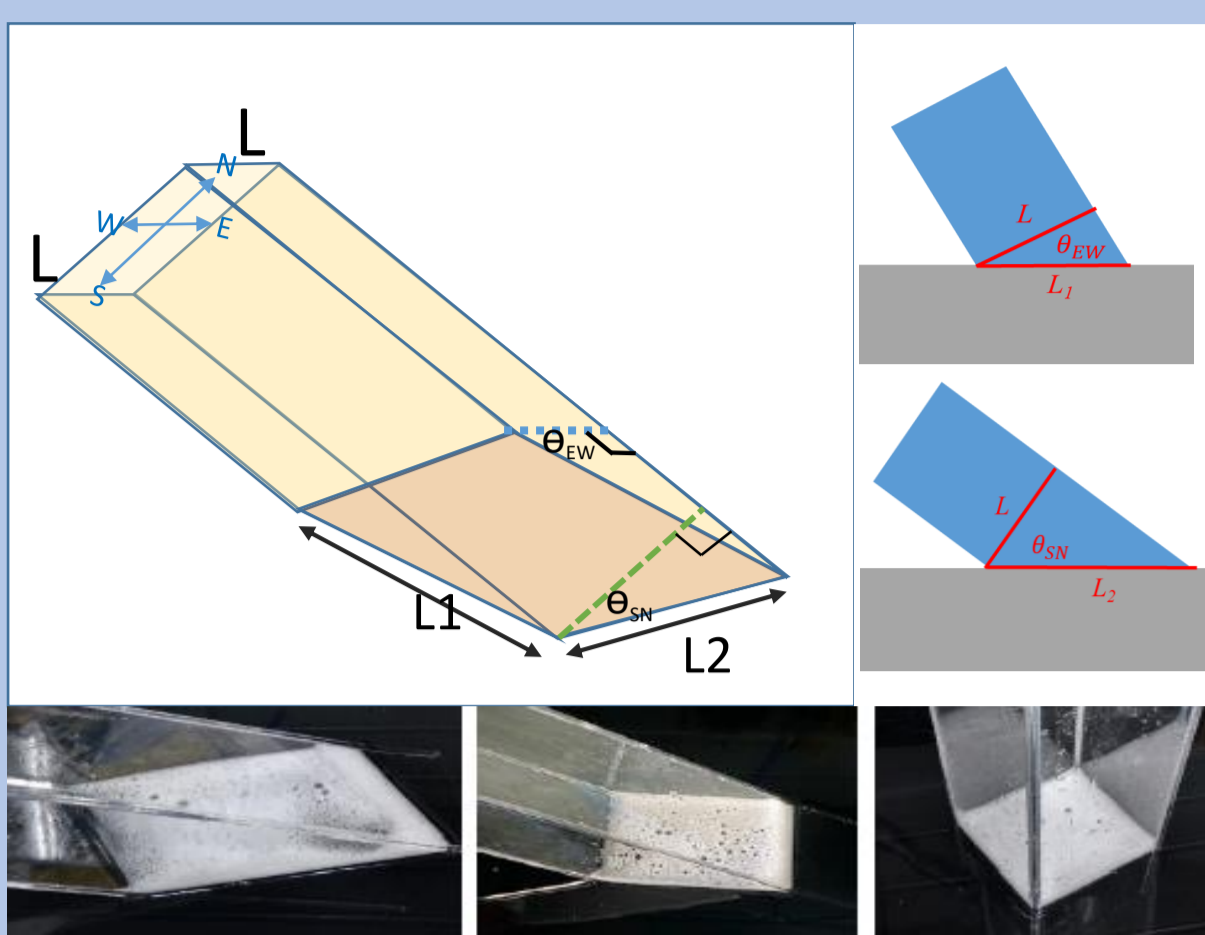
實驗驗證Excel模擬數值

| 高度 | θ_1 | | | θ_2 | | | θ_3 | | | θ_4 | | |
|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-------|
| | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 | 理論 | 實驗 | 差值 |
| 43mm | 30.2° | 30° | -0.2° | 60.2° | 57° | -3.2° | 71.0° | 70° | -1° | 76.2° | 73° | -3.2° |
| 89mm | 15.6° | 14° | -1.6° | 40.0° | 40° | 0° | 54.5° | 52° | -2.5° | 63.0° | 60° | -3° |
| 123mm | 11.5° | 11° | -0.5° | 31.4° | 31° | -0.4° | 45.5° | 44° | -1.5° | 54.9° | 54° | -0.9° |
| 163mm | 8.7° | 8° | -0.7° | 24.7° | 25° | 0.3° | 37.5° | 35° | -2.5° | 47° | 45° | -2° |
| 203mm | 7.0° | 6° | -1.0° | 20.3° | 19° | -1.3° | 31.6° | 30° | -1.6° | 40.7° | 38° | -2.7° |
| 243mm | 5.9° | 5° | -0.9° | 17.2° | 15° | -2.2° | 27.2° | 24° | -3.2° | 35.7° | 33° | -2.7° |

以Excel數值模擬探討太陽能板最佳架設高度

最佳架設高度定義：能使太陽能板正下方(Ls/2)與太陽能板間隔中間(Ld/2)累積日照量相等的最低架設高度

光照量計算公式



$$L = 1000 \cdot \frac{L \cdot L}{L_1 \cdot L_2}$$

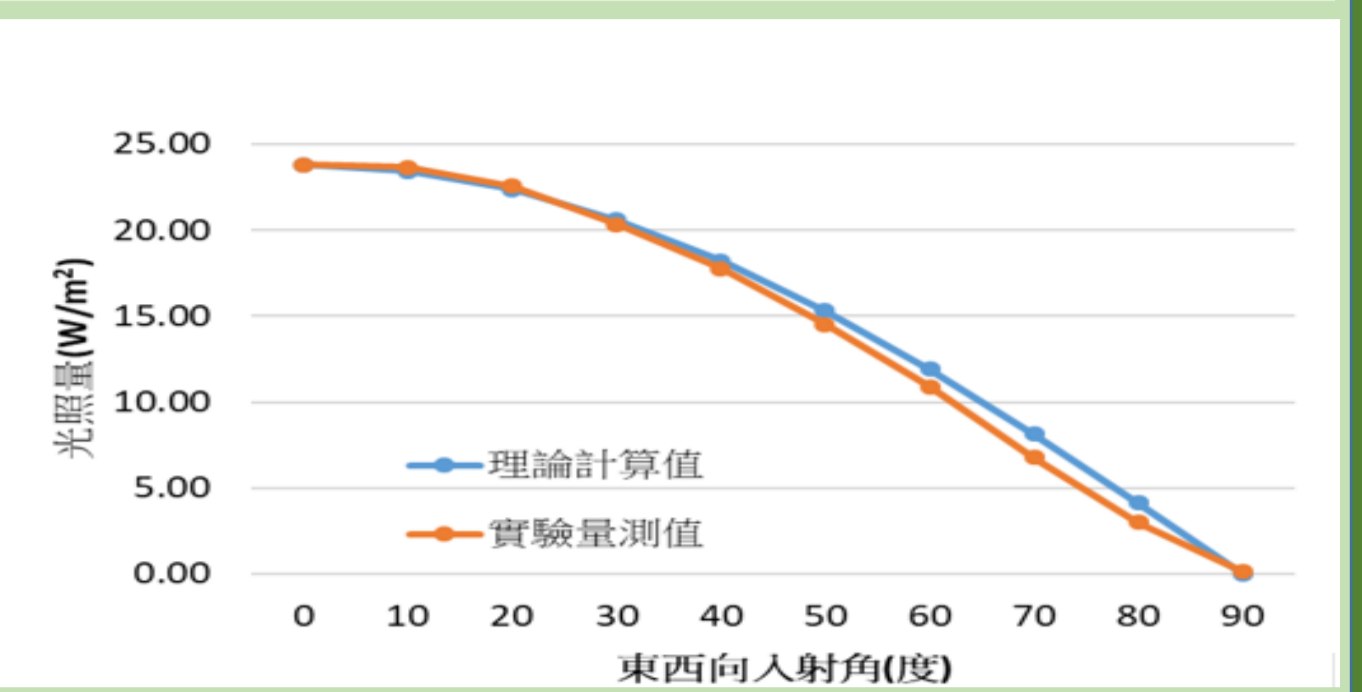
$$= 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})$$

* θ_{EW} 為東西向入射角
 θ_{SN} 為南北向入射角

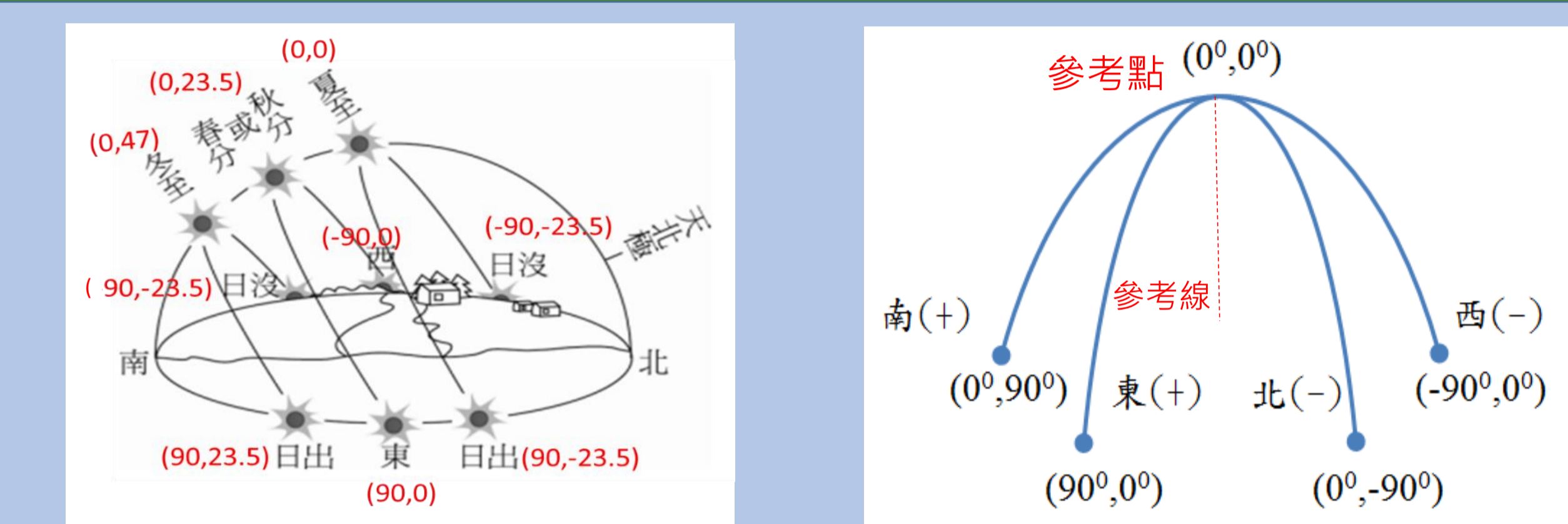
光照量實驗與探討



因使用投影機當作太陽，公式中之 $1000W/m^2$ 需修正為 $23.8W/m^2$



太陽入射角座標



累積日照量數值模擬計算(考量東西向、南北向入射角)

θ_{EW} ：一天中由 90° 變化到 0° 再到 -90°

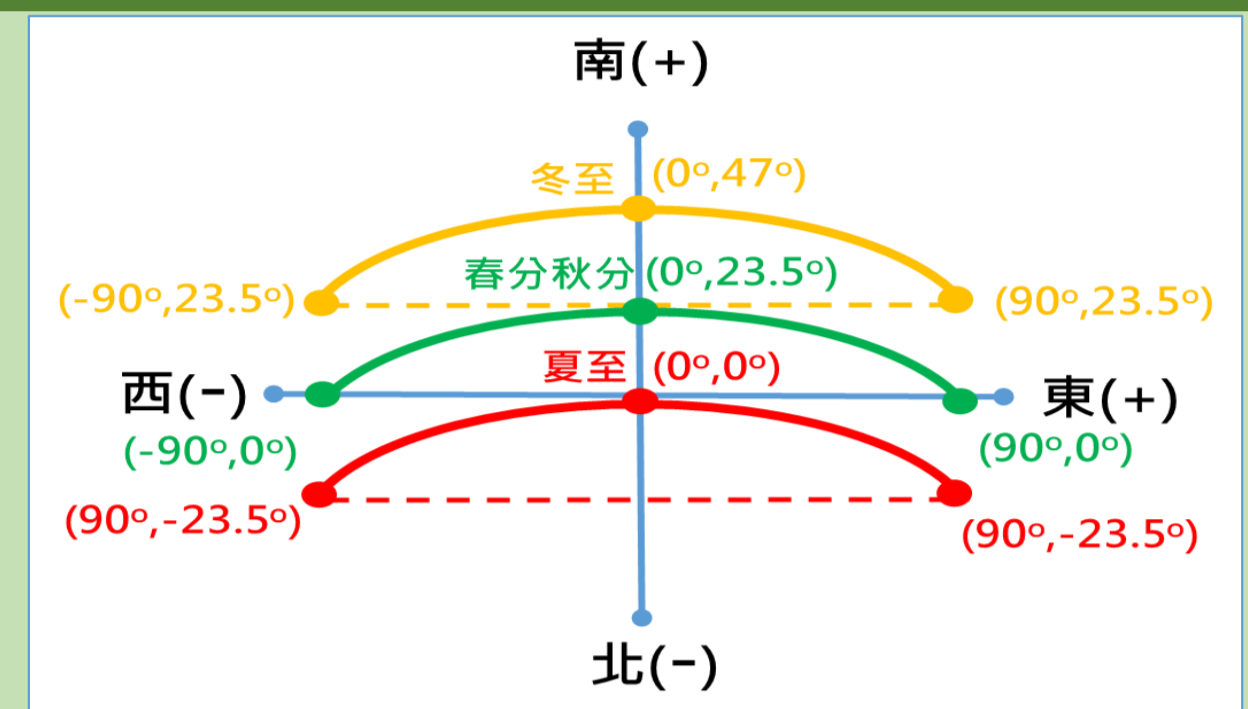
北半球 θ_{SN} ：

$$\theta_{SN} = (D_{noon} - D_{Lat}) + D_{Lat} \cdot \cos(\theta_{EW})$$

D_{Lat} ：當地的緯度(用來決定地點)

D_{noon} ：當天中天時 θ_{SN} (用來決定季節)

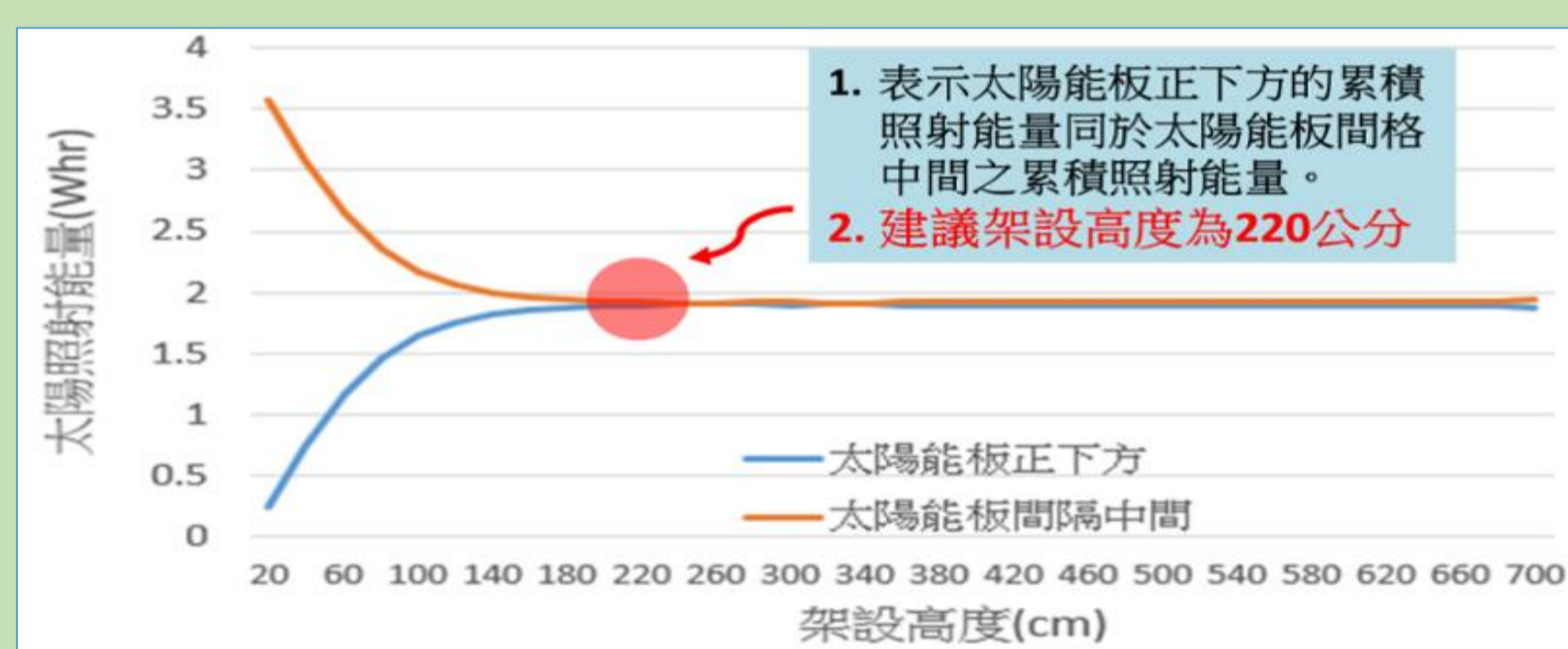
以台灣冬至為例： $\theta_{SN} = (47 - 23.5) + 23.5 \cdot \cos(\theta_{EW})$



用Excel程式計算最佳架設高度

$$L = 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})$$

*因本研究架設方向為正南方，因此 $\cos(\theta_{SN})=1$



太陽能板寬度固定，不同間隔距離

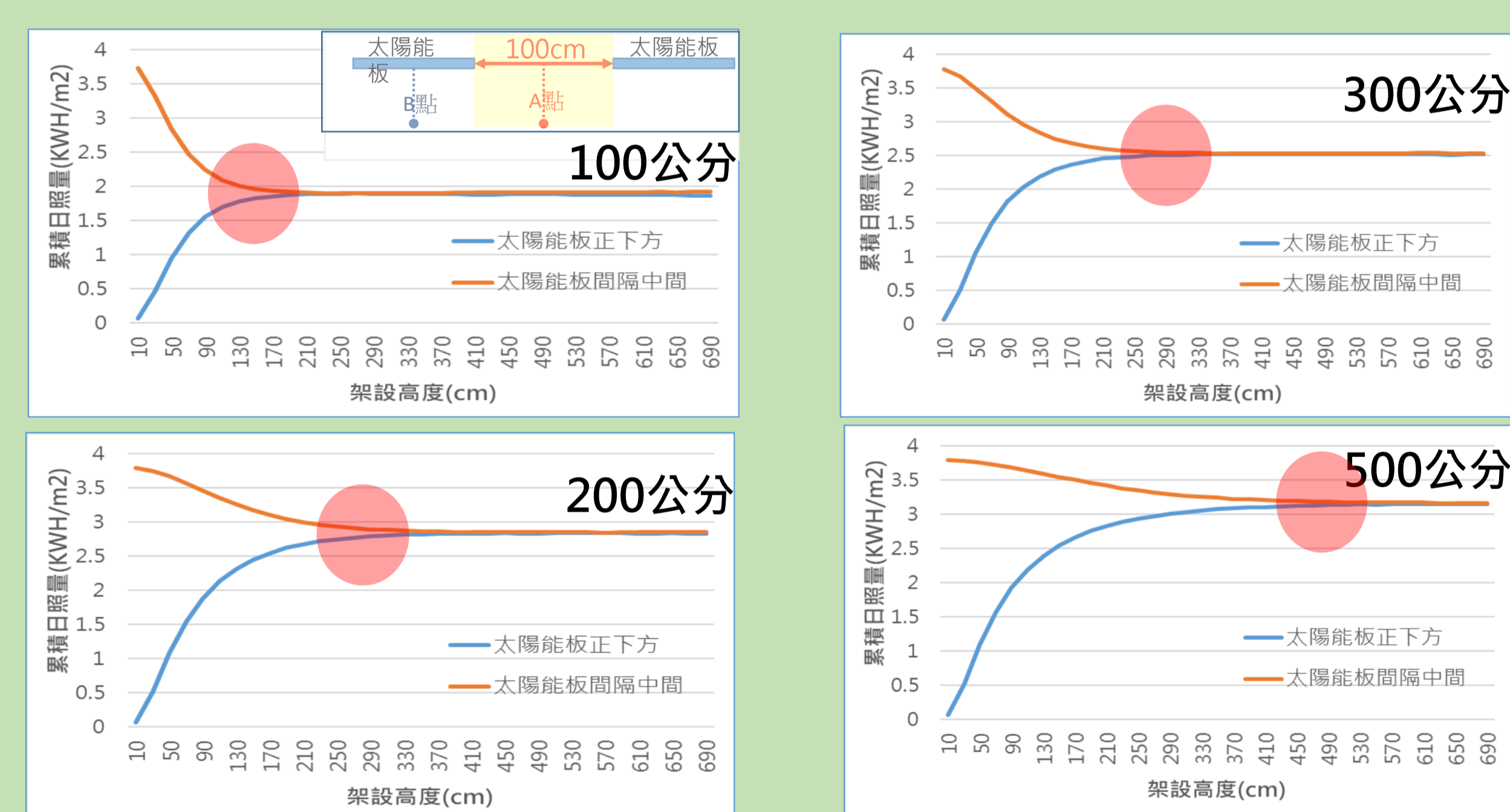
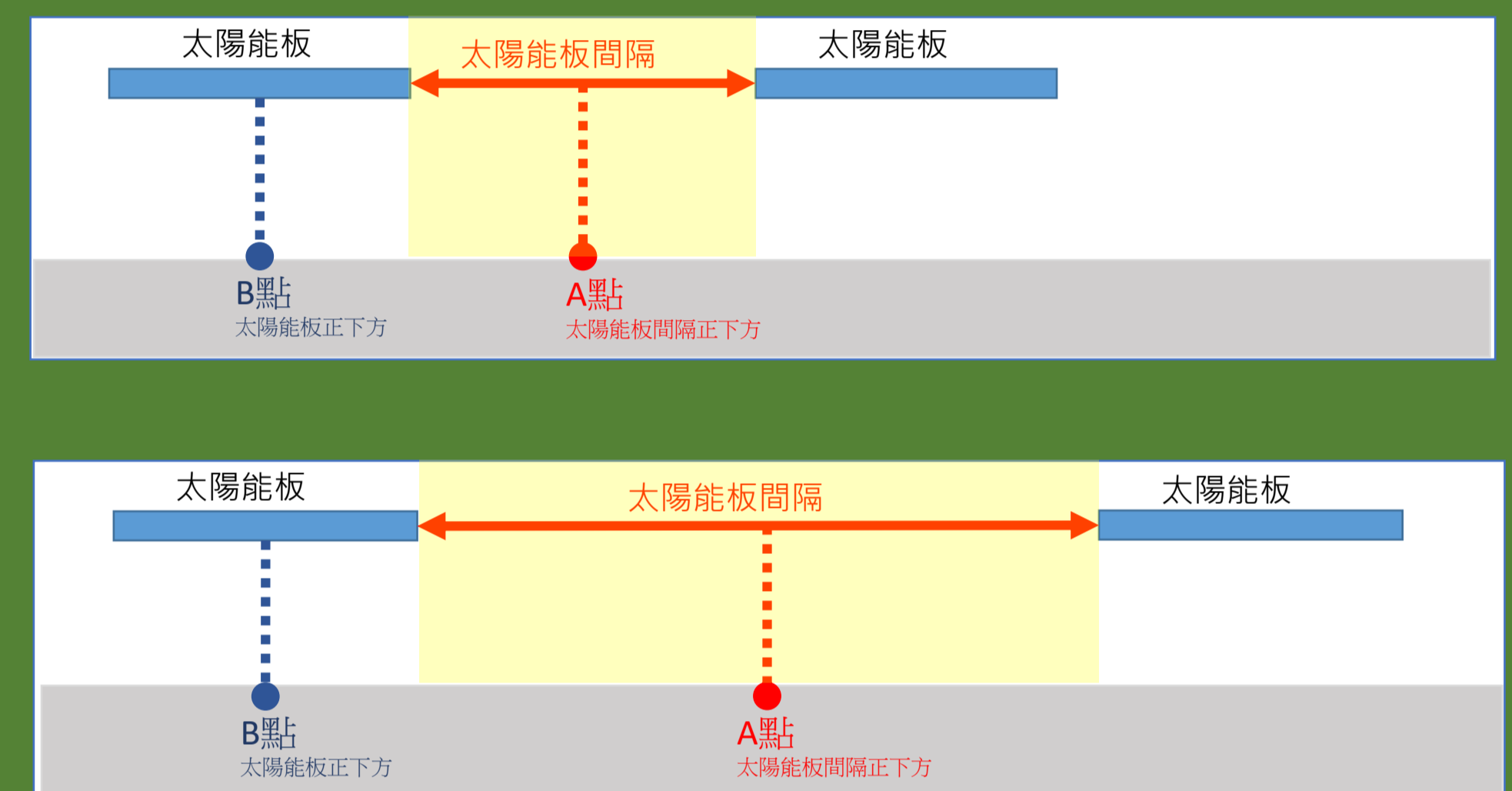
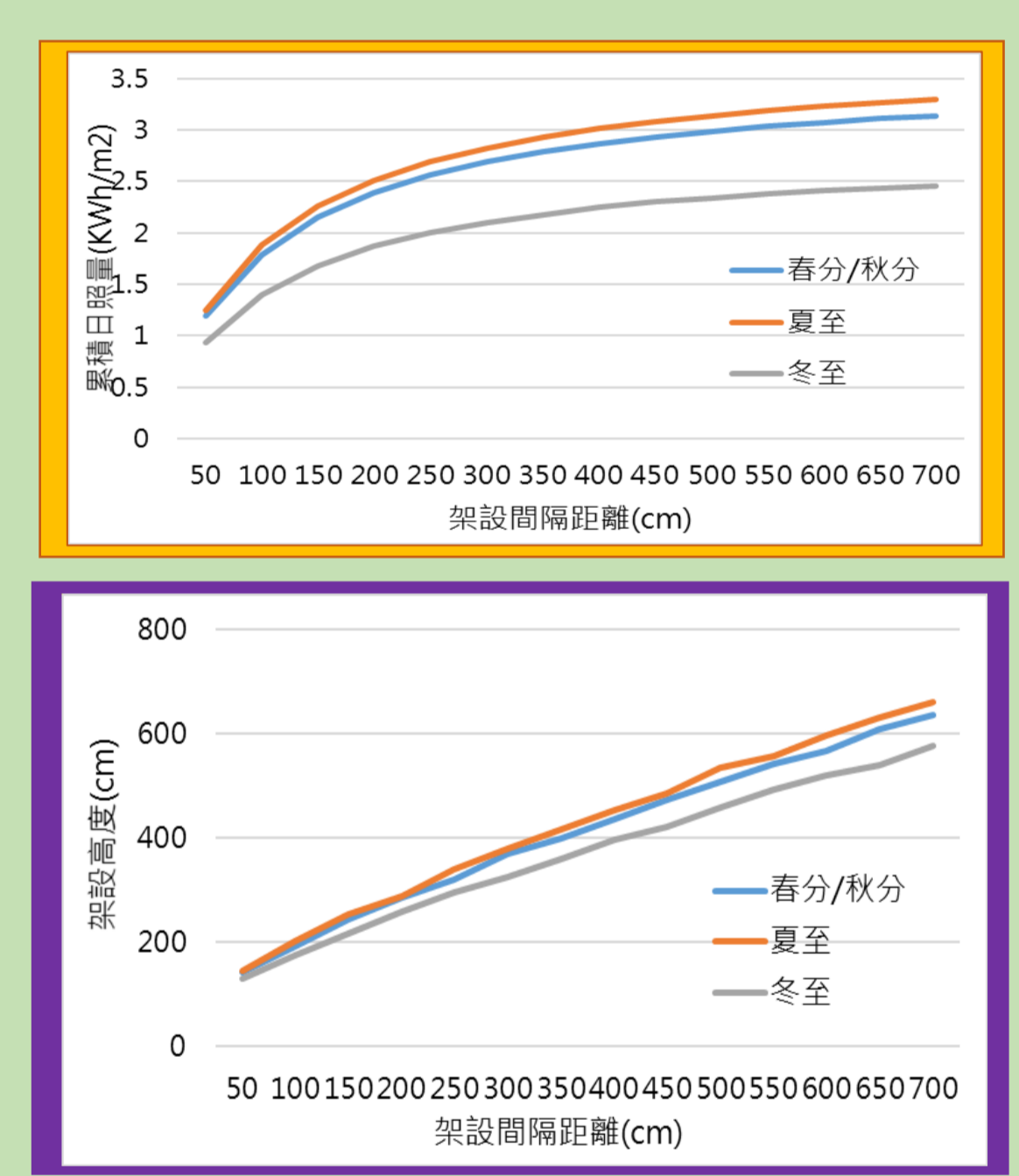
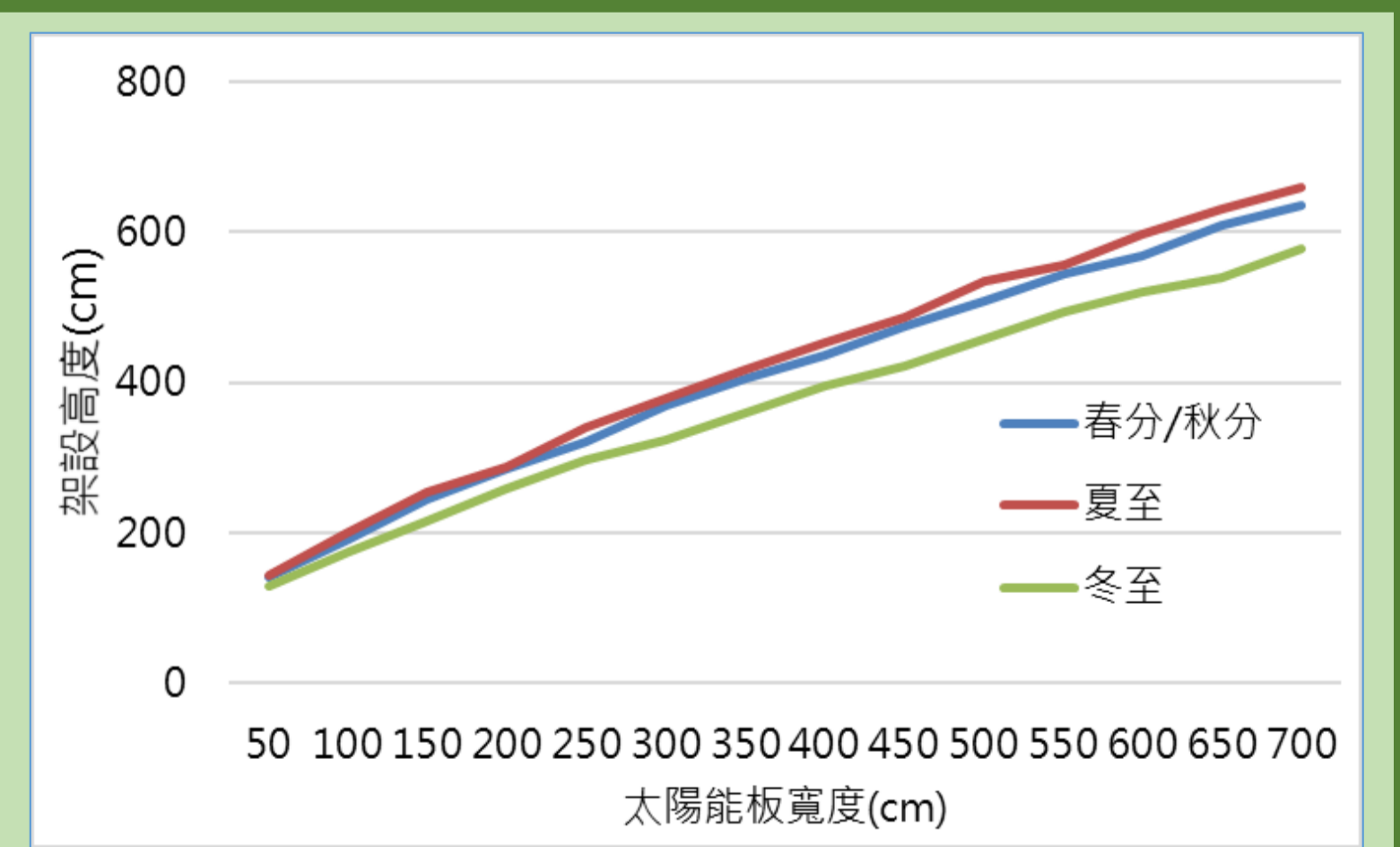
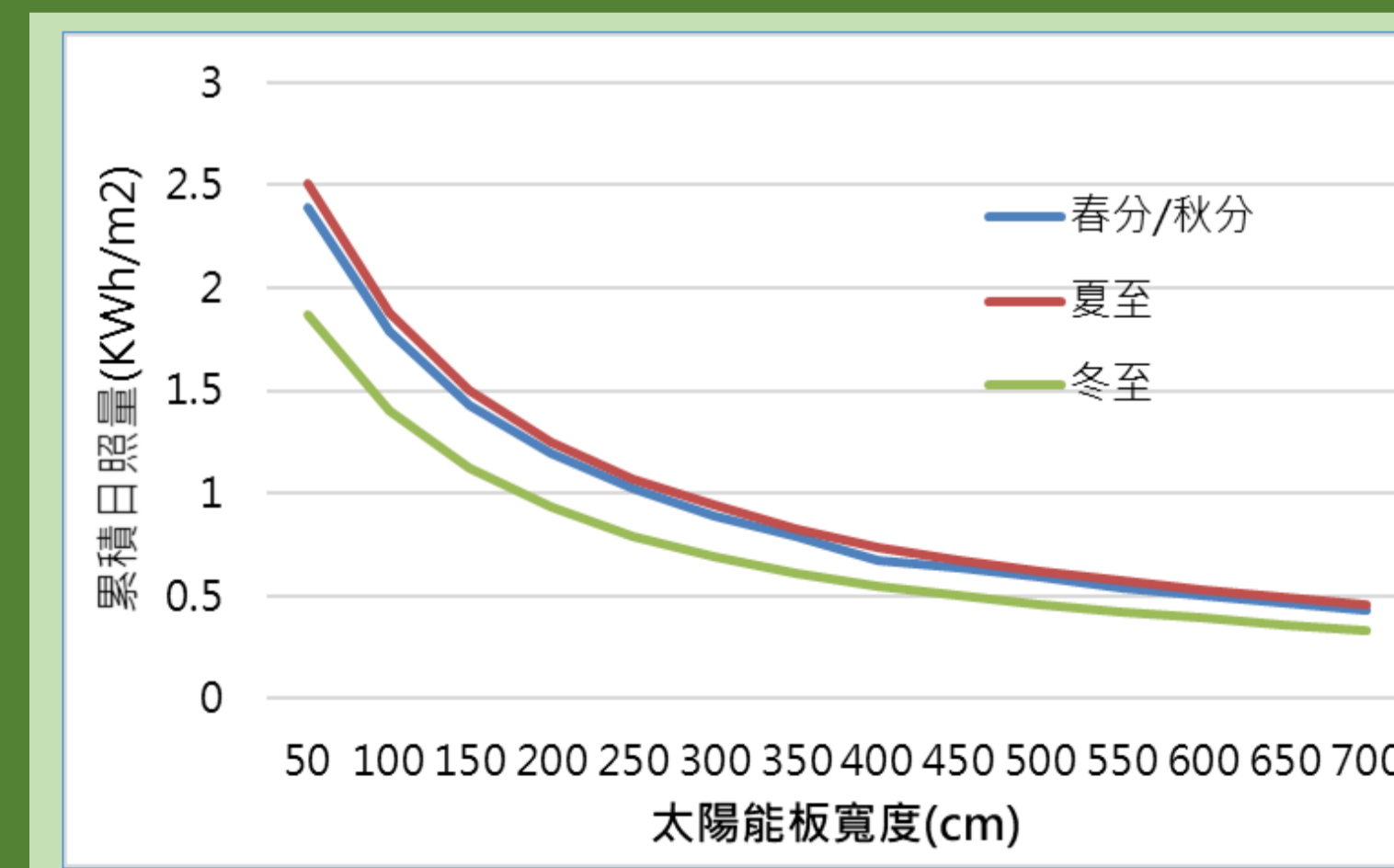
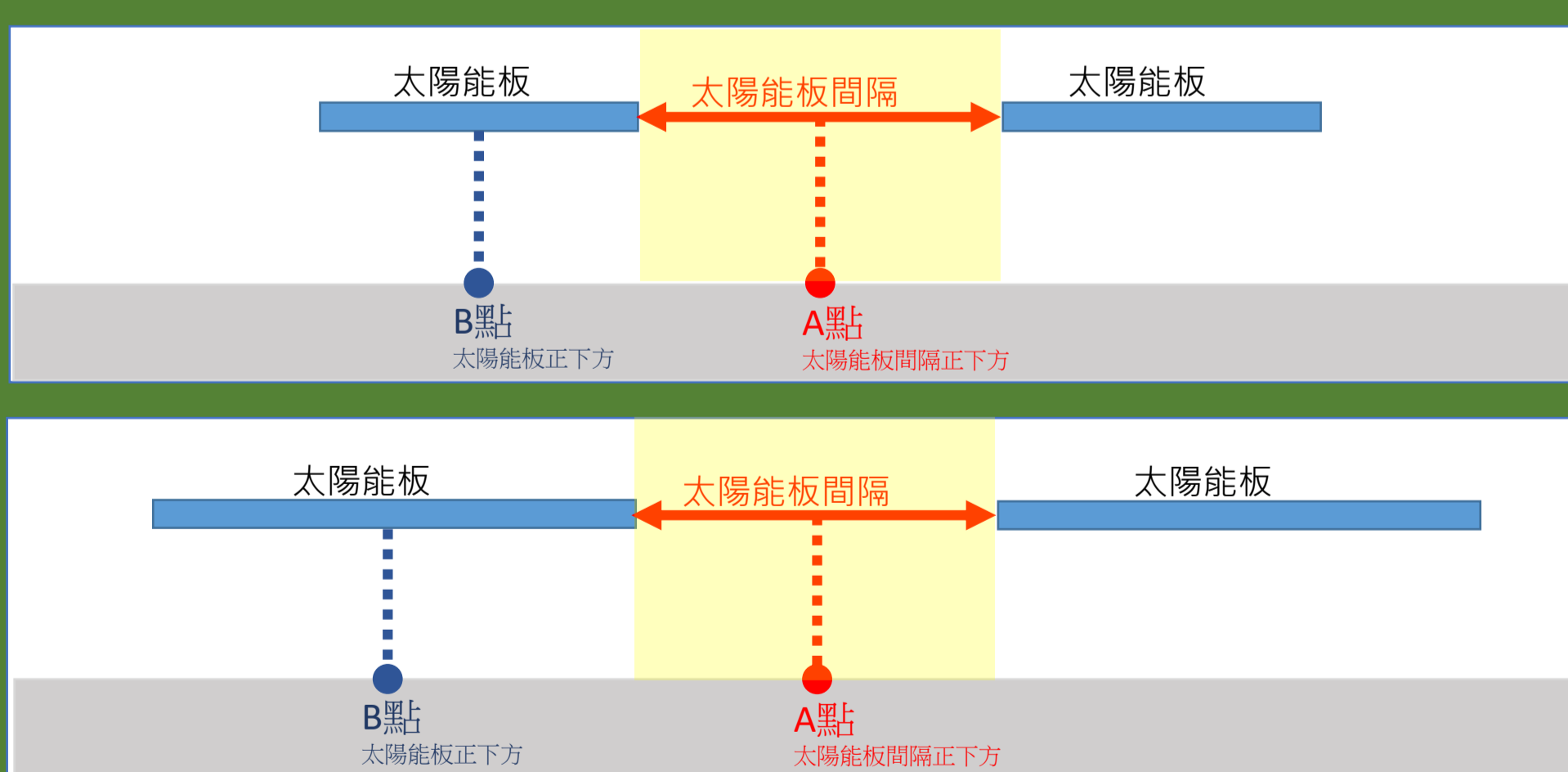


表 4-2 太陽能板寬度 100 公分在不同架設間隔距離之比較

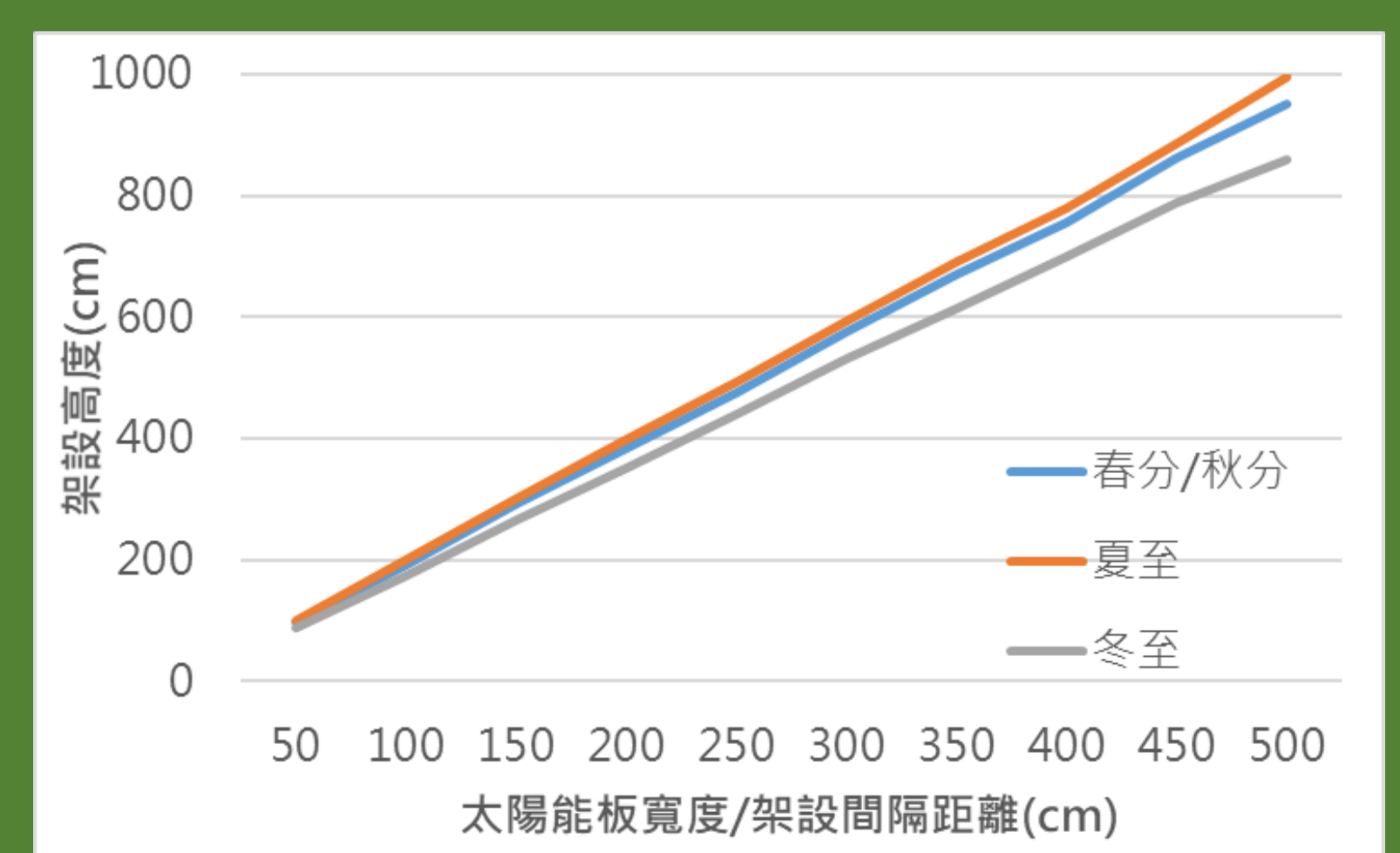
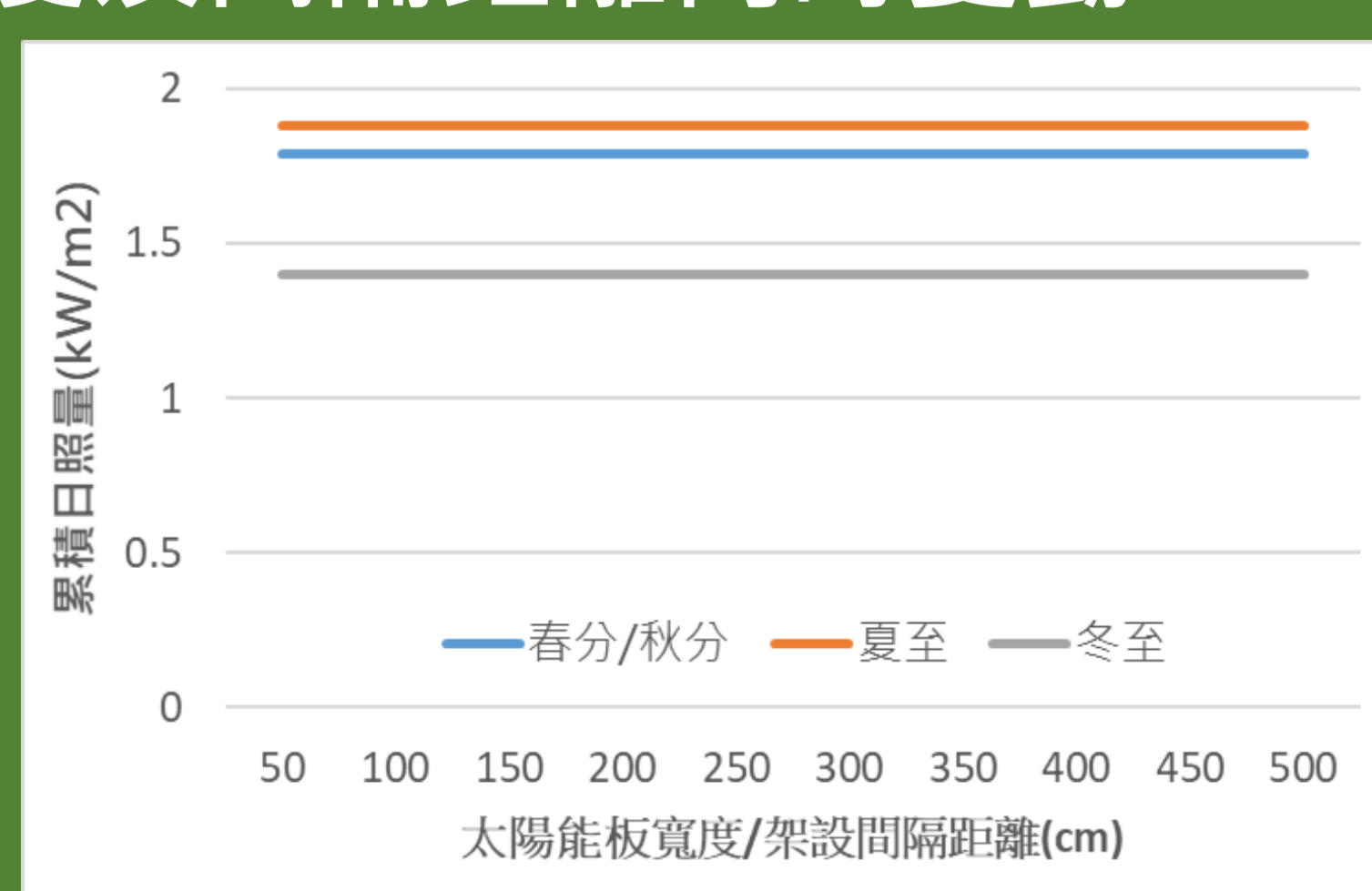
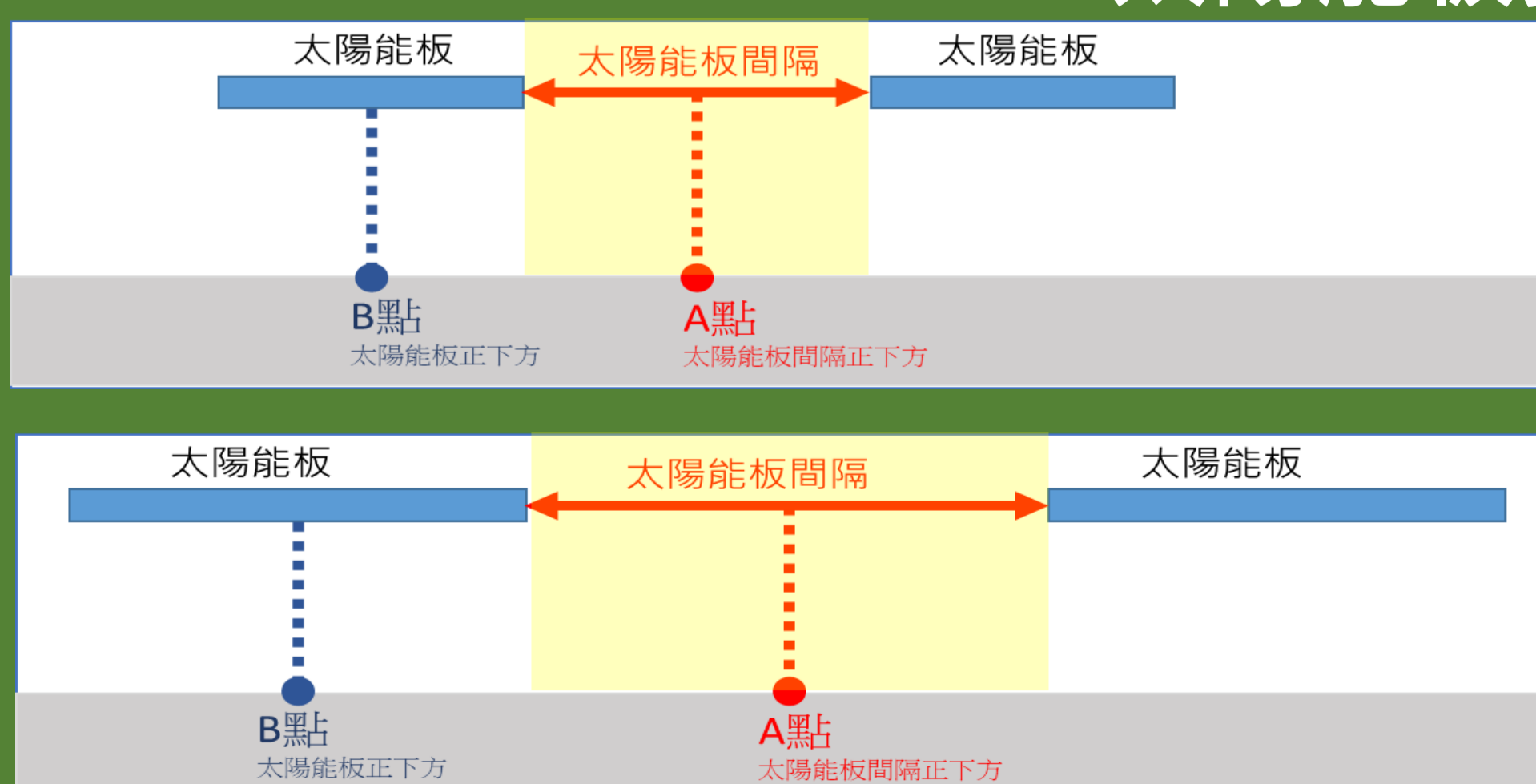
| Ld | 累積日照量(KWh/m²) | | | 架設高度(cm) | | | Ld/(Ls+Ld) |
|-----|---------------|------|------|----------|-----|-----|------------|
| | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | 春分/秋分 | 夏至 | 冬至 | |
| 50 | 1.19 | 1.25 | 0.93 | 142 | 144 | 130 | 0.33 |
| 100 | 1.79 | 1.88 | 1.4 | 192 | 200 | 175 | 0.50 |
| 150 | 2.15 | 2.26 | 1.68 | 243 | 254 | 216 | 0.60 |
| 200 | 2.39 | 2.51 | 1.87 | 284 | 288 | 259 | 0.67 |
| 250 | 2.56 | 2.69 | 2 | 320 | 339 | 296 | 0.71 |
| 300 | 2.69 | 2.82 | 2.1 | 368 | 379 | 324 | 0.75 |
| 350 | 2.79 | 2.93 | 2.18 | 399 | 417 | 359 | 0.78 |
| 400 | 2.87 | 3.02 | 2.25 | 436 | 453 | 396 | 0.80 |
| 450 | 2.93 | 3.08 | 2.3 | 474 | 486 | 421 | 0.82 |
| 500 | 2.99 | 3.14 | 2.34 | 507 | 535 | 457 | 0.83 |
| 550 | 3.04 | 3.19 | 2.38 | 543 | 557 | 493 | 0.85 |
| 600 | 3.07 | 3.23 | 2.41 | 567 | 597 | 521 | 0.86 |
| 650 | 3.11 | 3.27 | 2.43 | 609 | 630 | 539 | 0.87 |
| 700 | 3.14 | 3.3 | 2.46 | 636 | 660 | 577 | 0.88 |



太陽能板間隔距離固定，不同太陽能板寬度



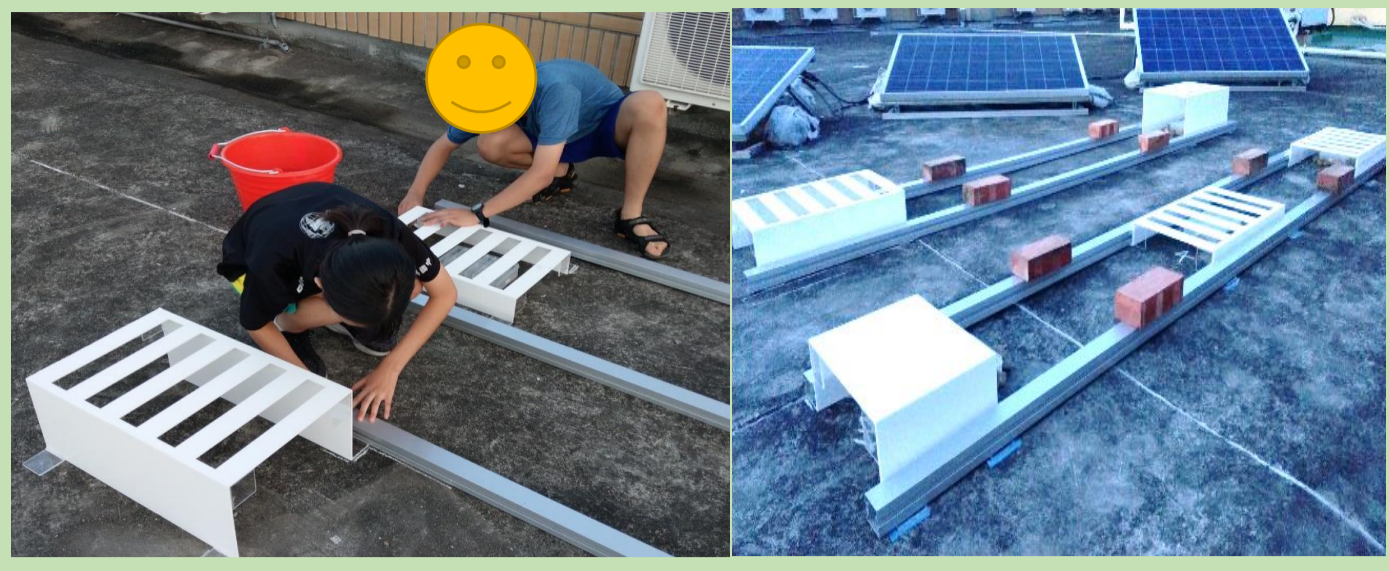
太陽能板寬度及間隔距離同時變動



1. 架設高度隨太陽能板寬度與間隔距離之和變大而增高 2. 夏至時所需之架設高度最高，應以此為施工基準

實測太陽能板架設高度對植物生長的影響—浮萍實驗

以雷射切割機製作壓克力模型來模擬太陽能板架設情形，將模型架設於大樓樓頂。



選取定量的浮萍放入塑膠盒中，以模型遮蓋，一週後計數並統計浮萍數量。



浮萍生長情況

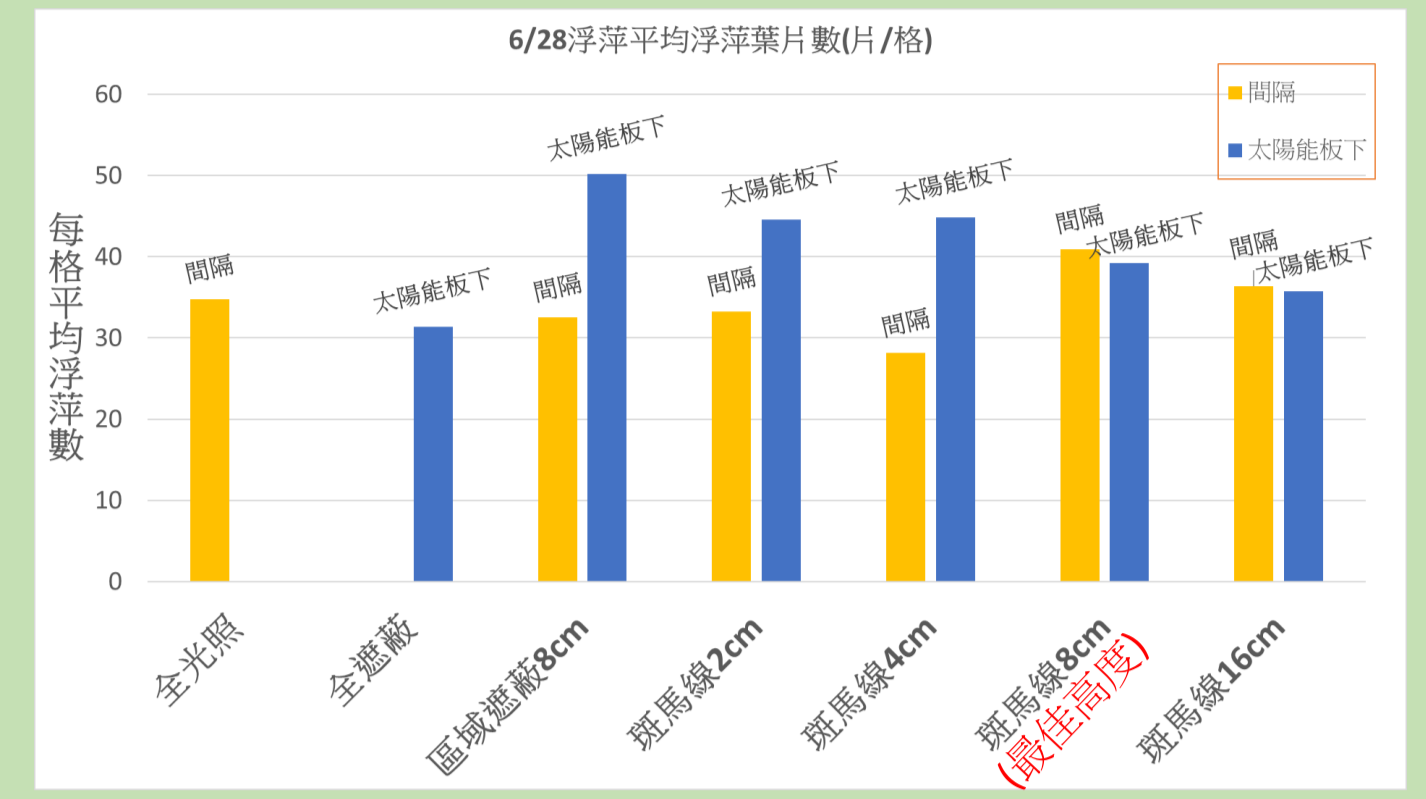
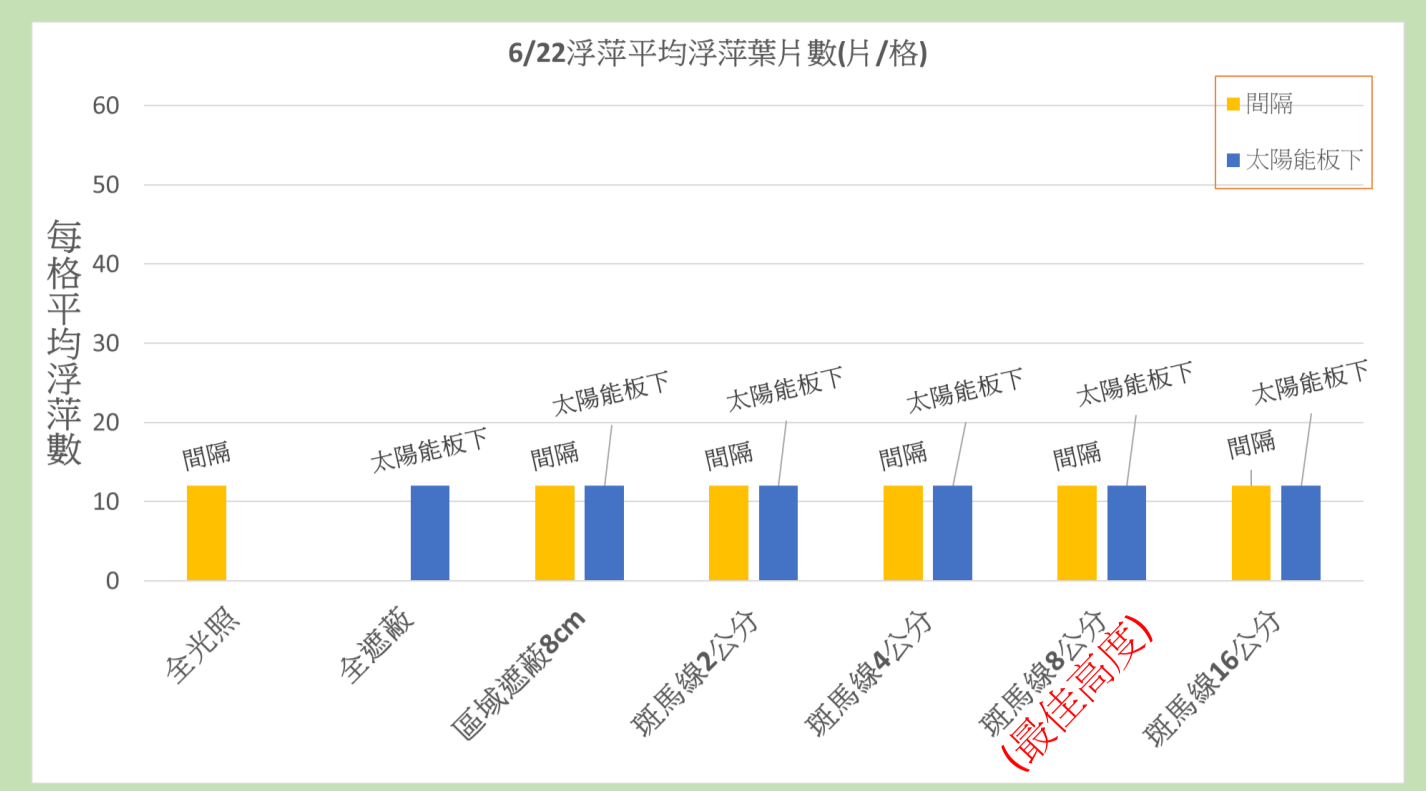


全光照(無遮蔽) 全遮蔽 區塊遮蔽50%面積



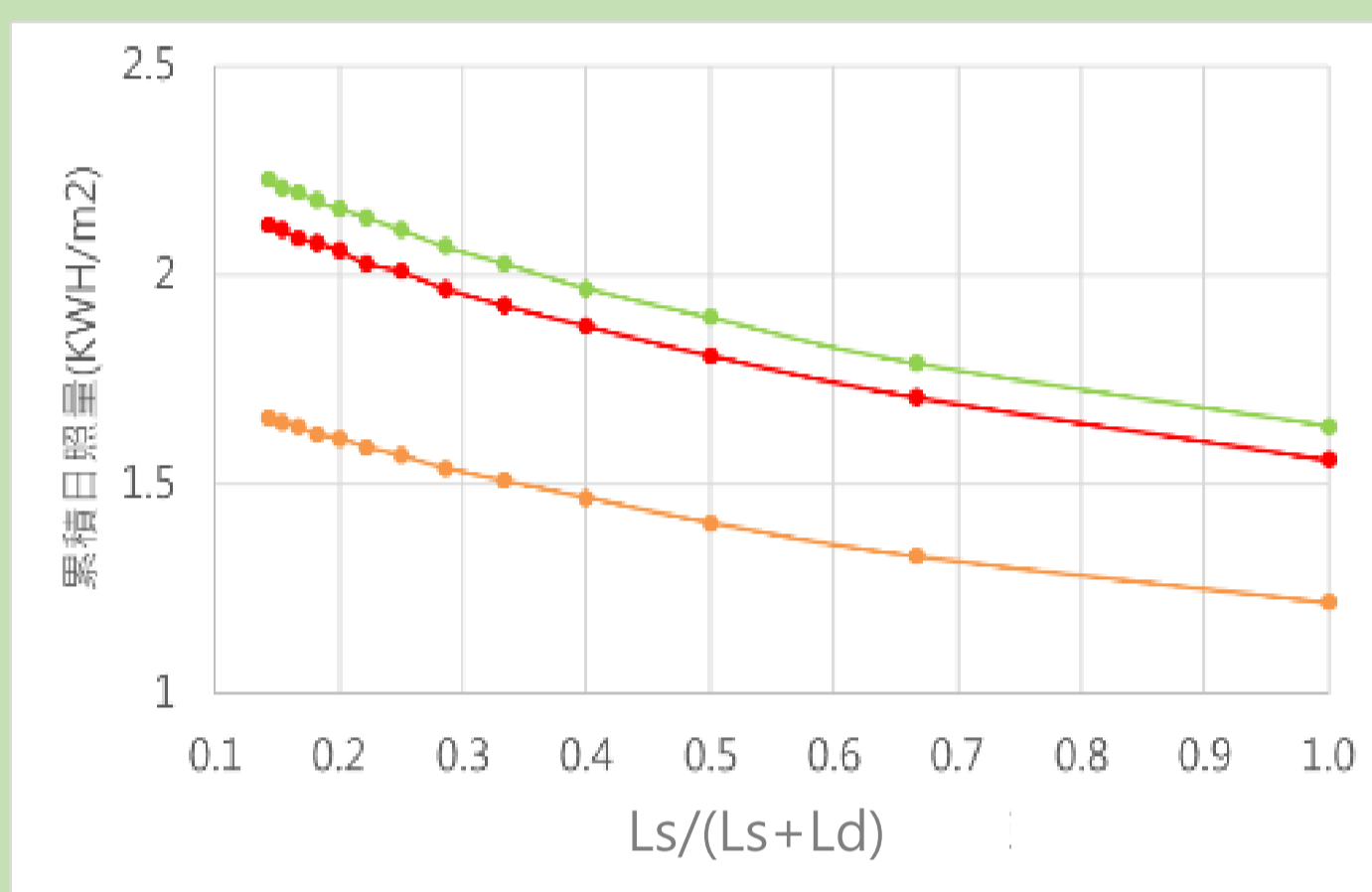
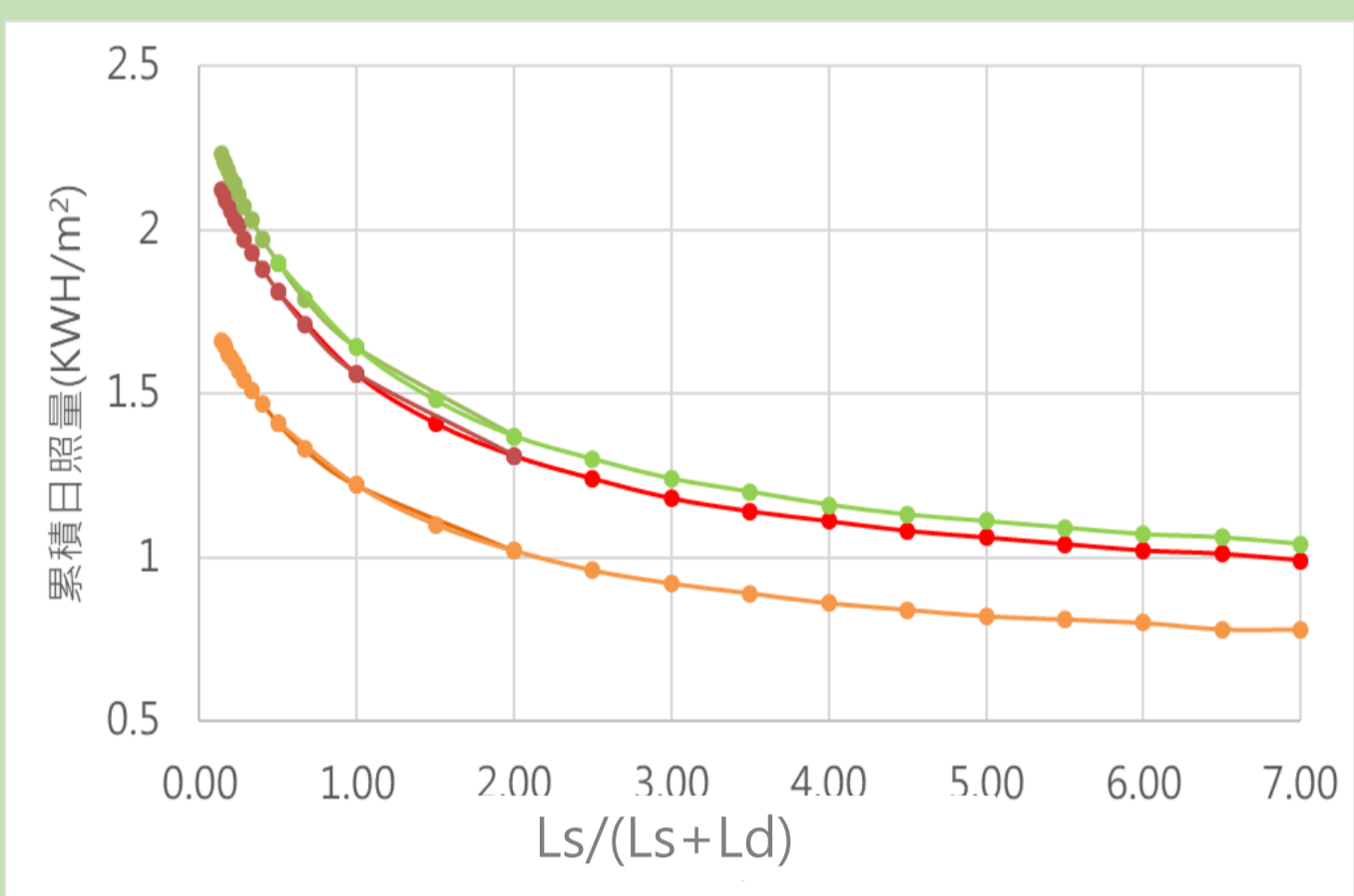
斑馬線式遮蔽50%，架設高度2cm小於最佳高度 斑馬線式遮蔽50%，架設高度8cm等於最佳高度 斑馬線式遮蔽50%，架設高度16cm高於最佳高度

實驗結果



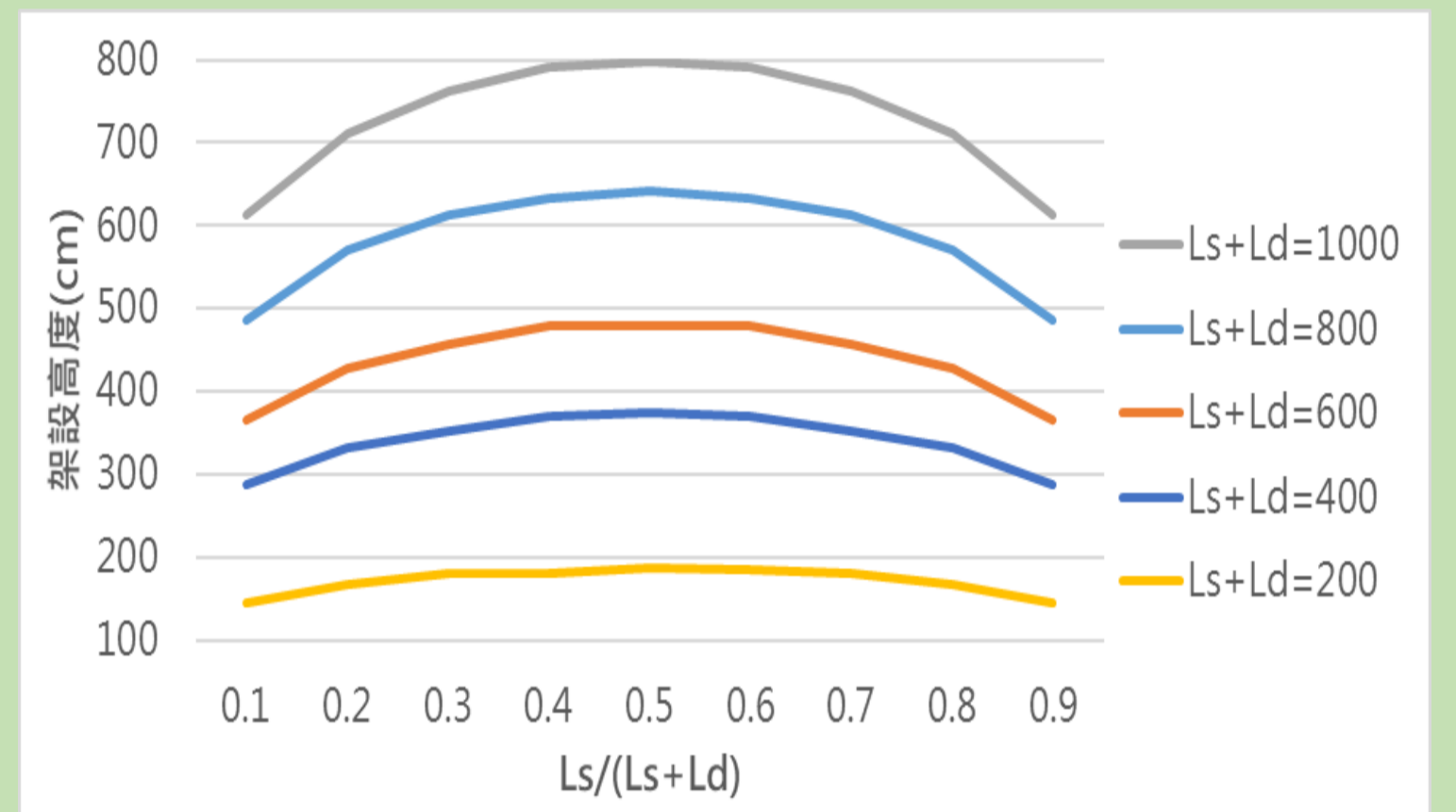
問題與討論

探討1：太陽能板寬度與架設間隔距離之比會直接決定日累積日照量嗎？



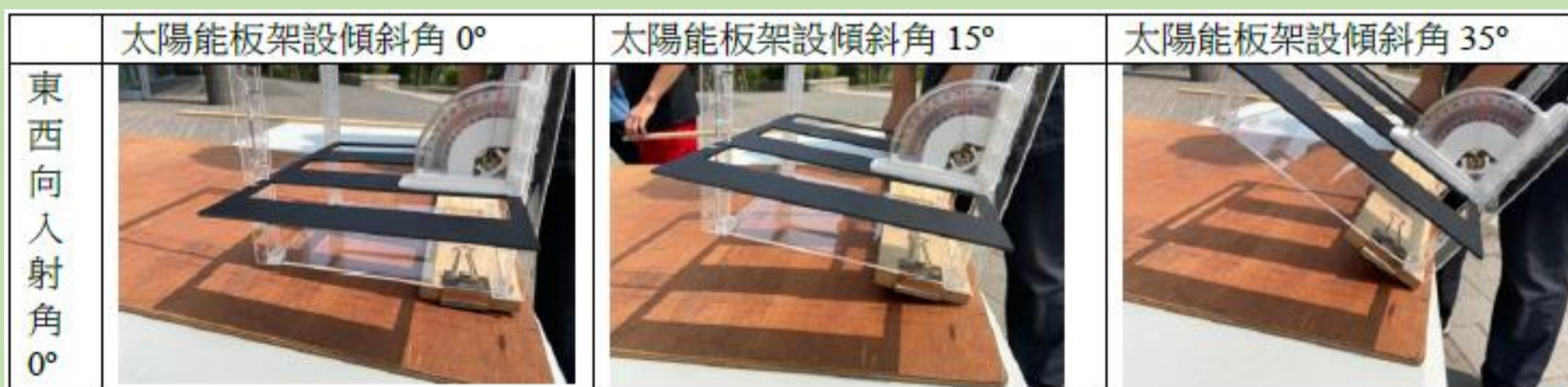
會，太陽能板寬度與架設間隔距離之比與日累積日照量確實有一定關係。利用該關係圖，可依所種植之農作物所需之陽光來決定太陽能板寬度與架設間隔距離之比[10]。

探討2：太陽能板寬度與架設間隔距離之比會影響架設高度嗎？



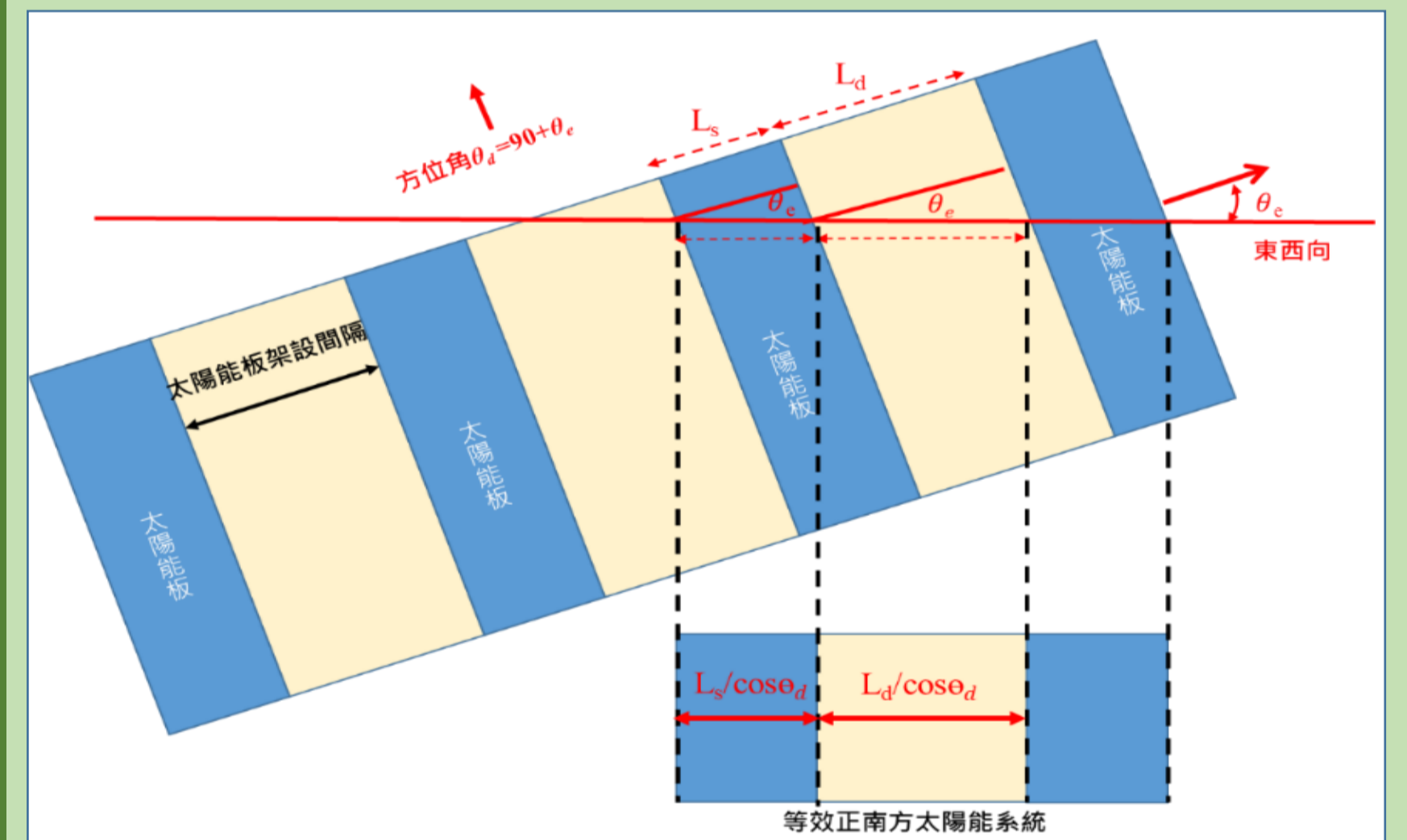
當 $L_s/(L_s+L_d)=0.5$ ，也就是太陽能板寬度等於太陽能板架設間距時，其所需之架設高度最高

探討3：一般太陽能板架設時會有傾斜角，此傾斜角有影響嗎？

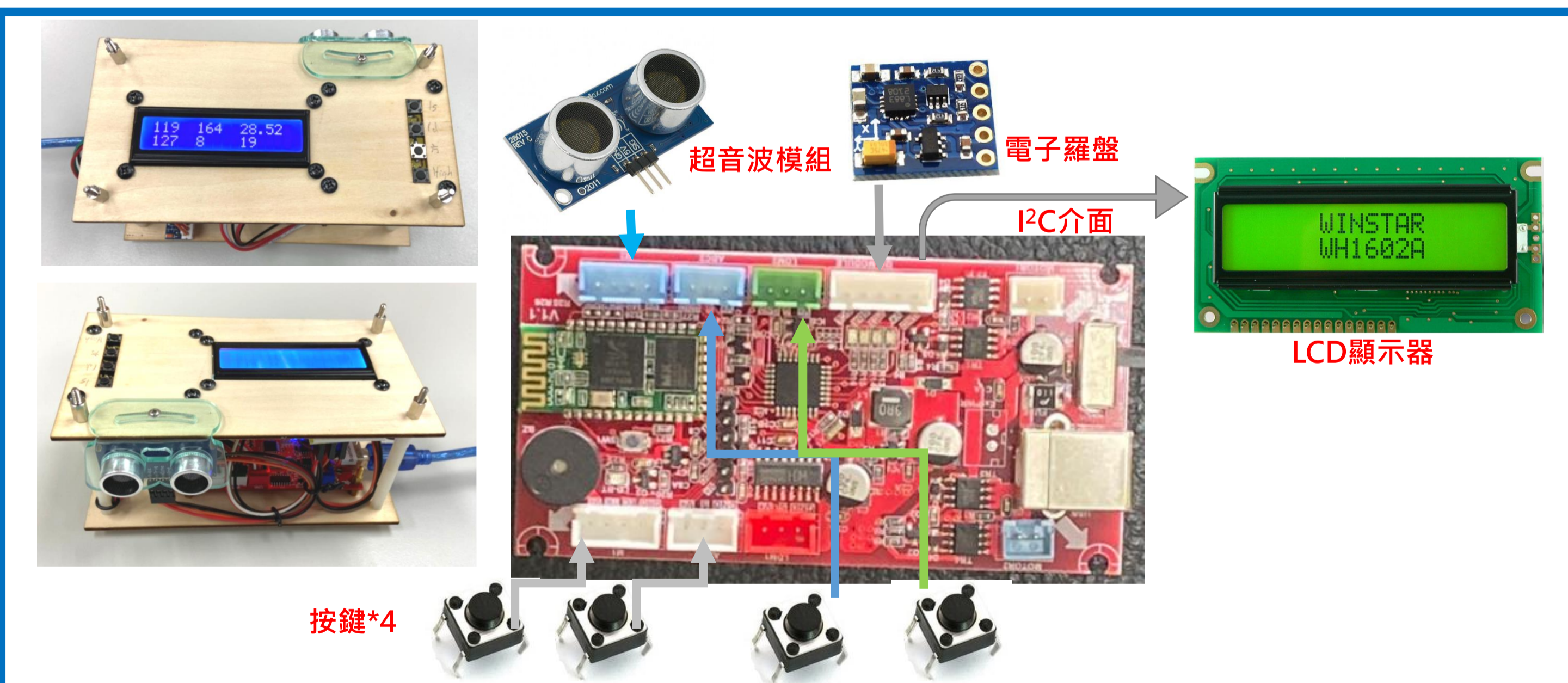
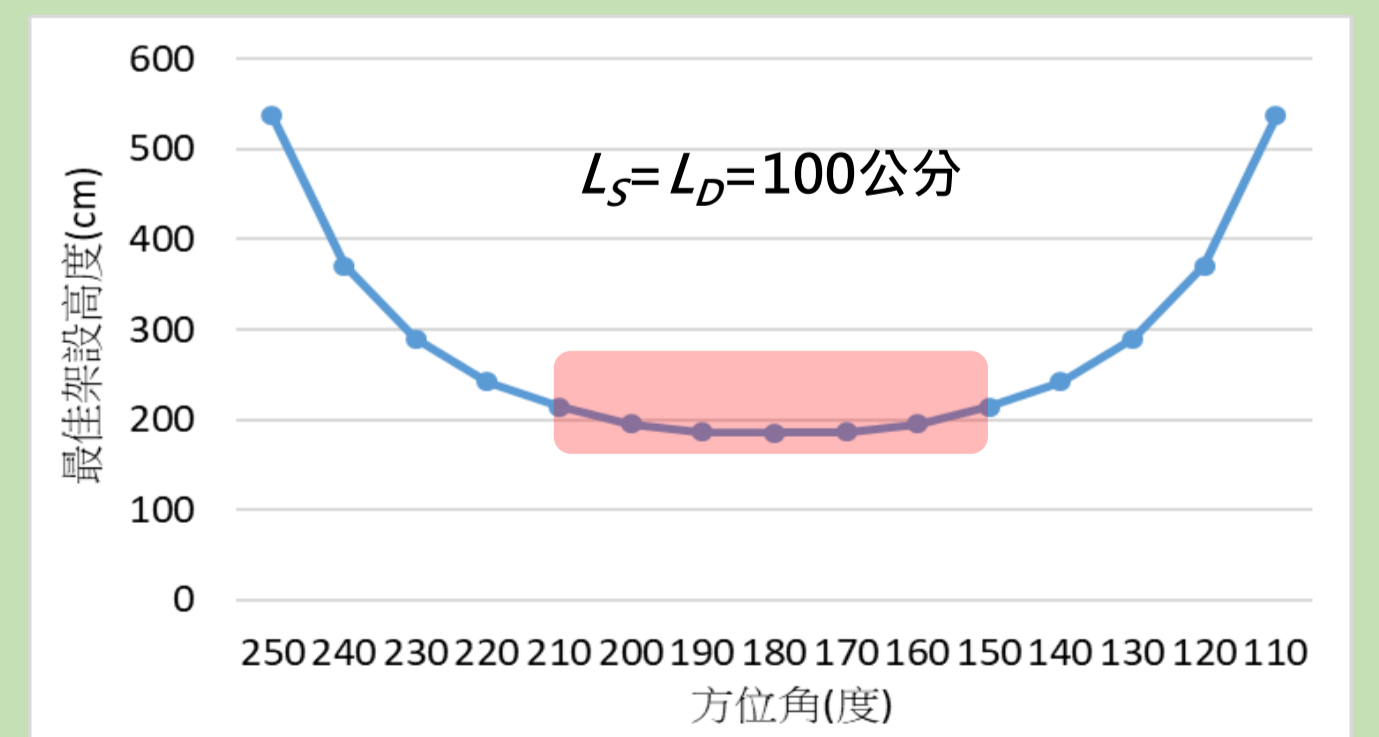


觀察影子變化可發現，太陽能板架設傾斜角僅影響到影子的長短，對何時太陽能板正下方與太陽能板間隔中間何時曬到太陽無影響，故對整日的累積日照量也會無影響。由以上實驗結果可知，太陽能板架設傾斜角不會影響本研究之探討結果。

探討4：若太陽能板架設時非朝向正南方時，應該如何架設？



- $L_{ss} = L_s / \cos(\theta_e)$ 與 $L_{dd} = L_d / \cos(\theta_e)$ 。
- 經過上述轉換，本研究方法即可適用於太陽能板架設非正南方時之情況。
- 建議太陽能板架設方位角位應位於於 $210^\circ-150^\circ$ 之間，才能節省建築費用



結論：

- 若在農地架設太陽能板時，採用適當的方式架設，就能讓太陽能板在發電的同時底下的農地也能進行農業生產，使太陽能發電不再成為農地殺手，減少與農爭地的問題。
- 若以市面常見太陽能板尺寸大部分長約165公分、寬約100公分而言，在太陽能板遮蔽率30%、40%與50%情況下，可得出最低架設高度分別為168公分、208公分與268公分，並得到日累積日照量 1.95 KWh/m^2 、 1.79 KWh/m^2 、 1.64 KWh/m^2 。三個架設高度均低於3公尺，低於一個樓層高度，確實可適用於棚架與溫室，極具可行性。

未來發展：

- 目前當太陽能板面向非正南方時，僅探討太陽能板平放(架設傾斜角=0°)，未來可拓展探討到太陽能板任意架設傾斜角。
- 尋求政府經費或廠商支持，實際架設太陽能板進行農地種電，驗證所提方法的可行性。