

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

佳作

040718

「紫」命的吸引力-紋白蝶翅上的蝶呤色素研究

學校名稱：臺中市立惠文高級中學

作者： 高二 袁苙芸	指導老師： 陳慈宜
---------------	--------------

關鍵詞：紋白蝶、奈米顆粒、蝶呤色素

摘要

分析日本紋白蝶和台灣紋白蝶間的差異。實驗發現日本紋白雌蝶能反射紫外光，而日本紋白雄蝶及雌雄台灣紋白蝶是吸收紫外光，因此日本紋白蝶的雌雄蝶間在短波光源有明顯的對比。再利用 SEM 觀察，發現翅膀上奈米顆粒的數量是造成紋白蝶吸收或反射紫外光的原因。

利用氨水及氫氧化鈉溶液清除紋白蝶的奈米顆粒，發現奈米顆粒具有反射 400 nm 以上及吸收 350~400nm 的特性。因此日本紋白蝶藉由奈米顆粒數量的多寡形成的明顯性標。

蝴蝶翅膀吸收紫外光的特性，應該與奈米顆粒上的蝶呤色素相關。隨著蝶呤奈米粒的數目增加而提高吸收紫外光的能力，使日本紋白雌蝶反射、雄蝶吸收紫外光，因此容易找到同種異性個體，具交配優勢而成為臺灣優勢蝶種。

壹、 研究動機

我每次望向油菜花田，總看到一大群的白色蝴蝶在飛舞著，對其驚人的數量印象深刻，促使我主動搜尋比對資料，赫然發現那些幾乎全是日本紋白蝶 *Pieris rapae curivora* (*P. r. c.*)，而此物種竟已是台灣冬季到春季時期的平地優勢蝶種。這發現讓我想起高一基礎生物上課程中演化以及生物多樣性單元，還有基礎生物下討論的外來種問題。而如今在我生活環境中就出現一個鮮明的例子，即台灣土地上的優勢種是日本紋白蝶而非台灣紋白蝶 *Pieris canidia canidia* (*P. c. c.*)。因為深怕天擇過程中台灣紋白蝶可能被淘汰，決定展開台灣與日本紋白蝶間的研究。

在飼養紋白蝶過程中，經大量蒐集資料及實驗觀察結果，我了解視覺應該是日本紋白蝶在近處時的擇偶關鍵，而其中又偏好紫外光，所以我想探究是何種構造或物質的影響，使其具有較高的優勢關鍵。

因此本研究針對台灣紋白蝶與日本紋白蝶之雌、雄蝶間的差異並進行比較，實驗證明及分析日本紋白蝶的生存及交配優勢，探討紋白蝶在台灣生存型態以及更替方式。

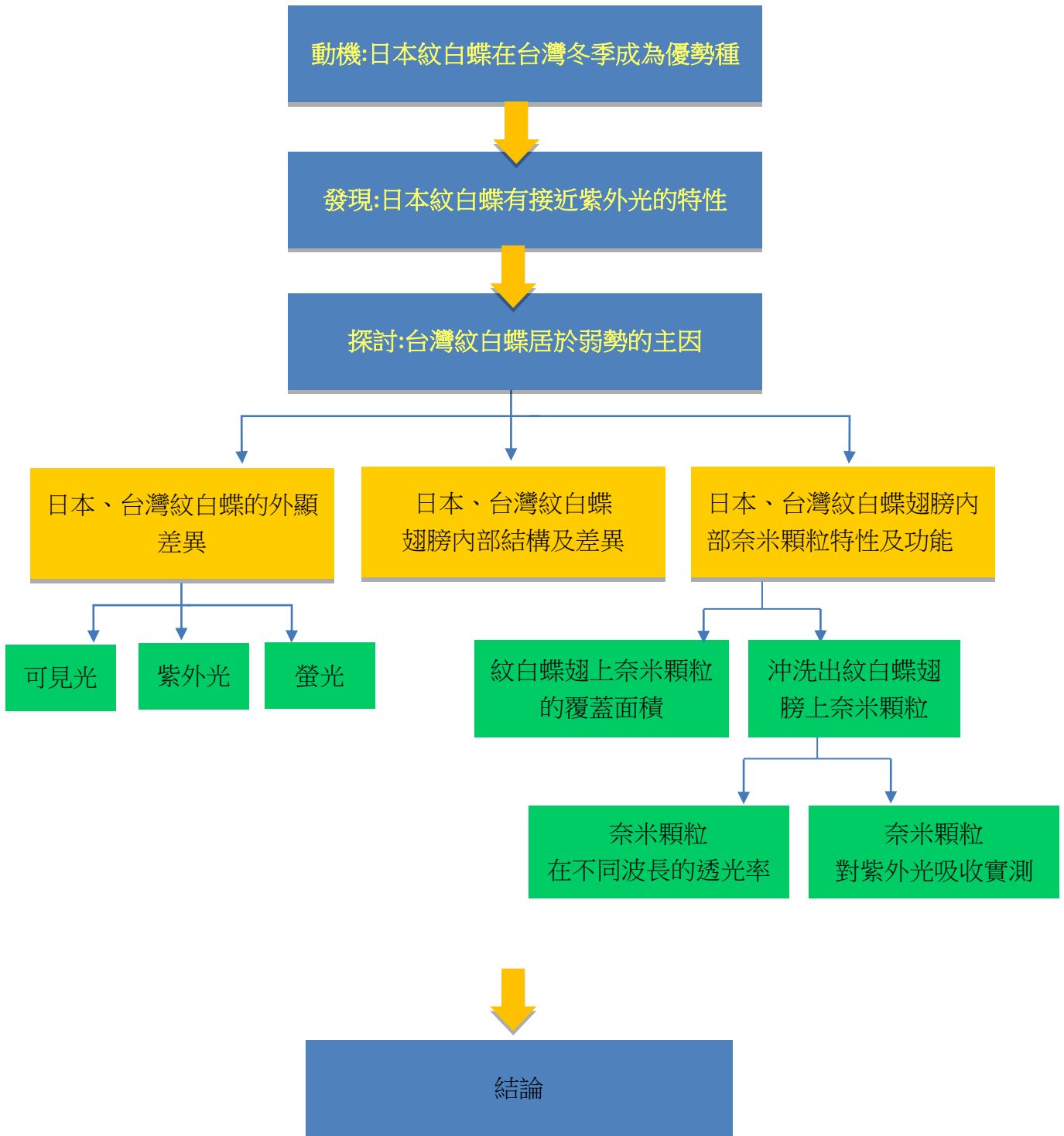
貳、 研究目的

- 一、日本雌、雄紋白蝶(*P. r. c.*) 構造的外顯差異？
- 二、台灣雌、雄紋白蝶(*P. c. c.*) 是否亦具有存在於日本雌、雄紋白蝶間明顯的外顯差異？
- 三、日本紋白蝶(*P. r. c.*)與台灣紋白蝶(*P. c. c.*)翅膀內部結構以及排列的差異？
- 四、日本紋白蝶(*P. r. c.*)與台灣紋白蝶(*P. c. c.*) 在不同波長下對光線的透光率？
- 五、相較於日本紋白蝶(*P. r. c.*)，台灣紋白蝶(*P. c. c.*)居於弱勢的主因為何？

參、 研究設備及器材

編號	項目	數量	規格
1	<i>Pieris rapae curivora</i> (<i>P. r. c.</i>)	逾百隻	日本紋白蝶
2	<i>Pieris canidia canidia</i> (<i>P. c. c.</i>)	逾百隻	台灣紋白蝶
3	捕蟲網	1 支	鋁合金三節伸縮，105cm
4	飼養網	1 個	75×75×115cm
5	飼養箱	數個	22L，41×26×29cm
6	紫外燈(UVA)	1 台	T5，10W，波長 365nm
7	單眼數位相機	1 台	Nikon D70s
8	微量吸管	2 支	AWE-770050 AWE-770060
9	鏡頭	1 個	Tamron 17-50 mm F2.8
10	高速攝影機	1 台	JVC-PX10
11	分光光度計	1 台	SP-830PLUS
12	解剖顯微鏡	1 台	Hamlet SZ45TL
13	複式顯微鏡	1 台	Hamlet 40X~1000X
14	正立螢光顯微鏡	1 台	中興大學 Zeiss Axio Imager.A1
15	掃描式電子顯微鏡	1 台	中興大學 JEOL, JSM-7401F
		1 台	彰化師範大學 Hitachi S-4300 SE
16	NaOH	1 罐	無
17	異丙醇	數罐	無
18	氨水	數罐	無
19	防曬乳	1 瓶	SPF30
20	Image J	-	Image J 1.48

肆、 研究過程或方法



一、 紋白蝶的飼養

實驗所用的日本和台灣紋白蝶，最初都先從野外捕捉一批，帶回實驗室，置於飼養網，除了在網內放置糖水和水果，如:柳丁，餵食紋白蝶，同時放置十字花科植物，如:高麗菜、油菜葉 (*Brassica campestris*) 提供繁殖和幼蟲生長，當卵的大小足以利用肉眼辨識，便將菜葉移至飼養箱，並每天更換新鮮菜葉，等待結蛹羽化。



圖 1:在飼養箱中等待蛹羽化



圖 2:以十字花科植物飼養紋白蝶

飼養過程中發現，紋白蝶似乎有趨光性，為了得知日本紋白蝶對不同波長光的喜好程度。在暗室中，四色(紅、澄、綠、藍)LED 燈組放在飼養箱中的四個角落，每次放入 10 隻雄蝶，觀察雄蝶的反應。



圖 3: 日本紋白蝶在暗室中幾乎都聚集在藍光附近

二、 不同條件下拍攝紋白蝶

(一)紫外光拍攝條件

將紋白蝶樣本攤平至於暗室中，利用紋白蝶可接收的光一波長 365nm 的紫外光照射，因現在相機多已具備濾紫外光的功能，必須以能夠感測紫外光的鏡頭及相機，因此我利用單眼數位相機(Nikon D70s) 加上 Tamron 17-50 mm F2.8 鏡頭拍攝。快門 1/4、光圈 4。



圖 4:紙箱改裝的暗室

(二)正立式螢光顯微鏡

1.玻片製備:

(1)取透明膠帶黏在紋白蝶翅上。

(2)慢慢撕下膠帶後，黏於載玻片上，即取得翅膀與鱗粉玻片。

2.向中興大學借用正立式螢光顯微鏡，分別利用紫外光激發濾片組(DAPI 波段)、藍光激發濾片組(GFP 波段)及綠光激發濾片組(TRTIC 波段)觀察紋白蝶翅膀及鱗粉。

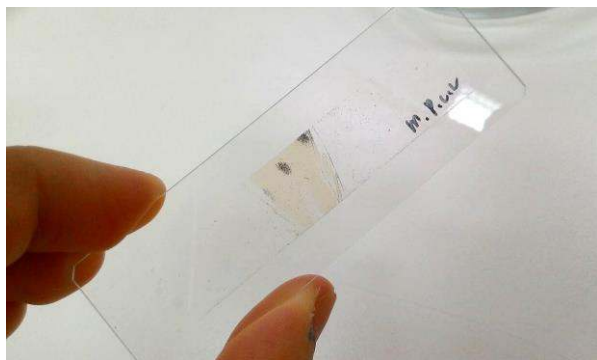


圖 5:自製玻片(翅膀)

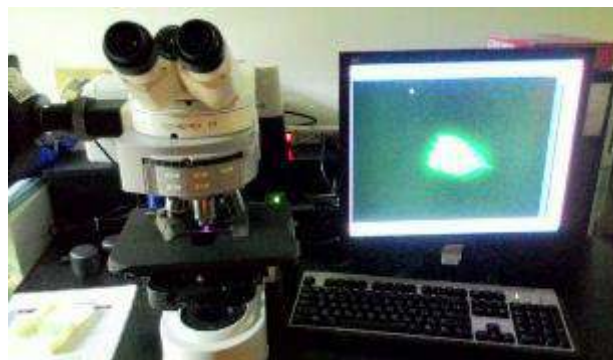


圖 6:中興大學 正立螢光顯微鏡

三、 分析紋白蝶翅膀結構：

向中興大學和彰化師範大學借用掃描式電子顯微鏡 SEM(Scanning Electron Microscope)觀察紋白蝶的翅膀構造。將紋白蝶翅膀鍍鉑之後，利用 SEM 拍攝分析結構。



圖 7:中興大學 SEM



圖 8:中興大學鍍鉑儀器

四、 奈米顆粒在紋白蝶翅上的覆蓋面積

根據 SEM 掃描後的照片我們可以明顯發現，不同種以及不同性別的紋白蝶翅上格狀大小、奈米顆粒大小和數量多寡，皆有差異。利用 Image J 圖像分析，SEM 20000X 照片上，計算無奈米顆粒覆蓋面積之大小。

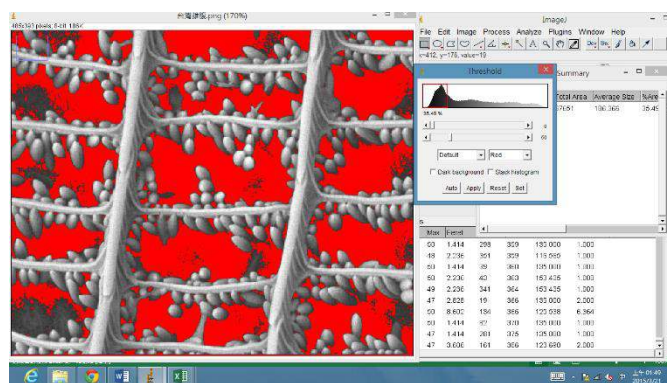


圖 9: Image J 分析覆蓋面積

五、 沖洗出紋白蝶翅膀上的奈米顆粒

為驗證奈米顆粒是否具有吸收紫外線的能力，我們嘗試將日本紋白雄蝶和雌雄台灣紋白蝶的奈米顆粒清除掉，並觀察其前後的差異。

由於蝴蝶的翅膀具有疏水性，所以先利用中性的異丙醇浸潤紋白蝶標本以便後續溶液處理。

(一)調配出不同 pH 值的氫氧化鈉溶液，將蝴蝶標本浸泡 2 分鐘即拿起

(二)再次利用異丙醇沖洗，以減少氫氧化鈉的殘留

(三)靜置標本至異丙醇完全揮發，並在紫外燈下拍攝，比較溶液處理前後的差異

將日本紋白雄蝶浸泡於 pH 值分別為:1、3、5、7、9、11、13 的溶液中，結果發現 pH13 溶液處理過能使日本紋白雄蝶反射紫外光，進一步尋求臨界值。



圖 10: 利用異丙醇處理具有疏水性的紋白蝶翅膀



圖 11: 浸泡過異丙醇的蝴蝶翅膀

六、 分析紋白蝶翅膀上奈米顆粒在連續性波長下的透光度

將被沖洗出奈米顆粒的氨水溶液裝入分光光度計的樣品槽座，以氨水對照組為基準。

由於蝴蝶的翅膀具有疏水性，所以先利用中性的異丙醇浸潤紋白蝶標本以便後續溶液處理。

(一)調配 0.5M 的氨水溶液，將蝴蝶標本浸泡 2 分鐘即拿起

(二)將浸泡過紋白蝶標本的氨水，裝入分光光度計的樣品槽座，再置入分光光度計

(三)在分光光度計中，先置入氨水對照組為基準歸零後，再置入待測的沖洗出的顆粒樣本

(四)比較波長 350nm~650nm 時紋白蝶翅膀顆粒的透光度



圖 12:分光光度計樣品槽座



圖 13:分光光度計

七、紋白蝶翅膀上奈米顆粒對紫外光的吸收實測

為驗證奈米顆粒為吸收紫外光線的主因，並非翅上勒狀結構，我們利用 5ml 0.5M 氨水溶液，浸泡兩片上翅。將溶液至於玻片後待自然蒸發與市售的防曬乳比較。

(一)以 5ml 0.5M 氨水溶液，浸泡兩片上翅

(二)以微量滴管吸取 300 μ l 浸泡過翅膀的氨水溶液，滴在載玻片上，靜置至液體蒸發

(三)將玻片(包含對照組)滴於於自製紫外燈管外罩上，以單眼數位相機(Nikon D70s) 加上 Tamron 17-50 mm F2.8 鏡頭拍攝。快門 1/4、光圈 4

(四)利用 Image J、threshold colour 和 threshold 分析亮度，製成圖表



圖 14: 自製拍攝玻片暗箱

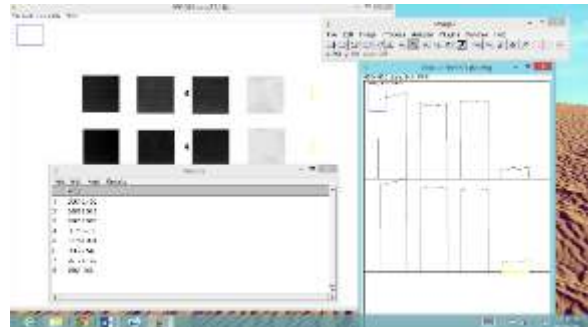


圖 15: Image J 分析亮度

伍、 研究結果

一、 分析紋白蝶對各種波長光的喜好

(一)昆蟲的視覺可接收光波波長從 330nm~650nm，與人類可接收的範圍 400nm~700nm，不太相同。四色(紅、藍、橘、綠)LED 燈組吸引紋白蝶的情形，結果如下圖 16:

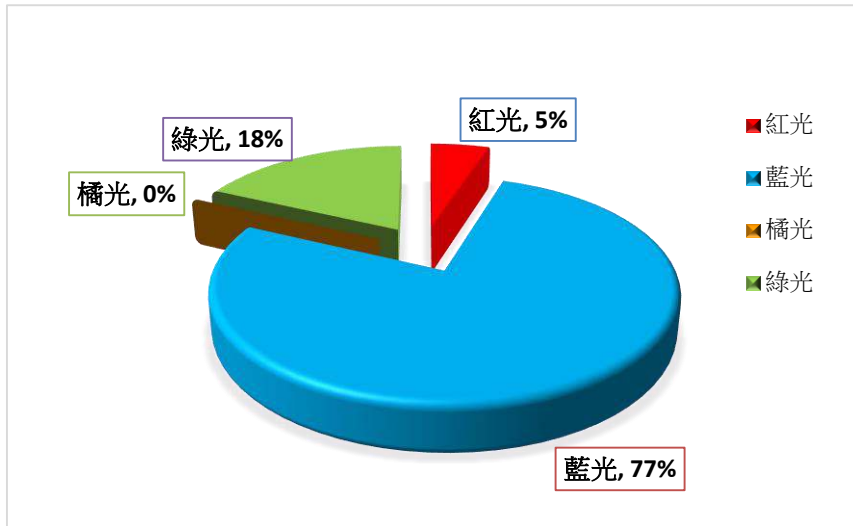


圖 16: 四色 LED 燈組吸引日本紋白蝶的情形

(二)由實驗得知，雄蝶對於藍光非常敏感，當改成紫外燈靠近時，所有的紋白蝶都會迅速飛近紫外燈，如圖 17。由此實驗驗證紋白蝶的複眼可以接受到 400nm 以下的紫外光區段波長。並得知：紋白蝶對於藍光及 UVA 紫外線波段的區段非常敏感。



圖 17: 日本紋白蝶會迅速飛近紫外燈，顯示紫外光有很強的吸引力

二、日本與台灣紋白蝶在可見光下的差異

- (一)台灣紋白蝶背部的下翅邊緣有一圈色斑點，日本紋白蝶則無。
- (二)不論台灣紋白蝶或日本紋白蝶，雌紋白蝶背部翅膀上的黑色斑點範圍都較雄紋白蝶大，因此可見光下雄紋白蝶比雌紋白蝶白，在長波長光源下較為明亮。
- (三)台灣及日本紋白蝶腹部翅膀皆呈淡黃色，兩種雌蝶背部上翅中間部分呈現略偏黑色，故相較於背部翅膀，腹部翅膀較無明顯差異。

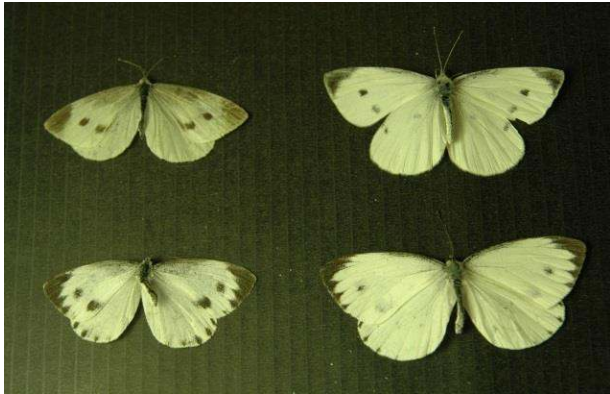


圖 18: 可見光下紋白蝶背部
上左:日本雌蝶 上右:日本雄蝶
下左:台灣雌蝶 下右:台灣雄蝶



圖 19:可見光下紋白蝶腹部
上左:日本雌蝶 上右:日本雄蝶
下左:台灣雌蝶 下右:台灣雄蝶

三、日本與台灣紋白蝶在紫外線光下的差異

- (一)在紫外光下，日本紋白雌蝶背部及腹部皆明顯能反射紫外光，日本紋白雄蝶及雌雄台灣紋白蝶則是吸收紫外光，故在紫外光下日本紋白雌蝶較其他紋白蝶顯而易見。
- (二)在紫外光下雌雄日本紋白蝶比雌雄台灣紋白蝶有較明顯的差異，故推論日本紋白蝶藉由接收翅膀的亮度來分辨雌雄，強烈的對比就是明顯的性別標示。



圖 20: 紫外光下紋白蝶背部
上左:日本雌蝶 上右:日本雄蝶
下左:台灣雌蝶 下右:台灣雄蝶



圖 21:紫外光下紋白蝶腹部
上左:日本雌蝶 上右:日本雄蝶
下左:台灣雌蝶 下右:台灣雄蝶

四、 利用螢光顯微鏡分析紋白蝶翅膀

(一)翅膀: 100x (10x × 10x)

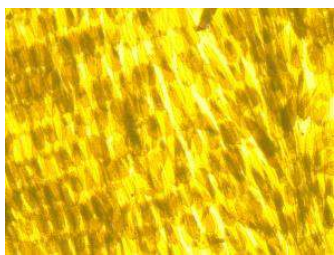

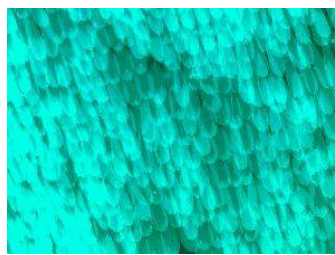
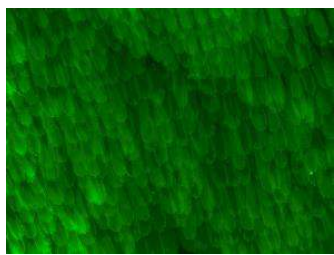
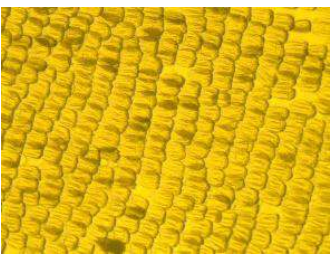
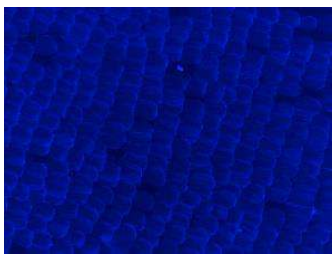
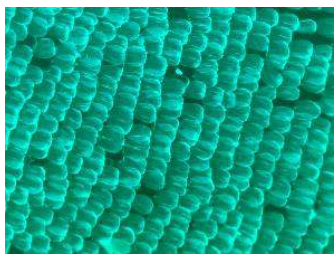
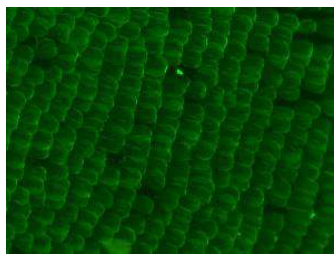
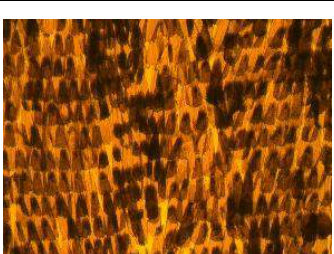
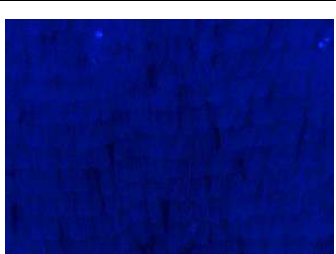
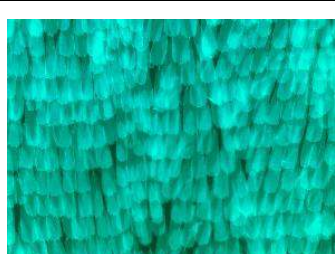
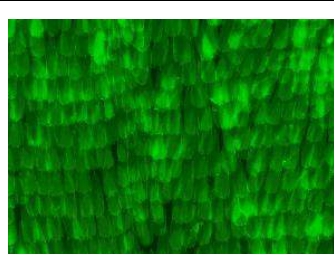
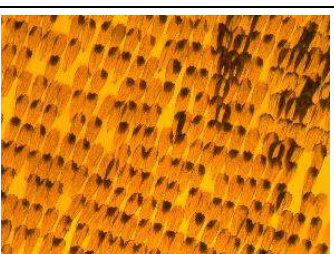
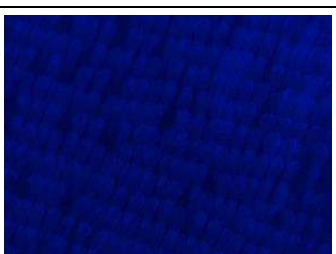
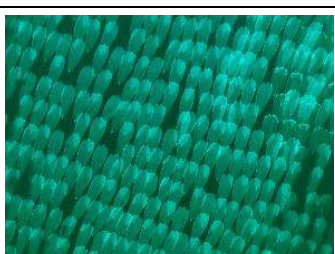
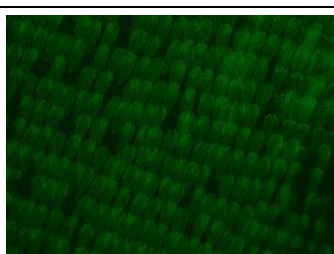
	可見光	DAPI 波段	GFP 波段	TRITC 波段
日本紋白雄蝶				
日本紋白雌蝶				
台灣紋白雄蝶				
台灣紋白雌蝶				

圖 22: 螢光顯微鏡下紋白蝶翅膀

- 1.在 DAPI 波段(紫外光激發濾片組)，四種紋白蝶翅膀皆可被激發藍色螢光，而其中日本紋白雌蝶又略比其他三種亮。
- 2.在 GFP 波段(藍光激發濾片組)，四種紋白蝶翅膀可被激發綠色螢光。
- 3.在 TRITC 波段(綠光激發濾片組)，四種紋白蝶翅膀可被激發綠色螢光。

(二)鱗片: 400x (10x × 40x)

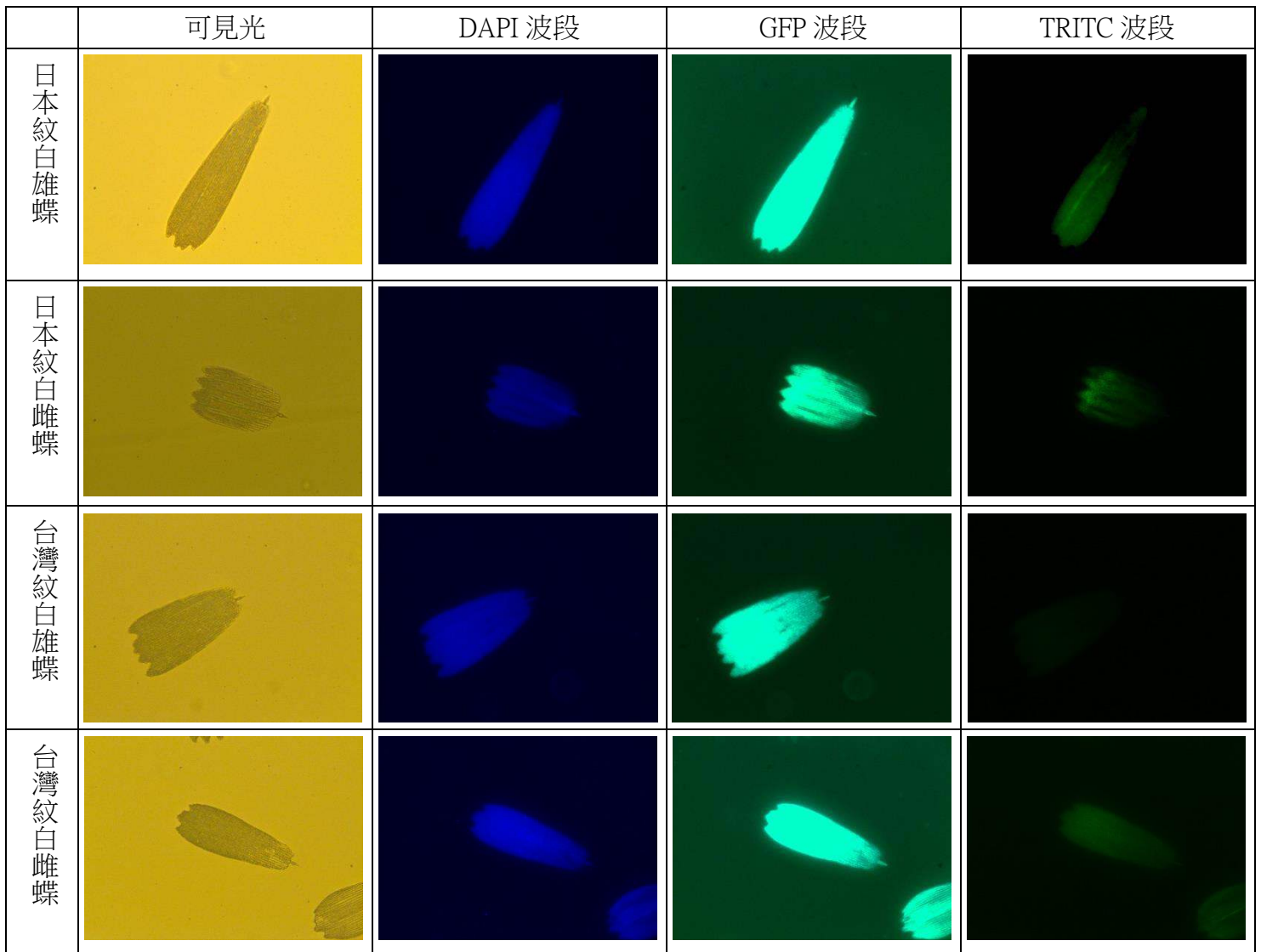


圖 23:螢光顯微鏡下紋白蝶翅上鱗片

- 1.在可見光下，日本紋白雌蝶翅上鱗片形狀不像其他三者細長。
- 2.在 DAPI 波段(紫外光激發濾片組)，四種紋白蝶鱗片皆可被激發藍色螢光。
- 3.在 GFP 波段(藍光激發濾片組)，四種紋白蝶鱗片可被激發綠色螢光。
- 4.在 TRITC 波段(綠光激發濾片組)，四種紋白蝶鱗片可被激發綠色螢光。

我們發現日本紋白雌蝶在經紫外光激發濾片後，被激發的藍色螢光相較之下較其他三者亮。除了先前的 UVA 差異外，可能也藉螢光提升亮度，強化性標。而台灣紋白蝶種內同樣無顯著差異。

五、以 SEM 分析紋白蝶翅膀的構造

(一)如下頁圖 20 及圖 21，發現日本紋白雌蝶相較日本紋白雄蝶及雌雄台灣紋白蝶鱗片上最明顯的差異在於格狀結構中奈米顆粒的數量，造成紋白蝶在紫外線照射下吸收與否的原因就是這些『奈米級紡錘形顆粒的數量多寡』，因此推測『鱗片上之奈米顆粒具有吸收紫外線的能力』。

(二)就日本紋白蝶來看，因可見光下日本紋白雄蝶比日本紋白雌蝶白且亮，但在紫外光下則是相反，因此推測鱗片上之奈米顆粒具有吸收長波長(400 nm~800nm)，且反射短波長(400 nm 以下)之能力。

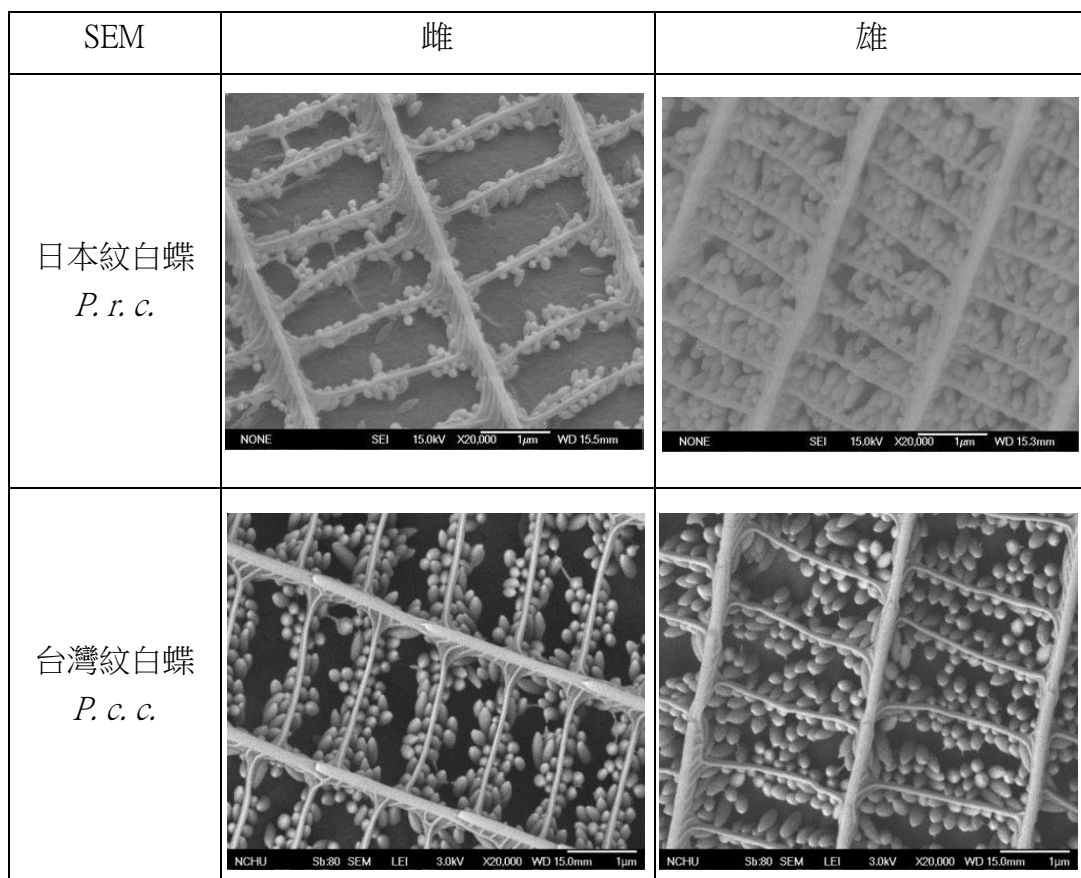


圖 24: SEM 下紋白蝶背部鱗片表面的構造

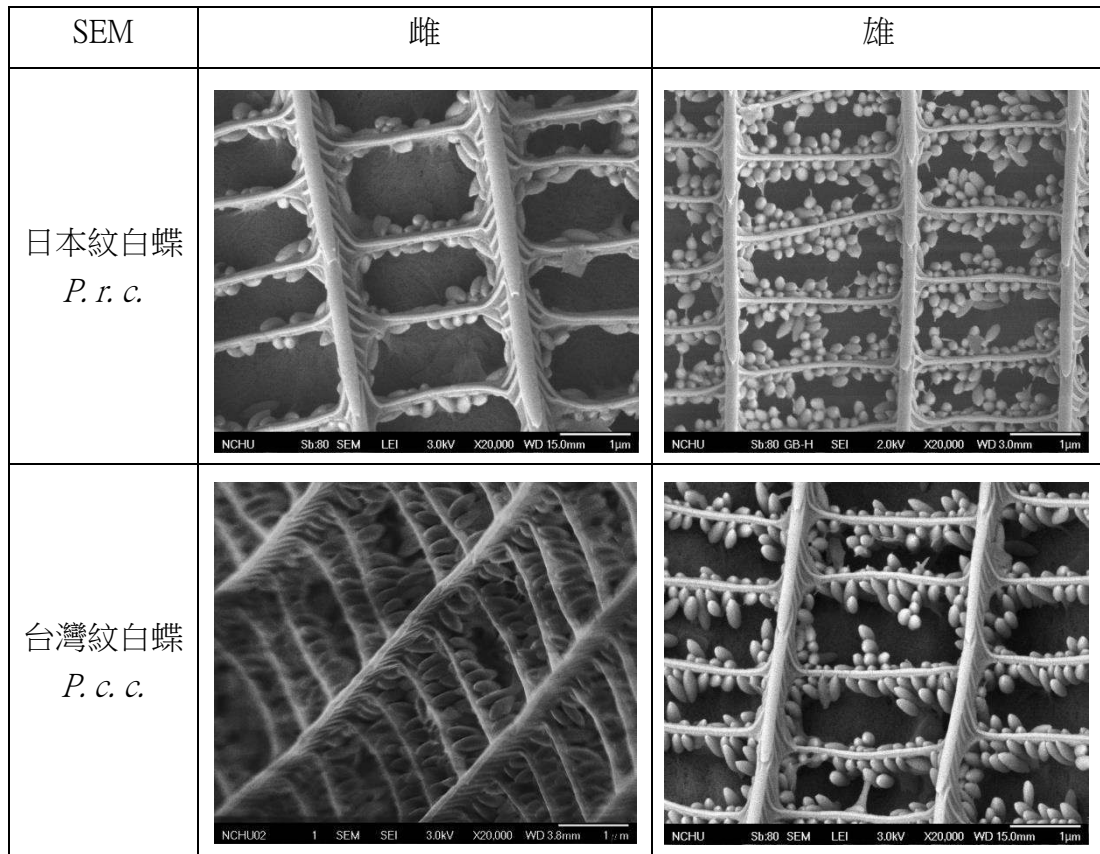


圖 25: SEM 下紋白蝶腹部鱗片表面的構造

參考國外文獻並比對我的紋白蝶翅上奈米顆粒的實驗觀察，將結果整理如下：

表 1: 日本紋白蝶翅膀對光線的反應

日本	短波長(400 nm 以下)	長波長(400 nm~800nm)	奈米顆粒分布
雄	吸收紫外光	翅膀黑色區塊較少、小 反射較多可見光，較亮	多而密集
雌	反射紫外光	翅膀黑色區塊較多、大， 反射較少可見光，較暗	少且稀疏

我自行歸納台灣紋白蝶：

表 2: 台灣紋白蝶翅膀對光線的反應

台灣	短波長(400 nm 以下)	長波長(400 nm~800nm)	奈米顆粒分布
雄	吸收紫外光	翅膀黑色區塊較少、小 反射較多可見光，較亮	多而密集
雌	吸收紫外光	翅膀黑色區塊較多、大， 反射較少可見光，較暗	多而密集

六、 奈米顆粒覆蓋面積分析

將覆蓋面積數據繪製成長條圖如下圖 26 及圖 27：

- (一)無論是背部或是腹部，日本紋白雌蝶無奈米顆粒面積都較另外三種（雌雄台灣紋白蝶、日本紋白雄蝶）大。
- (二)而其中雌雄日本紋白蝶的差距又更為明顯，日本紋白雄蝶無奈米顆粒面積只有約 20000 pixels，而日本紋白雌蝶卻高達 73273 pixels。雌雄台灣紋白蝶則是沒有明顯的差距皆為 50000 pixels。
- (三)本實驗之數據也符合從 SEM 下觀察結果：雌雄日本紋白蝶間顆粒數量有極大差距，雄多雌少，台灣紋紋蝶則無。

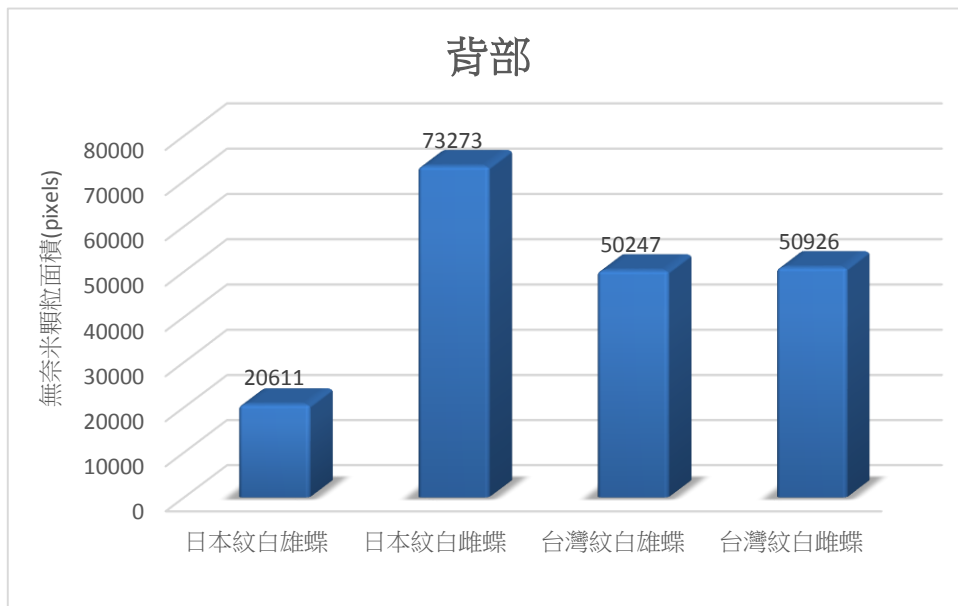


圖 26：紋白蝶背部翅上無奈米顆粒面積

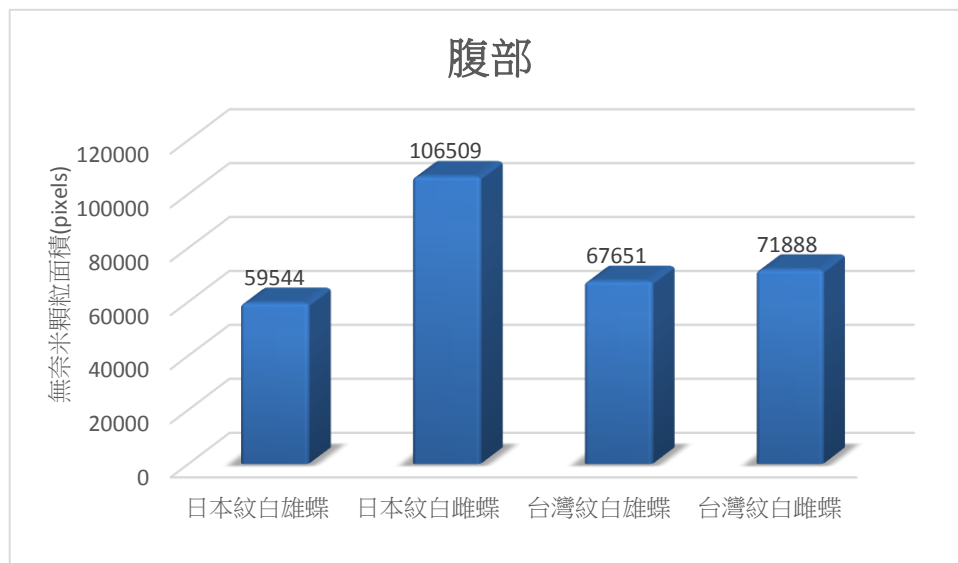






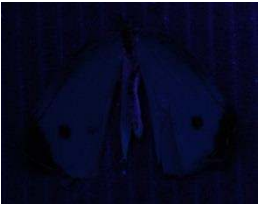
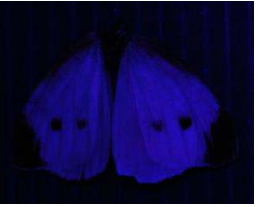


圖 27：紋白蝶腹部翅上無奈米顆粒面積

七、 清除紋白蝶翅上的奈米顆粒

表 3：紫外光下日本紋白雄蝶背部的翅膀在浸泡各種不同 pH 值溶液

未浸泡溶液	pH1	pH3	pH5
			
吸收紫外光	吸收紫外光	吸收紫外光	吸收紫外光
pH7	pH9	pH11	pH13
			
吸收紫外光	吸收紫外光	吸收紫外光	反射紫外光

(一)發現 pH13 溶液處理過能使日本紋白雄蝶反射紫外光，進一步尋求臨界值。

(二)在可見光下，發現經鹼性溶液處理後能反射紫外光的日本紋白雄蝶及雌雄台灣紋白蝶與不能反射紫外光的相比，能反射紫外光的翅膀較白且有珍珠光澤，如下圖 28。



圖 28：(左)日本紋白雄蝶以 pH11.7 溶液處理在可見光下有珍珠光澤；(右)未處理

八、 日本紋白雄蝶翅膀背部與腹部奈米顆粒的差異

(一)以 pH11.6 及 pH11.7 的氫氧化鈉溶液處理過日本紋白雄蝶後，在紫外光及 SEM 拍攝結果如下圖 29。


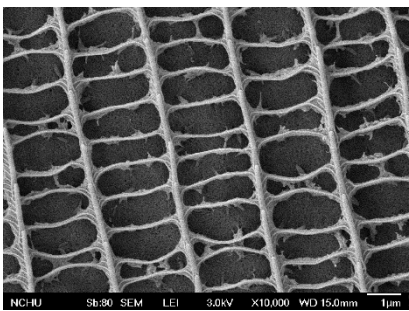

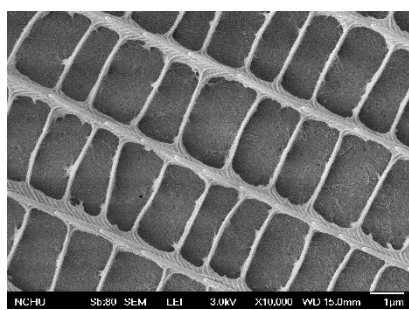

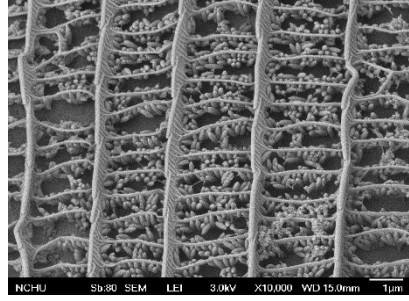

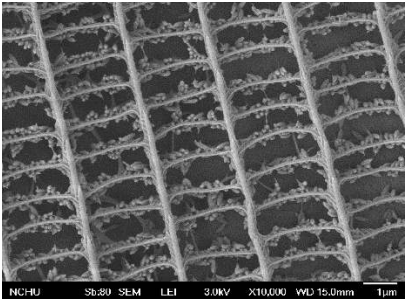
	UVA rays	SEM
日本雄 背部 pH11.7		
日本雄 腹部 pH11.7		
日本雄 背部 pH11.6		
日本雄 腹部 pH11.6		

圖 29: 日本紋白雄蝶在不同 pH 值下紫外光及 SEM 的表現

九、 台灣紋白蝶翅膀背部與腹部奈米顆粒的差異

(一) 以 pH11.6 及 pH11.7 的氫氧化鈉溶液處理過台灣紋白蝶後，在紫外光及 SEM 拍攝結果如下圖 30。


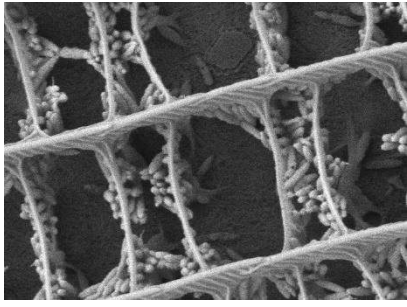

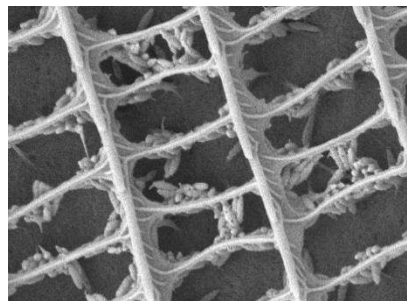

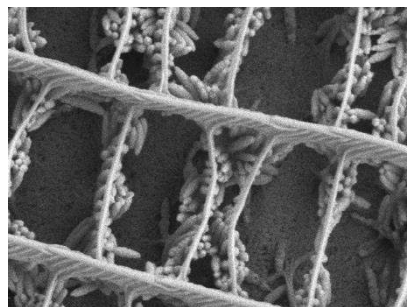

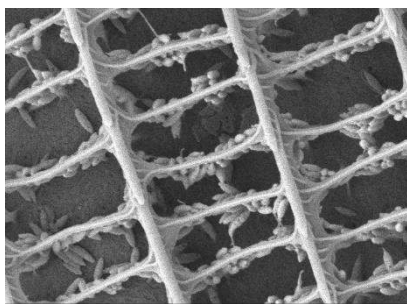
	UVA rays	SEM
台灣雄 背部 pH11.6		
台灣雄 腹部 pH11.6		
台灣雌 背部 pH11.6		
台灣雌 腹部 pH11.6		

圖 30: 台灣紋白蝶在不同 pH 值下紫外光及 SEM 的表現

表 4：日本紋白雄蝶、雌雄台灣紋白蝶在不同 pH 值下奈米顆粒清除效果

pH 值	紫外光下	奈米顆粒數量
pH11.6	反射	仍有殘餘
pH11.7	反射	完全除去，只留下基材和肋狀結構構成的格狀結構

(二)以 pH11.6 鹼性溶液處理過的紋白蝶翅膀上奈米顆粒並沒有完全被去除掉，但是紫外光下卻呈現反射。我們推測應該是翅膀上的基材是具有反射紫外線的性質，而奈米顆粒具有吸收紫外線的能力所導致的。因為清除掉一些奈米顆粒後，露出下面的基材，便能反射紫外光，就像日本紋白雌蝶沒有顆粒反射紫外線一般。

歸納以上的結果，我們得知日本紋白蝶翅上顆粒的成分跟台灣紋白蝶沒有太大的差別，皆能被鹼性溶液去除顆粒，pH 值也相近大概在 pH11.5~11.7 之間。而背部跟腹部的翅膀似乎存在著微小的差異，應該是奈米顆粒數量、排列方式及位置造成的。

十、分析紋白蝶翅膀上奈米顆粒在連續性波長下的透光率

(一)在紫外光波段 400nm 以下，日本紋白雌蝶反射的波段明顯比其他三種(雌雄台灣紋白蝶、日本紋白雄蝶) 穿透的較多，有 72%的光線穿透，而其他三種(雌雄台灣紋白蝶、日本紋白雄蝶)則是大致相同約有 10%的光線穿透。

(二)在可見光波段 400nm 以上，四種紋白蝶便沒有明顯差距，隨著波長的提高透光度慢慢爬升接近 99%，同時也驗證，紋白蝶在可見光下的確比較難以分出性別，因為性標「奈米顆粒」是在紫外光波段吸收光線的。

(三)因為日本紋白雌蝶翅上的奈米顆粒較稀疏且數量少，因此在氨水溶液裡的顆粒數量相較較少，故光線入射後穿透較多，而其他三種(雌雄台灣紋白蝶、日本紋白雄蝶)在紫外光下則是明顯吸收較多而穿透較少。

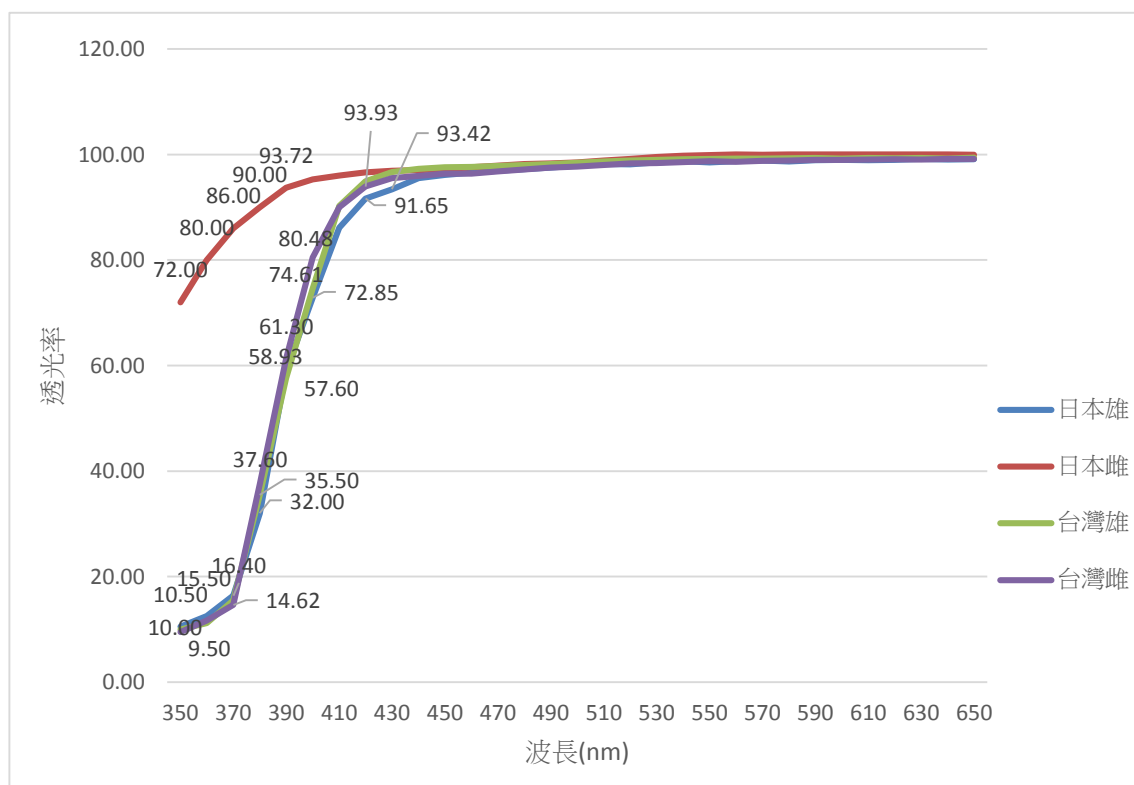


圖 31: 紋白蝶翅膀上奈米顆粒在連續性波長下的透光率

十一、 紋白蝶翅膀上奈米顆粒對紫外光的吸收實測

(一)將對照組亮度設為 100%之後，可以發現日本紋白雌蝶玻片仍有 93%的透光率，而相較之下日本紋白雄蝶只有 89%的透光率，印證日本紋白雄蝶翅上奈米顆粒較多且有吸收紫外光的能力。

(二)而雌雄台灣紋白蝶呈現的數據皆為 91%，由此可知雌雄台灣紋白蝶翅上之奈米顆粒，數量大約一致，符合 SEM 的掃描結果，但仍略遜日本紋白雄蝶。

(三)而塗布防曬乳的玻片，在照片中就明顯能夠吸收紫外光，如圖 29，實際數值有高達 88 %的紫外光被吸收。

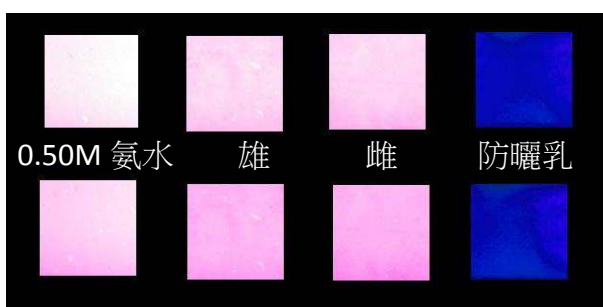


圖 32:紫外光下塗佈各種奈米顆粒的載玻片

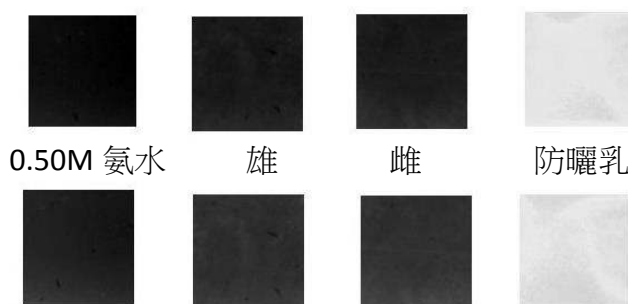


圖 33:經過 IMAGE J 處理的載玻片

上：日本；下：台灣

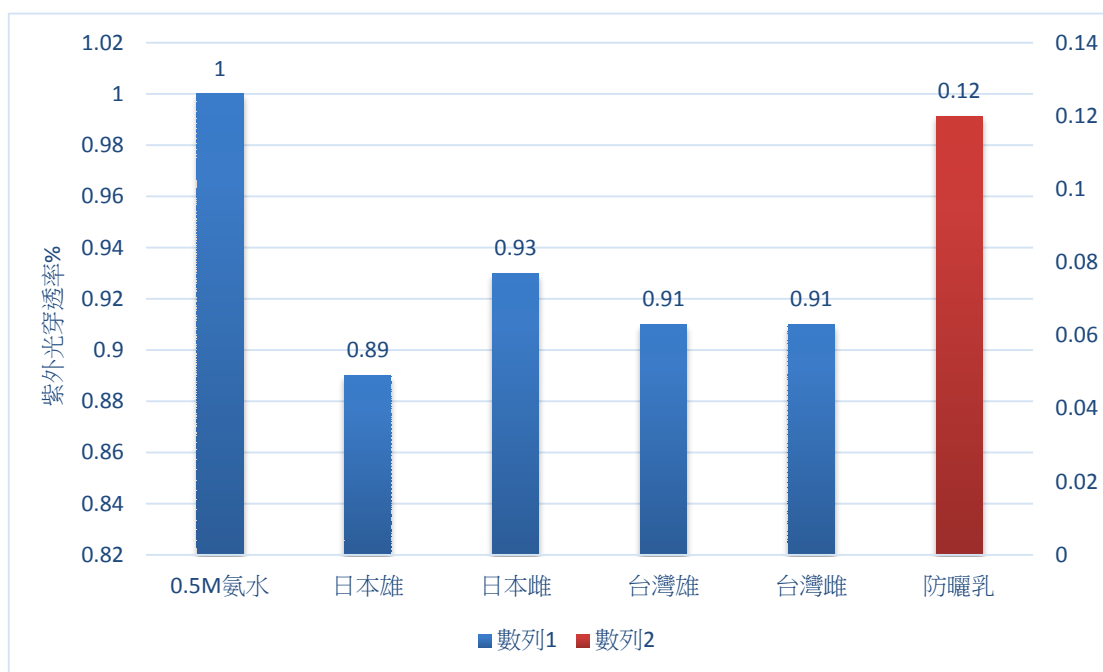


圖 34: 紋白蝶翅膀上奈米顆粒對紫外光的吸收實測

陸、 討論

一、紋白蝶翅膀屬於化學色，也就是由化學色素吸收可見光譜所生成的，無論光源從甚麼角度來，顏色都不會改變，而化學色蝴蝶翅膀的色素一般有黑色素(melanins)，黃酮類物質(flavonoids)，蝶呤(pterins)和眼色素(ommochromes)等四種，在外國文獻^[9]中，得知雲粉蝶(Pontia protodice)的蝶呤色素是吸收紫外光的主因，因此我們推測，蝶呤為影響奈米顆粒反射可見光及吸收紫外光並造成雌雄日本紋白蝶有明顯差異主要原因。

二、我曾試圖利用 EDS(Energy Disperse Spectroscopy)分析蝶呤奈米粒的成分，得到的元素太少，無法確定，但是主要成分是 C、O 成分，且在酸鹼的實驗中，得知奈米顆粒只溶於鹼性，不溶於酸性及醇類，比對其翅上色素官能基符合實驗結果。

二、從 2013 年 7 月~2015 年 6 月，我們在台中市各區、南投縣抓了約 400 隻的紋白蝶來歸納並實驗。

表 5: 冬季紋白蝶捕捉狀況

冬季(9~12 月)	優勢種	備註
市區	日本紋白蝶	成群出現，雌雄比例 1:10
山區(南投海拔約 2000 公尺)	台灣紋白蝶	單獨幾隻出沒

一直到 4 月份才可以在平地、市區看見零星的台灣紋白蝶，對於這兩種數量如此極端的情形，應該是和日本紋白蝶雄雌辨識容易、因此能迅速找到配偶交配及物種特性有關。

三、根據我的實驗結果還有野外實察我歸納了日本與台灣紋白蝶在台灣競爭情形。

(一)日本紋白蝶可能是演化時程較晚期的物種，所以雌雄蝶間進化成如此明顯的差異，紫外光下有利吸引雄蝶交配，而可見光下也能辨識明亮的雄蝶，能夠順利交配之後，進而產生更多的後代；而反觀台灣紋白蝶即使在不同波長中雌雄還是都沒有差異，因為辨識不易，因此交配產卵數不如日本紋白蝶。

(二)台灣冬天稻田休耕時期農夫改種油菜花、高麗菜……十字花科植物，紋白蝶幼蟲食物大增。日本紋白蝶因為交配及生產迅速，所以能夠快速佔據食物及生活空間，因而大量出現成為平地優勢種。另一方面，台灣紋白蝶因為雌雄間沒有差異，辨識不易，增加了繁殖需要的時間，所以冬天在台灣平地，幾乎不可能看到台灣紋白蝶，大多遷徙至山區、高海拔的地方尋找幼蟲的食物來產卵。

(三)雖然冬季平地的十字花科作物都被日本紋白蝶的幼蟲佔據。但是等到農夫噴灑農藥、收割作物之後，日本紋白蝶的幼蟲也幾乎被撲殺殆盡，集中生產卻也造成集體死亡。反觀台灣紋白蝶雖然被排擠到荒郊野外求生存，但是少了人為的干擾能順利孵化、成蛹、羽化成蟲。所以 3~4 月時，台灣紋白蝶又回復了優勢。

四、利用螢光顯微鏡分析紋白蝶翅上的鱗片，在低倍率下發現並不是每個鱗片反射螢光的亮度都相同，有些微明暗的差異，而日本紋白雌蝶單片鱗片在經紫外光激發濾片後激發出的藍光，不如其整片翅膀般與其他三種紋白蝶具明顯亮暗差異，我推測可能因為紋白蝶翅膀由多層鱗片組成，各層鱗片功能略有差異而導致，而日本紋白雌蝶其的鱗片在排列後著實展現其性標。



圖 35: TRITC 波段下的台灣紋白雌蝶 200X

五、以 SEM 觀察雌雄日本紋白蝶和台灣紋白蝶翅膀上的鱗片，發現牠們鱗片上的構造不同。日本紋白雌蝶較日本雄蝶和雌雄台灣紋白蝶蝶吟奈米粒少。尤其雌雄日本紋白蝶間強烈的對比，推測牠們的差別具有相當重要的生理意義。

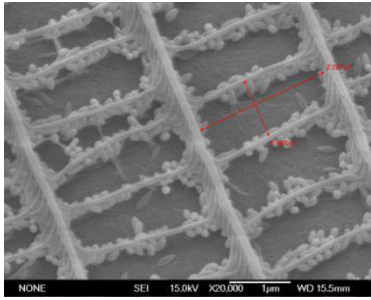
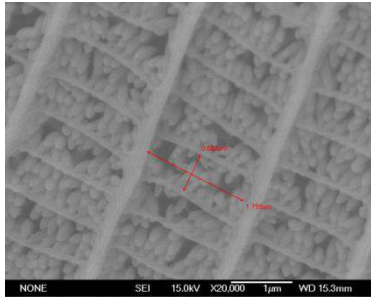
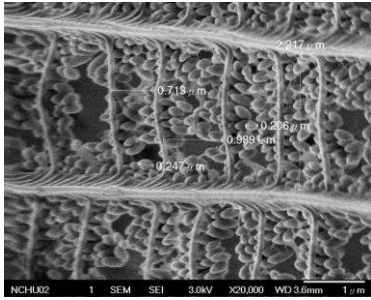
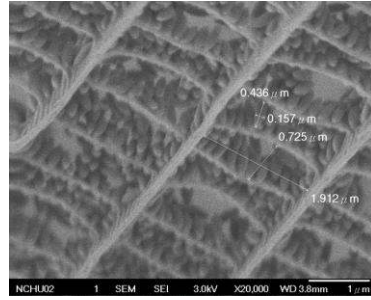
SEM	雌	雄
日本紋白蝶 <i>P. r. c.</i>		
台灣紋白蝶 <i>P. c. c.</i>		

圖 36:利用 SEM 測量紋白蝶鱗片的格狀大小

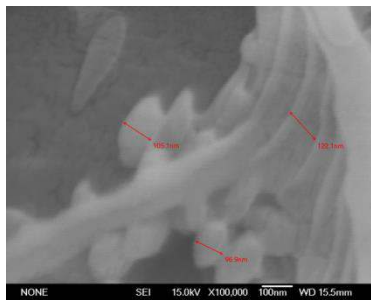
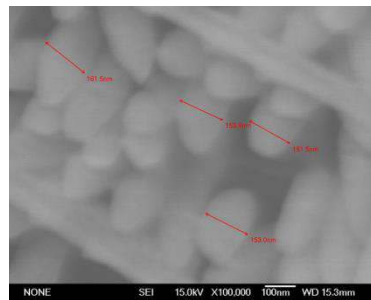
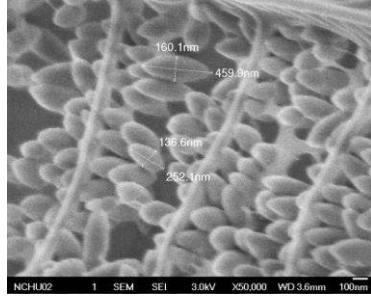
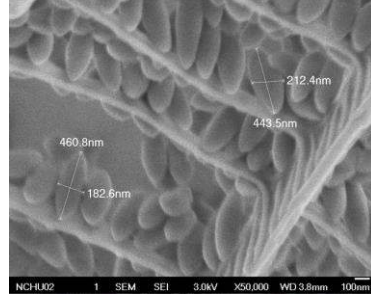
SEM	雌	雄
日本紋白蝶 <i>P. r. c.</i>		
台灣紋白蝶 <i>P. c. c.</i>		

圖 37: 利用 SEM 測量紋白蝶鱗片上的奈米顆粒大小

表 6: 紋白蝶格狀結構及蝶呤奈米粒測量結果。

日本紋白蝶	格狀結構		顆粒分布	蝶呤奈米粒直徑
雄	較小	0.6×1.7 μ m	多而密集	100 nm
雌	較大	1.0×2.2 μ m	少且稀疏	150nm
台灣紋白蝶				
雄	較小	2.2×0.9 μ m	多而密集	197nm
雌	較大	2.2×0.8 μ m	多而密集	148nm

日本紋白雌蝶翅膀背部及腹部的蝶呤奈米粒，明顯比其他三者少且稀疏，且顆粒數量稀少時，大多沿著肋狀結構邊緣排列，而隨著顆粒的數量漸多，漸漸填滿了肋狀結構內部的空間。

此一現象可以大略說明，從演化較前期的物種台灣紋白蝶到有明顯性標的日本紋白蝶，日本紋白雄蝶的顆粒密集且填滿整個格子，而日本紋白雌蝶為了有視覺差異，蝶呤奈米粒的數量減少，最後只剩下些許沿著肋狀結構邊緣，這樣的差異使日本紋白蝶產了生存優勢。

柒、 結論

一、 實驗結論

(一) 外顯差異

- 1.可見光：不論日本或台灣雌蝶背部翅膀上黑色斑點較多，黑色範圍較大，因此吸收的光較雄蝶多。
- 2.UVA：只有日本紋白雌蝶能反射紫外光，雄蝶反而是吸收，紫外光就存在著強烈的視覺對比。但是雌雄台灣紋白蝶間則不具有像日本如此明顯的差異，雄雌皆吸收紫外光。
- 3.螢光: 日本紋白雌蝶在 DAPI 波段(經紫外光激發濾片組)，被激發的藍色螢光相較之下較其他三者亮，而台灣紋白蝶種內同樣無顯著明暗差異。

(二) 紋白蝶翅膀上的蝶呤奈米粒

- 1.日本紋白雌蝶背部及腹部翅膀上蝶呤奈米粒的數量明顯較日本紋白雄蝶和雌雄台灣紋白蝶少，而牠反射短波長的紫外光最多。
- 2.鹼性溶液處理後能使牠們像日本紋白雌蝶一樣反射紫外光。並證實其翅膀上的蝶呤奈米粒已被清除。

紋白蝶翅膀上的蝶呤奈米粒數量多寡是影響反射紫外光與否的主因，顆粒數量越多吸收紫外光的能力越好，越少則反之。

(三) 蝶呤奈米粒在連續性波長下的透光率:

- 1.有為數較多蝶呤奈米粒的日本紋白雄蝶、雌雄日本紋白蝶，在短波長，只能讓 10%的紫外光透過，其餘幾乎都被翅上的蝶呤奈米粒吸收，呼應了先前在相機下的成像

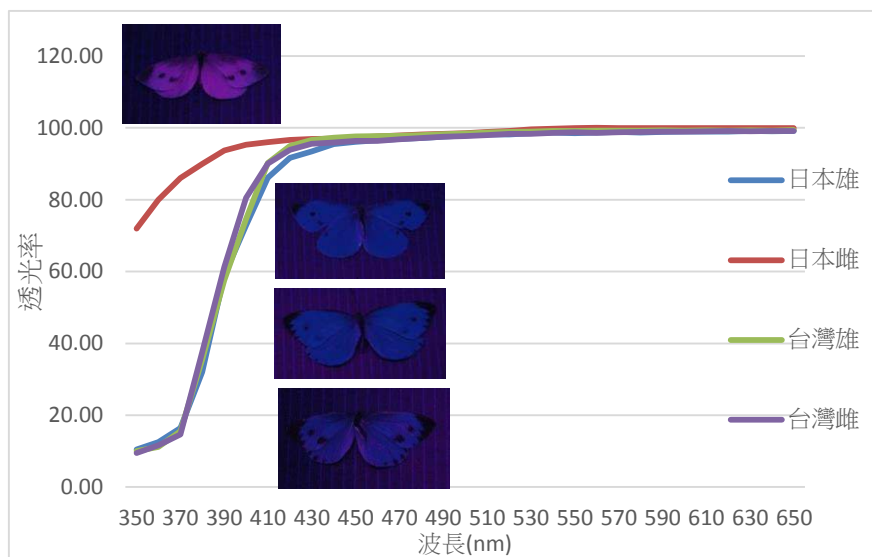


圖 38: 透光率結果符合紫外光下成像

證實了紋白蝶的性標在紫外光波段也就是紋白蝶視波長有顯著的差異，演化的結果讓身為外來種的日本紋白蝶可以利用雌蝶反射和雄蝶吸收紫外光，提高找尋配偶的能力，增加產量，成為台灣冬季平地的優勢種。

二、 未來計畫

- (一) 因為從文獻中搜尋到粉蝶科蝴蝶的蝶呤色素具有吸收紫外光和反射可見光的特性，所以我們嘗試進一步從翅膀的奈米顆粒析出蝶呤色素，並期待於合作的大學實驗室中能成功分析成分及結構式。
- (二) 再利用其特性，製成溶液，針對可同時接收長波長和紫外光的生物，思考是否可製成吸引昆蟲的塗料，應用於誘捕害蟲或是特殊標示等用途。
- (三) 我們將飼養日本和台灣紋白蝶，並觀察是否有雜交現象。因為紋白蝶都會被紫外光吸引，而能反射紫外光的只有日本紋白雌蝶，所以我們想探討台灣紋白蝶是否可能被吸引，進而交配產生雜交種。並追蹤此雜交種的生態地位及行為表現。
- (四)、接下來我們也將嘗試分析日本和台灣紋白蝶基因差異，因為曾經從文獻上看到兩者的遺傳距離報告，所以想進一步從 DNA 核苷酸層次驗證並分析差異，以了解日本紋白蝶演化上的優勢，如何成為台灣優勢種。
- (五) 日本紋白蝶最初於民國 55 年因為迷蝶，出現在台灣的外來蝶種，短短 3~4 年的時間展現他們極強的適應力而成為台灣平地的優勢蝶種，除佔據棲息地，也是十字花科的菜蟲。如果日本紋白蝶對於紫外線反射特別敏感，到時若是數量激增導致生態不平衡，我們可以利用紫外光來吸引日本紋白蝶並捕捉或撲殺，也能恢復農作的產量，但是畢竟經過 40 年的適應，生態環境已經達到現在的平衡，如果貿然將日本紋白蝶大量撲殺，雖然可以回復台灣紋白蝶族群數量，但是這過程中會不會破壞生態平衡，甚至引起其他物種的滅絕，是需要審慎評估的。

捌、參考資料及其他

1. 林春吉，蘇錦平合著，台灣蝴蝶大圖鑑，遠流出版社，2013年3月。
2. 張永仁著，昆蟲圖鑑 1、2，遠流出版社，1998年6月。
3. 張永仁著，蝴蝶 100，遠流出版社，2007年1月增訂新板。
4. 葉孟考等著，高中奈米通用補充教材 I、II，奈米科技 K-12 教育發展中心，2008.12。
5. 趙大衛等著，普通高級中學基礎生物(上下)冊，翰林出版，2013年4月。
6. 楊鏡堂等著，奈米科技實驗手冊，奈米科技 K-12 教育發展中心，2007.12。
7. Ling-Yu Wang, Wei Lee, Shong Huang, Yu-Feng Hsu. **Estimate of The Genetic Distance Between *Talbotia naganum karumii*, *Pieris canidia canidia* and *Pieris rapae crucivora***. 師大生物學報. 1998.6.33 卷 1 期.47-55
8. Giraldo MA1, Stavenga DG. **Sexual dichroism and pigment localization in the wing scales of *Pieris rapae* butterflies**. Proc Biol Sci.2007 Jan 7;274(1606):97-102.
9. Morehouse, N.I., Vukusic, P. and Rutowski, R.L. 2007. **Pterin pigment granules are responsible for both broadband light scattering and wavelength selective absorption in the wing scales of pierid butterflies**. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 274, 359-366.
10. Partha Basu, Igor Pimkov, Duquesne University of The Holy Ghost, **Composition, synthesis, and use of new substituted pyran and pterin compounds**, US 8378123 B2, SEP.27,201
11. Yoshiaki Obara, Michael E. N. Majerus **Initial Mate Recognition in the British Cabbage Butterfly, *Pieris rapae rapae***. *Zoological Science* 17:725~730(2000)

【評語】 040718

1. 比較日本紋白蝶與台灣紋白蝶差異，觀察奈米顆粒在翅膀上之結構，推論日本紋白蝶成為優勢蝶種可能原因，實驗記錄詳實。

2. 此為延續性之研究作品，應闡明前人研究作品之相同與相異性，再加以延續發展。