

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

030304

“紫”看“外”在美-紋白蝶性標成因之研究

學校名稱：臺中市立惠文高級中學(附設國中)

作者： 國二 張逸 國二 尹心怡 國二 卓毓珊	指導老師： 龍世斌 曹佑民
--	-----------------------------

關鍵詞：紋白蝶、紫外線、奈米顆粒

“紫”看“外”在美

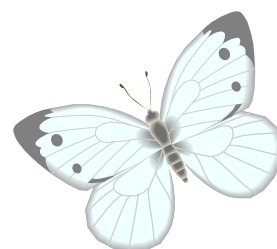
紋白蝶性標成因之研究

【摘要】

本研究的主題是探討日本紋白蝶(以下簡稱紋白蝶)間如何分辨雌雄。經實驗發現並驗證雄蝶在近距離時是利用視覺來尋找雌蝶，而不是利用一般所熟知的費洛蒙(嗅覺)¹。還發現雄蝶翅膀對於紫外線有吸收能力，雌蝶翅膀對於紫外線則是有反射現象的明顯差異，因此造成雌雄外觀上有強烈的視覺對比。更進一步用掃描式電子顯微鏡(SEM)發現形成紋白蝶雌雄對比的原因是翅膀鱗片上的奈米級顆粒多寡所造成的。最後驗證了雄蝶翅膀對於紫外線有吸收能力就是由鱗片上的奈米顆粒所造成的。而且用去除掉奈米級顆粒的雄蝶標本竟然也可以很快的吸引其他雄蝶的靠近，證明了紋白蝶利用「翅膀對紫外線波段的反射與否」來當成性標。

壹、研究動機

當冬天油菜花開滿田間時，常常可見到一群粉白色的蝴蝶。經查尋得知那種蝴蝶是『日本紋白蝶 (*Pieris rapae crucivora*)』，是台灣冬季到春季時期平地的優勢蝶種^{1,2,5,6}。剛開始見到一大群白色、沒有太大的差異的紋白蝶時，我們不知道如何分辨雌雄就覺得很納悶：『連人類的眼睛都無法輕易分辨雄蝶及雌蝶的特徵，那紋白蝶間又是如何分辨呢？』與老師一起討論後，推測可能是透過嗅覺(費洛蒙)來分辨。但是雄蝶或許可以很容易找到單獨一隻雌蝶；而當一大群紋白蝶混雜在一起時，要準確找到雌蝶就不是一件簡單的事了。後來查資料發現有些昆蟲的視覺『可以接收的光波波長從 300nm(紫外線)~650nm(橙色)』⁸，與人類可接收的可見光波長從 400nm(紫色)~700nm(紅色)不大相同。因此，設計了一系列的實驗來研究：日本紋白蝶間是如何分辨異性的。



貳、研究目的

- 一、歸納分析雌雄紋白蝶的差異。
- 二、探討紋白蝶異性間吸引的因素。
- 三、驗證視覺為紋白蝶擇偶之重要因素。
- 四、探討紫外線下紋白蝶雌雄的差異。
- 五、探討雄蝶翅膀吸收紫外線之成因。



參、研究設備及器材

器材：			
捕蟲網	飼養網	飼養箱	數位相機 Nikon D70s
紫外燈(UVA) T5 10W	燒杯	滴管	Tamron 17-50mm F2.8
大頭針	量筒	電池座及電池	Sigma 105mm F2.8
紋白蝶	解剖顯微鏡	複式顯微鏡	電子掃描式顯微鏡 SEM
紅、橙、綠、藍色 LED 燈			
藥品：			
0.2M NaOH	0.2M HCl	0.5M H ₂ NOH	96% 異丙醇
機械潤滑油	蒸餾水		

肆、研究過程或方法

實驗一、分析雌雄紋白蝶的差異

1. 捕捉紋白蝶。
2. 歸納出雌雄紋白蝶的特徵。

實驗二、雌蝶吸引雄蝶的訊息

1. 捕捉及飼養紋白蝶。
2. 記錄雌雄紋白蝶間的行為。

實驗三、以雌蝶標本吸引雄蝶(一)

1. 將雌蝶及雄蝶標本放在飼養箱裡，再放入數隻雄蝶。
2. 記錄雄蝶的行為。

實驗四、以雌蝶標本吸引雄蝶(二)

1. 將雌蝶標本置於夾鏈袋中隔絕味道，和雄蝶標本一起置於飼養箱中，再放入數隻雄蝶。
2. 紀錄雄蝶的行為。

實驗五、觀察紋白蝶的趨光性

1. 將紋白蝶放入飼養箱，置於暗室中。
2. 控制暗室光線量，紀錄紋白蝶的行為。

實驗六、分析紋白蝶對各種波長光的喜好

1. 將紋白蝶置入飼養網中，置於暗室中。
2. 以紅、橙、綠、藍四色相同功率的 LED 燈組及紫外燈吸引紋白蝶，記錄紋白蝶的行為。

實驗七、紫外線下雌雄紋白蝶的差異

1. 取雌雄標本各一隻，將翅膀攤平置於暗室中。
2. 在紫外燈照射下，以能夠感測紫外線的數位相機(Nikon D70s)¹⁰加上 Sigma 鏡頭拍攝，比較雌雄蝶的差異。

實驗八、驗證視覺為雄蝶擇偶之關鍵(一)

1. 將翅膀塗上機械潤滑油的雄蝶標本和未處理的雄蝶標本一起置於飼養箱中，再放入雌蝶。
2. 紀錄雄蝶的行為。

實驗九、以 SEM 分析雌雄紋白蝶鱗片的差異

1. 以光學顯微鏡觀察雌雄蝶的鱗片構造。
2. 以 SEM 觀察雌雄蝶的鱗片構造。

實驗十、驗證奈米顆粒具有吸收紫外線之能力

1. 因蝴蝶翅膀具防水性，所以先用異丙醇溶液將雄蝶標本沖濕，易於後續處理及減少酸鹼溶液的殘留。
2. 使用異丙醇、0.2M 的鹽酸、氫氧化鈉溶液及 0.5M 氨水將標本浸入溶液 2~3 分鐘，再以不反射紫外線的異丙醇沖洗掉殘存的溶液，避免影響呈色現象。
3. 靜置標本至完全乾燥後，在紫外燈下拍攝，比較雄蝶處理前後及雌蝶的差異。

實驗十一、以 SEM 分析鹼溶液處理後之雄蝶鱗片

1. 以 SEM 觀察鹼性溶液處理後的雄蝶鱗片。
2. 比較鹼性溶液處理前、後，雄蝶鱗片在 SEM 下的差異。

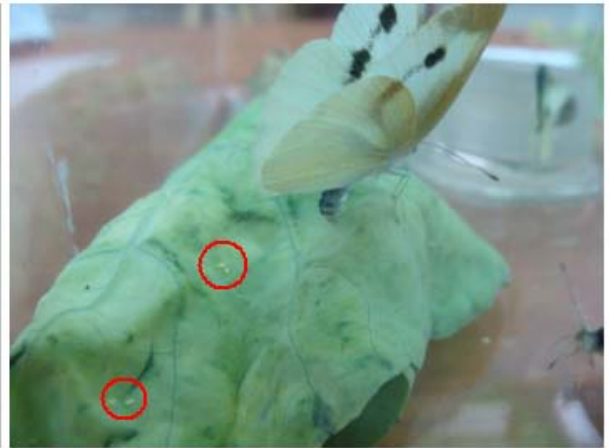
實驗十二、驗證視覺為雄蝶擇偶之關鍵(二)

1. 將鹼性溶液處理過與未處理的雄蝶標本，一起置於飼養箱中，再放入雌蝶。
2. 紀錄雄蝶的行為。

伍、研究結果

實驗一、分析雌雄紋白蝶的差異

- 一、紋白蝶外觀看起來差不多都是粉白色的，但仔細觀察及歸納之下還是發現有不同之處，如圖一。
- 二、將捕捉到的蝴蝶依以上特徵分兩群，分別放入不同的飼養箱中。
- 三、為維持蝴蝶的生命及活力，放入油菜花及水供它們食用，結果發現翅膀上黑色斑紋較多且深的紋白蝶竟然產卵了，如圖二。



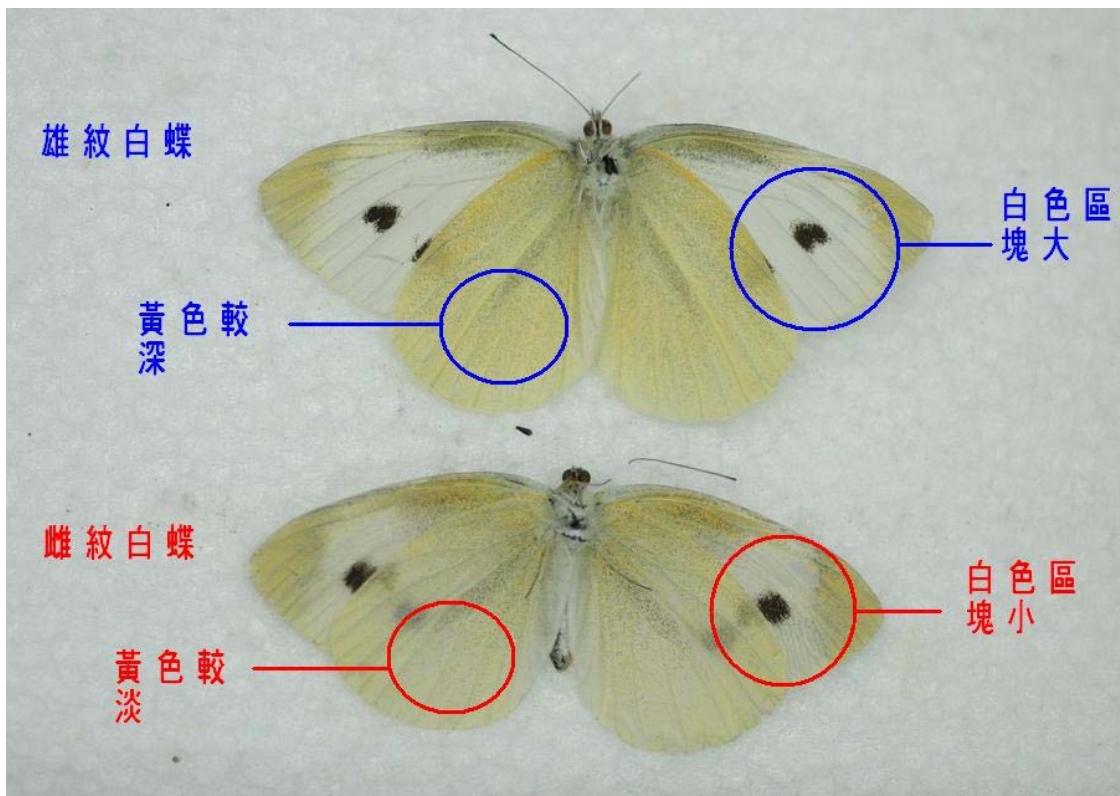
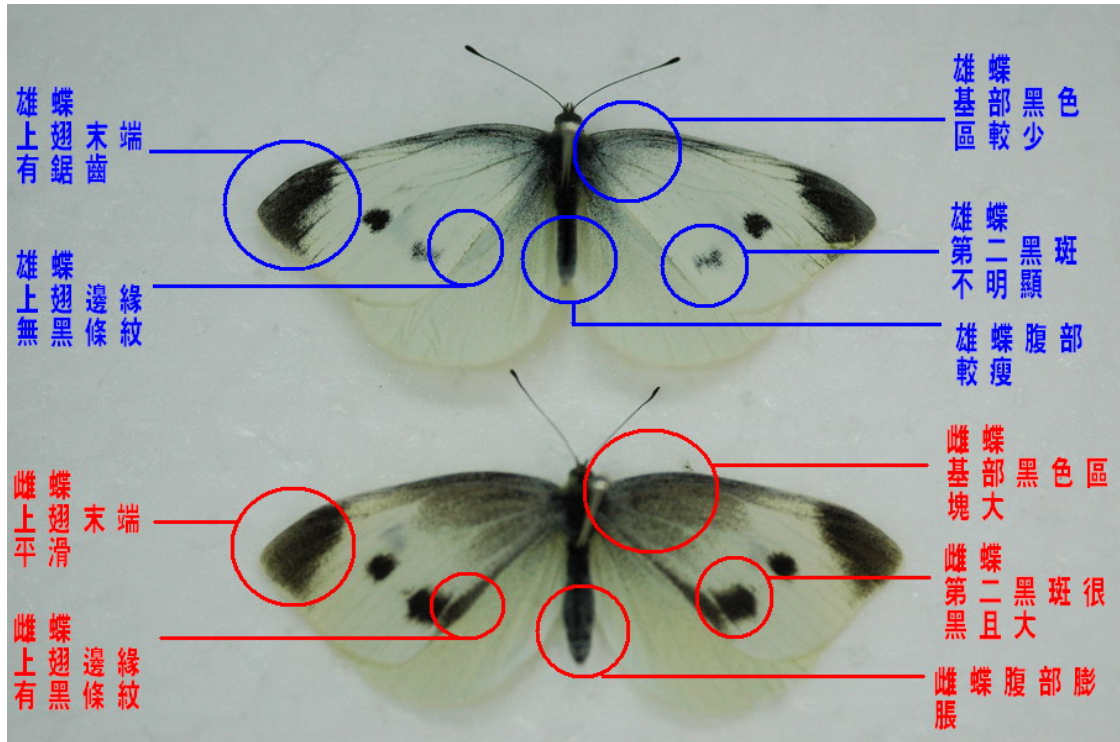
圖一：不同的紋白蝶有的較黑、有的較淺

圖二：產卵(紅色圓圈)中的紋白蝶

- 四、因此確定正面黑斑較少的紋白蝶(圖一上)是雄性的；正面較黑的紋白蝶(圖一下)是雌性的。

- 五、所以將雌雄紋白蝶的特徵整理如下表及圖三，後續的實驗都是以此來判斷。

特徵 蝴蝶	上翅 正面 尖端黑斑	上翅 正面 邊緣	上翅 正面	上翅基部 黑色區塊	腹部	下翅 背面
雄蝶 (上)	呈鋸齒狀	無黑條紋	第二個黑 斑不明顯	不大	瘦，短	黃色較深
雌蝶 (下)	較平滑	有黑條紋	兩個明顯 的黑斑	很大片	胖、長	黃色較淡



圖三：雄紋白蝶(上)及雌紋白蝶(下)的特徵比較。

實驗二、雌蝶吸引雄蝶的訊息

- 一、觀察飼養箱中的蝴蝶，發現雌蝶會擺出某種特殊動作以吸引雄蝶。
- 二、一般蝴蝶停下來的時候都是將翅膀合起來，如圖四。但是飼養箱中雌蝶都會將**翅膀完全張開超過 180 度、腹部翹起、末端綠色的交尾器打開**，如圖五。



圖四：正常蝴蝶停止時會將翅膀合起來

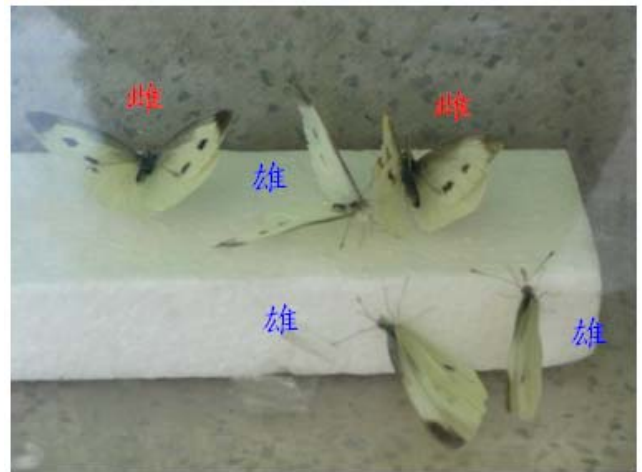


圖五：雌蝶會擺出吸引雄蝶的姿勢

- 三、這發現引發以下的疑問：雌蝶如何吸引雄蝶來交配？如果是藉由費洛蒙吸引雄蝶，那麼雌蝶將尾部翹起、張開交尾器，可能會散發味道有利於交配行為。但是將**翅膀張開到如此大有何目的呢？**
- 四、經討論後較合理的解釋是：**雌蝶將翅膀張開是當成辨識雌雄的一種方式**。因為之前已經歸納出雌雄蝶的上翅正面有差異，或許雌蝶藉由擺出此姿勢通知雄蝶自己**準確的位置之外**，同時也告知另一項重要訊息-『**雌蝶已經準備好要交配了**』。

實驗三、以雌蝶標本吸引雄蝶(一)

- 一、為了進一步排除其他感覺因素，將雌蝶標本放在飼養箱中，放入一些雄蝶。發現仍有很多雄蝶被吸引過來，如圖六。
- 二、從實驗中得知，死去的蝴蝶標本並不會發出聲音，在此可排除以聽覺來吸引異性。而且標本也不會做出什麼動作或訊息，所以也可排除是以特殊動作來吸引異性。

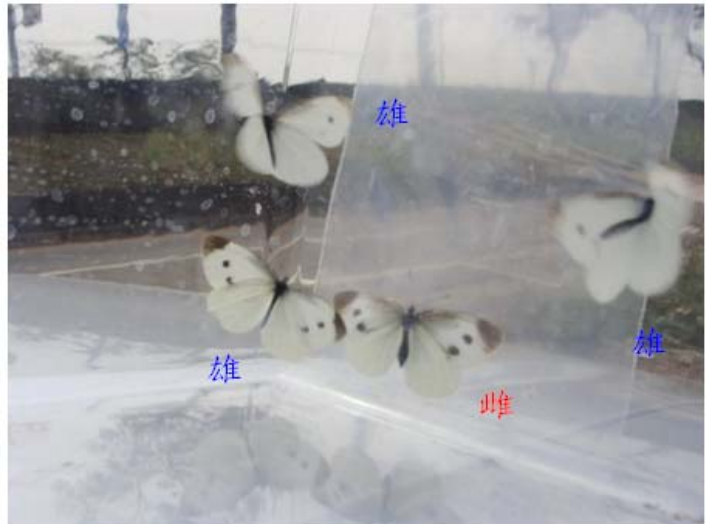


圖六：雌蝶標本吸引雄蝶的情形

- 三、綜合以上的結果推論：紋白蝶在**近距離時有可能是靠視覺來尋找配偶**，但也有可能是標本仍會殘留散發出一些費洛蒙的味道來吸引異性。因此『**視覺**』與『**嗅覺**』都有可能是吸引雄蝶的因素。所以需要再設計實驗來確認紋白蝶間是以哪一種感覺來吸引異性。

實驗四、以雌蝶標本吸引雄蝶(二)

- 一、將雌雄紋白蝶標本分別放入夾鏈袋裡，隔絕費洛蒙的味道放入飼養箱中，將雄蝶放入其中觀察雄蝶的行為。
- 二、發現只有裝著雌蝶的夾鏈袋才會吸引雄蝶靠近停留，如圖七；裝著雄蝶的夾鏈袋並不會吸引雄蝶停駐。
- 三、將雌蝶標本隔絕費洛蒙，卻仍然可以吸引雄蝶靠近雌蝶標本，因此證明：近距離時雄蝶並不是以嗅覺來辨識雌蝶，近距離是『以視覺的方式來辨識的』⁹。



圖七：夾鏈袋裡的雌蝶仍可吸引雄蝶

實驗五、觀察紋白蝶的趨光性

- 一、所以接下來的實驗都針對紋白蝶的視覺來研究。將捕捉回來的紋白蝶放入飼養箱，並且置於暗室中。
- 二、每到實驗室要做實驗時，一打開窗簾就發現紋白蝶總是飛往陽光充足的一邊(圖八)，或是日光燈光較強的方向(圖九)。



圖八：紋白蝶聚集在陽光充足一邊



圖九：紋白蝶聚集在日光燈光充足一邊

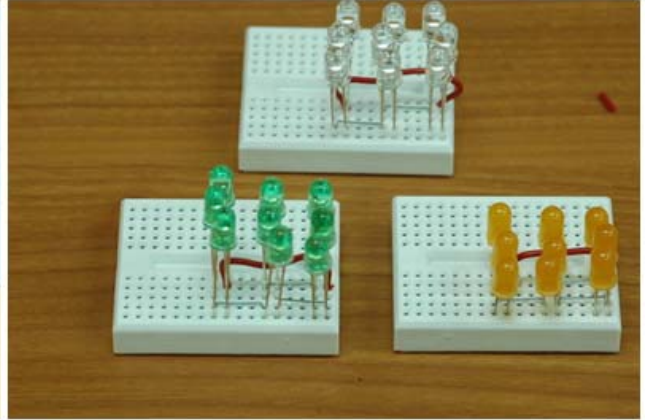
- 三、由本實驗觀察到紋白蝶有強烈的趨光性，且複眼對於光線非常的敏感。

實驗六、分析紋白蝶對各種波長光的喜好

- 一、經網路搜尋，發現昆蟲的視覺可接收的光波波長從 300nm~650nm⁸，與人類可接收的可見光波長從 400nm~700nm 不大相同。
- 二、為得知紋白蝶對不同波長光的喜好程度，設計了紅、橙、綠、藍等四色 LED 燈組 (圖十、十一)，來吸引蝴蝶靠近。



圖十：測試及組裝 LED 燈



圖十一：四色 LED(紅、橙、綠、藍)燈組

- 三、在暗室中，將四色 LED 燈放置在飼養網的四個角落裡。放入 10 隻雄蝶，觀察雄蝶的反應，結果如下：

單位：隻

	紅色	橙色	綠色	藍色
第一次	1	0	2	7
第二次	0	0	2	8
第三次	1	0	1	8
第四次	0	0	2	8

- 四、實驗得知，雄蝶對於藍光非常敏感。當以紫外燈靠近時，所有的紋白蝶都會迅速飛近紫外燈。
- 五、由此驗證紋白蝶的複眼真的可以接收到 400nm 以下紫外光區段的波長。並得知：雄蝶對於藍光及 UVA 紫外線波長的區段非常敏感。



圖十二：蝴蝶多聚集在藍光附近



圖十三：紫外燈會迅速吸引紋白蝶靠近

實驗七、紫外線下雌雄紋白蝶的差異

- 一、再來為了瞭解在紋白蝶的眼中，雄雌之間是否有差異，便在紫外線照射下觀察及拍攝。
- 二、取雌雄標本各一隻，在暗室中將翅膀攤平放在紫外燈下，再以數位相機拍攝，圖十四。
- 三、發現雌蝶翅膀能夠反射紫外線而顯得十分明亮；雄蝶翅膀似乎吸收紫外線，顯得相當暗沉。雄蝶及雌蝶間呈現相當強烈的視覺對比，圖十五。



圖十四：Nikon D70s拍攝紫外燈下的情形

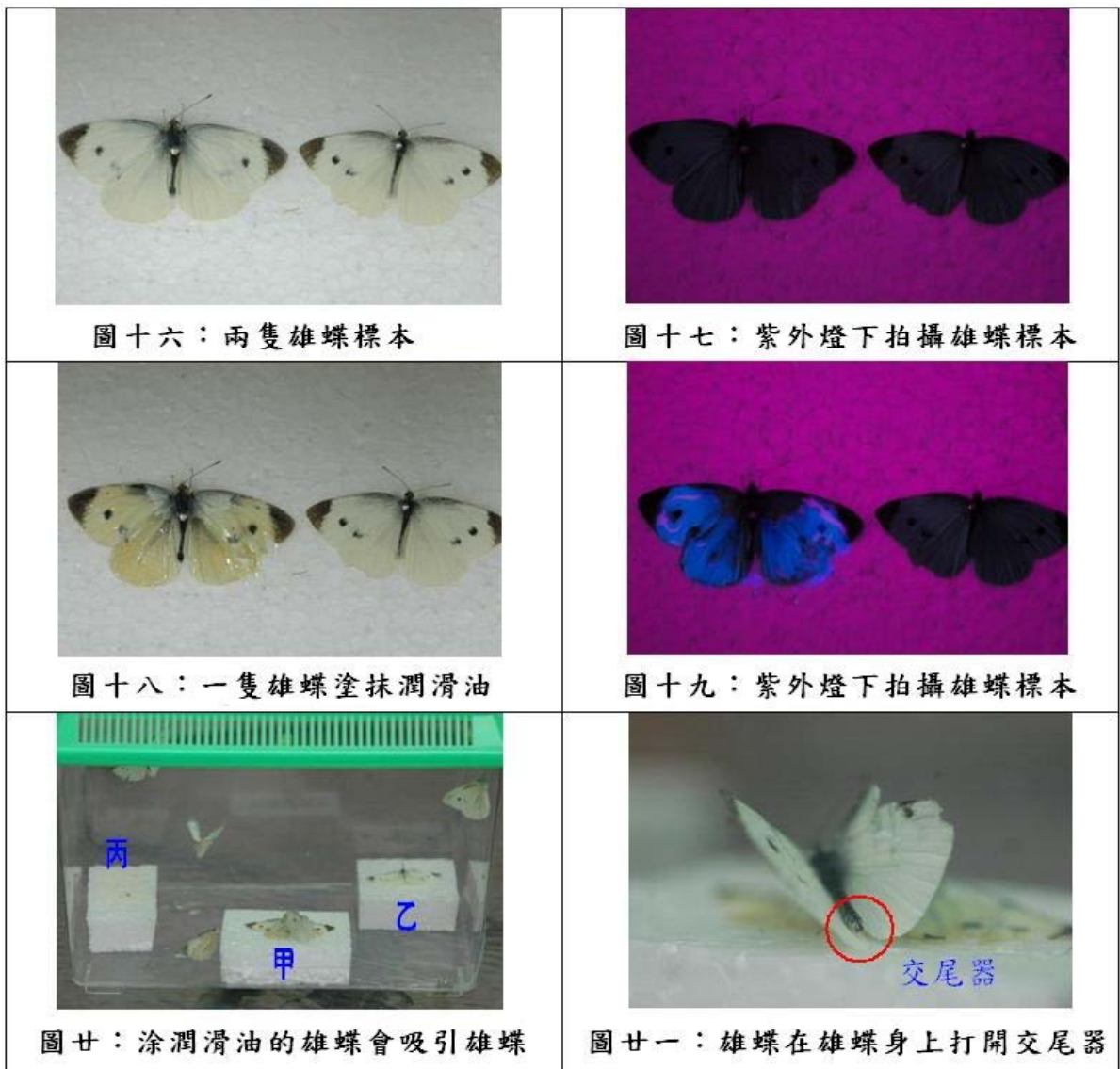


圖十五：可見光下雌蝶(左)及雄蝶(右)；紫外燈下雌蝶(左)及雄蝶(右)

- 四、由此推論：紋白蝶藉由接收翅膀的亮度來分辨雌雄，如此強烈的對比就是明顯的性別標示，更相信『紋白蝶在近距離時是以視覺來辨識雌雄』。

實驗八、驗證視覺為雄蝶擇偶之關鍵(一)

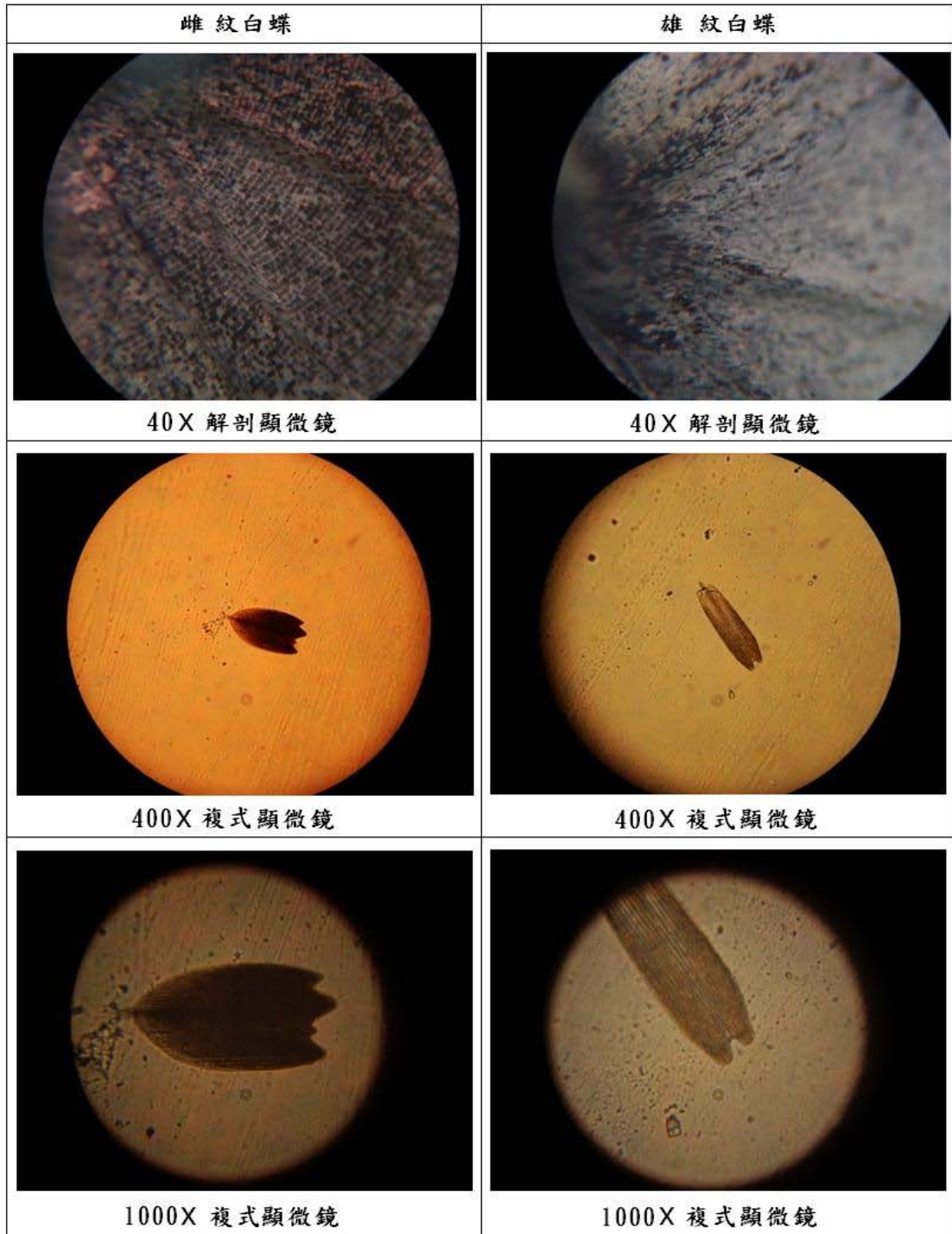
- 一、在實驗過程中，恰巧發現殘留在實驗室桌上的立可白及潤滑油在紫外線的照射下會發亮，因此想到：「如果紋白蝶是以視覺來辨識雌蝶，只要使雄蝶的外觀如同雌蝶一樣能反射紫外線，或許也能吸引雄蝶。」
- 二、先將雄蝶標本比照雌蝶在紫外線下呈現的輪廓於雄蝶翅膀塗抹機械潤滑油，要讓雄蝶以為雄蝶標本是雌蝶。
- 三、將抹潤滑油的雄蝶標本（甲蝶）、對照組的雄蝶標本（乙蝶）及將潤滑油比照雌蝶輪廓塗在保麗龍上(丙)，放入裝有雄蝶的飼養箱中觀察。經過幾分鐘後，發現雄蝶幾乎都集中在甲蝶旁。接著也觀察到有的雄蝶已經打開交尾器似乎準備要交配(圖十六 ~ 廿一)。



- 四、由上驗證：理論上雄蝶標本應該不會散發吸引雄蝶的費洛蒙，而且在雄蝶身上抹油，卻能讓雄蝶靠近雄蝶且有想要交配的錯覺。因此更加確信『紫外線區段的視覺是紋白蝶在近距離時擇偶之關鍵』。

實驗九、以 SEM 分析雌雄紋白蝶鱗片的差異

- 一、但是是什麼原因造成雄蝶翅膀能吸收紫外線，而雌蝶卻是反射紫外線呢？
- 二、首先利用光學顯微鏡觀察雌雄鱗片上的差異。但只能分辨出雌蝶鱗片呈橢圓形，雄蝶鱗片較為細長。即使放大到 1000 倍仍看不清細微構造，只發現鱗片上有重複性的格狀結構，圖廿二。



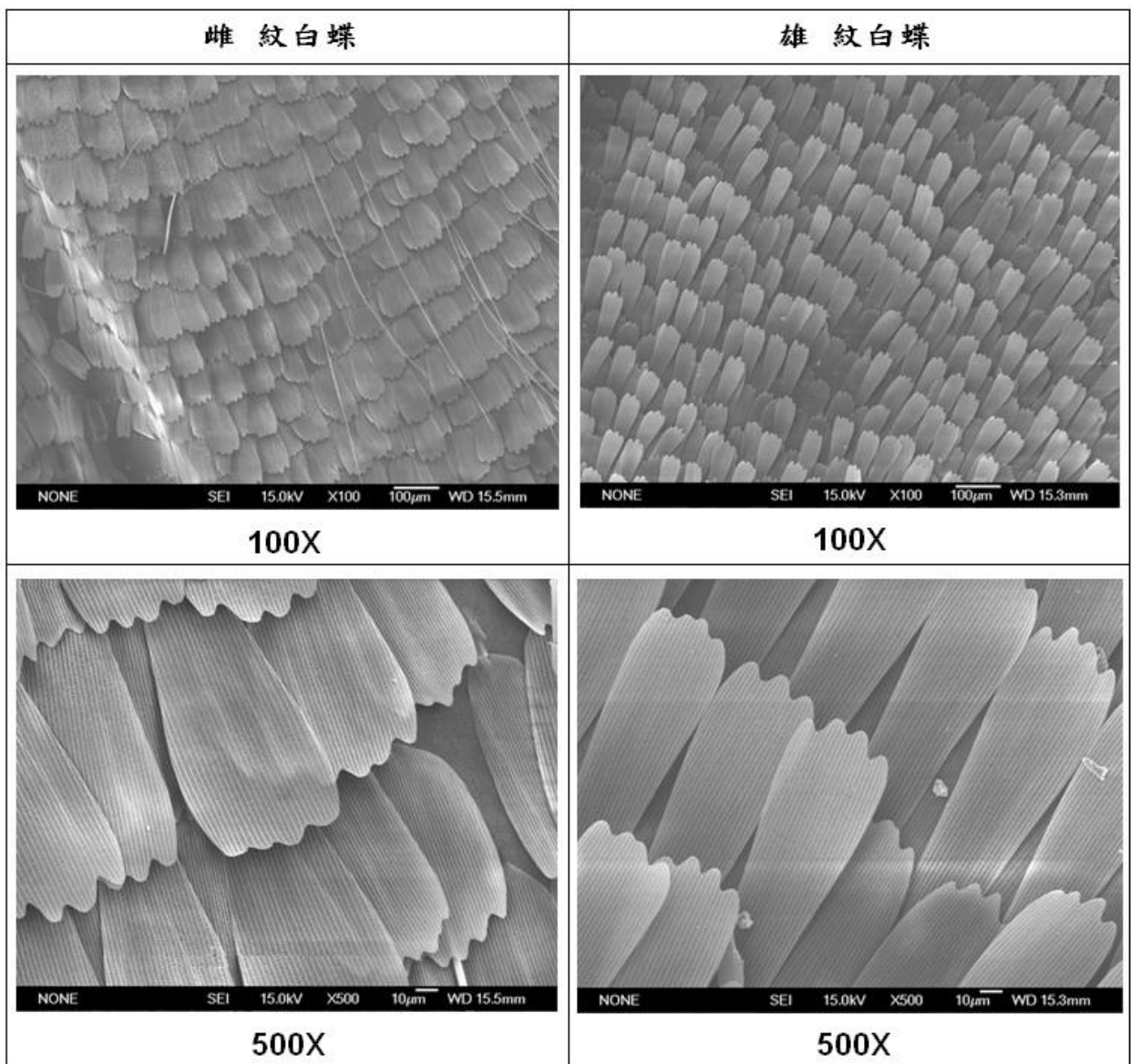
圖廿二：一般光學顯微鏡下觀察雌雄紋白蝶的鱗片

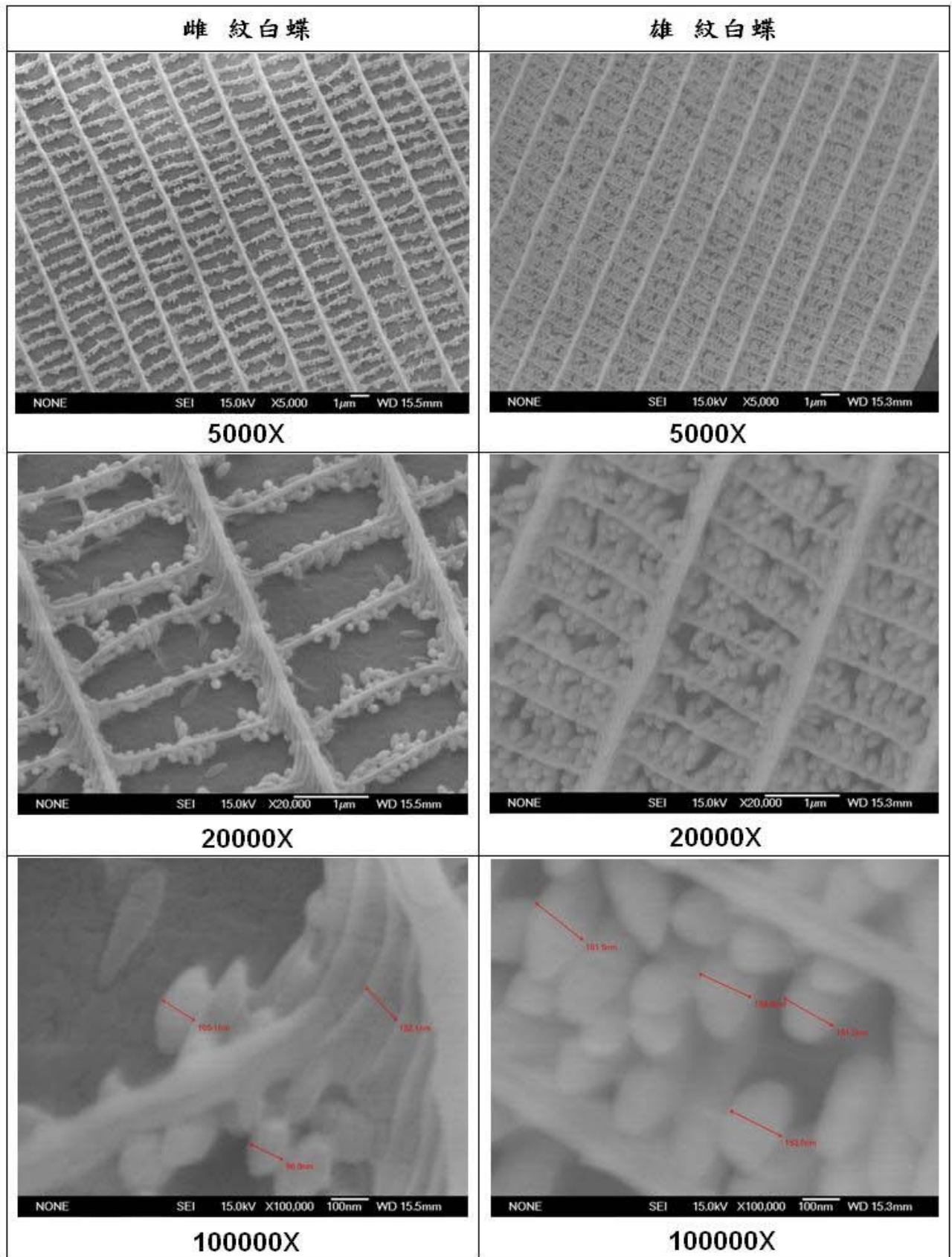
- 三、為更進一步瞭解鱗片構造，需要放大倍率更高的設備⁷。因此老師聯繫清華大學協助我們以 SEM 拍攝雌雄鱗片上的差異。

四、在 SEM 下可以清晰觀察到雌雄蝶間的差異，如下表及圖廿三：

	鱗片格子	大小	奈米顆粒	直徑	數量
雌蝶	比較大	1.0X2.2 μm	比較小	約 100nm	無或很少
雄蝶	比較小	0.6X1.7 μm	比較大	約 150nm	多且密集

五、雌雄鱗片上最明顯的差異在於格狀結構中奈米顆粒的數量，推測造成雌蝶與雄蝶在紫外線照射下形成強烈對比的原因就是這些『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』





圖廿三：掃描式電子顯微鏡下雌蝶及雄蝶鱗片表面的構造

實驗十、驗證奈米顆粒具有吸收紫外線之能力

- 一、為了驗證推測，嘗試將雄蝶的奈米顆粒清除掉，觀察清除前後的差異。
- 二、使用不同酸鹼溶液處理，條件如下表：

紋白蝶	條 件	紋白蝶	條 件
雌蝶標本 1	未經任何處理	雄蝶標本 4	96% 異丙醇
雄蝶標本 2	未經任何處理	雄蝶標本 5	0.2M 鹽酸
雄蝶標本 3	0.2M 氫氧化鈉	雄蝶標本 6	0.5M 氨水

三、以光學顯微鏡觀察確認鱗片都還存在。將這六個標本，放到紫外燈下拍攝，如圖廿四~廿七。

四、異丙醇(標本 4)跟鹽酸溶液(標本 5)處理的雄蝶標本，仍會吸收紫外線。而以氫氧化鈉溶液(標本 3)及氨水(標本 6)處理過的雄蝶標本卻可反射紫外線。所以推測：標本 4 及 5 翅膀上可以吸收紫外線的奈米顆粒並未受到破壞。而鹼性溶液處理過的標本 3 及 6，卻出現與雌蝶反射紫外線相似的情況，所以標本 3 及 6 的雄蝶鱗片上吸收紫外線的奈米顆粒應該是被清除掉了。

五、此結果證明了『鱗片上之奈米顆粒具有吸收紫外線之能力』的推測。



圖廿四：標本處理前可見光攝影



圖廿五：標本處理前紫外燈下攝影



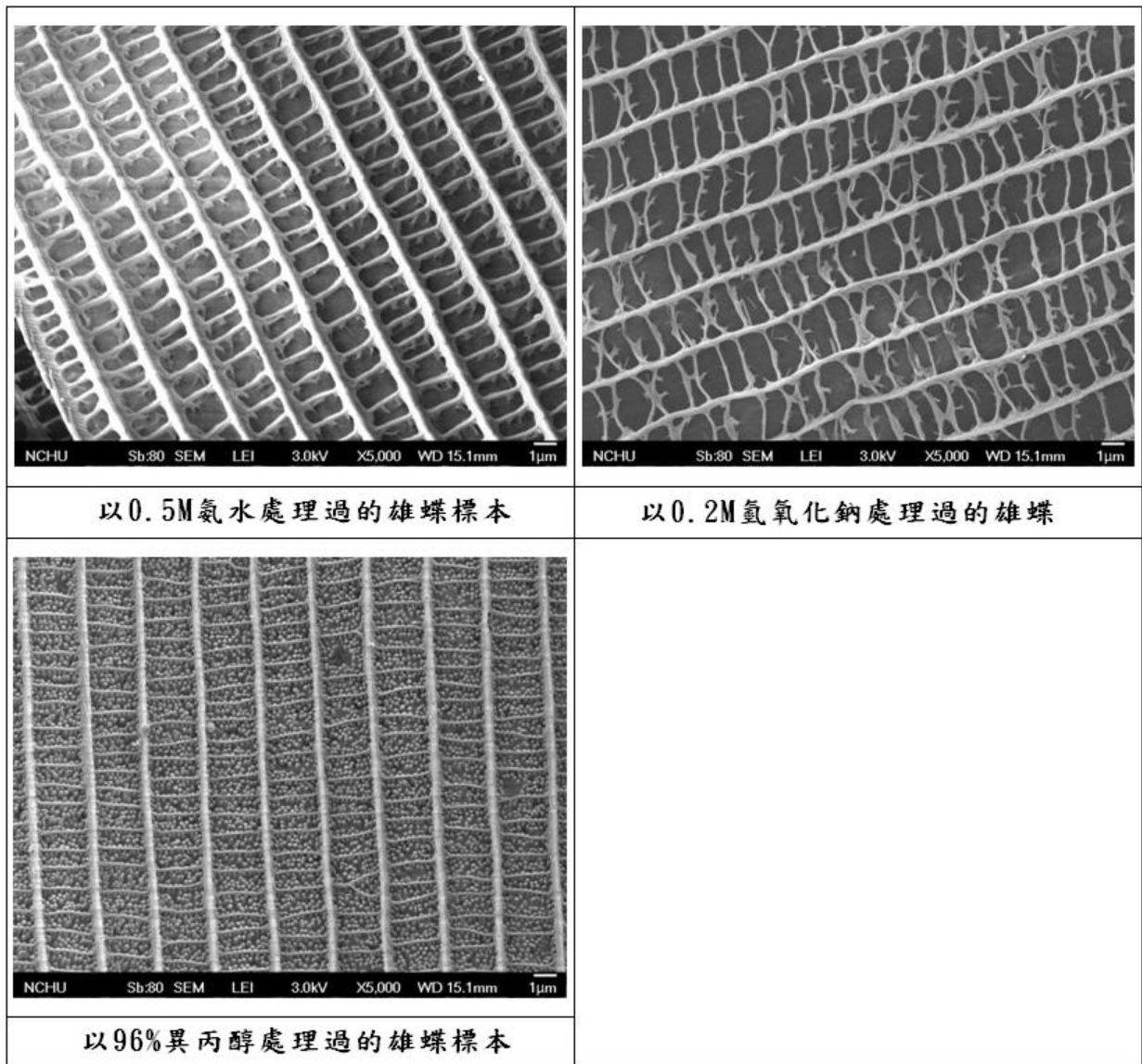
圖廿六：標本處理後可見光攝影



圖廿七：標本處理後紫外燈下攝影

實驗十一、以 SEM 分析鹼溶液處理後之雄蝶鱗片

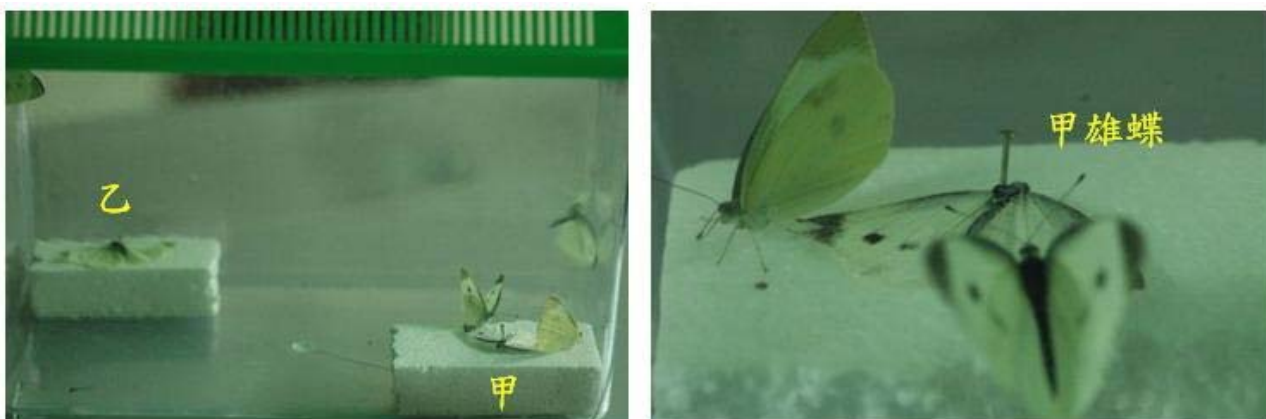
- 一、為了觀察奈米顆粒是否被清除掉，此次協請中興大學以 SEM 拍攝鹼性溶液處理後雄蝶鱗片上的情形。
- 二、從 SEM 中可以看到經鹼性溶液處理過的雄蝶鱗片上的奈米顆粒全都消失，圖廿八。而以氫氧化鈉溶液處理過的鱗片有被腐蝕的現象。用異丙醇處理的鱗片上奈米顆粒都還存在，所以仍可吸收紫外線。
- 三、驗證了『鱗片上之奈米顆粒具有吸收紫外線之能力』。



圖廿八：SEM 下觀察鹼性溶液處理過的雄紋白蝶鱗片上的構造

實驗十二、驗證視覺為雄蝶擇偶之關鍵(二)

- 一、因為鹼溶液處理過的雄蝶如雌蝶一樣也會反射紫外線，推測應該會吸引雄蝶靠近。
- 二、將鹼溶液處理過的雄蝶（甲蝶）及未處理的雄蝶（乙蝶）組置於飼養箱中，放入捕捉的雄蝶，觀察雄蝶的行為。
- 三、一下子就發現雄蝶幾乎都聚集到甲蝶旁，沒有任何雄蝶靠近乙蝶，圖廿九。



圖廿九：以鹼溶液處理掉鱗片上奈米顆粒的雄蝶標本吸引雄蝶聚集

- 四、由以上一系列的實驗發現：雄蝶翅膀上奈米顆粒多，會吸收紫外線；雌蝶翅膀上奈米顆粒少，所以不會吸收紫外線而造成強烈的視覺對比。這就是紋白蝶近距離分辨異性的性標。

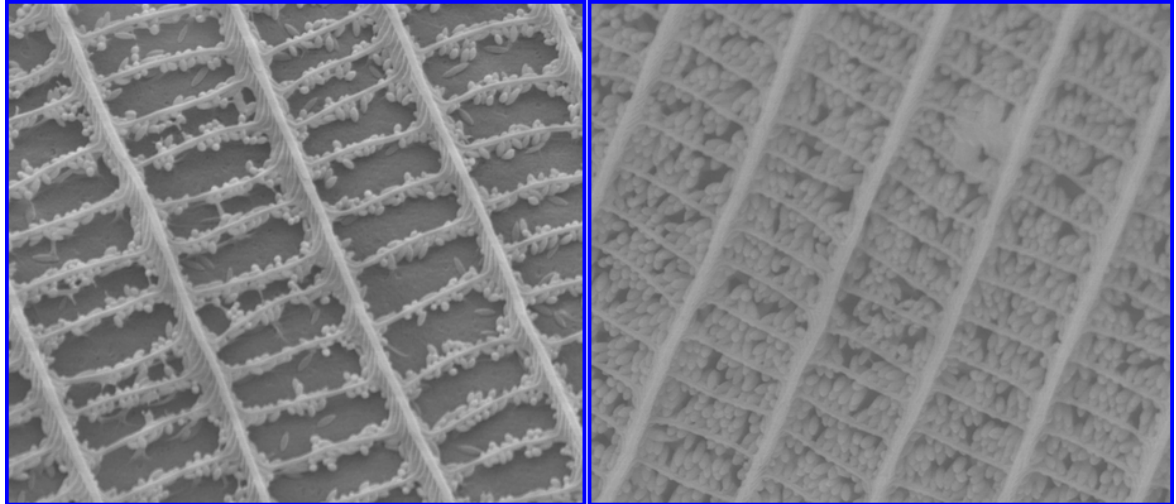
陸、討論

- 一、資料查詢後發現大部分昆蟲都是利用費洛蒙吸引異性。但是嗅覺比較無法精準定位，當同時出現一大群外觀顏色相似的紋白蝶時，雄蝶要如何正確找到其中的雌蝶？所以推測紋白蝶間有可能是利用視覺來辨識異性。
- 二、網路上查到昆蟲視覺可接收的光波波長從 300nm~650nm，與人類大不相同。紋白蝶在可見光下雌雄間並無顯著差異，因此推測紋白蝶若以視覺辨識雌雄，應該是在紫外線範圍(400nm 以下)。
- 三、使用紅、橙、綠、藍色 LED 燈吸引雄蝶。發現紅、橙色不吸引，綠色吸引少數靠近，而藍色則可吸引多數雄蝶。此時若將紫外燈移近，則原本被吸引在綠、藍色附近的雄蝶都飛往紫外燈處，紫外線對雄蝶更具吸引力。可知紋白蝶在紫外線區具有極敏感的視覺。
- 四、為釐清雌雄紋白蝶在紫外線下的差異，因此使用 Nikon D70s 數位相機，在 UVA 波段紫外燈下拍攝。發現雄蝶不反射紫外線，雌蝶明顯反射紫外線，雌雄間就是依此來造成強烈視覺對比。而在雄蝶翅膀塗上可以反射紫外線的機械潤滑油後，也可以吸引雄蝶靠近。推論能夠反射紫外線的紋白蝶就能吸引雄蝶。

五、以光學顯微鏡及 SEM 觀察雌雄蝶的鱗片，發現兩者間：

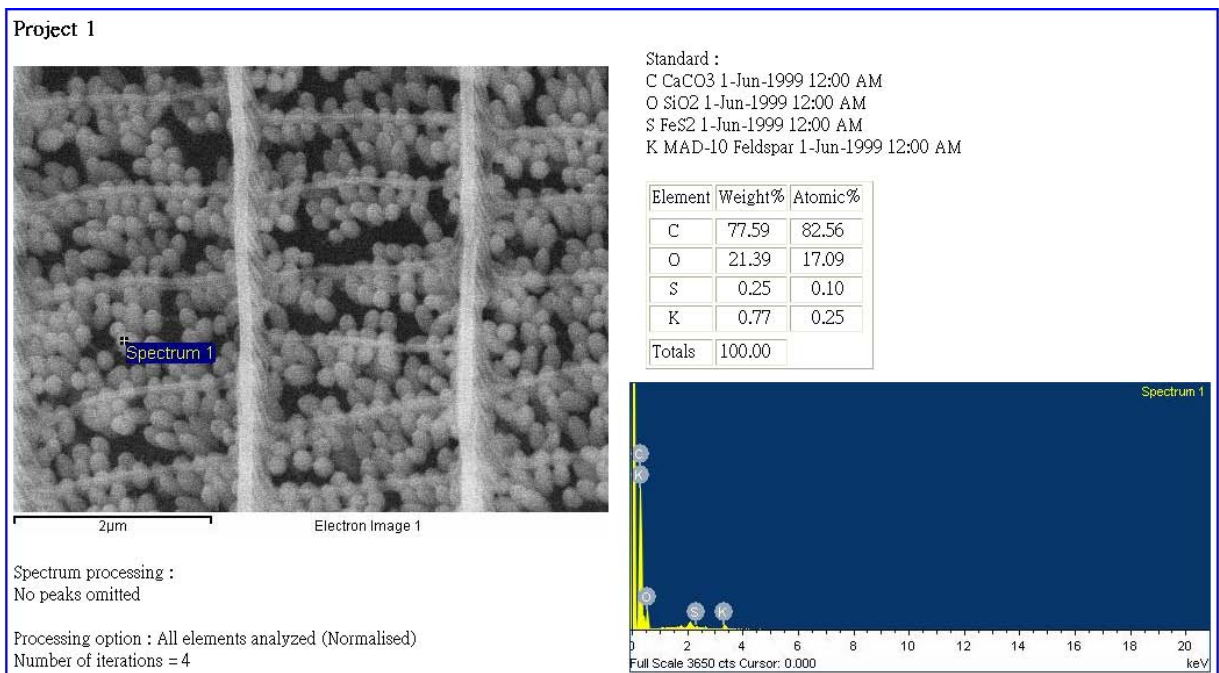
1. 鱗片大小及形狀不同。
2. 鱗片上都具有奈米級肋狀結構。
3. 雄蝶鱗片上有很多奈米顆粒，雌蝶幾乎沒有。

雌雄間最明顯的差異就是第 3 點中奈米顆粒的有無，因此推測這些奈米顆粒應該具有吸收紫外線的性質，圖卅。



圖卅：雌蝶鱗片上奈米顆粒少；雄蝶鱗片上奈米顆粒多

六、氨水處理過後的雄蝶翅膀在 SEM 下，可以觀察到奈米顆粒完全被清除，僅剩下框架。而經氫氧化鈉處理過後，也可以觀察到奈米顆粒完全被清除，甚至連框架都有破損。在相機拍攝下，反射紫外線的效果與雌蝶相同。因此可證明奈米顆粒就是雄蝶吸收紫外線的關鍵。而 EDS 檢測發現顆粒主要含 C、O 成分，所以推測應該是脂質或酯類(溶於鹼性，不溶於酸性及醇類)，圖卅一。

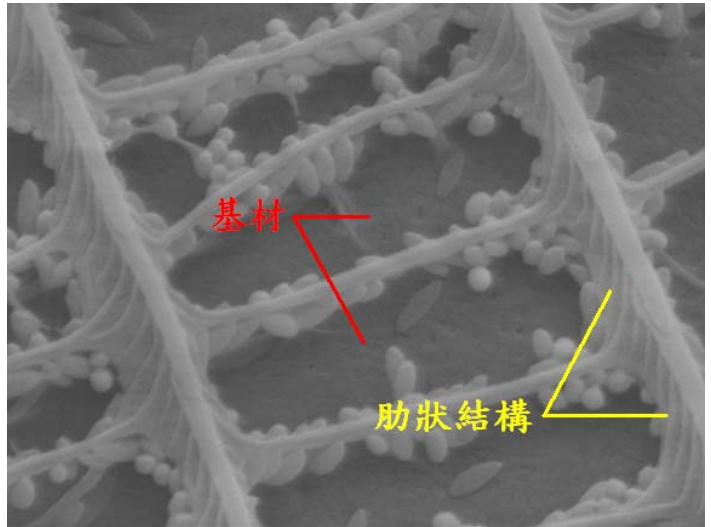


圖卅一：EDS測量雄紋白蝶鱗片上奈米顆粒的成分

七、而為何沒有奈米級顆粒的翅膀就能夠反射紫外線，可能與下列因素有關。

1. 鱗片基材：可能鱗片的基材本身就具有反射紫外線的特性(色素色)，因此當雄蝶上的奈米顆粒消失，基材顯露出來與雌蝶相同後，就可以反射紫外線。

2. 鱗片上奈米級『肋狀結構』^{2,3}：
根據所查資料提及，蝴蝶翅膀上繽紛的顏色是因為鱗片上有許多重複規則性的奈米結構，會造成特定波長的光被反射。我們推測可能因為鱗片上的奈米級肋狀結構，產生了類似彩蝶效應的現象，其反射波長恰好為紫外線波段(結構色)，圖卅二。



圖卅二：鱗片上的基材及肋狀結構

但目前無法分離鱗片基材與奈米級肋狀結構，因此無法確定到底是何種因素造成翅膀反射紫外線，此待未來擁有分離技術後才能再行研究。

八、奈米顆粒的應用：防曬乳原理分為兩種機制，一種是物理性防曬，利用物質反射紫外線；另一種是化學性防曬，利用物質吸收紫外線的特性，達到保護皮膚的效果。若能利用這種奈米級顆粒吸收紫外線的特性，在化學性防曬乳上將會有極佳的應用。

柒、結論

一、當紋白蝶在遠處見不到對方時，會以釋放費洛蒙吸引異性前來交配產卵。但是在近距離時，紋白蝶是以視覺方式吸引或辨識雌雄，且應該在昆蟲可以接收的紫外線範圍內(300nm~400nm)具有很大的關鍵。

二、可見光下雌雄紋白蝶間並無太顯著的差異，當蝴蝶拍動翅膀，複眼構造辨識度差，很難利用可見光分辨群體中的性別。但在紫外線的波段內，雄蝶不反射紫外線，雌蝶明顯反射紫外線，形成強烈的視覺對比，是紋白蝶間一項重要的性標成因。

三、以光學顯微鏡及 SEM 觀察雌雄紋白蝶翅膀上的鱗片，發現兩者間：

1. 鱗片上的構造不同。

	鱗片格子	大小	奈米顆粒	直徑	數量
雌蝶	比較大	1.0X2.2 μm	比較小	100nm	無或很少
雄蝶	比較小	0.6X1.7 μm	比較大	150nm	很多且密集

2. 雄蝶與雌蝶鱗片上都具有奈米級肋狀結構，依計算可得反射波長應在紫外線範圍。

3. 雄蝶鱗片上有很多奈米顆粒，雌蝶鱗片幾乎沒有。

依照第 2 點發現，理論上雄蝶與雌蝶都應該可以反射紫外線，但事實上雄蝶卻沒有，因此推測在第 3 點中發現的奈米顆粒應該具有吸收紫外線的性質。

四、使用氫氧化鈉及氨水溶液來溶解掉雄蝶鱗片上的奈米顆粒，在 SEM 觀察到雄蝶的奈米級顆粒都消失了，而且雄蝶翅膀也如同雌蝶一樣會反射紫外線。由此證明奈米顆粒可吸收紫外線。雌雄間就是以這種奈米顆粒形成強烈的視覺對比效果，造成明顯的性別的差異，是構成紋白蝶間性標的一項重要成因。

五、從本研究中發現，紋白蝶眼睛對這世界的成像和人類習以為常的可見光有很大的差異。此觀點給我們很大的啟示：將來我們進一步研究生物現象時，應該多考慮生物的特性，試著從生物的觀點來觀察及思考，而不能只用人類的眼光來看事物！

後記：

我們在實驗過程中從中文網站搜尋，一直找不到本實驗的相關資料。而在整個實驗結束後，開始整理撞打報告時，老師查詢國外學術網站，卻發現了一篇與我們研究十分類似的論文。M. A Giraldo and D. G Stavenga *Proc Biol Sci.* 2007 274, 97 - 102 *Sexual dichroism and pigment localization in the wing scales of *Pieris rapae* butterflies*
老師仔細地比較我們與國外論文間的異同，整理如下：

	相 異	相 同
我們	1 拍攝紫外線下實際的影像 2 將雄蝶模擬成雌蝶及清除顆粒後再觀察擇偶情形 3 著重紋白蝶辨識雌雄之關鍵	1 研究日本紋白蝶 2 SEM 分析鱗片的差異
國外	1 光譜儀測量連續頻段的吸收 2 分析歐洲及日本亞種 3 著重鱗片吸光的波長及比率	3 發現雄蝶顆粒多、雌蝶顆粒少

這篇早在實驗開始的一年半前就已發表在國外著名的期刊上，剛開始我們覺得有點錯愕，但一想到我們所有的實驗是全體共同設計、嘗試錯誤中學習及互相討論完成；而且我們切入的主題、重點、實驗方式及完整度都和論文不同，所以這反而是給我們的一種鼓勵及肯定。

捌、參考資料及其他

一、參考資料

1. 張永仁著，昆蟲圖鑑 1、2，遠流出版社，1998 年 6 月。
2. 張永仁著，蝴蝶 100，遠流出版社，2007 年 1 月增訂新版。
3. 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。
4. 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。
5. 中華植物保護協會 <http://www.pps.org.tw/htdocs/ppb45-4-2c.htm>
6. 台灣昆蟲圖鑑 <http://gaga.jes.mlc.edu.tw/new23/s2-94.htm>
7. 奈米科技人才培育網 <http://www.nano.edu.tw/>
8. 農業知識入口網
http://kmweb.coa.gov.tw/knowledge/knowledge_discuss_lp.aspx?ArticleId=91818&ArticleType=D&CategoryId=&kpi=0
9. 數位典藏與數位學習
http://digitalarchives.tw/collection_detail.jsp?exhibition_id=1381
10. ウロコアシナガグモの紫外線写真
<http://www.cyberoz.net/city/sekine/UVIMAGES.htm>

二、特別感謝

清華大學工程與系統科學系及中興大學植病系 協助我們 SEM 及 EDS 拍攝。

【評語】 030304

1. 有創意。
2. 觀察細微。
3. 利用紫外燈拍攝仿造陽光是極佳的思考。
4. 建議可多觀察野外紋白蝶的求偶行為，則有助於結果之後
續討論。