

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科
團隊合作獎

051821

從帝王斑蝶色斑探究色塊排列之熱傳輸機制

學校名稱：臺中市立臺中女子高級中等學校

作者： 高二 張沛綺 高二 劉芯妤	指導老師： 何雅惠
---------------------------------	------------------

關鍵詞：帝王斑蝶、熱傳輸、氣流

摘要

本研究以帝王斑蝶色斑為發想，探討不同顏色與幾何圖形配置對熱傳輸機制的影響。實驗以鹵素燈模擬輻射熱源、熱像儀量測溫度分布，再以自製密閉觀察箱觀察樣本周遭氣流，分析輻射、傳導及對流的交互作用。結果顯示，黑色吸熱效率最高，與白或橘色塊接觸時，熱傳導效應使溫差降低，尤其色塊面積小、接觸邊數量多會增強熱傳導速率，接觸邊短時多餘的熱傾向於逸散至環境中，使色塊間溫差下降更顯著。氣流上升則隨顏色吸熱效果提升而旺盛。研究支持顏色與幾何配置對熱量流動有重要影響，進一步推測帝王斑蝶白斑的分布擴大了蝶翅外緣與內部溫差，導致周遭氣流的增強。未來我們期待透過軟體模擬，完善對於帝王斑蝶蝶翅熱傳輸機制的整合與應用探索。

壹、前言

一、研究動機

近期的研究已發現擁有較多白斑的帝王斑蝶飛行距離較遠（Davis et al., 2023），該研究團隊推測，這些斑點可能透過造成蝶翅上的溫度差，影響周遭氣流的流動，從而提升飛行效率。此研究僅就統計分析的結果提出假設，目前亦尚無研究進行進一步的實驗驗證，但我們查閱文獻後發現自然界中確實存在類似現象，如斑馬、信天翁都因體表顏色吸熱效果不同而獲得益處。因此，我們決定透過深入探討顏色排列對熱傳輸的影響，了解白斑在熱傳輸機制中的角色，並探究其可能對飛行帶來的影響。

二、研究目的

- （一）探討顏色熱輻射吸收能力差異。
- （二）探討雙色間的熱傳導現象。
 - 1. 不同顏色組合對熱傳導之影響。
 - 2. 改變色塊面積對熱傳導之影響。

3. 改變色塊接觸長度對熱傳導之影響。
4. 改變色塊接觸邊數量對熱傳導之影響。

(三) 探討三色間的熱傳導現象。

1. 改變色塊排列對熱傳導之影響。
2. 模擬蝶翅局部色斑之熱傳導情形。

(四) 分析蝶翅熱傳導機制。

(五) 探討不同色塊及蝶翅之熱對流現象。

1. 不同色塊排列時熱對流之差異。
2. 模擬蝶翅局部色斑之熱對流情形。
3. 帝王斑蝶蝶翅之熱對流情形。

三、文獻回顧

(一) 帝王斑蝶 (*Danaus plexippus*) 的翅膀與其遷徙特性

1. 形態特徵：翅膀呈黃褐橙色，翅脈及邊緣黑色，邊緣有兩串細白點。前翅近端則具有橙點 (Britannica, 2024)。
2. 遷徙習性：帝王斑蝶在秋季時會自北美洲向墨西哥遷移超過 3000 英里，並在當地過冬。每到春季時分，牠們又往北部、東部遷徙，而回到北美洲地區 (Johnson et al., 2023)。關於其遷徙原因，科學家提出眾多解釋，其中最廣為接受的一種：帝王斑蝶體內具有磁性氧化鐵質微粒，作用類似指南針，牠們可以藉此偵測到太陽在天空中的位置、角度和地球的磁場，加上自己生理時鐘發出的訊號，整合這些資訊來保持向南飛行。



圖 1：帝王斑蝶的形態特徵
(圖源：維基百科)



圖 2：帝王斑蝶的遷徙路徑
(圖源：Britannica, 2024)

3. 遷徙與色斑的關聯：Davis et al. (2023) 在對帝王斑蝶翅膀進行分析後指出，比較夏季繁殖期間與越冬時斑紋的比例，黑色面積佔比在後者中降低了 3%，白色面積則是提高 3%。研究者認為導致此結果的原因可能是因為斑點造成翅膀邊緣的氣流變化，如微渦流能降低阻力，使其飛行更有效率。

(二) 顏色吸熱造成影響之實例

1. 斑馬：斑馬身上的條紋能調控其體溫，是因白色、黑色吸放熱差異，導致溫度不同，而使得身體外圍空氣產生氣壓差，進而有對流的產生而減緩升溫速率（洪宥靖等，中華民國第 53 屆中小學科學展覽會）。
2. 信天翁：由於不同顏色翅膀吸熱上的差別，黑色翅膀更能加熱周圍空氣，造成空氣黏度與密度的差異，研究顯示黑色的信天翁翅膀相較於白色之下有更小的阻力（Hassanalian et al., 2019）。
3. 光能輻射計（radiometer）：外界溫度變化時，光能輻射計因黑白扇葉熱量變動的差異而發生轉動的情形。以加溫為例，因光能輻射計的黑色扇葉升溫較白色為高且快速，其周遭的空氣分子受到加熱的情形也更顯著，並產生較大的動能，進而撞擊黑色扇葉，推動由黑向白的扇葉轉動情形，降溫則反之。（廖冠翔等，中華民國第 48 屆中小學科學展覽會）。

(三) 氣流影響飛行之實例

1. 前緣渦流（Leading-edge vortex, LEV）：前緣渦流的形成可減低翅翼表面的摩擦力，且由於其低壓的特徵，能造成法線方向上的力，故穩定的 LEV 能為昆蟲飛行增加更多升力（Wilkins & Knowles, 2009）。
2. 果蠅：流動結構、渦流與壓力的效應可增加小展弦比翅翼的升力，翼尖渦流也能對翼展的變化起到良性作用，如果蠅產生的渦旋結構能提高局部動量和升力（Shyy et al., 2016）。
3. 蚊子：主要有三種空氣動力學上的特徵，包含前述提及的前緣渦流、旋轉阻力（Rotational drag）可在旋轉後產生垂直翅膀的力以提供升力，以及尾緣渦流（Trailing-edge vortex, TEV）。尾緣渦流形成後，受到上撲尾流（wake）的

影響，空氣速度與壓力梯度使剪切層（shear layer）捲曲而形成附著渦流，造成該區域的強烈負壓，而可支撐重量（Bomphrey et al., 2017）。

（四）熱學理論

1. 史蒂芬-波茲曼定律（Stefan-Boltzmann Law）：

物體表面每秒輻射出的熱能（即物體的輻射功率）與其發射率、絕對溫度的四次方以及表面積成正比。

$$*P = \varepsilon \sigma T^4 A$$

其中 $*P$ 為輻射功率， ε 為物體的發射率， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 為史蒂芬-波茲曼常數（Stefan-Boltzmann constant）， T 為絕對溫度， A 為表面積。

2. 克希荷夫輻射定律（Kirchhoff's law of thermal radiation）：

對於達熱平衡的所有物體而言，其發射率與吸收率的值相等，即

$$\varepsilon \text{（發射率）} = \alpha \text{（吸收率）}。$$

3. 傅立葉熱傳導定律（Fourier's Law）

物體在單位面積的熱流密度與溫度梯度（溫度隨距離的變化率）成正比。

$$q = -kA (\Delta T / \Delta X)$$

其中 q 為熱流密度， k 為熱傳導係數， A 為面積， $\Delta T / \Delta X$ 為溫度梯度。

貳、研究設備及器材

一、實驗設備

（一） 熱輻射與熱傳導實驗

熱像儀（型號：FLIR Ex+）

鹵素探照燈（110V，300W）

支架 1 組、基座（紙質）1 組

測溫樣本 19 張

Flir tools（熱影像分析軟體）

手機計時器

鹵素探照燈（110V，300W）

自製密閉觀測箱（含黑色背景紙、
透明觀察窗、線香 2 根、掛鉤 4
個）

四角裝上棉線的測溫樣本 12 張

手機計時器

平板（錄影用）

（二） 熱對流實驗

二、實驗裝置



圖 3-1：熱輻射與熱傳導實驗裝置

（第二作者親自拍攝）

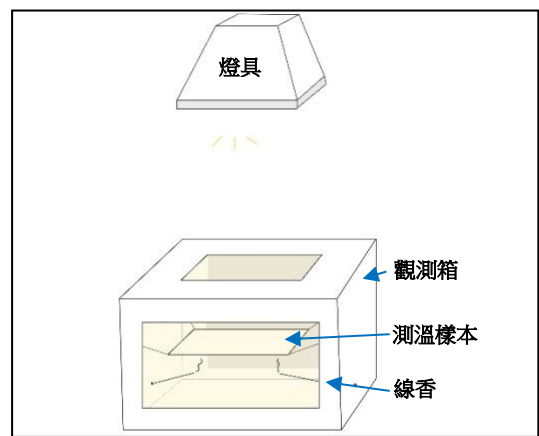


圖 3-2：熱對流實驗裝置

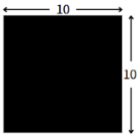
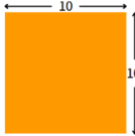
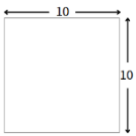
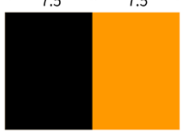
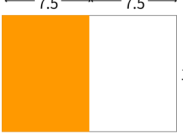
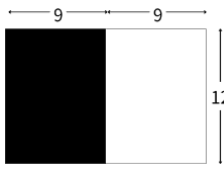
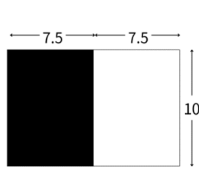
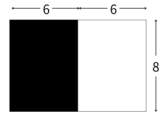
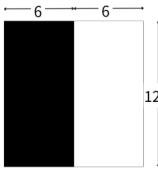
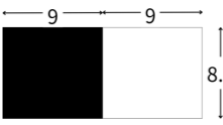
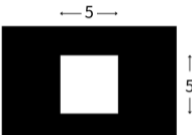
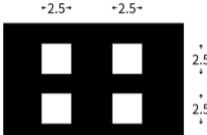




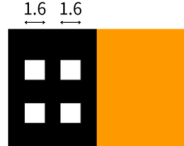
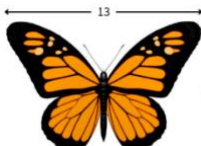
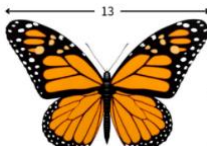
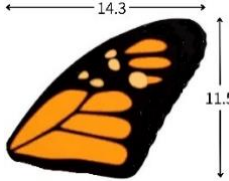
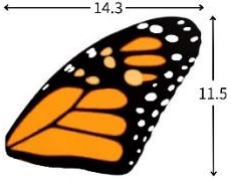
（第一作者親自繪製）

三、測溫樣本

實驗使用紙張作為加熱測溫的對象，並以雷射列印色彩，因紙張之取得便利性符合實驗大量需求，且與蝶翅輕薄柔韌的特性相符，而雷射列印較噴墨列印其表面更均質。

表 1：測溫樣本列表（單位：cm）

（蝶翅圖源：Thingiverse，其餘各圖由第二作者親自繪製）

				
10*10 黑色塊	10*10 橘色塊	10*10 白色塊	10*15 黑橘色塊	10*15 橘白色塊
				
12*18 黑白色塊	10*15 黑白色塊	8*12 黑白色塊	12.5*12 黑白色塊	8.3*18 黑白色塊
				
10*15 黑包大白色塊	10*15 黑包小白色塊	10*15 黑橘白色塊	10*15 橘黑白色塊	10*15 黑白橘色塊
				
黑橘及一大白斑	黑橘及四小白斑	無白斑蝶翅	有白斑蝶翅	
				
無白斑蝶右前翅		有白斑蝶右前翅		

參、研究過程及方法

一、實驗架構



圖 4：實驗架構圖（第一作者親自繪製）

二、測量方法

（一）準確性確認

我們使用水平儀確認燈具與地面平行，並使用 Phyphox 量測燈具下一定範圍內光照度（光源下等距定速移動，測得光照度如圖），確認在兩側支架支撐點高度差 10 cm、燈具距離測溫樣本 30 cm 時，測溫樣本上各處得以受到均勻輻射熱。

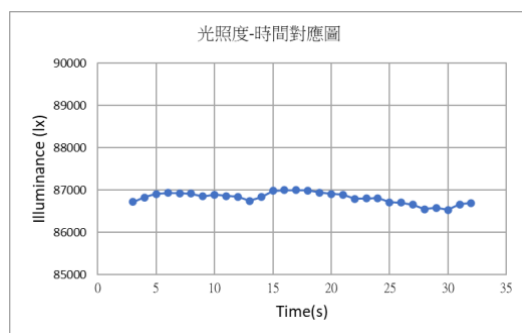


圖 5-1：陽光下光照度

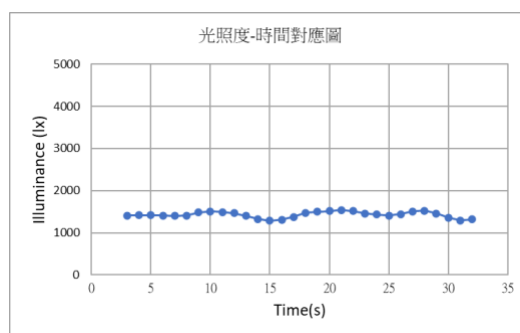


圖 5-2：鹵素探照燈下光照度

（第二作者親自繪製）

（二）溫度量測

我們將 10 cm*15 cm 黑白色塊置於鹵素探照燈下，加熱 10 分鐘，每隔 1 分鐘拍攝一張熱影像，以 Flir tools 進行分析，所得溫度數據如圖。

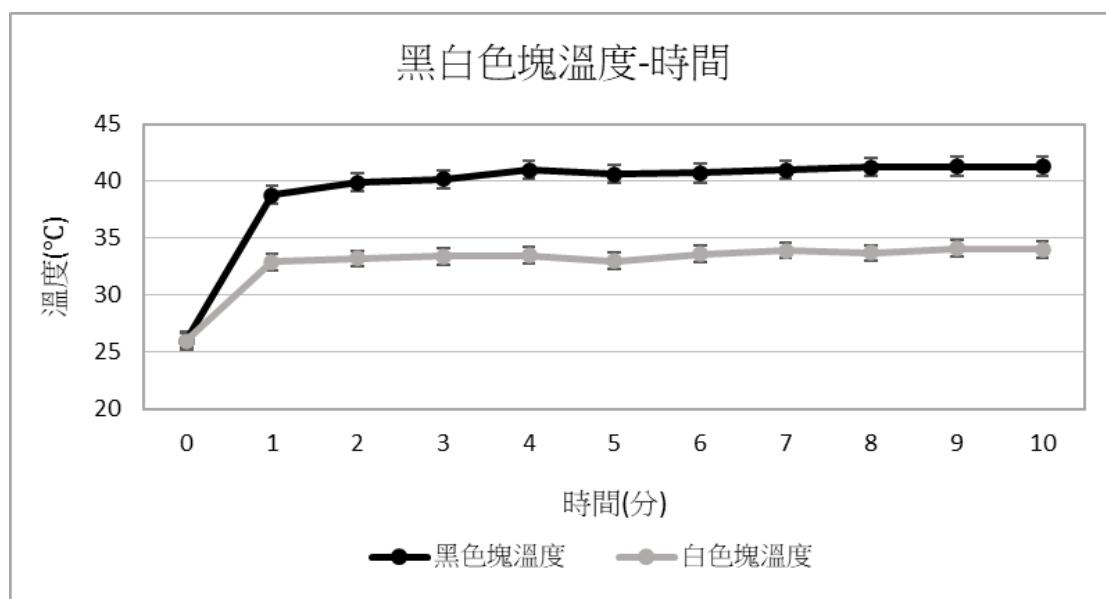


圖 6：黑白色塊溫度-時間折線圖（第二作者親自繪製）

由此圖可知紙張約在加熱 3 分鐘後溫度趨於穩定，因此後續實驗取加熱 3 分鐘的熱影像進行分析，以確保溫度已達平衡狀態。

（三）氣流觀察

我們將測溫樣本的四個角繫上棉線，懸掛於自製密閉觀測箱壁上的掛鉤，接著點燃線香以可視化氣流，最後加熱 3 分鐘，同時以平板拍攝記錄過程。

三、實驗設計

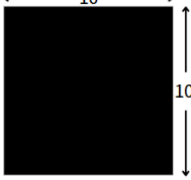
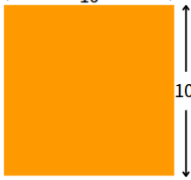

表 2：實驗變因設計

類型	實驗	操縱變因	控制變因	應變變因
熱輻射 吸收	一	色塊顏色（黑、橘、白）	色塊面積、紙質、輻射熱源、加熱時間、環境條件	色塊溫度
雙色間 熱傳導	二	色塊顏色組合 （黑橘、黑白、橘白）	色塊面積（實驗二、四、五）、色塊長寬比（實驗三）、紙質、輻射熱源、加熱時間、環境條件	色塊溫度、熱傳導速率
	三	色塊面積（12 cm*18 cm、10 cm*15 cm、8 cm*12 cm）		
	四	色塊接觸長度（12.5 cm、10 cm、8.3 cm）		
	五	色塊接觸邊數量（4 邊、16 邊）		
三色間 熱傳導	六	色塊排列 （黑橘白、橘黑白、黑白橘）	色塊面積、紙質、輻射熱源、加熱時間、環境條件	
	七	模擬蝶翅局部色斑：改變白斑的有無或數量		
蝶翅 熱傳導 機制	八	白斑的有無	蝶翅面積、紙質、輻射熱源、加熱時間、環境條件	蝶翅溫度分布
雙色間 熱對流	九 （一）	色塊顏色組合 （黑橘、黑白、橘白）	色塊面積、紙質、輻射熱源、加熱時間、環境條件、煙源	樣本上方 空氣熱對流情形
三色間 熱對流	九 （二）	色塊排列 （黑橘白、橘黑白、黑白橘）		
模擬蝶翅局部 色斑	九 （三）	黑色塊或黑橘色塊中白色塊數量 （黑／黑橘包單塊大白色塊、黑／黑橘包四塊小白色塊）		
蝶翅 熱對流 機制	九 （四）	白斑的有無		

肆、研究結果

一、顏色熱輻射吸收能力差異

表 3：測溫樣本

測溫樣本			
	10*10 黑色塊	10*10 橘色塊	10*10 白色塊
溫度	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ：35.0 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ：27.2 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ：25.2 °C

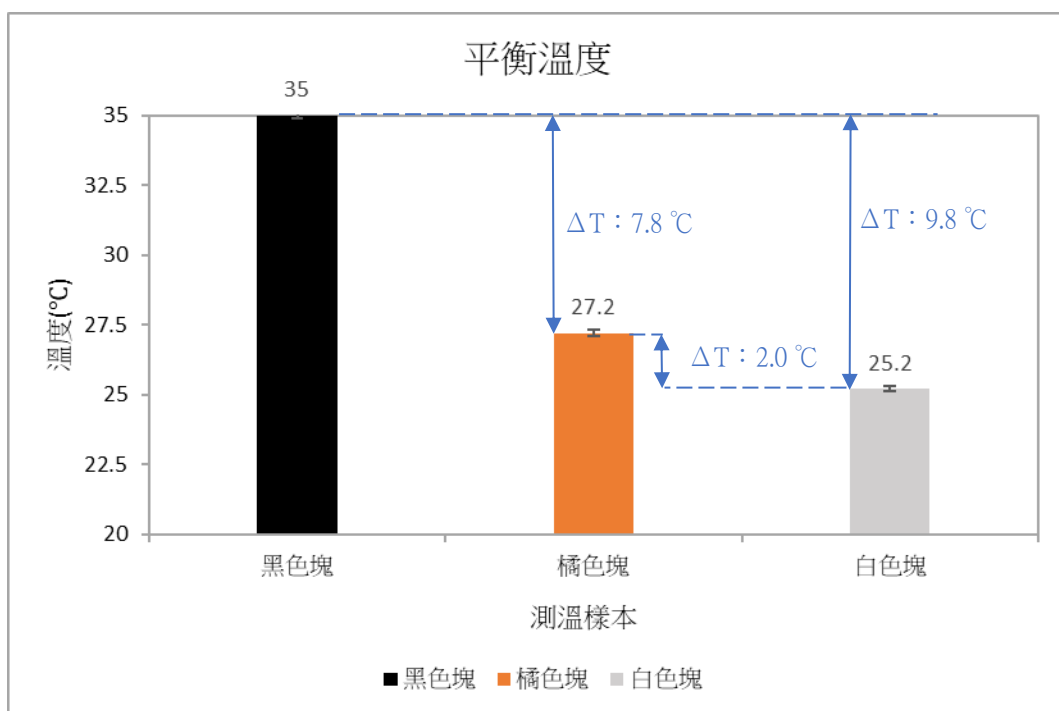
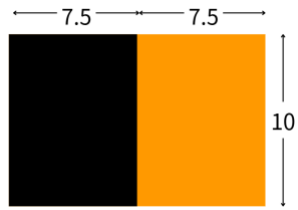
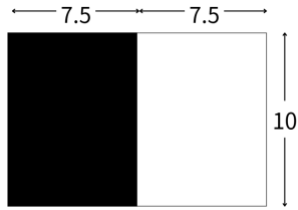
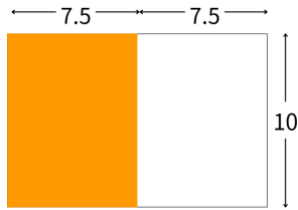


圖 7：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

二、雙色間熱傳導現象：不同顏色組合對熱傳導之影響

表 4：測溫樣本

測溫樣本			
	10*15 黑橘色塊	10*15 黑白色塊	10*15 橘白色塊
溫度	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 黑 $33.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 橘 $28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 黑 $33.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 白 $27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 橘 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 白 $26.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

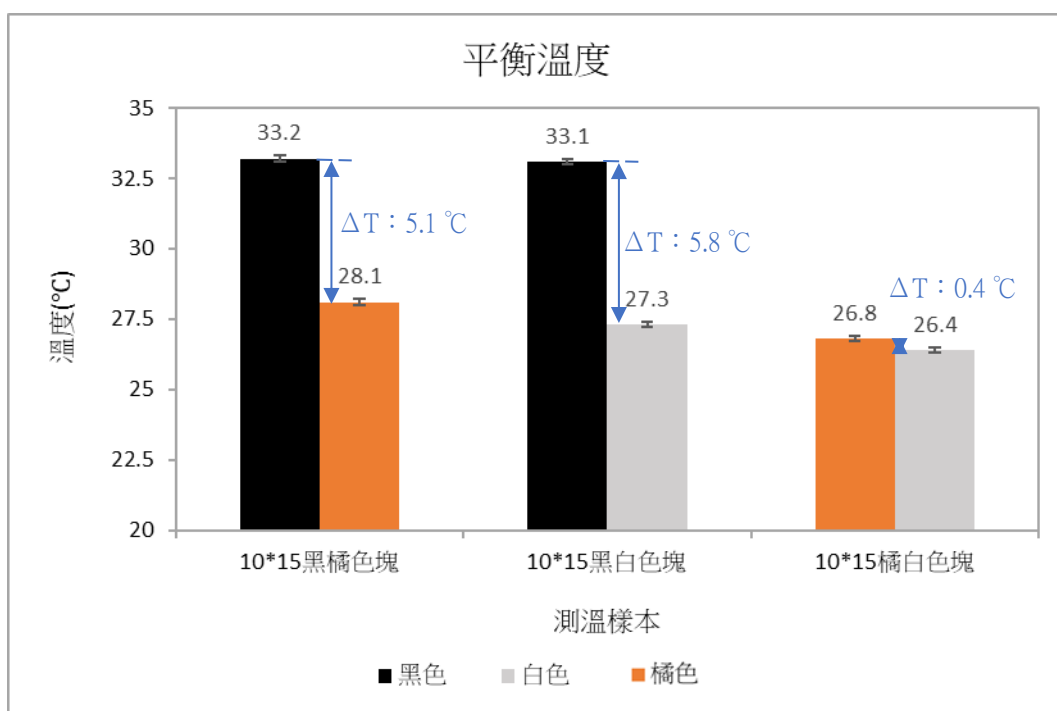
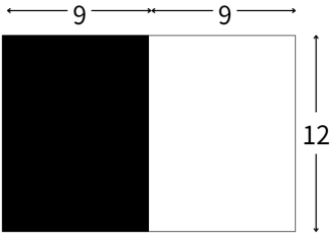
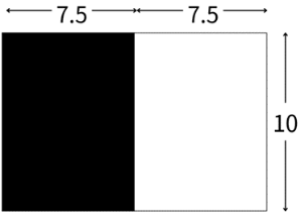
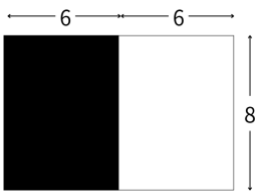


圖 8：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

三、雙色間熱傳導現象：改變色塊面積對熱傳導之影響

表 5：測溫樣本

測溫樣本			
	12*18 黑白色塊	10*15 黑白色塊	8*12 黑白色塊
溫度	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.1 °C 白 27.2 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.1 °C 白 27.3 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.3 °C 白 27.8 °C

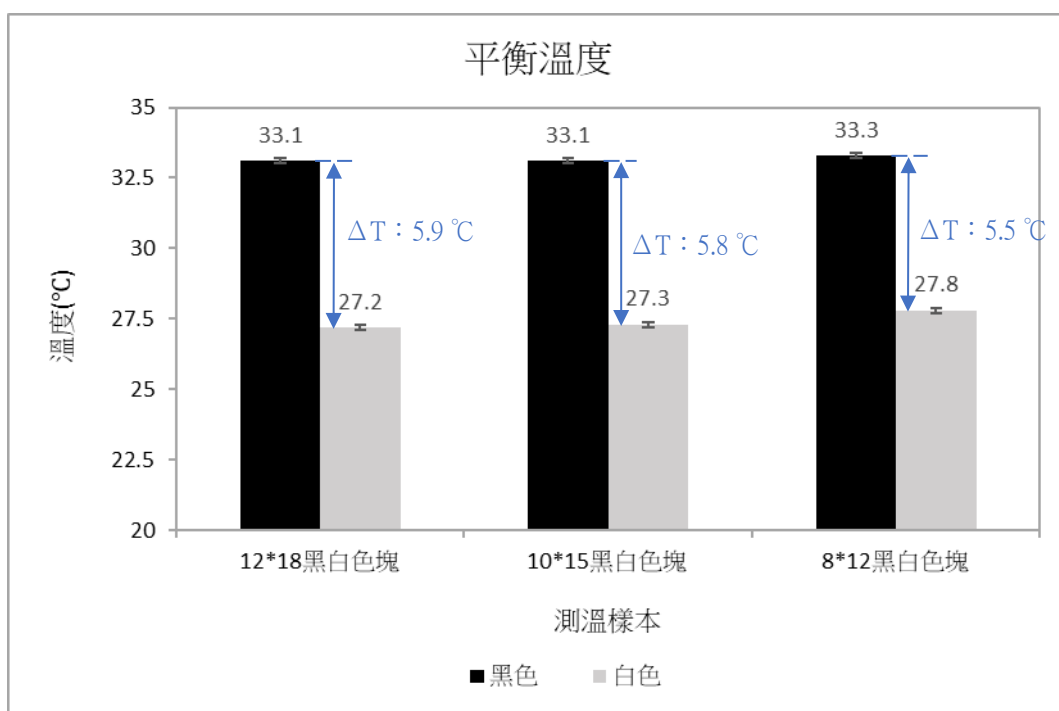
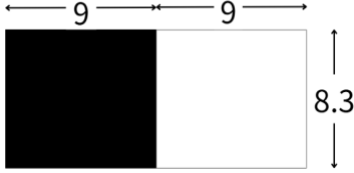
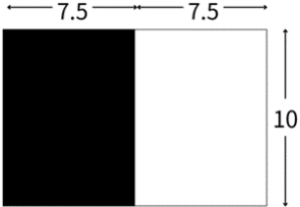
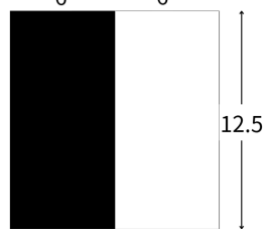


圖 9：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

四、雙色間熱傳導現象：面積相同，改變色塊接觸長度對熱傳導之影響

表 6：測溫樣本

測溫樣本			
	8.3*18 黑白色塊	10*15 黑白色塊	12.5*12 黑白色塊
溫度	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 32.9 °C 白 27.4 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.1 °C 白 27.3 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.5 °C 白 27.0 °C

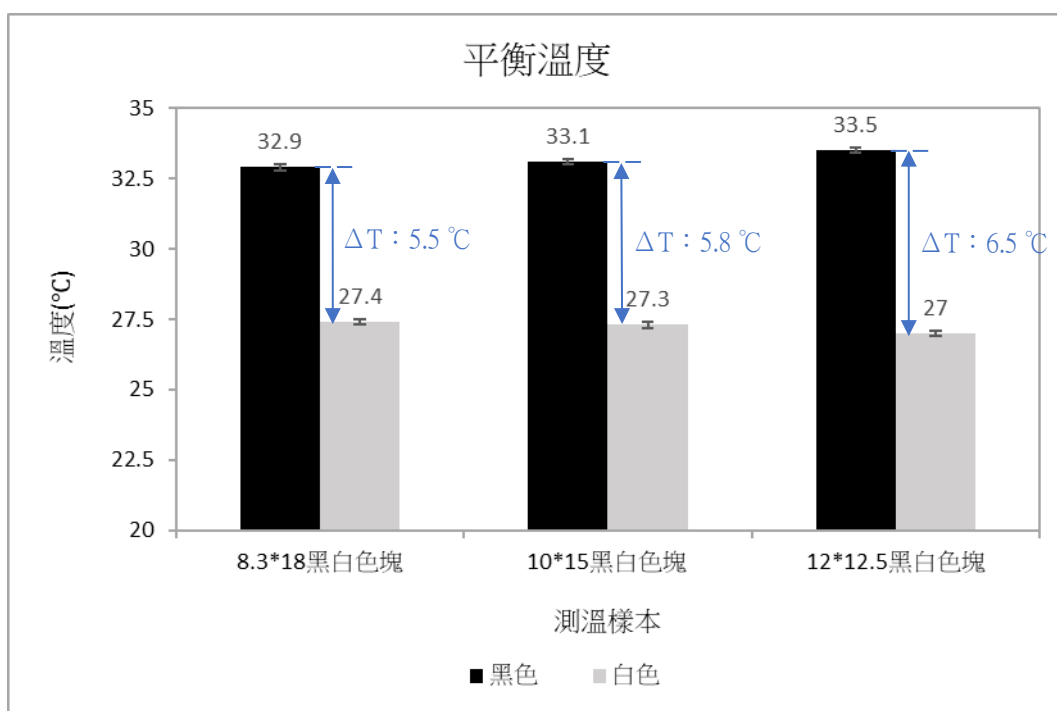
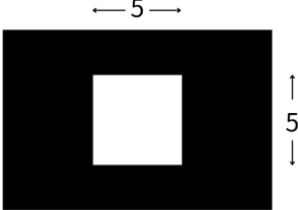
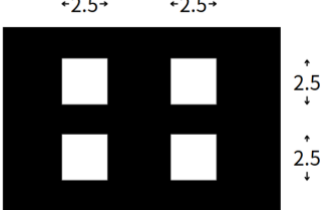


圖 10：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

五、雙色間熱傳導現象：面積相同，改變色塊接觸邊數量對熱傳導之影響

表 7：測溫樣本

測溫樣本		
	10*15 黑包大白色塊	10*15 黑包小白色塊
溫度	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 31.9 °C 白 27.7 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 32.8 °C 白 30.1 °C

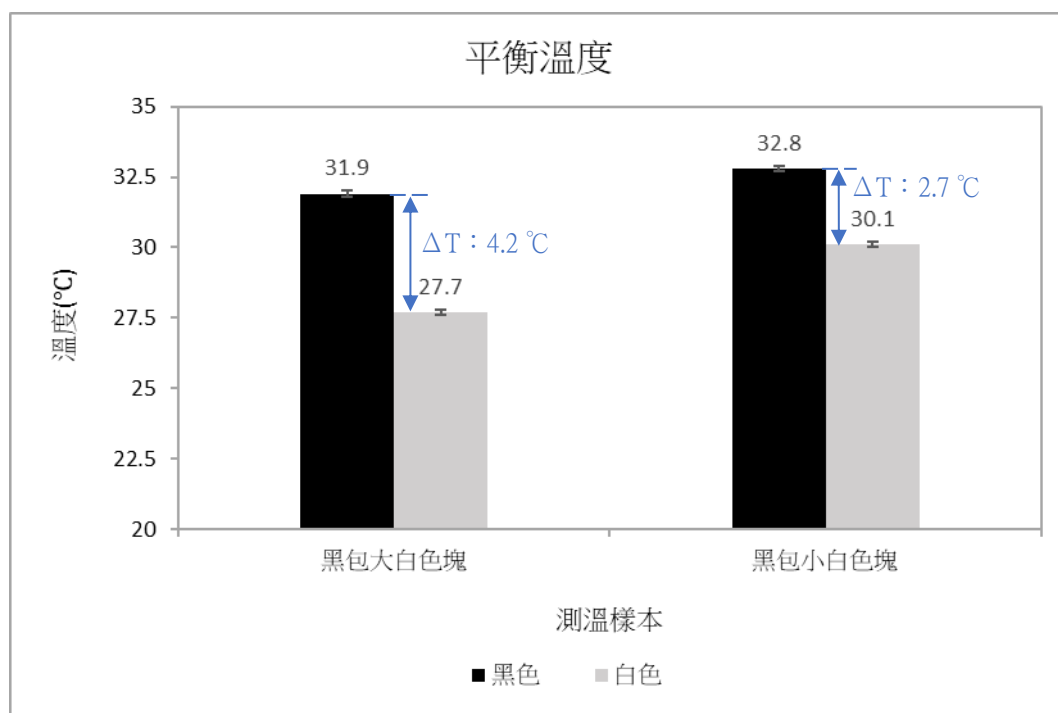





圖 11：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

六、三色間熱傳導現象：改變色塊排列對熱傳導之影響

表 8：測溫樣本

測溫樣本			
	10*15 黑橘白色塊	10*15 橘黑白色塊	10*15 黑白橘色塊
溫度	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 黑 $32.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 橘 $27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 白 $26.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 橘 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑 $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 白 $26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 黑 $32.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 白 $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 橘 $26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

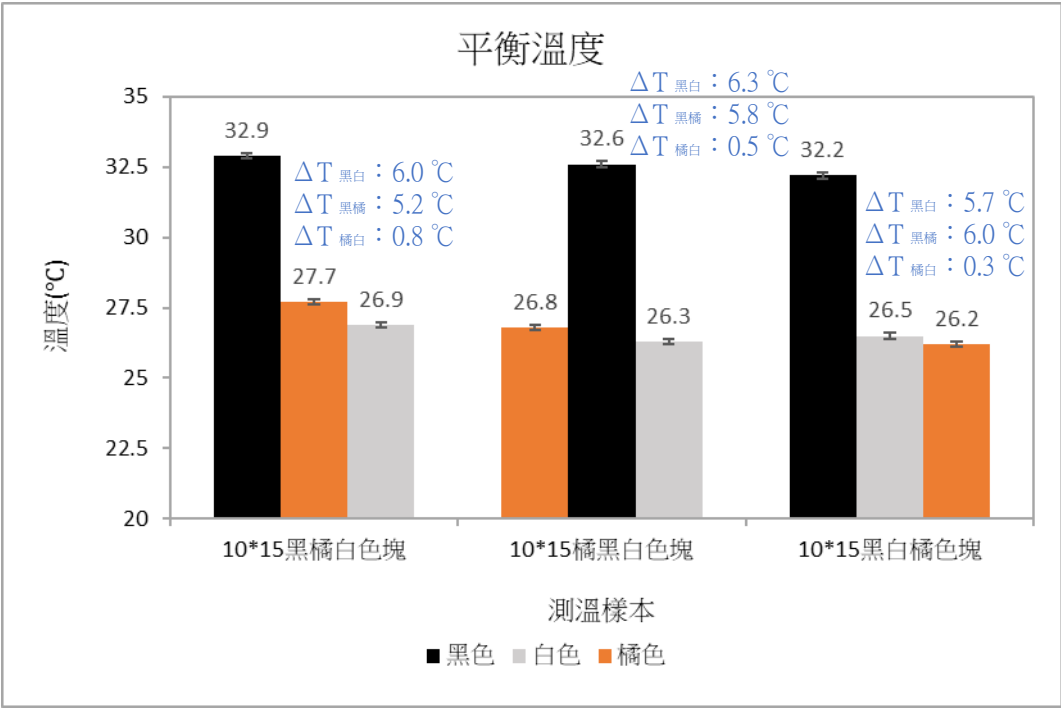
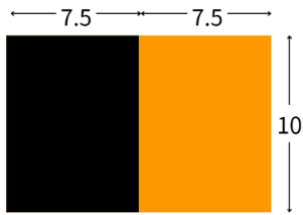
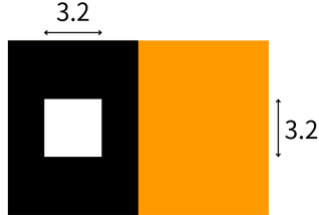
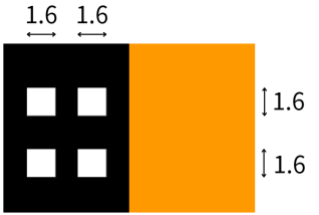


圖 12：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

七、三色間熱傳導現象：模擬蝶翅局部色斑之熱傳導情形

表 9：測溫樣本

測溫樣本			
	無白斑黑橘色塊	黑橘及一大白斑	黑橘及四小白斑
溫度	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 33.2 °C 橘 28.1 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 32.6 °C 白 28.4 °C 橘 27.0 °C	T _初 ：18.2 °C T _{平衡} ： 黑 31.9 °C 白 28.6 °C 橘 26.2 °C

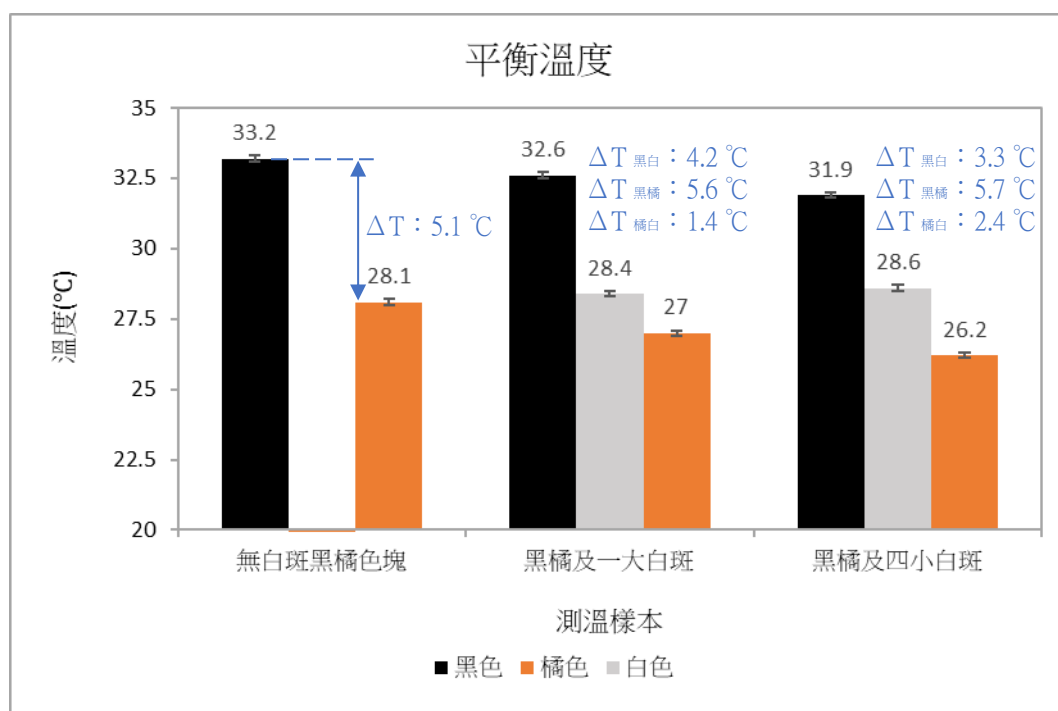


圖 13：色塊溫度長條圖（第二作者親自繪製）

八、蝶翅熱傳導機制分析

(一) 分別在蝶翅熱影像（顯色方式：Rainbow HC）外圍取 10 點、內部取 8 點，如圖 14-1、14-2 所示，測量其溫度平均。

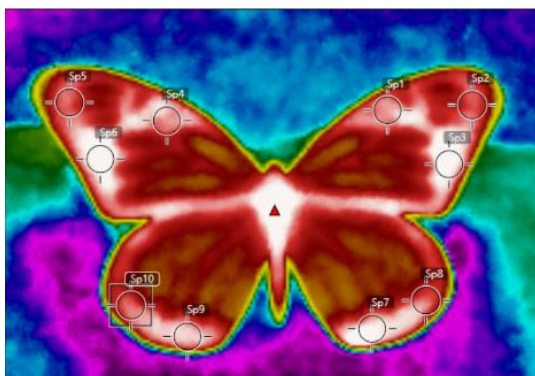


圖 14-1：外圍取點示意圖

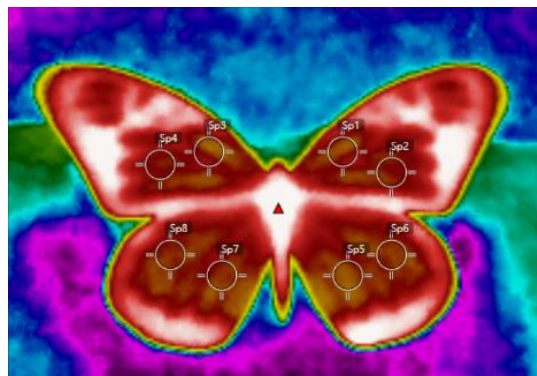


圖 14-2：內部取點示意圖

（圖源：第二作者親自拍攝及取點）

(二) 觀察其熱影像圖。

表 10：測溫樣本及熱影像（設定熱影像中高於 30 °C 之區域呈現紅色）

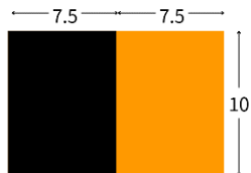
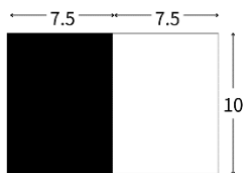
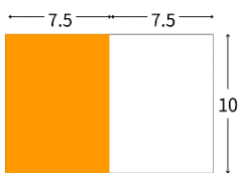
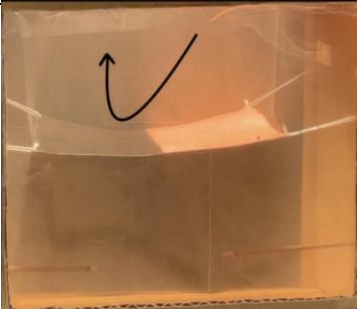
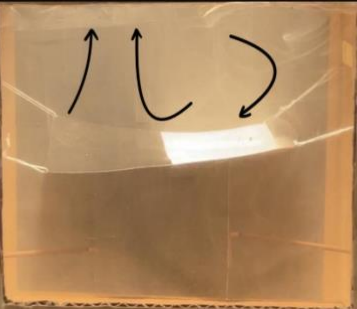
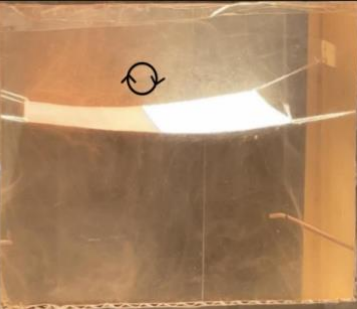
測溫樣本		
	無白斑蝶翅	有白斑蝶翅
溫度	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 外圍 $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 內部 $29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{內外} : 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{初} : 18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{平衡} :$ 外圍 $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 內部 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{內外} : 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
熱影像		

（測溫樣本圖源：Thingiverse，熱影像由第二作者親自拍攝）

九、不同色塊及蝶翅之熱對流現象探討

(一) 雙色間熱對流現象：不同顏色組合對熱對流之影響

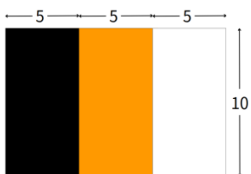


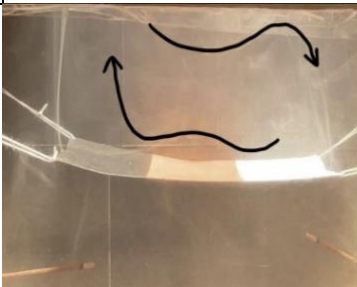
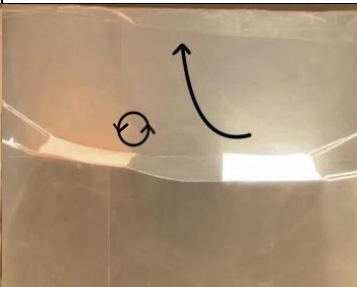

表 11：測溫樣本及對流情形

測溫樣本	10*15 黑橘色塊	10*15 黑白色塊	10*15 橘白色塊
			
對流情形			
	氣流在橘色下降、黑色上升	氣流在黑色上升、白色下降	橘白交界上空有順時針渦流

(圖源：第一作者親自拍攝)

(二) 三色間熱對流現象：改變色塊排列對熱對流之影響

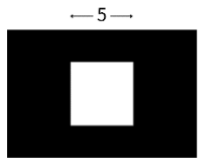
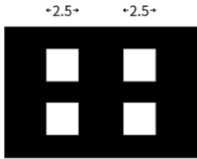
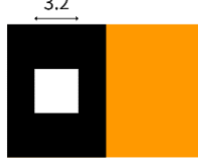
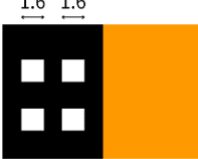


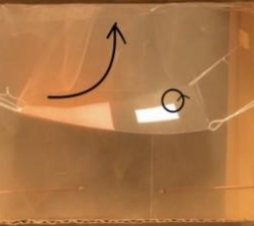

表 12：測溫樣本及對流情形

測溫樣本	10*15 黑橘白色塊	10*15 橘黑白色塊	10*15 黑白橘色塊
			
對流情形			
	氣流在橘白交界處略升，黑橘處先降後升	氣流在黑色上升，黑橘交界有順時針渦流	氣流在橘色、白色上方漸下沉，黑色上升

(圖源：第一作者親自拍攝)

(三) 雙色與三色模擬蝶翅局部色斑之熱對流情形

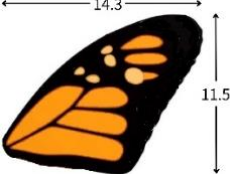
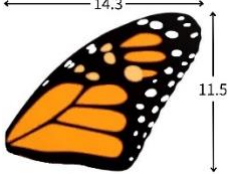
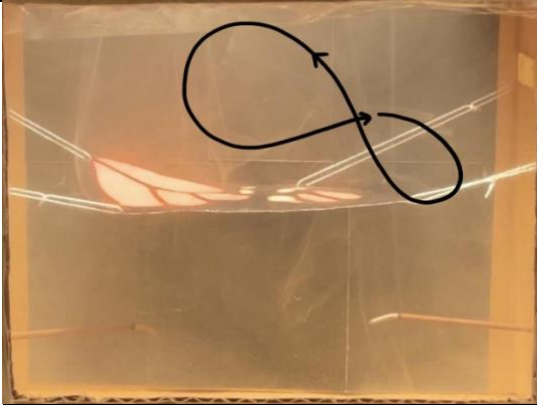
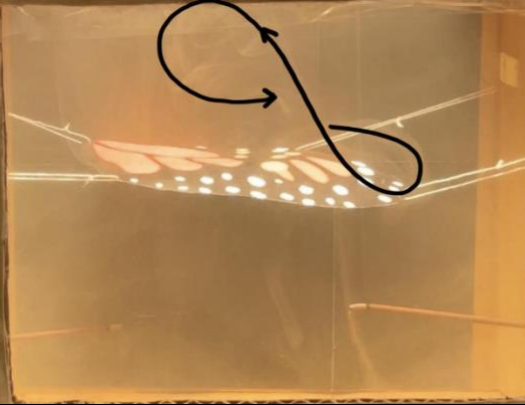
表 13：測溫樣本及對流情形

測溫樣本	10*15 黑包大白 	10*15 黑包小白 	黑橘及一大白斑 	黑橘及四小白斑 
對流情形	 氣流在黑色上升、白色下降，形成渦流	 氣流在黑色上升，黑白交界處形成渦流	 橘到黑時氣流上升，黑白交界處有逆時針渦流	 氣流在橘色下沉，黑色上升，白斑上有渦流

(圖源：第一作者親自拍攝)

(四) 蝶翅熱對流機制分析

表 14：測溫樣本及對流情形

測溫樣本	無白斑蝶右前翅 	有白斑蝶右前翅 
對流情形	 氣流在蝶翅內部與外圍間產生弱渦流（側視呈 8 字）	 氣流在蝶翅內部與外圍間產生渦流（側視呈 8 字）

(圖源：第一作者親自拍攝)

伍、討論

一、顏色熱輻射吸收能力差異探討

黑、橘、白色塊加熱後溫度分別上升至 35.0 °C、27.2 °C、25.2 °C，推知熱輻射吸收能力應為黑色>橘色>白色。而黑白、黑橘、橘白色塊溫差分別為 9.8 °C、7.8 °C、2.0 °C，為後續實驗提供對照數據。

二、雙色間熱傳導現象探討：不同顏色組合對熱傳導之影響

表 15：溫差比較

	各自存在時溫差	相鄰時溫差	溫差變化量
黑白色塊	9.8 °C	5.8 °C	-4.0 °C
黑橘色塊	7.8 °C	5.1 °C	-2.7 °C
橘白色塊	2.0 °C	0.4 °C	-1.6 °C

(一) 如表 15 所示，兩兩色塊相鄰時其溫差皆明顯小於單獨存在時，是因接觸產生的熱傳導，促使較高溫色塊的熱向低溫色塊流動，因此降低兩者溫度差。

(二) 如表 15 所示，各自存在時溫差較大者，改為相鄰後溫差的下降幅度也較大。根據傅立葉定律：物體在單位面積的熱流密度與溫度梯度（溫度隨距離的變化率）成正比，可解釋此現象。

三、雙色間熱傳導現象探討：改變色塊面積對熱傳導之影響

邊長 12 cm*18 cm、10 cm*15 cm、8 cm*12 cm 的黑白色塊加熱後，色塊溫差分別下降至 5.9 °C、5.8 °C、5.5 °C，由於熱傳導會降低色塊溫差，推測溫差越小，其熱傳導效果越佳。對照史蒂芬-波茲曼定律：

$$*P = \varepsilon \sigma T^4 A$$

由於加熱燈源、樣本材質相同，*P 值與 ε 值不變，則 $T^4 \propto 1/A$ ，即當黑色塊面積越小，其溫度上升越快，與相同面積白色塊產生較大的溫差，而使熱傳導速率越快。

四、雙色間熱傳導現象探討：面積相同，改變色塊接觸長度對熱傳導之影響

總面積不變，且黑、白面積相當，接觸邊長分別為 8.3 cm、10 cm、12.5 cm 的黑白色塊加熱後，色塊溫差分別下降至 5.5 °C、5.8 °C、6.5 °C，此結果顯示接觸邊越短，色塊間溫差越小。雖然傅立葉熱傳導定律：

$$q = -kA (\Delta T / \Delta X)$$

說明截面積越大，單位時間內通過的熱流密度越大，但在本實驗給予恆定輻射熱源的條件下，黑、白區域皆持續吸收熱量，當接觸邊長度縮小使得總傳導面積減少，非傳導邊界面積相對增加，多餘的熱便可能傾向於以對流形式逸散至環境中。又由克希荷夫輻射定律：

$$\varepsilon \text{（發射率）} = \alpha \text{（吸收率）}$$

可推測溫度較高的黑色塊逸散的熱亦較多，導致黑白色塊之間溫差下降。

五、雙色間熱傳導現象探討：面積相同，改變色塊接觸邊數量對熱傳導之影響

總面積不變，且黑、白面積相當，分別包了一個大白色塊、四個小白白色塊的黑色塊加熱後，黑白色塊溫差分別下降至 4.2 °C、2.7 °C，此結果顯示接觸邊數量越多，其熱傳導效果越佳。是因為在黑包大白色塊中，黑色塊的熱僅可由 4 個途徑傳導至白色塊，且傳導至白色塊中心路徑較長；黑包四個小白白色塊時，熱可由 16 個途徑傳導，且傳導至白色塊中心路徑較短，由討論四亦可推知小白白色塊邊長較短，熱傳導速率較快，使單位時間內白色塊可獲得的熱較多。如圖 15 所示。

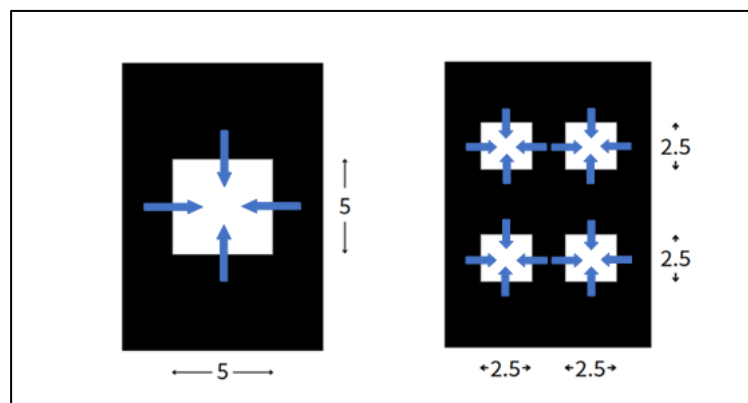


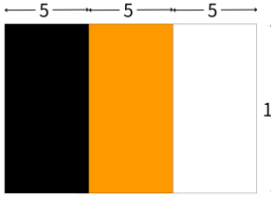
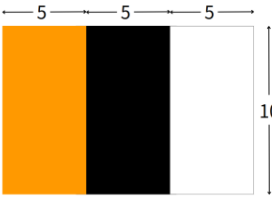

圖 15：熱傳導方向（箭頭為熱量淨傳輸方向。圖源：第二作者親自繪製）

六、三色間熱傳導現象探討：改變色塊排列對熱傳導之影響

（一）熱傳導強弱分析（以黑橘色塊溫差探討為例）：

觀察黑橘色塊於不同排列下的溫差，如表 16 所示。可見在黑橘白色塊中，溫度最高的黑色塊僅與橘色塊相鄰，因此黑橘色塊溫差為三種排列下最小；在橘黑白色塊中，黑色塊同時與橘、白色塊相鄰，熱不僅傳導至橘色塊，亦傳導至白色塊，因此黑橘溫差較大；而在黑白橘色塊中，黑橘色塊未相鄰，因此溫差最大。綜上所述，我們推論當黑色塊僅與橘色塊相鄰時，黑橘色塊間熱傳導效果最佳。

表 16：黑橘色塊於不同排列下的溫差比較

測溫樣本			
	10*15 黑橘白色塊	10*15 橘黑白色塊	10*15 黑白橘色塊
黑橘色塊位置	黑橘色塊相鄰且黑色塊在側邊	黑橘色塊相鄰且黑色塊置中	黑橘色塊未相鄰
黑橘色塊溫差	5.2 °C	5.8 °C	6.0 °C

（二）熱傳導傾向分析

在橘黑白色塊中，黑色塊同時與橘、白色塊相鄰，熱不僅傳導至橘色塊，亦傳導至白色塊。假設黑色塊總熱輸出不變，當系統由雙色塊（黑橘、黑白）變為三色塊（橘黑白）時，黑色塊需同時向白色塊與橘色塊傳遞熱量，使得分配給兩者的熱量均減少、升溫幅度均下降，因此黑白溫差與黑橘溫差皆增大。然而，黑白溫差的變化較小，顯示即使黑色塊同時向兩者傳熱，白色塊仍獲得相對較多的熱量，反映出橘黑白三色塊中黑色塊更傾向於傳熱至白色塊。

表 17：溫差比較

	雙色塊	橘黑白三色塊	溫差變化量
相鄰黑白色塊溫差	5.8 °C	6.3 °C	+0.5 °C
相鄰黑橘色塊溫差	5.1 °C	5.8 °C	+0.7 °C

七、三色間熱傳導現象探討：模擬蝶翅局部色斑之熱傳導情形

- (一) 色塊在有一大白斑、有四小白斑的情況下，黑白溫差分別為 4.2°C 、 3.3°C ，此結果顯示四小白斑與黑色塊之間傳導效果較佳。符合討論五觀點：由於傳熱途徑較多、接觸邊較短，小白色塊單位時間內可獲得的熱較多。
- (二) 色塊在無白斑、有一大白斑、有四小白斑三種不同的情況下，黑橘溫差分別為 5.1°C 、 5.6°C 、 5.7°C ，顯示當系統內的黑白熱傳導效果提升時，黑橘之間的熱傳導反而減弱。我們推測是因為黑色塊的總熱輸出固定，當其與白色塊的傳熱能力增強時，分配給橘色塊的熱量相對減少，導致黑橘溫差增加。此結果與討論六之觀點相符：當黑色塊同時與白、橘色塊接觸，黑橘色塊間溫差增加。

八、蝶翅熱傳導機制分析

比較有、無白斑蝶翅，其外圍黑色翅緣及內部橘色塊斑的溫差分別為 3.3°C 、 2.5°C ，可見在有白斑的情況下，黑橘溫差增大，符合討論七（二）觀點。此現象亦可由熱影像觀察得，比對圖 16-1、16-2，有白斑的蝶翅在外圍黑色翅緣及內部橘色塊斑間有較明顯溫度梯度。此溫度梯度可能正是導致蝶翅周圍氣流的變化而影響其飛行效率之原因。



圖 16-1：無白斑蝶翅熱影像



圖 16-2：有白斑蝶翅熱影像

(第二作者親自拍攝)(設定熱影像中高於 30°C 之區域呈現紅色)

九、不同色塊及蝶翅之熱對流現象探討

- (一) 雙色間熱對流現象：不同顏色組合對熱對流之影響

觀察黑橘、黑白、橘白色塊上方的對流情形，可見兩兩之間熱輻射吸收能力

較佳的色塊上方較高溫，使周遭空氣被加熱後因密度降低而上升，溫度較低的色塊則使氣體受熱較小，密度相對較大而下沉。因此兩種色塊同時存在時，容易在色塊交界處產生渦流，且由圖片中，黑橘、黑白上方的對流胞尺寸明顯大於橘白色塊，故推論當兩者間溫差明顯，形成的渦流範圍也較大。

（二）三色間熱對流現象：改變色塊排列對熱對流之影響

對比黑橘白、橘黑白及黑白橘色塊上方的對流情形，可觀察到氣流上升程度：黑色 > 橘色 > 白色，與顏色熱輻射吸收能力的排序相同，推知熱對流強弱與接收熱輻射後呈現的溫度呈正相關，呼應討論一及討論九（一）發現。

接著分別分析三種排列情形下的氣流行為。在黑橘白色塊中，空氣首先通過最低溫的白色塊，上升程度最低；遇到較高溫的橘色塊時氣體密度稍降，因此輕微抬升又下沉；最終在最高溫的黑色塊上方受熱明顯而浮起。橘黑白色塊中，黑白兩色交界處出現與僅有黑白色塊時相似的現象，即氣流由白向黑流動並上升；而由於黑色色塊上已存在此上升氣流，壓縮了黑橘間氣體上升的空間，所以在黑橘上方產生較小尺度的局部渦流。黑白橘色塊則因空氣從橘到白（往低溫處移動）而逐漸下沉，最後遇到最高溫的黑色塊使其上浮。

（三）雙色與三色模擬蝶翅局部色斑之熱對流情形

觀察四張圖片的對流情形，可發現在色塊交界處有上升氣流及渦流的產生。分別為黑白交界處較小的渦流、黑色上方的上升氣流，以及在黑橘包圍白斑的情形下氣流呈現自橘向黑上升的狀況。這些結果皆符合前述兩點對於不同顏色產生的熱對流情形之探討，支持色塊的相異配置對氣體運動有明確影響，亦提供對於蝶翅更清晰的局部氣流觀察。

（四）蝶翅熱對流機制分析

在無白斑右前翅圖形中，流經蝶翅表面的氣流在黑色上方上升，行經右上角橘色部分時有所降溫而下沉，轉彎後再次遇到邊緣黑色高溫而浮起，最後在左下角的大面積橘斑顯著下降，形成從側視角度觀察到的 8 字渦流。對比有白斑者，蝶翅上亦有相似的氣流出現，氣體流動的產生原因也大致相同，但觀察氣流的整

體狀態，可發現在無白斑時，整體的氣流結構較為鬆散、混亂，不夠明顯而集中；相比之下，有白斑的蝶翅周圍有更清晰可見且穩定的氣流。對照討論八對於蝶翅熱傳導機制分析及討論九（一）中溫差明顯能形成更旺盛對流的觀點，有白斑的帝王斑蝶照光後溫度梯度及熱對流效果皆較無白斑者明顯，因此，我們認為白斑可造成更為顯著的溫度差，藉此強化原有的渦流，提升此氣流對帝王斑蝶的影響，進而達到飛行效果上的助益。

雖然本研究未實際以動態模擬蝴蝶的運動，尚無法明確驗證此種 8 字渦流對於帝王斑蝶的實質影響力，但透過觀察文獻回顧（三）中所提及三種氣流影響飛行之實例後，我們合理推測此渦流具有導引氣流、提升飛行效益的潛力，並已初步證明 Davis et al.（2023）在文獻中所提之白斑可能造成空氣動力學上的差異而影響飛行效率，同時為未來於流體力學方面探討氣流如何為帝王斑蝶提升助益奠定基礎。

陸、結論

- 一、顏色吸收熱輻射的能力不同，其吸熱後溫差會導致相鄰兩色塊之間產生熱傳導及熱對流現象。
- 二、色塊總面積與熱傳導效果呈負相關。
- 三、接觸邊越短，理論上會增強熱傳導，但受散熱面積影響，亦可能出現接觸邊越短，色塊間溫差越小的現象。
- 四、接觸邊數量與熱傳導效果呈正相關。
- 五、當高溫色塊同時與兩色塊相鄰時，熱能分散傳導會造成兩兩溫差上升。其中在橘黑白三色塊中，黑色更傾向於將熱傳導至白色色塊而非橘色色塊。
- 六、模擬蝶翅局部色斑圖形展現了具有白斑時，黑色塊與橘色塊溫差明顯較大。此現象亦可在蝶翅圖形上觀察到，蝶翅外緣及內部形成的溫度梯度可能導致蝶翅周圍氣流的變化，從而影響其飛行效率。
- 七、氣流易上升程度與熱輻射吸收效果呈正相關，且接觸的兩色塊間溫差越大，形成的渦流也越大。
- 八、在帝王斑蝶蝶翅中可觀察到有白斑者氣流的強度較無白斑者高。推測白斑的存在可能正是增加溫度梯度，進而強化氣流，提升帝王斑蝶飛行過程中空氣動力學助益的因素。
- 九、未來展望：我們希望能更深入探討氣流方面，以有限元素法（FEM）完善對於帝王斑蝶蝶翅上的熱傳輸機制研究，了解白斑所加強氣流具體為其帶來的幫助。

柒、參考文獻資料

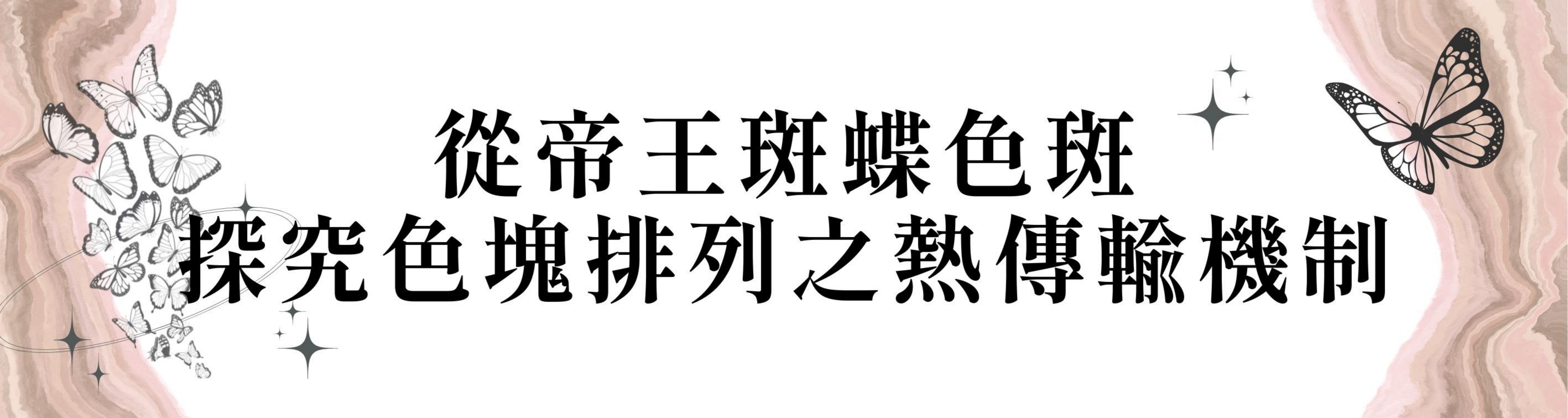
- 一、Davis, A. K., Herkenhoff, B., Vu, C., Barriga, P. A., & Hassanalain M. (2023). How the monarch got its spots: Long-distance migration selects for larger white spots on monarch butterfly wings. *PLOS One*.

- 二、Britannica. (2024, December 19). *monarch butterfly*. Britannica.
<https://www.britannica.com/animal/monarch-butterfly>
- 三、Johnson, A., McGinnis, E., & Knodel, J. (2023, June). *The Monarch Butterfly Part 1 - Migration and Life Cycle*. North Dakota State University.
<https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/monarch-butterfly-part-1-migration-and-life-cycle>
- 四、Hassanalain, M., Pellerito, V., Sedaghat, A., Sabri, F., Borvayeh, L., & Sadeghi, S. (2019). Aerodynamics loads variations of wings with novel heating of top surface: Bioinspiration and experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- 五、洪宥靖、黃冠霖、鍾芳志（2013）。黑與白的邂逅--探討黑條紋與白條紋升溫降溫的變化。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。
- 六、廖冠翔、陳光祥、蕭景文（2008）。光風車性質之相關研究。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會。
- 七、Wilkins, P. C., & Knowles, K. (2009). The leading-edge vortex and aerodynamics of insect-based flapping-wing micro air vehicles. *The Aeronautical Journal*, 113(1142), 253 – 262.
doi:10.1017/S000192400000292X
- 八、Shyy, W., Kang, C. K., Chirarattananon, P., Ravi, S., & Liu, H. (2016). Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight. *Proceedings. Mathematical, physical, and engineering sciences*, 472(2186), 20150712.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0712>
- 九、Bomphrey, R. J., Nakata, T., Phillips, N., & Walker, S. M. (2017). Smart wing rotation and trailing-edge vortices enable high frequency mosquito flight. *Nature*, 544(7648), 92 – 95.
<https://doi.org/10.1038/nature21727>

【評語】 051821

本作品選題靈感來自自然界的帝王斑蝶，結合色彩排列與熱傳輸現象，兼具生物學與物理學意涵，題材富有跨領域特色，且研究架構清晰嚴謹，從熱輻射、熱傳導到熱對流，逐步深入探索不同顏色及幾何配置對熱傳輸機制的影響。唯數據統計層次可再強化：目前溫度數據多為單次量測結果，若能納入標準差、信賴區間等基本統計量，將使結果更具說服力。另外，在不同色塊相鄰的實驗中，輻射現象仍是一直有的，傳導所扮演的角色應再深入重新探討。

作品海報



從帝王斑蝶色斑 探究色塊排列之熱傳輸機制

摘要

本研究以帝王斑蝶色斑為發想，探討不同顏色與幾何圖形配置對熱傳輸機制的影響。實驗以鹵素燈模擬輻射熱源、熱像儀量測溫度分布，再以自製密閉觀察箱觀察樣本周遭氣流，分析輻射、傳導及對流的交互作用。結果顯示，黑色吸熱效率最高，與白或橘色塊接觸時，熱傳導效應使溫差降低，尤其色塊面積小、接觸邊數量多會增強熱傳導速率，接觸邊短時，多餘的熱傾向於逸散至環境中，使色塊間溫差下降更顯著。氣流上升則隨顏色吸熱效果提升而旺盛。研究支持顏色與幾何配置對熱量流動有重要影響，進一步推測帝王斑蝶白斑的分布擴大了蝶翅外緣與內部溫差，導致周遭氣流的增強。未來我們期待透過軟體模擬，完善對於帝王斑蝶蝶翅熱傳輸機制的整合與應用探索。

壹、前言

一、研究動機

近期的研究已發現擁有較多白斑的帝王斑蝶飛行距離較遠（Davis et al., 2023），該研究團隊推測，這些斑點可能透過造成蝶翅上的溫度差，影響周遭氣流的流動，從而提升飛行效率。此研究僅就統計分析的結果提出假設，目前亦尚無研究進行進一步的實驗驗證，但我們查閱文獻後發現自然界中確實存在類似現象，如斑馬、信天翁都因體表顏色吸熱效果不同而獲得益處。因此，我們決定透過深入探討顏色排列對熱傳輸的影響，了解白斑在熱傳輸機制中的角色，並探究其可能對飛行帶來的影響。



圖1：帝王斑蝶（維基百科）

二、研究目的

- （一） 探討顏色熱輻射吸收能力差異。
- （二） 探討雙色間的熱傳導現象。
（各組操縱變因：顏色組合、色塊面積、色塊接觸長度、色塊接觸邊數量）
- （三） 探討三色間的熱傳導現象。
1. 改變色塊排列對熱傳導之影響。
2. 模擬蝶翅局部色斑之熱傳導情形。
- （四） 分析蝶翅熱傳導機制。
- （五） 不同色塊及蝶翅之熱對流現象探討。
1. 不同色塊排列時熱對流之差異。
2. 模擬蝶翅局部色斑、蝶翅之熱對流情形。

三、文獻回顧

- （一） 帝王斑蝶遷徙與色斑的關聯
比較夏季繁殖期間與越冬時斑紋的比例，黑與白的面積佔比在後者中分別降低、提高3%。研究者認為導致此結果的原因可能是因為斑點造成翅膀邊緣的氣流變化，如微渦流能降低阻力，使其飛行更有效率。
- （二） 熱學理論
1. 史蒂芬-波茲曼定律： $P = \epsilon \sigma T^4 A$
2. 克希荷夫輻射定律： $\epsilon = \alpha$
3. 傅立葉熱傳導定律： $q = -kA(\Delta T/\Delta X)$

貳、研究設備及器材

一、硬體

- 熱像儀（型號：FLIR Ex+）
- 鹵素探照燈（110V，300W）
- 支架 1組、基座（紙質）1組
- 測溫樣本 21 張
- 手機計時器（照光 3 分鐘）
- 自製密閉觀測箱（含黑色背景紙、透明觀察窗、線香）

二、軟體

- Flir tools（熱影像分析軟體）

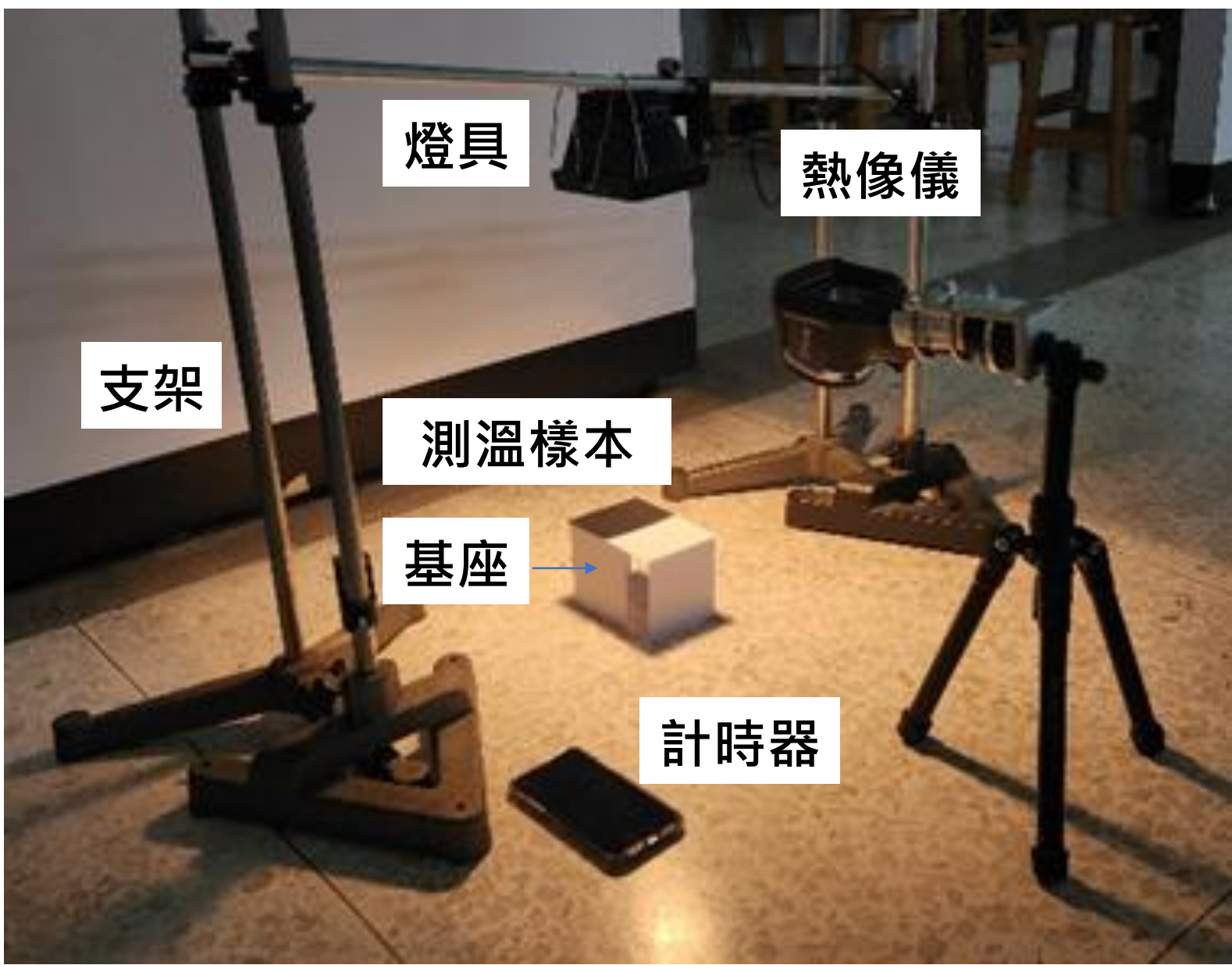


圖2-1：熱傳導實驗裝置
（第二作者拍攝）

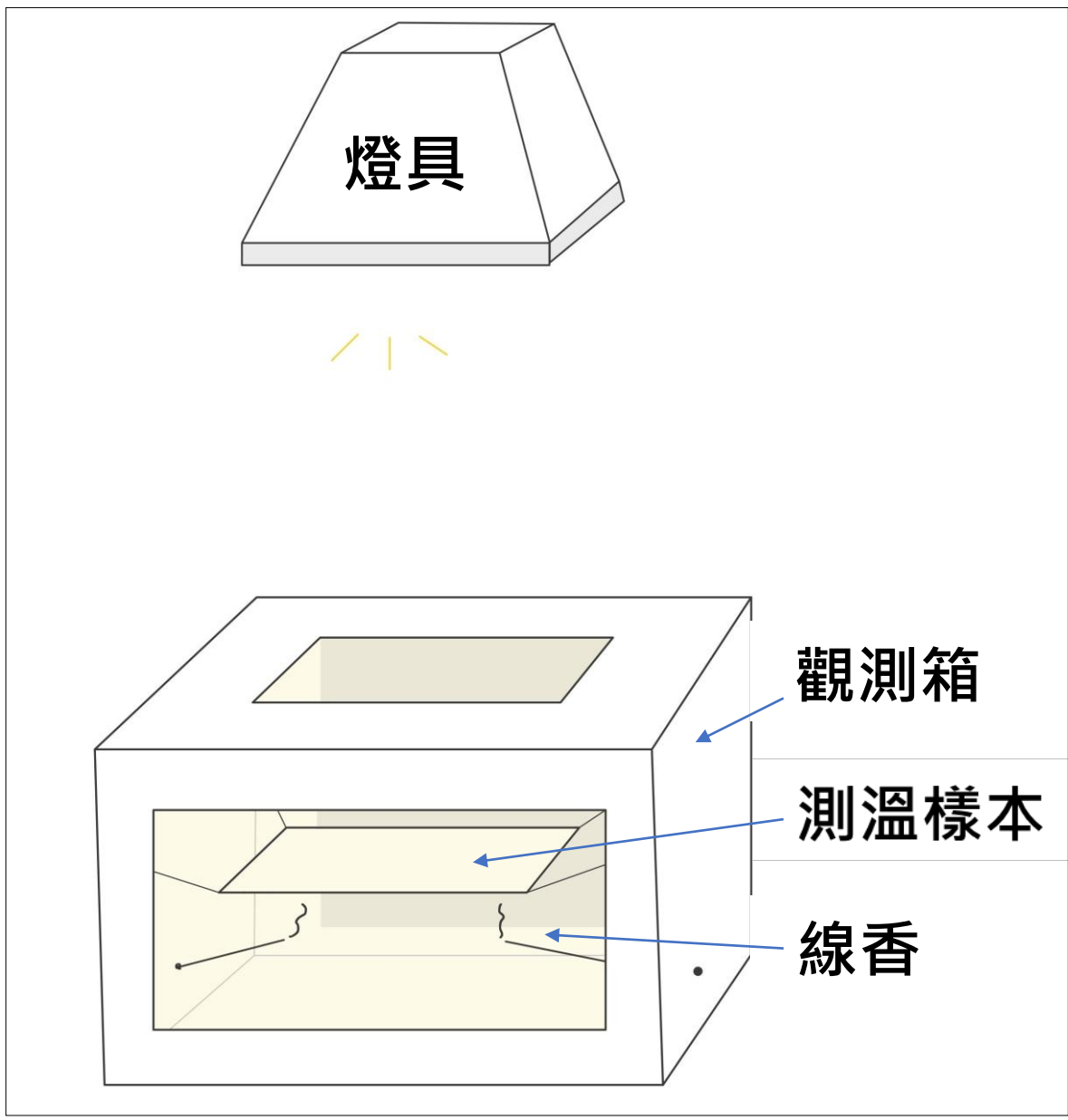


圖2-2：熱對流實驗裝置
（第一作者繪製）

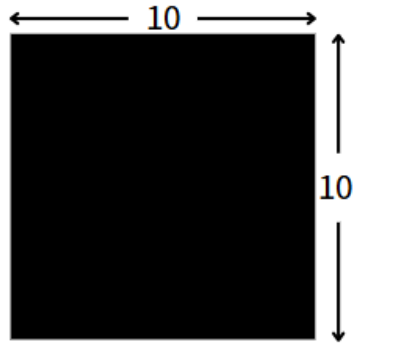
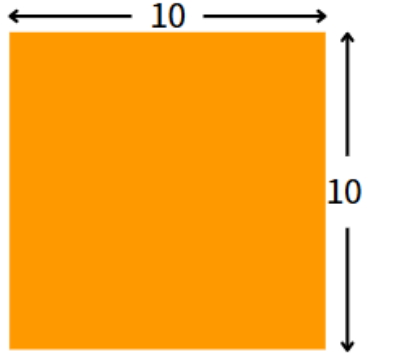
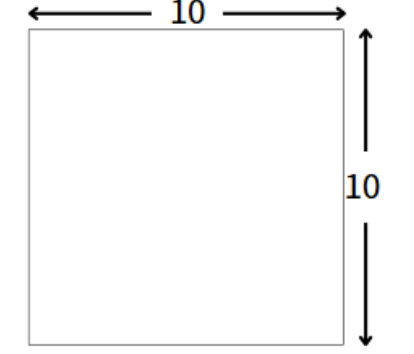
參、研究過程及方法



圖3：實驗流程圖（第一作者繪製）

一、顏色熱輻射吸收能力差異

表一、測溫樣本（以下各測溫樣本、長條圖皆由第二作者繪製）

測溫樣本	10*10黑色塊	10*10橘色塊	10*10白色塊
			
平衡溫度 T _初 ：18.2℃	35.0℃	27.2℃	25.2℃

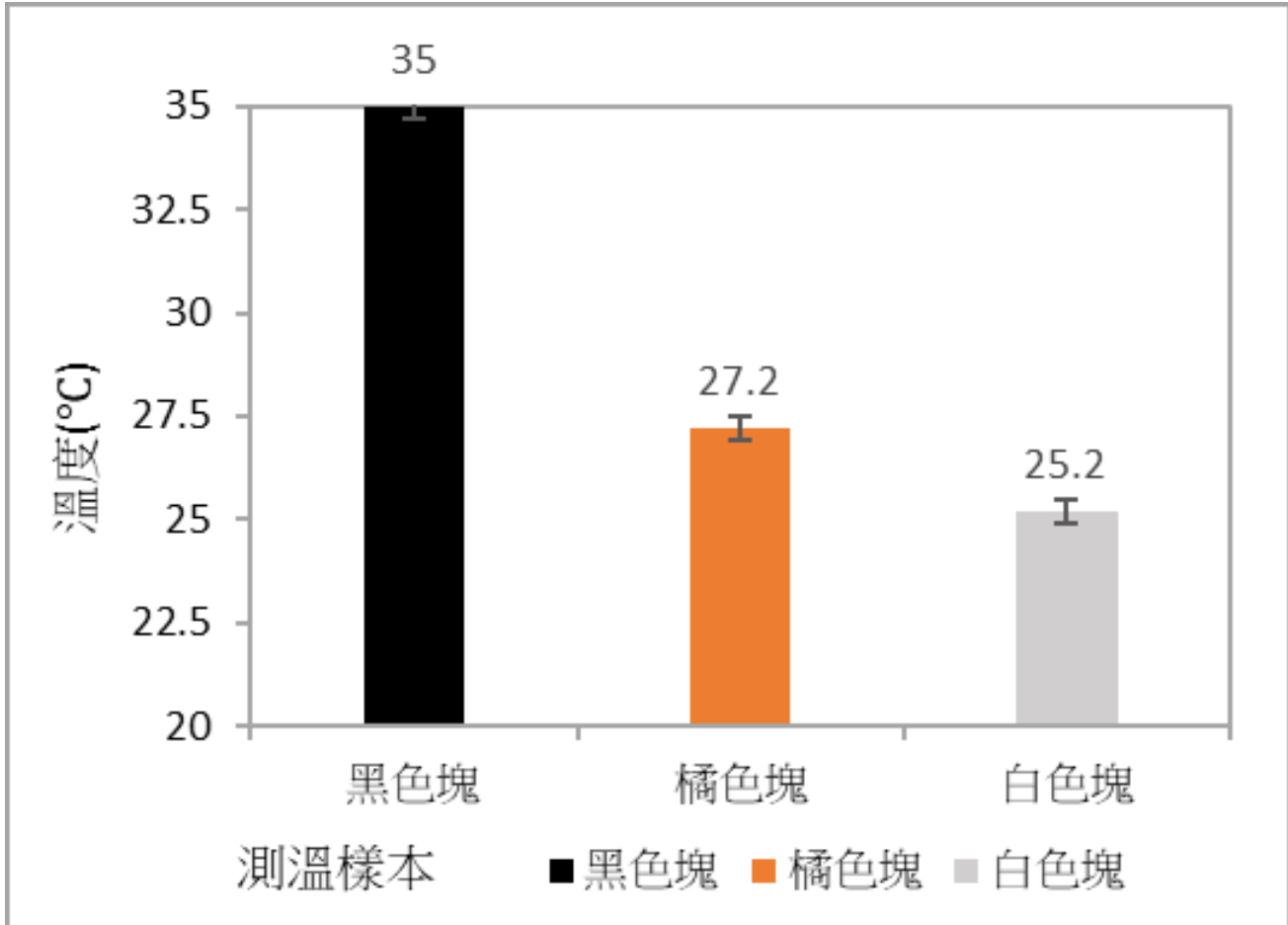
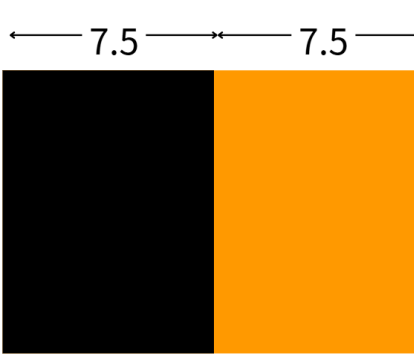
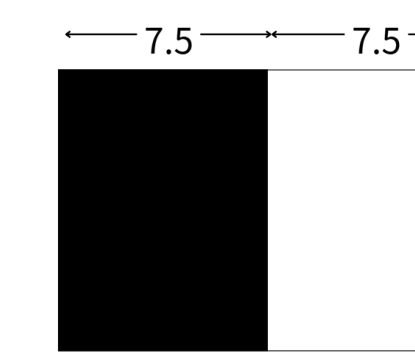
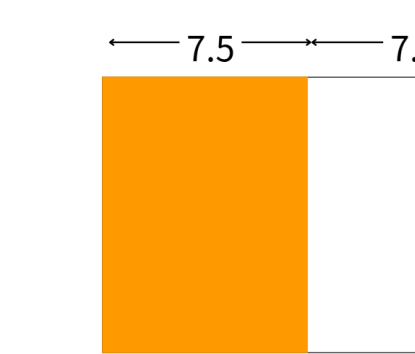


圖4：色塊溫度長條圖
由圖推知熱輻射吸收能力為黑色>橘色>白色。而黑白、黑橘、橘白色塊溫差分別為9.8℃、7.8℃、2.0℃，提供對照數據。

二、雙色間熱傳導現象：不同顏色組合

表二、測溫樣本

測溫樣本	10*15黑橘色塊	10*15黑白色塊	10*15橘白色塊
			
色塊溫差	ΔT _{黑橘} ：5.1℃	ΔT _{黑白} ：5.8℃	ΔT _{橘白} ：0.4℃

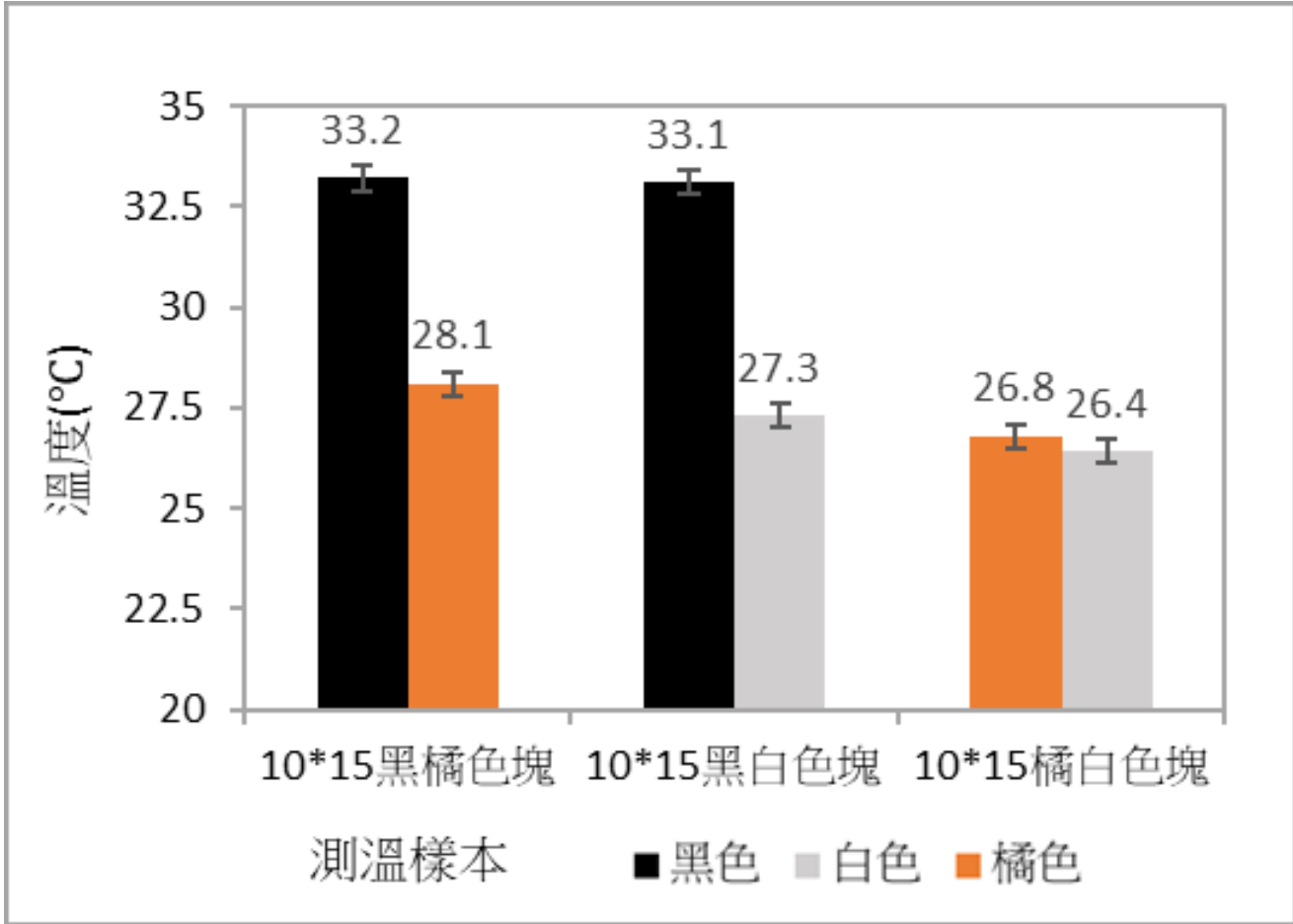
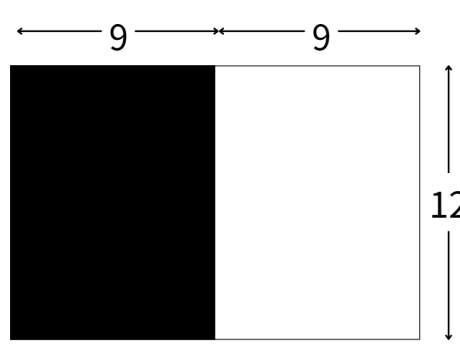
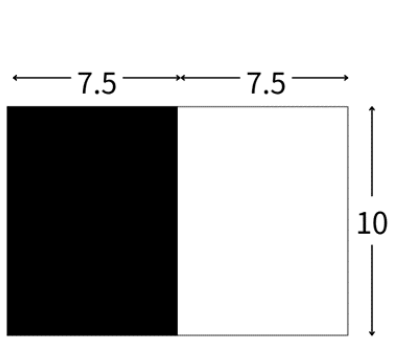
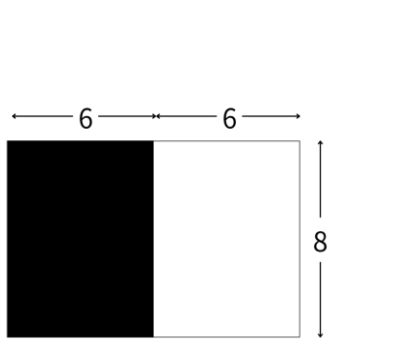


圖5：色塊溫度長條圖
與單獨存在時相較，接觸產生的熱傳導降低兩兩相鄰色塊間的溫差，且兩物體間熱傳導速率與其溫差成正比，此符合傅立葉定律。

三、雙色間熱傳導現象：改變色塊面積

表三、測溫樣本

測溫樣本	12*18黑白色塊	10*15黑白色塊	8*12黑白色塊
			
色塊溫差	ΔT _{黑白} ：5.9℃	ΔT _{黑白} ：5.8℃	ΔT _{黑白} ：5.5℃

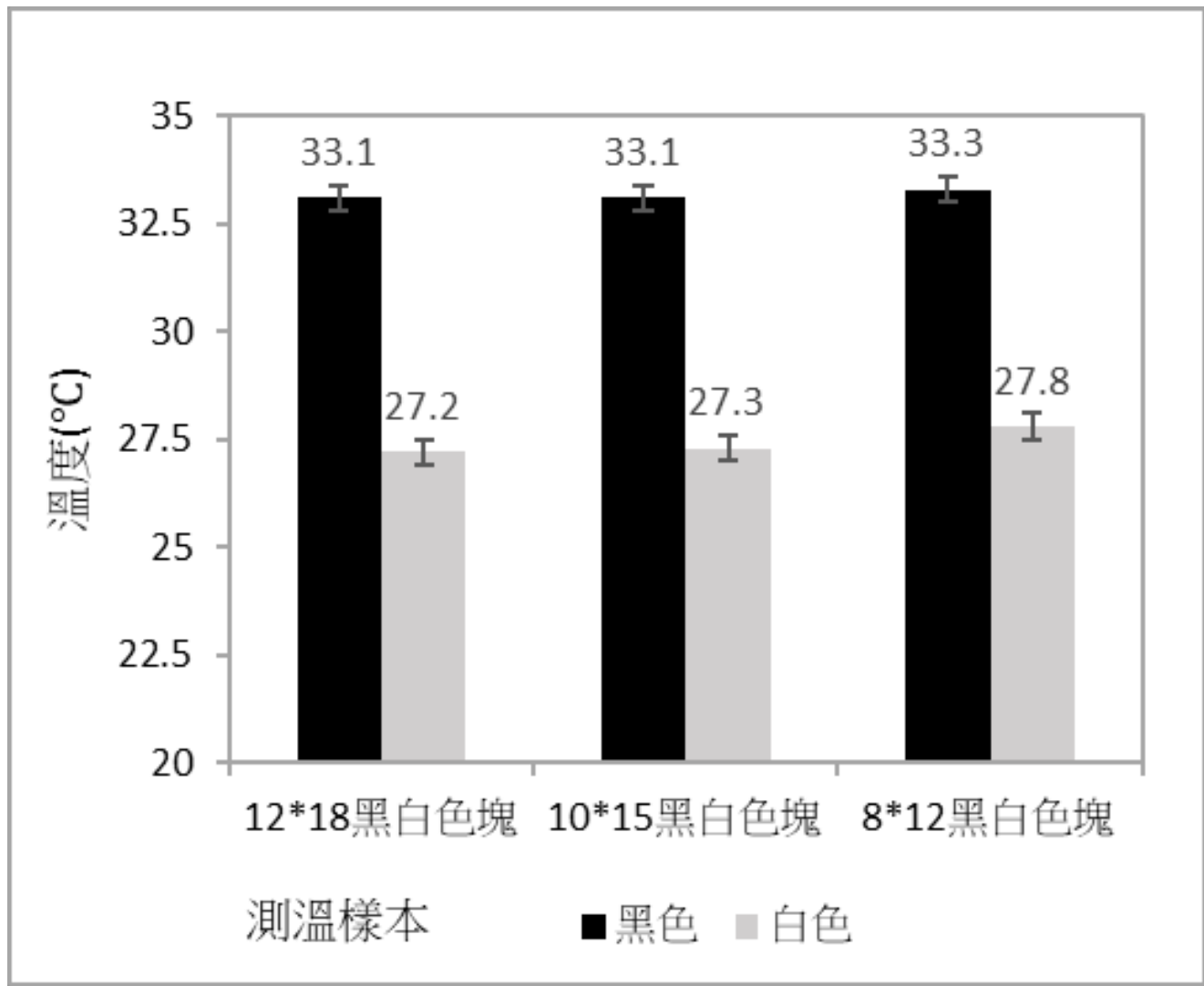
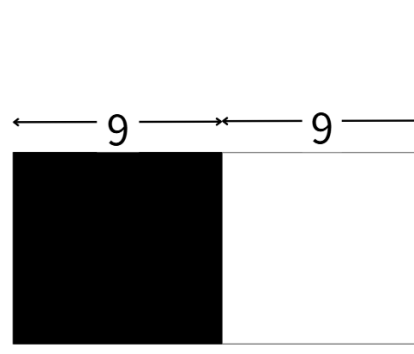
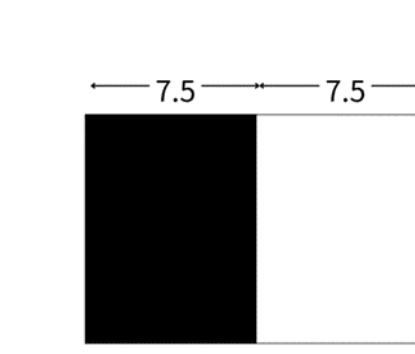
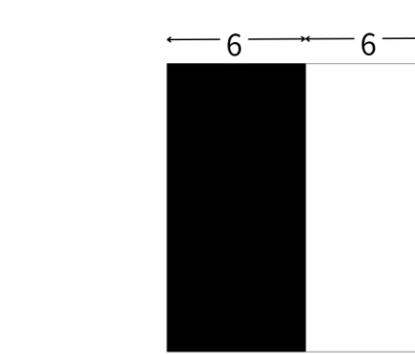


圖6：色塊溫度長條圖
將結果對照史蒂芬-波茲曼定律，**P*值與ε值不變，則 $T^4 \propto 1/A$ ，即黑色塊面積越小，其溫度上升越快，與相同面積白色塊的溫差越大，而使熱傳導速率越快。

四、雙色間熱傳導現象：改變色塊接觸長度

表四、測溫樣本

測溫樣本	8.3*18黑白色塊	10*15黑白色塊	12.5*12黑白色塊
			
色塊溫差	ΔT _{黑白} ：5.5℃	ΔT _{黑白} ：5.8℃	ΔT _{黑白} ：6.5℃

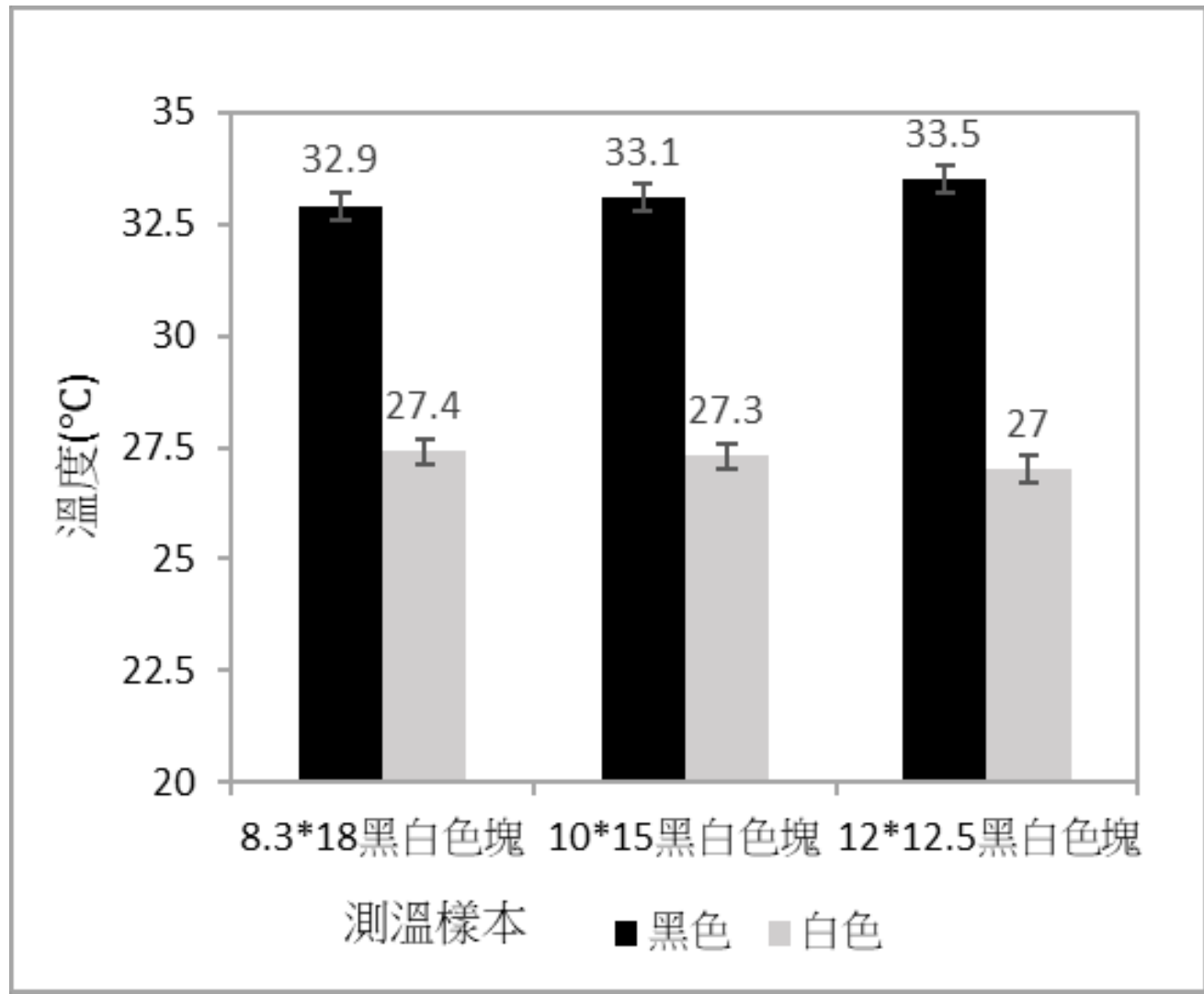
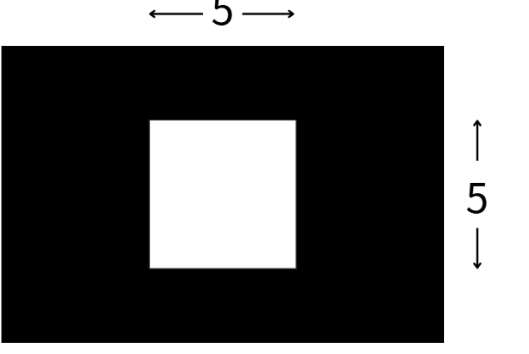
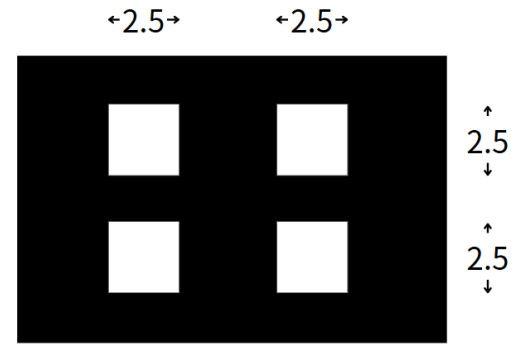


圖7：色塊溫度長條圖
黑白面積相同，雖然傅立葉定律指出接觸截面積越大熱傳導效率越高，但在持續加熱下，多餘的熱可能傾向於以對流形式散逸。根據克希荷夫定律，黑色塊會輻射出更多的熱，促使黑白色塊間的溫差減小。

五、雙色間熱傳導現象：改變接觸邊數量

表五、測溫樣本

測溫樣本	10*15黑包大白色塊	10*15黑包小白色塊
		
色塊溫差	ΔT _{黑白} ：4.2℃	ΔT _{黑白} ：2.7℃

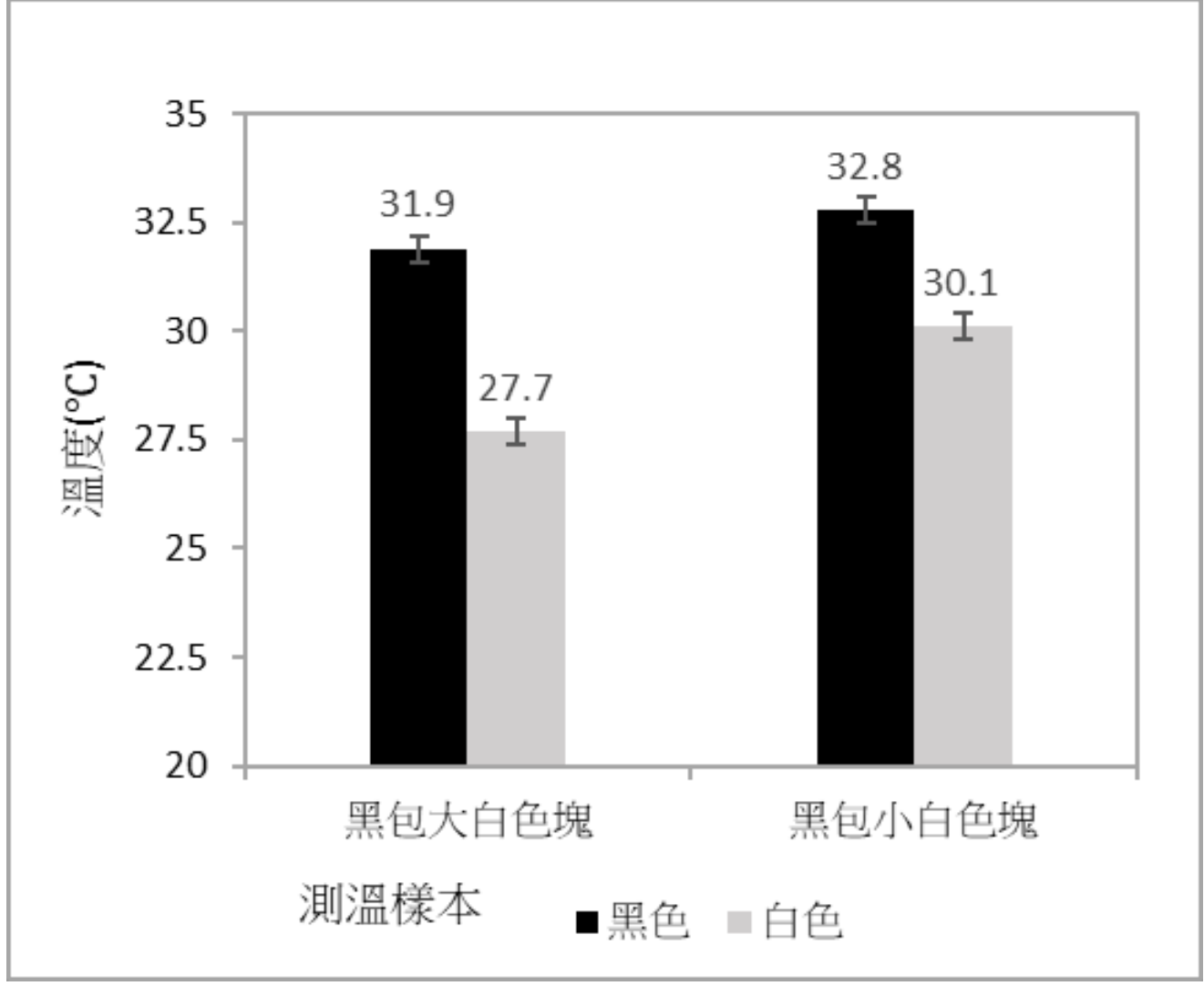
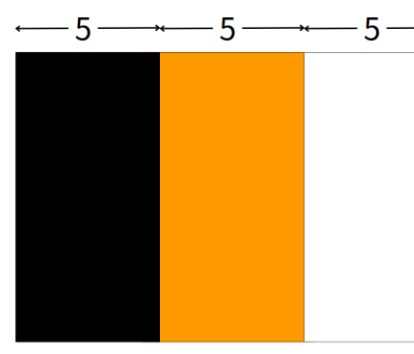
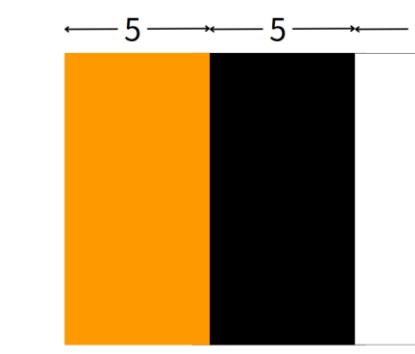
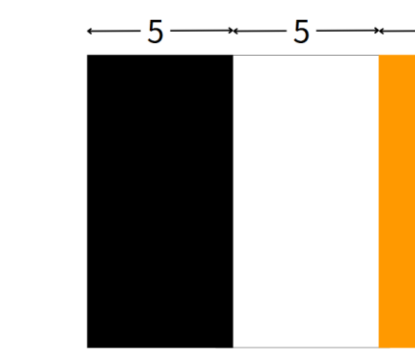


圖8：色塊溫度長條圖
熱傳導途徑較多者，其黑色塊的熱傳導至白色塊中心路徑較短，推測接觸邊數量越多，其熱傳導效果越佳。

六、三色間熱傳導現象：改變色塊排列

表六、測溫樣本

測溫樣本	10*15黑橘白色塊	10*15橘黑白色塊	10*15黑白橘色塊
			
色塊溫差	ΔT _{黑橘} ：5.2℃ ΔT _{橘白} ：0.8℃	ΔT _{橘黑} ：5.8℃ ΔT _{黑白} ：6.3℃	ΔT _{黑白} ：5.7℃ ΔT _{白橘} ：0.3℃

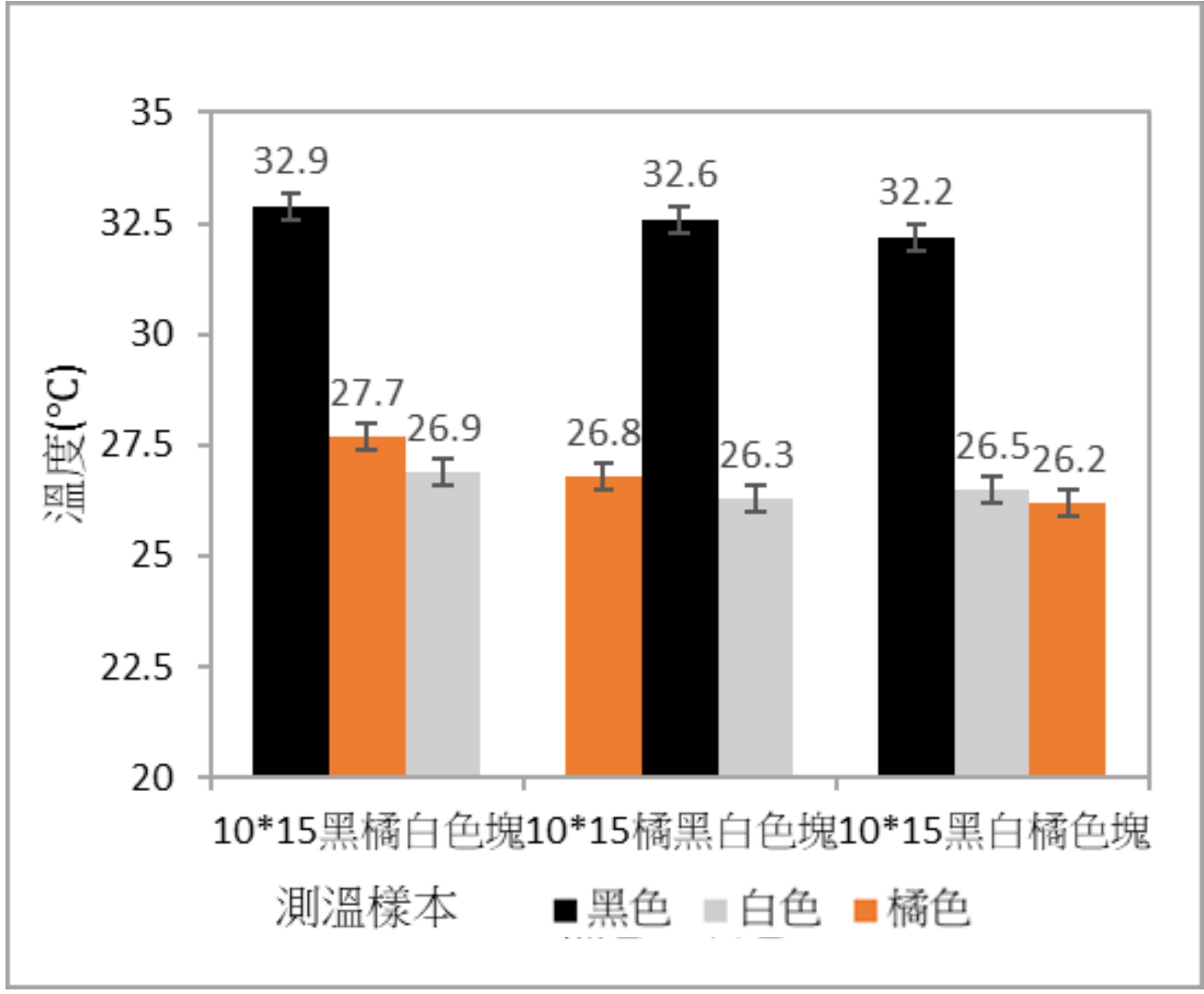
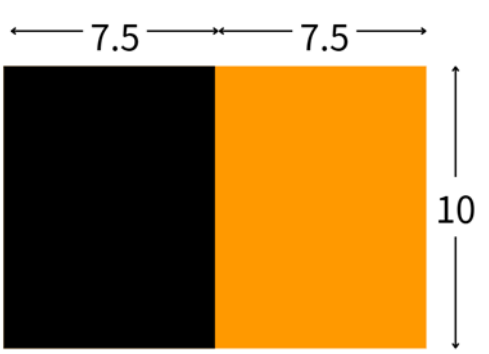
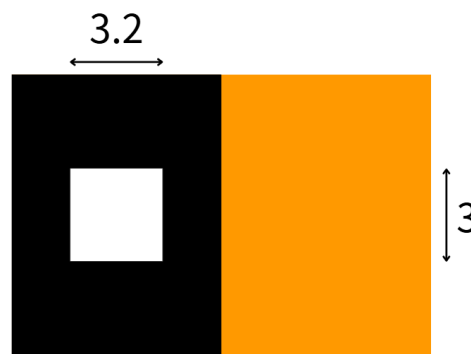
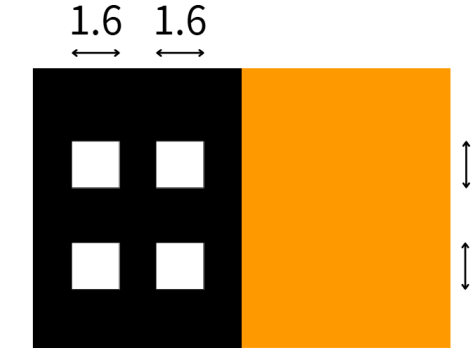


圖9：色塊溫度長條圖
以橘黑白色塊為例，其中黑色塊熱量向白色與橘色方向傳遞，因此黑橘、黑白溫差皆有所上升，然而黑白溫差增加較小，反映此排列中黑色塊更傾向傳熱至白色塊。

七、三色間熱傳導現象：模擬蝶翅局部色斑

表七、測溫樣本

測溫樣本	無白斑黑橘色塊	黑橘及一大白斑	黑橘及四小白斑
			
色塊溫差	ΔT _{黑橘} ：5.1℃	ΔT _{黑白} ：4.2℃ ΔT _{黑橘} ：5.6℃	ΔT _{黑白} ：3.3℃ ΔT _{黑橘} ：5.7℃

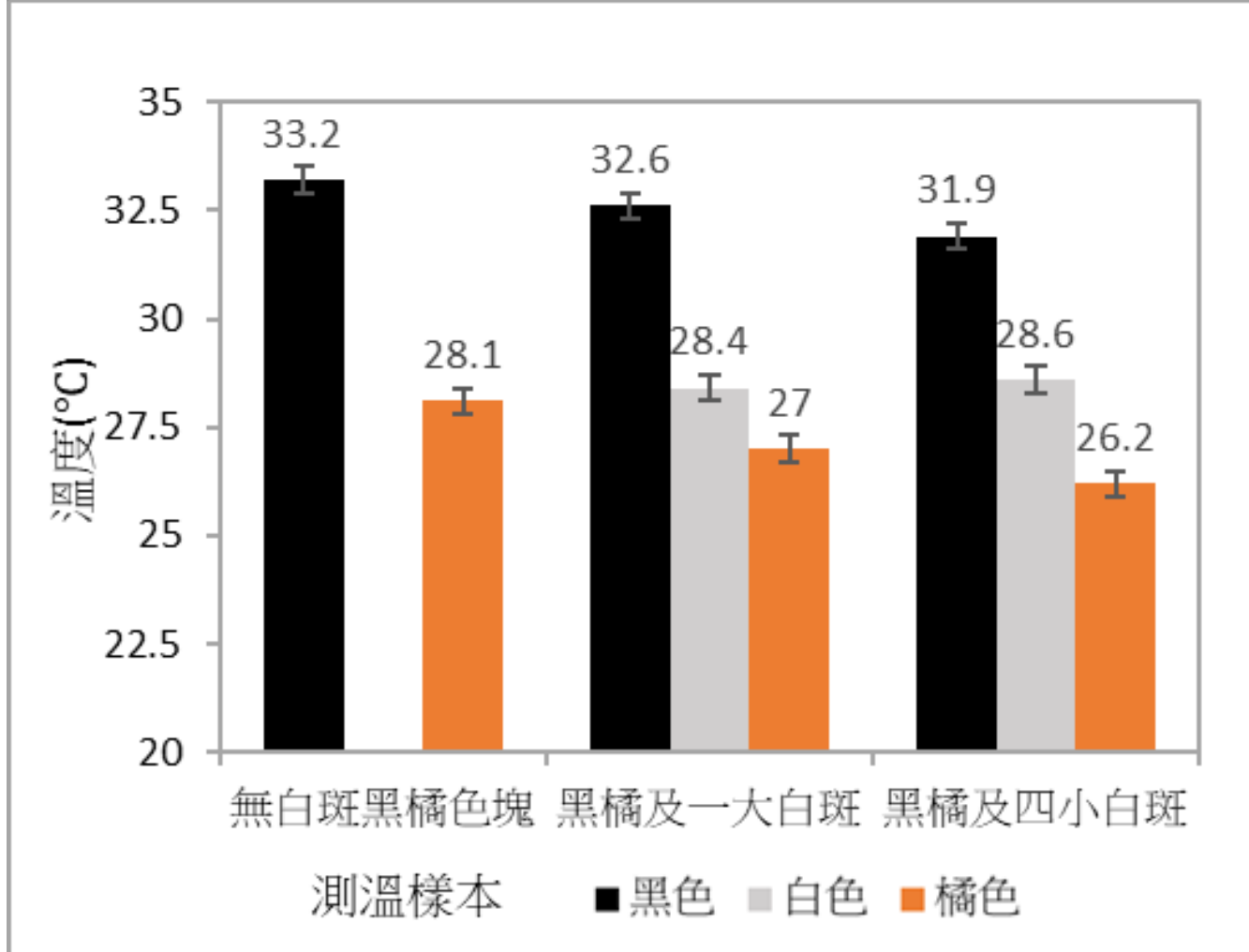


圖10：色塊溫度長條圖
四小白斑與黑色塊之間傳導效果較佳，符合討論五觀點；黑白的傳熱效果增強時，分配給橘色塊的熱量相對減少，導致黑橘溫差增加，符合討論六觀點。

八、 蝶翅熱傳導機制分析

表八、測溫樣本及其熱影像 (第二作者繪製及拍攝)

測溫樣本	<div>無白斑蝶翅</div>	無白斑蝶翅熱影像	<div>有白斑蝶翅</div>	有白斑蝶翅熱影像
平衡溫度 T _初 ：18.2 °C	外圍31.8 °C 內部29.3 °C $\Delta T_{\text{內外}}：2.5\text{ °C}$		外圍31.8 °C 內部28.5 °C $\Delta T_{\text{內外}}：3.3\text{ °C}$	

比較無白斑、有白斑蝶翅，可見在有白斑的情況下，黑橘溫差增大，符合討論七觀點。此現象亦可比對兩者之熱影像而觀察得，有白斑的蝶翅在外圍黑色翅緣及內部橘色塊斑間有較明顯溫度梯度。此溫度梯度可能正是導致蝶翅周圍氣流的變化而影響其飛行效率之原因。

九、 不同色塊及蝶翅之熱對流現象探討

表九、測溫樣本及對流情形 (第一作者拍攝及繪製)

測溫樣本	10*15黑橘色塊	10*15黑白色塊	10*15橘白色塊	10*15黑橘白色塊	10*15橘黑白色塊	10*15黑白橘色塊
對流情形						
	氣流在黑色上升、橘色下降	氣流在黑色上升、白色下降	橘白交界上空有順時針渦流	氣流在橘白交界處略升，黑橘處先降後升	氣流在黑色上升，黑橘交界有逆時針渦流	氣流在橘色、白色上方漸下沉，黑色上升
測溫樣本	10*15黑包大白	10*15黑包小白	黑橘及一大白斑	黑橘及四小白斑	無白斑右前蝶翅	有白斑右前蝶翅
對流情形						
	氣流在黑色上升、白色下降，形成渦流	氣流在黑色上升，黑白交界處形成渦流	橘到黑時氣流上升，黑白交界處逆時針渦流	氣流在橘色下沉，黑色上升，白斑上有渦流	氣流在蝶翅內部與外圍間產生弱渦流（側視呈八字）	氣流在蝶翅內部與外圍間產生渦流（側視呈八字）

- (一) 雙色不同組合色塊：吸熱效果較好的色塊上方較高溫，使空氣被加熱而上升。另外，兩種色塊同時存在時，便易在色塊交界處產生渦流，且當兩者間溫差明顯，形成的渦流範圍也較大。
- (二) 黑包白斑與模擬蝶翅：色塊交界處有上升氣流、渦流，符合討論九（一）發現。另外也提供對蝶翅更為清晰的局部氣流狀況。
- (三) 三色不同排列色塊：由三色塊間的對流情形，可觀察到氣流上升程度：黑色 > 橘色 > 白色，與該顏色的吸熱能力有關，分別呼應討論一的吸熱能力大小排序及討論九（一）之觀點。
- (四) 帝王斑蝶蝶翅：對比有、無白斑者，發現氣流狀態雖大致相同，卻有強弱、明顯程度的差異。因此，我們認為白斑可強化原有的氣流，提升原有氣流對帝王斑蝶的影響，進而達到飛行效果上的助益。目前雖未進行動態模擬加以證明，但根據文獻，我們推測此氣流具有相同潛力。

伍、 結論

- 一、顏色吸收熱輻射的能力不同，其吸熱後溫差會導致相鄰兩色塊之間產生熱傳導現象。
- 二、色塊總面積與熱傳導效果呈負相關。
- 三、接觸邊長度與熱傳導效果呈負相關。
- 四、接觸邊數量與熱傳導效果呈正相關。
- 五、當高溫色塊同時與兩色塊相鄰時，熱能分散傳導會造成兩兩溫差上升。其中在橘黑白三色塊中，黑色更傾向於將熱傳導至白色色塊而非橘色色塊。
- 六、模擬蝶翅局部色斑圖形展現了具有白斑時，黑色塊與橘色塊溫差明顯較大。此現象亦可在蝶翅圖形上觀察到，蝶翅外緣及內部形成的溫度梯度可能導致蝶翅周圍氣流的變化，從而影響其飛行效率。
- 七、氣流易上升程度與熱輻射吸收效果呈正相關，且交界的兩者溫差越大，形成的渦流也越大。
- 八、在帝王斑蝶蝶翅中可觀察到有白斑者氣流的強度較無白斑者高，此種氣流的增強可能正是幫助帝王斑蝶飛行，提升空氣動力學助益的因素。
- 九、未來展望：以電腦建構模型及有限元素法計算熱流方向並製成圖像，觀察樣本的熱量流動與周圍氣流，以達到對於本研究更清晰的觀察與結果的整合。

陸、 參考資料

一、Davis, A. K., Herkenhoff, B., Vu, C., Barriga, P. A., & Hassanalian M. (2023). How the monarch got its spots: Long-distance migration selects for larger white spots on monarch butterfly wings. *PLOS One*.

二、Britannica. (2024, December 19). *monarch butterfly*. Britannica. <https://www.britannica.com/animal/monarch-butterfly>

三、Johnson, A., McGinnis, E., & Knodel, J. (2023, June). *The Monarch Butterfly Part 1 - Migration and Life Cycle*. North Dakota State University.

四、Hassanalian, M., Pellerito, V., Sedaghat, A., Sabri, F., Borvayeh, L., & Sadeghi, S. (2019). Aerodynamics loads variations of wings with novel heating of top surface: Bioinspiration and experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*.

五、洪有靖、黃冠霖、鍾芳志 (2013) 。黑與白的邂逅--探討黑條紋與白條紋升溫降溫的變化。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。

六、廖冠翔、陳光祥、蕭景文 (2008) 。光風車性質之相關研究。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會。