

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

030312

「貝」受矚目

——探究貝蚤的外形特徵與行為模式

學校名稱：基隆市立武崙國民中學

作者： 國三 梁晏誠 國二 甘閔燁 國二 郭晏伶	指導老師： 葉玉君 曾義原
---	-----------------------------

關鍵詞：貝蚤、行為模式、外形特徵

摘要

貝蚤的長短軸比值都介於 1.3~1.4，外型為顯著的兩側對稱，殼紋分為三種類型：紅棕色殼紋有橘點、紅棕色殼紋無橘點以及墨綠色。移動速率與分布密度成正相關，具負趨光性；環境溫度愈高，平均速率愈大，NGDR 愈小；面對刺激物採取的行動會先暫停再快速地離開。

運動行為大致分為沿壁、停止、繞圈、跳躍等機制，其中又以沿壁的個體數最多。貝蚤相遇可能停止移動；且貝蚤與水蚤同時存在時，數量並無明顯關係；貝蚤沒有趨向或背離死蝦子的行為。在酸性、高鹽份以及含重金屬離子的環境，皆會使貝蚤的活動力下降。

壹、 研究動機

我們在學校採集水樣，欲觀察水中的小生物，卻發現水中有許多快速移動的小黑點。於顯微鏡下觀察，發現此種生物有兩片外殼，經上網搜尋資料後，得知此種生物為 *Cyclocypris* 屬的貝蚤，屬於介形蟲的一種。

顯微鏡下發現貝蚤的外殼和殼紋十分特別，牠們快速移動的方式也使我们對其移動模式產生興趣；此外，貝蚤的原生活環境水田和魚缸也常有水蚤或米蝦的存在，牠們之間的互動模式，也成為我們想探究的問題之一。

貳、 研究目的

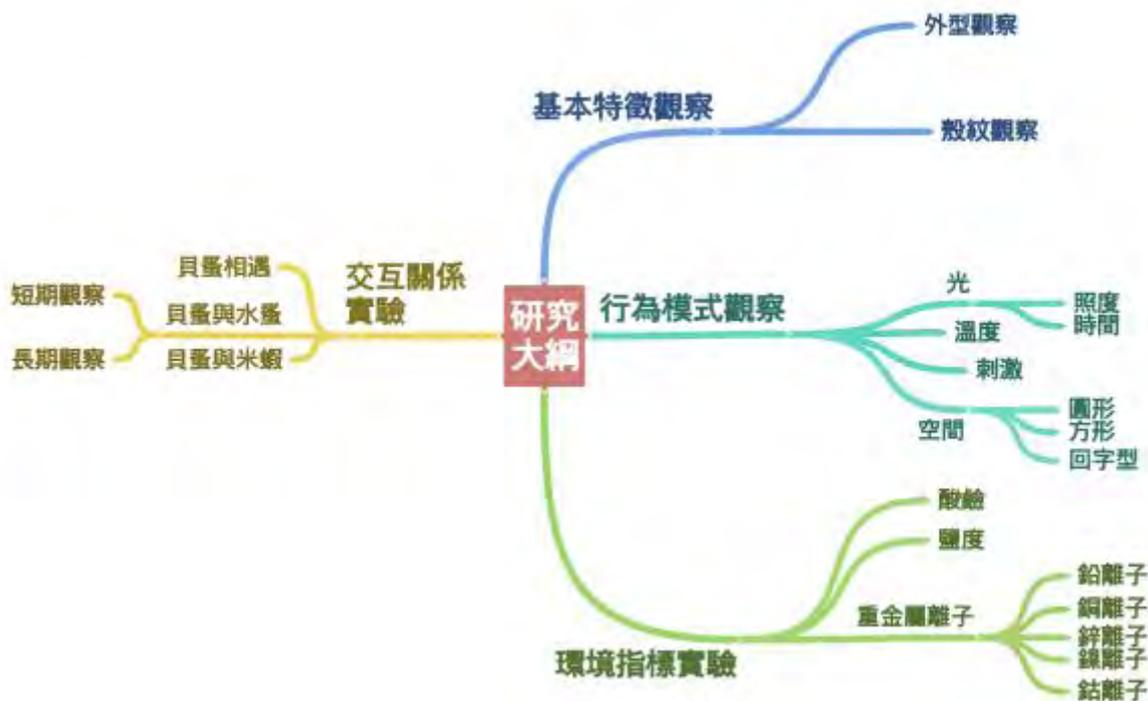


圖 1、研究大綱

本研究的目的旨在探討貝蚤的特徵、生活型態與移動模式藉由研究，了解貝蚤的行為模式、偏好環境，以期更加了解此種生物，並發掘其應用可能性。

操作變因包含光、溫度、刺激、空間等物理因素，和酸鹼、鹽度、重金屬離子等化學因素，以及貝蚤與貝蚤、貝蚤與水蚤、貝蚤與米蝦的生物交互關係。

參、 研究設備及器材

一、研究生物：貝蚤、水蚤（培養於綠水當中）。



圖 2、貝蚤 又稱介形蟲、種子蝦，介形綱生物

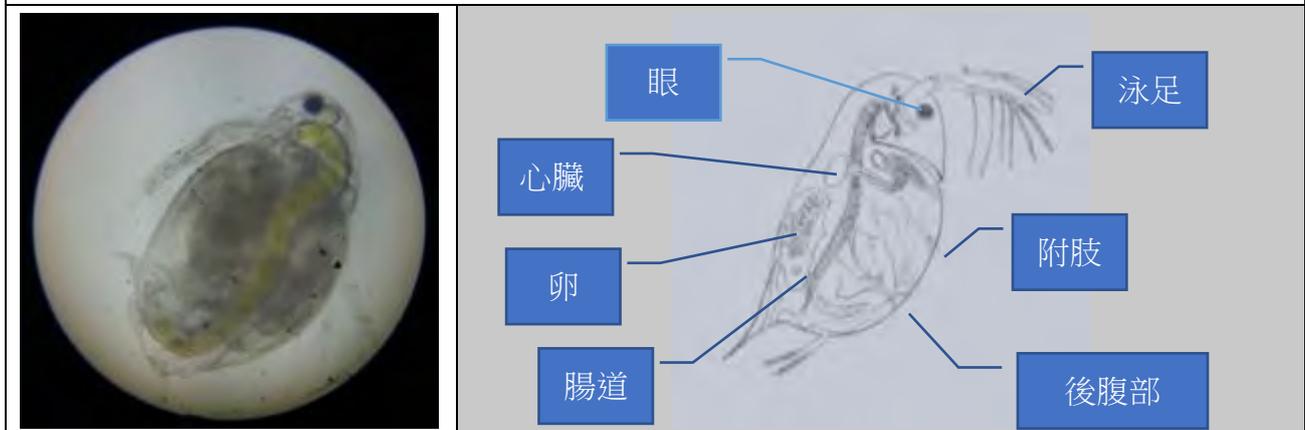


圖 3、水蚤 亦稱魚蟲，鯉足綱生物，常作為魚食，有耐久卵。

二、研究設備：複式顯微鏡、解剖顯微鏡、手機、電腦、檯燈、Arduino 套件、3D 列印機。

三、使用軟體：Image J、Tracker、Arduino 軟件、Tindercad、Stellarium。

四、使用藥品：NaCl、HCl、NaOH、PbNO₃、CuSO₄ · 5H₂O、ZnSO₄ · 7H₂O、NiSO₄ · 7H₂O、CoCl₂ · 6H₂O。

五、自製器材：攝影腳架、暗箱、圓形外環、方形外環。



圖 4、攝影腳架

圖 5、綠水

圖 6、圓形外環

圖 7、方形外環

肆、 研究過程或方法

一、 基本特徵觀察

將貝蚤分裝於小容器中，將貝蚤培養於綠水中，以日為單位連續拍攝貝蚤於顯微鏡底下的樣貌。

(一) 外型觀察

使用 Image J 軟體測量軀體長軸和短軸長度。

● Image J 使用方式 (長度測量)

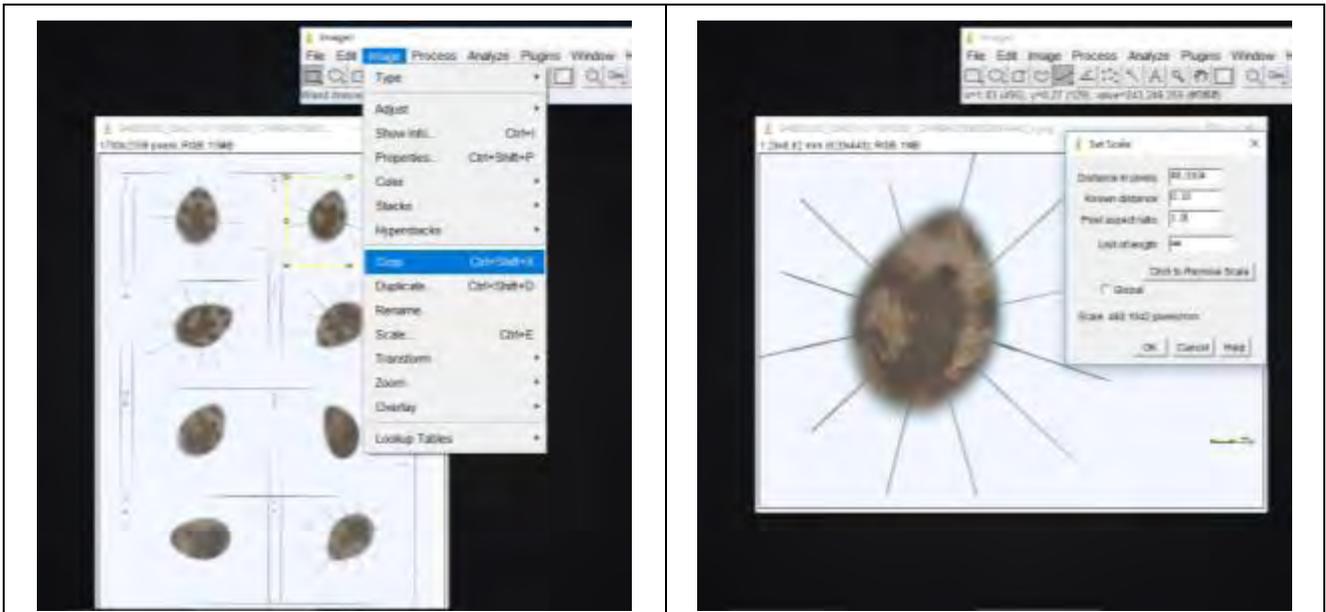


圖 8、裁剪必要範圍

圖 9、設定比例尺

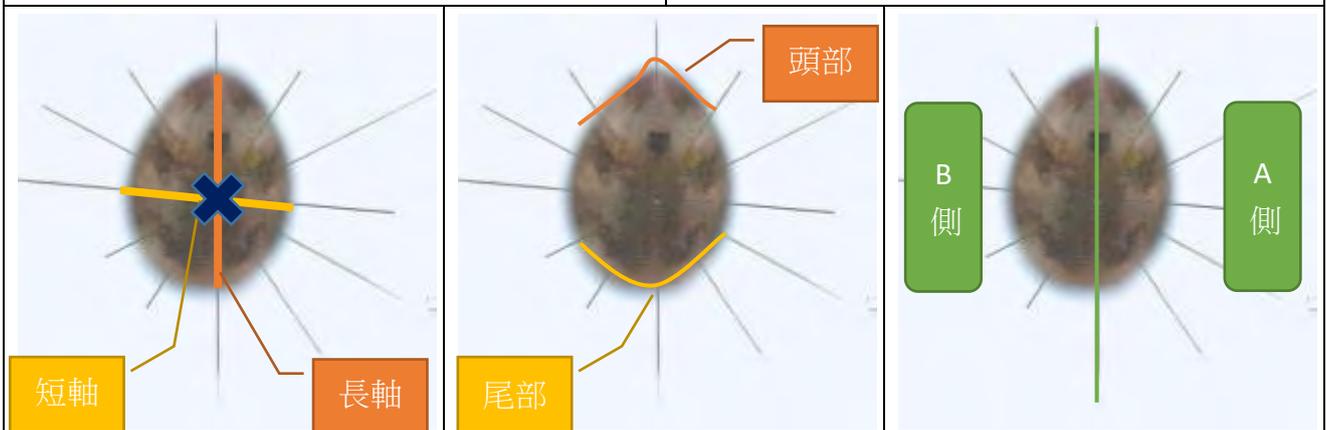


圖 10、長短軸與中心點

圖 11、頭尾部角度

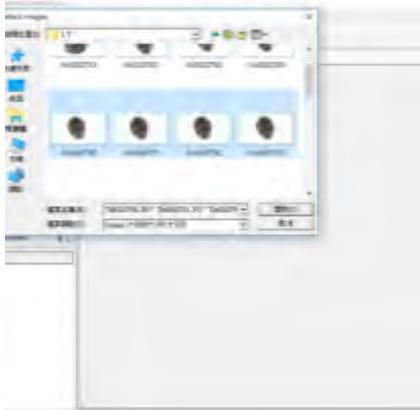
圖 12、A 側與 B 側

我們定義橘色線段為長軸，黃色線段為短軸，分別測量長短軸的長度，兩線段的交點就定義為中心點，如圖 10。另外也定義橘色夾角為頭部，黃色夾角為尾部，分別測量頭尾部的角度，如圖 11。我們將長軸延伸之後可以將貝蚤的體側分為 A 側與 B 側，並每 30 度就繪製一條通過中心的線段，從頭部開始將各線段區間分為 A1~A6、B1~B6。

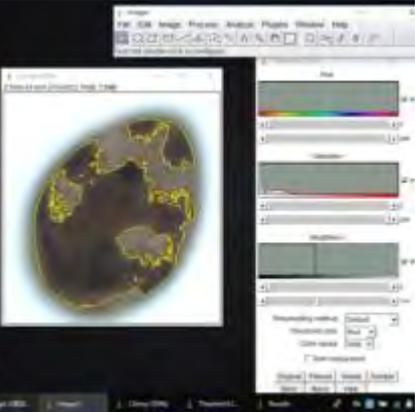
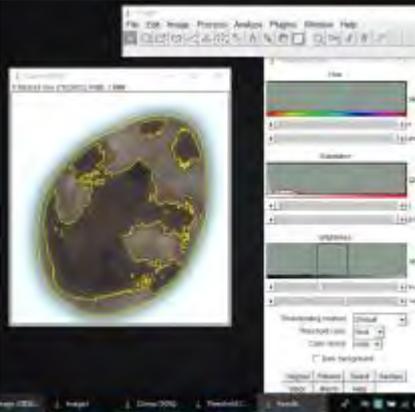
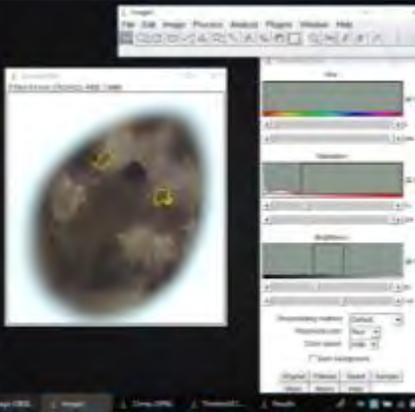
(二) 殼紋觀察

使用 Stellarium 軟體疊圖，使貝蚤的照片變得清晰以後，利用 Image J 軟體測量貝蚤不同區塊上，不同顏色所占的面積。

- Stellarium 使用方式（疊圖）

		
<p>圖 13、失焦照片</p>	<p>圖 14、使用 Stellarium</p>	<p>圖 15、清晰照片</p>
<p>我們將連續於複式顯微鏡底下拍攝的失焦照片，經由 Stellarium 軟體疊圖後，就可以得到相較清晰的照片。</p>		

- Image J 使用方式（顏色面積測量）

		
<p>圖 16、深色區域</p>	<p>圖 17、淺色區域</p>	<p>圖 18、殼上橘點</p>
<p>我們先設定比例使並裁剪必要範圍之後，選擇顏色閾值(Color Threshold)進行區域選取。調整明暗(Brightness)可以測量出深色區域與淺色區域的面積數值，而調整飽和度(Saturation)則可另外測量殼上橘點的面積數值。</p>		

二、行為模式觀察

行為實驗主要觀察貝蚤在無任何變因或光、溫度、刺激、空間的調整下，其行為模式的變化或環境種類的選擇。

（一）對照組

將貝蚤以 5、10、15 隻三種數目，放置在直徑為 10.5cm 的圓形培養皿、25°C 的常溫水中，拍攝 1 分鐘的影片，記錄貝蚤的移動行為。重複五次。

另外我們也選了 5 隻水蚤進行上述實驗，用以比較貝蚤與水蚤之前移動模式的差異，也重複五次實驗。

使用 Tracker 以 0.1 秒為單位記錄貝蚤的座標，計算出每 0.1 秒的路徑長和速率、60 秒的平均速率，再以 NGDR 公式計算其路徑彎曲程度，用以比較與其他實驗組的差別。

● Tracker 使用方式

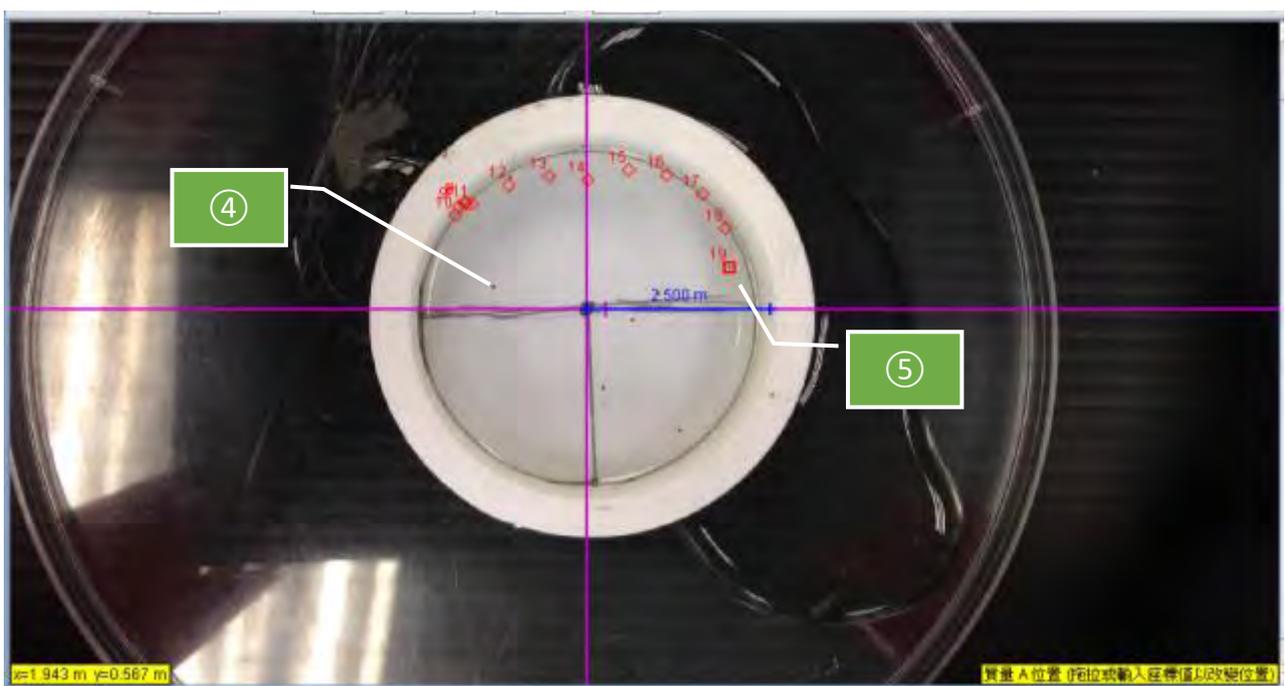
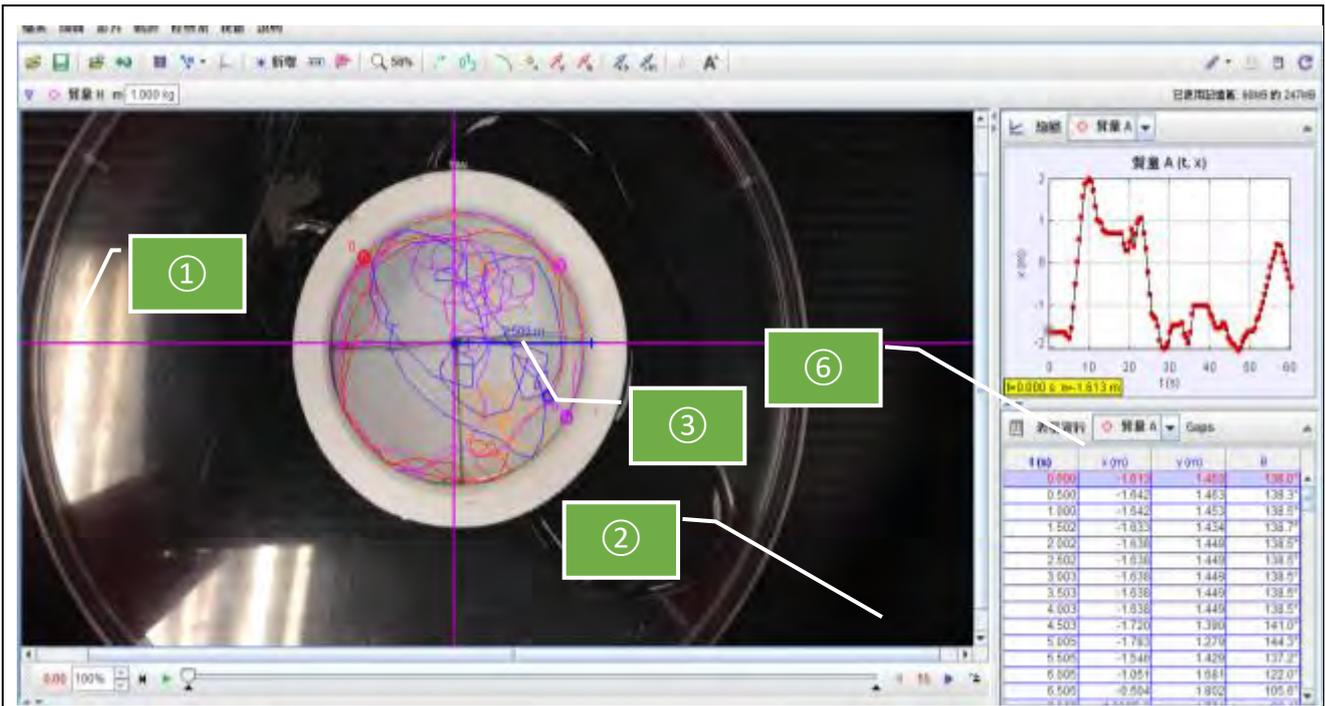


圖 19、Tracker 使用方式

①設定座標系統：

- 多數實驗會將直角坐標原點設定於影片左下角，與圓形容器兩點相切。
- 「空間—方形」組別的實驗將座標原點設定於方形左下角的直角上。
- 「空間—圓形、回字形」組別的實驗將座標圓點設定於圓的圓心上。

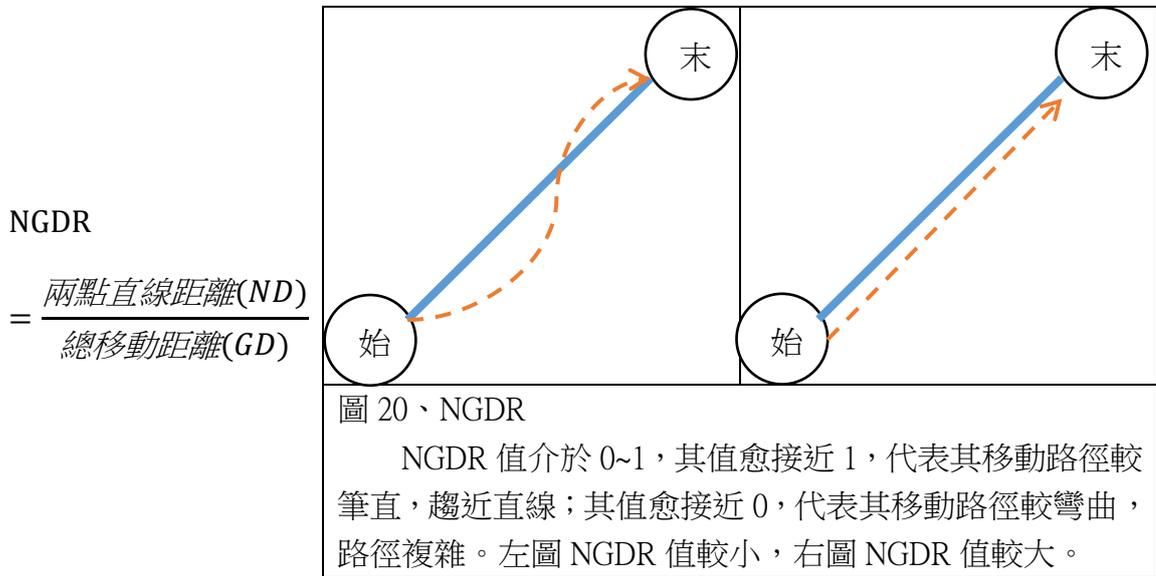
②設定時間間隔：每個影格的時間間隔約為 0.03 秒。

- 三個影格（約 0.1 秒）為單位：「對照組」、「貝蚤相遇」組別的實驗。
- 十五個影格（約 0.5 秒）為單位：其餘各組實驗。

- ③設定比例尺：以使用容器的大小作為基準，標示比例尺。
- ④尋找影片中的貝蚤，新增「質點」進行後續追蹤。
- ⑤追蹤貝蚤的移動軌跡，完成追蹤可以製成上圖的軌跡圖。
- ⑥有關貝蚤座標的數據同步顯示於畫面右側，以這些數據進行後續分析。

● Net to Gross Displacement Ratio (NGDR)

NGDR 值是一種可以衡量路徑扭曲程度的比率，定義為橈足類移動起點與終點間的最短距離（直線距離）和總移動距離的比值。



(二) 光

我們發現貝蚤多數時候皆處於養殖盆的底部，介形蟲具有「眼」的構造，它的眼能做為判斷光源來向和強度的工具，我們想探究貝蚤是否有趨光行為。

1. 光的照度實驗

為了驗證貝蚤是否有趨光性（或負趨光性），我們將 20 隻貝蚤放置在自製暗箱（見附圖）進行實驗，實驗前先將實驗生物放置暗室 5 分鐘再開始，以 Lux meter 軟體測量固定光源（檯燈）的照度，使其分別為 50、100、150、200lux，計算照光 5 分鐘之後出現在照光側的貝蚤個數。重複五次。

2. 照光長度實驗

為了確認貝蚤對於光產生的反應是否僅侷限於短時間，我們將 20 隻貝蚤放置在自製暗箱進行實驗，實驗之前將實驗生物放置暗室 5 分鐘再開始，以 Lux meter 軟體測量固定光源（檯燈）的照度，取 50、100、150、200lux 的組別各一，並持續照光 20 分鐘，每 5 分鐘計算一次出現在照光側的貝蚤個數。重複五次。



圖 21、自製暗箱

我們將每次計量時出現在照光側的貝蚤隻數，並以貝蚤總數減掉出現在照光側貝蚤的數目作為出現在背光側貝蚤的數目。

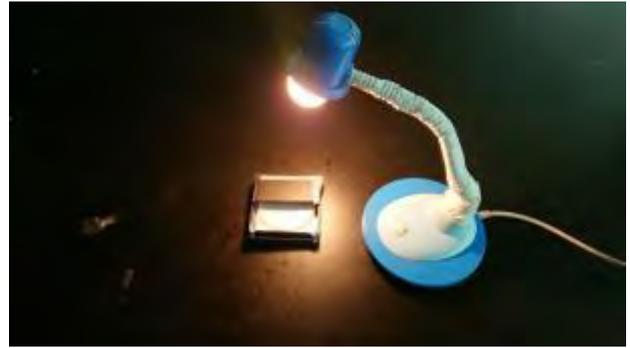


圖 22、「光」實驗方法

我們將完成的暗箱放置在檯燈之下進行實驗，每次實驗前都會先拿用 lux meter 軟體測量照度。

(三) 溫度

我們發現貝蚤在溫度高的夏日繁殖的個數較多，我們想要探究貝蚤的移動模式是否也受到溫度的影響。

為了瞭解溫度對貝蚤移動模式的影響，我們將 10 隻貝蚤放置在培養皿進行實驗，放置在溫度分別為 15°C、25°C（對照組）、35°C、45°C 的水當中，以一分鐘為單位拍攝貝蚤的移動行為，而後再使用 Tracker 分析影片。重複五次。

(四) 刺激

在我們用滴管吸取貝蚤時，貝蚤會有逃離的反應，我們想要知道貝蚤對於環境刺激會有何反應，參考文獻之後發現有類似的橈足類實驗，實驗者利用小球進入水中以刺激橈足類。

● 原先的刺激實驗設計

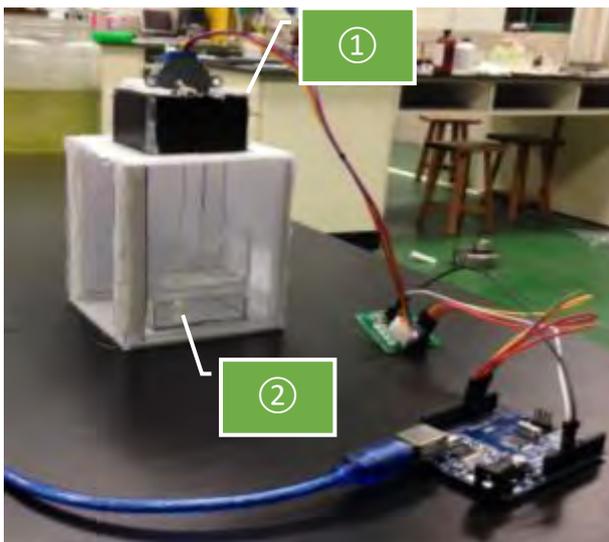


圖 23、Arduino 伺服馬達刺激實驗

附圖中①為伺服馬達，②為直徑 0.4cm 的刺激物（小球），③為連接筆電以執行程式的 Arduino 套件。

我們原先參考其實驗，將 10 隻貝蚤放置在透明壓克力盒中，使用 Arduino 以控制伺服馬達轉動，控制刺激物（小球）進入水面的速度，計算小球進入水中之後，趨近於刺激物的個數。

隨後即發現此種操作對於貝蚤的影響不大，貝蚤未因為球體的進入產生太大的行為改變，我們推測其原因可能是小球進入水中的速度過於緩慢，受限於器材問題，我們改以直接丟擲的形式進行實驗。

● 更新的刺激實驗設計

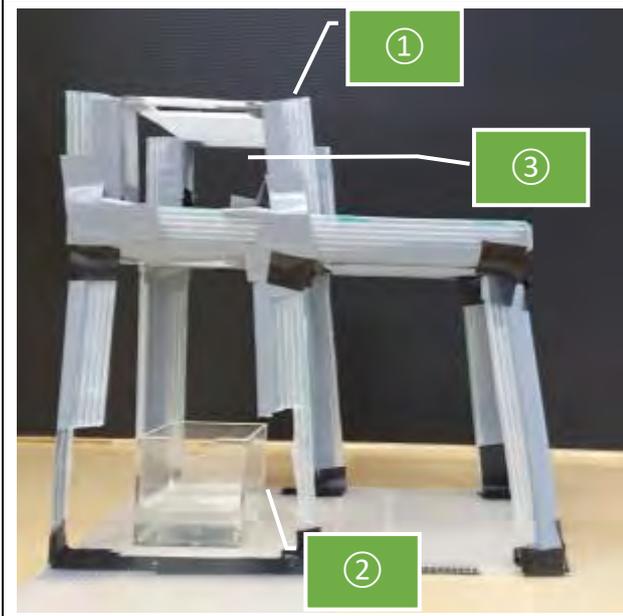


圖 24、刺激腳架

附圖中①為手機放置處，②為待實驗的貝蚤放置處，③則為丟下刺激物（小球）的地方。

我們將 10 隻貝蚤放置在透明壓克力盒進行實驗，設定水深為 1cm，而丟下高度則為 14cm，並於實驗前拍攝 30 秒貝蚤靜置的影片，在 30 秒時丟下小球，拍攝 30 秒貝蚤受到刺激的影片，最後使用 Tracker 分析貝蚤的行為。

(五) 空間

在日常的觀察中，我們發現貝蚤多數時候棲息於養殖盆的盆底或是盆壁，我們想要知道貝蚤是否對於盆壁或盆角有特殊的停留喜好，介形蟲為了躲避天敵或尋找食物，在原先的生活環境（如：水田）本來就會棲息在邊角的位置。

為計算貝蚤選擇邊角位置的機率和歸納貝蚤常見的行為軌跡種類，我們使用 Tindercad 進行圓形和方形外環的繪製，再用 3D 列印機印製實體。

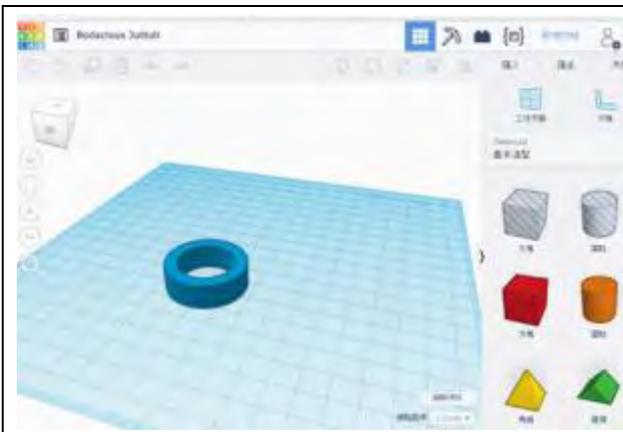


圖 25、圓形外環設計圖

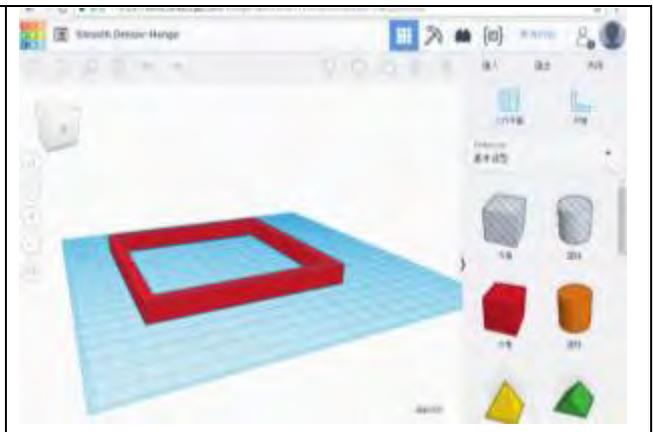
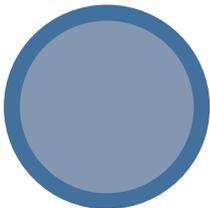
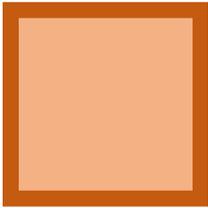
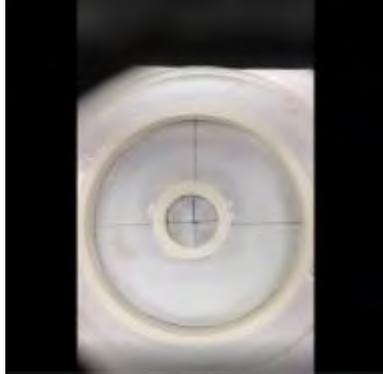


圖 26、方形外環設計圖

我們將實驗分成 3 個種類：圓形（直徑 5cm、7.5cm、10cm）、正方形（邊長 5cm、7.5cm、10cm）、回字形（外圓環＋內圓環的組合，外環直徑固定為 10cm，內環直徑分別為 2.5cm、5cm、7.5cm）。

我們取 10 隻貝蚤進行實驗，放置在不同形狀的空間中，拍攝 1 分鐘，並以 Tracker 分析。重複三次。以下圖示，貝蚤活動空間以底色表示。

容器外形	圓形	正方形	回字形
3D 列印圖形			
實際成品			
容器特色	容器的內部為圓形空間，內部沒有夾角，只有凹面	容器的內部為方形空間，內部有四個夾角跟凹面	貝蚤活動空間為兩個圓的中間，有凹面跟凸面

三、 交互關係實驗

生物在大自然的環境中罕有個體獨自存在的情況，因此我們想要知道在隨機環境中，貝蚤與貝蚤、貝蚤與其他生物的生物交互關係。

(一) 貝蚤與貝蚤種內的交互關係

在前面實驗的分析中，我們發現貝蚤與貝蚤相遇的時候，常有迴避或撞擊而停止的行為出現，我們想要知道被碰撞的貝蚤會有何反應。

我們隨機從養殖盆中取出混合的貝蚤和水蚤，將其放置於顯微鏡底下錄影，而後以 Tracker 分析其移動軌跡。

(二) 貝蚤與水蚤種間的交互關係

貝蚤與水蚤的生存環境非常類似，常見於水田等靜水環境，我們想知道貝蚤與水蚤之間是否會有攻擊、競爭的關係，因此我們將貝蚤與水蚤的關係又分為兩個實驗：

1. 短期觀察

為了知道共同處於同一環境的貝蚤與水蚤是否會影響彼此的行為模式，我們將貝蚤和水蚤的實驗組別分為「貝蚤 15 隻，水蚤 5 隻」、「貝蚤 10 隻，水蚤 10 隻」及「貝蚤 5 隻，水蚤 15 隻」三個組別。

將貝蚤和水蚤放置在同一環境，於 0~4 小時內，每小時拍攝一次 1 分鐘的影片以記錄貝蚤和水蚤的活動行為，而後使用 Tracker 分析其移動軌跡。

2. 長期觀察

為了知道長時間將貝蚤和水蚤放置在同一環境中，是否會造成某一族群的數量消長，我們將貝蚤和水蚤的實驗組別分為「貝蚤 15 隻，水蚤 5 隻」、「貝蚤 10 隻，水蚤 10 隻」及「貝蚤 5 隻，水蚤 15 隻」三個組別。

每日計算一次貝蚤和水蚤的數量，並將貝蚤和水蚤的數量消長繪製成折線圖，以判斷其交互關係為何。

(三) 貝蚤與米蝦種間的交互關係

我們曾經在行政院的水產養殖網站上看到民眾向其詢問貝蚤孳生的問題，該名民眾懷疑貝蚤的孳生使得米蝦的抱卵、脫殼受到影響。為了驗證此說法的可信度，我們將 10 隻貝蚤與 1 隻死米蝦放置在同一個環境中，拍攝並觀察貝蚤與米蝦的交互關係。

四、 環境指標實驗

就貝蚤對於水族利用價值而言，比起水蚤來得低，不為人所愛，而且也在網路上的水族論壇，也有貝蚤的出現是因為底層土壤過於肥沃的緣故。因而我們想要找到一個貝蚤的應用方法，也就是貝蚤作為環境指標的潛力。

參考蚤尋活水（李佳瑩、張碩珍，2009）以後發現有類似的水蚤實驗，文中用水蚤進行環境檢測，配置溶液的標準則參考行政院頒布的放流水標準。我們進行酸鹼度、鹽度和重金屬離子的實驗。實驗的不同之處於：文章作者以水蚤的生理反應及外觀特徵變化作為判斷項目，我們的實驗則以貝蚤的移動模式作為觀察項目。

(一) 酸鹼（放流水標準：pH6~9）

我們每組實驗取 5 隻貝蚤，使用 HCl 和 NaOH 配出 pH 值 5、6、7（對照組）、8、9 的水溶液，於 0~4 小時內，每小時拍攝一次 1 分鐘的影片以記錄貝蚤的活動行為，而後使用 Tracker 分析其移動軌跡。重複兩次。

(二) 鹽度（放流水標準未特別規定）

我們每組實驗取 5 隻貝蚤，使用 NaCl 配出濃度為 1.8、3.6、5.4、7.2、9.0mg/L 的水溶液，於 0~4 小時內，每小時拍攝一次 1 分鐘的影片以記錄貝蚤的活動行為，而後使用 Tracker 分析其移動軌跡。重複兩次。

(三) 重金屬離子

我們每組實驗取 5 隻貝蚤，使用電子天秤將附表的藥劑調配出其放流水標準 1 倍和 10 倍的水溶液，於 0~4 小時內，每小時拍攝一次 1 分鐘的影片以記錄貝蚤的活動行為，而後使用 Tracker 分析其移動軌跡。重複兩次。

表 1：重金屬離子放流水標準、使用藥劑與 10 倍標準劑量

離子種類	鉛離子	銅離子	鋅離子	鎳離子	鈷離子
放流水標準 (單位：mg/L)	1.0	1.5	3.5	0.7	1.0
使用藥劑	Pb(NO ₃) ₂	CuSO ₄ · 5H ₂ O	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	NiSO ₄ · 7H ₂ O	CoCl ₂ · 6H ₂ O
10 倍標準劑量 (單位：mg/L)	8.0	59.0	153.9	33.5	39.7

伍、研究結果

一、基本特徵觀察

(一) 外型觀察

我們描繪了 56 隻貝蚤的外型輪廓，分析如下：

1. 長軸與短軸

紅棕色 25 隻，墨綠色 31 隻，長短軸的單位皆為 μm 。

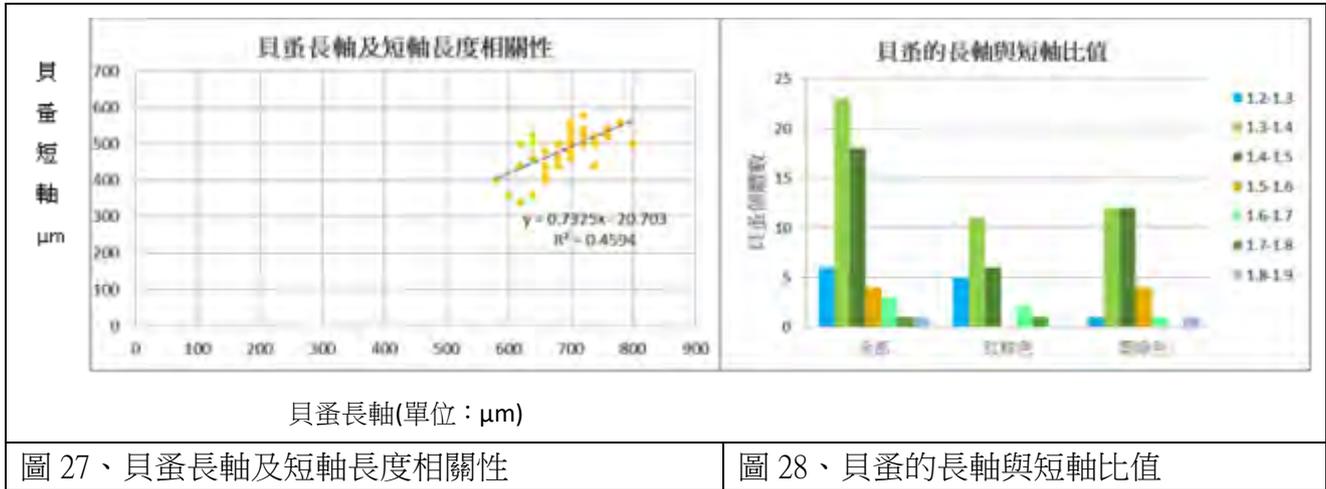


圖 27、貝蚤長軸及短軸長度相關性

圖 28、貝蚤的長軸與短軸比值

表 2：兩種體色貝蚤的長軸與短軸尺寸（單位： μm ）

	長軸	短軸	長短軸比值
紅棕色貝蚤	686.67	492.50	1.41
墨綠色貝蚤	703.75	489.38	1.46

貝蚤的長軸與短軸長度成正相關，在我們研究的貝蚤當中分為兩種顏色，再進一步進算長短軸的比值，發現無論是紅棕色的貝蚤或是墨綠色的貝蚤，其長短軸比值都介於 1.3~1.4。

2. 頭部角度與尾部角度

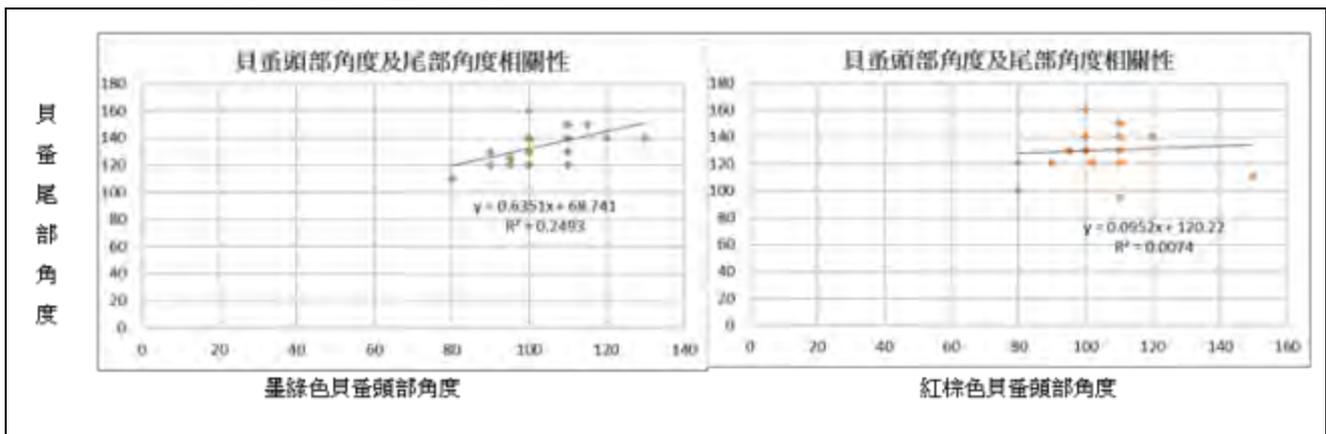


圖 29、墨綠色貝蚤頭部與尾部角度相關性

圖 30、紅棕色貝蚤頭部與尾部角度相關性

無論是墨綠色或是紅棕色貝蚤其頭部角度及尾部角度相關性都不高，而其頭部及尾部的角度平均，紅棕色為頭部角度為 104.875 度，尾部角度為 130.208 度；墨綠色頭部角度為 103.594 度，尾部角度為 134.53 度。

3. 眼睛位置與其他特徵

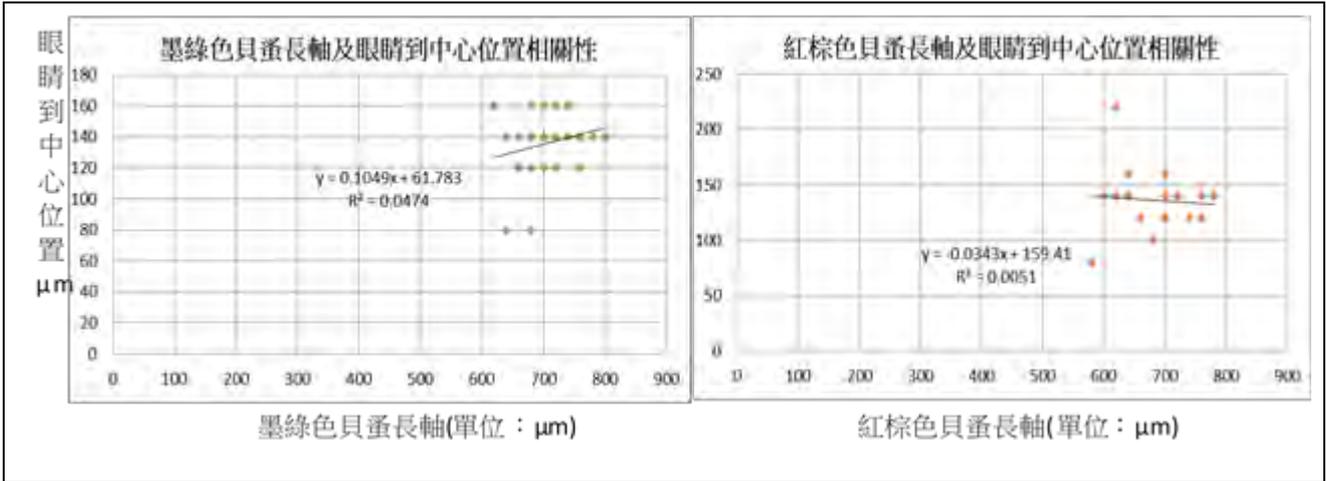


圖 31、墨綠色貝蚤長軸與眼睛到中心位置相關性

圖 32、紅棕色貝蚤長軸與眼睛到中心位置相關性

無論是墨綠色或是紅棕色貝蚤其貝蚤長軸及眼睛到中心位置相關性都不高，眼睛到中心位置平均距離，紅棕色為 $135.833 \mu\text{m}$ ，墨綠色為 $135.63 \mu\text{m}$ 。

4. 貝蚤兩體側數據形質

我們想知道貝蚤左右兩側其輪廓數值是否具有相關性，因此比較 A1 到 A6 與 B1 到 B6 的相關性，結果如下表所示：

表 3：兩種顏色貝蚤身體輪廓數值(單位： μm)

墨綠色 貝蚤	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	198.13	157.50	135.00	126.25	147.50	162.50
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
紅棕色 貝蚤	198.75	170.00	142.31	143.13	158.75	165.63
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	198.33	150.83	130.83	121.67	136.67	157.50
紅棕色 貝蚤	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	200.83	165.00	140.00	146.67	154.17	164.17

無論是墨綠色或紅棕色貝蚤其 A1 到 A6 與 B1 到 B6 都屬於高度正相關，顯示貝蚤的外型為顯著的兩側對稱。

B1-
B6
長度
單位：
 μm

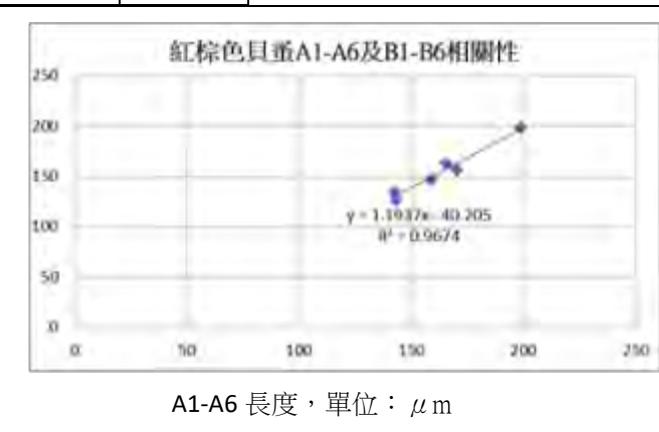
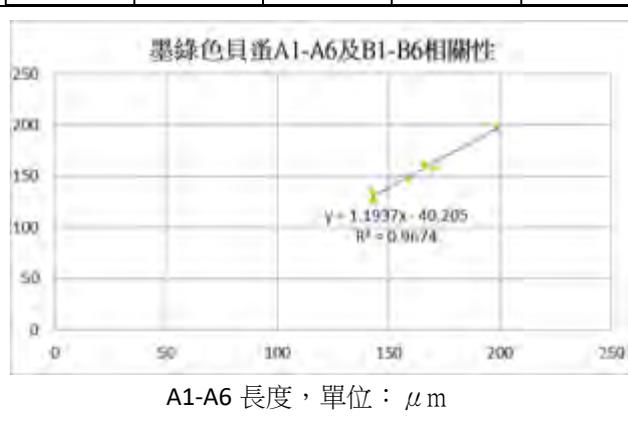
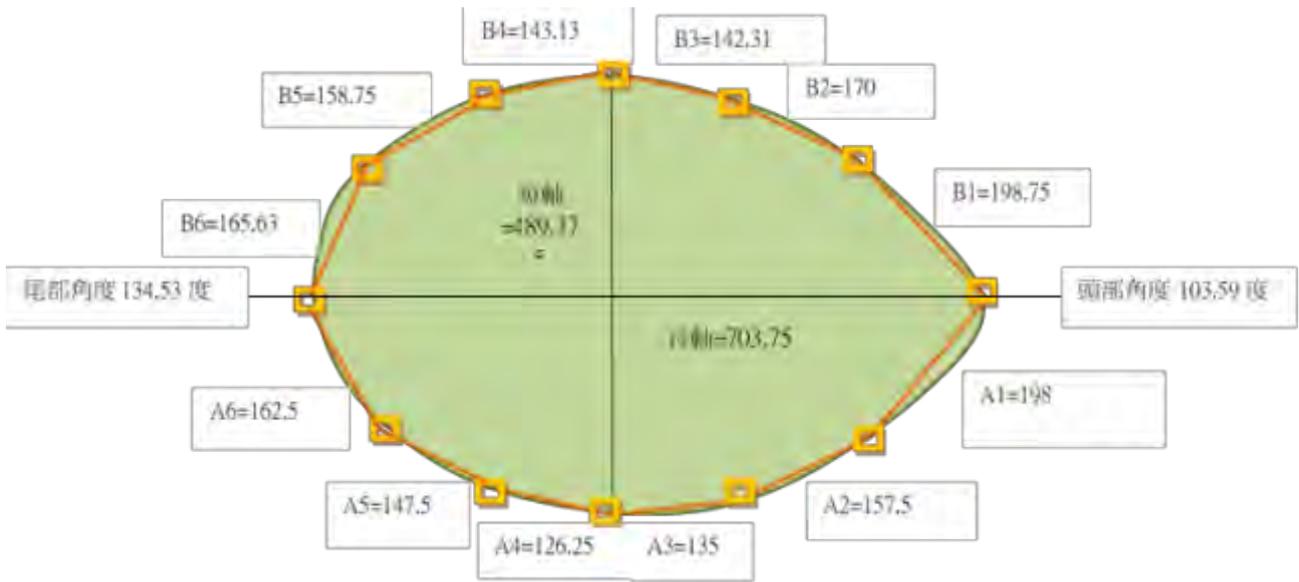


圖 33、墨綠色貝蚤 A1~A6 及 B1~B6 相關性

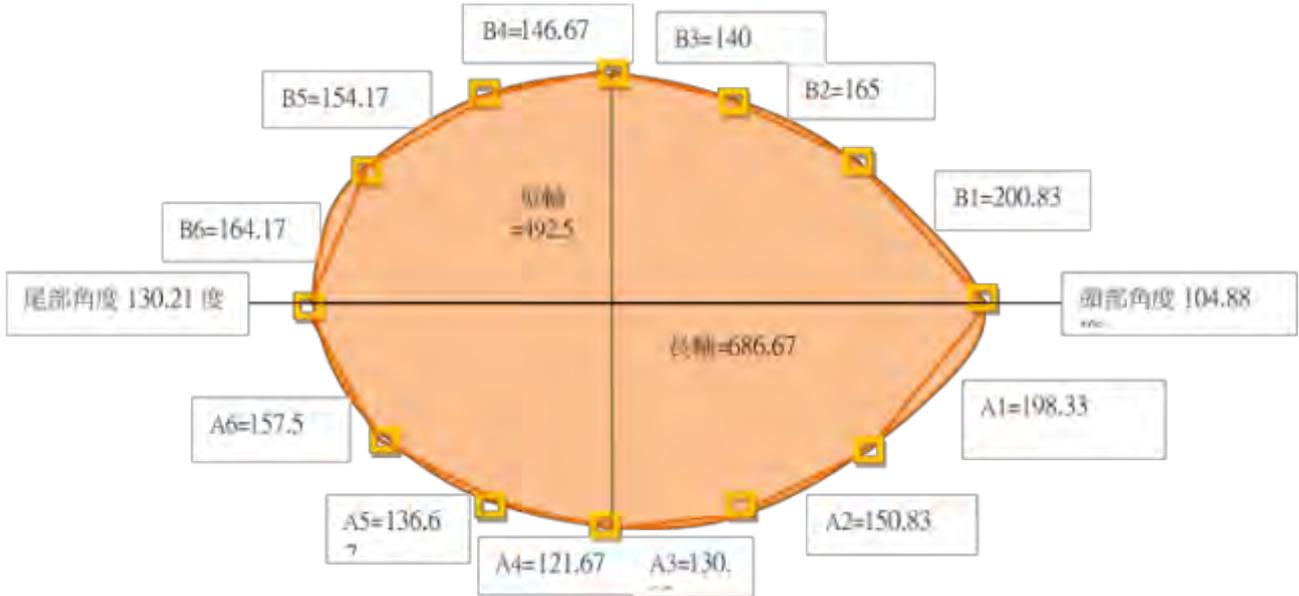
圖 34、紅棕色貝蚤 A1~A6 及 B1~B6 相關性

5. 貝蚤身體各形質(單位： μm)

墨綠色貝蚤



紅棕色貝蚤



由測量結果發現，兩種不同顏色的貝蚤基本外型輪廓大小差異不大，墨綠色較長，短軸較短；而紅棕色貝蚤較圓胖。

(二) 殼紋觀察

我們使用複式顯微鏡拍照觀察，將研究中的貝蚤大略分成三種類型：紅棕色殼紋有橘點、紅棕色殼紋無橘點、墨綠色。

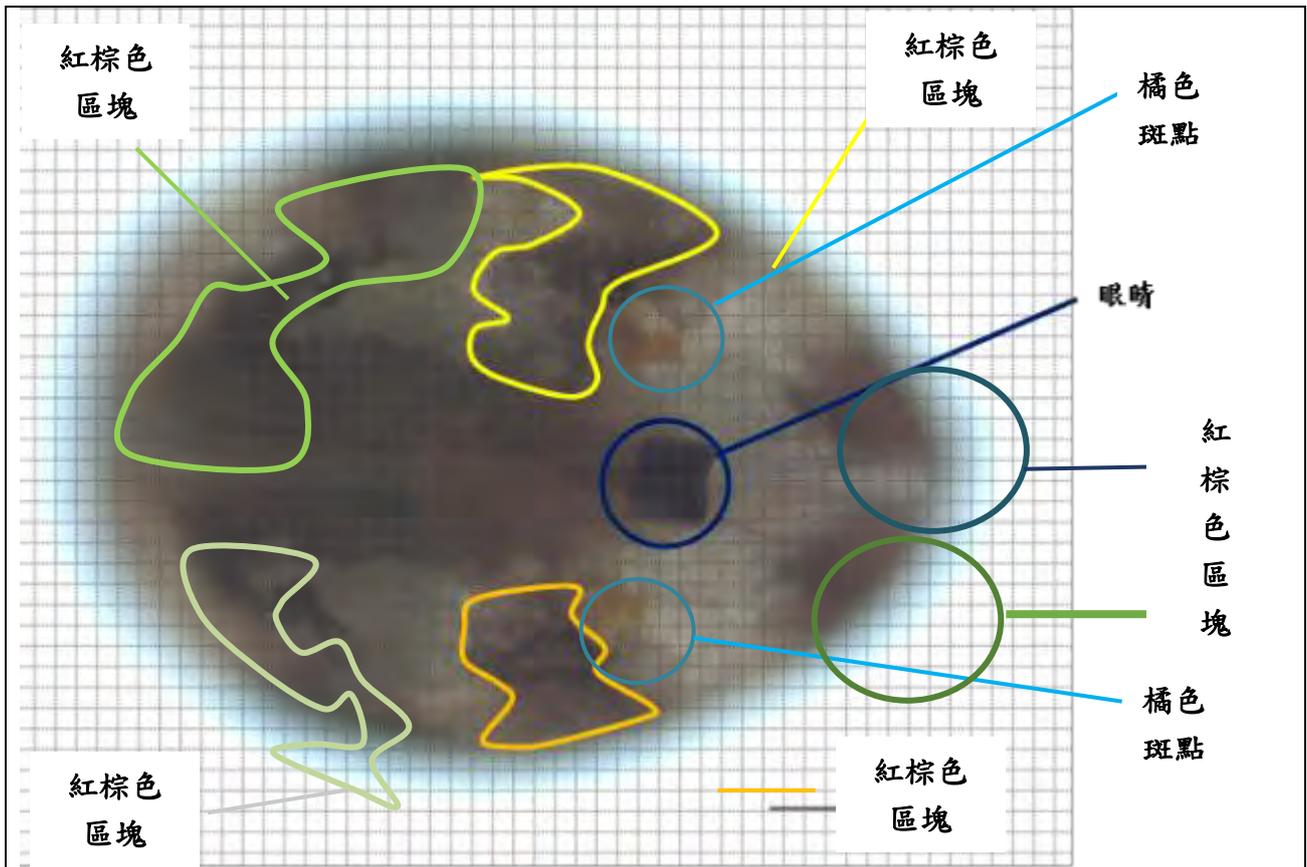


圖 35、紅棕色殼紋有橘點貝蚤的殼紋色彩分布

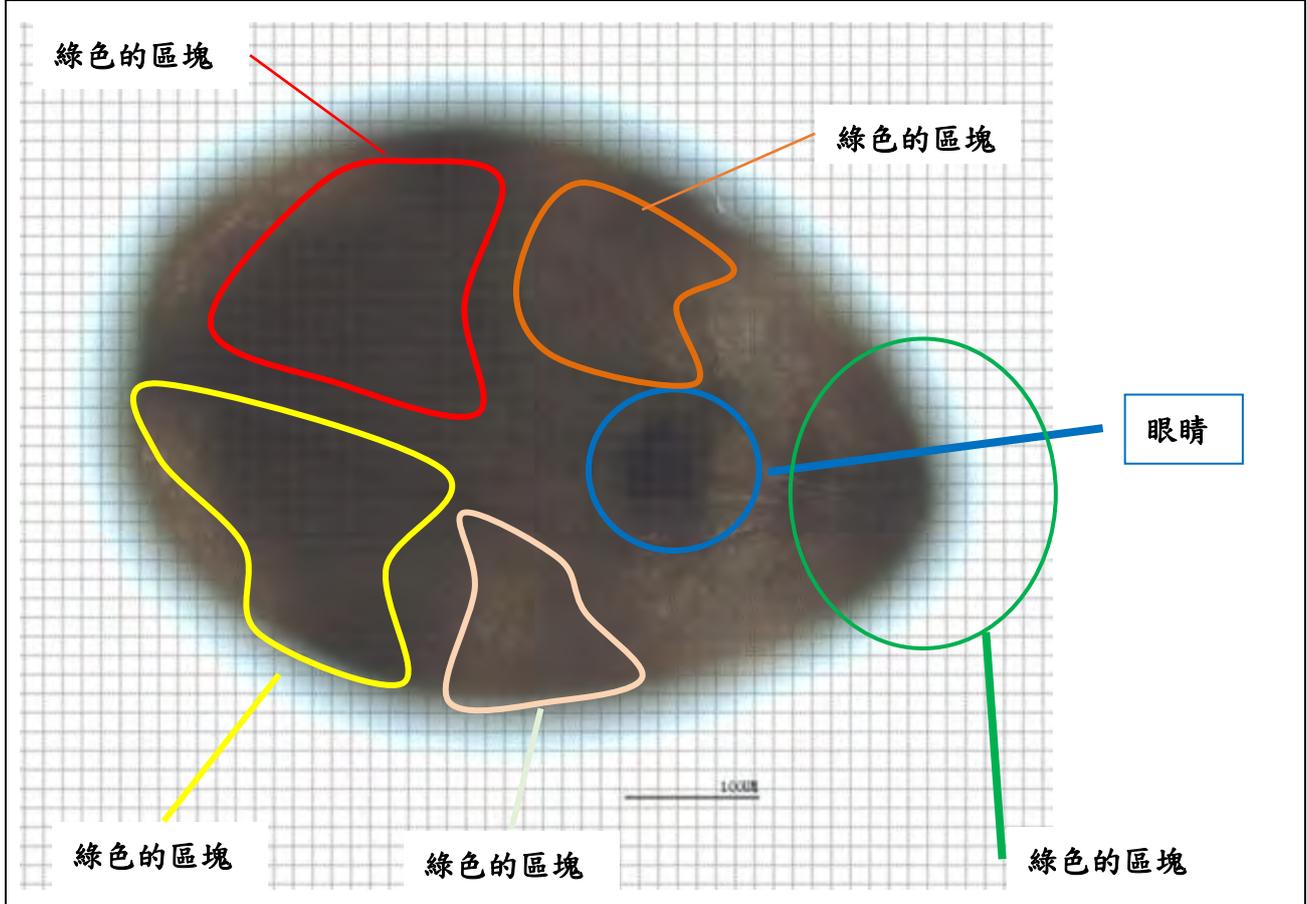
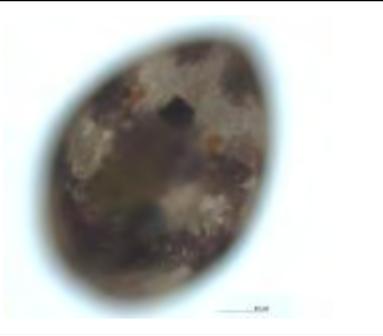
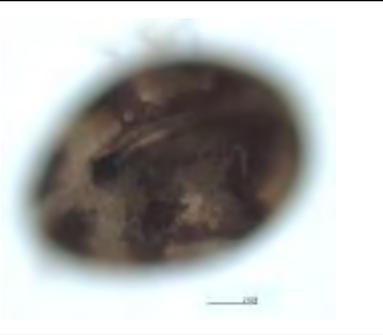


圖 36、墨綠色殼紋貝蚤的殼紋色彩分布

表 4：貝蚤的殼紋色彩分布 (n=92)

類型	A 類型	B 類型	C 類型
圖片			
特徵	體側：紅棕色的斑紋 眼睛：兩側具有橘點 無斑紋的區塊：皆為透明	體側：紅棕色的斑紋 眼睛：兩側沒有橘點 無斑紋的區塊：皆為透明	體側：墨綠色的條紋 眼睛：兩側沒有橘點 無斑紋的區塊：皆為半透明
個體數目	27	4	67

實驗中墨綠色的貝蚤數量較多，紅棕色個體數量較少。研究中的貝蚤殼紋顏色主要分成兩種：紅棕色和墨綠色斑紋，紅棕色個體的斑紋主要分布在邊緣，大多數紅棕色個體的眼睛兩側都有橘色圓點，而且身體透光度高；墨綠色個體的紋路為條紋狀，此外身體透光度較低，呈現半透明狀態。

我們再進一步貝蚤殼紋色彩的明暗比例，以透明的區域作為「明」的區域，有斑紋或是條紋的部分則為「暗」的區域。

表 5：貝蚤的殼紋色彩明暗比例 (n=98)

	暗	明	橘點
紅棕色有橘點	64.0688	35.9312	1.19571
紅棕色沒有橘點	67.0233	32.9767	0
墨綠色	67.1097	32.9767	0

分析之後發現，紅棕色與墨綠色貝蚤的明暗比例差異不大，皆約為 6.5：3.5，也就是瓣殼不透光的區塊 > 透光區域。

最後，我們將不同殼紋色彩分布的貝蚤數量和其殼紋明暗的比例繪製成長條圖，結果如下圖所示。

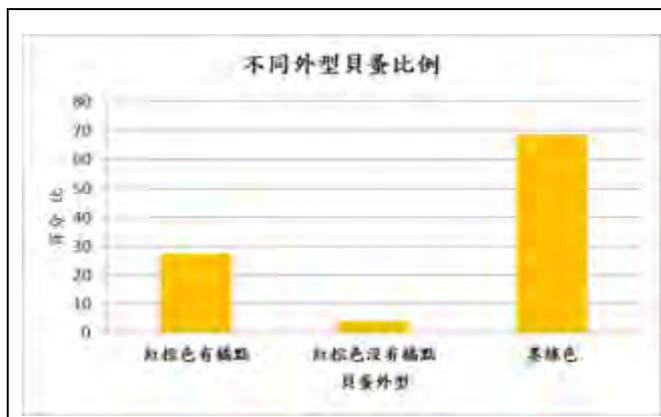


圖 37、不同外型貝蚤比例長條圖

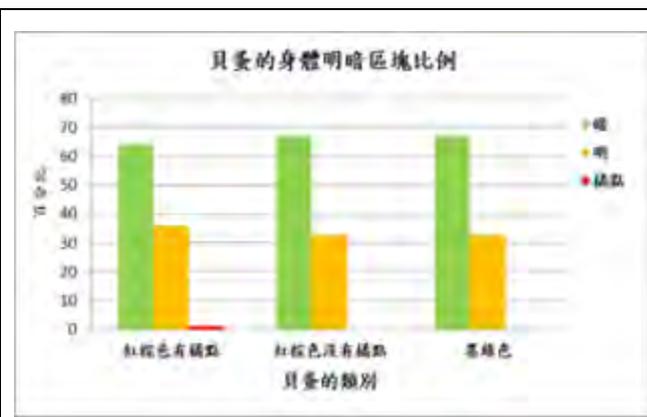


圖 38、貝蚤的身體明暗區塊比例長條圖

(三) 生活簡史

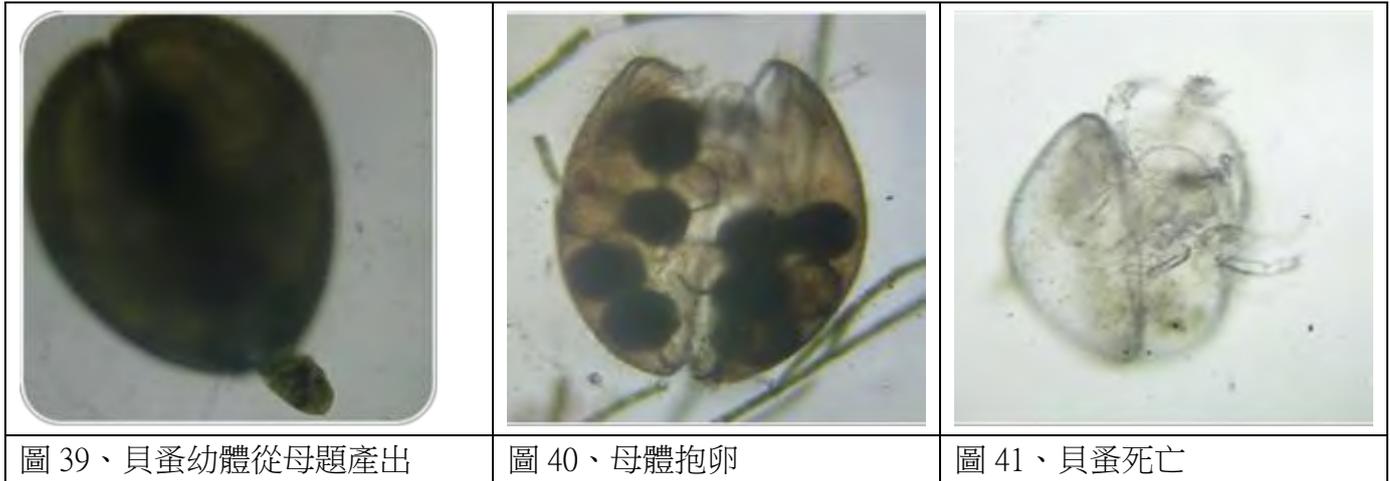


圖 39、貝蚤幼體從母題產出

圖 40、母體抱卵

圖 41、貝蚤死亡

貝蚤未死亡的體色為綠色，致使不易觀察其內部器官構造，唯有打開瓣殼時看得清楚；然而其死亡之後的體色則轉為綠色，瓣殼也會鬆開，可清楚看到其觸角與附肢。另外，由體色的轉變，可以推測其食物來源為綠水中的藻類。

二、 行為觀察實驗

(一) 對照組

此實驗檢測在沒有任何操作變因的環境底下，不同數量的貝蚤是否有行為差異。而本實驗也是我們之後的對照組實驗，作為後續實驗的比對。比對的內容包含貝蚤的平均速率(cm/s)，以及貝蚤的 NGDR 數值(無單位)。(每組的 n=20)

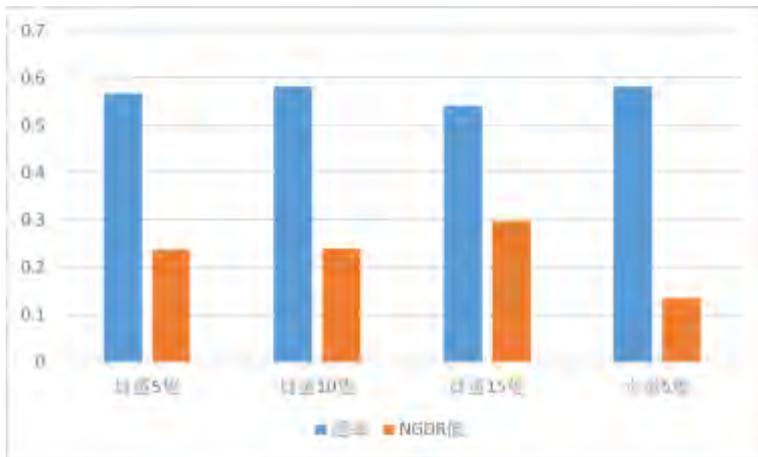


圖 42、對照組貝蚤與水蚤的速率與 NGDR 值

水蚤的移動速率較貝蚤更快一些，且移動軌跡較貝蚤更為曲折。

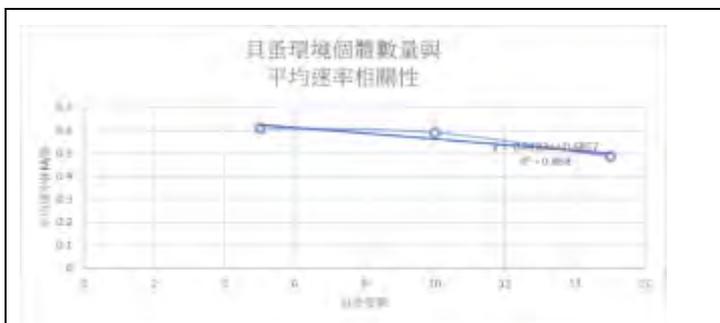


圖 43、貝蚤環境個數數量與平均速率相關性

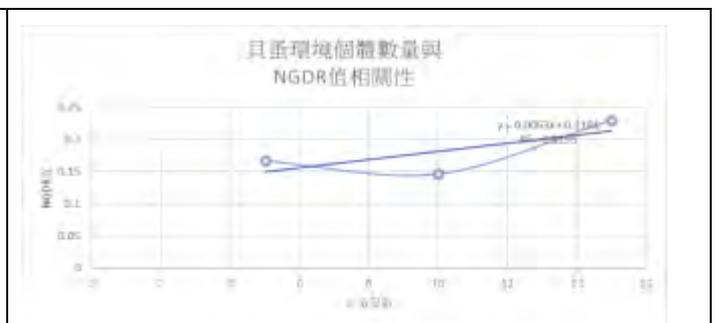


圖 44、貝蚤環境個數數量與 NGDR 值相關性

進行相關性分析後發現：貝蚤的數量與移動的平均速率成高度的負相關，貝蚤在數量少的環境，移動速率較快；在數量多的環境，移動速率較慢。貝蚤的數量與移動的 NGDR 值成

正相關，顯示貝蚤在數量少的環境 NGDR 值較小，路徑大於位移，表示繞圈情形明顯；在數量多的環境，NGDR 值較大，路徑與位移較接近。

(二) 光

實驗之前曾觀察到貝蚤平時都待在容器底部，關燈時發現貝蚤竟然從底部移至水面上，對此我們設計實驗進行貝蚤對於光的反應實驗。(每組的 n=20)

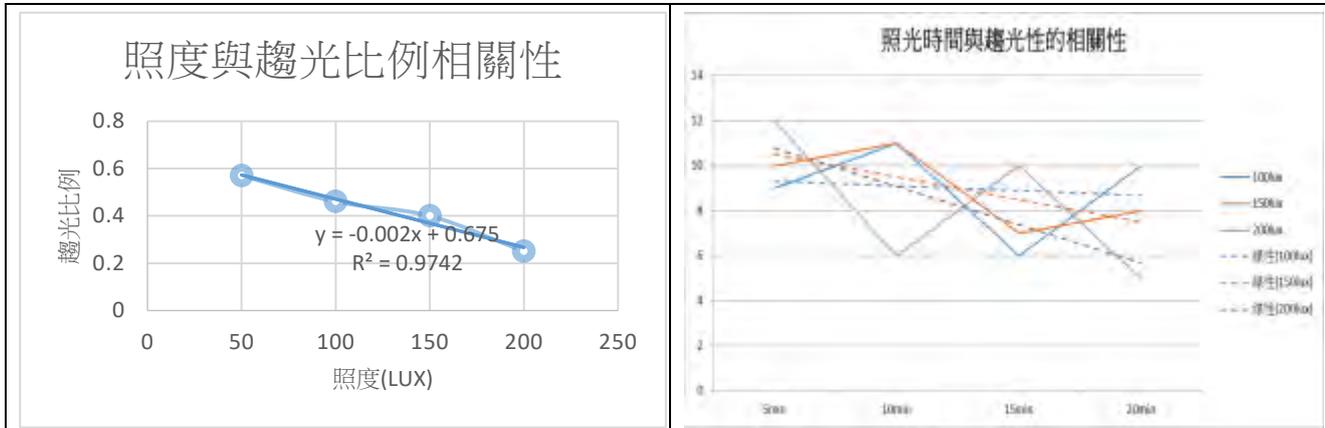


圖 45、光的實驗結果 實驗結果顯示：照度愈大，貝蚤越趨向照度低的環境移動，並且成高度的負相關，也就是趨光比例愈低（即負趨光性愈顯著），且極具關連性；我們也分析時間長短是否會影響趨光性的比例，結果顯示時間對較強照光的組別較明顯，都顯現負趨光性。

(三) 溫度

水中小生物對於環境的敏感性高，也因此我們也想知道環境溫度的高低對於貝蚤的平均速率與 NGDR 值是否有影響。(每組的 n=20)

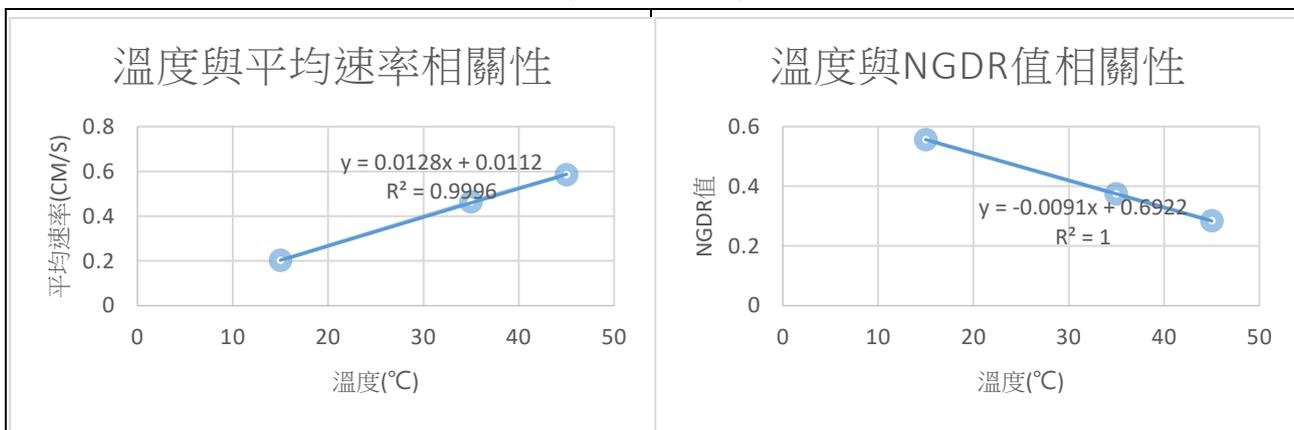


圖 46、溫度的實驗結果 溫度越高，貝蚤的平均速率愈大；溫度越高，NGDR 愈小，顯示高溫的環境下，貝蚤在環境中會增加移動的距離，也就是活動力增加。

(四) 刺激

我們進行丟球的實驗之後，比較貝蚤的運動速率是否會因為接受到此刺激物的影響而改變，同時也計算貝蚤與刺激物的距離，可以得知貝蚤是否有逃離的反應。(n=10)

1. 貝蚤受刺激後的運動速率

在這個實驗當中，小球落下的時間是第 34.03 秒。圖中綠色三角形即代表 34.03 秒，我們取該點的前 10 秒與後 10 秒做 v-t 圖。從下頁圖表中可以發現貝蚤在遭遇此刺激時，會停止或減慢速率，之後再恢復原先的運動模式。

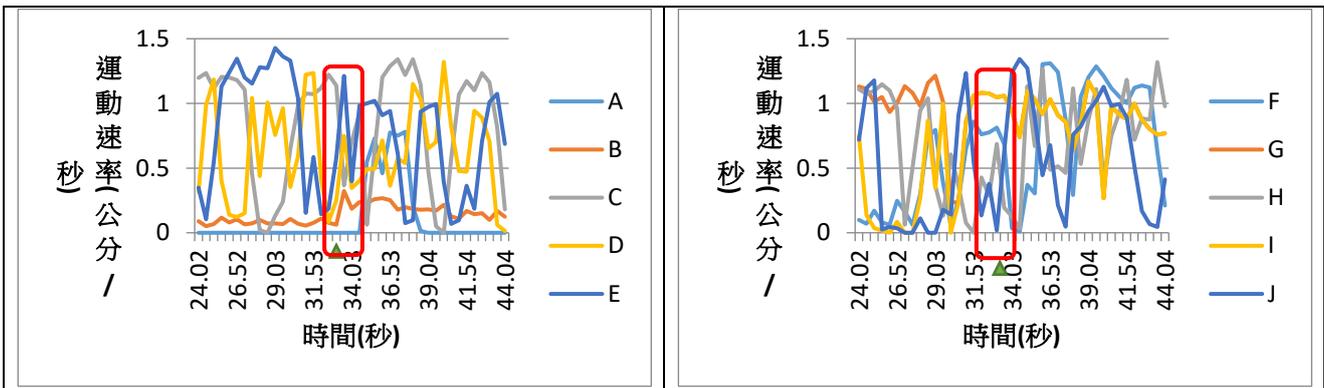


圖 47、貝蚤受刺激後的運動速率

2. 貝蚤與刺激物的距離

在這個分析當中，我們可以看到刺激物落下之後小球與貝蚤之間的距離變化，從圖中可發現，貝蚤並沒有排斥或者是接近刺激物的行為。

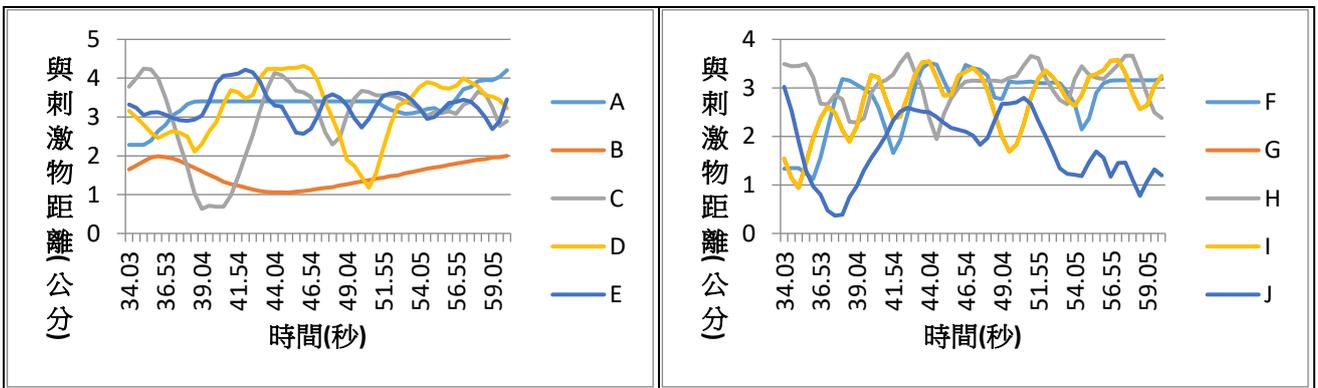
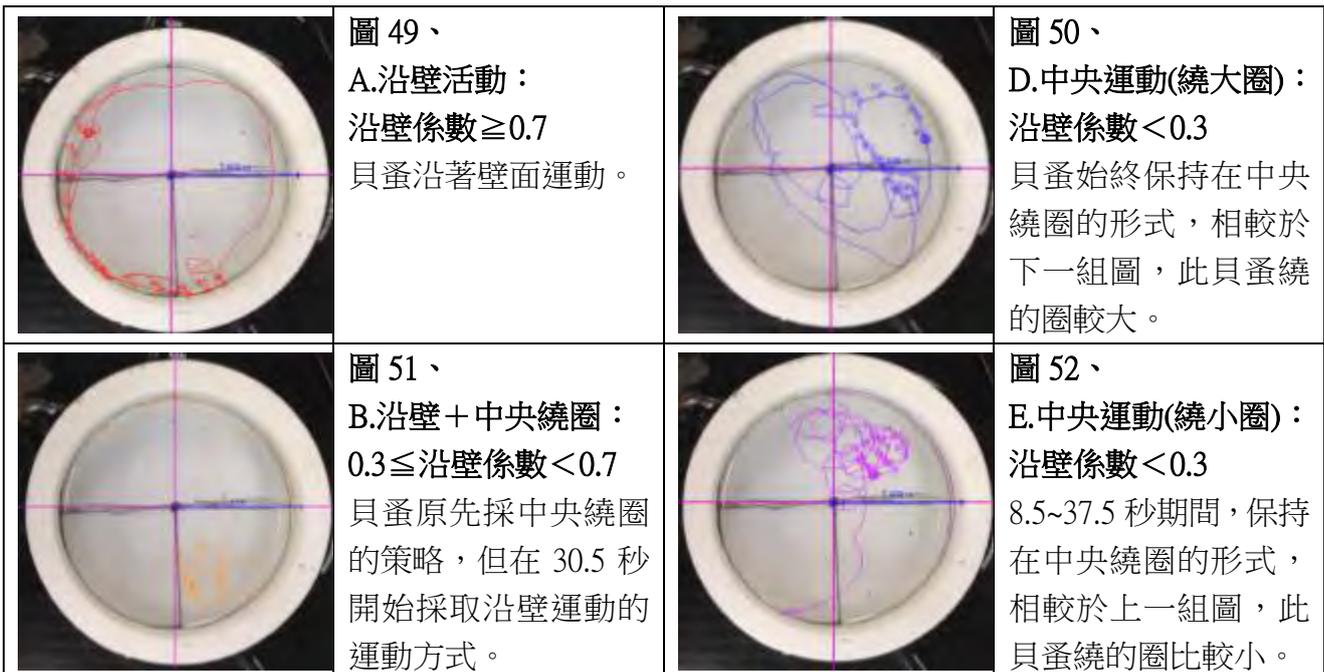
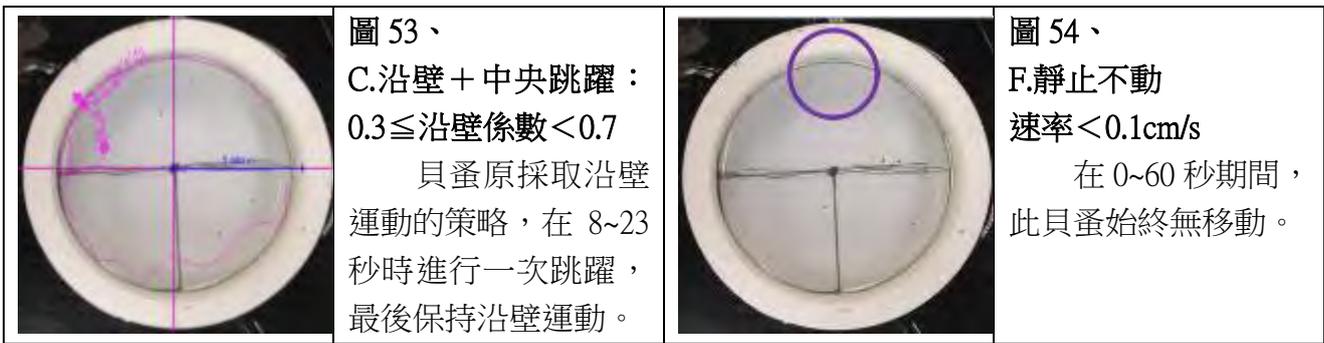


圖 48、貝蚤受與刺激物的距離

(五) 空間

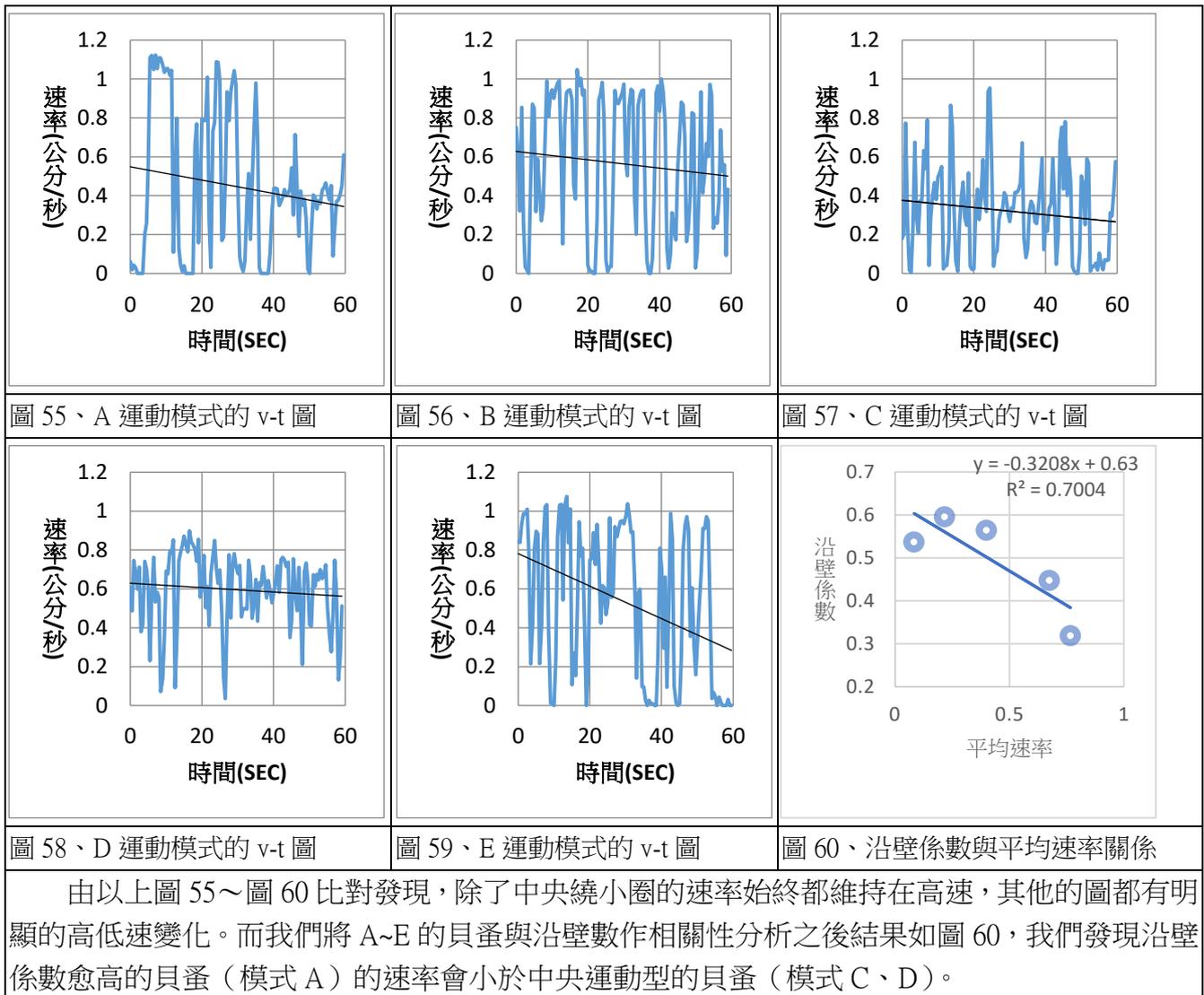
我們在進行分析後發現，貝蚤在實驗容器中，大致上可分為沿壁、停止、跳躍、繞圈等，其中繞圈的部分只要是順時針旋轉必保持順時針，反之亦然，且繞的圈面積大小不等。我們發現貝蚤有六種基本的活動模式。我們以圓形外環=5cm 的影片作為範本。





1. 不同移動形式的 v-t 圖

我們將上述 A~E 形式運動速率與經過時間製成 v-t 圖，整理如下圖所示。



由以上圖 55~圖 60 比對發現，除了中央繞小圈的速率始終都維持在高速，其他的圖都有明顯的高低速變化。而我們將 A~E 的貝蚤與沿壁數作相關性分析之後結果如圖 60，我們發現沿壁係數愈高的貝蚤（模式 A）的速率會小於中央運動型的貝蚤（模式 C、D）。

2. 貝蚤的沿壁行為

貝蚤的活動行為可以區分為中心或沿壁活動，我們計算貝蚤活動平均速率和沿壁係數。我們定義沿壁區域為離壁 5mm 以內，其他區域為中心區域。

沿壁偏好係數	在方形的組別裡，可以再細分為沿邊與沿角；而在回字形的
= $\frac{\text{沿壁時間}}{\text{測定總時間}}$	組別裡，可以再細分為靠近內部圓環的「凸曲面區域」，還有靠近
	外部圓環的「凹曲面區域」。

我們算出貝蚤的平均速率、沿壁係數，再將所有數值平均之後，與空間大小做相關性的分析，得到以下結果：

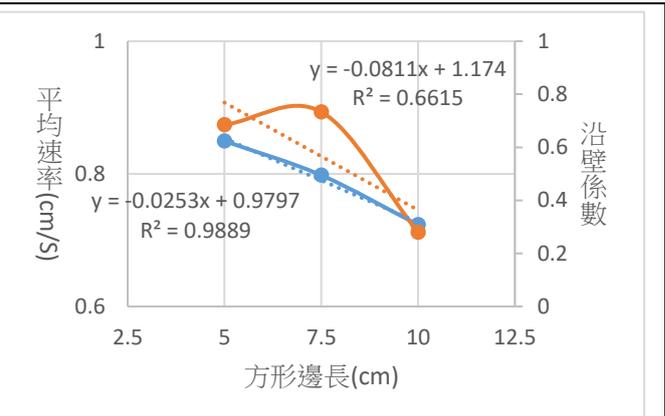
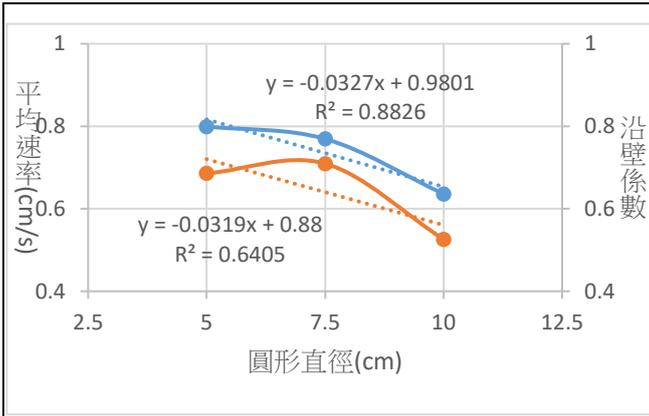


圖 61、圓形 - 平均速率、沿壁係數與空間關係

圖 62、方形 - 平均速率、沿壁係數與空間關係

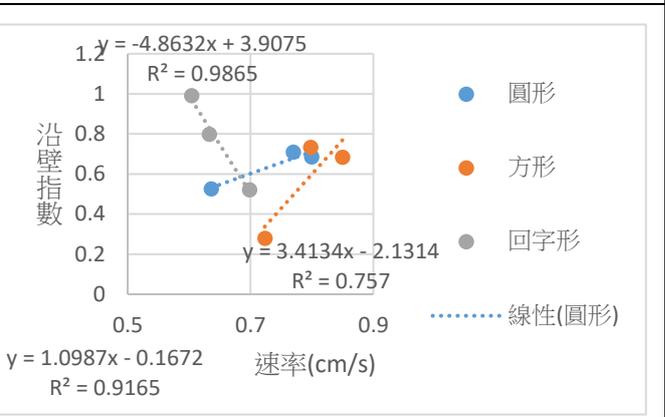
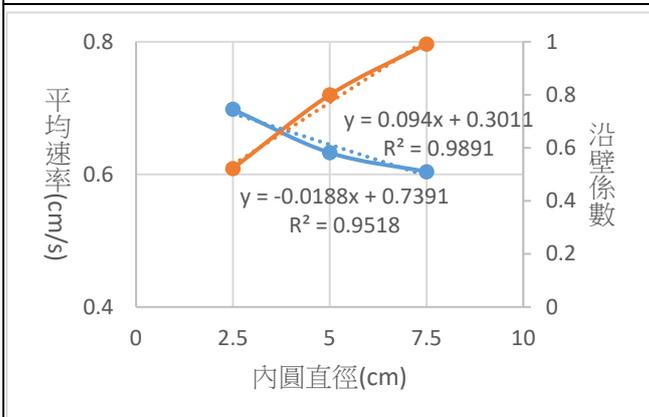


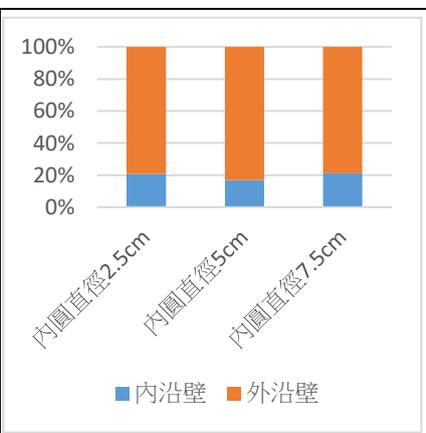
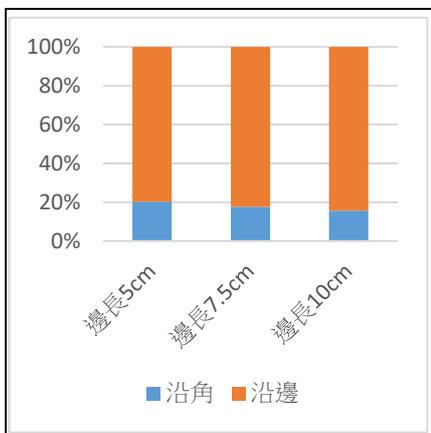
圖 63、回字形 - 平均速率、沿壁係數與空間關係

圖 64、各形狀空間的貝蚤速率與沿壁指數關係

圖 61~圖 64 中的藍色線段代表平均速率，橘色線段代表沿壁係數。從以上圖表可以看出，在圓形和方形的組別中，貝蚤的移動速率會隨著空間增大而降低，只有回字形的組別例外；而在沿壁係數的部分，三組都呈現空間愈大沿壁係數愈小的結果。

我們將貝蚤速率與沿壁係數作相關性分析之後發現，在圓形和方形的組別裡，兩者數值呈現高度正相關，表示速率愈慢，沿壁指數愈小；而在回字形組別則恰好相反，速率愈慢，沿壁指數愈大。

我們又計算沿角、沿邊和內沿壁、外沿壁的比例分析，結果如下圖所示：



從方形的沿角沿邊比例可發現，沿角比例約略占總沿壁比例的 20%，比重相當高，而比例會隨著容器增大而下降。

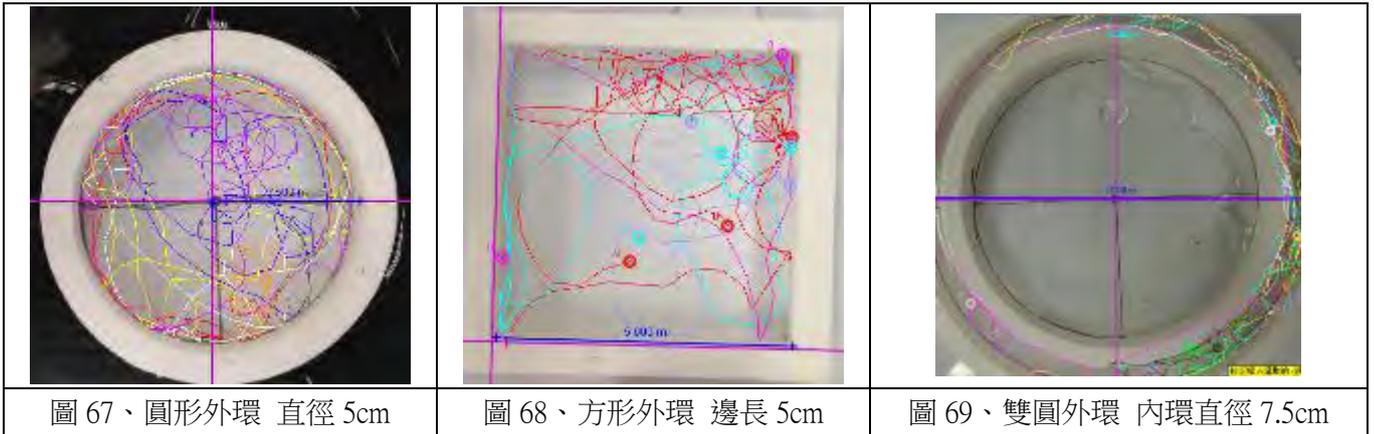
從回字形的內、外沿壁的比例可發現，內沿壁比例比重約為 20%，顯示大多數的貝蚤沿壁行為是發生在外圈。

圖 65、沿角、沿邊比例

圖 66、內、外沿壁比例

3. 各形狀容器貝蚤運動特色

實驗中我們每一組都放置 10 隻貝蚤，其活動軌跡如下圖所示：



- (1) 圓形：貝蚤多採取沿壁、中央繞圈等運動方式。
- (2) 方形：貝蚤會聚集在容器的直角停留一段時間。
- (3) 回字形：貝蚤會在容器兩側徘徊，並較少轉變運動方向。

三、 交互關係實驗

(一) 貝蚤與貝蚤種內的行為交互關係

我們將貝蚤放置於顯微鏡底下觀察之後發現兩隻貝蚤相遇之後，會造成貝蚤的軌跡偏移或是停止，結果如下：

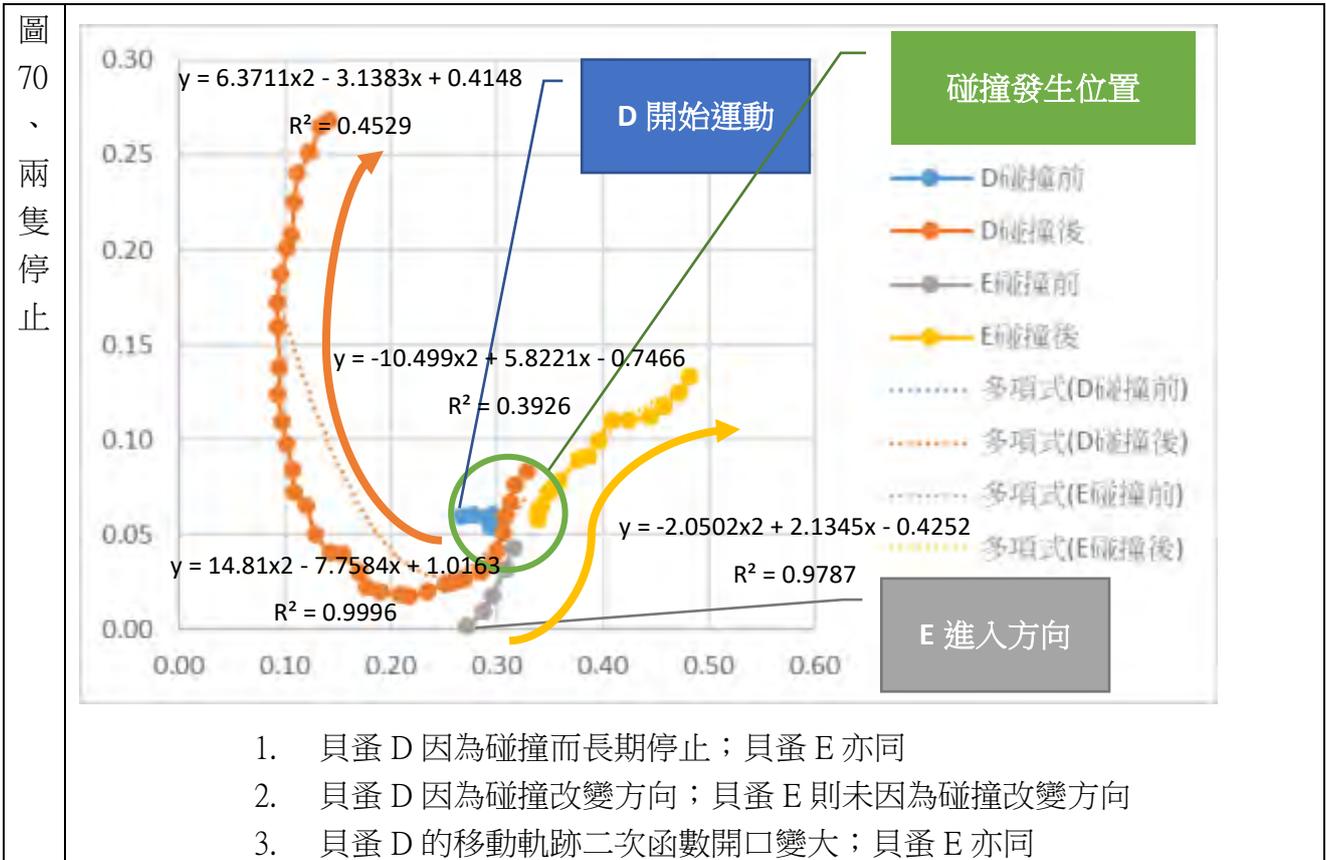
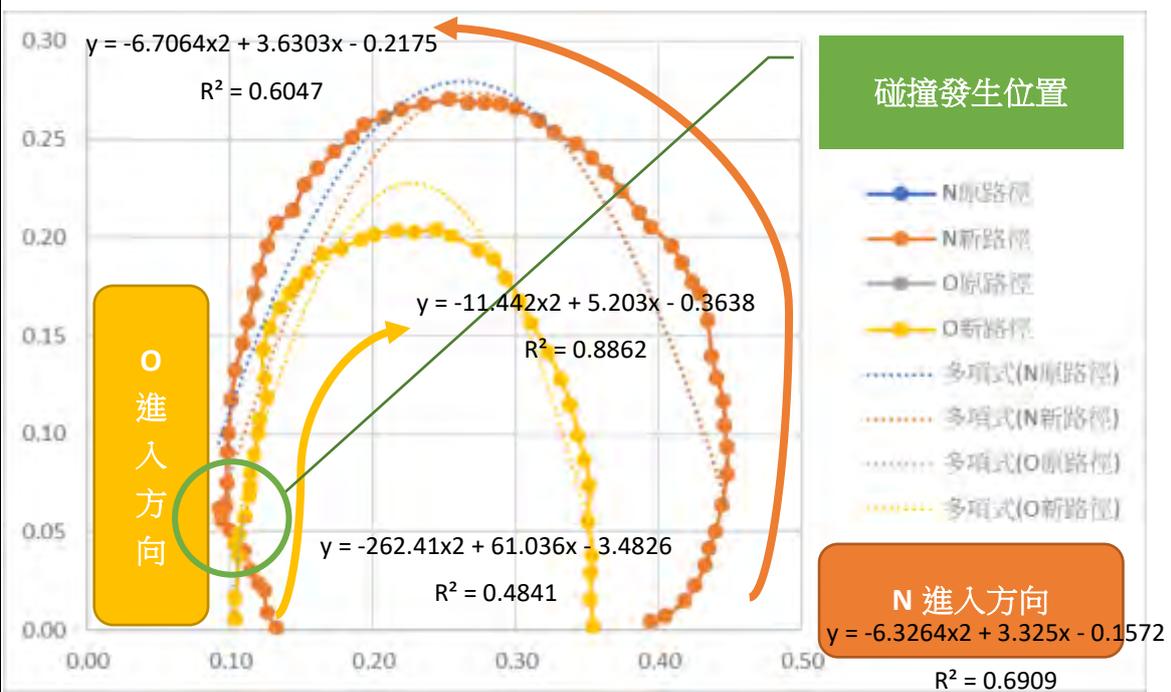
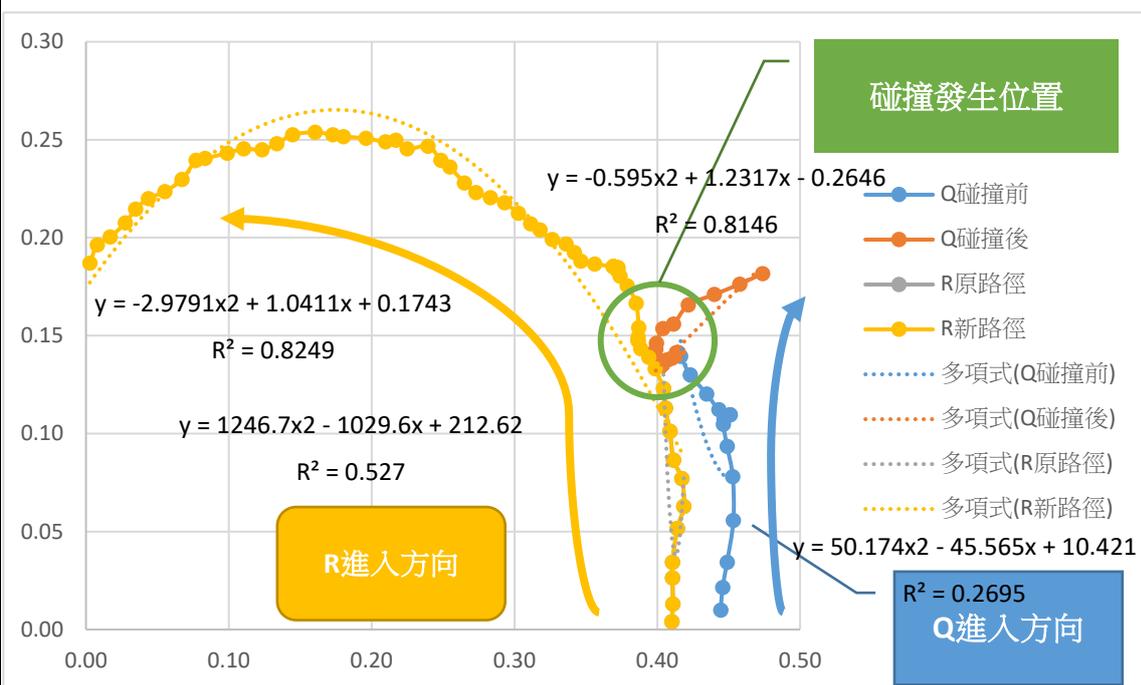


圖 71、皆未停止



1. 貝蚤 N 未因為碰撞而長期停止；貝蚤 O 亦同
2. 兩者發生的僅為輕微碰撞，並未改變方向
3. 貝蚤 N 的新移動軌跡二次函數開口變大；貝蚤 O 則變小

圖 72、一隻停止



1. 貝蚤 Q 因為碰撞而長期停止；貝蚤 R 則未因碰撞而長期停止
2. 貝蚤 Q 因為碰撞改變方向；貝蚤 R 則未因為碰撞改變方向
3. 貝蚤 Q 的移動軌跡二次函數開口變大；貝蚤 R 亦同

(二) 貝蚤與水蚤種間的交互關係

我們將這個實驗分為短期觀察與長期觀察兩組，短期觀察主要看兩者的運動速率和 NGDR 值的變化；長期觀察主要看兩者數目消長的變化。

1. 短期觀察

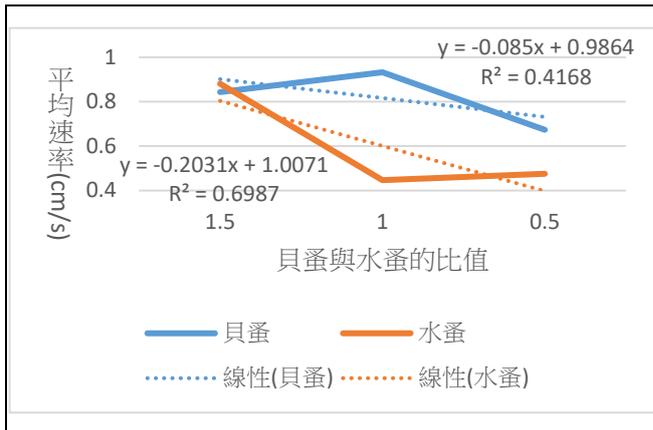


圖 73、貝蚤與水蚤平均速率變化

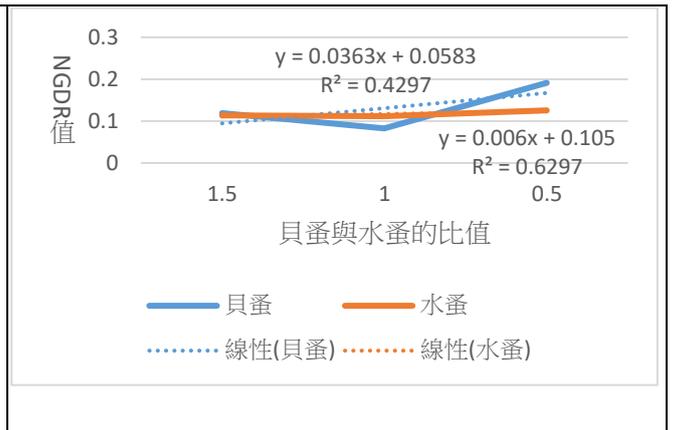


圖 74、貝蚤與水蚤 NGDR 值變化

由圖中可知：當水蚤的比例增加時，貝蚤和水蚤的速率都會下降，NGDR 值都會上升。

2. 長期觀察

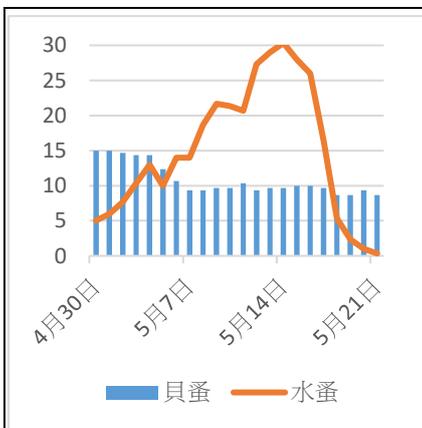


圖 75、貝蚤 15 水蚤 5 數量消長

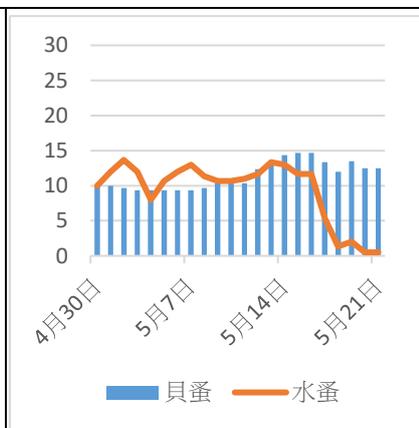


圖 76、貝蚤 10 水蚤 10 數量消長

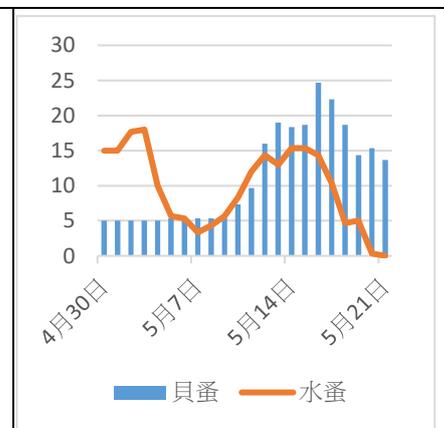


圖 77、貝蚤 5 水蚤 15 數量消長

由圖中可以得知：貝蚤和水蚤之間無明顯交互關係，但是透過數量消長可以看見水蚤的繁殖速度較貝蚤來得快，但是族群數量的穩定性不如貝蚤。

(三) 貝蚤與米蝦種間的交互關係

我們將 1 隻死米蝦和 10 隻貝蚤放置於同一個培養皿當中，等待一個小時之後錄影一分鐘，計算貝蚤與米蝦之間的距離，再擷取其中與貝蚤距離小於 1 公分的時間，結果如下表所示：

表 6：貝蚤與米蝦距離小於 1 公分的時間

貝蚤編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距離小於 1 公分的時間 (單位:秒)	0	0	31.5	0	0	22	0	0	0	0

由上表數據可知，貝蚤無明顯接近或遠離貝蚤的現象。

四、 環境指標實驗

(一) pH 值

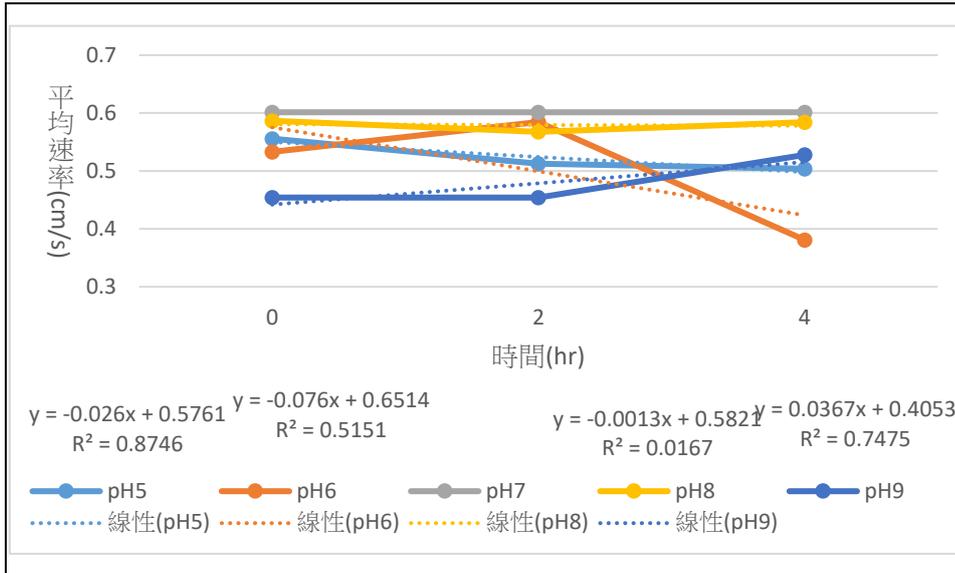


圖 78、 pH 值與平均速率關係

從圖中可以看出所有組別的平均速率均小於對照組，且多數呈現減慢的趨勢。

分析數據也發現 pH5 的貝蚤組別的停止數目最多。

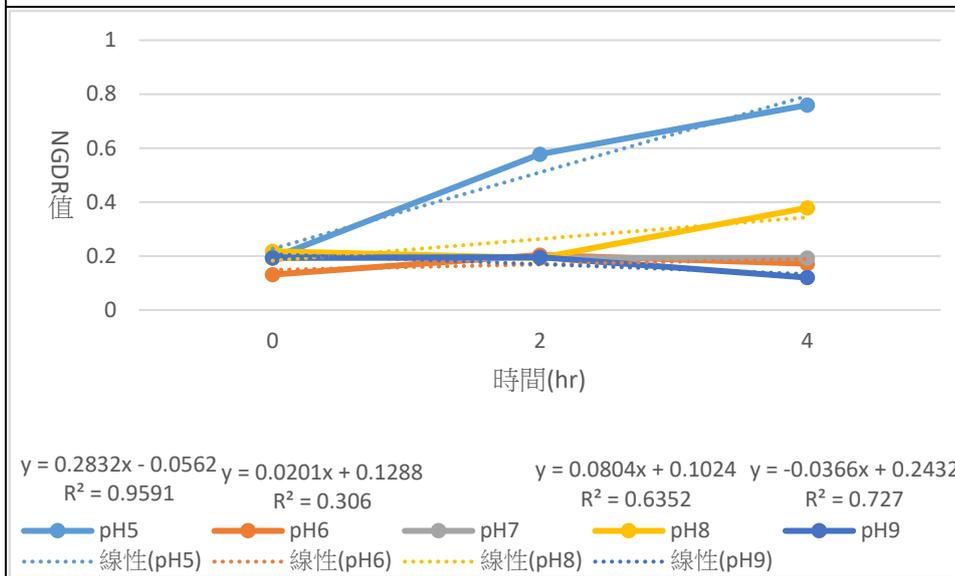


圖 79、 pH 值與 NGDR 值關係

多數組別的貝蚤 NGDR 值會呈現上升的趨勢，顯示移動路徑常縮減。

(二) 鹽度

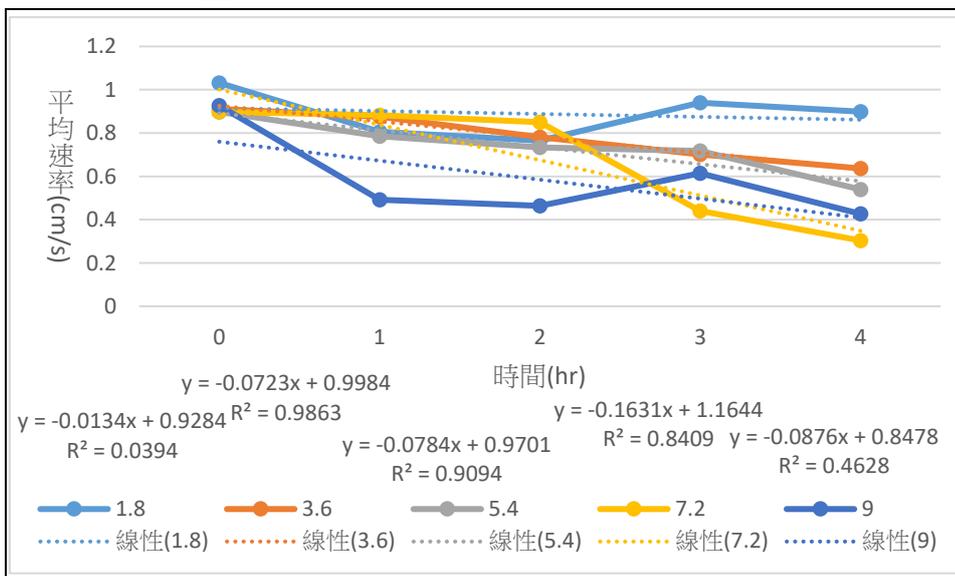


圖 80、鹽度與平均速率關係

所有貝蚤的運動速率都呈現出下降的趨勢，NaCl 濃度愈高，貝蚤的運動速率愈慢。

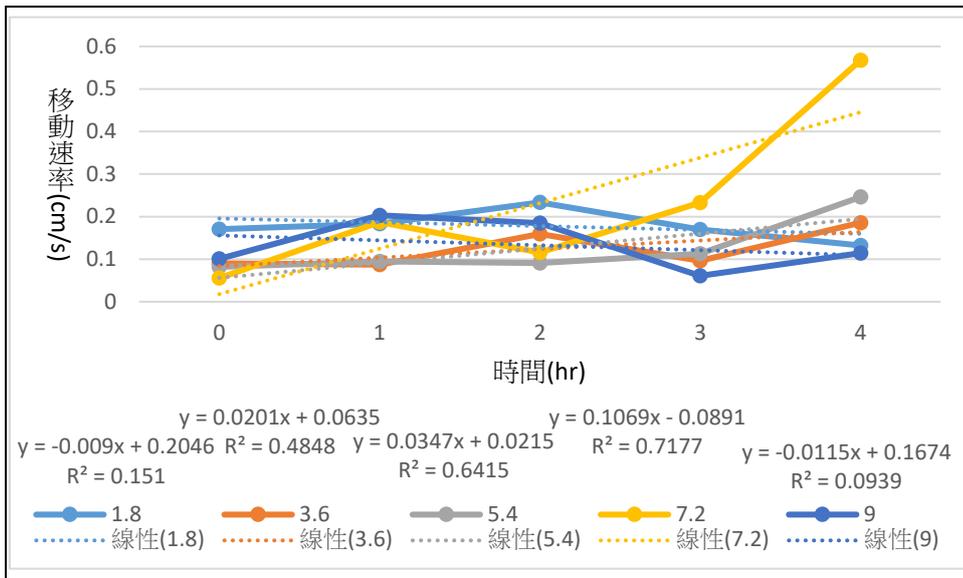


圖 81、鹽度與 NGDR 值關係

1.8mg/L、3.6mg/L、5.4mg/L、9 mg/L 鹽度，其貝蚤的 NGDR 值，隨時間增加皆些許上升。實驗中以 7.2mg/L 的 NGDR 值，在四小時後上升比例最高。

(三) 重金屬離子溶液

1. 鉛離子

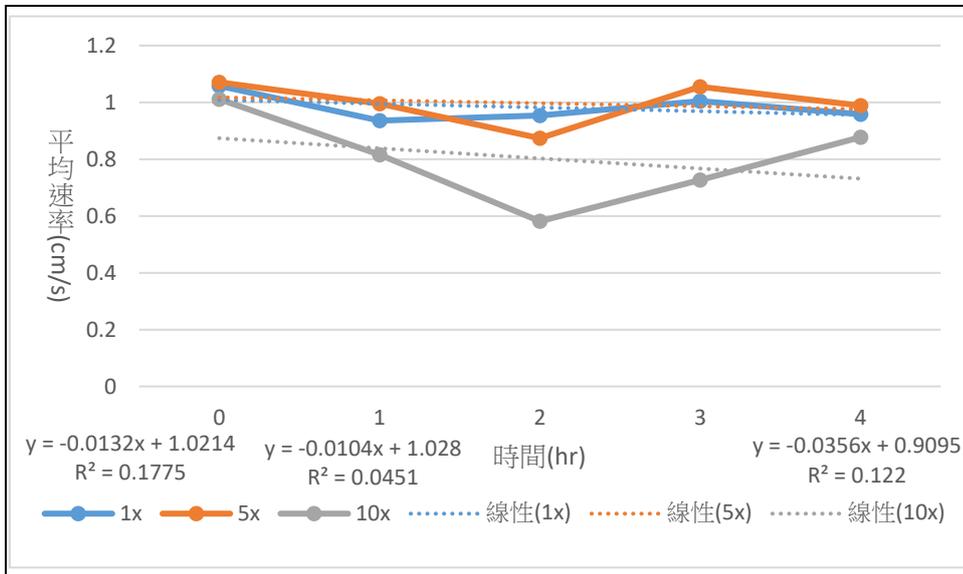


圖 82、鉛離子放流水標準倍數與平均速率關係

鉛離子濃度對於貝蚤速率在 1 倍和 5 倍時未見顯著影響；而 10 倍的平均速率都小於其他兩者。

2. 銅離子

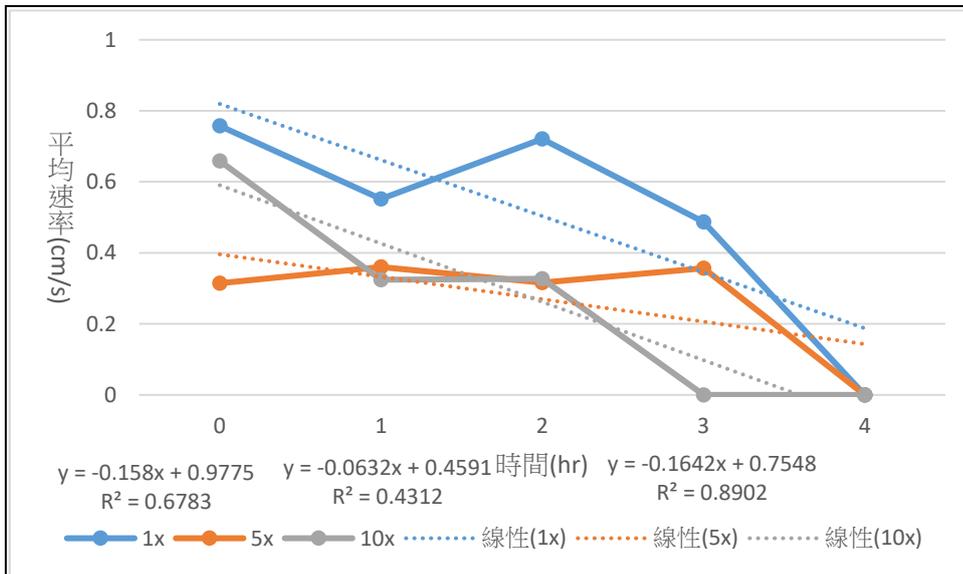


圖 83、銅離子放流水標準倍數與平均速率關係

銅離子組的三種濃度組別最後貝蚤皆全數死亡。其中 10 倍的死亡速度和活動力下降的速度最快，5 倍次之，1 倍最慢。

3. 鋅離子

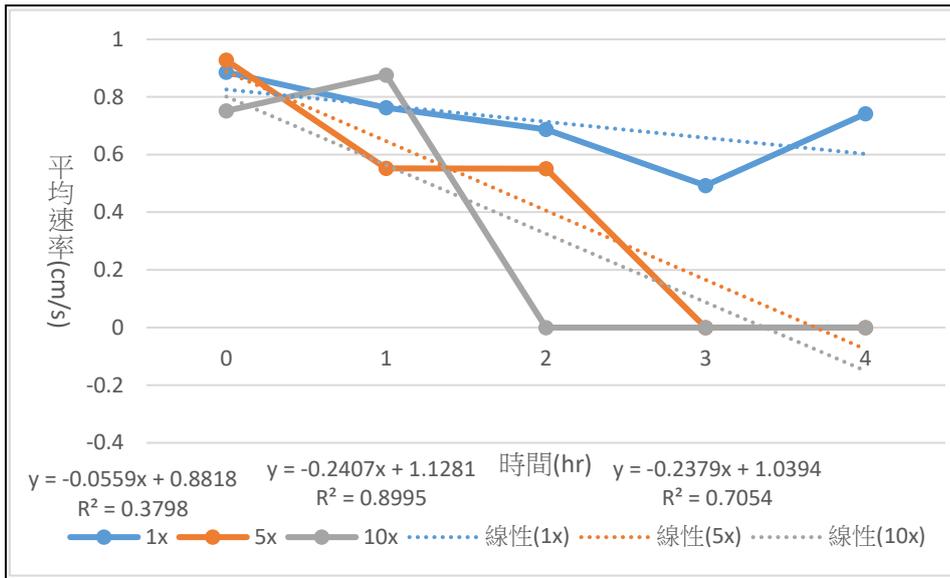


圖 84、鋅離子放流水標準倍數與平均速率關係

鋅離子組的 5 倍和 10 倍的組別，最後貝蚤皆全數死亡。

其中 10 倍的死亡速度和活動力下降的速度最快，5 倍次之。1 倍活動力雖下降，但貝蚤未全數死亡。

4. 鎳離子

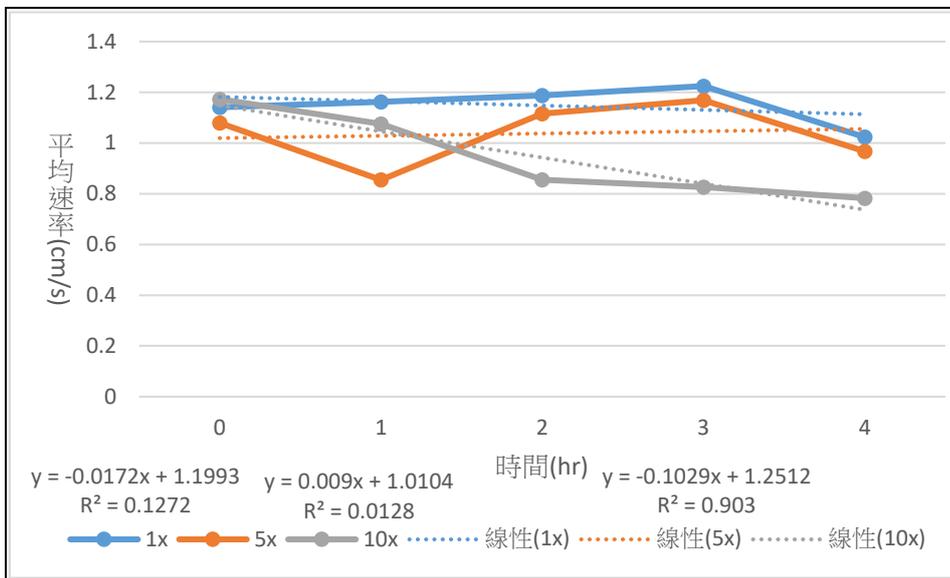


圖 85、鎳離子放流水標準倍數與平均速率關係

鎳離子濃度對於貝蚤速率在 1 倍和 5 倍時未見顯著影響；而 10 倍的平均速率有下降趨勢，且都小於其他兩者。

5. 鈷離子

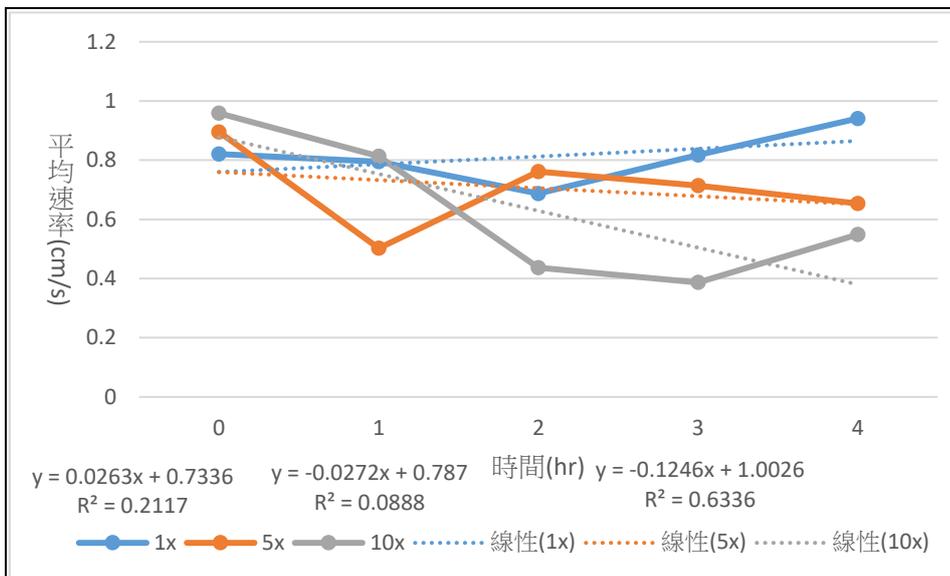


圖 86、鈷離子放流水標準倍數與平均速率關係

鈷離子濃度對於貝蚤速率 1 倍時未見顯著影響，而 5 倍時其速率有稍微下降些許的趨勢，10 倍的平均速率下降趨勢更為明顯。

陸、討論

一、基本特徵觀察

(一) 外型輪廓：

1. 我們都是由貝蚤的上方進行拍攝，從貝蚤上方的輪廓分析中，測量了長軸及短軸，發現不論是墨綠色或紅棕色個體其長軸及短軸皆屬於正相關，且其長短軸比值介於 1.3~1.4。
2. 紅棕色與墨綠色個體的眼睛距離身體中心之長度皆相同，而我們更進一步分析貝蚤左右兩側輪廓數值，發現 A1 到 A6 與 B1 到 B6 為高度正相關，顯示貝蚤為兩側對稱顯著的生物體。
3. 因貝蚤頭部的角度小於尾部的角度，以致整個貝蚤的外形呈現類似雞蛋的圓滑曲線形狀，故在水中的移動速度也會較快。

(二) 殼紋觀察：

1. 研究中的貝蚤殼紋顏色主要分成兩種：紅棕色和墨綠色斑紋，紅棕色個體斑紋主要分布在邊緣，且大多數眼睛兩側都有橘色圓點，身體透光度也較高；墨綠色個體的紋路為條紋狀，身體透光度較低，屬半透明狀態。
2. 我們剛開始用肉眼觀察時覺得貝蚤為深色，但經過顯微觀察後才發現並非全部個體皆屬深色殼紋，有的個體為部分透明，推測是因為貝蚤生活在水中底部區域，所以不論紅棕色或墨綠色皆與環境中的底棲顏色相近，具有隱蔽性。

二、行為模式觀察

(一) 光對貝蚤的影響

1. 在照光強度實驗中，貝蚤展現出負趨光性，這與平時觀察的結果——貝蚤多棲息於盆底或漂浮的枯葉附近相同，並跟我們做的殼紋分析結果有相呼應。
2. 在照光長度實驗中，照度 200lux 及 150lux 環境中，隨著時間增加，貝蚤照光環境的數量逐漸減少；而在 100lux 以下的實驗較不顯著，推測強光表現出的負趨光行為會比較明顯，而弱光的狀況則較不顯著。

(二) 溫度對貝蚤的影響

1. 溫度越高，貝蚤的平均速率愈大，且 NGDR 愈小。顯示高溫的環境下，貝蚤在環境中會增加移動的距離，也就是活動力增加。
2. 貝蚤在低溫時的活動力下降，高溫時的活動力則上升，且相關性極高，代表溫度對於介形蟲的影響力極大。

(三) 外界刺激對貝蚤的影響

1. 在實驗中我們丟擲小球，觀察貝蚤的行為，結果顯示在小球附近的貝蚤受到刺激物影響之後，會採取先暫停再快速地離開，而經過一段時間後，部分貝蚤就開始靠近刺激物，推測是因貝蚤在自然界中天敵較少，所以對外來物無明顯激烈反應。

(四) 空間對於貝蚤行為模式的影響

1. 在空間的實驗中，我們簡單歸納出貝蚤的六種運動形式，發現繞圈或沿壁都有可能是一種探查環境或避敵的表現，且沿壁係數與平均速率具一定關聯性。

2. 在圓形和方形的組別中，貝蚤的移動速率會隨著空間增大而降低，只有回字形組別例外；在沿壁係數的部分，三組都呈現空間愈大沿壁係數愈小的結果，顯示在較大的空間中，貝蚤的密度下降，運動的速率也隨之下降。活動空間大時沿壁的機率較小，推測此為沿壁數下降的原因。
3. 從方形的沿角沿邊比例可發現，沿角比例約略占總沿壁比例的 20%，比例相當高，但此狀況會隨著容器增大而下降，顯示有牆角的環境中，貝蚤會不斷的在角落來回移動。從回字形的內、外沿壁的比例可發現，內沿壁比例約為 20%，顯示大多數的貝蚤沿壁行為是發生在外圈，推測因外圈的沿壁面積較大，所以貝蚤多在外圈活動。

三、交互關係實驗

(一) 貝蚤與貝蚤種內的行為交互關係

觀察貝蚤在水中相遇的狀況，發現三種不同相遇模式：

1. 兩隻貝蚤碰撞後，其中一隻停止並改變運動方向，另一隻則維持原方向。
2. 碰撞後沒有停止或改變方向，維持原方向前進。
3. 兩隻貝蚤碰撞後，兩隻都停止，而且其中一隻改變運動方向，另一隻則維持原方向。顯示在碰撞過程中，有可能產生暫停而後再繼續運動的行為模式。

(二) 貝蚤與水蚤種間的行為交互關係

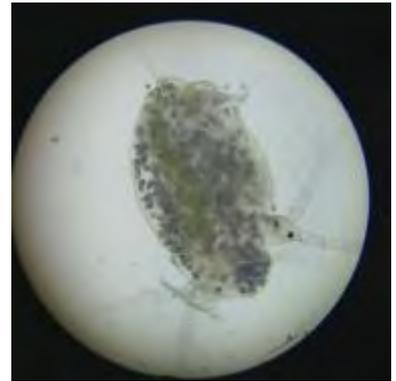
1. 短期觀察

當兩者同時存在時，水蚤數量增加會讓貝蚤的速率跟 NGDR 值下降，推測因為水蚤是採取快速而且類似跳躍性的運動方式，對於周圍的其他生物干擾較大，也因此貝蚤的速率下降。

2. 長期觀察

無論是哪一組貝蚤與水蚤都可以發現水蚤的族群數量上升的較快，也下降的較快，族群穩定性較低；而貝蚤的趨於穩定的狀態。

3. 此外研究中也觀察到水蚤會被纖毛蟲的攻擊（如附圖所示）而貝蚤則無，推測是因為貝蚤有殼，所以不會受外來物種侵襲。



(三) 貝蚤與米蝦種間的行為交互關係

在網路上水族討論中曾看到：貝蚤可能有攻擊米蝦或妨礙米蝦脫殼、抱卵的行為，然而我們在觀察中發現，貝蚤只食用蝦子的殼，並無食用蝦子的其它構造，也沒有攻擊蝦子的行為。

四、環境指標實驗

(一) pH 值的實驗

貝蚤對酸性的敏感程度較鹼性的敏感程度高，推測是因酸性會侵蝕其瓣殼（因瓣殼的成分為碳酸鈣容易被酸性腐蝕），因此相較之下貝蚤不喜酸性的環境。

我們上網查詢資料，發現降雨的酸鹼值平均為 pH4.5，屬於貝蚤有反應的範圍之內，因此可考慮作為環境指標，也希望能藉由貝蚤的瓣殼判斷其酸性程度。

(二) 鹽度的實驗

較低濃度組別的 NGDR 值小於高濃度組別，推測貝蚤為淡水的生物，在高滲透壓環境中會使貝蚤的生理異常而無法正常活動。

(三) 重金屬離子溶液的實驗

貝蚤對於 1 倍標準濃度反應變化輕微，但於 10 倍的放流水標準來看，隨著在溶液中時間增加，其貝蚤的平均速率下降、NGDR 值上升，顯示高濃度的重金屬離子環境會影響貝蚤的活動能力。

柒、結論

一、基本特徵觀察

(一) 紅棕色的貝蚤或是墨綠色的貝蚤，其長短軸比值都介於 1.3~1.4。

(二) 墨綠色或是紅棕色貝蚤其 A1 到 A6 與 B1 到 B6 都屬於高度正相關，顯示貝蚤的外型為顯著的兩側對稱。

(三) 貝蚤殼紋有三種類型：紅棕色殼紋有橘點、紅棕色殼紋無橘點、墨綠色。推測貝蚤生活在水中底部的區域，不論紅棕色或是墨綠色的個體都與環境中的底棲顏色相近，具有隱蔽性。

二、行為模式觀察

(一) 在光照的實驗中，發現貝蚤有負趨光行為。

(二) 在溫度的實驗中，發現溫度越高，貝蚤的平均速率愈大，且 NGDR 愈小，顯示高溫的環境下，貝蚤在環境中會增加移動的距離，也就是活動力增加。

(三) 在刺激的實驗中，發現貝蚤面對刺激物採取的行動為先暫停再快速地離開。

(四) 在空間的試驗中，發現貝蚤的運動行為大致可分為沿壁、停止、繞圈、跳躍等機制，其中又以沿壁的個體數最多。貝蚤的沿壁時間比例與所在空間大小成反比，但是可能與時間成正比。

三、交互關係實驗

(一) 貝蚤與貝蚤同種內的交互關係

貝蚤與貝蚤相遇後，可能產生三種情形：

1. 碰撞後，其中一隻停止，另一隻維持運動。
2. 碰撞後，兩者皆未停止，並朝原方向運動。
3. 碰撞後，兩隻貝蚤都停止。

(二) 貝蚤與水蚤異種間的交互關係

1. 短期觀察：水蚤比例增加會使貝蚤速率與 NGDR 值下降。
2. 長期觀察：水蚤族群數量繁衍速度較快，但是一旦達到環境負荷量，則死亡速度也較貝蚤快；而貝蚤的族群數目則趨於穩定狀態。

(三) 貝蚤與米蝦異種間的交互關係

實驗中發現貝蚤沒有趨近或是背離米蝦的行為，但是在觀察中我們發現貝蚤會靠近米蝦脫下的殼。

四、環境指標實驗

酸性、高鹽份和含有重金屬離子（尤以鋅、銅）的環境會使貝蚤活動力下降。

捌、參考資料及其他

- 一、 Yoshitaro Akiyama , Kiyokazu Agata , Takeshi Inoue (2015) . Spontaneous Behaviors and Wall-Curvature Lead to Apparent Wall Preference in Planarian. PLOS one.
- 二、 李佳螢、張碩珍(2007)。蚤尋活水(2009年臺灣國際科學展覽會)。
- 三、 齊凌岫(民 99)。小擬哲水蚤與其潛在纖毛蟲獵物之行為互動研究。

【評語】 030312

1. 探究貝蚤的外形特徵與行為模式，有初步成果。
2. 關於貝蚤的研究，雖不多但還是有些報告，相較之下，此研究有較深入的探討。此研究所使用的研究方法大致合理可行，部分數據分析亦有應用數學及統計方法。但有些研究似乎為一次性實驗，雖然每組可能有好幾隻貝蚤，建議要有三重複實驗並畫出誤差線。
3. 模擬方式和田間似乎較難貼近，實驗起來之變因應較難控制。貝蚤身體形質和殼紋色彩分布的結果可以應用在什麼地方？
4. 本計畫針對貝蚤體色及其活動行為做很詳細的試驗，瞭解它的活動模式，並對其生活環境的要求，譬如酸度鹽類及重金屬離子的反應都做很詳細的試驗。

摘要

貝蚤的長短軸比值都介於1.3~1.4，外型為顯著的兩側對稱，殼紋分為三種類型：紅棕色殼紋有橘點、紅棕色殼紋無橘點以及墨綠色。移動速率與分布密度成正相關，貝負趨光性；環境溫度愈高，平均速率愈大，NGDR愈小；面對刺激物採取的行動會先暫停再快速地離開。

運動行為大致分為沿壁、停止、繞圈、跳躍等機制，其中又以沿壁的個體數最多。貝蚤相遇後可能會暫停再移動；且貝蚤與水蚤同時存在時，數量並無明顯關係；貝蚤沒有趨向或背離死蝦子的行為。在酸性、高鹽份以及含重金屬離子的環境，皆會使貝蚤的活動力下降。

壹、研究動機

本報告研究的生物為 *Cyclocypris* 屬的貝蚤，屬於介形蟲的一種。

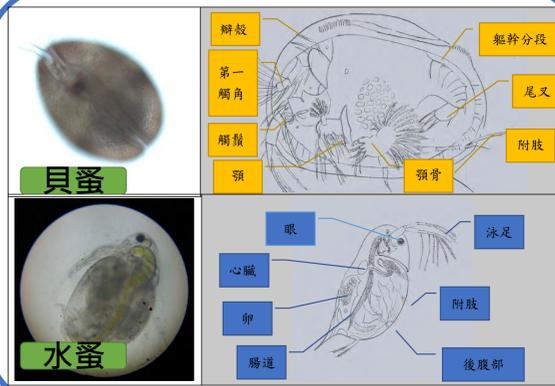
顯微鏡下發現貝蚤的外殼和殼紋十分特別，牠們快速移動的方式也讓我們對其移動模式產生興趣；此外，貝蚤的原生活環境水田和魚缸也常有水蚤或米蝦的存在，牠們之間的互動模式，也成為我們想探究的問題之一。

貳、研究目的

本研究的目的旨在探討貝蚤的特徵、生活型態與移動模式，了解貝蚤的行為模式、偏好環境。

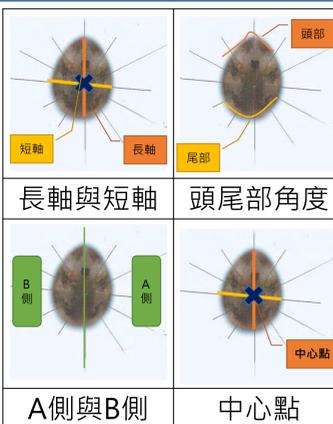
操作變因包含光、溫度、刺激、空間等物理因素，和酸鹼、鹽度、重金屬離子等化學因素，以及貝蚤與貝蚤、貝蚤與水蚤、貝蚤與米蝦的生物交互關係。

參、研究生物

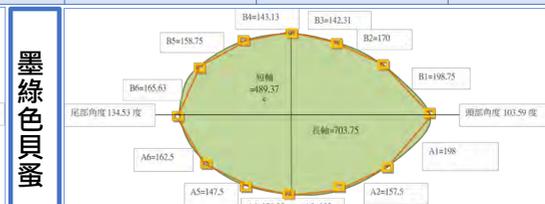
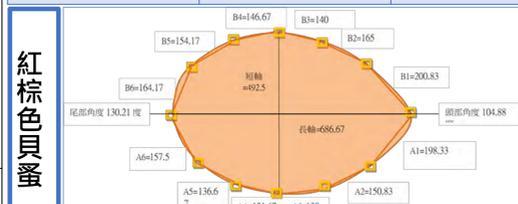


肆、研究過程、方法與結果

(一)、外型觀察

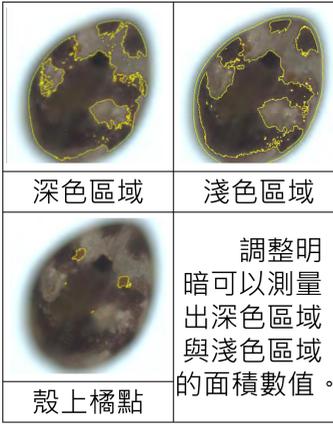


貝蚤	長度平均				角度平均	
	長軸	短軸	長短軸比值	眼睛至中心點	頭部	尾部
紅棕色貝蚤	686μm	492μm	1.41	135μm	104°	130°
墨綠色貝蚤	703μm	489μm	1.46	135μm	103°	134°

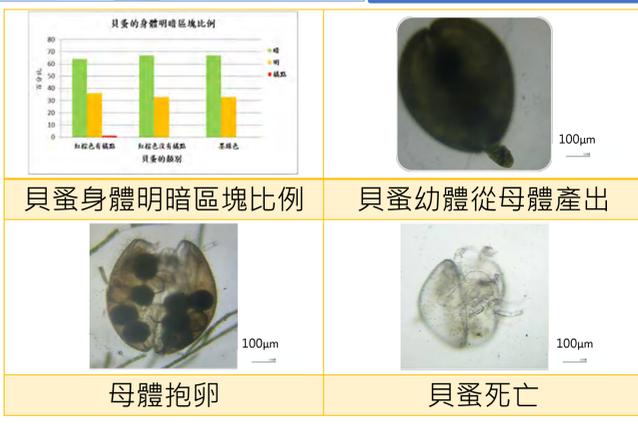


貝蚤外形為顯著的兩側對稱，且兩色貝蚤的輪廓差異小，墨綠色相較較長，紅棕色相較較圓胖。

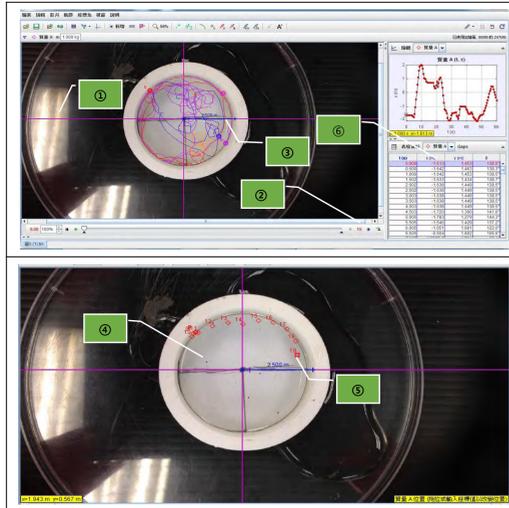
(二)、殼紋觀察



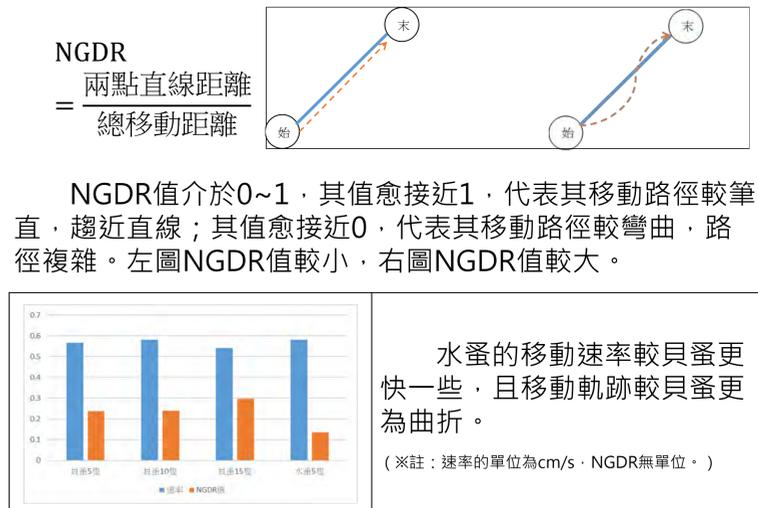
貝蚤種類 (n=98)	A類型	B類型	C類型
圖片			
特徵	<ul style="list-style-type: none"> 紅棕色 有橘點 較透明 	<ul style="list-style-type: none"> 紅棕色 無橘點 較透明 	<ul style="list-style-type: none"> 墨綠色 無橘點 半透明
數目	27	4	67



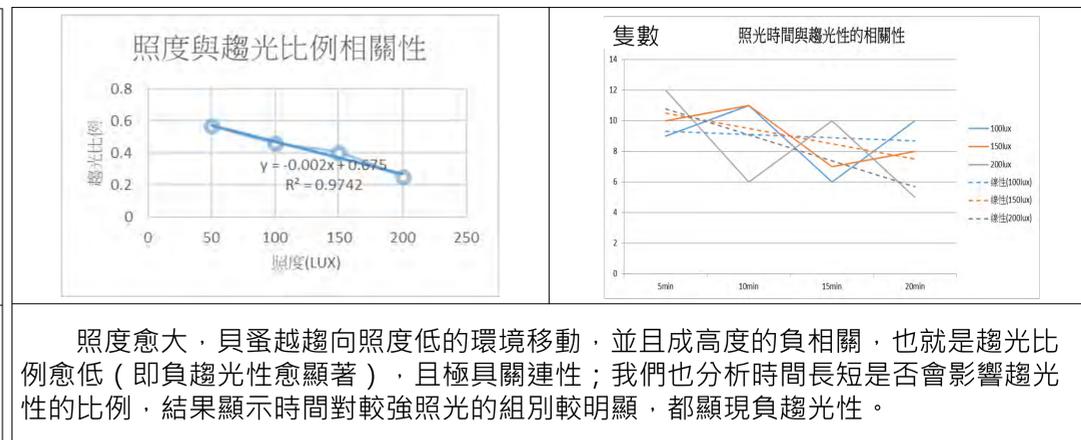
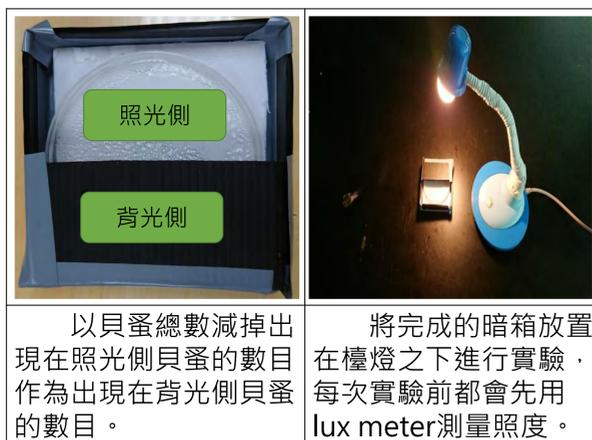
(一)、對照組



- ①設定座標系統：將直角坐標原點設定於影片左下角。
- ②設定時間間隔：每個影格的時間間隔約為0.03秒。
- ③設定比例尺：以使用容器的尺寸作為基準，標示比例尺。
- ④尋找影片中的貝蚤，新增「質點」進行後續追蹤。
- ⑤追蹤貝蚤的移動軌跡，可以製成上圖的軌跡圖。
- ⑥有關貝蚤座標的數據同步顯示於畫面右側。

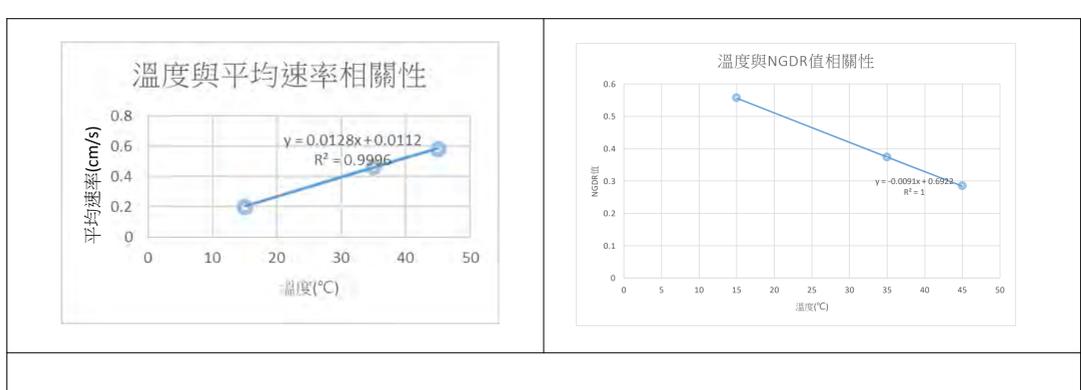


(二)、光

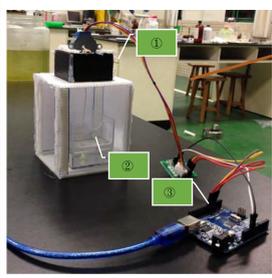


(三)、溫度

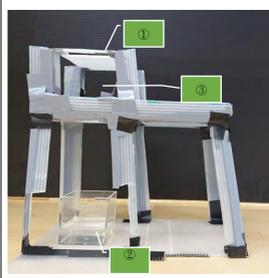
為了瞭解溫度對貝蚤移動模式的影響，我們將10隻貝蚤放置在培養皿進行實驗，放置在溫度分別為15°C、25°C（對照組）、35°C、45°C的水當中，以一分鐘為單位拍攝貝蚤的移動行為，而後再使用Tracker分析影片。



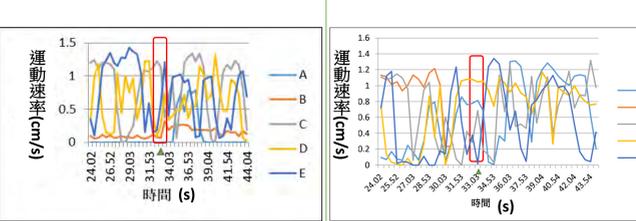
(四)、刺激



此種操作對於貝蚤的影響不大，貝蚤未因為球體的進入產生太大的行為改變我們改以直接丟擲的形式進行實驗。



1. 平均速率
在這個實驗當中，小球落下的時間是第34.03秒。我們取該點的前10秒與後10秒做v-t圖。
貝蚤在遭遇此刺激時，會停止或減慢速率，之後再恢復原先的運動模式。

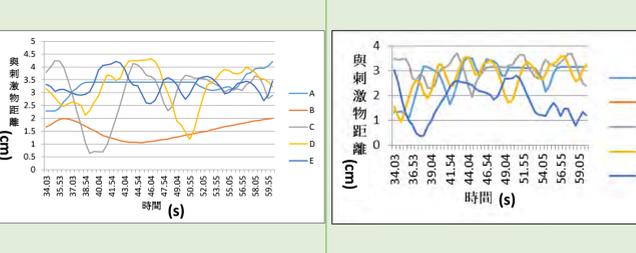


更新實驗設計

附圖中①為伺服馬達，②為直徑0.4cm的刺激物（小球），③為連接筆電以執行程式的Arduino套件。

附圖中①為手機放置處，②為待實驗的貝蚤放置處，③則為丟下刺激物（小球）的地方。

2. 與刺激物距離
在這個分析當中，我們可以看到刺激物落下之後小球與貝蚤之間的距離變化，從圖中可發現，貝蚤並沒有排斥或者是接近刺激物的行為。

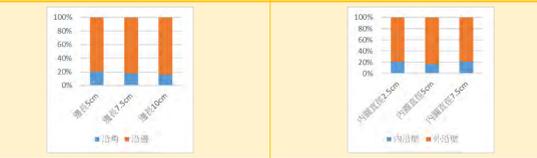


二、行為觀察實驗

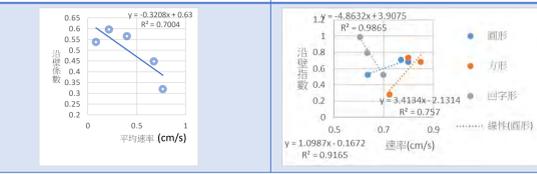
容器外形	圓形	正方形	回字形	六種運動形式	A.沿壁	B.沿壁+繞圈	C.沿壁+跳躍	D.中央繞大圈	E.中央繞小圈	F.靜止不動
3D列印圖形				軌跡						
實際成品				定義	沿壁係數 ≥ 0.7	0.3 ≤ 沿壁係數 < 0.7	0.3 ≤ 沿壁係數 < 0.7	沿壁係數 < 0.3	沿壁係數 < 0.3	速率 < 0.1cm/s
容器特色	容器的內部為圓形空間，內部沒有夾角只有凹面	容器的內部為方形空間，內部有四個夾角跟凹面	貝蚤活動空間為兩個圓的中間，有凹面跟凸面	v-t圖						不適用

中央繞小圈的速率維持高速，其餘有明顯的高低速變化。

方形 - 沿角、邊係數 回字形 - 沿內、外係數

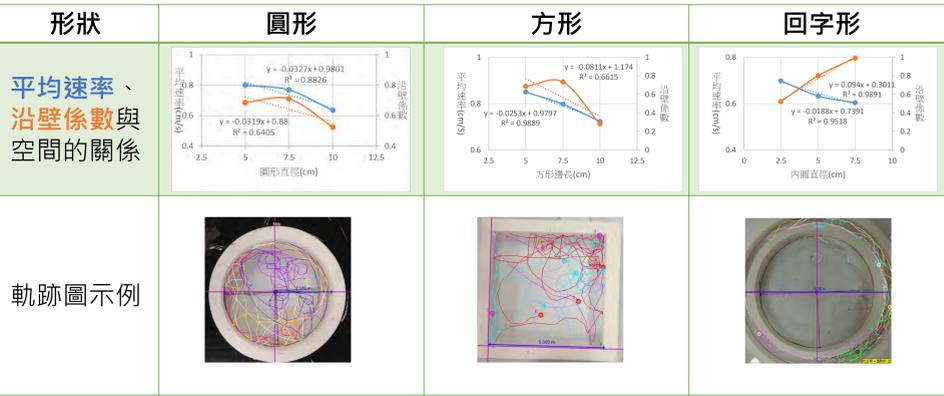


運動模式 - 沿壁係數 & 平均速率關係 空間大小 - 沿壁係數 & 平均速率關係



(五)、空間

沿壁偏好係數 = $\frac{\text{沿壁時間}}{\text{測定總時間}}$



(一)、貝蚤 & 貝蚤

貝蚤相遇情況	兩者停止	皆未停止	一隻停止
示例圖			
說明	<ol style="list-style-type: none"> 貝蚤D因為碰撞而長期停止；貝蚤E亦同 貝蚤D因為碰撞改變方向；貝蚤E則未因為碰撞改變方向 貝蚤D的移動軌跡二次函數開口變大；貝蚤E亦同 	<ol style="list-style-type: none"> 貝蚤N未因為碰撞而長期停止；貝蚤O亦同 兩者發生的僅為輕微碰撞，並未改變方向 貝蚤N的新移動軌跡二次函數開口變大；貝蚤O則變小 	<ol style="list-style-type: none"> 貝蚤Q因為碰撞而長期停止；貝蚤R則未因碰撞而長期停止 貝蚤Q因為碰撞改變方向；貝蚤R則未因為碰撞改變方向 貝蚤Q的移動軌跡二次函數開口變大；貝蚤R亦同

三、交互關係實驗

1. 短期觀察		2. 長期觀察		
平均速率變化	NGDR值變化	貝蚤15水蚤5數量消長	貝蚤10水蚤10數量消長	貝蚤5水蚤15數量消長
由圖中可知：當水蚤的比例增加時，貝蚤和水蚤的速率都會下降，NGDR值都會上升。		由圖中可以得知：貝蚤和水蚤之間無明顯交互關係，但是透過數量消長可以看見水蚤的繁殖速度較貝蚤來得快，但是族群數量的穩定性不如貝蚤。		

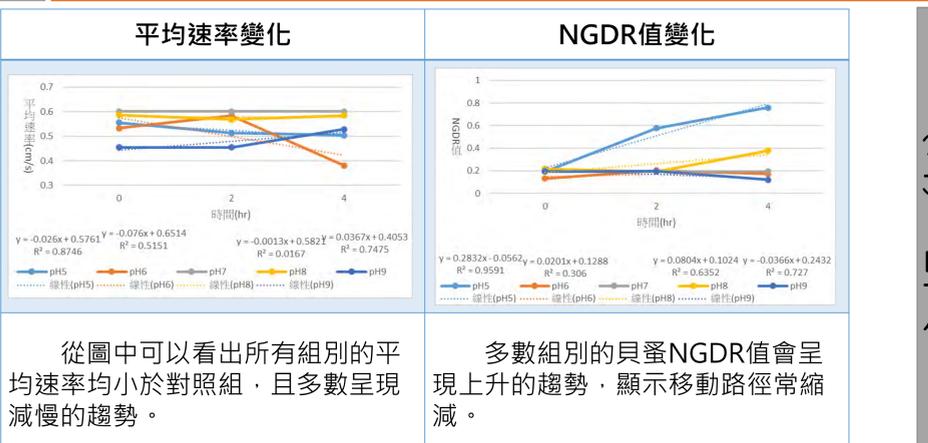
(二)、貝蚤 & 米蝦

我們將1隻死米蝦和10隻貝蚤放置於同一個培養皿當中，等待一個小時之後錄影一分鐘，計算貝蚤與米蝦之間的距離，再擷取其中與貝蚤距離小於1公分的時間，結果如附表所示：
由附表數據可知，貝蚤無明顯接近或遠離貝蚤的現象。

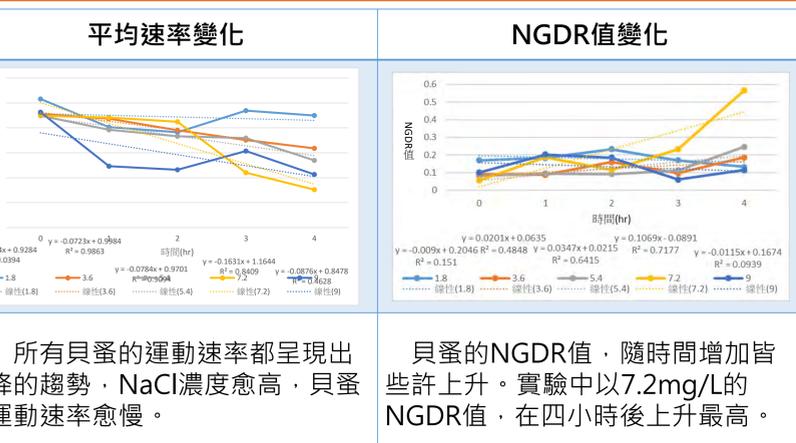
貝蚤與米蝦距離小於1公分的時間

貝蚤編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距離小於1公分的時間 (單位:秒)	0	0	31.5	0	0	22	0	0	0	0

(一)、酸鹼值



(二)、鹽度



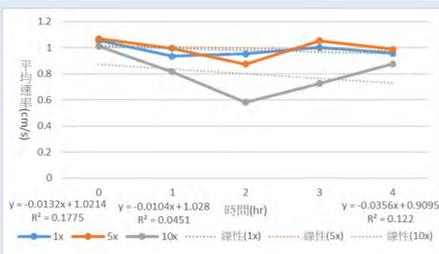
四、環境指標實驗

我們每組實驗取5隻貝蚤，使用電子天秤將附表的藥劑調配出其放流水標準1倍、5倍和10倍的水溶液，於0~4小時，每小時拍攝一次1分鐘的影片以記錄貝蚤活動行為，而後使用Tracker分析其移動軌跡。

重金屬離子放流水標準、使用藥劑與10倍標準劑量：

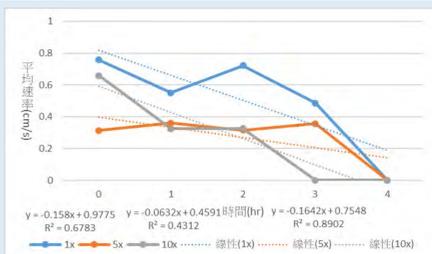
離子種類	鉛離子	銅離子	鋅離子	鎳離子	鈷離子
放流水標準 (單位: mg/L)	1.0	1.5	3.5	0.7	1.0
使用藥劑	Pb(NO ₃) ₂	CuSO ₄ · 5H ₂ O	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	NiSO ₄ · 7H ₂ O	CoCl ₂ · 6H ₂ O
10倍標準劑量 (單位: mg/L)	8.0	59.0	153.9	33.5	39.7

鉛離子



鉛離子濃度對於貝蚤速率在1倍和5倍時未見顯著影響；而10倍的平均速率都小於其他兩者。

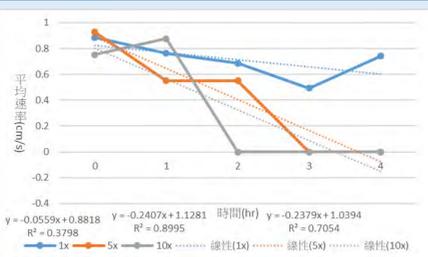
銅離子



銅離子組的三種濃度組別最後貝蚤皆全數死亡。

其中10倍的死亡速度和活動力下降的速度最快，5倍次之，1倍最慢。

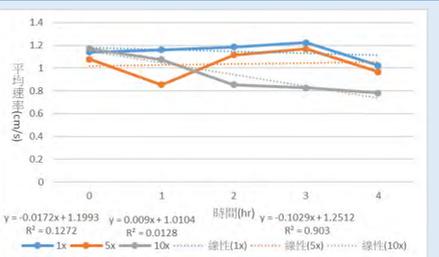
鋅離子



鋅離子組的5倍和10倍的組別，最後貝蚤皆全數死亡。

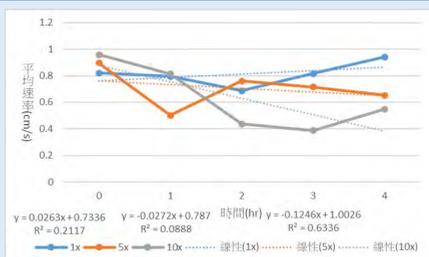
其中10倍的死亡速度和活動力下降的速度最快，5倍次之。1倍活動力雖下降，但貝蚤未全數死亡。

鎳離子



鎳離子濃度對於貝蚤速率在1倍和5倍時未見顯著影響；而10倍的平均速率有下降趨勢，且都小於其他兩者。

鈷離子



鈷離子濃度對於貝蚤速率1倍時未見顯著影響，而5倍時其速率有稍微下降些許的趨勢，10倍的平均速率下降趨勢更為明顯。

伍、討論

一、基本特徵觀察

(一) 外型輪廓

- 我們測量貝蚤的長軸及短軸，發現不論是墨綠色或紅棕色個體其長軸及短軸皆屬於正相關，且其長短軸比值介於1.3~1.4。
- 紅棕色與墨綠色個體的眼睛距離身體中心之長度相近，測量A1~A6、B1~B6的長度之後，發現A、B兩側長度兩兩相近，顯示貝蚤為兩側對稱顯著的生物體。
- 貝蚤頭部的角度小於尾部的角度，呈現類似雞蛋的形狀，推測此流線型的外形，能夠在水中的移動得比較快。

(二) 殼紋觀察

- 研究中的貝蚤殼紋顏色主要分成紅棕色和墨綠色斑紋兩種，紅棕色的個體斑紋分布在邊緣，且大多數眼睛兩側都有橘色圓點，身體透光度也較高；墨綠色的個體具有條紋，身體透光度較低，屬半透明狀態。
- 以肉眼觀察時覺得貝蚤為深綠色，經顯微觀察後發現有的個體為部分透明，推測因為貝蚤生活在水中底部區域，所以不論紅棕色或墨綠色皆與環境中的底棲顏色相近，具有隱蔽性。

二、行為模式觀察

(一) 光對貝蚤行為模式的影響

- 在照光強度實驗中，貝蚤展現出負趨光性，這與平時貝蚤多棲息盆底或漂浮的枯葉附近相同，並跟我們做的殼紋分析結果有相呼應。
- 在照光長度實驗中，照度200lux及150lux環境中，隨著時間增加，貝蚤照光環境的數量逐漸減少，而在100lux以下的實驗較不顯著，推測強光表現出的負趨光行為會比較明顯，而弱光的狀況則較不顯著。

(二) 溫度對貝蚤行為模式的影響

- 溫度越高，貝蚤的平均速率愈大，且NGDR愈小。顯示高溫的環境下，貝蚤在環境中會增加移動的距離，也就是活動力增加。
- 貝蚤在低溫時的活動力下降，高溫時的活動力則上升，且相關性極高，代表溫度對於介形蟲的影響力極大。

(三) 刺激對貝蚤行為模式的影響

- 丟擲小球，觀察貝蚤的行為發現：在小球附近的貝蚤受到刺激物影響之後，會採取先暫停再快速地離開的策略。
- 經一段時間後，部分貝蚤就開始靠近刺激物，推測此時貝蚤已判斷該刺激物沒有威脅性才靠近。

(四) 空間對貝蚤行為模式的影響

- 在空間的實驗中，我們簡單歸納出貝蚤的六種運動形式，發現繞圈或沿壁都有可能是一種探索環境或避敵的表現，且沿壁係數與平均速率具一定關聯性。
- 在圓形和方形的組別中，貝蚤的移動速率會隨著空間增大而降低，只有回字形組別例外；在沿壁係數的部分，三組都呈現空間愈大沿壁係數愈小的結果。在較大的空間中，貝蚤的密度下降，運動速率也隨之下降；活動空間大時沿壁的機率較小，推測此為沿壁數下降的原因。
- 從方形的沿角沿邊比例可發現，沿角比例約略占總沿壁比例的20%，比例相當高，但此狀況會隨著容器增大而下降，顯示有牆角的環境中貝蚤會不斷的在角落來回移動。從回字形的內、外沿壁的比例可發現內沿壁比例約為20%，顯示大多數的貝蚤沿壁行為是發生在外圍。

三、交互關係實驗

(一) 貝蚤與貝蚤種內的行為交互關係

- 兩隻貝蚤碰撞後，其中一隻停止並改變運動方向，另一隻維持原方向。
- 碰撞後沒有停止或改變方向，維持原方向前進。
- 兩隻貝蚤碰撞後，兩隻都停止，而且其中一隻改變運動方向，另一隻則維持原方向。在碰撞過程中，可能產生暫停之後再繼續運動的行為模式。

(二) 貝蚤與水蚤種間的行為交互關係

- 短期觀察：當兩者同時存在時，水蚤數量增加會讓貝蚤的速率下降和NGDR值上升，推測因為水蚤是採取快速而且類似跳躍性的運動方式，對於周圍的其他生物干擾較大，也因此貝蚤的速率下降。
- 長期觀察：無論是哪一組貝蚤與水蚤都可以發現水蚤的族群數量上升得較快，也下降得較快，族群穩定性較低；而貝蚤的趨於穩定的狀態。
- 研究中觀察到水蚤會被纖毛蟲的攻擊（如附圖）而貝蚤則無，推測是因為貝蚤有殼，所以不會受外來物種侵襲。



(三) 貝蚤與米蝦種間的行為交互關係

在網路上水族討論中曾看到：貝蚤可能有攻擊米蝦或妨礙米蝦脫殼、抱卵的行為，然而我們在觀察中發現，貝蚤只食用蝦子的殼，並無食用蝦子的其它構造，也沒有攻擊蝦子的行為。

四、環境指標實驗

(一) pH值的實驗

貝蚤對酸性的敏感程度較鹼性的敏感程度高，推測是因酸性會侵蝕其瓣殼的成分（碳酸鈣），因此貝蚤不喜酸性的環境。

我們上網查詢資料，發現基隆市降雨的酸鹼值平均為pH4.5，是貝蚤有反應的範圍之內，可以考慮藉由貝蚤的瓣殼判斷其酸性程度。

(二) 鹽度的實驗

較低濃度組別的NGDR值小於高濃度組別，推測貝蚤為淡水的生物，在高滲透壓環境中會使貝蚤的生理異常而無法正常活動。

(三) 重金屬離子溶液的實驗

貝蚤對於1倍標準濃度反應變化輕微，但於10倍的放流水標準來看，隨著在溶液中時間增加，貝蚤的平均速率下降、NGDR值上升，顯示高濃度的重金屬離子環境會影響貝蚤的活動能力。

陸、結論

一、基本特徵觀察

- 紅棕色的貝蚤或是墨綠色的貝蚤，其長短軸比值都介於1.3~1.4。
- 墨綠色或是紅棕色貝蚤其A側與B側長度兩兩相近，顯示貝蚤的外型為顯著的兩側對稱。
- 貝蚤殼紋有三種類型：紅棕色殼紋有橘點、紅棕色殼紋無橘點、墨綠色。

二、行為模式觀察

- 在光照的實驗中，發現貝蚤有負趨光行為。
- 在溫度的實驗中，發現溫度越高，貝蚤的平均速率愈大，且NGDR愈小，顯示貝蚤在高溫的環境下，會增加移動的距離，也就是活動力增加。
- 在刺激的實驗中，發現貝蚤面對刺激物採取的行動為先暫停再快速地離開。
- 在空間的實驗中，發現貝蚤的運動行為大致可分為沿壁、停止、繞圈、跳躍等機制，其中又以沿壁的個體數最多。貝蚤的沿壁時間比例與所在空間大小成反比，但是可能與時間成正比。

三、交互關係實驗

(一) 貝蚤與貝蚤同種內的交互關係

- 碰撞後，其中一隻停止，另一隻維持運動。
- 碰撞後，兩者皆未停止，並朝原方向運動。
- 碰撞後，兩隻貝蚤都停止。

(二) 貝蚤與水蚤異種間的交互關係

- 短期觀察：水蚤比例增加會使貝蚤速率與NGDR值下降。
- 長期觀察：水蚤族群數量繁衍速度較快，但是一旦達到環境負荷量，則死亡速度也較貝蚤快；而貝蚤的族群數目則趨於穩定狀態。

(三) 貝蚤與米蝦異種間的交互關係

實驗中發現貝蚤沒有趨近或是背離米蝦的行為，但是在觀察中我們發現貝蚤會靠近米蝦脫下的殼。

四、環境指標實驗

酸性、高鹽份和含重金屬離子（尤以鋅、銅）的環境使貝蚤活動力下降。

柒、參考資料

- Yoshitaro Akiyama, Kiyokazu Agata, Takeshi Inoue (2015). Spontaneous Behaviors and Wall-Curvature Lead to Apparent Wall Preference in Planarian. PLOS one.
- 李佳瑩、張碩珍(2007)。蚤尋活水(2009年臺灣國際科學展覽會)。
- 齊凌岫(民99)。小擬哲水蚤與其潛在纖毛蟲獵物之行為互動研究。