

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生物科

第三名

030320

「鯊」馳「電」掣

---- 鯊魚感電能力之影響因素分析

學校名稱：臺中市立居仁國民中學

作者： 國二 陳勇安	指導老師： 蔡明致 李敏瑜
---------------	---------------------

關鍵詞：鯊、壺腹細胞、感電能力

## 摘要

斑鯊透過羅倫氏壺腹細胞感應周圍環境電場，以提升偵測附近獵物的能力。過去針對斑鯊電感能力的研究，多著重於生物行為表現，量化分析較不足。本研究首先透過外界電場刺激非活體斑鯊，分析斑鯊腦部負責處理電感之區域，並探討電流在斑鯊體內的流通路徑；接著以銅片、碳棒等素材模擬斑鯊及周圍環境，量化分析斑鯊身體構造因素（如鯊體長度）、環境因素（如水之深淺）、獵物因素（如周圍魚群多寡）及斑鯊活動因素（如鯊魚頭部擺動）等因子對於斑鯊電感之影響。實驗結果顯示大腦前端為電覺反應處理區，有訊息交叉現象；軀幹部電阻大，有阻隔電流發散的導流效應。本研究提供發明一套估算池內魚隻數儀器的概念，及利用電流測得神經傳導路徑的方法。

## 壹、研究動機

曾看到一部影片—*動物零距離*，發現斑鯊（*Atelomycterus marmoratus*）可藉由「第六感—電覺」捕捉獵物，因頭部有「羅倫氏壺腹」這特殊的感電器官，能敏銳感覺到周遭生物發出的細微電流，甚至是藏於沙中的獵物，因此斑鯊的獵食能力非常厲害！

我利用假日在台中梧棲漁港購買斑鯊，探討牠的「羅倫氏壺腹」細胞，希望了解斑鯊影響第六感的各項因素，並將研究結果應用在池內魚隻估算！

## 貳、研究目的

- 一、探討斑鯊壺腹細胞分布狀況對大腦連結的關係。
- 二、探討斑鯊各部位電阻對電流傳導的關係。
- 三、探討模擬影響壺腹細胞感電靈敏度的因素。
- 四、研究鯊魚感電能力的應用。

## 參、研究設備及器材

### 一、基礎裝置組（圖 3-1）：

1. 碳棒：模擬小魚
2. 變壓器：模擬小魚發電
3. 三用電表：模擬鯊魚
4. 銅片：模擬壺腹細胞
5. 水盆：場域
6. 鱷魚夾電線、電線：連結裝置

在進行模擬實驗及應用實驗皆須以此基礎裝置組做為其他裝置之延伸。

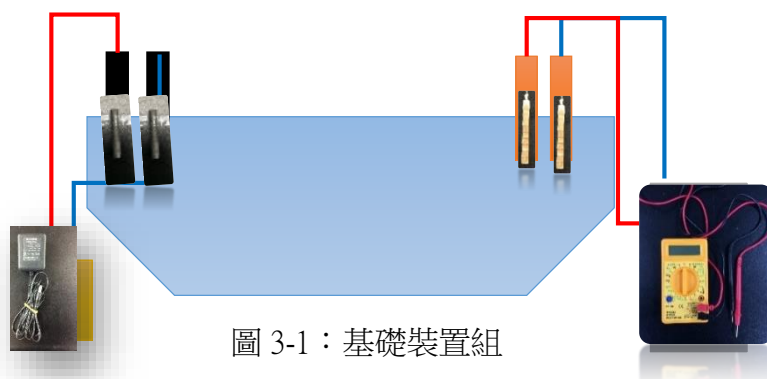
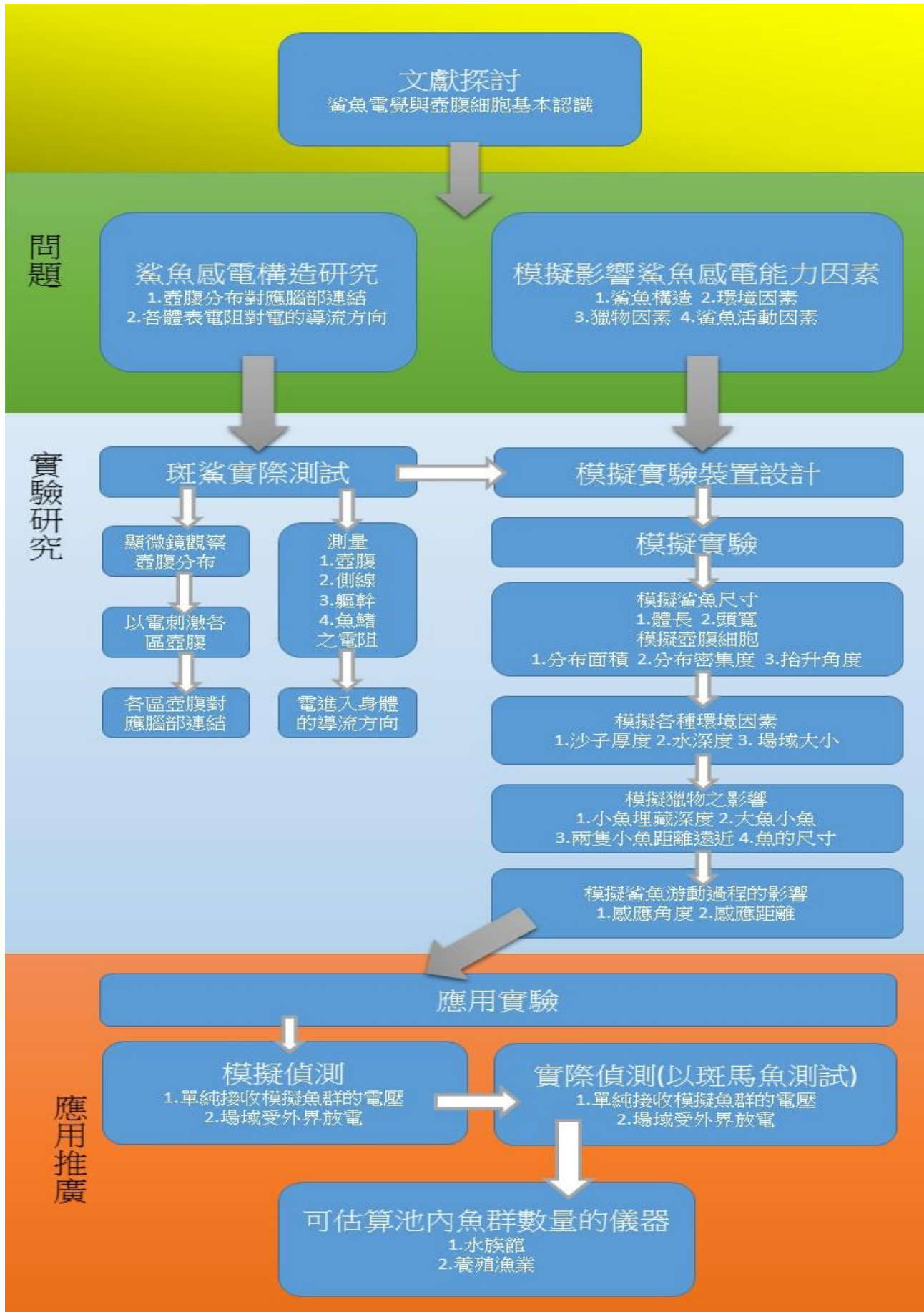


圖 3-1：基礎裝置組

- 二、實體實驗器材：斑鯊、解剖組、針、透明方格紙、三用電表、鱷魚夾電線、電線、變壓器、解剖顯微鏡。
- 三、模擬實驗器材：基礎裝置組、壺腹翻轉模組、直流電電源供應器、鯊魚頭模型、刻度插槽組、木板、長尺、打動水桶、漆包線、沙子、麵包板。
- 四、應用實驗器材：基礎裝置組、直流電電源供應器、斑馬魚、模擬魚群麵包板模組、木板。

## 肆、研究過程、方法及結果



## 一、文獻探討

義大利解剖學家勞倫茲尼（Stefano Lorenzini）發現鯊魚頭部前端有斑點般的體孔，但並不知其功用。到了 19 世紀末，新式顯微鏡發現體孔下方接管有個球狀囊袋（即壺腹），壺腹伸出一條細神經與前方側線的神經分支連結，它連到頭顱基部並經由延腦背側進入大腦<sup>參考資料 5</sup>。但因尚無人研究影響鯊魚對感電能力的靈敏度之因素，固本研究為鯊魚感電能力之先驅。

## 二、各項實驗

### 研究一：探討壺腹細胞分布狀況對大腦連接的關係

**動機：**找出壺腹分布於鯊魚頭部的哪些區域及特性，並尋找腦部處理電感之對應區塊。

#### （一）實驗 1-1：頭部壺腹體表分布

##### 1. 步驟：

- (1) 將斑鯊體表壺腹細胞分布區分成 13 區（A~M）。
- (2) 將斑鯊置於解剖顯微鏡下，紀錄頭部不同區域的壺腹細胞數量。

##### 2. 結果：

- (1) 根據圖 4-1，斑鯊的腹面線區（A、B、C、D、H、I）的壺腹細胞分布呈線狀、細胞的開口較大、密集度極高；圓圈區（E、F、G）的壺腹細胞分布呈散布狀、細胞的開口較小、密集度較低。
- (2) 斑鯊的背面圓圈區（J、K、L、M）的壺腹細胞呈集中式的散布狀、開口大，密集度不高。

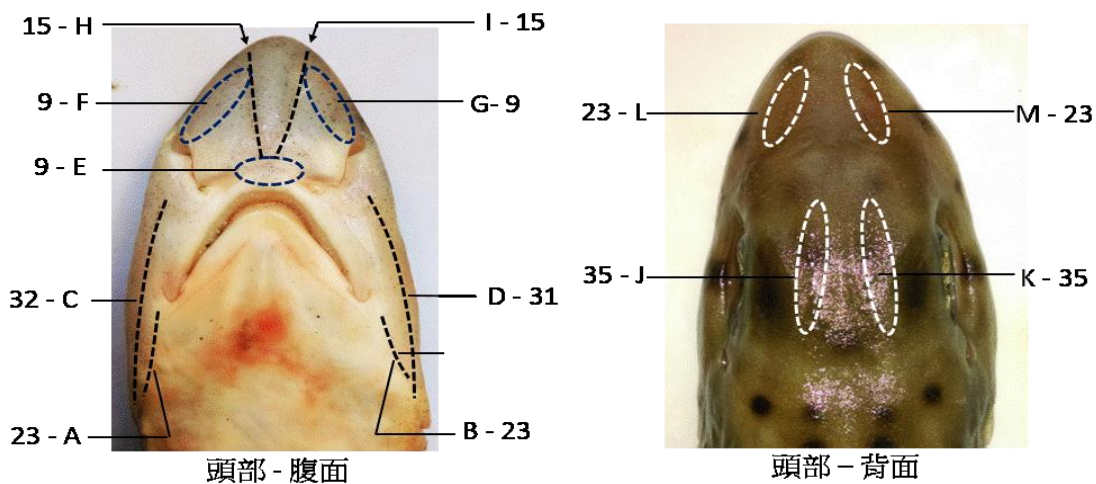


圖 4-1：斑鯊頭部壺腹細胞分布數量圖，字母旁為細胞個數（線區代表壺腹細胞線狀分布、圓圈區代表壺腹細胞分散分布）

##### 3. 推論：

- (1) 感電能力：腹面的線狀分布區（A、B、C、D、H、I）優於背面的集中式散布區（J、K、L、M），優於分散分布區（E、F、G）。
- (2) 斑鯊較常棲息於近海淺灘，而斑鯊壺腹細胞在頭部腹面比背面多，推測有利於斑鯊獵殺下方或沙堆裡的獵物。
- (3) 腹面 A、B、C、D 區壺腹細胞呈線狀分布，密集度極高。背面 J、K 區位於眼窩上方，且感電能力居中，此 2 區壺腹細胞可彌補視覺死角。

## (二) 實驗 1-2：各壺腹細胞分布區與腦的神經連結

### 1. 步驟：

- (1) 將斑鯊頭骨解剖開，裸露出腦，以方格紙，將腦分成 10 個區，如圖 4-2。
- (2) 提供電壓 12V 刺激 A~M 區（圖 4-1），模擬壺腹細胞接收生物電的刺激。
- (3) 利用銅線插入腦部 10 個區域，測量腦部接收到的電壓。
- (4) 重複 3 次，取平均值。平均值高表示此區域接收到電壓高，代表此區域是主要的壺腹細胞訊息處理區。

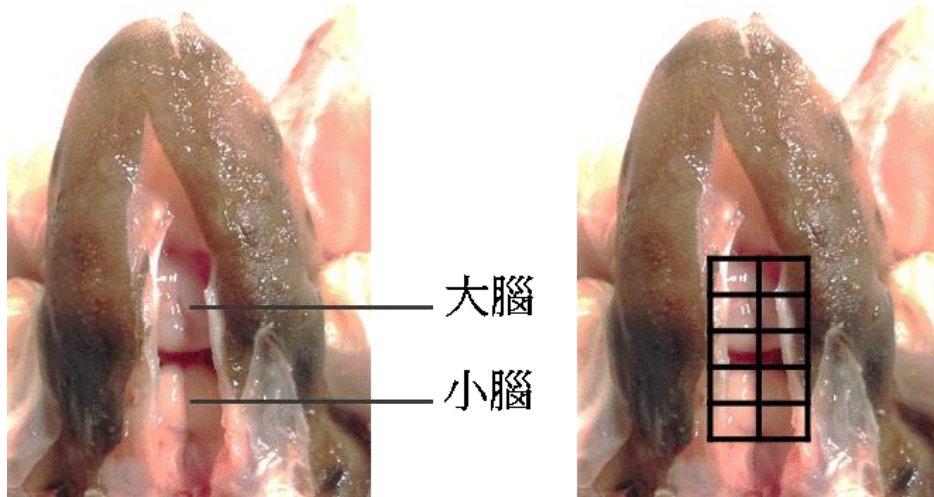


圖 4-2：斑鯊腦部構造與分區圖

### 2. 結果：（數據參考附件一）

- (1) 對應表 4-1，若以電刺激腹面右側 A、C、F、H 區，以左前腦反應最大。
- (2) 若以電刺激腹面左側 B、D、G、I 區，以右前腦反應最大。
- (3) 若以電刺激背面左側 L、J 區，以右前腦反應最大。
- (4) 若以電刺激背面右側 K、M 區，以左前腦反應最大。

### 3. 推論：

- (5) 電刺激有壺腹細胞分布的區域以大腦前端反應最大，且有交叉現象。
- (6) 據文獻<sup>參考資料 5</sup>，壺腹細胞神經匯集到腦神經第七對，接著進入腦幹，而此實驗也驗證了這個說法，壺腹細胞神經會集中到腦幹，再發散到大腦後進行訊息整合，使大腦成為「電覺終端反應處理區」。
- (7) 以往以活體測試，此實驗以死體分析仍可得到神經傳導路徑。

表 4-1：不同壺腹細胞分布區與腦的神經連結關係示意表

<p>頭部-腹面</p>	<p>頭部-腹面</p>	<p>頭部-背面</p>	<p>頭部-背面</p>
腹面右側壺腹接受刺激，左前腦產生最強感應電壓。	腹面左側壺腹接受刺激，右前腦產生最強感應電壓。	背面左側壺腹接受刺激，右前腦產生最強感應電壓。	背面右側壺腹接受刺激，左前腦產生最強感應電壓。

## 研究二：探討斑鯊各部位電阻對電流傳導的關係

**動機：**由於電流有進有出，而壺腹負責接收電，必有一處放電，利用此實驗找出放電之處。

### (一) 實驗 2-1：不同壺腹細胞分布區的電阻比較

#### 1. 步驟：

- (1) 利用三用電表測量不同區域的壺腹電阻。
- (2) 進行 3 次，取平均值。平均值愈高，區域電阻越大，此區越不導電，放電能力愈弱；反之則越易導電，放電能力愈強。

#### 2. 結果：(參考附件二)

- (1) 腹面 A~G 區電阻大；腹面吻端 H、I 區電阻小。
- (2) 背面 J~K 區電阻小。

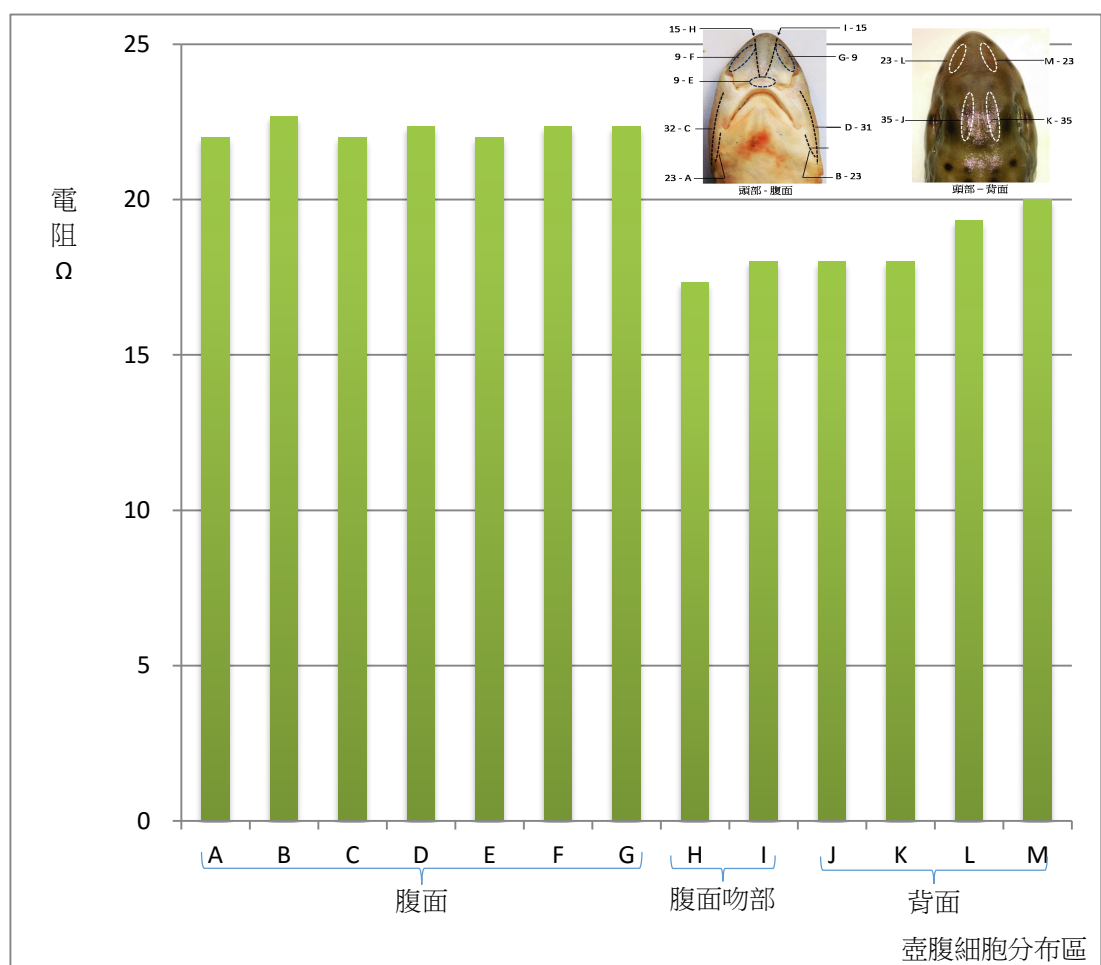


圖 4-3：不同壺腹細胞分布區的電阻比較

#### 3. 推論：

- (1) 腹面 A~G 區電阻大，感電能力較弱；腹面吻端 H、I 區電阻小，感電能力較強。
- (2) 背面 J~K 區電阻小，感電能力較強。
- (3) 據實驗 1-1，腹面的壺腹細胞數 157 個、背面 116 個；綜合實驗 1-1 與實驗 2-1 推論，背面壺腹細胞電阻較小比腹面放電能力好，可能因背面的數量較少，需提高感電力以彌補不足。

## (二) 實驗 2-2：不同側線區的電阻比較

### 1. 步驟：

- (1) 側線前段位於軀幹部、中段位於臀部、後段位於尾部，每段側線取 6 點測量。
- (2) 以三用電表測量不同區域側線電阻。
- (3) 進行 3 次，取平均值。平均值愈高，此區域電阻越大，越不導電，放電能力愈弱；反之則越易導電，放電能力越強。

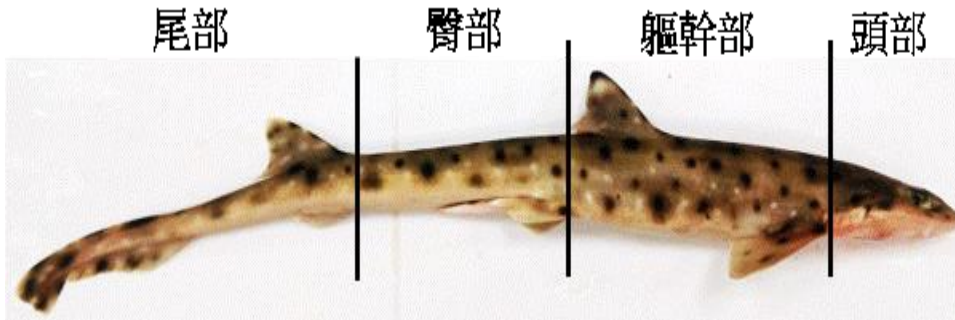


圖 4-4 鯊魚分段圖

### 2. 結果：(數據參考附件三)

- (1) 前段側線電阻 > 後段側線電阻 > 中段側線電阻；表示中段放電能力 > 後段放電能力 > 前段放電能力。

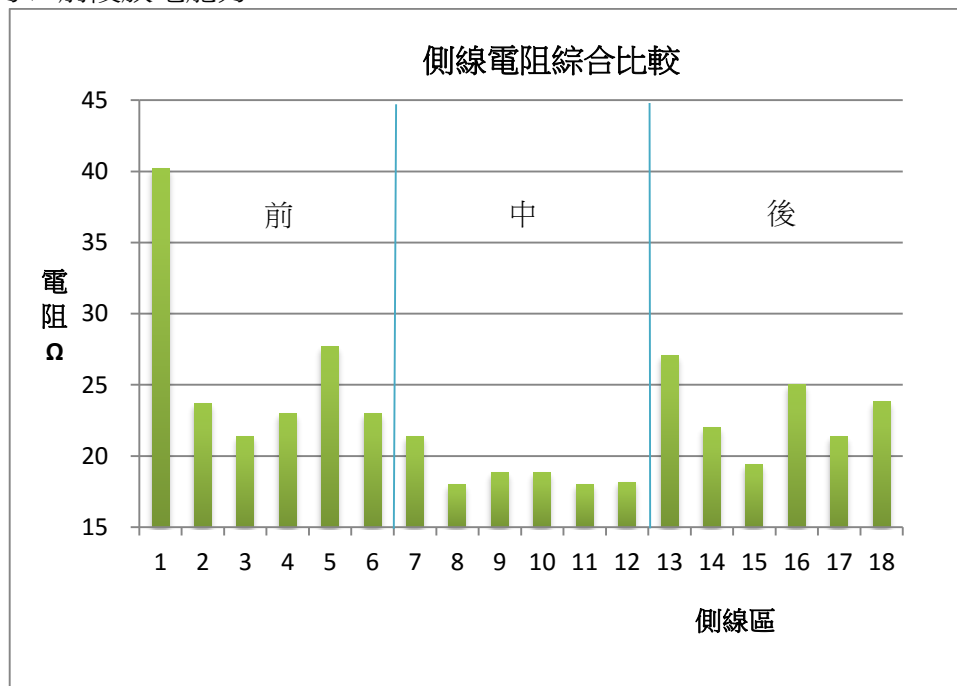


圖 4-5：側線前、中、後區的電阻比較

### 3. 推論：

- (1) 我們測到的中段側線電阻最弱，所以中段側線區可能是用來進行鯊魚放電的區域。

### (三) 實驗 2-3：不同體表部位的電阻比較

#### 1. 步驟：

- (1) 將斑鯊體表分成背面－頭部、軀幹、臀部和尾部，腹面－頭部、軀幹、臀部和尾部，及背鰭、胸鰭、腹鰭和尾鰭。
- (2) 利用三用電表測量不同體表區域電阻。
- (3) 進行 3 次，取平均值。平均值愈高，此區域電阻越大，表此區越不導電，放電能力越弱；反之則越易導電，放電能力越強。

#### 2. 結果：(數據參考附件四)

- (1) 根據圖 4-6，背面軀幹部的電阻極大，代表放電能力極弱。

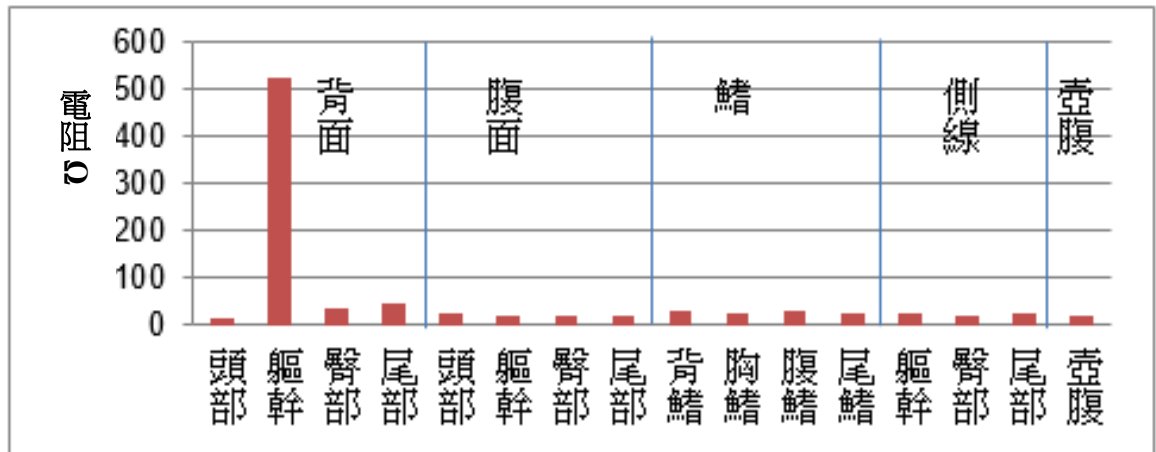


圖 4-6：不同體表部位的測量電阻比較

#### 3. 推論：

- (1) 背面軀幹與放電能力較無相關。

### 綜合實驗 2-1~2-3 發現：

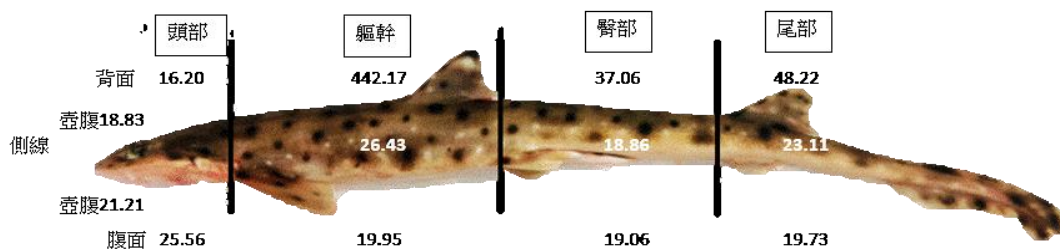


圖 4-7：不同部位體表的電阻示意圖，電阻愈大，代表愈不易放電。

1. 以軀幹、臀部與尾部三個分區而言，軀幹背面與側線電阻均最大，臀部背面與側線電阻均最小，推測軀幹電阻極大可能造成導流效果，若斑鯊透過頭部壺腹接收到外界電時，會通過軀幹，直接在電阻最小的臀部腹面釋放出去。
2. 側線主要功能是偵測水流而非感電，我們測到的中段側線電阻最弱，甚至弱於背面與鰭的電阻，所以推測中段側線區可能兼具鯊魚放電的區功能。
3. 以軀幹、臀部與尾部三個分區而言，腹面電阻都小於背面電阻，推測因腹面會與地面接觸，電阻小有利於接受沙中微弱的生物電流。
4. 以頭部而言，腹面電阻大於背面電阻，推測因為當生物弱電產生時，腹面電阻大，以利於腹面壺腹細胞集中接收生物弱電刺激，提高靈敏度。



### 研究三：模擬探討影響壺腹細胞感電靈敏度的因素

**動機：**在鯊魚感電過程中，有許多影響靈敏度的因子，這些因子包含：鯊魚構造、環境因素、獵物因素及鯊魚活動等因素，因此想藉由模擬實驗來探討這些因子是否會影響鯊魚感電能力靈敏度。

#### (一) 實驗 3-1：模擬鯊魚構造

##### 實驗 3-1-1：模擬鯊魚頭部寬度對感電能力的影響

###### 1. 步驟：

- (1) 相距 3 公分的 2 根碳棒（模擬小魚）在塑膠瓦楞板上，黏在盆子正中間。
- (2) 再將銅片接線組（模擬鯊魚）插在刻度插槽組上，接上三用電表，距離碳棒 12 公分。
- (3) 盆子灌滿水，接上電。兩銅片先距 24 公分，每次 1 公分往內縮，縮到兩銅片相距 1 公分。模擬鯊魚頭部寬度。
- (4) 進行 3 重次，取平均值。均值愈高，代表接收電壓愈大，則代表愈靈敏。

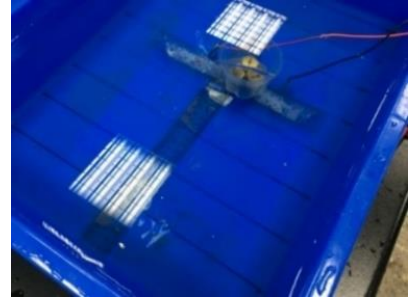


圖 4-8：實驗裝置圖

###### 2. 結果：（數據參考附件五）

- (1) 根據圖 4-9，模擬鯊魚頭部寬度愈寬接收電壓愈高，感電能力愈好。

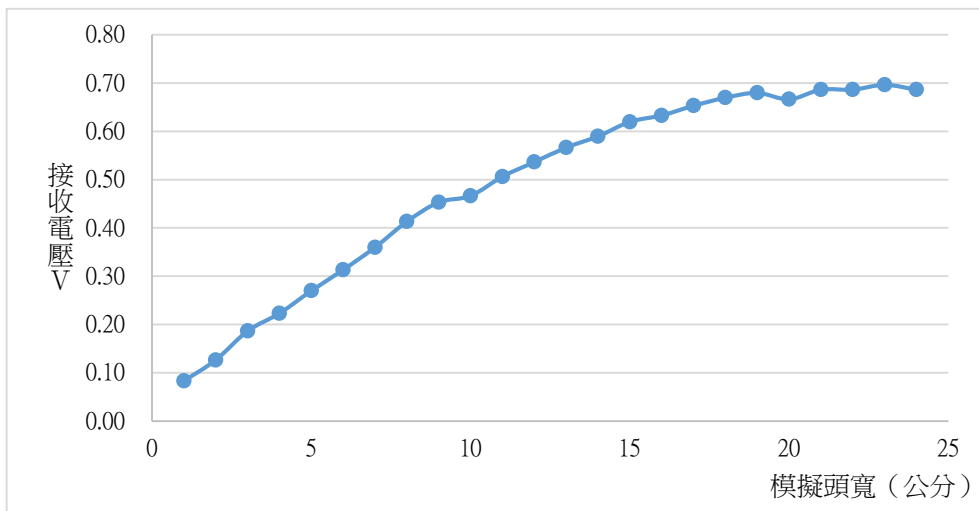


圖 4-9：模擬鯊魚頭部寬度對感電能力的影響

###### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-10：頭愈寬、距小魚愈近，能接收到電力線愈多，因此感電能力愈好。
- (2) 實際上頭寬愈寬的鯊魚比頭窄的鯊魚感電能力更靈敏，印證了髻頭鯊是感電能力最強的鯊魚。

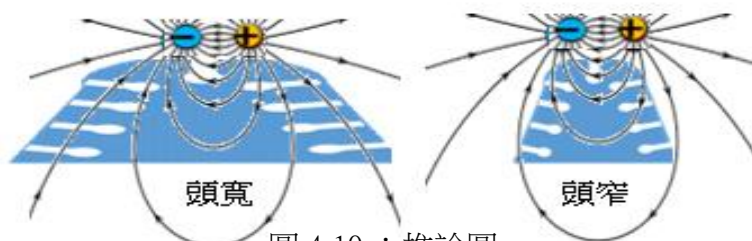


圖 4-10：推論圖

### 實驗 3-1-2：模擬鯊魚體長對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將 2 根碳棒（模擬小魚）相距 3 公分，黏在塑膠瓦楞板上，將板子黏在盆子正中間，接上電。
- (2) 以 2 片銅片距離代表鯊魚體長，第 1 片銅片代表吻端、第 2 片銅片代表尾部。
- (3) 第 1 片銅片距碳棒 12 公分，兩銅片平行距 18 公分。
- (4) 逐步拉長兩片銅片距離（每次移 1 公分），測量可接收到的電壓。
- (5) 進行 5 次（每次換水），取平均值。平均值愈高，代表接收電壓愈高，則代表愈靈敏。

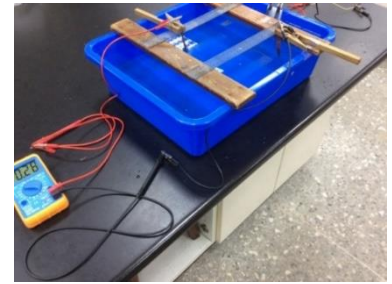


圖 4-11：實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據請參考附件六）

- (1) 根據圖 4-10，模擬鯊魚體長越長，可接收到電壓越小，感電能力愈好差。

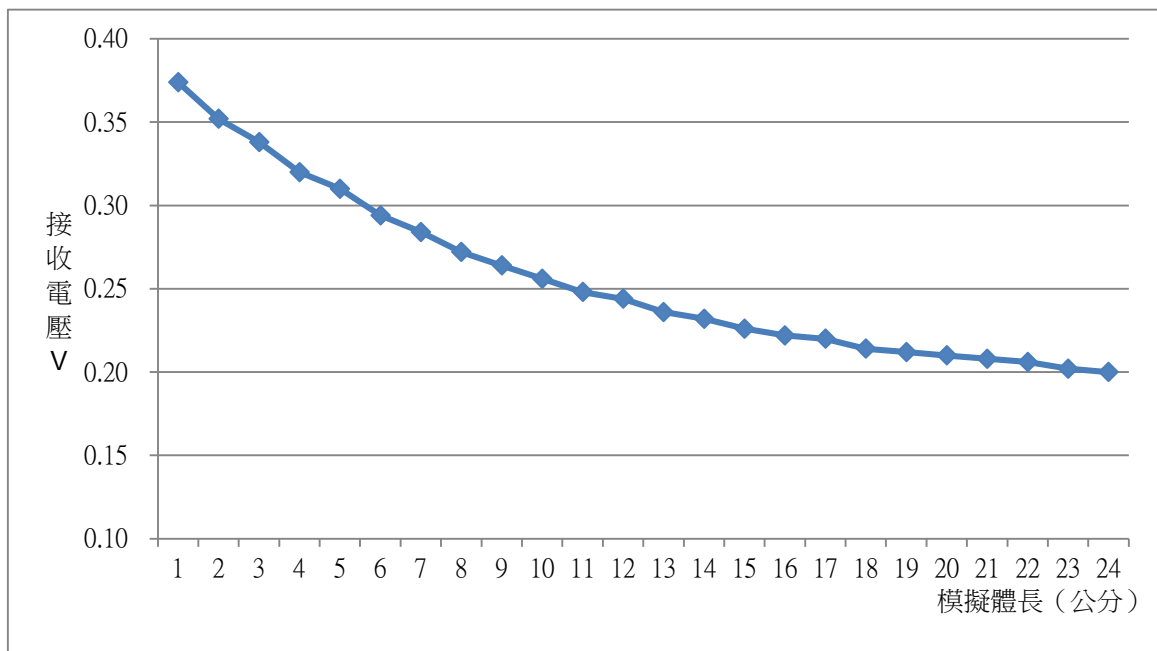


圖 4-12 模擬鯊魚體長對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 當模擬鯊魚體長超過 20 公分時，長度影響接收電壓的效果不大，代表鯊魚的長度超過 20 公分時，接收電壓差不多
- (2) 推論圖 4-13：壺腹間距愈大，單位面積下能測到的小魚電力線少，因此感電愈差。
- (3) 實際上大部分鯊魚種類的成魚體型超過 20 公分，接收電壓應相同。對同鯊而言，幼年時期感電能力比成年時期重要；對不同鯊魚而言，小型鯊較適合用感電力捕獵。

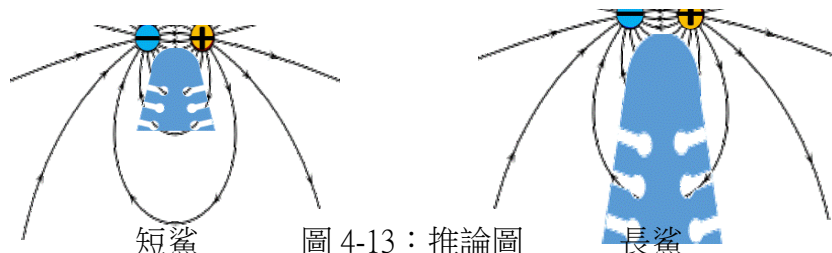


圖 4-13：推論圖

### 實驗 3-1-3：模擬鯊魚壺腹細胞分布面積大小對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將碳棒相距 5 公分，接上電。
- (2) 將 8 公分銅片（模擬壺腹細胞）區分成八段，每段 1 公分。
- (3) 分段逐步放入水中，增加模擬鯊魚壺腹細胞區域。
- (4) 進行 5 次（每次換水），記錄接收到的電壓，取平均值。

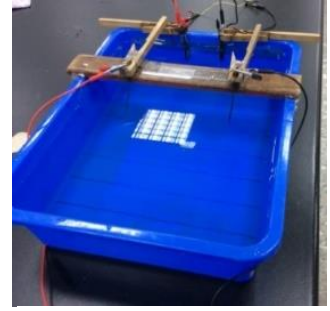


圖 4-14 實驗裝置圖

#### 2. 結果（數據參考附件七）

- (1) 根據圖 4-15，模擬壺腹分布面積越大，能接收到的電壓越大，感電能力愈好。

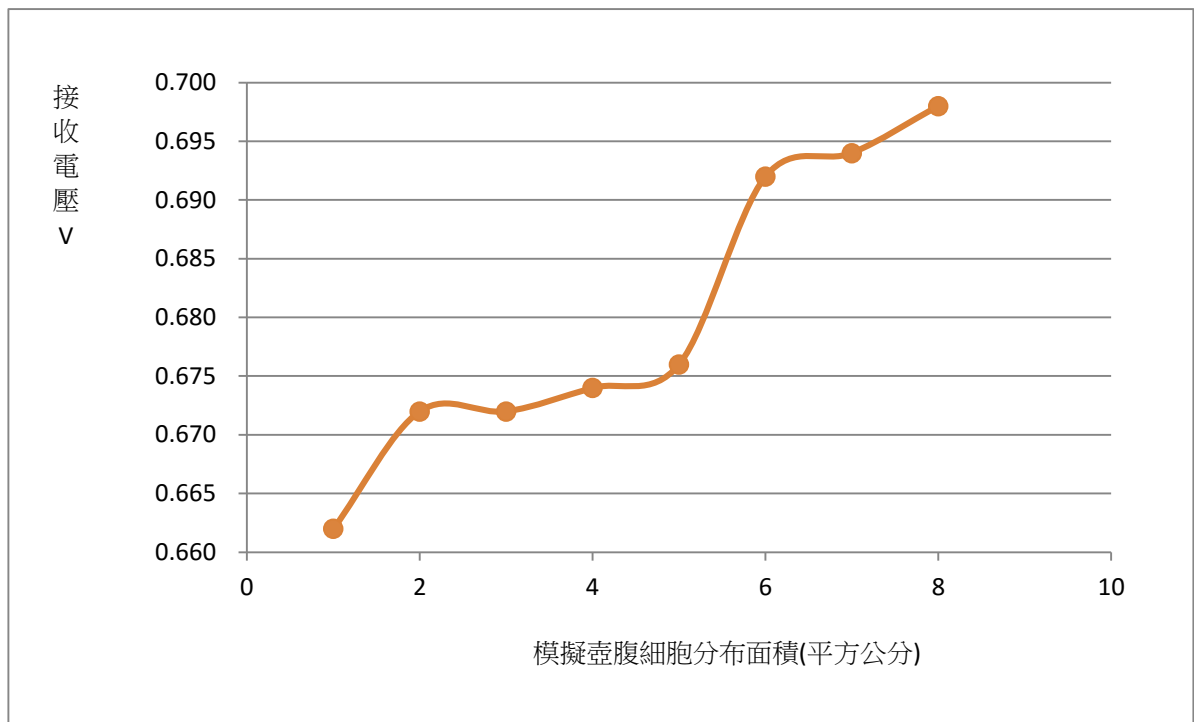


圖 4-15：模擬壺腹細胞分布面積大小對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-16：分布面積愈大，可接收到的電力線愈多，因此感電能力愈強。
- (2) 實際鯊魚的壺腹分布在頭部越多時，則感電能力愈強。

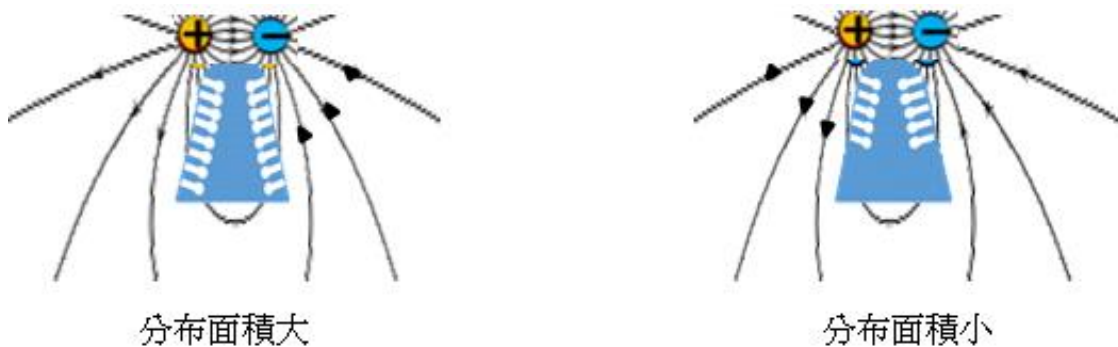


圖 4-16：推論圖

### 實驗 3-1-4：模擬鯊魚壺腹細胞分布密集度對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將 2 根碳棒（模擬小魚）相距 3 公分，黏在塑膠瓦楞板上，將板子黏在盆子正中間，接上電。
- (2) 將漆包線漆磨掉，剪成 30 段，每段 1.5 公分。
- (3) 拿麵包板，在單位面積上插入 30 根漆包線。
- (4) 將麵包板垂直置入水中，與發電體距離 40 公分，開始測量接收到的電壓。
- (5) 逐次移除一段漆包線，逐次測量接收到的電壓。記錄數據，進行 5 次（每次換水），取平均值。

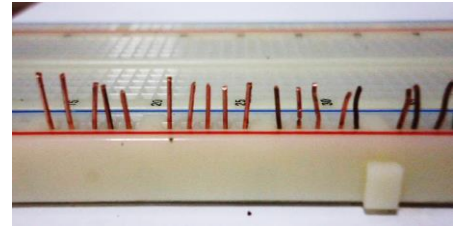


圖 4-17：實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據請參考附件八）

- (1) 根據圖 4-18，模擬鯊魚體表單位面積內，模擬壺腹數量越多，接收到電壓越高，感電能力愈好。

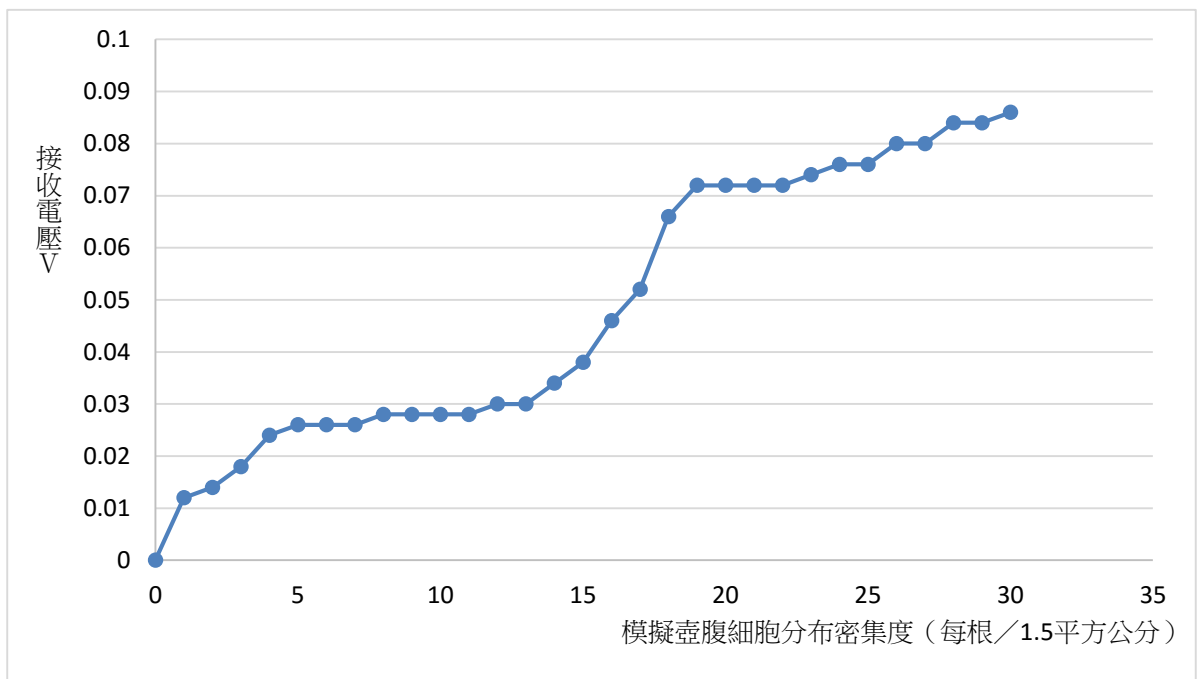


圖 4-18：模擬鯊魚壺腹細胞分布密集度對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-19：壺腹細胞分布密集度愈高，感電能力愈強，可接收的電力線愈多。
- (2) 實際鯊魚的壺腹分布在頭部愈密集時，則感電能力愈強。

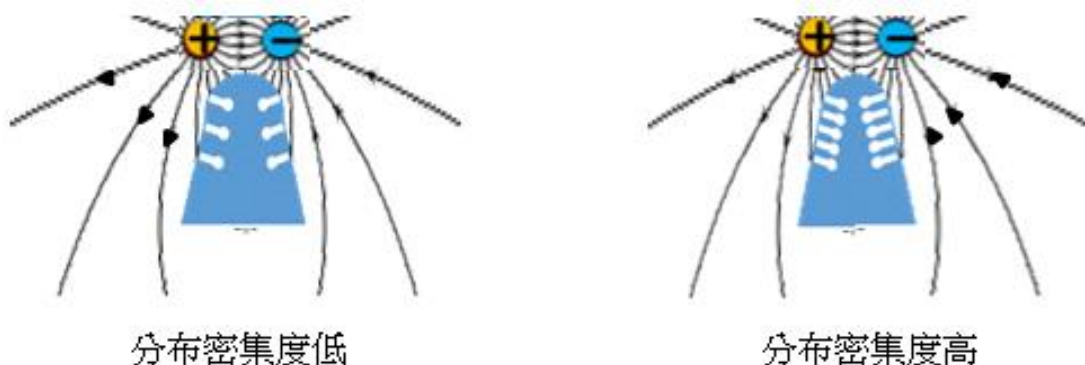


圖 4-19：推論圖

實驗 3-1-5：模擬鯊魚壺腹細胞抬升角度對感電能力的影響

1. 步驟：

- (1) 將 2 根碳棒（模擬小魚）相距 3 公分，黏在塑膠瓦楞板上，將板子黏在盆子正中間，接上電。
- (2) 將旋轉角度齒輪組接上第一片銅片，與水面平行放入水中，模擬接收刺激的壺腹細胞。
- (3) 第二片銅片插入水中固定不動，模擬側線細胞。
- (4) 每 12 度旋轉一次第一片銅片角度，0 度到 84 度代表下頷壺腹細胞，96 度到 180 度代表頭部背側壺腹細胞。
- (5) 進行 5 次（每次換水）取平均值。



圖 4-20：實驗裝置圖

2. 結果：

- (1) 根據圖 4-21，模擬下頷壺腹細胞在 60~72 度能接收到的電壓最多，感電能力好。
- (2) 根據圖 4-21，模擬頭部背面壺腹細胞在 36~48 度能接收到的電壓最多，感電能力好。

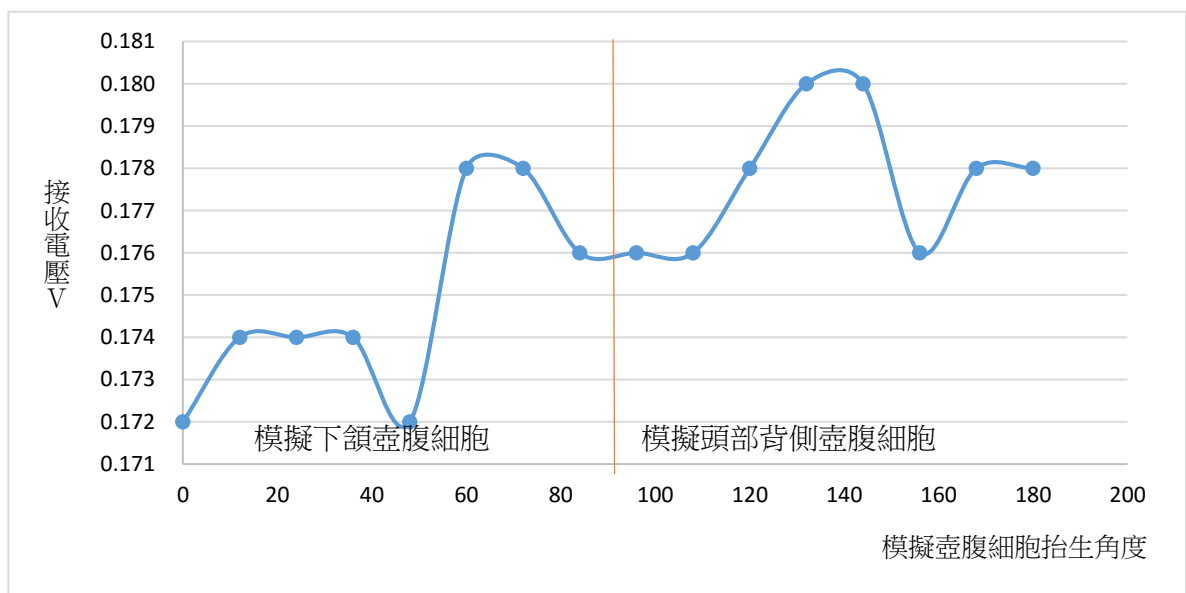


圖 4-21：模擬鯊魚壺腹細胞抬升角度對感電能力的影響

3. 推論：

- (1) 推論圖 4-21：下頷抬升 60~72 度、頭部背面 36~48 度靈敏度最佳，此角度的壺腹細胞較易接收到垂直的電力線。
- (2) 實際鯊魚下頷應抬升 60~72 度靈敏度最佳、頭部背面 36~48 度靈敏度最佳。
- (3) 此實驗可以解釋為何鯊魚在尋找獵物時，頭總是依循著一個抬升角度。

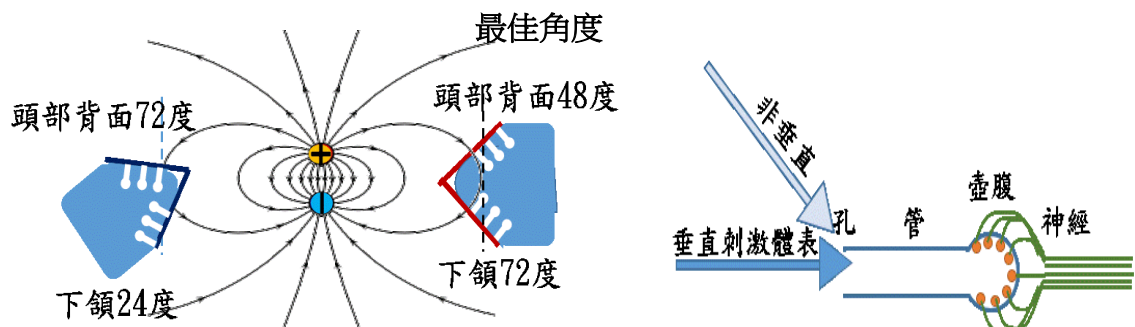


圖 4-22：推論圖

## (二) 實驗 3-2：模擬各種環境因素

### 實驗 3-2-1：模擬場域大小對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將兩根針相距 3 公分（模擬小魚）插在底部接上電源。
- (2) 再將另兩根針（相距 3 公分）插在距底部 5 公分處，固定不動（模擬壺腹細胞）。
- (3) 灌水至距底部 5 公分處，紀錄電壓，灌水依序 5、10、15、20、25、30、35、40、45 公分。
- (4) 進行 3 次（每次換水和針），取平均值。



圖 4-23：實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據參考附件十）

- (1) 根據圖 4-24，模擬場域愈大，感電能力愈好。

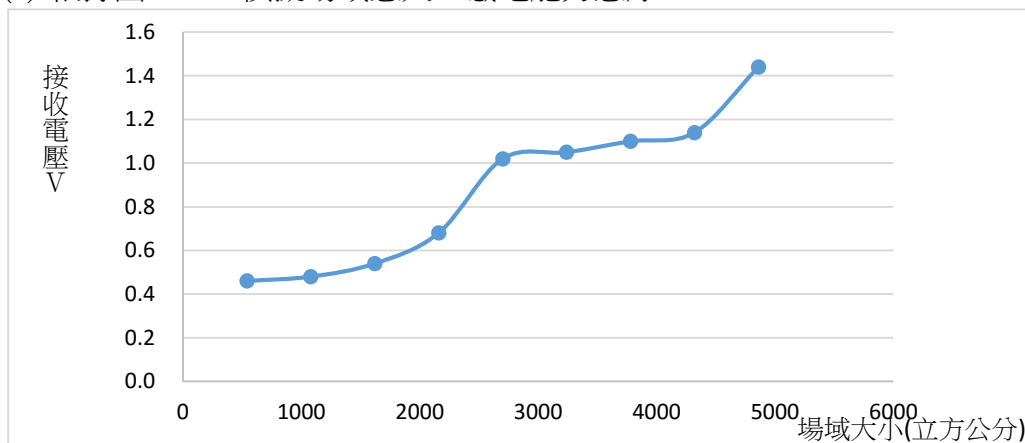


圖 4-24：模擬場域大小對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-25：由於電力線會互相排斥，因此場域越大，可使電力線發展較完全，造成鯊魚感電的靈敏度越佳。
- (2) 模擬場域愈大，接收電壓愈好，造成靈敏度愈佳。實際上，鯊魚在越廣大的海域，感電能力愈靈敏；而活在深海的鯊魚感電能力比近海淺灘的鯊魚更重要。

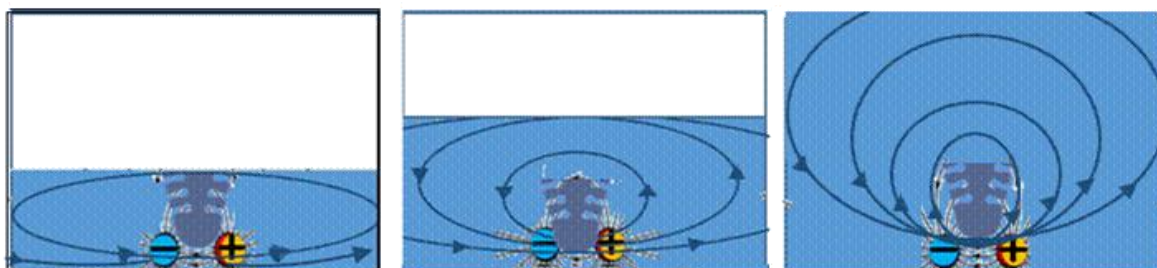


圖 4-25：推論圖

### 實驗 3-2-2：模擬沙子厚度對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 杯子底部插上兩根針（相距 3 公分），接上電源，模擬小魚放電。
- (2) 固定兩銅片於杯子上方（相距 3 公分），模擬鯊魚。
- (3) 杯底砂子厚度 1~13 公分，水的高度限制固定。
- (4) 進行五次（每次換水和砂和針），記錄電壓，取平均值。

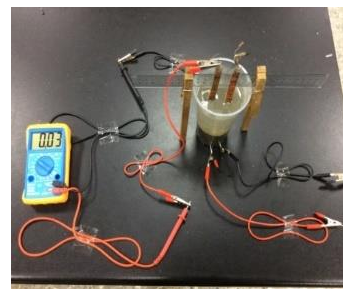


圖 4-26：實驗裝置圖

#### 2. 結果：（參考附件十一）

- (1) 根據圖 4-27，模擬砂子厚度在 1~3 公分時，收電效果最佳，模擬砂子厚度在 12~13 公分時，效果突然提升。

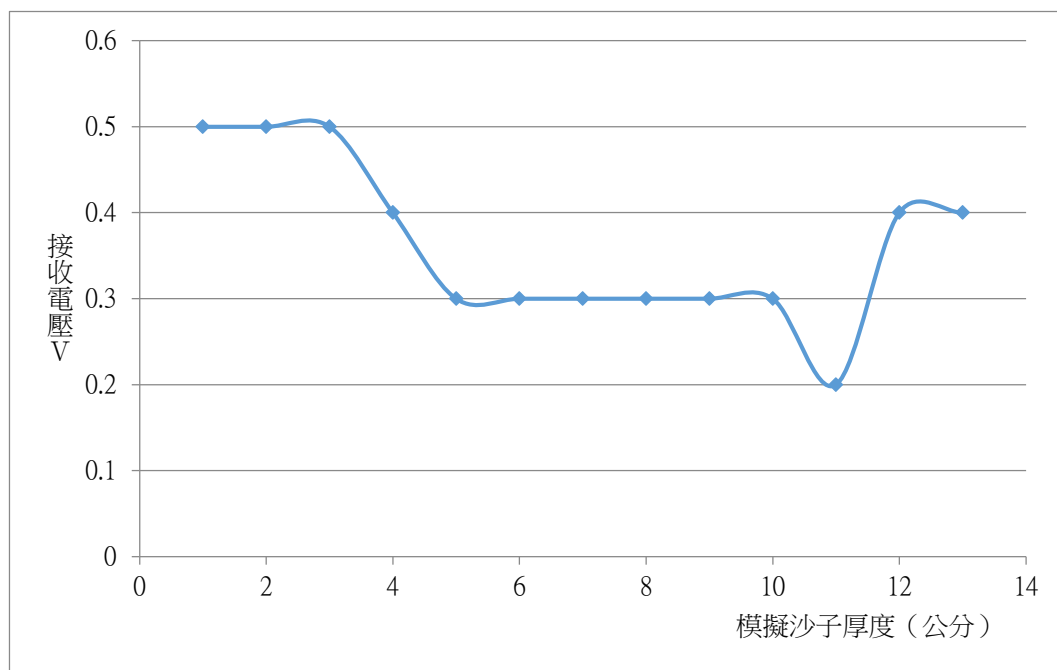
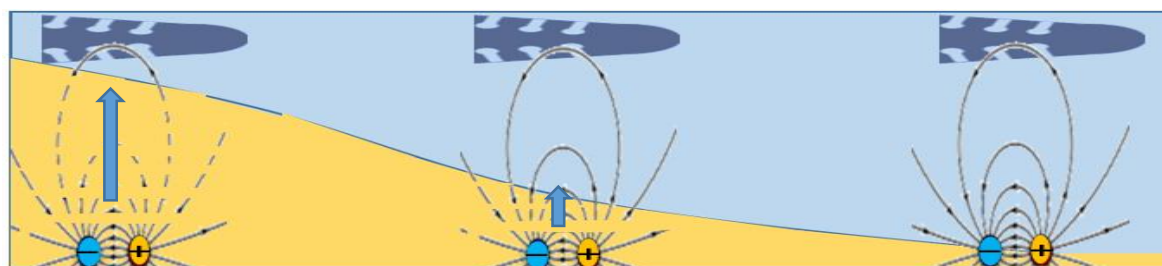


圖 4-27：模擬沙子厚度對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-28：沙子在某區域之特定厚度，會將電力線集中，使鯊魚容易偵測到生物電；而沙子淺時，較不會蓋住電力線，使鯊魚好接收生物電。
- (2) 砂子夠淺時，生物電較不容易被覆蓋，鯊魚較容易偵測；砂子厚度在某範圍內時，生物電會被覆蓋，造成鯊魚不容易偵測；而當砂子厚度在特定厚度因沙子顆粒無法導電，所以電力線會繞道而行，使電有一定的集中通道，因此鯊魚又容易偵測生物電。



沙子厚

圖 4-28：推論圖

沙子淺

### 實驗 3-2-3：模擬水深淺對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將兩根針相距 3 公分（模擬小魚）插在底部接上電源。
- (2) 再將另兩根針相距 3 公分（模擬鯊魚）插在距底部 5 公分處。
- (3) 灌水至 5 公分處，記下電壓值，拔出，黏上膠帶。依序灌水至 5、10、15、20、25、30、35、40、45 公分。
- (4) 每次移動針往上 5 公分，水往上 5 公分，記錄電壓值直到針與水離地 45 公分。
- (5) 進行 3 次（每次換水和針），取平均值。

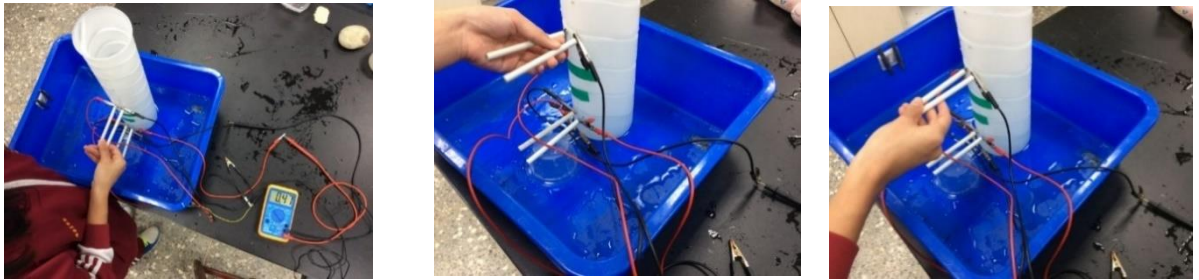


圖 4-29 實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據參考附件十二）

- (1) 模擬水域愈淺則感電能力愈好。
- (2) 根據圖 4-30，模擬水深 10 公分以上時，收電效果尚可。

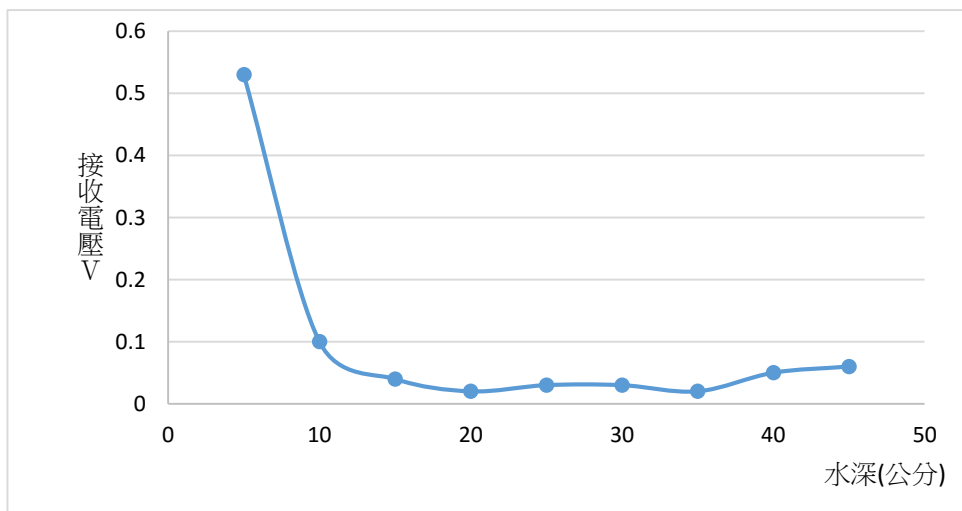
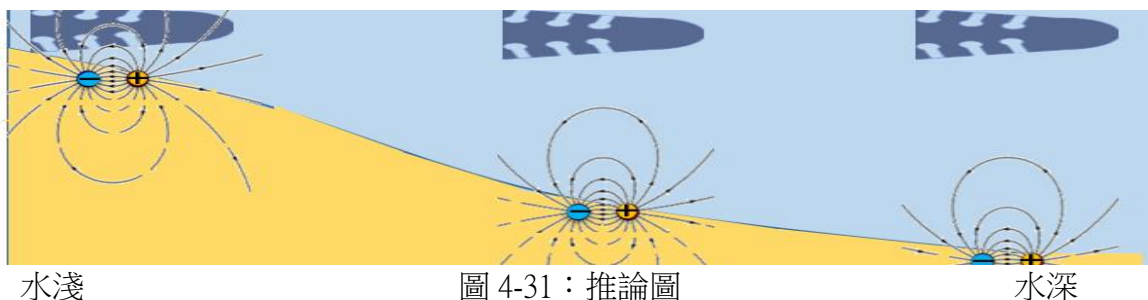


圖 4-30：模擬水深淺對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-31：水深時，鯊魚所接收到的電壓應相同，所以水深並不影響鯊魚感電能力。
- (2) 水深實際超過 5 公分，對鯊魚感電影響不大。





### (三)、實驗 3-3：模擬獵物之影響

#### 實驗 3-3-1：模擬小魚埋入灘內深度對感電能力的影響

1. 步驟：

- (1) 固定砂子深度 8 公分、水深 7 公分（銅片模擬鯊魚位置，至於水面）。
- (2) 將碳棒放電（模擬小魚）從沙子底部埋藏，每次上移 1 公分，到距底部 8 公分。
- (3) 再從水與砂之交接處每次上移 1 公分，直到距模擬鯊魚 1 公分。
- (4) 進行 3 次，每次換砂換水，取平均值。



圖 4-32：實驗裝置圖

2. 結論：（數據參考附件十三）

- (1) 據圖 4-33，模擬小魚埋入沙子 0 至-7 公分，模擬鯊魚感測電壓大於埋入-8 公分。
- (2) 當模擬小魚在水中愈接近水面的模擬鯊魚，模擬鯊魚的感測電壓愈強。
- (3) 模擬小魚處於水中比埋入沙中更容易被偵測到。

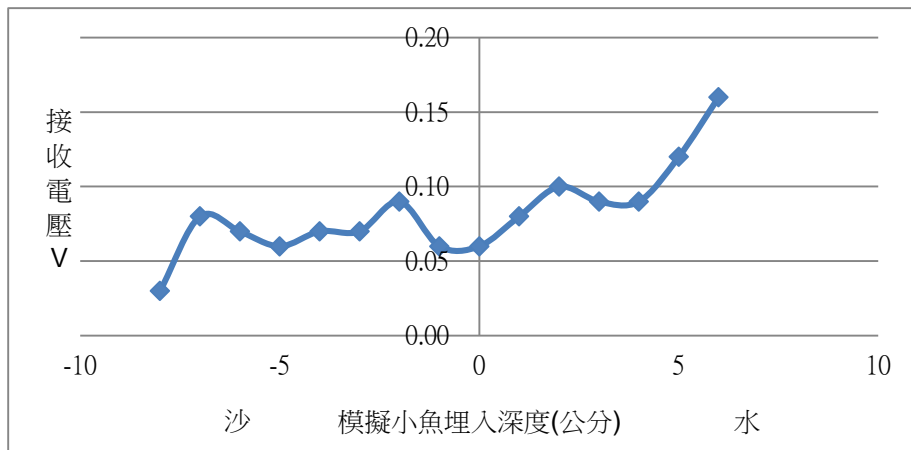


圖 4-33：模擬小魚埋入灘內深度小對感電能力的影響

3. 推論：

- (1) 推論圖 4-34：小魚在水中時鯊魚的感電能力優於在沙中，水中小魚釋放出的電力線較完整，較易被偵測；當小魚埋入沙中，淺沙不易覆蓋生物弱電，鯊魚能用感電力測得，但若小魚埋入更深處，電力線的強度愈弱，則鯊魚愈難偵測。

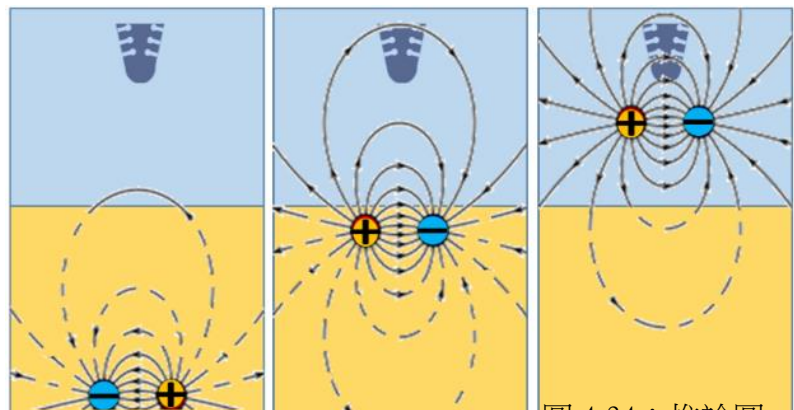


圖 4-34：推論圖

- (2) 實際鯊魚較容易偵測在水中移動的小魚，當小魚埋入沙中時，鯊魚依然能用感電能力偵測到，但若小魚埋入更深的沙中，則鯊魚感電能力下降。

### 實驗 3-3-2：模擬鯊魚同時偵測小魚與大魚對感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將兩銅片分別黏上去漆之漆包線 1.5 公分 8 根，插進鯊魚頭模型。
- (2) 將兩枝碳棒（模擬小魚）黏在塑膠瓦楞板，作兩組，相距 20 公分。
- (3) 將其中一組接上可調式變壓器，先調 0 格。
- (4) 轉動模擬鯊魚組，從 0 度旋轉至 180 度，紀錄數據。
- (5) 再將可調式變壓器調到 1 格，轉動模擬鯊魚組，從 0 度旋轉至 180 度，記錄數據。
- (6) 每次轉動 1 格直到 9 格，並重複紀錄數據之動作。
- (7) 重複 3 次（每次換水），取平均值。

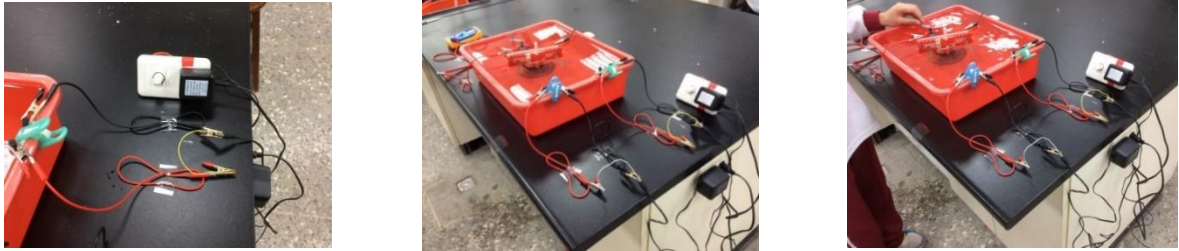


圖 4-35 實驗裝置圖

#### 2. 結論：（數據參考附件十四）

- (1) 根據圖 4-36，電壓差愈大，愈容易分辨出兩隻模擬小魚。
- (2) 當模擬鯊魚正面朝向兩隻模擬小魚時，辨識能力愈差。

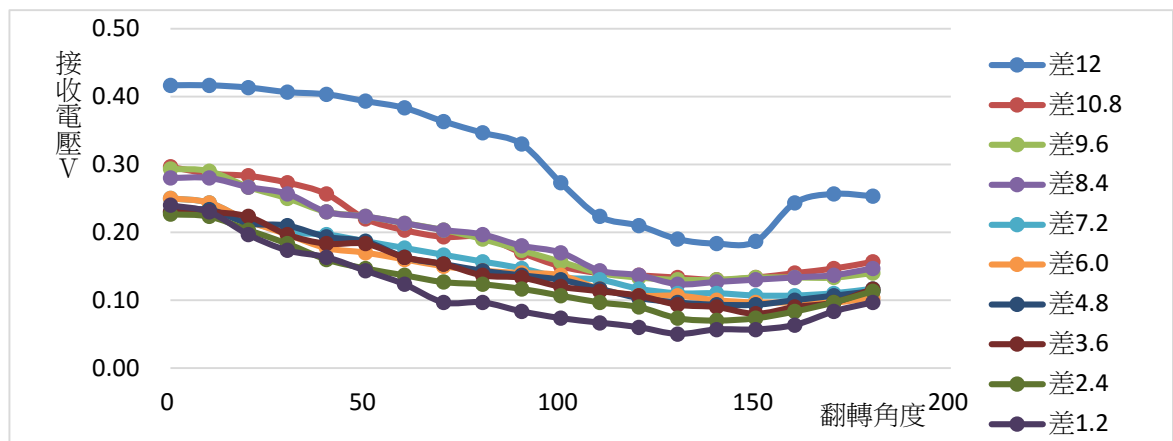


圖 4-36：模擬鯊魚同時偵測小魚與大魚對感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-37：當兩小魚電壓差愈大時，會使兩電場的交集區零亂，使鯊魚能夠分辨兩小魚位置；而當兩小魚電壓差愈小，兩電場之交集區較整齊，使鯊魚較難分辨兩隻魚的位置。
- (2) 實際鯊魚偵測時，較容易偵測出電壓差大的魚隻。
- (3) 鯊魚會利用側邊壺腹細胞來定位小魚位置。

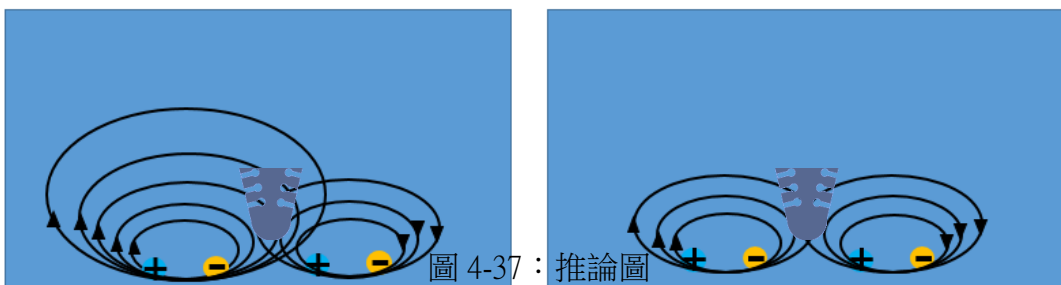


圖 4-37：推論圖

### 實驗 3-3-3：模擬兩小魚距離對鯊魚感電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 製作模擬鯊魚頭：將兩銅片分別黏上去漆之漆包線 1.5 公分 8 根（模擬壺腹細胞），插進鯊魚頭模型。
- (2) 將兩枝碳棒（模擬小魚）黏在塑膠瓦楞板，作兩組。
- (3) 相距 20 公分，分別接上電源。
- (4) 模擬鯊魚頭每次旋轉 10 度，記下數據，直到 180 度。
- (5) 將兩碳棒組各往內縮 2 公分，相距 16 公分，重複動作(4)。
- (6) 每次各往內縮 2 公分，直到相距 0 公分為止。
- (7) 重複 3 次（每次換水），取平均值。



圖 4-38 實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據參考附件十五）

- (1) 根據圖 4-39，模擬兩小魚相距越遠，模擬鯊魚辨識能力越佳。
- (2) 當模擬鯊魚正面朝向兩隻模擬小魚時，辨識能力較差。

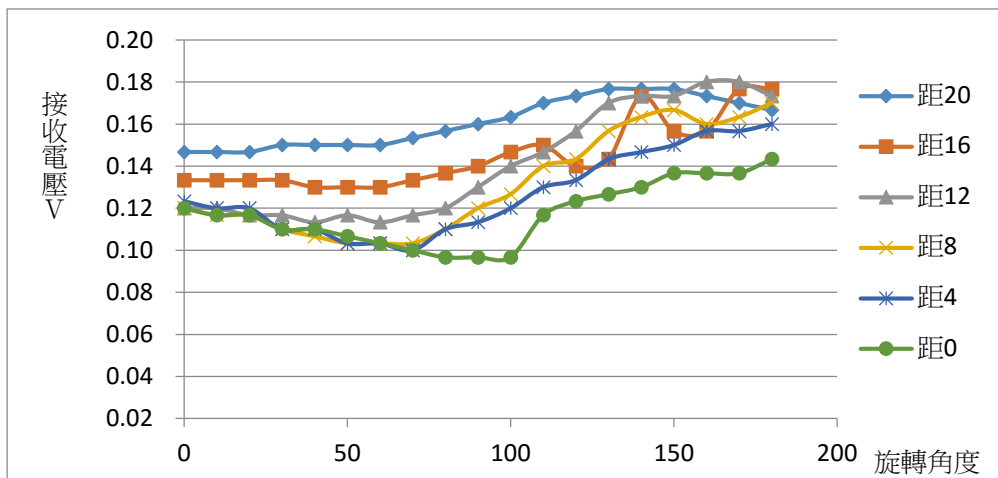


圖 4-39：模擬兩小魚距離對鯊魚感電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-40：兩隻小魚靠愈遠時，電力線會向外擴展較大，使鯊魚可以偵測到；而當兩小魚靠愈近時，會像磁鐵一樣，將電力線集中，而使鯊魚無法偵測到。
- (2) 鯊魚會利用側邊壺腹細胞來定位小魚位置。
- (3) 魚隻相距越遠越容易辨識出來，證明影片中，鯊魚總是捕捉落單的魚隻。

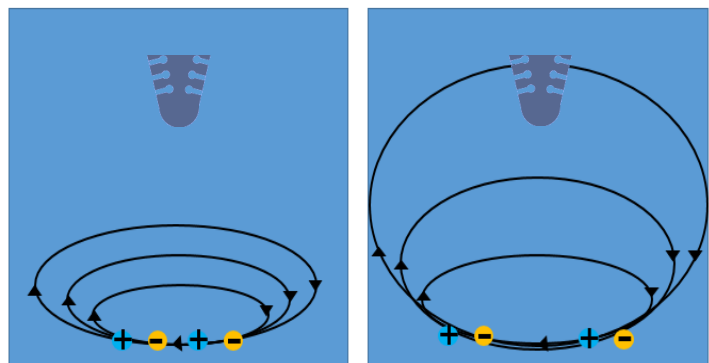


圖 4-40：推論圖

### 實驗 3-3-4：模擬小魚尺寸對鯊魚電能力的影響

#### 1. 步驟：

- (1) 將兩碳棒相距 24 公分夾在盆壁（模擬小魚），離兩銅片（模擬鯊魚）40 公分。
- (2) 每次各往內縮 0.5 公分，從相距 24 公分到相距 1 公分為止。
- (3) 重複 5 次（每次換水），取平均值。

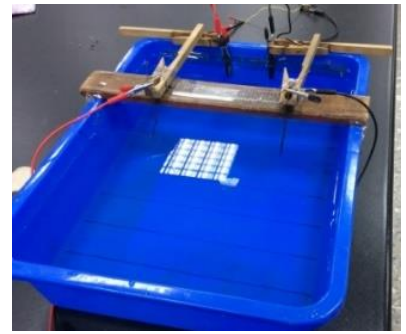


圖 4-41：實驗裝置圖

#### 2. 結果：（數據參考附件十六）

- (1) 根據圖 4-42，小魚越大隻，鯊魚越容易辨識，但鯊魚對 20 公分以上小魚的辨識能力沒大差別。

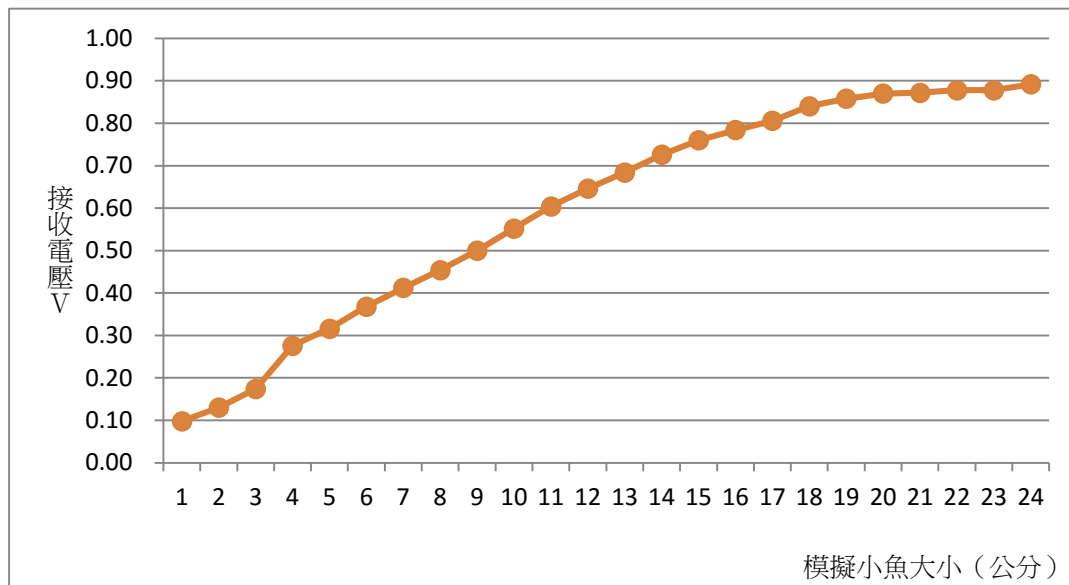


圖 4-42：模擬小魚尺寸對鯊魚電能力的影響

#### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-43：當小魚尺寸愈大時，兩極的距離也就愈遠，使電力線無法集中使鯊魚越易偵測到；而當小魚尺寸小時，兩極距離較近，使電力線集中，讓鯊魚較無法偵測到。
- (2) 鯊魚壺腹細胞對小型魚的辨識能力需較靈敏。
- (3) 小於尺寸對吃大型魚類的鯊魚影響較小，而吃小型魚類的鯊魚感電能力相對重要。

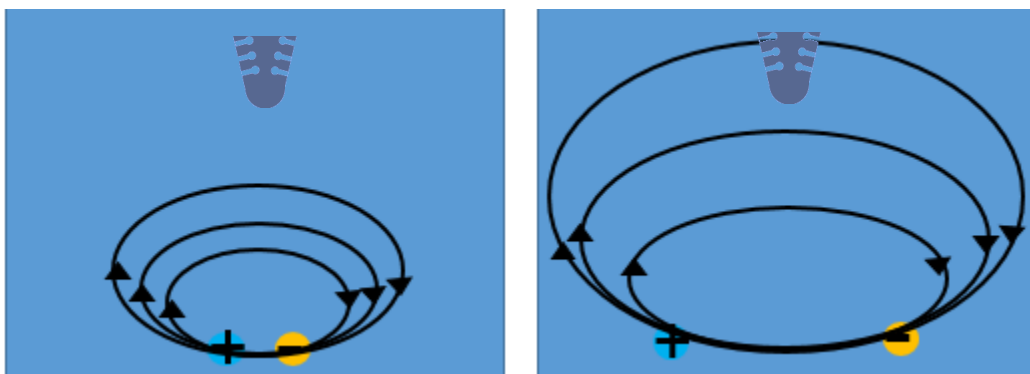


圖 4-43：推論圖

#### (四) 實驗 3-4：模擬鯊魚游動過程中的影響

##### 實驗 3-4-1：模擬鯊魚感應角度對電能力的影響

###### 1. 步驟：

- (1) 將旋轉角度齒輪組接上第一片銅片，與水面呈垂直放入水中，模擬壺腹細胞。
- (2) 第二片銅片插入水中固定不動，模擬側線細胞。
- (3) 碳棒（模擬小魚）放電 12 伏特。
- (4) 每次將第一片銅片角度向外翻轉 10 度，0 度到 90 度代表頭部右側壺腹細胞，90 度到 180 度代表頭部左側壺腹細胞。
- (5) 重複 5 次（每次換水），取平均值。

###### 2. 結果：（數據參考附件十七）

- (1) 根據圖 4-45，在模擬鯊魚擺頭過程中，以感電能力而言，0 度及 180 度最好，90 到 110 度最弱。



圖 4-44：實驗裝置圖

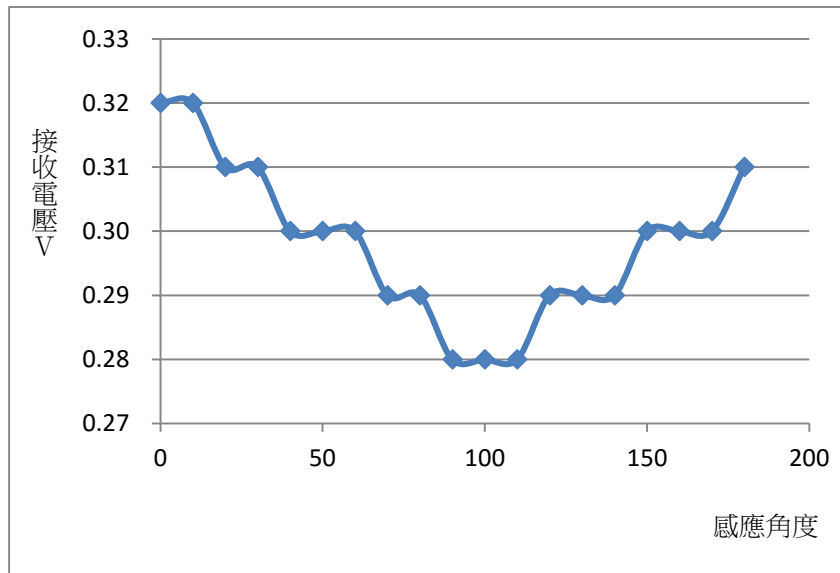


圖 4-45：模擬鯊魚感應角度對電能力的影響

###### 3. 推論：

- (1) 推論圖 4-46：鯊魚在追尋獵物時可藉由頭部左右擺動及側邊壺腹西胞來提對獵物。
- (2) 當鯊魚頭部擺向側邊時，感電能力最為靈敏；當鯊魚頭部直接朝向獵物時，有助於鯊魚在捕食獵物的搖擺頭部的過程中更能精確校準獵物位置。

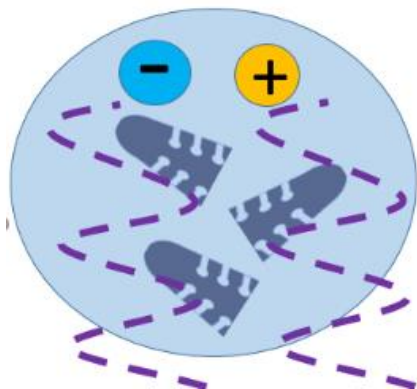


圖 4-46：推論圖

### 實驗 3-4-2：模擬鯊魚距離角度對電能力的影響

1. 步驟：

- (1) 將水盆底部放一把長尺。
- (2) 將模擬鯊魚每次前進 6 公分，從距離 36 公分一直到距離發電體 6 公分。
- (3) 在將模擬鯊魚前進至距離發電體 3 公分。
- (4) 進行 3 次重覆（每次換水），取平均值。

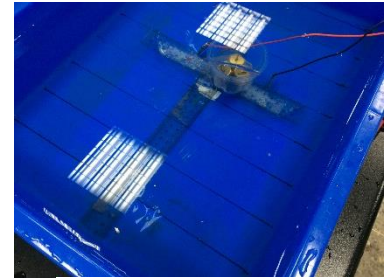


圖 4-47：實驗裝置圖

2. 結果：

- (1) 根據圖 4-48，鯊魚距離小魚越近，接收電壓越高，尤其距離小於 6 公分時，效果最佳。

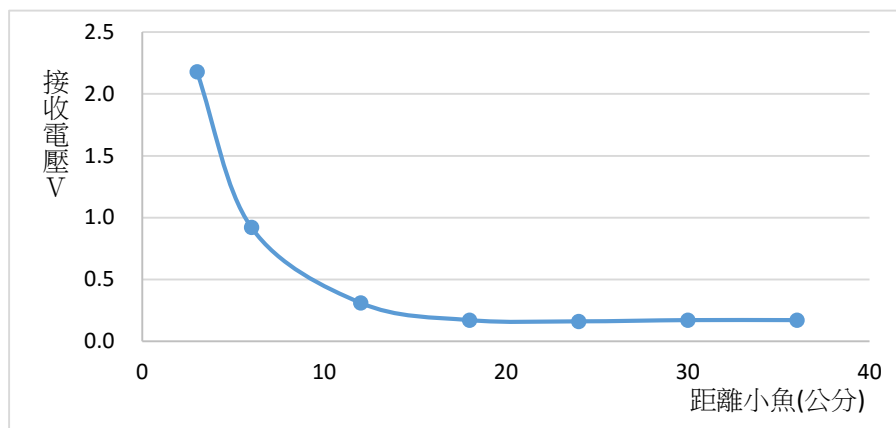


圖 4-48：模擬鯊魚距離角度對電能力的影響

3. 推論：

- (1) 推論圖 4-49：距小魚越近感電能力越強，能接收到電力線越多。

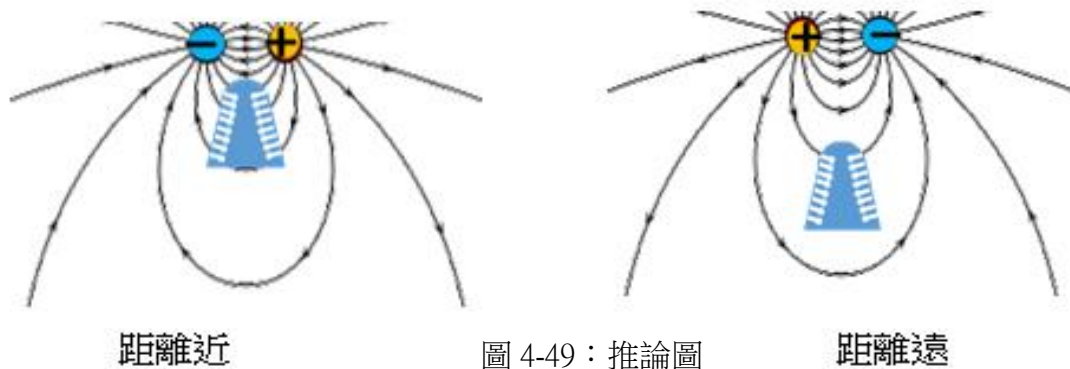


圖 4-49：推論圖

- (2) 魚感電能力只適合近距離的獵物偵測。

- (3) 此實驗應證了圖 4-50：



圖 4-50：鯊魚感官能力範圍示意圖

## 研究四：研究鯊魚感電能力的應用

動機：利用鯊魚感電能力和模擬實驗研發出一套可估算池內魚隻數量的儀器。

### (一) 實驗 4-1：模擬應用實驗

#### 實驗 4-1-1：模擬偵測時外界放電

1. 步驟：

- (1) 將 30 組電線插在麵包板上，接上電，模擬小魚放電。
- (2) 在水中碳棒接入電源 25V（外界放電）。
- (3) 魚群從距離感應器 6 公分，每次後退 6 公分直到距離 36 公分。
- (4) 拔去 5 組，再次執行 1-3 動作，再拔去 5 組，直到剩下 5 組。
- (5) 換電線和水，重複 3 次，取平均值。

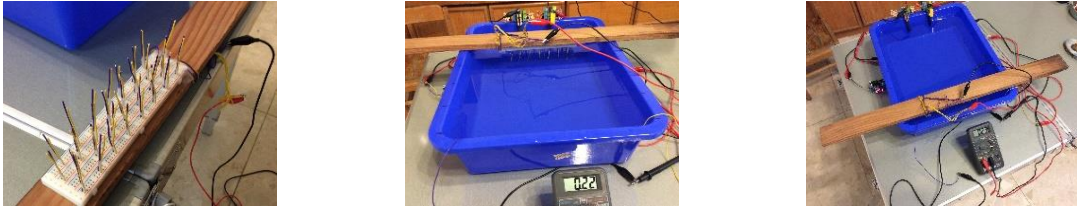


圖 4-51：實驗裝置圖

2. 結論：（數據參考附件十九）

- (1) 根據圖 4-52，距離感應器愈遠，所感應到的電壓愈小。
- (2) 根據圖 4-52，小魚隻數愈多，所感應到電壓與大。

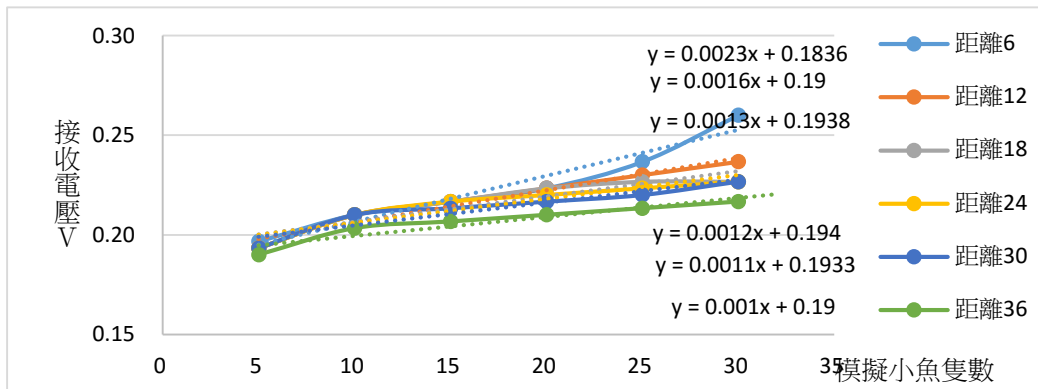


圖 4-52：模擬偵測時外界無放電

3. 推論：

- (1) 推論圖 4-53：小魚是比水還優質的導體，因此當小魚越多，越能把電力線集中，使增測器的電壓值越高。
- (2) 因為模擬實驗可測出一定的電壓值，並存在著趨勢，因此往後可藉由趨勢來判讀魚數的多寡，所以可實際應用於池內魚隻估計。

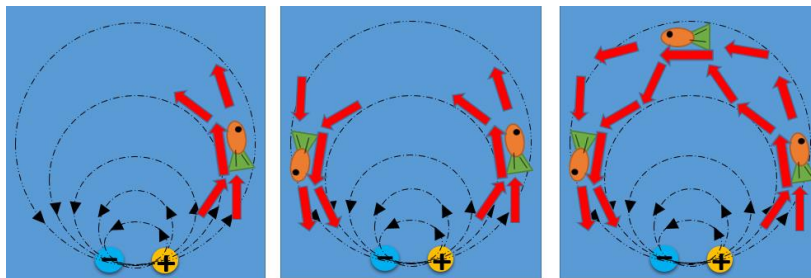


圖 4-53：推論圖

### 實驗 4-1-2：模擬偵測時外界無放電

1. 步驟：

- (1) 將 30 組電線插在麵包板上，接上電，模擬小魚放電。
- (2) 魚群從距離感應器 6 公分，每次後退 6 公分直到距離 36 公分。
- (3) 拔去 5 組，執行 1-3 動作，再拔去 5 組，直到剩下 5 組。
- (4) 換電線和水，重複 3 次。

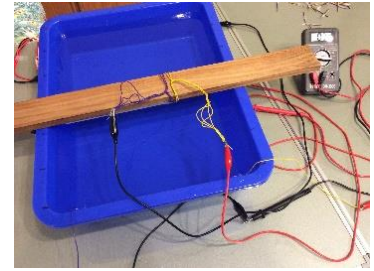


圖 4-54：實驗裝置圖

2. 結論：(數據參考附件二十)

- (1) 根據圖 4-55，距離感應器愈遠，所感應到的電壓愈小。
- (2) 根據圖 4-55，小魚隻數愈多，所感應到電壓愈小。

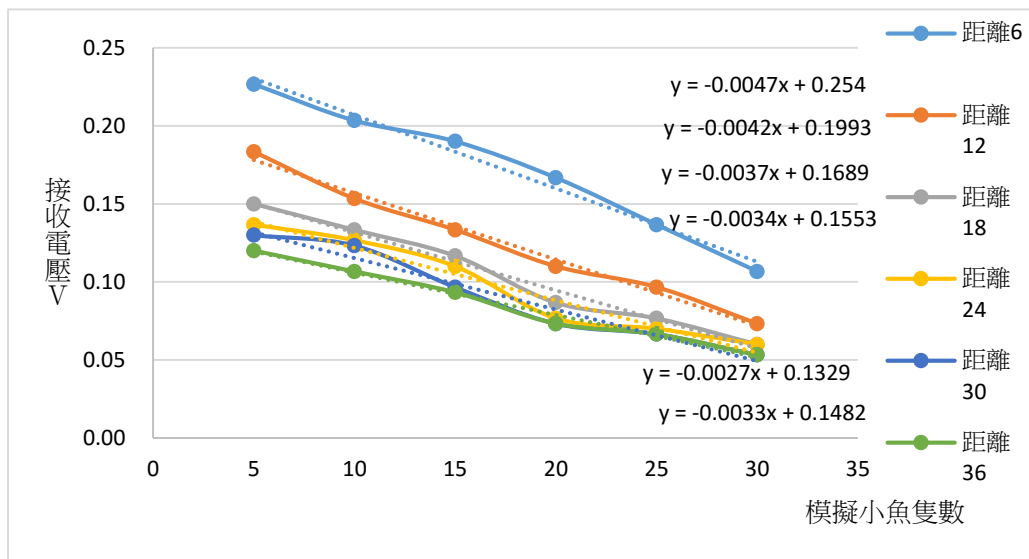


圖 4-55：模擬偵測時外界無放電

3. 推論：

- (1) 推論圖 4-56：由於小魚會將電荷吸引過去，因此當小魚放入越多時，水中的電荷會被小魚吸引過去，使偵測器越無法偵測到電壓值。
- (2) 因為模擬實驗可測出一定的數值測出數值，並存在著趨勢，因此往後可藉由趨勢來判讀魚數的多寡，所以可實際應用於池內魚隻估計。

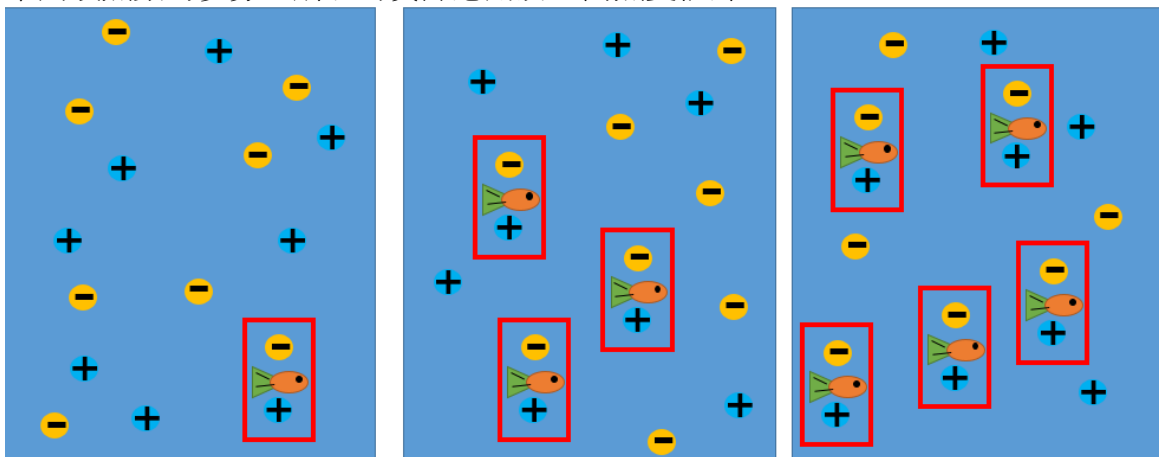


圖 4-56：推論圖



## (二) 實驗 4-2：實際應用實驗（以斑馬魚測試）

### 實驗 4-2-1：實際偵測時外界放電

- 步驟：
  - 碳棒在水盆中放電 25V，表示外界放電。
  - 將斑馬魚每次撈 5 隻進入水盆中，直到 30 隻魚，以偵測器量電壓值。
  - 重複 3 次。
- 結果：（數據請參考附件二十一）
  - 小魚越多時，所偵測到的電壓越大。
  - 此實驗應證了實驗 4-1-1。



圖 4-57：實驗裝置圖

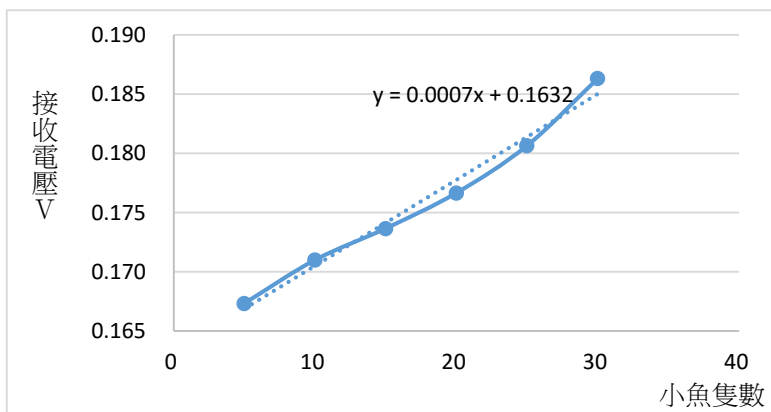


圖 4-58：實際偵測時外界放電

### 實驗 4-2-2：實際偵測時外界無放電

- 步驟：
  - 將斑馬魚每次撈 5 隻進入水盆中，記下電壓值，直到 30 隻魚。
  - 重複 3 次，取平均值。
- 結果：（數據參考附件二十二）
  - 小魚越多時，所偵測到的電壓越小。
  - 此實驗應證了實驗 4-1-2。



圖 4-59：實驗裝置圖

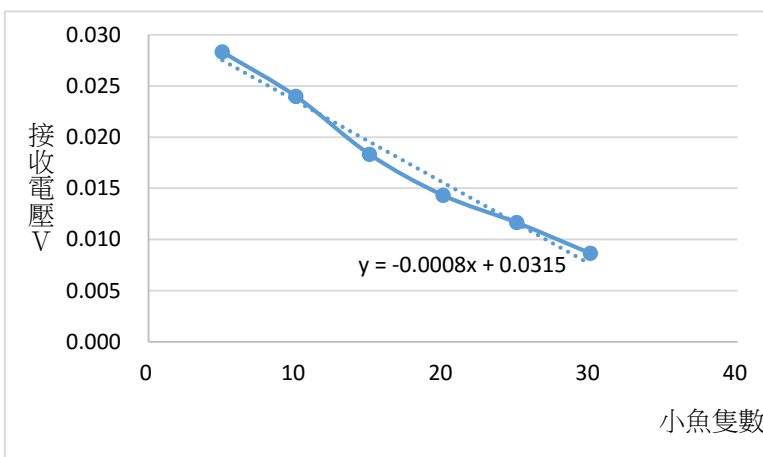
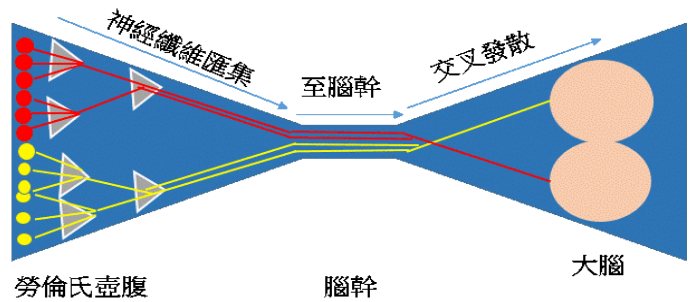


圖 4-60：實際偵測時外界無放電

## 伍、結論

### 研究一：壺腹細胞分布狀況對大腦連接的關係

一、壺腹細胞分布在頭部，神經匯集到腦神經第七對再集中至腦幹，最後到大腦前端進行訊息整合；解剖發現，斑鯊的大小腦均較中腦發達，推論類似斑鯊的底棲型小型鯊魚感電能力較視覺重要。建議未來可深入探討斑鯊腦之訊息利用與整合。



二、此次實驗是用死體分析神經傳導路徑，亦可測得神經傳導路徑結果，也完全符合文獻中利用活體實驗之傳導路徑。未來可利用外界放電研究神經傳導路徑。

圖 5-1：壺腹細胞神經訊息傳遞路徑示意圖

三、壺腹分布在頭部，在吻端主要呈線狀且密集分布，可提高感電能力。

### 研究二：斑鯊各部位電阻對電流傳導的關係

一、鯊魚用頭部壺腹細胞接收生物弱電時，電流進入魚體，因體表電阻大，內部產生導流現象，由臀部出去，推測可維持體內電中性並減少對壺腹細胞接收訊息的干擾。

二、進一步推測，鯊魚靠近灘地時，從臀部釋放電流進入沙灘，再次定位埋藏砂內的小魚，提高成功獵食機率。

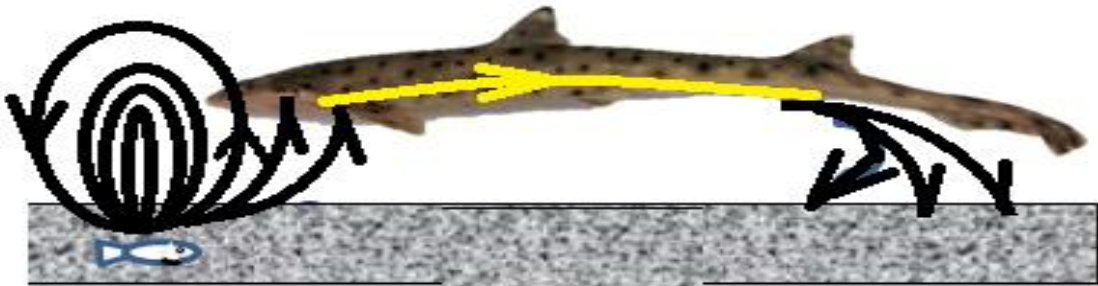


圖 5-2：鯊魚體內電路流通推測圖

### 研究三：模擬影響壺腹細胞感電靈敏度的因素

一、影響壺腹細胞感電靈敏度

1. 斑鯊構造因素：頭部寬度、體長、壺腹細胞分布面積、密集度、下頷抬升角度、頭部背面角度等。
2. 環境因素：場域大小、水灘的深淺。
3. 獵物因素：小魚大小、埋入灘中深度、魚隻數、魚隻相互距離。
4. 鯊魚游動過程因素：距離小魚遠近、頭部擺動角度。

二、模擬影響感電能力發現感測電壓良好條件

1. 斑鯊構造因素：頭部寬、體長短、壺腹細胞分布面積大、密集度高、下頷抬升 60~72 度、頭部背面 36~48 度。
2. 環境因素：場域大、水灘淺。
3. 獵物因素：小魚埋入沙中淺、魚隻少、魚隻大、魚隻相聚遠。
4. 鯊魚游動過程因素：距離小魚近、頭部擺動 0 度及 180 度。

- 三、鯊魚利用感電能力較易偵測到水中小魚，砂子內的小魚若埋入深度不足，容易被鯊魚偵測到，但若埋入一定的深度，鯊魚對其的感電能力將會大幅降低。
- 四、鯊魚可透過頭部擺動，調整壺腹細胞方位來定位獵物位置。
- 五、小魚相距越遠和釋放出電壓差愈大，鯊魚越易用感電能力辨識多隻魚；多隻魚靠一起，鯊魚分辨能力降低。推論，電覺適合用來偵測單隻魚，且海洋魚類群體活動原因之一可能產生干擾電場，降低被鯊魚等掠食者辨識出的機會；此外，鯊魚辨識一群魚，主要依賴其它感官。

#### **研究四：鯊魚感電能力的應用**

- 一、實際測試應證了模擬實驗。因此往後可藉由鯊魚感電能力的特性，研發出一套可進行池內魚數估算儀器，往後可繼續研究其應用並算出一條通式。
- 二、外界放電所接收到的電壓效果比外界無放電好：外界無放電，小魚會吸引電荷，導致越多小魚時，模擬儀器所偵測到的電壓值會漸漸趨近於零；而當外界放電，小魚越多，會將電力線集中，使數值越大，且小魚是弱導體，每增加一隻小魚，電壓值會略為提高，因此可偵測大量魚群。

### **陸、參考資料**

1. Brandon R. Brown (2002.1.19). Modeling an electrosensory landscape: behavioral and morphological optimization in elasmobranch prey capture. *The Journal of Experimental Biology* 205, 999–1007
2. A. J. Kalmijn (1971.3.18). The Electric Sense of Sharks and. *The Journal of Experimental Biology*, 55,371-383
3. Global Biodiversity Information Facility • Scoliodon laticaudus Müller & Henle, 1838 • from [www.gbif.org/species/2417865](http://www.gbif.org/species/2417865)
4. 【期刊文章】  
林欣怡、謝郁敏（2008）• 發電細胞與融合瘤技術結合之生物電池 • 中學生網站 • 取自 <http://www.shs.edu.tw/works/essay/2008/10/2008103100221249.pdf>
5. 【雜誌文章】  
菲爾茲(R. Douglas Fields)、翻譯／黃榮棋（2007年9月）• 斑鯊的第六感. 除了視覺、嗅覺、聽覺、味覺、觸覺這五種感官，斑鯊還有敏銳的「第六感」：電覺，可以偵測微弱電場，捕捉獵物 • *科學人雜誌*，67
6. 【影音資料】
  - (1) 嚴宏洋（2008年5月2日）• 生物訊號溝通的管道-人為干擾的負面效應 • 台大演講網 • 取自 [http://speech.ntu.edu.tw/sng/ci/index.php?c=User&m=vod\\_film&film\\_series=54&pager\\_PageID=12&film\\_sn=720](http://speech.ntu.edu.tw/sng/ci/index.php?c=User&m=vod_film&film_series=54&pager_PageID=12&film_sn=720)
  - (2) 陳柏熹、簡伯武、莊季瑛、凌斌、游一龍與郭余民（2014）• 神經細胞的電位 • 信號成功大學數位學習平台神經訊息傳遞特論 • 取自 [http://140.116.249.155/file.php/68233/Biopsy2014-Class3-Ch3\\_4-Neurophysiology\\_Neurotransmission1.pdf](http://140.116.249.155/file.php/68233/Biopsy2014-Class3-Ch3_4-Neurophysiology_Neurotransmission1.pdf)
7. 【媒體報導】  
陳振興、林宏彥（2014年1月16日）• 國立海洋生博物館鯊魚界的「第六感」!?! 好神

## 柒、附件

附件一·各壺腹細胞分布區與腦的神經連結關係表，黃底標示即為腦部接受到最高電壓區。  
(電阻單位  $\Omega$ )

A 區	左	右	B 區	左	右	C 區	左	右	D 區	左	右
	10.94	10.9		10.83	10.85		10.98	10.84		10.89	10.93
	10.87	10.85		10.78	10.8		10.92	10.84		10.74	10.86
	10.75	10.74		10.74	10.77		10.72	10.62		10.53	10.44
	10.63	10.56		10.64	10.6		10.37	10.31		10.34	10.33
10.65	10.63	10.62	10.55	10.43	10.41	10.43	10.39				
F 區	左	右	G 區	左	右	H 區	左	右	I 區	左	右
	10.83	10.79		10.79	10.82		10.64	10.56		10.72	10.8
	10.52	10.48		10.55	10.61		10.45	10.42		10.58	10.61
	10.34	10.32		10.43	10.48		10.42	10.32		10.43	10.48
	10.28	10.25		10.35	10.37		10.36	10.29		10.35	10.37
10.35	10.32	10.39	10.41	10.32	10.24	10.39	10.41				
J 區	左	右	K 區	左	右	L 區	左	右	M 區	左	右
	10.68	10.79		10.76	10.64		10.58	10.63		10.83	10.79
	10.6	10.63		10.61	10.53		10.51	10.53		10.62	10.58
	10.45	10.46		10.39	10.35		10.34	10.4		10.35	10.32
	10.42	10.13		10.37	10.33		10.34	10.38		10.36	10.34
10.35	10.38	10.36	10.32	10.20	10.29	10.30	10.27				

附件二·不同壺腹細胞分布區的電阻比較 (電阻單位  $\Omega$ )

腹面壺腹分布區	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	22.00	22.67	22.00	22.33	22.00	22.33	22.33	17.33	18.00
背面壺腹分布區	J	K	L	M					
	18.00	18.00	19.33	20.00					

附件三·不同側線區的測量電阻比較 (電阻單位  $\Omega$ )

	編號	1	2	3	4	5	6
側線	前	40.2	23.67	21.33	23	27.7	23
	中	21.33	18	18.83	18.83	18	18.17
	後	27.06	22	19.38	25	21.38	23.83

附件四·不同體表部位的測量電阻比較圖 (電阻單位  $\Omega$ )

背面				腹面			
頭	軀幹	臀	尾	頭	軀幹	臀	尾
16.21	527.02	37.06	48.22	25.56	19.94	19.06	19.73
鰭				側線			壺腹
背鰭	胸鰭	腹鰭	尾鰭	前	中	後	
30.44	27.20	33.44	25.06	26.48	18.86	23.11	20.49

附件五·模擬頭部寬度對感電能力的影響(電壓單位 V)

頭寬(公分)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.08	0.13	0.19	0.22	0.27	0.31	0.36	0.41	0.45
頭寬(公分)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	0.47	0.51	0.54	0.57	0.59	0.62	0.63	0.65	0.67
頭寬(公分)	19	20	21	22	23	24			
	0.68	0.67	0.69	0.69	0.70	0.69			

附件六・模擬體長對感電能力的影響(電壓單位 V)

體長	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.35	0.34	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.26	0.25
體長	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21
體長	21	22	23							
	0.21	0.20	0.20							

附件七・模擬壺腹細胞分布面積大小對感電能力的影響(電壓單位 V)

面積	1	2	3	4	5	6	7	8
	0.66	0.67	0.67	0.67	0.68	0.69	0.69	0.70

附件八・模擬壺腹細胞分布密集度對感電能力的影響(電壓單位 V)

分布密集度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.012	0.014	0.018	0.024	0.026	0.026	0.026	0.028	0.028	0.028
分布密集度	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.028	0.03	0.03	0.034	0.038	0.046	0.052	0.066	0.072	0.072
分布密集度	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	0.072	0.072	0.074	0.076	0.076	0.08	0.08	0.084	0.084	0.086

附件九・模擬壺腹細胞抬升角度對感電能力的影響(電壓單位 V)

水平翻轉角度 (下頷壺腹細胞)	0	12	24	36	48	60	72	84
	0.172	0.174	0.174	0.174	0.172	0.178	0.178	0.176
水平翻轉角度(頭 部背側壺腹細胞)	96	108	120	132	144	156	168	180
	0.176	0.176	0.178	0.18	0.18	0.176	0.178	0.178
備註(實際角度)	6	18	30	42	54	66	78	90

附件十・模擬場域大小對感電能力的影響(電壓單位 V)

場域大小(cm <sup>3</sup> )	540	1080	1620	2160	2700	3240	3780	4320	4860
	0.46	0.48	0.54	0.68	1.02	1.05	1.10	1.14	1.44

附件十一・模擬沙子厚度對感電能力的影響(電壓單位 V)

砂子厚度(公分)	1	2	3	4	5	6	7
	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3
砂子厚度(公分)	8	9	10	11	12	13	
	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	

附件十二・模擬水深淺對感電能力的影響(電壓單位 V)

水深淺(公分)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	0.53	0.10	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.05	0.06

附件十三・模擬小魚埋入灘內深度小對感電能力的影響(電壓單位 V)

	水								
小魚埋入深度(公分)	6	5	4	3	2	1	0		
	0.16	0.12	0.09	0.09	0.10	0.08	0.06		
	沙								
小魚埋入深度(公分)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	
	0.06	0.09	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.03	

附件十四· 模擬鯊魚同時偵測小魚與大魚對感電能力的影響(電壓單位 V)

兩魚電壓差 (V) 角度	12	10.8	9.6	8.4	7.2	6	4.8	3.6	2.4	1.2
0	0.42	0.30	0.29	0.28	0.25	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24
10	0.42	0.29	0.30	0.28	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.23
20	0.41	0.28	0.28	0.27	0.22	0.22	0.21	0.22	0.20	0.20
30	0.41	0.27	0.26	0.26	0.20	0.20	0.21	0.20	0.18	0.17
40	0.40	0.26	0.23	0.23	0.20	0.18	0.19	0.18	0.16	0.16
50	0.39	0.22	0.22	0.22	0.19	0.17	0.19	0.18	0.15	0.14
60	0.38	0.20	0.21	0.21	0.18	0.16	0.16	0.16	0.14	0.12
70	0.36	0.19	0.20	0.20	0.17	0.15	0.15	0.15	0.13	0.10
80	0.35	0.19	0.19	0.20	0.16	0.14	0.14	0.14	0.12	0.10
90	0.33	0.17	0.18	0.18	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.08
100	0.27	0.15	0.16	0.17	0.13	0.14	0.13	0.12	0.11	0.07
110	0.22	0.14	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.07
120	0.21	0.14	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.11	0.09	0.06
130	0.19	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.07	0.05
140	0.18	0.13	0.13	0.13	0.11	0.10	0.09	0.09	0.07	0.06
150	0.19	0.13	0.13	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06
160	0.24	0.14	0.13	0.13	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.06
170	0.26	0.15	0.13	0.14	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.08
180	0.25	0.16	0.13	0.15	0.12	0.10	0.11	0.12	0.11	0.10

附件十五· 模擬兩小魚距離對鯊魚感電能力的影響(電壓單位 V)

兩小魚相距距離角度	0	4	8	12	16	20
0	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15
10	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15
20	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15
30	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.15
40	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.15
50	0.11	0.10	0.10	0.12	0.13	0.15
60	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.15
70	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.15
80	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.16
90	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16
100	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
110	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.17
120	0.12	0.13	0.14	0.16	0.14	0.17
130	0.13	0.14	0.16	0.17	0.14	0.18
140	0.13	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18
150	0.14	0.15	0.17	0.17	0.16	0.18
160	0.14	0.16	0.16	0.18	0.16	0.17
170	0.14	0.16	0.16	0.18	0.18	0.17
180	0.14	0.16	0.17	0.17	0.18	0.17

附件十六·模擬小魚尺寸對鯊魚電能力的影響(電壓單位 V)

尺寸(cm)	1	2	3	4	5	6	7	8
	0.10	0.13	0.17	0.28	0.32	0.37	0.41	0.45
尺寸(cm)	9	10	11	12	13	14	15	16
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.68	0.73	0.76	0.78
尺寸(cm)	17	18	19	20	21	22	23	24
	0.81	0.84	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.89

附件十七·模擬鯊魚感應角度對電能力的影響(電壓單位 V)

角度	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	
角度	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31

附件十八·模擬鯊魚距離角度對電能力的影響(電壓單位 V)

距離	36	30	24	18	12	6	3
	0.17	0.17	0.16	0.17	0.31	0.92	2.18

附件十九·模擬偵測外界放電(電壓單位 V)

小魚 隻數 與感應器 距離	5	10	15	20	25	30
距離 6	0.20	0.21	0.22	0.22	0.24	0.26
距離 12	0.19	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24
距離 18	0.19	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23
距離 24	0.19	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23
距離 30	0.19	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23
距離 36	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.22

附件二十·模擬偵測外界無放電(電壓單位 V)

小魚隻數 與感應器距離	5	10	15	20	25	30
距離 6	0.23	0.20	0.19	0.17	0.14	0.11
距離 12	0.18	0.15	0.13	0.11	0.10	0.07
距離 18	0.15	0.13	0.12	0.09	0.08	0.06
距離 24	0.14	0.13	0.11	0.08	0.07	0.06
距離 30	0.13	0.12	0.10	0.07	0.07	0.05
距離 36	0.12	0.11	0.09	0.07	0.07	0.08

附件二十一·實際偵測外界放電(電壓單位 V)

魚數	5	10	15	20	25	30
	0.167	0.171	0.174	0.177	0.181	0.186

附件二十二·實際偵測外界無放電(電壓單位 V)

魚數	5	10	15	20	25	30
	0.028	0.024	0.018	0.014	0.012	0.009

## 【評語】 030320

1. 本研究作品的主題在於探討外界電場在班鯊腦部處理與體內流通路徑，透過作者自製的偵測設備分析不同因子對班鯊電感之影響。
2. 針對單人作者對實驗工作的熱愛與辛勤的付出，表示高度嘉許。
3. 未來模擬班鯊壺腹細胞感電能力，以偵測小魚數量，賡續研究應可建立推算公式，用以印證及修正自製設備。