

2024年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 050008
參展科別 動物學
作品名稱 構造、力學與能耗比較淡水螺的仰泳機制

就讀學校 臺南市私立德光高級中學
國立臺南第一高級中學
國立臺南第一高級中學
指導教師 江芝韻、鄭楷騰
作者姓名 王苡珊、鍾招佑、許晉瑋

關鍵詞 囊螺、台灣錐實螺、仰泳

作者照片



中文摘要

我們發現扁捲總科的囊螺 (*Physella acuta*) 與椎實螺科的台灣椎實螺 (*Lymnaea swinhoei*) 在親緣關係上雖屬不同科，但卻擁有相似的外型並都具有奇特仰泳動作，推測或許是兩者適應相似生存環境後進而演化出相近構造與行為模式。根據我們的實驗結果顯示，囊螺比起台灣椎實螺擁有較佳的翻身仰泳能力，其螺殼質量不均的特性使其產生比椎實螺大 1.7 倍的力矩助其翻身仰泳，另外囊螺氣囊有著比椎實螺更大的儲質比助其浮沉調節。漂浮方面，囊螺腹部一半浮於水面所產生的表面張力即可支撐其漂浮，而椎實螺的漂浮仍需氣囊協助，無法單靠表面張力。能量耗損上，仰泳比水中爬行擁有近百倍的節能效益，或是因此讓兩種螺類在演化上願意承擔被掠食者發現的風險執行仰泳。未來期待以仿生概念將仰泳的運動模式延伸結合，打造出更節能省電的水中移動設施。

Abstract

We found that the Bladder snail (*Physella acuta*) from the Planorbidae family and the Taiwan marsh snail (*Lymnaea swinhoei*) from the Lymnaeidae family have a somewhat distant genetic relationship but exhibit similar appearances and peculiar backstroke behavior. These similarities in structure and behavior might evolved due to their adaptation to similar environments. Our experiment results reveal that the Bladder snail has better flipping and backstroke abilities than the Taiwan marsh snail. The uneven distribution of shell mass in Bladder snails drive a 1.7 times torque than that in Taiwan marsh snail, assisting in its flipping and backstroke ability. Additionally, the Bladder snail has a larger air sac-to-body mass ratio for buoyancy regulation than the Taiwan marsh snail. When it comes to floating, the Bladder snail can be supported by surface tension when half of its abdomen is above the water's surface, while the Taiwan marsh snail still requires the assistance of an air sac and cannot float solely on surface tension. In terms of energy consumption, backstroke behavior provides energy-saving benefits nearly a hundred times greater compared to crawling in water. This drives both snail species to willingly risk being detected by predators while engaging in backstroke behavior. In the future, we aim to extend and combine the backstroke movement pattern using biomimicry concepts to create more energy-efficient aquatic transportation devices.

壹、目的

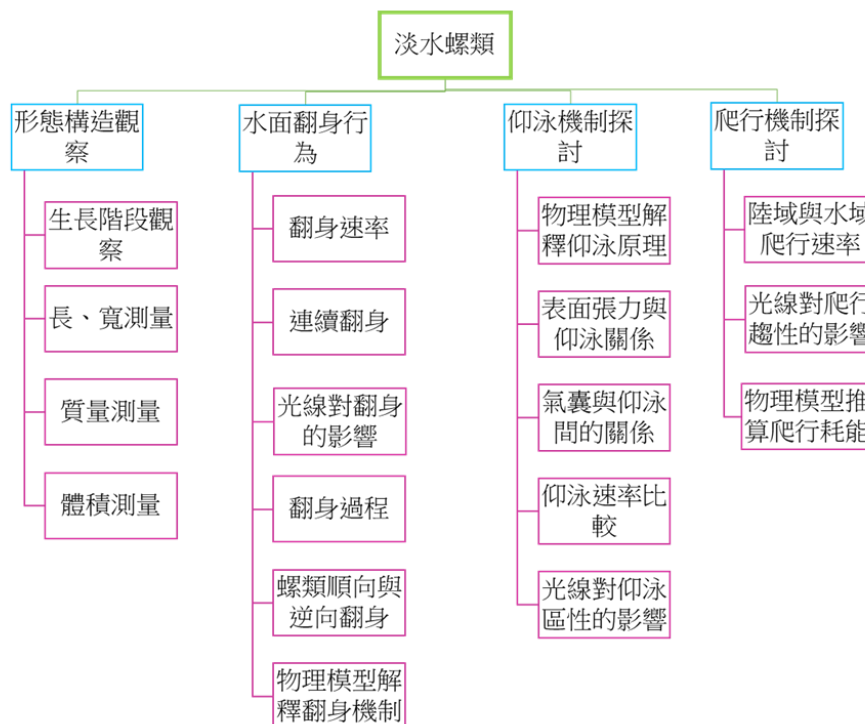
一、 研究動機

團隊成員偶然在家中水族箱內發現有一種特殊的淡水螺類，其會漂浮於水面後進行翻身，並以腹部朝上的方式執行仰泳，這特殊的水中運動模式引起了

我們的興趣，決定針對淡水螺的生理特徵和水中生存機制進行研究。我們深入比較兩種淡水螺在翻身、仰泳、爬行行為上的差異，並透過身形構造與物理模型說明兩者在構造與行為上的關聯性，藉以找出淡水螺特殊關鍵構造使其能因應水中翻身仰泳的特殊生存模式。

二、研究目的

- (一) 確認三種淡水螺類的親緣關係
- (二) 觀察並比較三種淡水螺類的身形與結構差異
- (三) 探討並比較兩種淡水螺類的水面翻身機制
- (四) 探討並比較兩種淡水螺類的仰漂原理
- (五) 探討並比較兩種淡水螺類的仰泳機制
- (六) 探討並比較兩種淡水螺類的爬行機制
- (七) 探討並比較兩種淡水螺類的趨性行為



(三) 文獻回顧

本研究比較囊螺與台灣錐實螺構造，兩者形態雖有些差異，但整體形態與翻身仰泳等運動模式上，囊螺與台灣錐實螺間具有高度相似性，我們推測囊螺與錐實螺應具有相近的親緣關係。過去科學家以 16srRNA 核酸序列建構淡水螺間的親緣關係，可見囊螺分屬於膀胱螺科(Physidae)，其與扁捲螺科(Planorbidae)可合併成扁捲總科(Planorboidea)，為一單系群 (David C. Campbell et al. 2017)。台灣錐實螺則歸類於錐實螺科(Lymnaeidae)。錐實螺科(Lymnaeidae)的外殼形態彼此高度相似，皆為右旋形態的錐形螺旋外殼，相反的，扁捲總科(Planorboidea)彼此間

的外殼型態差異較大，但螺殼皆為左旋。值得注意的事，身為扁捲總科(Planorboidea)成員的囊螺(*Physella acuta*)，其外殼形態反而與錐實螺科(Lymnaeidae)更為相近！同為錐形螺旋狀，差別在於囊螺(*Physella acuta*)為左旋外殼。經過上述比較，我們推測囊螺(*Physella acuta*)雖與錐實螺科(Lymnaeidae)的親緣關係雖然較遠，但彼此間應適應相似生活環境而產生趨同演化，彼此間相似的構造使他們能在水面執行仰泳以適應水中生活。

以下我們將深入對囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)的運動與身形構造進行研究，試著以物理模型說明兩者構造與翻身仰泳間的關係，試著解釋來自扁捲總科(Planorboidea)的囊螺(*Physella acuta*)為何與錐實螺科(Lymnaeidae)的台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)有相似的仰泳行為之可能演化契機。

貳、研究器材與設備

- 一、 研究材料：台灣錐實螺、囊螺
- 二、 實驗藥劑：清潔劑
- 三、 實驗器材：水族箱、培養皿、方形盤、鑷子、有色壁報紙、手機架、手機、量筒、電子天秤、滴管、直尺、電腦、大頭針、秤藥匙

參、研究過程與方法

一、 全照光環境翻身實驗

1. 將淡水螺以鑷子夾取，放置於有光照且裝有適量水面的水族箱中，待其呈現身體舒張探出殼外殼且腹部朝下的穩定姿勢。
2. 此時開始計時，直到腹部完全朝上穩定後停止計時。
3. 依序上面步驟取數隻螺執行重複實驗
4. 得到兩種螺數據後，各自取時間平均及 T-Test，做圖。

二、 淡水螺於照光/暗室之翻身實驗

1. 將裝有適量水的玻璃缸由上打白光，完成器材設置。
2. 依序將囊螺做照光翻身，紀錄完成翻身動作所需時間，一次五隻囊螺完成稱為一輪，進行 5 輪共 25 次。
3. 將囊螺改成台灣錐實螺後重複上述步驟 1 到 2。
4. 將所得數據取平均、T-Test、標準差後，作圖。
5. 同理，重新設置器材將玻璃缸四周貼黑紙，上端部分以黑紙遮蔽僅留手可操作的縫隙後，關上電燈及窗簾，營造暗室，重複步驟 1 至 4。

三、 淡水螺順翻/逆翻實驗

1. 每次使用隻螺 5 隻，任意編碼 A~E 號，記住編碼所對應的個體。
2. 於實驗室中保持正常狀態，將裝有適量水之玻璃缸架設完成。
3. 囊螺 A 開始，測水中翻身之方向並記錄，依序進行螺 B 至螺 E，稱為一輪，共需做 11 輪共 55 次。
4. 將數據做左翻率、右翻率(有 T-Test、標準差、及不定度的處理)並作圖。

四、界面活性劑對淡水螺仰泳之影響

1. 將玻璃缸裝滿固定的足夠的水量並確保其平穩。
2. 將囊螺以鑷子夾取，放置水面上，待其翻身且腹部朝上開始仰泳。
3. 在水面上滴入界面活性劑。
4. 拍攝觀察囊螺在滴入後反應，並利用 image J 透過比例尺計算移動速率。
5. 台灣錐實螺的部分重複上述步驟，作法亦同。

五、淡水螺在陸域與水域中的爬行速率測量

1. 用囊螺 30 隻，分散置於玻璃缸中，玻璃缸表面濕滑或裝有適量的水。
2. 將攝影機架設於玻璃缸正上方。
3. 拍攝十分鐘囊螺爬行影片並將其匯入 tracker。
4. 由 tracker 測量囊螺爬行距離並計算出爬行速率。
5. 台灣錐實螺的部分重複上述步驟，作法亦同。

六、兩螺仰泳速率測量

1. 使用囊螺 30 隻，分散放置於玻璃缸中，玻璃缸有適量的水。
2. 靜置直到大部分囊螺開始仰泳。
3. 將攝影機架設於玻璃缸正上方。
4. 拍攝十分鐘囊螺仰泳影片並將其匯入 tracker。
5. 挑出在水中仰泳之囊螺。
6. 由 tracker 測量水中囊螺仰泳距離並計算出仰泳速率。
7. 台灣錐實螺的部分重複上述步驟，作法亦同。

肆、研究結果

一、形態觀察與親緣關係

我們偶然在家中水族箱內發現有些特殊的淡水螺類，其會漂浮於水面後進行翻身，並以腹部朝上的方式進行仰泳，如圖 1-1 所示，此運動模式引起我們興趣，決定針對淡水螺的生理特徵和生存機制進行深入探討與研究。

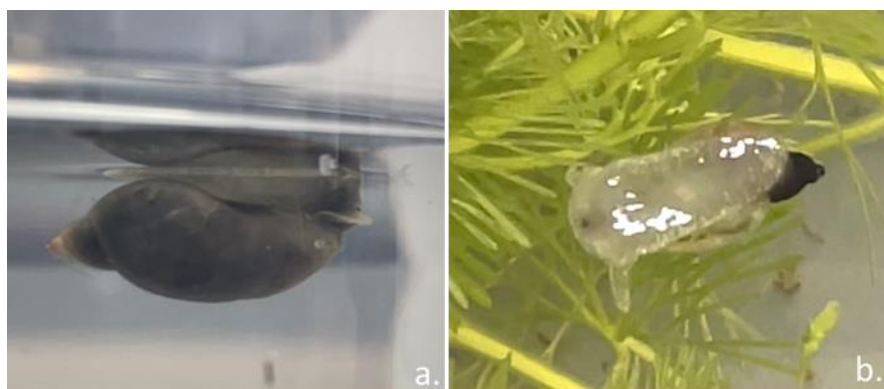


圖 1-1。a. 淡水螺仰泳時於水下側面照。b. 淡水螺仰泳時於水面俯視面照

深入觀察後，我們發現，水族箱中會仰泳的螺原來並非同一種，而是兩種不

一樣的螺，經過形態比對與檢索後得知，兩種螺分別為膀胱螺屬的囊螺 (*Physella acuta*)與錐實螺屬的台灣錐實螺 (*Radix swinhoei*)，兩者外觀型態極為相似！如圖 1-2 所示。

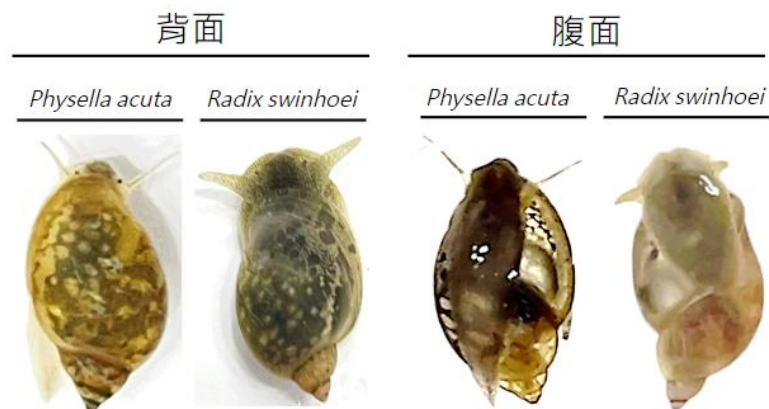
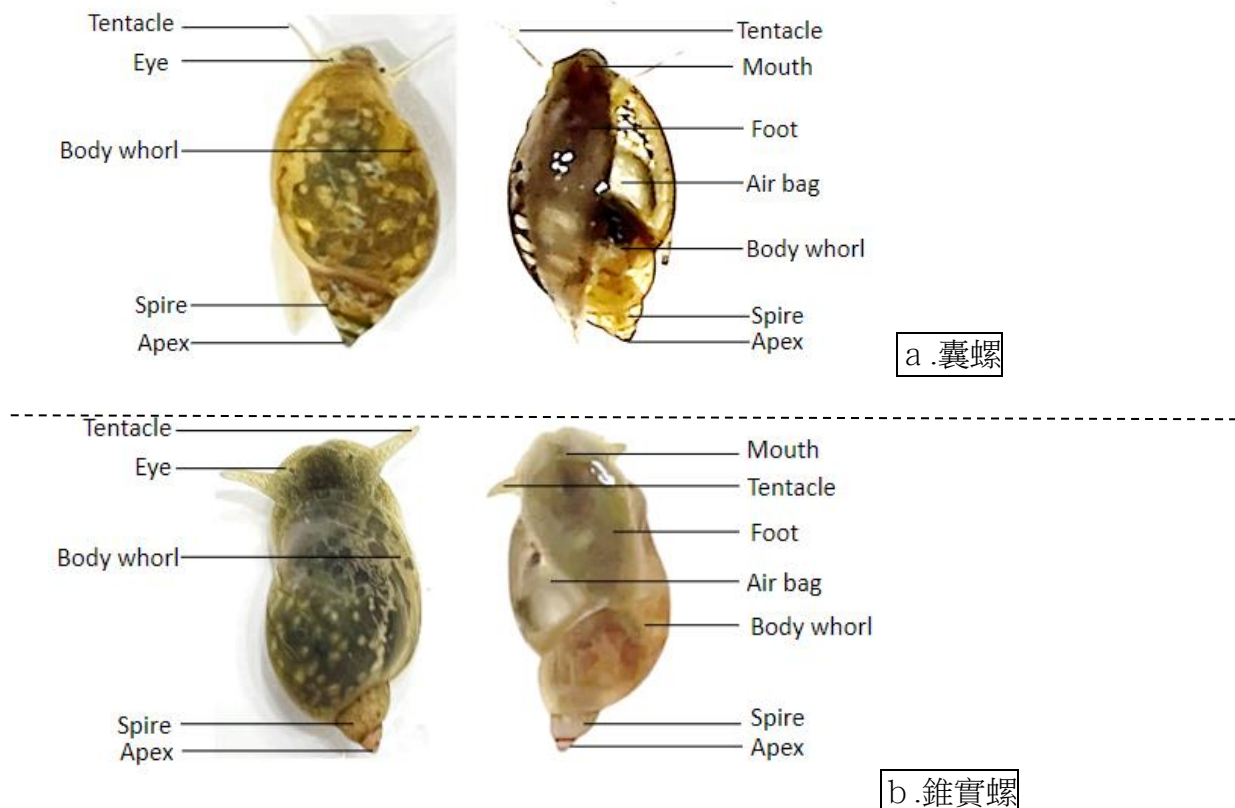


圖 1-2。囊螺 (*Physella acuta*)與台灣錐實螺 (*Radix swinhoei*)背面與腹面形態

深入觀察比較兩螺的結構，結果如圖 1-3 所示。我們可以觀察到，相似的兩種螺其實存在不少差異！在觸角 (Tentacle)方面，囊螺的比較細長，錐實螺則偏粗且短。囊螺的螺紋 (Body whorl)比較偏透明，而且比錐實螺的螺紋來的稀疏，腹足 (Foot)的部份，囊螺頭部較窄且腹足較細長，可見腹足尾部甚至會突出殼外，錐實螺頭部寬扁，腹足較短，其腹足尾部長度並無超越殼長。



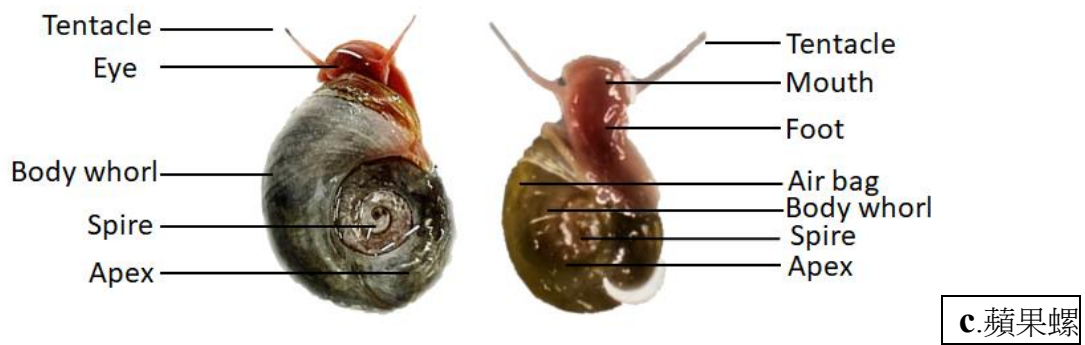


圖 1-3。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)與蘋果螺(*Planorbella duryi*) 的構造名稱與對照圖

另外，我們觀察到囊螺和錐實螺最特別的相異處，就是牠殼的螺旋方向與氣囊的位置！首先我們發現以**囊螺尖(Apex)朝上時螺殼開口位於左側，為左旋螺**，台灣錐實螺則開口則位於右側，為右旋螺。此外我們在兩種螺的螺殼開口處皆可發現由外套膜特化的氣囊構造，**囊螺為例，當我們在觀察腹部時可以發現的氣囊在腹足的左側**，而螺塔(Spire)及螺尖(Apex)則朝氣囊側彎，**錐實螺的氣囊在腹足的右端**，牠的螺塔及螺尖也朝氣囊側彎。

而接下來的蘋果螺，是在後面會提到與囊螺親緣關係相近但構造型態卻很不一樣的物種。其實蘋果螺的觸鬚、腹足都跟囊螺和台灣錐實螺很相似，但是殼的型態相差非常多，囊螺與台灣錐實螺的殼都為螺旋狀，螺尖是漸漸變細的，而蘋果螺的殼是類似鸚鵡螺狀的，螺尖則是圓滑的。

囊螺與台灣錐實螺在生長過程大小會逐漸變大，我們分別以大小作區別，將囊螺與台灣錐實螺的生長過程由小到大分成四個階段，如圖 1-4 所示。

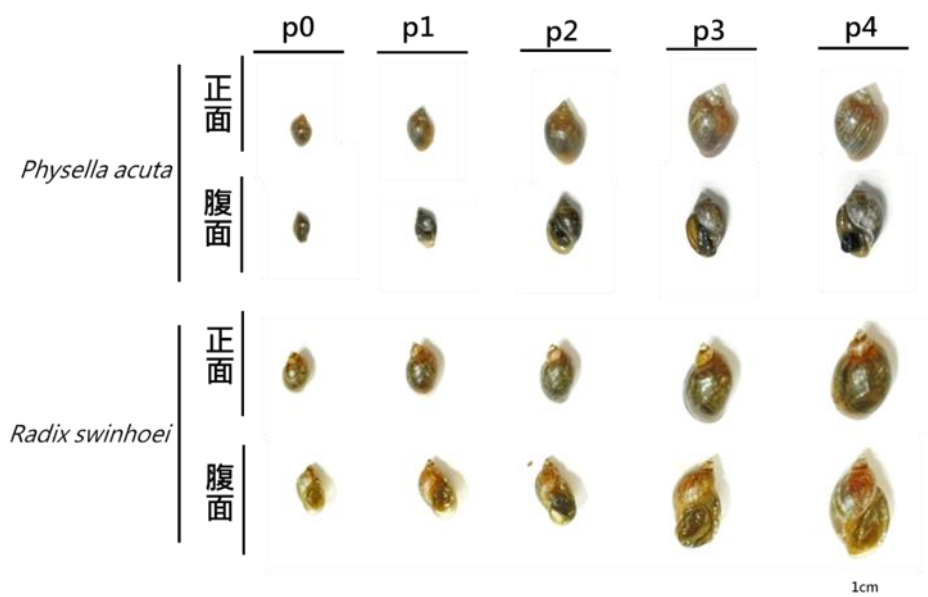


圖 1-4。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)不同生長階段

由上圖可見，在幼年階段(0p)台灣錐實螺體形即較囊螺更大。當兩者都進入成長末期時，囊螺在第四期(4p)成熟生長期的體寬度尚未超過不到 1cm 大，反而是錐實螺在成熟階段(4P)時的體寬已經超過 1cm。由結果可看出，不論是由年期還是成年期，台灣錐實螺體形皆較囊螺更大。

另外我們逐一量測缸中每隻囊螺與台灣錐實螺的寬、長，並以散布圖呈現結果，結果如圖 1-5 所示。圖中可看出台灣錐實螺整體的寬、長大小皆較叫囊螺更大，另比較我們比較兩者寬、長的回歸曲線可以發現，囊螺的曲線斜率較台灣錐實螺大，代表囊螺外殼形態偏寬，台灣錐實螺外殼形態則偏長。

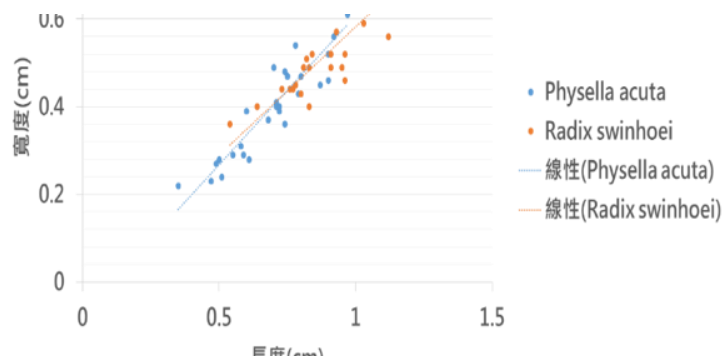


圖 1-5。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoi*)的長、寬量測結果。

經過上述觀察比較兩種淡水螺的構造，可看出兩者形態雖有些差異，但整體形態與翻身仰泳等運動模式上，囊螺與台灣錐實螺間具有高度相似性，我們推測囊螺與錐實螺應具有相近的親緣關係，因此我們針對淡水螺類的親緣分類上網搜尋。

結果發現囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoi*)在科的分類層級上就已不同！囊螺是膀胱螺科，台灣錐實螺則是錐實螺科。科學家以 16srRNA 核酸序列建構淡水螺間的親緣關係，如圖 1-6 所示，可見囊螺分屬於膀胱螺科(Physidae)，其與扁捲螺科(Planorbidae)可合併成扁捲總科(Planorboidea)，為一單系群。台灣錐實螺則歸類於錐實螺科(Lymnaeidae)。

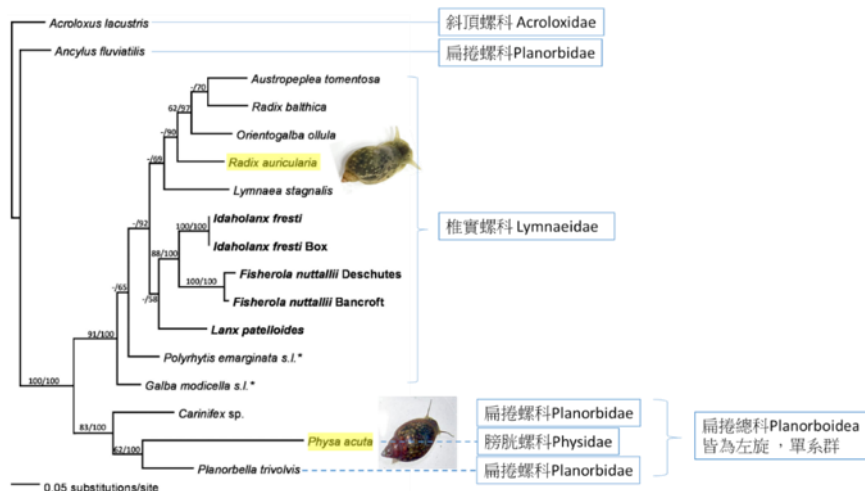


圖 1-6。根據 David C. Campbell, 2017 的研究結果更改繪製，前人以 16srRNA 序列建構淡水螺的親緣關係。囊螺學名 *Physella acuta*，台灣錐實螺學名 *Radix swinhoi* (*Radix auricularia*)。

再搜尋並比較扁捲總科(Planorboidea)與錐實螺科(Lymnaeidae)的形態後我們發現，錐實螺科(Lymnaeidae)的外殼形態彼此高度相似，皆為右旋形態的錐形螺旋外殼，相反的，扁捲總科(Planorboidea)彼此間的外殼型態差異較大，值得注意的事，身為扁捲總科(Planorboidea)成員的囊螺(*Physella acuta*)，其外殼形態反而與錐實螺科(Lymnaeidae)更為相近！同為錐形螺旋狀，差別在於囊螺(*Physella acuta*)為左旋外殼，如圖 1-7 所示。

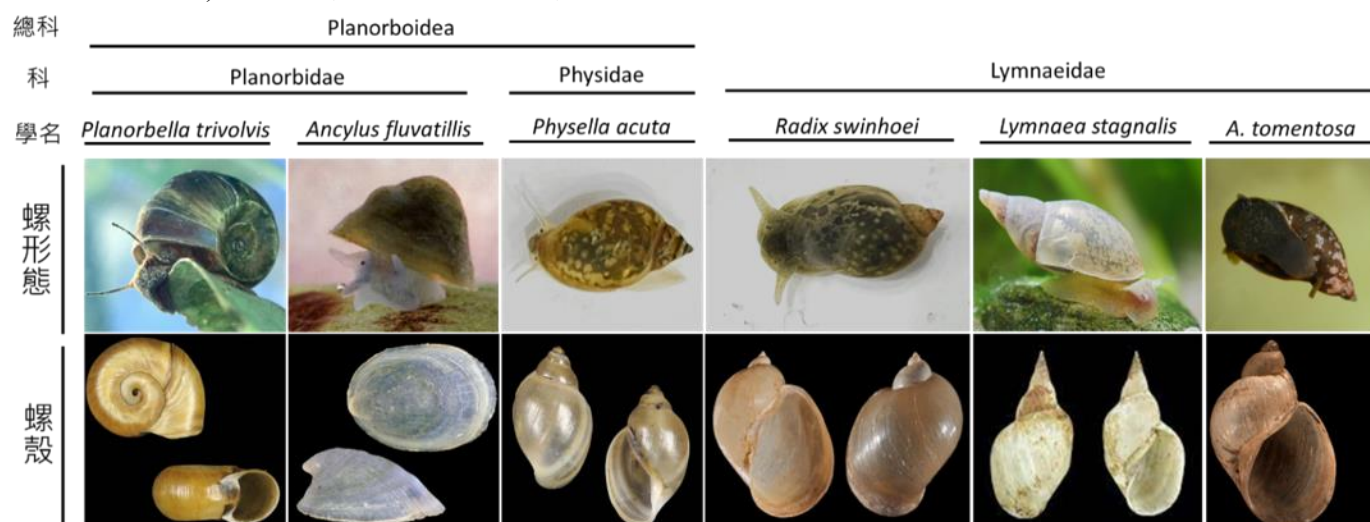


圖 1-7。扁捲總科(Planorboidea)與錐實螺科(Lymnaeidae)的外殼形態。

經過上述比較，我們推測囊螺(*Physella acuta*)雖與錐實螺科(Lymnaeidae)的親緣關係雖然較遠，但彼此間應適應相似生活環境而產生趨同演化，彼此間相似的構造使他們能在水面執行仰泳以適應水中生活。

以下我們將深入對囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)的運動與身形構造進行研究，試著以物理模型說明兩者構造與翻身仰泳間的關係，試著解釋來自扁捲總科(Planorboidea)的囊螺(*Physella acuta*)為何要模仿錐實螺科(Lymnaeidae)的演化契機及。

二、淡水螺類翻身機制探討

深入觀察囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)的運動模式後，我們將其運動流程分成五個階段，如圖 2-1 所示：

1. **潛水階段**：腹足緊黏於缸底，並透過腹足蠕動向前移動。
2. **上爬階段**：當螺類碰觸水缸側壁，其腹足會緊附於側壁向上爬行。
3. **充氣階段**：待螺的頭部突破水面後執行翻身動作，使其腹部朝上並開啟氣室通道，藉以讓殼內的氣室充氣增加浮力。
4. **仰泳階段**：充氣完畢後關閉氣室通道，以腹足產生波紋蠕動作為動力在水面執行仰泳。
5. **沉降階段**：給予螺類腹足刺激（如：鈍器觸碰），螺會將腹足向殼內收縮，並壓縮氣室將氣體排出以降低浮力後快速下沉到底部。

其中螺要在水面執行仰泳前得先克服水面翻身，使其腹部朝上後才能順利在

水面執行仰泳，因此翻身效率的差異將成為螺類是否能順利仰泳的關鍵！以下我們將針對囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)的翻身機制深入探討，比較兩者的翻身能力，並試著找出影響翻身策略的關鍵形態構造。

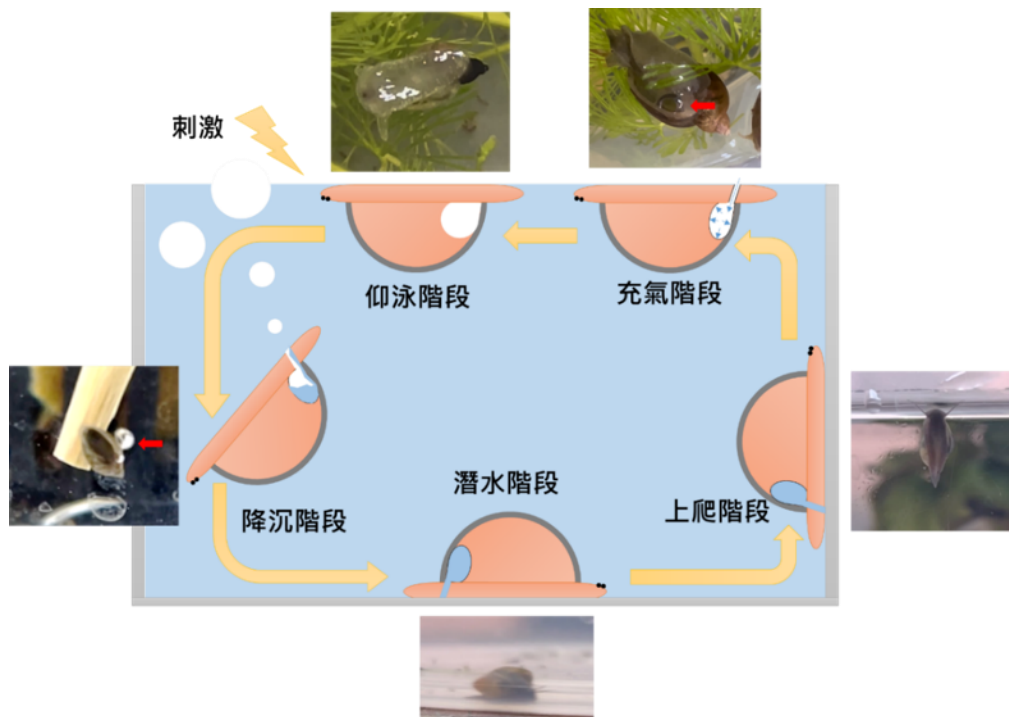


圖 2-1。淡水螺類水中運動階段示意圖

水面翻身是仰泳前的必要動作！我們認為擁有較佳翻身能力者應更容易的執行仰泳，因此我們首先量測了囊螺與台灣錐實螺在水面翻身的成功率，結果如圖 2-2 所示，囊螺與台灣錐實螺翻身成功率較高，反觀蘋果螺則極難翻身。接著我們量測三螺翻身所需時間，結果如圖 2-3 所示。結果顯示，台灣錐實螺翻身時間超過囊螺兩倍以上，而蘋果螺又是錐實螺的三倍多，代表在翻身能力方面，囊螺是優於台灣錐實螺而前皆勝於蘋果螺。

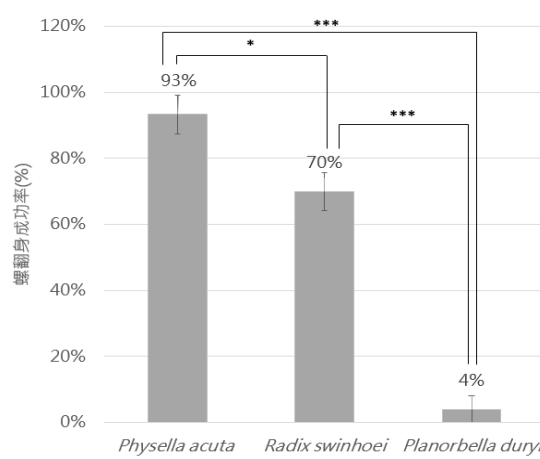


圖 2-2。淡水螺翻身成功率

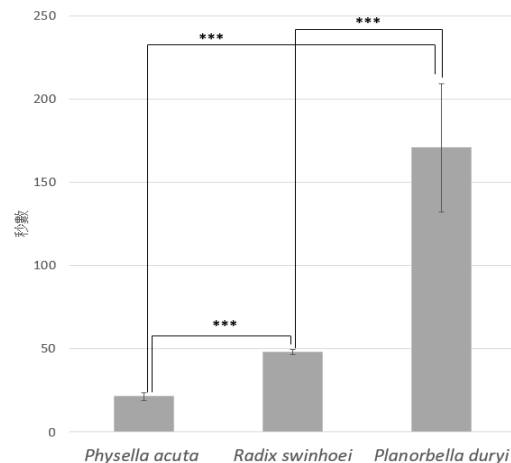


圖 2-3。淡水螺翻身花費時間

囊螺與台灣錐實螺皆生活於淡水環境，其在仰泳的過程可能因水面波動失去平衡並解除仰泳狀態，這時得再次進行翻轉才能再次仰泳。我們認為在水面波動

劇烈時，囊螺與台灣錐實螺將會遇到連續翻身的問題，為了節省能量，我們假設連續翻身過程將會降低囊螺與台灣錐實螺的翻身意願，透過實驗我們讓囊螺與台灣錐實螺進行 10 次連續翻身，並統計前四次與後四次翻身所花費時間，結果如圖 2-4 所示。研究結果顯示，囊螺在連續翻身過程會降低其翻身的頻率，但台灣錐實螺則無明顯差別，我們推測囊螺翻身時間拉長可能是囊螺對於劇烈擾動環境有著較佳的適應性，透果減少翻身以減少能量消耗，但台灣錐實螺對此較無明顯適應性。

我們認為囊螺與台灣錐實螺腹部朝上的仰泳運動可能會提高被陸域掠食者的捕食率，因此我們推測夜間等較暗的環境會提高囊螺與台灣錐實螺的翻身仰泳意願，白天環境則會降低翻身仰泳意願。以下實驗以光照模擬白天，黑暗則為夜晚，去量測囊螺與台灣錐實螺的翻身時間，結果如圖 2-5 所示。研究結果顯示，囊螺與台灣錐實螺翻身頻率在光照與黑暗環境下無明顯差異，推測兩者在白天與晚上環境下翻身傾向相當。

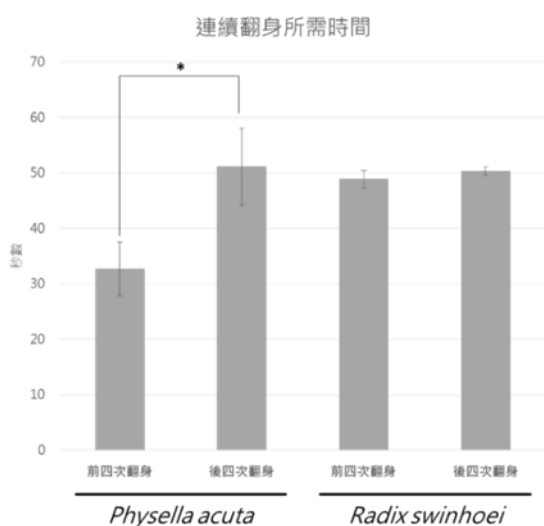


圖 2-4。囊螺與台灣錐實螺連續翻身花費時間

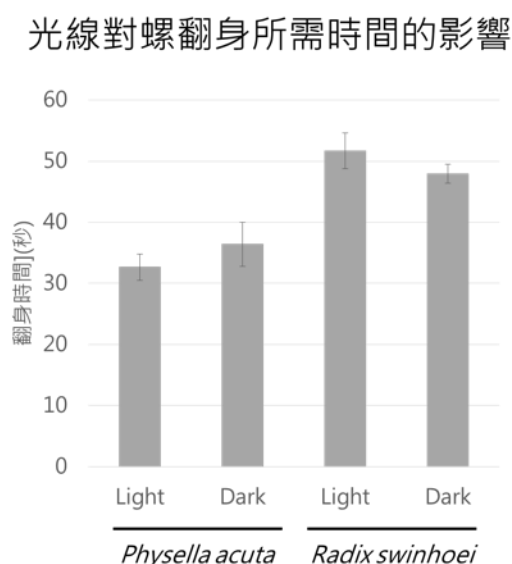


圖 2-5。光照與黑暗環境對於囊螺與台灣錐實螺翻身時間影響。

根據圖 2-3 實驗結果我們得知，囊螺較台灣錐實螺擁有更佳的翻身能力，以利其執行水面仰泳，但身形相似的兩者為何在翻身能力上有著明顯差異？為解開其中的關鍵原因，我們針對兩者翻身動作與其結構的關聯進行深入探討。

首要我們發覺兩種螺的翻身方向有著很大的不同。我們定義螺尖朝上順時針翻轉稱作順翻、逆時針翻轉稱作逆翻，若是縱向翻轉稱作直翻，計算囊螺與台灣錐實螺的各種翻身方式的占比，結果如圖 2-6 所示。

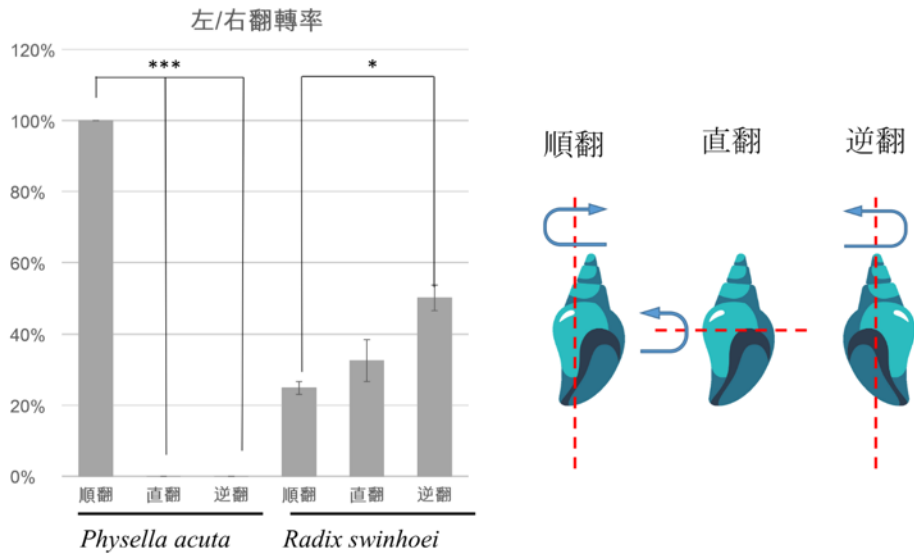


圖 2-6。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)各種翻身方式占比。

研究結果顯示，螺殼為左旋的囊螺(*Physella acuta*)全部都以順翻的方式完成翻轉。如圖 2-7 所示，圖中紅色虛線代表質心軸，首先囊螺漂浮於水面時螺殼開口靠左，頭部會先突破水面後以表面張力撐於水面上，接著頭部會向質心線延展並越過質心，藉以產生順向力矩帶動全身順時針翻轉；圖 2-3 下圖為水側視圖，其螺殼開口靠左，待其頭部突破水面後向右越過質心線，透過順向力矩帶動身體翻轉。

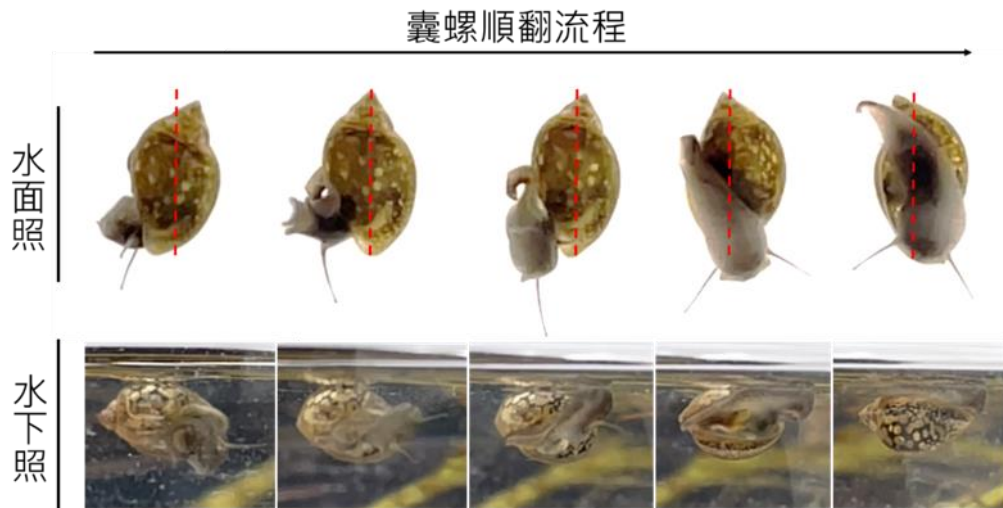


圖 2-7。囊螺(*Physella acuta*)水面順向翻身流程照片，紅色虛線為質心線。

螺殼為右旋的台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)其順翻、逆翻與直翻皆會，但逆翻的佔比較高。圖 2-8 顯示台灣錐實螺的順翻過程，此情況較為少見，其懸浮於水面時螺殼開口靠左，當頭突破水面後向右延伸越過質心連線，藉以產生順向力矩帶動全身順時針翻轉(尖端朝前視角為順時針)，台灣錐實螺的順翻過程與囊螺高度相似，但順翻在台灣錐實螺中較少見！

台灣錐實螺順翻流程

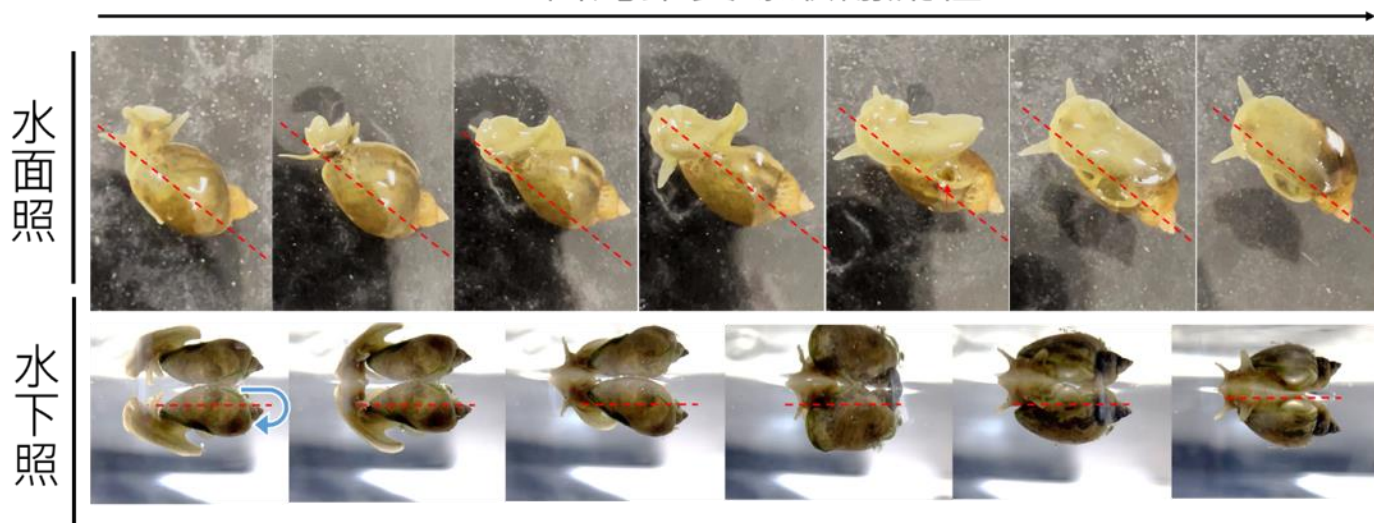


圖 2-8。台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)水面順向翻身流程，紅色虛線為質心線。

台灣錐實螺以逆翻為主。如圖 2-9 所示，逆翻過程首先螺殼開口靠右，接著頭部向上突破水面後向左延伸越過質心連線，藉以產生逆向力矩帶動全身逆時針翻轉；逆翻過程與順翻過程相似，但整體動作如鏡像對稱般反向執行。

台灣錐實螺逆翻流程

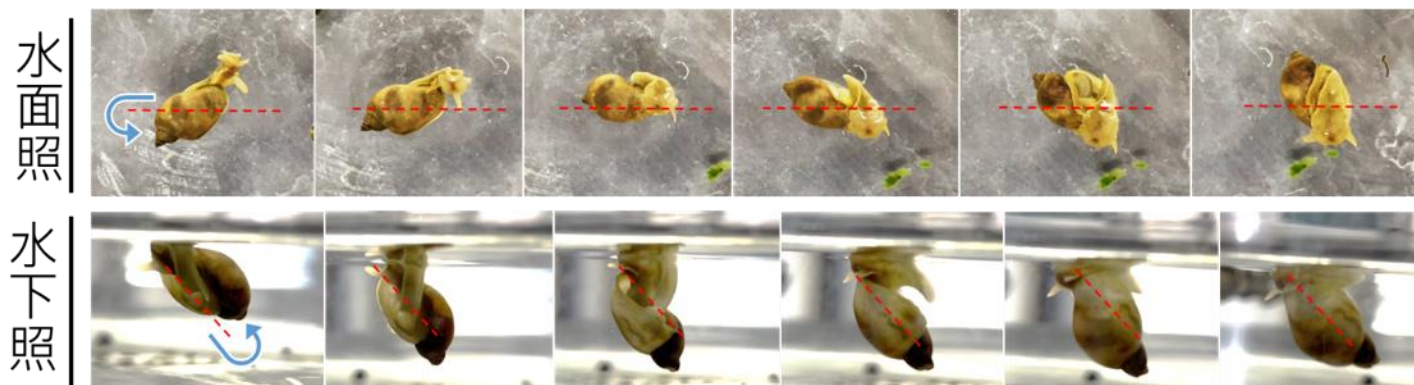


圖 2-9。台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)水面逆向翻身流程，紅色虛線為質心線。

台灣錐實螺另會執行直翻，但佔比較逆翻低，如圖 2-10 所示。首先直翻過程時螺殼開口朝下，頭部會先左右擺動，接著直接向上拉起突破水面、尾部尖端下沉，以頭部表面張力讓其腹部挺在水面上後向垂直下向延伸並越過質心線，藉以產生直向翻轉的力矩順勢縱向翻越，完成直翻。

台灣錐實螺直翻流程

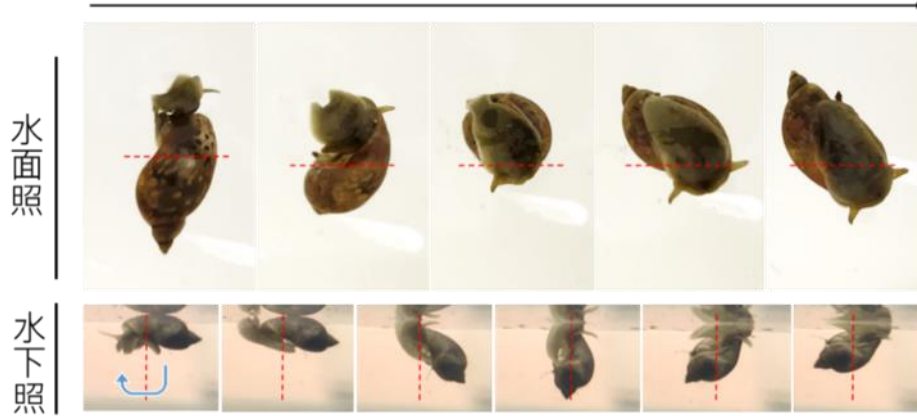


圖 2-10。台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)水面直向翻身流程，紅色虛線為質心線。

囊螺與台灣錐實螺身形相似，但水面翻身方式截然不同。擁有較佳翻身能力的囊螺皆是順翻，不會執行逆翻與直翻，我們推測囊螺應有搭配順翻的特殊結構，使其擁有較佳的翻身效率。翻身能力差的台灣錐實螺則是三種翻法都有，但逆翻佔比較高，推測台灣錐實螺在構造上較適合逆翻，但構造與逆翻之契合不專一，因此尚可見直翻與順翻。

兩淡水螺擁有不同的翻身策略我們推測他身體構造有助其產生力矩協助翻身。於是我們進行了此量種螺分別觀察兩種螺的構造並試著找出是否有力矩存在。如圖 2-11 可見左方呈現其殼形左右旋差異與平放時該身與水平面會有一夾角，說明兩種螺殼質量分布不均，應會產生助其旋轉的力矩。

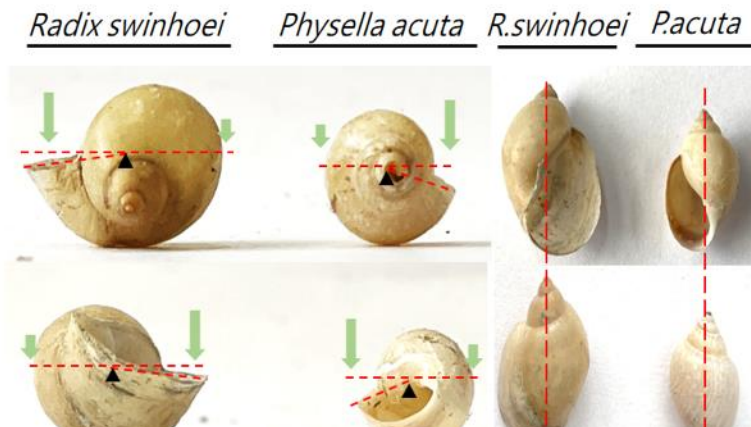


圖 2-11。螺殼平放後不水平現象可說明兩種螺殼質量不均，有助力矩產生。

首先，觀察囊螺的螺殼屬於左旋，螺殼開口朝左;台灣錐實螺的螺殼屬於右旋，螺殼開口朝右。如下方所示，沿著質心「縱向」區分，量測開口側與開口對側(圖 2-12)發現，兩者於開口測的質量占比皆較開口對側來的高，因此造成左旋殼的囊螺的形成順向力矩，右旋殼的台灣錐實螺形成逆向力矩。又將囊螺與台灣錐實螺測質量差異乘上 $1/4$ 體寬(力臂)算出兩者力矩的大小，顯示囊螺力矩量值為台灣錐實螺之 1.7 倍，如圖 2-13，這力矩差異應是囊螺擁有較佳翻身效率的原因之一。

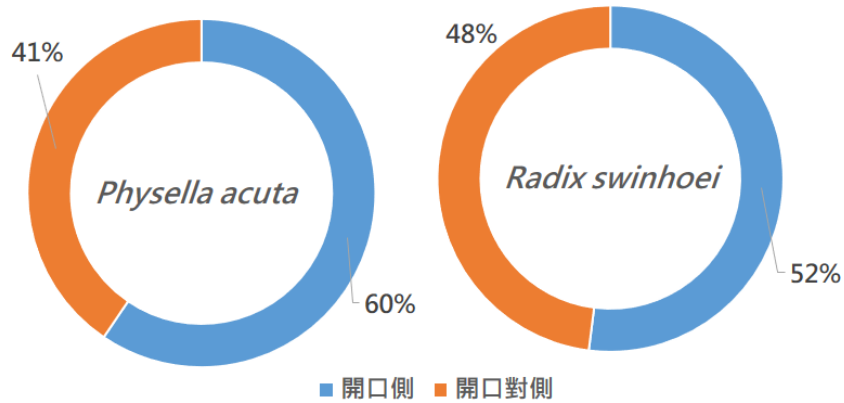


圖 2-12。囊螺(左)與台灣錐實螺(右)各自身體兩側質量比圓餅圖

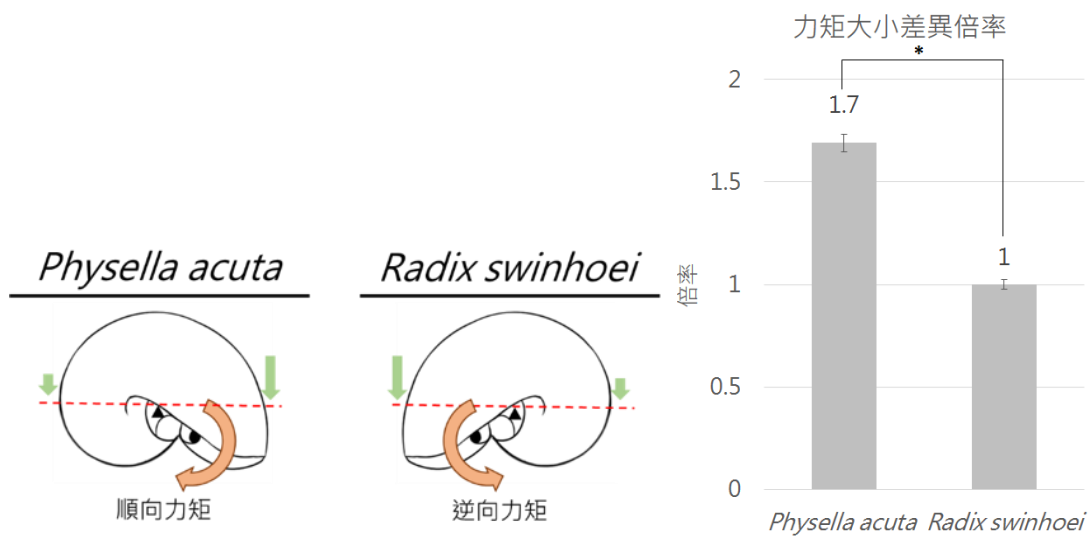


圖 2-13。順/逆向力矩示意圖及力矩倍率表格

為何錐實螺還會直翻，而囊螺不會？我們同上方將殼平放後觀察，發現於圖 2-14 側視角度下，台灣錐實螺尾部與水平線夾角較囊螺來的大。而圖 2-15 實驗數據證實台灣錐實螺尾部質量占比較大，甚至比例過半占 57.4%，而囊螺頭尾質量近乎一至，我們將頭尾質量差異乘上體長(力臂)算出力矩，結果如圖 2-16 所是，頭尾力矩倍率表格呈現台灣錐實螺約為囊螺的 15 倍，是台灣錐實螺可行縱向直翻的依據。

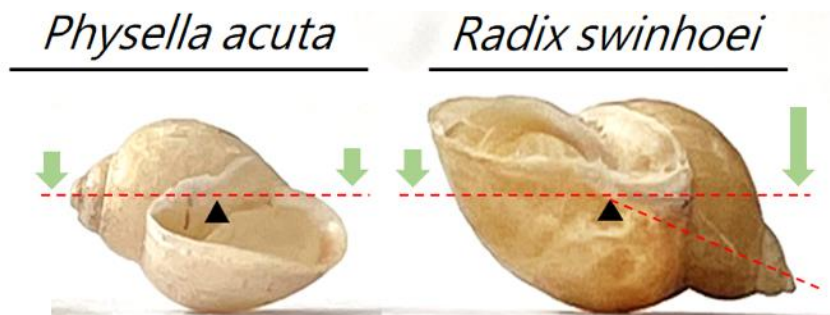


圖 2-14。側面視角夾角示意圖

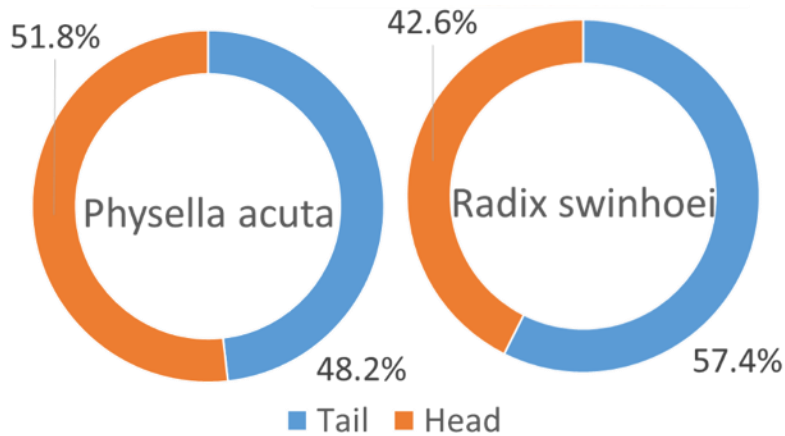


圖 2-15。兩種螺類頭尾質量占比圓餅圖

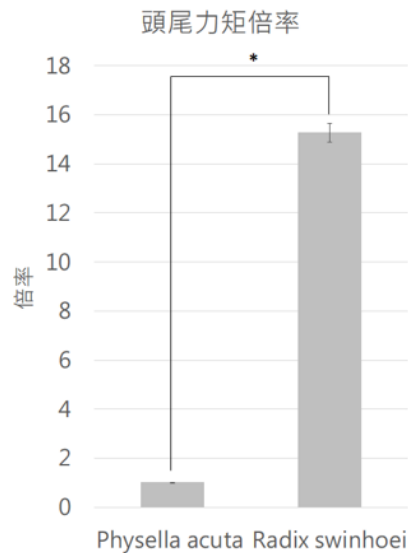


圖 2-16 頭尾力矩倍率表

由上述的計算後，我們得知囊螺與台灣錐實螺的翻身趨向確實與他們的力矩大小有關，力矩順、逆向的不同與大小的差異造成兩者擁有不同的翻身策略。接下來，我們要對於囊螺與台灣錐實螺運動進到第二階段前的過渡期「仰漂」進行進一步的探討與研究。

三、囊螺與台灣錐實螺的仰漂探討

能順利漂浮於水面為仰泳的必要條件，以下我們想真入找出提供囊螺和台灣錐實螺漂浮能力的關鍵構造。首先，螺要能漂浮於表面，其必須產生與其質量相同的浮力，透過量測囊螺於台灣錐實螺的質量，結果如圖 3-1 所示。

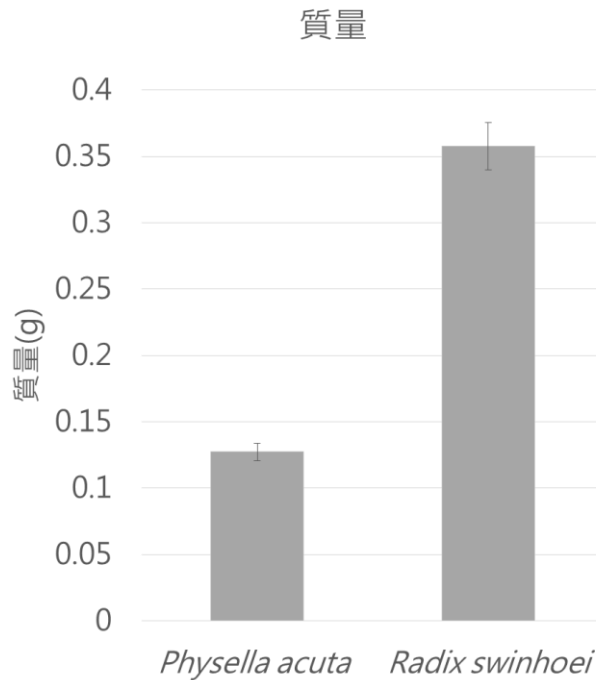


圖 3-1。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)的質量測定。

結果顯示，台灣錐實螺的質量約囊螺的 2.5 倍，代表台灣錐實螺要能漂浮於水面需產生比囊螺更大的浮力，也增加其漂浮的難度。而囊螺與台灣錐實螺到底是如何產生足夠浮力?經觀察我們發現，我們發現囊螺與錐實螺身上有一個部位在翻身與仰泳時會不停的開闔，閉合時樣子形似氣球，且裡面充滿氣體，因此我們稱其為氣囊，如圖 3-2 所示。螺類能貼著缸壁往上爬再打開氣囊開口充氣後漂浮於水面，當兩者在受到刺激時會藉由氣囊開口排氣體並快速下沉。

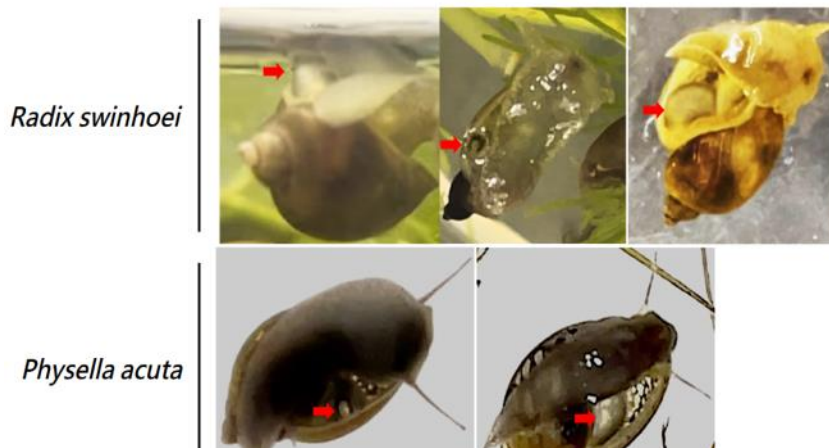


圖 3-2。囊螺(*Physella acuta*)與台灣錐實螺(*Radix swinhoei*)氣囊充氣過程。

經由上述的觀察，我們推測氣囊對於囊螺和台灣錐實螺的翻身和仰泳中都是不可或缺的，氣囊能提供浮力以利仰泳。由前面實驗得知，囊螺較台灣錐實螺擁有較佳的翻身仰泳能力，我們猜測兩者氣囊的大小可能存在差異，使得囊螺擁有最佳的漂浮力以利仰泳。為了證實我們猜想，我們針對兩者氣囊結構的

差異進行深入探討與測量。

首先，螺要能漂浮於水上，其浮力需等於其質量，也代表螺排開水量產生的浮力將與其質量相等。我們將螺的體積分成螺含水總體積(V_t)、螺殼與螺肉體積(V_s)、氣室內氣體體積(V_{air})、氣室儲備容積(V_c ，氣室內水的體積)。其中 V_s 與 V_{air} 能在液面下排開水並產生浮力，而浮力應與螺的質量相等。

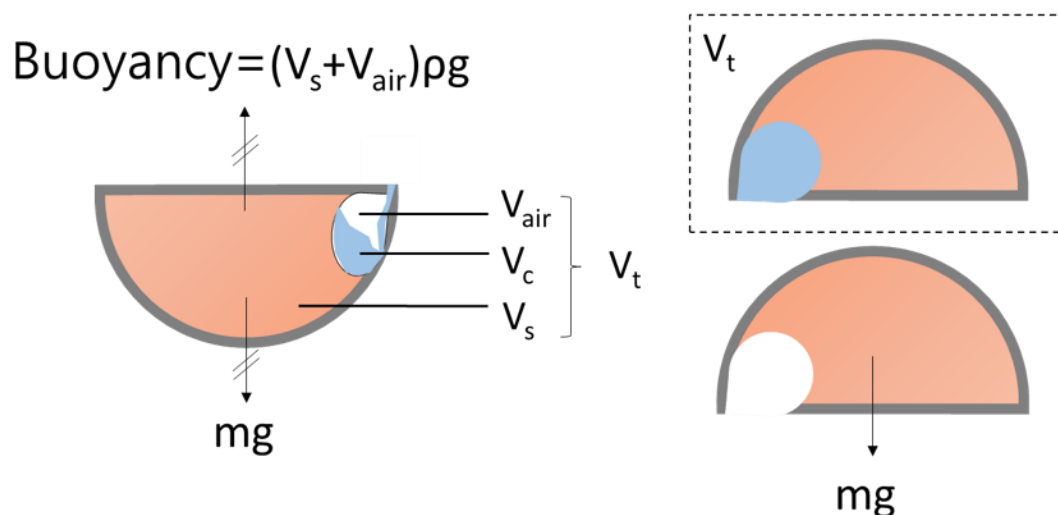


圖 3-3。螺類各項體積示意圖。螺含水總體積(V_t)、螺殼與螺肉體積(V_s)、氣室內氣體體積(V_{air})、氣室儲備容積(V_c ，氣室內水的體積)、螺的質量(m)、重力加速度(g)。

在上述的各項體積中，我們認為氣室儲備容積(V_c ，氣室內水的體積)越大，該螺在浮力調節上應有著空多且更有彈性的調節能力。為求出氣室儲備容積(V_c)，我們以排水法量測兩種螺類的含水總體積(V_t)，如圖 3-4；另透過電子天平測量兩種螺了的質量，如圖 3-1，並透過以下公式推倒得知氣室儲備容積 $V_c = (V_t g\rho - mg)\rho g$ 。

$$V_t = V_s + V_{air} + V_c$$

$$\text{Buoyancy} = mg = (V_s + V_{air})\rho g = (V_t - V_c)\rho g$$

$$mg = V_t\rho g - V_c\rho g$$

$$V_c = (V_t g\rho - mg)\rho g$$

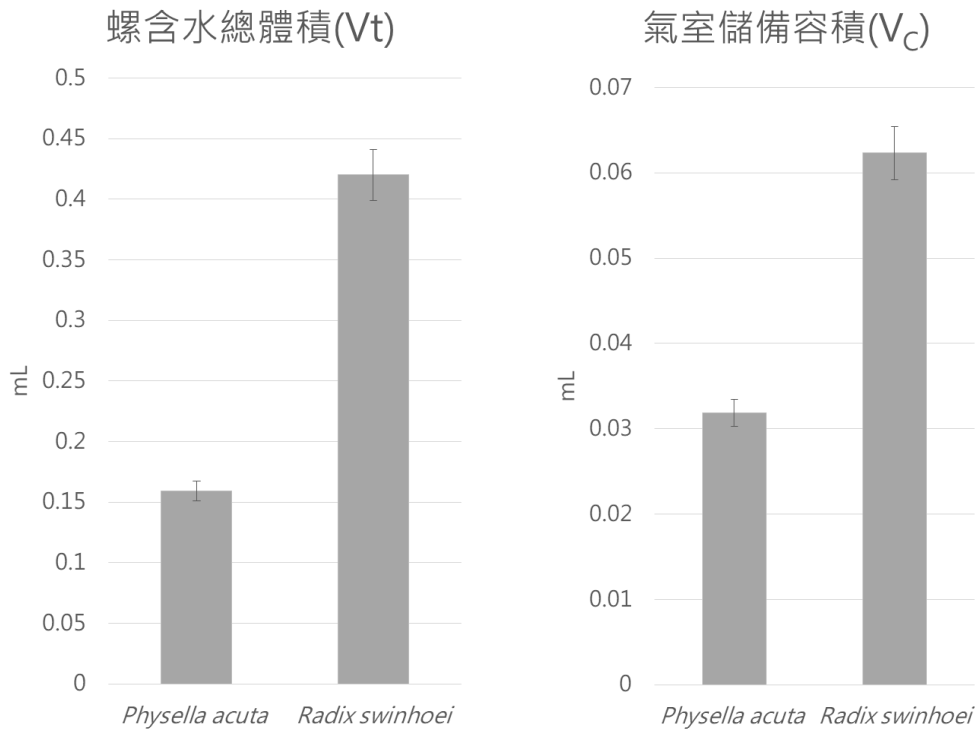


圖 3-4。排水法測得螺的含水總體積。 圖 3-5。以公式計算螺的氣室儲備容積。

我們將測得的含水總體積(Vt)與質量套入公式計算，得到氣室儲備容積(Vc)，如圖 3-5 所示。結果顯示台灣錐實螺的氣室儲備容積(Vc)比約囊螺的兩倍，雖然台灣錐實螺的氣室儲備容積較大，但台灣錐實螺本身的重量較囊螺更重，需要的浮力應比囊螺更高，因此我們進一步計算氣室儲備容積(Vc)與質量的比值，我們稱作儲質比，結果如圖 3-6 所示。

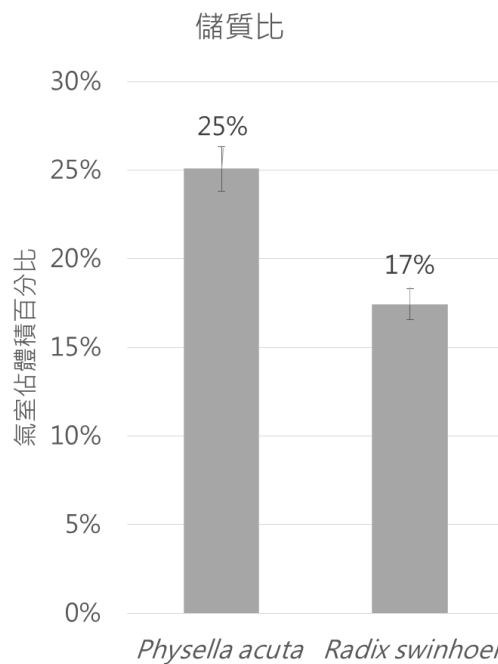


圖 3-6。囊螺與台灣錐實螺的儲質比(氣室儲備容積(Vc)與質量的比值)。

根據前述結論，我們得知，雖台灣錐實螺的氣室儲備容積(V_c)較大，但儲質比卻較囊螺低，如圖 3-6 所示，代表相同質量之下，囊螺擁有更高氣室儲備容積(V_c)以利沉浮調節，使其在漂浮與仰泳上比台灣錐實螺擁有更佳效率。

螺的腹足並無外殼保護，其以腹部朝上的方式仰泳應不利其抵抗陸域或空中的掠食者，那為何囊螺與台灣錐實螺要以仰泳來移動呢？經觀察我們發現，當螺類背部朝上進行漂浮時，不會有明顯的水面凹陷現象，但當螺類腹部朝上進行仰泳時，可清楚看到水面產生明顯的凹陷構造，如圖 3-7 所示。

背部朝上漂浮 腹部朝上仰泳

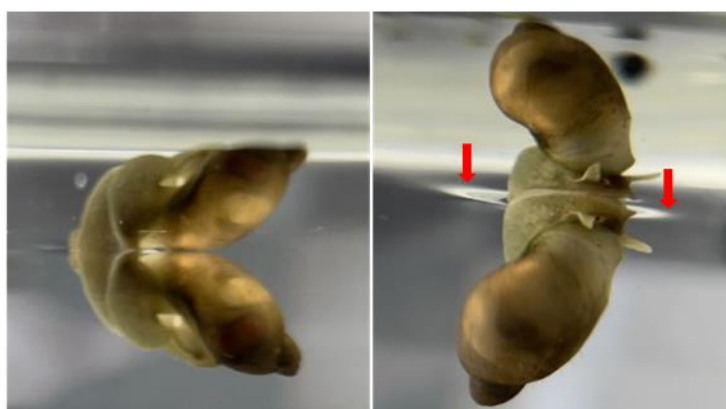


圖 3-7。腹部朝上仰泳過程會產生水面凹陷構造。箭頭為為水面凹陷構造。

根據我們的觀察推測，凹陷溝代表其具表面張力，腹部朝上的螺，其表面張力使其更輕鬆的浮於水面。將螺在仰泳時所有受力統整繪製，如圖 3-8 所示。當螺在以固定速度仰泳時，在水平方面所受到的阻力等於本身的推力，但在垂直方面，若是以仰泳的方式進行，與以腹部朝下游泳相比，會多受到一個向上的表面張力，以更穩定方式漂浮並前進。

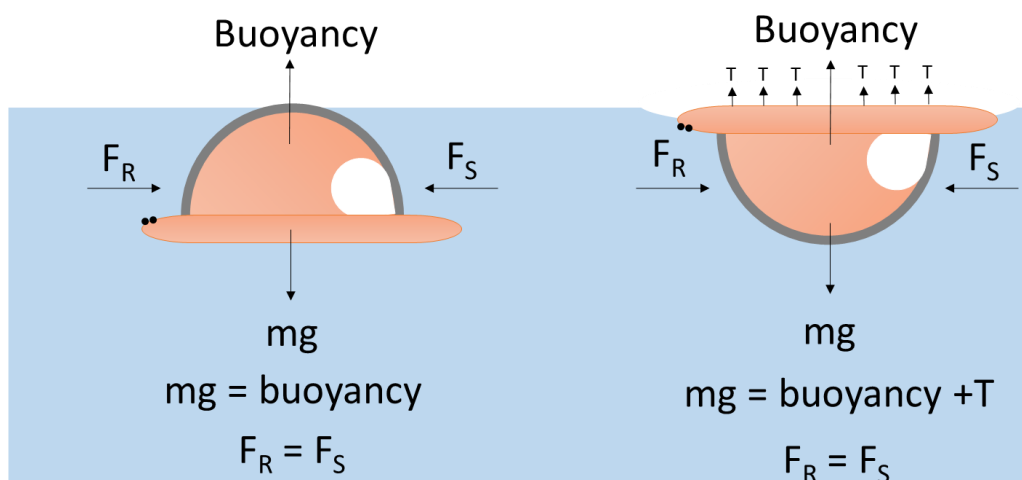


圖 3-8。漂浮與仰泳過程受力圖。阻力(F_R)、進行動力(F_S)、表面張力(T)、重量(mg)、浮力($buoyancy$)。

為了驗證表面張力是否存在，我們做了以下的實驗。首先讓一隻螺在水面上進行仰泳，接著將一滴界面活性劑滴入水缸中來降低水面的張力，若螺朝著界面活性劑的反方向移動則代表表面張力確實存在，實驗結果如圖 3-9 所示。在水缸中滴入純水時，仰泳中的螺並無明顯移動現象，代表滴水動作本身不會讓螺產生明顯的移動效果，但滴入界面活性劑時，螺瞬間朝著滴入處的反方向漂走，我們將移動速率以電腦軟體量化呈現，結果如圖 3-10 所示。

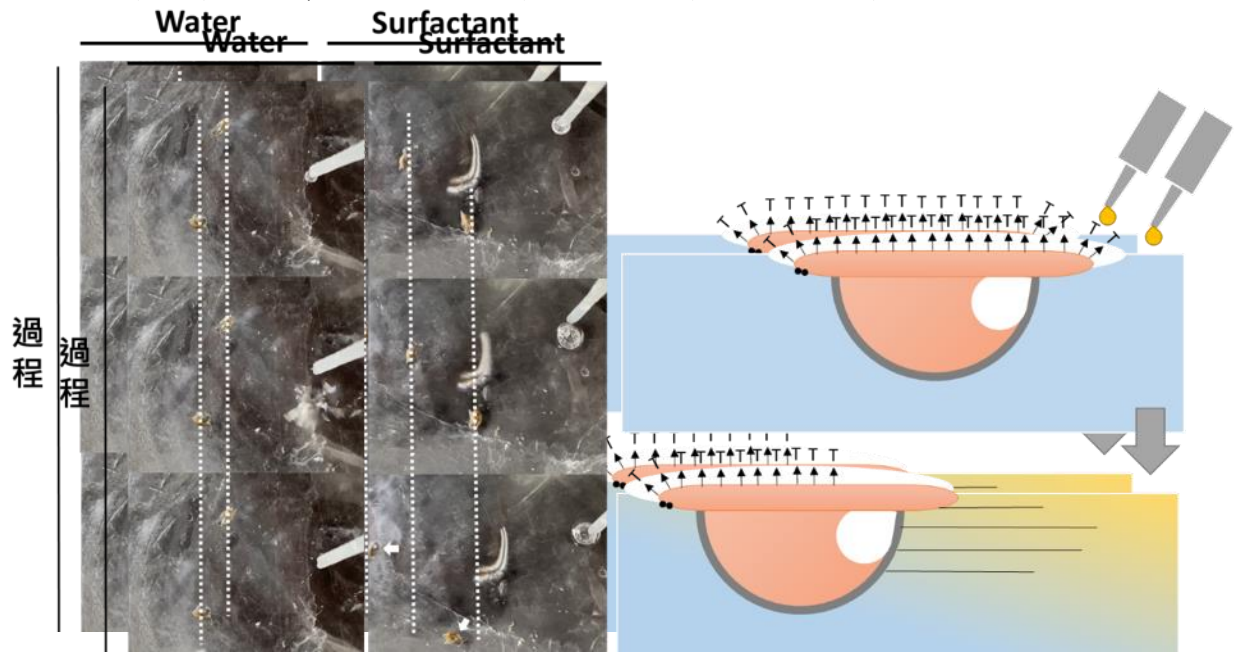


圖 3-9。以界面活性劑降低表面張力，觀察螺在水中的是否會高速移動，藉以確認螺仰泳過程有使用表面張力。Water 代表滴入純水，Surfactant 代表滴入界面活性劑。

實驗結果證實腹部朝上的仰泳方式確實能產生向上的表面張力，能藉此分擔氣囊的工作，使其更有效的浮於水面。

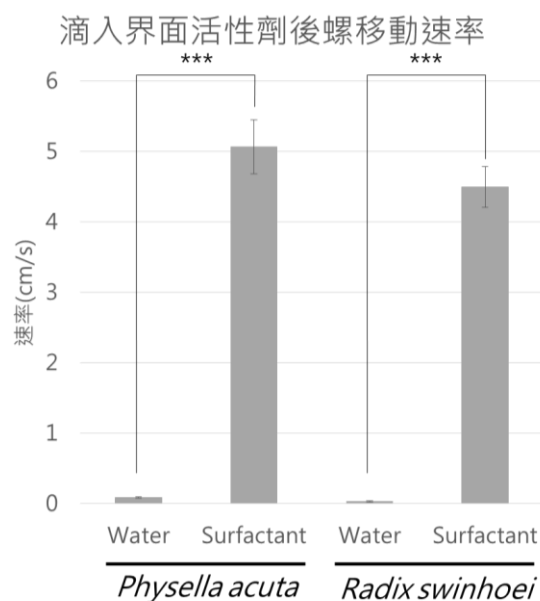


圖 3-10。滴入純水(Water)或界面活性劑(Surfactant)後螺的瞬間位移速率。

經由上述的觀察我們得知表面張力是影響兩螺漂浮的原因之一，但為了確認表面張力對於囊螺與台灣錐實螺翻身仰泳的影響有多大，我們將螺放置缸中，觀察加入界面活性劑後觀其三分鐘內成功翻身仰泳的機率，結果如圖 3-11 所示。

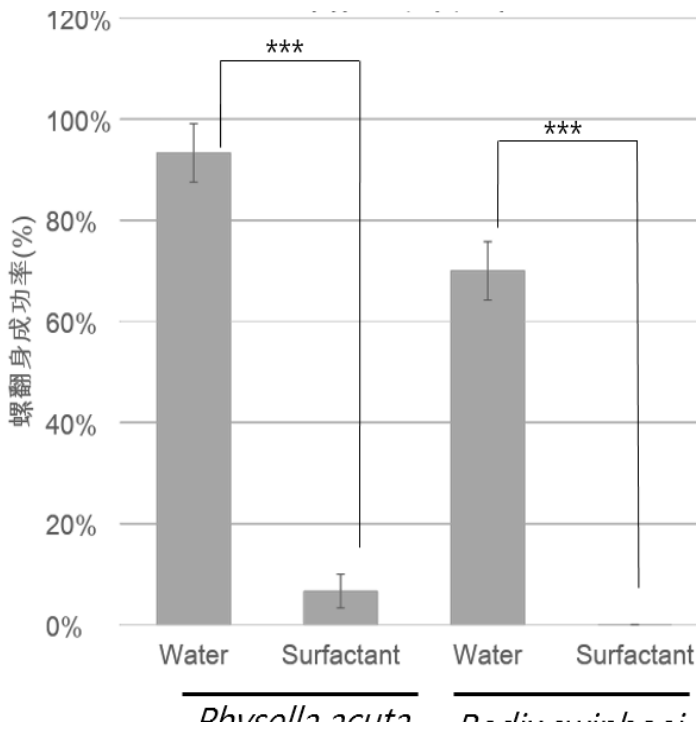


圖 3-11。界面活性劑對翻身仰泳率的影響。

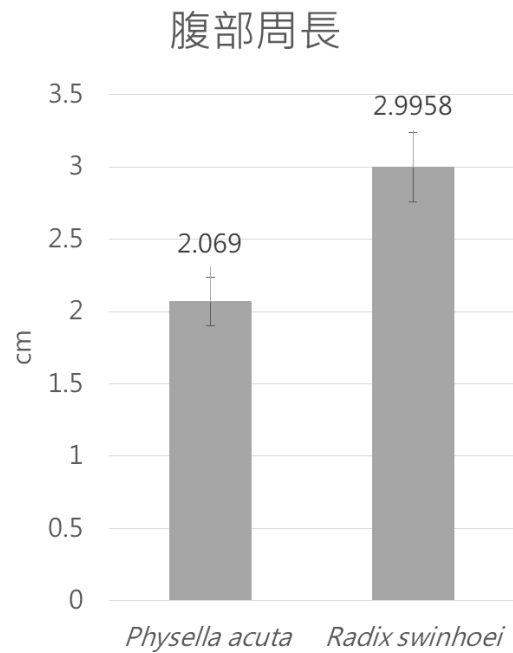


圖 3-12。兩種螺類的腹部周長。

結果顯示，加入界面活性劑後，囊螺與台灣錐實螺的翻身仰泳能力急遽下降，台灣錐實螺完全無法執行翻身仰泳，代表表面張力為台灣錐實螺執行仰泳的必要條件！囊螺上有 7% 的個體能成功翻身仰泳，推測囊螺較高的儲質比(Vc)能幫助部分個體在無表面張力協助下翻身仰泳。

前面實驗得知，囊螺與台灣錐實螺透過腹部朝上的方式產生表面張力，藉此幫助其漂浮於水面。然而，囊螺較台灣錐實螺擁有更佳的翻身仰泳能力，會不會是兩者腹部產生的表面張力大小有所不同所致呢？為了確認我們的假設，我們進一步探討並嘗試計算兩種螺類腹部所能產生的表面張力大小。根據表面張力公式： $T = \sigma L$ （註:T 表面張力、 σ 表面張力常數、L 周長），影響表面張力的關鍵因子為週長，因此我們對兩種螺類的腹部周長進行量測，結果如圖 3-12 所示。結果顯示，台灣錐實螺腹部周長約為 3 公分，囊螺則為 2 公分，差距為 1.5 倍，代表台灣錐實螺腹部能產生的表面張力較囊螺更高。雖然台灣錐實螺能產生較大的表面張力，但其質量卻較囊螺重，為了解兩者表面張力與其質量間

的關係，我們將腹部周長乘上水的表面張力常數 σ （72.75 mN/m），藉以算出兩者腹部所能產生的最大表面張力數值，結果如圖 3-13 所示。

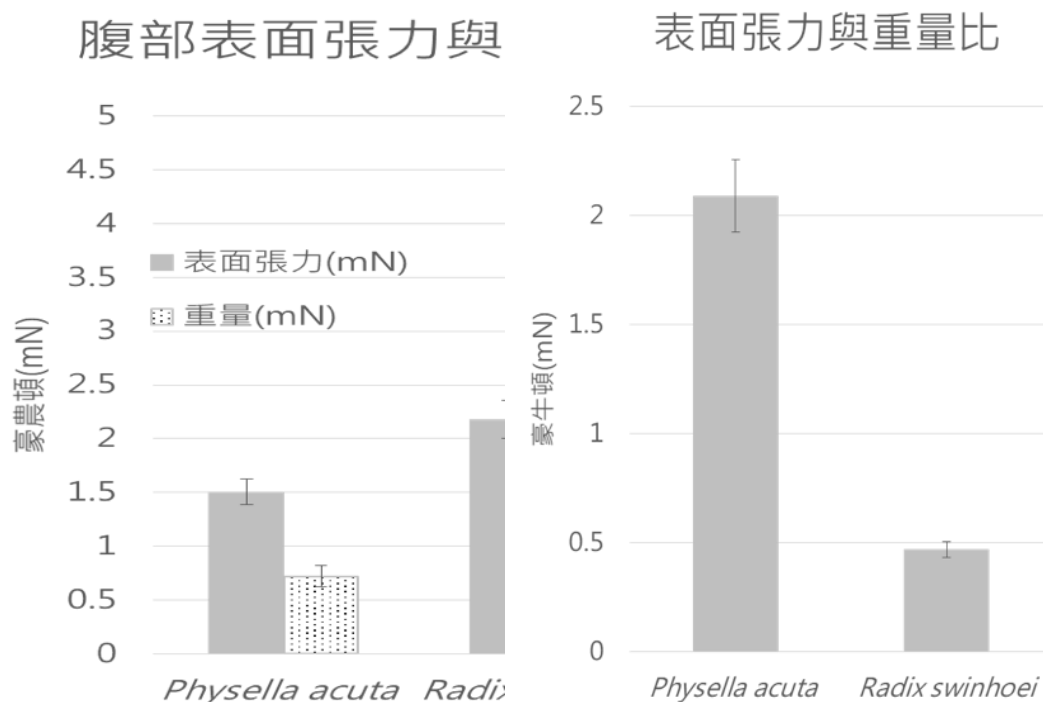


圖 3-13。腹部最大表面張力與螺總質量。 圖 3-14。表面張力與重量比值圖。

結果顯示，就算錐實螺的腹部周長大於囊螺，但由於其重量遠大於囊螺，其腹部能產生的最大表面張力也無法完全支持其漂浮。相對的，囊螺腹部可提供的表面張力大於其重量，實驗數據顯示，囊螺僅需一半的腹部浮出水面即可產生支持其重量的表面張力，也代表囊螺只需表面張力就能提供其漂浮所需的力。透過計算最大表面張力與重量比值更能看出囊螺與台灣錐實螺間的差異，如圖 3-14 所示。這項實驗結果能解釋為何囊螺翻身趨勢會大於台灣錐實螺。

總結上述研究得知，囊螺較高的儲質量比能提供其更寬裕的沉浮調節能力助其仰泳。另外，囊螺與台灣錐實螺腹部朝上產生的表面張力對於翻身仰泳有著關鍵性影響；此外，囊螺腹部產生的表面張力即可支撐其重量，台灣錐實螺者否。以上結果可說明囊螺為何較台灣錐實螺擁有較好的翻身與仰泳能力。

四、囊螺與台灣錐實螺的仰泳能力與趨性探討

經過上述測量了解漂浮的機制後，我們針對囊螺與台灣錐實螺仰泳機制深入探討。首先我們觀察到囊螺與台灣錐實螺在水面仰泳的速率大不相同，我們將兩者仰泳的過程錄影後用軟體分析測量兩者的仰泳速率，如圖 4-1 所示。囊螺的仰泳速率大於台灣錐實螺，兩者相差約 1.6 倍，蘋果螺的仰泳速率則是遠小

於囊螺與台灣錐實螺的。

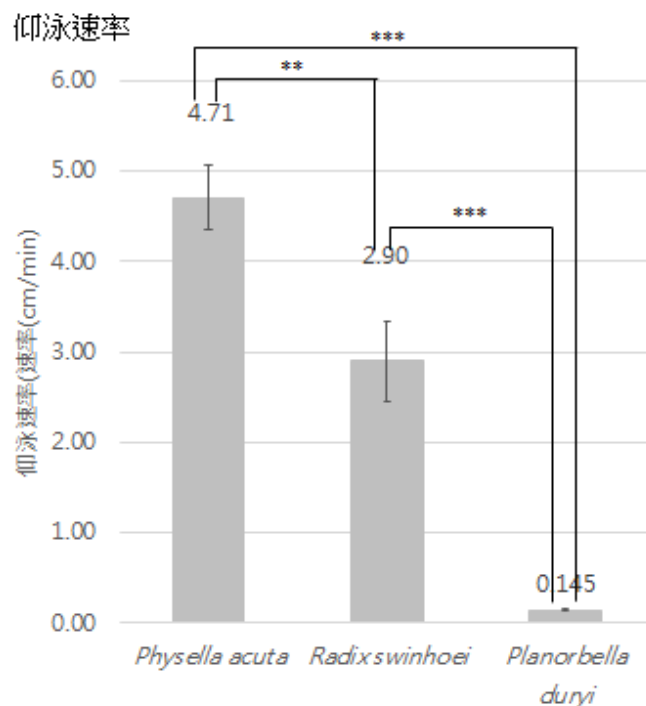


圖 4-1。淡水螺仰泳移動速率。

接著我們好奇囊螺與台灣錐實螺在仰泳過程是否對於光線有特殊趨性，因此我們設計實驗做出黑暗與光照空間供螺選擇，藉以探討兩種螺在仰泳過程是對光線產生趨性，結果如圖 4-2 所示。在仰泳時，囊螺會有明顯的趨光性而台灣錐實螺則無明顯的趨光性。我們推測，因為光線能穿透水，在水中池心的亮度會比岸邊來的更高，囊螺在仰泳過程的趨光性能減少仰泳過程往岸邊方向移動的可能性，增加其待在水中的機會，減少岸邊掠食者的補時機率。

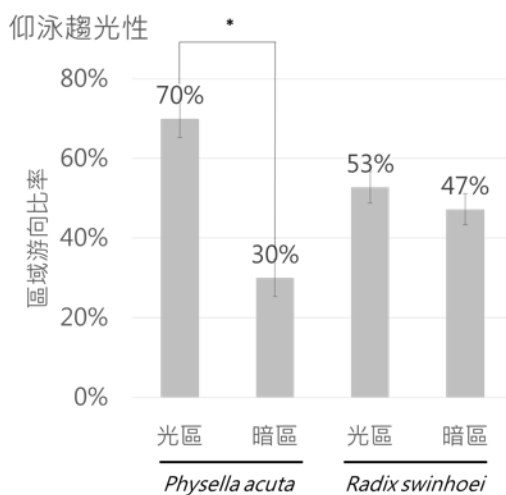


圖 4-2。囊螺與台灣錐實螺仰泳過程是否會有趨光性。

五、囊螺與台灣錐實螺的爬行能力與趨性探討

螺可能因水面擾動被沖到岸上，此時將會遇到陸地爬行的挑戰，我們囊螺與台灣錐實螺陸域爬行能力是否有差異，因此我們將兩種螺類放入無水的缸中，透過攝影紀錄兩種螺在陸域爬行過程，結果如圖 5-1 所示。

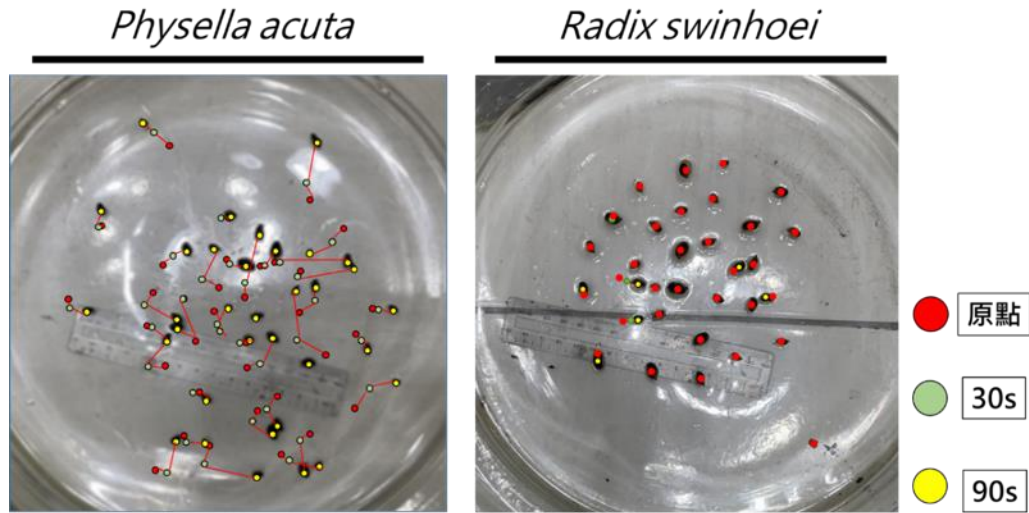


圖 5-1。囊螺與台灣錐實螺在陸域爬行過程圖。

結果可以看出，囊螺在陸域爬行較台灣錐實螺更為活躍，從爬行路徑可看出囊螺爬行方向似乎是隨機移動；錐實螺的部分則傾向停留於原地。我們推測兩種螺類在陸域展現出不同的生存策略，囊螺傾向隨機移動增加回到水域的機會，台灣錐實螺選擇留在原地，藉以減少爬行造成的能量與水分的損耗，等待流經的水將其帶走。

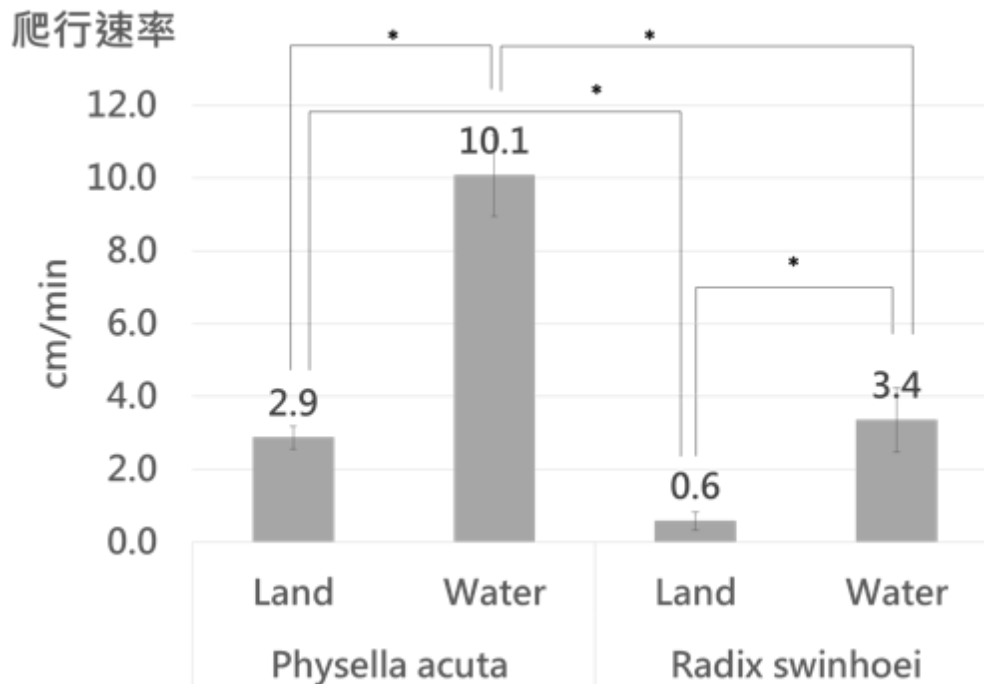


圖 5-2。囊螺於台灣錐實螺在陸域與水域中的爬行速率。

除了陸域環境以外，我們進一步量測兩種螺類的水域的爬行速率，並與陸域爬行速率相互比較，結果如圖 5-2 所示。兩種螺類在水域環境的爬行速率遠高於陸域環境，我們推測在水域環境中爬行不會有水分散失的問題，此外，陸域環境少了浮力作用，殼重將大幅提升螺類在陸域爬行的耗能，因此，兩種螺類皆傾向在有浮力的水域環境爬行

了解兩種螺類在陸域與水域環境的爬行能力後，我們好奇兩種螺類在不同環境下爬行時是否對光向產生趨性。透過實驗我們觀察並記錄囊螺與台灣錐實螺分別在陸域與水域環境中對光、暗環境的選擇傾向，結果如圖 5-3 所示。

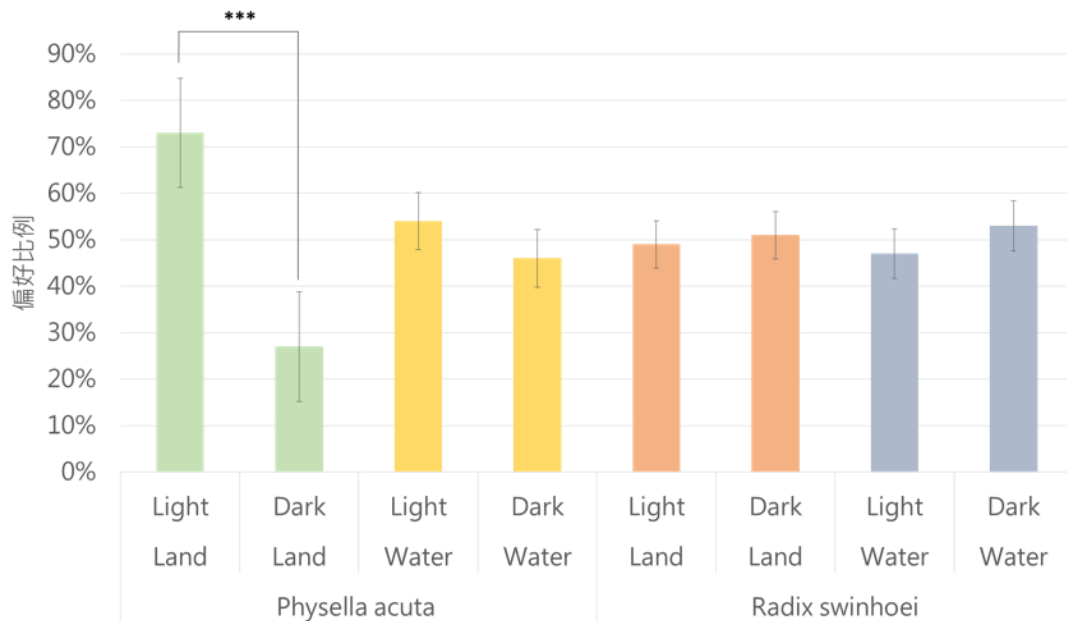
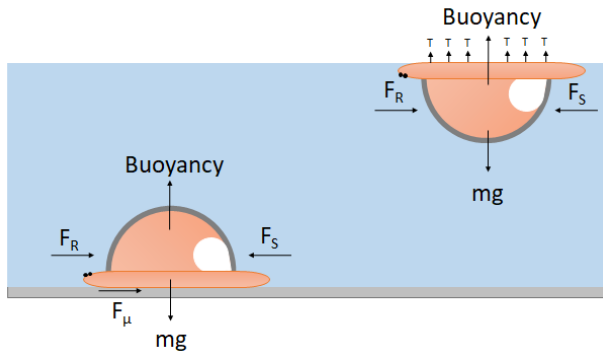


圖 5-3。囊螺與台灣錐實螺在陸域與水域爬行有無趨光性實驗。

結果顯示，僅有囊螺在陸域環境爬行時對會產生顯著趨光性，在水域環境則否！我們推測，光線照射水面會產生反射，在陸域的囊螺可藉由感受水面反射的光向來偵查水域方位，藉以增加其從陸域重返水域的機會。先前實驗得知，台灣錐實螺在陸域環境傾向不移動來減少水分與能量消耗，因此在陸域環境對光暗則無明顯趨性。

六、囊螺與台灣錐實螺運動型態之耗能比較

經過上面一連串的實驗後，我們發現囊螺與台灣錐實螺的翻身方向，可以經由力矩計算來印證；另外，兩種淡水螺的仰漂能力則與它們跟水面所產生的表面張力有關。最後我們要以耗能的運動觀點，比較後試解釋為甚麼囊螺會與親緣關係很遠的台灣錐實螺進行趨同演化，和執行「仰泳」這一個不符合生存法則的運動型態。



雷諾數很低時的阻力(用於計算水阻力)

$$F_d = -bv$$

其中：

b 為一常數，和流體特性及物體尺寸有關
 v 為物體和流體的相對速度

圖 6-1。囊螺與台灣錐實螺運動受力圖及仰泳阻力計算公式。

因為無法從現有的器材裡，直接計算出兩種螺耗能的精確數值，所以我們分別透過計算水阻力、摩擦力來換算出兩種螺類在陸上爬行、水中爬行與仰泳三者移動模式的耗能。圖 6-1 的水阻力公式，及適用於計算當物體在雷諾數很低，沒有紊流的流體中移動時，其受到的阻力稱為黏滯阻力、線性阻力，也為本次實驗中淡水螺在仰泳時的阻力。

水中爬行阻力=摩擦力+水阻力

$$F = \mu \cdot (N - B) + F_d$$

其中：

μ 為一常數由滑動面的性質、粗糙度所決定
 N 為淡水螺與接觸面的正向力
 B 為水給淡水螺的浮力 $B = V(\text{體積}) \cdot D(\text{液體密度})$
 F_d 為雷諾數很低時的阻力(用於計算水阻力)

陸地爬行阻力=滑動摩擦力

$$F = \mu \cdot N$$

其中：

μ 為一常數由滑動面的性質、粗糙度所決定
 N 則為淡水螺與接觸面的正向力

圖 6-2。囊螺與台灣錐實螺水中與陸地爬行阻力計算公式。

圖 6-2 為計算水中和路地上爬行的阻力。陸地的爬行阻力，我們是直接以淡水螺與接觸面產生的動摩擦力為計算依據，水中的爬行阻力與陸地上的大致相同，只是因為水中擁有有浮力，所以需在計算時將正向力減掉浮力，得得一數後再乘上動摩擦係數才是最終的淡水螺所受的阻力值。

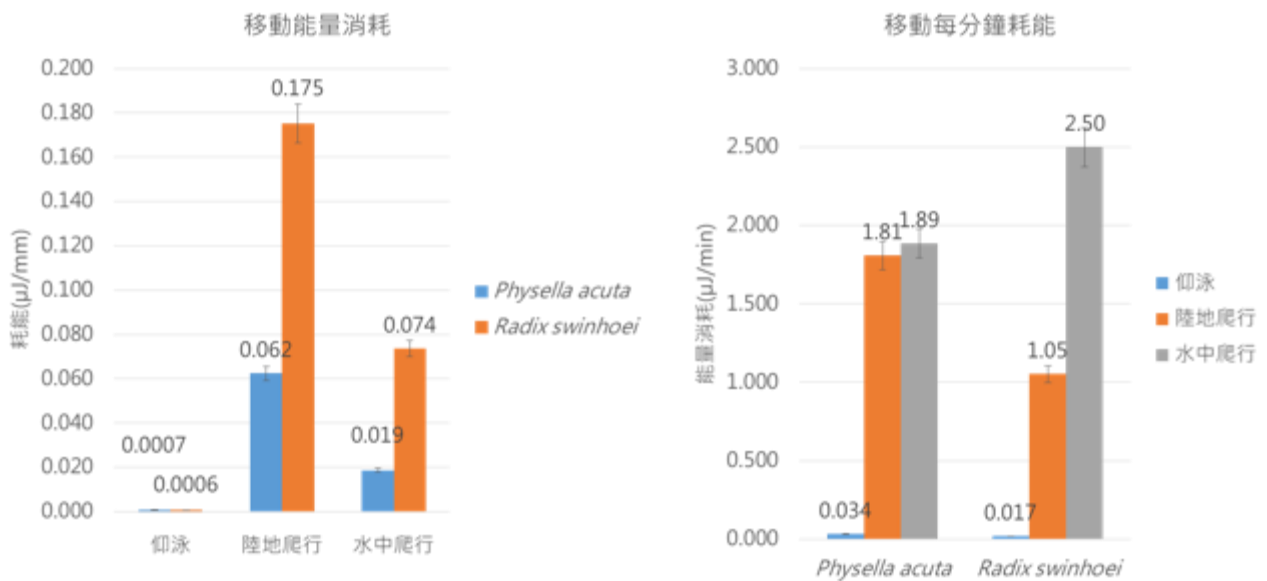


圖 6-3。囊螺與台灣錐實螺移動能量消耗和每分鐘之消耗計算。

由圖 6-3 的比較中，我們可以明顯發現囊螺與台灣錐實螺在仰泳時所需消耗的能量是最少的，這也間接應證了為甚麼此兩種淡水螺要選擇仰泳，就是因為兩者在仰泳上具有非常誇張的節能表現，而這種節能差異可能是讓他們願意承擔風險執行仰泳的主要關鍵。

另外我們可以發現兩種淡水螺在水中爬行的耗能因為有浮力減少摩擦力的因素，使得在水中爬行都較陸地爬行更加節能，兩者也都更願意投入能量在水中爬行。另外，其實兩淡水螺不管是在陸地還是水中，囊螺的節能表現都是比錐實螺好，此也說明為何囊螺爬行速率總是比較快，正是因為較節能所以牠願意消耗能量並投入於爬行中。

接下來，透過算出兩種螺每分鐘移動耗能的結果，我們出囊螺在陸上水中爬行時，其實單位時間耗能相近，代表水中跟陸上他們願意在單位可以看時間內投入相同能量進行爬行，至於爬行速率水中比較快的原因應該是浮力減少摩擦力所致。而台灣錐實螺則非常明顯不願意花能力在陸上爬行，但在水下則願意投入高能量在爬行上面，顯示其陸上移動高耗能特性使其盡量減少陸上爬行降低能量損耗。

伍、 討論

一、 利用身形與阻力常數之關係說明囊螺與台灣錐實螺為何呈現流線形

囊螺身為扁捲總科身形卻與其同科之生物，如蘋果螺形狀相差甚大，錐實螺科則大多呈現流線形，而囊螺身形反而比較像錐實螺科之流線型，如圖 1-7。我們推論這跟生存環境有關，囊螺為了能夠更好的適應環境，演變出更適合仰泳的形狀。為了驗證，我們查詢了阻力的計算方式，阻力

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$
 (註： ρ 密度、 v 速度、 C_d 阻力係數、 A 截面積)，其中的

阻力係數便由形狀所決定，如圖 6-1 所示。由圖可知，當形狀為流線型時，身體受到的水阻力相對其他形狀來說小很多，因此在仰泳時所受到的阻力較小。由此可知，囊螺所屬的扁捲總科之身形較錐實螺科之身形不容易受到水阻力之影響，因此囊螺或許在演化中逐漸變成了類似錐實螺科的流線型。

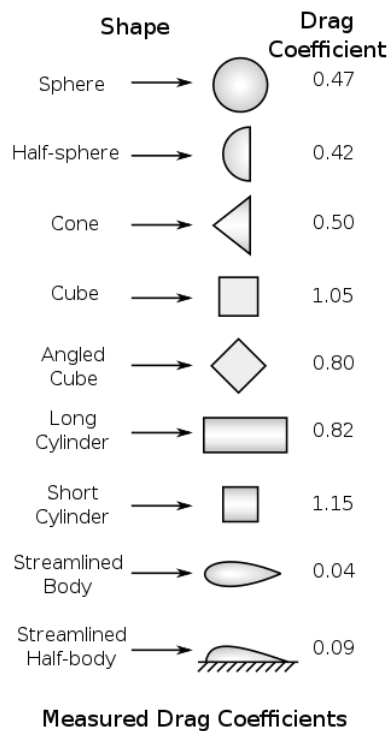


圖 6-1。不同形狀之阻力係數

二、 趨性與野外生存間的關係

在研究兩螺時，觀察到許多的趨性，我們推斷這些趨性是兩螺為了更好的適應環境而產生的。

首先，囊螺與台灣錐實螺在仰泳過程對於光線的特殊趨性，在仰泳時，囊螺會有明顯的趨光性而台灣錐實螺則無明顯的趨光性。我們推測，因為光線能穿透水，在水中池心的亮度會比岸邊來的更高，囊螺在仰泳過程的趨光性能減

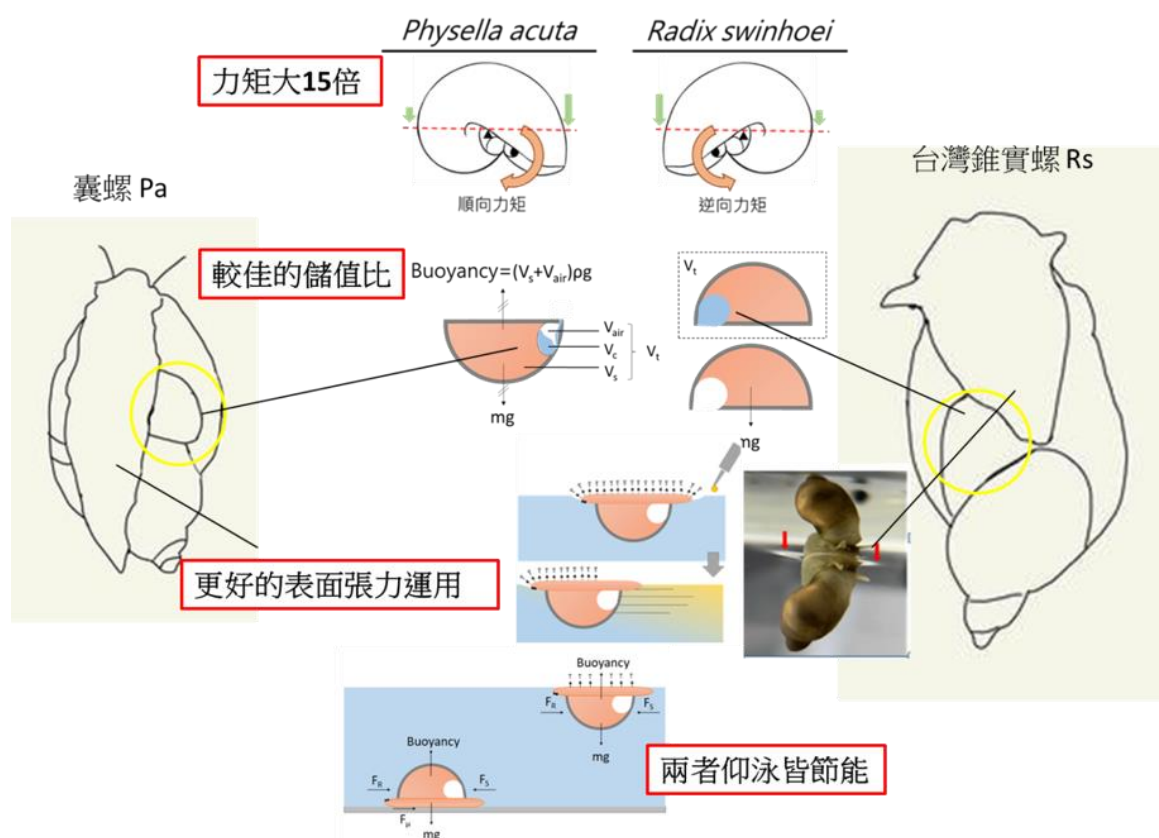
少仰泳過程往岸邊方向移動的可能性，增加其待在水中的機會，減少岸邊掠食者的捕食機率。相對來說，錐實螺因為本身對仰泳的傾向較囊螺低，錐實螺更傾向依靠水流來移動，故看不出明顯的趨光性。

接下來，關於兩螺在陸域上爬行的傾向，囊螺在陸域爬行較台灣錐實螺更為活躍；錐實螺的部分則傾向停留於原地。我們推測兩種螺類在陸域展現出不同的生存策略，囊螺傾向隨機移動增加回到水域的機會，台灣錐實螺選擇留在原地，藉以減少爬行造成的能量與水分的損耗，等待流經的水將其帶走。

至於在水域環境中，兩種螺類在水域環境的爬行速率遠高於陸域環境，我們推測在水域環境中爬行不會有水分散失的問題，此外，陸域環境少了浮力作用，殼重將大幅提升螺類在陸域爬行的耗能，因此，兩種螺類皆傾向在有浮力的水域環境爬行，來增加尋找食物的機會。

最後，在爬行時僅有囊螺在陸域環境爬行時對會產生顯著趨光性，在水域環境則否。我們推測，光線照射水面會產生反射，在陸域的囊螺可藉由感受水面反射的光向來偵查水域方位，藉以增加其從陸域重返水域的機會。台灣錐實螺在陸域環境則傾向不移動來減少水分與能量消耗，因此在陸域環境對光暗則無明顯趨性。

陸、 結論



- 一、囊螺與台灣錐實螺具有相似的身形構造與行為模式，但兩者親緣關係卻相當遠，代表兩者間有產生趨同演化，藉以適應水中特殊運動與生活模式。
- 二、囊螺較台灣錐實螺擁有更加的翻身與仰泳能力。
- 三、囊螺的氣囊擁有較高的儲質比，擁有比台灣錐實螺更好的浮沉調節能力。
- 四、囊螺與台灣錐實螺腹部的表面張力是提供兩者能順利仰泳的關鍵支撐力。
- 五、相同質量條件下，囊螺腹部能產生較大表面張力遠大於台灣錐實螺，使囊螺擁有更佳的飄浮能力。
- 六、囊螺較台灣錐實螺擁有較佳的爬行能力。
- 七、囊螺在仰泳或陸域爬行過程能透過感受光線來尋找水源位置。
- 八、陸域環境下，囊螺傾向爬行尋找水源，台灣錐實螺傾向固定不動以降低水分與能量的損耗。
- 九、蘋果螺的構造造成翻身能力與仰泳速率較囊螺與錐實螺慢

柒、 參考文獻及其他

- 一、Aneta Spyra, Freshwater alien species *Physella acuta* (Draparnaud, 1805) - A possible model for bioaccumulation of heavy metals, ISSN 0147-6513,
- 二、McCormick, Barnes W. (1979): Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics. p. 24, John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-03032-5
- 三、M.D Bargues, S Mas-Coma, European Lymnaeidae (Mollusca: Gastropoda), intermediate hosts of trematodiasis, based on nuclear ribosomal DNA ITS-2 sequences, ISSN 1567-1348,
- 四、R. K. Sinnott Coulson & Richardson's Chemical Engineering, Volume 6: Chemical Engineering Design, 4th ed (Butterworth-Heinemann) ISBN 0-7506-6538-6
- 五、Smith, S., Wilson, N., Goetz, F. et al. Resolving the evolutionary relationships of molluscs with phylogenomic tools. Nature 480, 364–367 (2011).

【評語】 050008

這項研究探討了兩種螺類（囊螺與台灣椎實螺）的仰泳行為，研究聚焦於兩種外形相似但親緣關係遠的螺類，探索它們在相似環境下演化出類似的仰泳行為。透過力矩和浮沉調節等生物力學特性的比較，瞭解這些螺類的物理適應機制。從過去參賽資料及試驗設計，研究試驗設計完整，結果明確，討論邏輯清晰完整。研究結果提出將螺類仰泳運動模式應用於節能水中移動設施的可能性。

試驗建議：

1. 試驗環境與實際的差異，可能影響結果，建議可以探討模擬野外環境作為對照組比較。
2. 在應用上可能會有技術轉換的挑戰，將生物運動模式轉換為工程設計可能面臨諸多技術和實用性挑戰，包括實驗設計的普遍性和技術轉換的可行性。