中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　動物與醫學學科

佳作

052007

蝸牛殼毛功能新觀點 － 探討殼毛摩擦力效用對台灣盾蝸牛生存適應之影響

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者：	指導老師：
高二 劉蕙瑄	林獻升
高二 楊　羚	郭瓊華
高二 簡郁芬	

關鍵詞：蝸牛、殼毛、摩擦力

摘要

本研究目的在於瞭解盾蝸牛殼毛的功能，**假設殼毛會增加摩擦力幫助蝸牛在潮濕表面附著**。首先形態測量發現**爬行時愈常與表面接觸的部位殼毛較短、密度較小**，推測殼毛與接觸面產生摩擦而造成磨損。測量不同環境下殼毛與殼皮(無殼毛)的最大靜摩擦係數，以推算摩擦力值，結果顯示潮濕的殼毛能產生較大的摩擦力，但若濕殼毛在具有蠟質結構的葉表面，或在水中加入界面活性劑破壞水的氫鍵作用，則摩擦力都會變小，**證實殼毛吸水後能利用氫鍵吸引力作用增加摩擦力**。**野外調查結果發現，殼長較小且殼毛較完整的盾蝸牛較常棲息在較高的環境**。**因此本研究結論為臺灣盾蝸牛殼毛能產生較大的摩擦力，使其在潮濕環境下有更多的附著力，增加在較高環境棲息的適應力。**

壹、　研究動機

在一次考察中我們發現姑婆芋葉鞘中有隻特別的蝸牛，殼型為盾狀且殼緣上竟長著一圈毛狀的構造，對此感到非常好奇，因此找尋相關資料，得知此種蝸牛為**臺灣盾蝸牛**，而毛狀構造稱之為「**殼毛**」。

(圖一)台灣盾蝸牛

(圖二)殼毛

具有殼毛的蝸牛在全世界都有分佈。而臺灣有殼毛的蝸牛種類大約有 2 屬 8 種。殼毛型態大致分為兩類：第一型為 *Trochulus* 屬等類群，**殼毛平均分布全部殼面**。第二型為本研究的 *Aegista* 屬的臺灣盾蝸牛和薄鱗盾蝸牛等，**殼毛沿殼緣分布**。(資料來源:臺灣貝類資料庫)

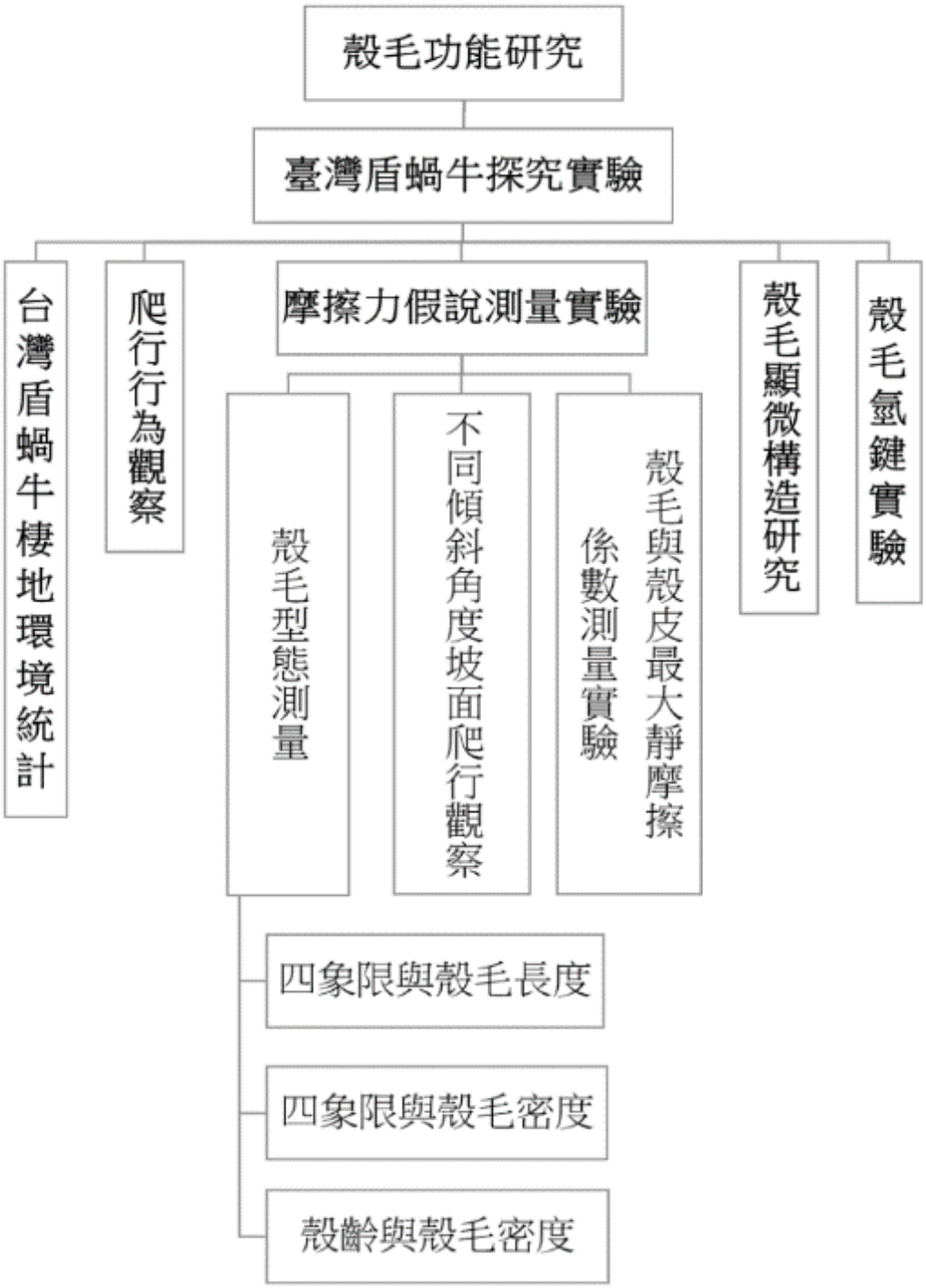
Trochulus villosus	*Aegista vulgivaga*
(圖三)殼面佈滿殼毛的蝸牛	(圖四)殼毛沿著殼緣的蝸牛

蝸牛的外殼，主要成分為碳酸鈣質和貝殼質。由外套膜分泌，而其質地由外而內可分為三層：有機層；稜柱層；珍珠層。本研究所探討的殼毛由硬蛋白組成為殼皮的一部分，殼皮與殼毛如果脫落無法再生修補(臺灣蝸牛圖鑑。吳書平。2013。)

而本研究的臺灣盾蝸牛及不少不同類群的蝸牛可發現外殼表面有毛狀構造。以天擇的觀點來看，需多耗費能量及時間的構造必有其優勢處以提高個體適存度(fitness)。關於殼毛功能的假說主要有三點，感覺、防禦與保濕，**但皆未有具體的實驗來證實其功能**。(臺灣蝸牛圖鑑。吳書平。2013。)

Pfenninger M, Magnin F (2005)等人曾利用粒線體的 COI 和 16SrRNA 基因片段及核 DNA 的 ITS1，建構出 *Trochulus* 屬有殼毛蝸牛的親緣關係，**分析出殼毛特徵和微棲地潮濕的關係，顯示有殼毛的蝸牛多棲息潮濕環境，殼毛為祖徵，若蝸牛遷徙至較乾燥環境生存，則殼毛會逐漸消失**。因此殼毛的功應該是有助於蝸牛在潮濕環境下生存，但確切的功能與對蝸牛的影響亦尚未十分瞭解。

由於科學界對於殼毛功能尚未有一致性的見解，促使我們研究的興趣，因此在上述文獻資料的基礎下，我們設計了下列研究方法探討出殼毛的功能：首先是測量蝸牛環境數據與觀察爬行模式，接著分析爬行模式與殼之間的關係，綜合前面得到的結果後配合假說進行其他相關實驗，最後以研究得到的數據比較殼毛對蝸牛生存適應的影響。


殼毛功能研究
臺灣盾蝸牛探究實驗
台灣盾蝸牛棲地環境統計
爬行行為觀察
摩擦力假說測量實驗
殼毛型態測量
不同傾斜角度坡面爬行觀察
殼毛與殼皮最大靜摩擦係數測量實驗
殼毛顯微構造研究
殼毛氫鍵實驗
四象限與殼毛長度
四象限與殼毛密度
殼齡與殼毛密度

(圖五)實驗總流程圖

貳、　研究目的

一、　研究目的：

(一) 探討台灣盾蝸牛的殼毛之功用。

(二) 探討殼毛對蝸牛生存上的意義。

二、　研究問題：

潮濕環境下殼毛增加蝸牛何種生存優勢，讓蝸牛花費額外的能量生長殼毛構造？

三、　研究假說：

殼毛會增加個體一定程度的「摩擦力」，幫助其在潮濕的表面附著、棲息

(一) 棲息地

我們發現臺灣盾蝸牛多棲息在葉面或姑婆芋葉鞘中，而一般認為蝸牛分泌的黏液有夠多的黏著力吸附物體表面，但經過野外觀察結果發現蝸牛常垂直爬行在潮濕、易滑落處(圖六)。另外在**休眠時蝸牛會縮進殼裡，並且在殼口分泌碳酸鈣膜固定(圖七)，這時候如果環境非常潮濕蝸牛便不易固定在潮濕表面上。因此我們假設「殼毛」會比平滑的殼面有較大的摩擦力作用，幫助其在潮濕的表面附著**。

在不同的垂直的岩面、葉鞘、樹幹爬行	(圖七)
(圖六)台灣盾蝸牛棲息環境	休眠時分泌碳酸鈣殼膜

(二) 摩擦力（friction）

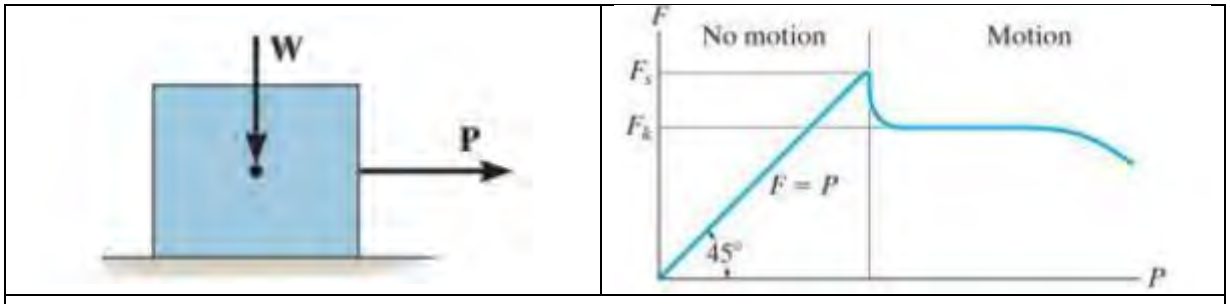
1.指兩個表面接觸的物體相對滑動時抵制它們的相對移動的力。其力主要來自物體之介面間彼此的粗糙度所致，還有物體之介面間彼此分子的吸引力。

2.靜摩擦力(Fs)：物體與介面無相對移動，大小等於施加於物體並與介面平行的力(P)。

3.最大靜摩擦力：當物體之介面間開始產生滑動前的剪力為最大。

4.動摩擦力(Fk)：當物體之介面間開始產生滑動後，此時的剪力比最大靜摩擦力為小，

動摩擦力在物體之介面間的滑動沒有產生空氣間隙層時，其力為固定常數，當物體之介面間的滑動速度加快時，會產生空氣間隙層，因而使得動摩擦力下降。(R.C Hibbeler, 2009)



(圖八) (R.C Hibbeler, 2009)

參、　研究設備及器材

一、**實驗物種**：臺灣盾蝸牛(*Aegista mackensii*)

(一) 分類：扁蝸牛科(Bradybaenidae)

(二) 分布：低中海拔山區之**陰暗潮濕**的林下。

(三) 特徵：殼形為盾狀，周圍具有銳利的稜角與

(四) 殼毛，殼顏色為褐色具淡褐黃色半透明殼皮，殼表具斜向長紋。幼蝸殼背較淡，具明顯的褐色斑紋。

(圖九)台灣盾蝸牛幼年期形態

肆、　研究過程或方法

一、　臺灣盾蝸牛棲地環境統計

在幾次野外觀察中我們發現體型較小的臺灣盾蝸牛大多位於較高的植物或岩面，體型較大的個體則大多棲息於相對高度較低的地方。我們推測大、小盾蝸牛的生態棲位是不同的。因此我們至野外調查統計**休眠時期**的盾蝸牛體型大小和停棲高度以及環境之間的關係。

發現休眠樣本拍下棲地 → 用捲尺記錄當時棲地的高度 → 依殼長大小分類，再統計分布地區

二、　臺灣盾蝸牛爬行行為觀察

我們利用攝影機及相機進行盾蝸牛爬行行為的觀察記錄，觀察蝸牛在爬行於垂直和水平表面、靜態與動態殼面的傾斜狀況與殼毛接觸之部分的差異。

三、　摩擦力假說測量實驗

由蝸牛運動行為觀察結果，我們提出以下的觀點：

1. **特定部位會因經常接觸摩擦物體表面，殼毛會變短，或者脫落消失不見。**
2. **越老的蝸牛摩擦次數越多，時間越久，殼毛變短、脫落越明顯。**

刮除殼毛後，摩擦力會變小，在潮濕表面的附著力會下降。

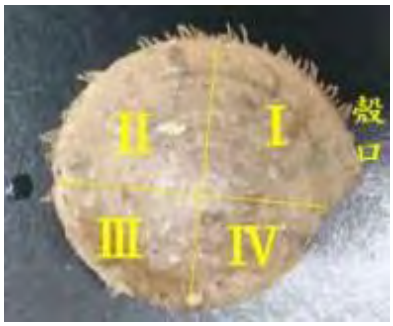
因此我們設計以下的實驗來證實我們的推論：

(一) 殼毛形態測量

1. 不同部位殼毛長度測量

首先將樣本拍照，再利用 ImageJ 軟體將蝸牛的殼毛做數據分析

從殼口開始計算，逆時針以 90 度為一個單位，將蝸牛殼面分成四個象限 → 從每一個象限取適當的殼毛 → 利用 ImageJ 軟體將殼毛做顯微測量，統計各象限殼毛長度

	
劃分殼毛生長四個部位	四象限標示圖
(圖十)殼毛四象限磨損程度探討測量方法截圖	

2. 不同部位殼毛密度測量

除了測量不同部位的殼毛的磨損程度之外，還要測量各象限的平均殼毛密度，以佐證隨著蝸牛的生長，殼毛會磨損得更厲害。

逆時針以 90 度為一個單位，將蝸牛分成四個象限 ➡ 利用 ImageJ 軟體，數每一個象限的殼毛數量 ➡ 計算殼寬，得到殼周長，統計分析個現象的殼毛密度

數各象限殼毛	計算殼寬
(圖十一)	

3. 不同殼層數殼毛密度測量

由於蝸牛的殼是順著殼緣一圈一圈的長的，因此我們可以合理推測殼層數可以等於其年齡，利用 ImageJ 軟體，數出臺灣盾蝸牛的殼層數。

從殼的正中央往外計算殼層 ➡ 計算不同殼層數的殼毛數量，換算成殼毛密度

計算殼層數	測量殼寬

(圖十二)殼毛密度測量示意圖

(二) 不同傾斜角度坡面爬行觀察

為了模擬臺灣盾蝸牛在自然環境的爬行模式，我們製作了一個可由 Arduino 操作的機械平台，可以依實驗需求輸入傾斜角度的數值，而已寫入程式的麵包板會控制連接平台的馬達轉動，**藉此減少人為手動的誤差**。

本實驗測試的角度依序為 30˚、60˚及 90˚，並記錄蝸牛在不同傾斜角度的條件下，殼面傾斜的角度變化，以及殼毛與平台的接觸面積有何變化。

將待測的蝸牛放到 Arduino 平台上 → 輸入待測數值，控制儀器傾斜一定的角度 → 拍攝、觀察蝸牛爬行

Arduino 儀器	Arduino 儀器螢幕	蝸牛爬行圖

(圖十三)利用 Arduino 儀器精確調整爬行面傾斜角度

(三) 殼毛與殼皮的摩擦係數測量實驗

為比較具有殼毛與殼皮(沒有殼毛)何者產生較大的摩擦力，因此藉由測量摩擦係數然後統計分析兩者的差異，有較大摩擦係數者，代表其產生的摩擦力較大。

從以下公式推導可得知最大靜摩擦係數的大小可以作為摩擦力的比較依據，而最大靜摩擦係數可由物體在靜止在斜面最大角的 $\tan\theta$ 求得。

為了避免實驗因為角度過小造成誤差，因此使用「光槓桿」為輔助，能將斜面的傾斜角度經反射投影為兩倍，更加精準測量。

1. **摩擦係數公式推導：**

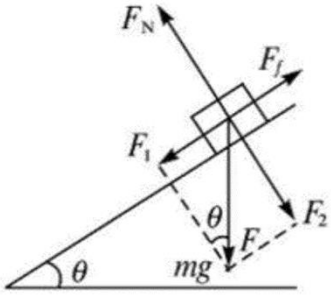
在相同重量下，摩擦係數越大者產生之摩擦力越大。利用物理之摩擦力公式推得摩擦係數量值為 tan θ ，<u>因此測出 tan θ 值即可比較摩擦係數大小。</u>

$F_{smax} = mg \cdot \sin\theta = \mu s \cdot N$

又 $N = mg \cdot \cos\theta$

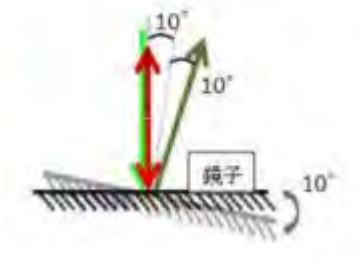
推得：$F_{smax} = mg \cdot \sin\theta$

$= \mu s \cdot (mg \cdot \cos\theta) \rightarrow \mu s = \tan\theta$



2. **光槓桿物理概念解說：**

當平面傾斜 10 度角時，法線移動 10 度角，又入射角等於反射角，轉動角度便變為 2 倍。**利用此原理，將待測角度放大 2 倍以求更精準的測量角度，計算摩擦係數。**



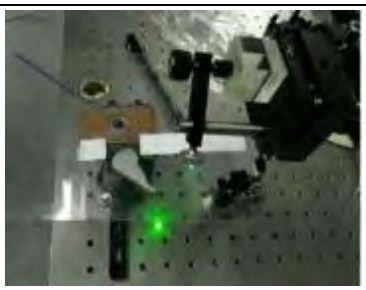
(圖十四)光槓桿物理概念

3. **摩擦力實驗操作：**

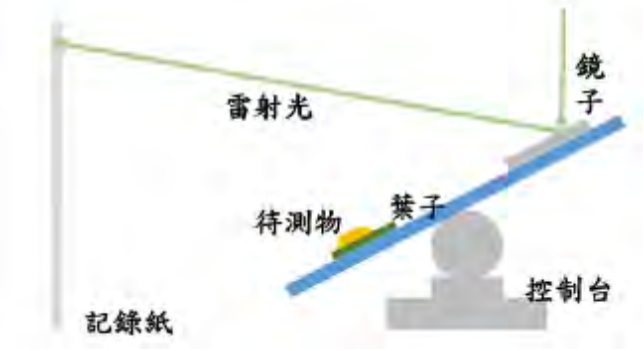
實驗依**乾、濕環境**分為兩部分，在乾燥環境下我們將殼毛與殼皮直接放置在平台上進行測量，殼皮模擬沒有殼毛的狀態；而在潮濕環境下，每個待測物都會先被滴過等量的水，接著都靜置五分鐘才開始實驗。

在牆上貼上方格紙並劃出壓克力板水平高度 → 將待測物置於壓克力板上並傾斜斜面直至待測物滑動停止 → 在方格紙上標記作為高度

紀錄斜面與水平線交點得到水平距離 → 藉由水平距離和高度算出正切值 → 利用 Excel 將所有蒐集的 θ 值加以做敘述統計分析



待測物(殼毛)	待測物(殼皮)	實驗儀器實際照片
(圖十五)		(圖十六)



(圖十七)實驗裝置示意圖

四、　殼毛與殼皮顯微構造觀察

最後為了找出有何種細微構造在影響殼毛與殼皮(沒有殼毛)之間摩擦係數的差異，以及觀察殼毛在乾燥與潮溼條件下的微小現象，所以我們將殼毛和殼皮放在顯微鏡下觀察並拍攝紀錄。

取適當殼皮和殼毛 ➡ 製成玻片樣本 ➡ 放在顯微鏡下觀察其構造

五、　殼毛氫鍵實驗

蝸牛在潮濕環境時攀附的葉面常有積水或附有水珠，殼毛在蝸牛爬行時也會沾附到，而水為極性分子，會與極性分子之間會產生氫鍵吸引，因此為**測定水的氫鍵是否會增加殼毛的附著力**，我們**重複殼毛在潮濕環境的摩擦係數測定實驗**(P.8)，但是將滑動平面分為兩組。一組為**姑婆芋葉及山芋葉的比較，山芋葉面具有奈米大小的細微突起，使的水與葉面形成很大的接觸角，葉面上的水會因表面張力形成水珠，水珠與葉面接觸面積極小，因此水珠極易滑落，使葉面具有疏水性，此現象稱為蓮葉效應**(奈米科技新世界－國立科學工藝博物館)。第二組為**姑婆芋上有、無清潔劑的比較**，我們將姑婆芋葉面塗上一定濃度的清潔劑，而**清潔劑成分具有介面活性劑，介面活性劑為一部分親水和一部分親油的兩親分子，能破壞水分子的氫鍵，使水分子之間的附著力下降。**

以上這兩項實驗都是想要證實當殼毛吸附水後，是否是透過水分子與極性物體表面產生氫鍵的作用力，而增加附著力(黏滯力)，導致摩擦力變大，用以證實殼毛摩擦力功能假說。

伍、　研究結果

一、　臺灣盾蝸牛棲地環境統計

從圖(十八)中得到，在同一顆植物上，當蝸牛在休眠時體型較小的個體棲息之垂直高度較高，；而體型較大的蝸牛則高度較低。另外從圖(十九)及圖(二十)比較也能得到，體型較小的蝸牛多位於較高的植物與岩壁上；體型較大的則多位於地面。

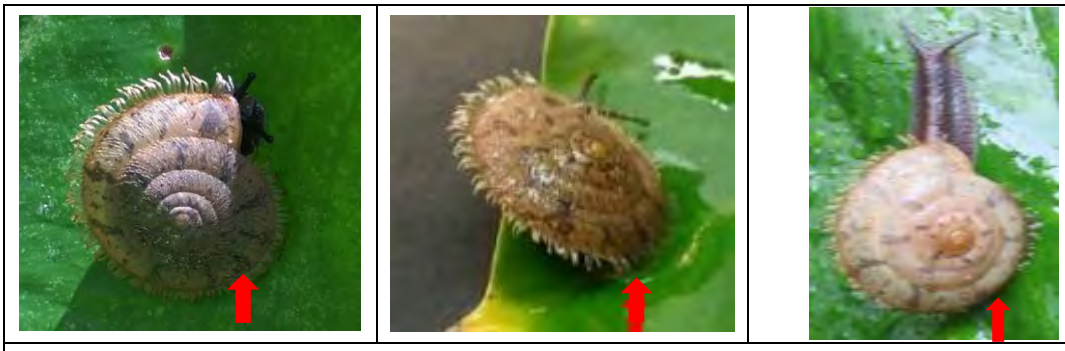
(圖十八)在同一棵樹上，大、小盾蝸牛不同的棲息高度分佈

(圖十九)體型較小盾的蝸牛棲息在較高處的環境

(圖二十)體型較大的蝸牛棲息在高低處的環境

二、 臺灣盾蝸牛爬行模式觀察

經由對臺灣盾蝸牛爬行模式的觀察，可以發現當臺灣盾蝸牛在大部分停棲或欲爬行時，**殼面經常會往頭部的右側傾斜甚至旋轉，而右側是被我們定義為第三、四象限的區塊**。由觀察顯示(下圖紅色箭頭標示)，蝸牛殼面第三、四象限，特別是第四象限的殼毛較常與爬行表面接觸。



(圖二十一)台灣盾蝸牛爬行時特定部位常接觸、摩擦爬行面

三、 摩擦力假說測量實驗

(一) 殼毛型態測量

1. 不同部位殼毛象限磨損程度之探討

從行為觀察中發現盾蝸牛在剛要爬行時，通常殼面右側會傾斜，換言之第四象限是蝸牛最常與爬行面接觸的地方。我們先觀察許多蝸牛殼的照片，**發現第四象限（下圖紅色箭頭標記之處)的殼毛較其他象限稀疏**。比對爬行觀察可以得知，最常與其他物體表面接觸的第四象限殼毛磨損最為嚴重。

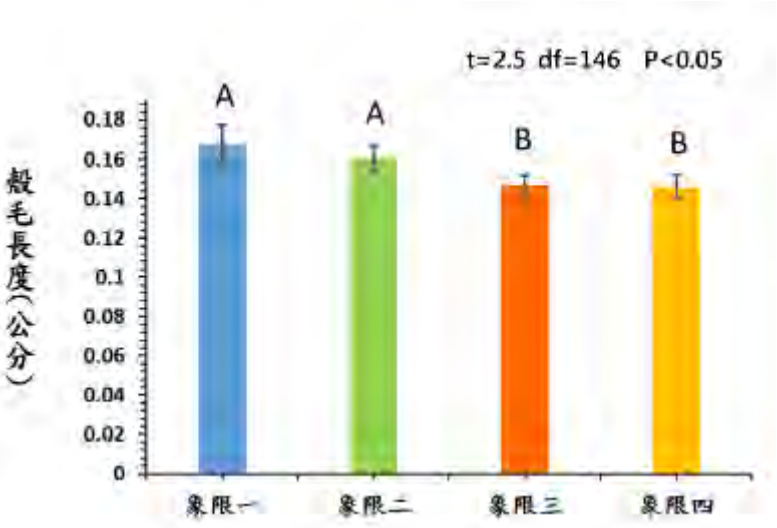
(圖二十二) 四象限殼毛分布

為了使觀察結果以實際數據來呈現，我們利用 ImageJ 軟體測量殼毛長度。**結果顯示第四象限之平均殼毛較短(表三)，可能原因為象限三和四的部位殼毛常因發生摩擦而變短**。利用單因子變數分析（ANOVA）後得到 ***P*值小於 0.05，有顯著差異**。

(表二) 臺灣盾蝸牛四象限平均殼毛長度

	平均(cm)	標準差(cm)	個數(隻)
象限一	0.16	0.0098	37
象限二	0.16	0.0068	37
象限三	0.14	0.0054	37
象限四	0.14	0.0058	37

*P*值：0.087496　　F 值：2.227842

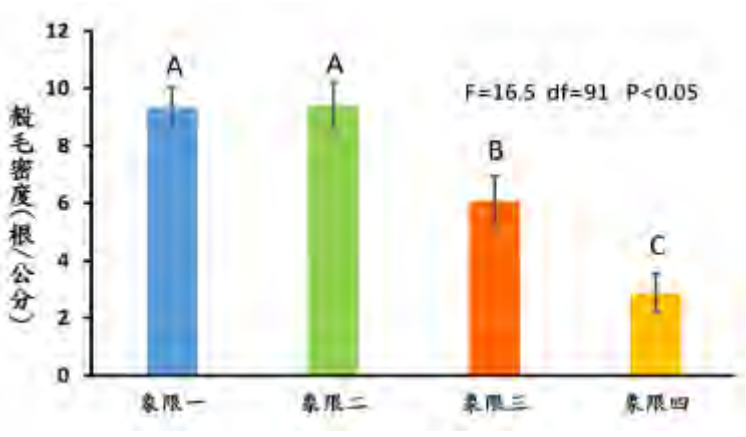


(圖二十三)臺灣盾蝸牛四象限平均殼毛數比較圖

2. **四象限區域殼毛密度探討：**

以四象限的殼毛密度作單因子變異數(ANOVA)分析，分析結果發現**第三(6.08 根/公分)、四象限(2.87 根/公分)的殼毛密度平均值明顯比第一(9.33 根/公分)二象限(9.40 根/公分)來的低**。

(表三) 臺灣盾蝸牛四象限平均殼毛密度			
	平均(根/cm)	標準差(根/cm)	個數(隻)
象限一	9.33	0.70	23
象限二	9.40	0.81	23
象限三	6.08	0.85	23
象限四	2.87	0.67	23



第三、四象限的殼毛密度較一、二象限低，第四象限密度最低。

(圖二十四)台灣盾蝸牛四象限平均殼毛密度之比較

*P*值<0.05　　F 值：16.55

另外從一二象限的殼毛密度比較來做 T-test。發現 P 值並沒有小於 0.05，無顯著差異，表示一二象限的殼毛可以定義為新長出來的殼毛，也可以視為同一組資料來探討。

而從三四象限殼毛密度的分析，發現 P 值小於 0.05，有顯著差異。尤其是第四象限，在取樣的過程中，許多樣本都是寥寥無幾，甚至完全沒有。另外可以比對各象限殼毛長度和各象限殼毛密度的統計結果，能發現第一、二象限殼毛長度及密度都較第三、四象限大。

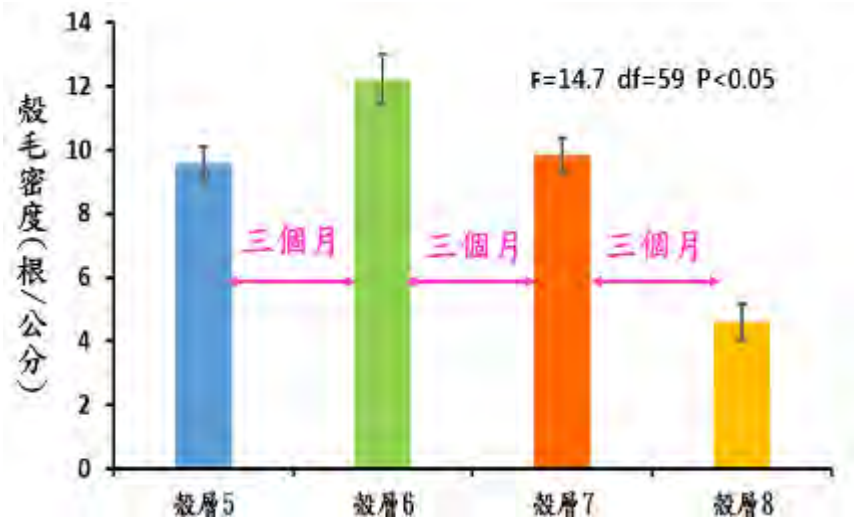
綜合前面爬行行為觀察得到的結果，第三、四象限的殼毛越長，接觸其他物體表面就越常被磨損到，導致統計結果呈現第三、四象限被磨損的最嚴重，結果符合我們的預期。

3. **殼毛密度與殼層數(年齡)之探討：**

我們將殼層數(殼層數越多表示年齡越大)與殼毛密度做比較(圖三十)，發現臺灣盾蝸牛平均殼層數介於 5~8 層之間，當臺灣盾蝸牛成長到第 8 殼層後即停止生長。**而其中從殼層數與殼毛密度之間的關係分析顯示第 8 殼層的殼毛密度最低。此結果顯示蝸牛生命史中殼會不斷與其他物體表面接觸造成殼毛磨損。**

(表三) 臺灣盾蝸牛不同殼層平均殼毛密度			
	平均(根/cm)	標準差(根/cm)	個數(隻)
殼層五	9.55	0.62	2
殼層六	12.19	10.44	17
殼層七	9.81	9.18	31
殼層八	4.59	3.12	10

P 值<0.05　　F 值：16.55



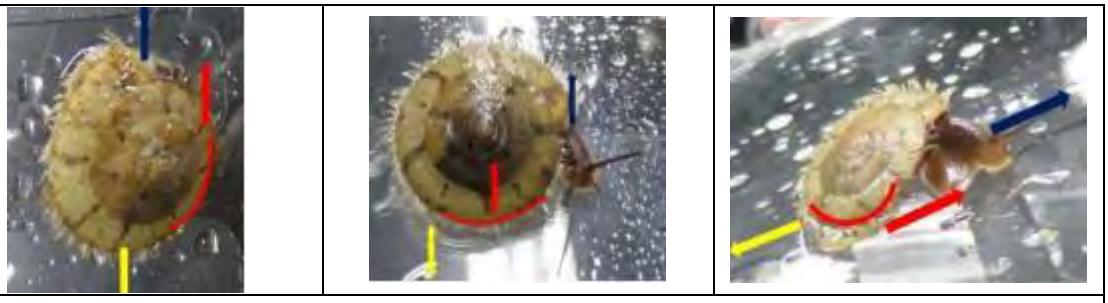
(圖二十五)臺灣盾蝸牛殼層數（年齡）與殼毛密度關係圖

(二) 臺灣盾蝸牛不同傾斜坡面爬行角度觀察：

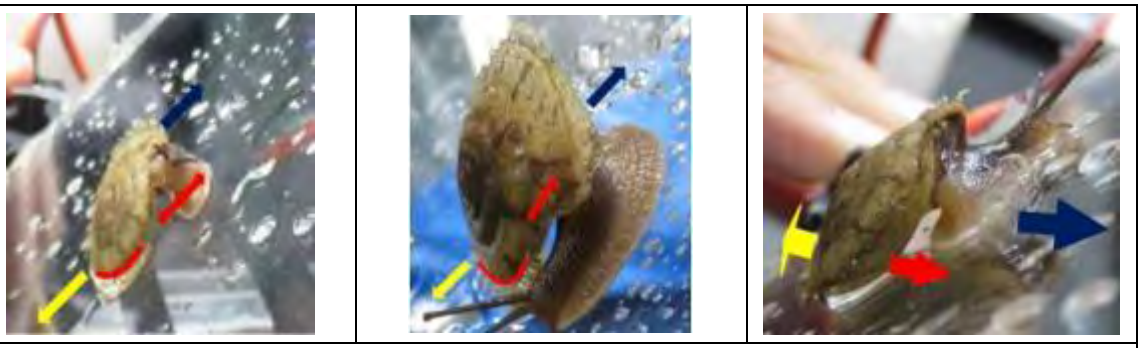
藉由 Arduino 斜面裝置，**我們模擬了在 30、60 及 90 度角傾斜斜面的蝸牛爬行**，觀察後將

照片以下圖紅色弧線標示出**殼毛與爬行物體表面接觸的部分**，並畫出力圖。**黃色箭頭表示蝸牛產生的下滑力，此立即平行斜面的重力分力；藍色箭頭為蝸牛本身對物體表面的附著力；而紅色箭頭代表殼毛產生的摩擦力。**

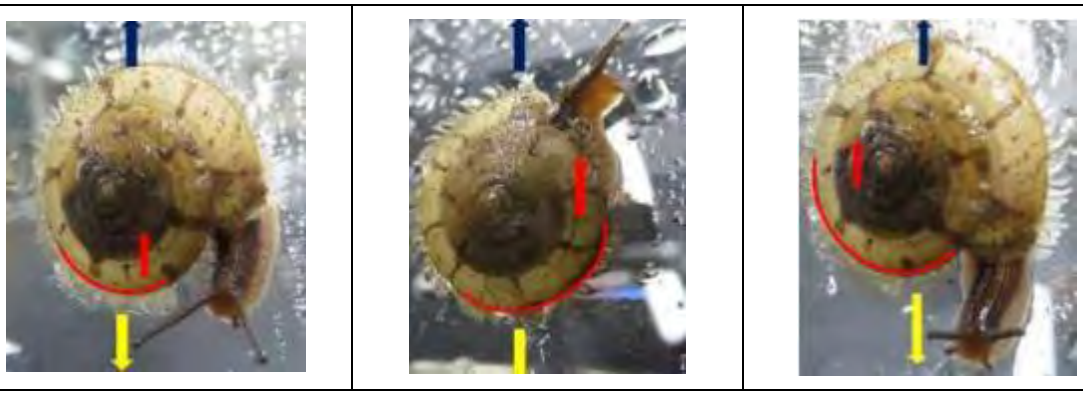
以物理角度來說，物體在傾斜角度越大的坡面，其下滑力(mg sinθ)就越大。而從觀察結果可以發現當蝸牛分別在 30 度與 90 度角時，後者的殼毛與爬行面接觸的部分較前者多，殼毛與爬行面接觸的範圍就越大。**若蝸牛停棲或爬行在近垂直的姑婆芋鞘，下滑力會大於平面**。



(圖二十六)傾斜 30 度角



(圖二十七)傾斜 60 度角



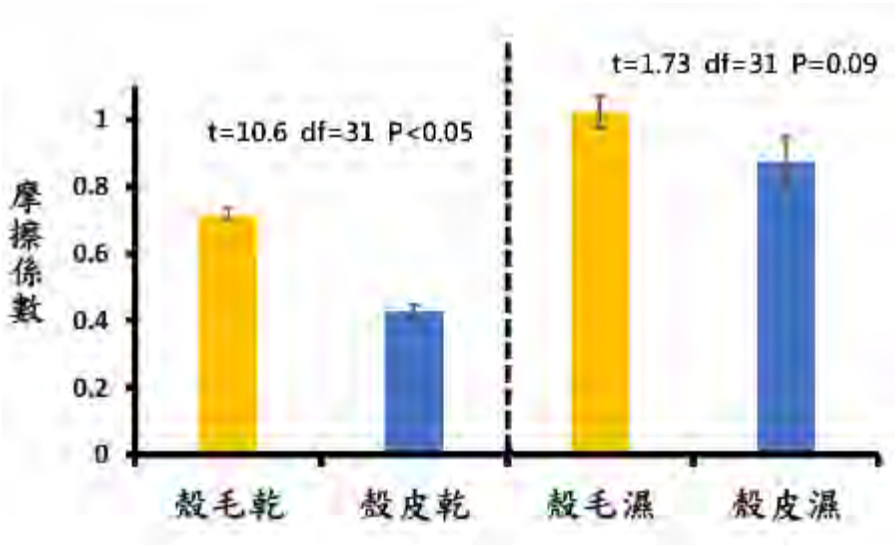
(圖二十八)傾斜 90 度角

(三) 殼毛與殼皮(無殼毛)摩擦係數(μs)測定實驗

經由實驗得到殼毛在乾燥環境的最大靜摩擦係數(0.71)，比殼皮的最大靜摩擦係數(0.42)大；潮濕環境的殼毛最大靜摩擦力係數(1.02)，同樣大於殼皮最大靜摩擦係數(0.87)。同時比對結果，殼毛不管在潮濕或乾燥環境，最大靜摩擦係數都「大於」沒有殼毛的殼皮。從物理公式(P.8)來說，最大靜摩擦力等於其係數乘上物體正向力 (Fs max = μs·N)，由此可知當物體重量固定時，其最大靜摩擦係數越大，就會得到越大的摩擦力。所以殼毛摩擦係數比沒有殼毛的殼皮大，表示殼毛產生的摩擦力大於沒有殼毛的殼皮。殼毛能增加更大的摩擦力。(圖三十四)

(表五) 殼毛與殼皮在壓克力板上乾濕環境最大靜摩擦係數測定結果			
	最大靜摩擦系數	標準差	次數
殼毛乾	0.71	0.01	16
殼皮乾	0.42	0.02	16
殼毛濕	1.02	0.04	16
殼皮濕	0.87	0.07	16

*P*值<0.05



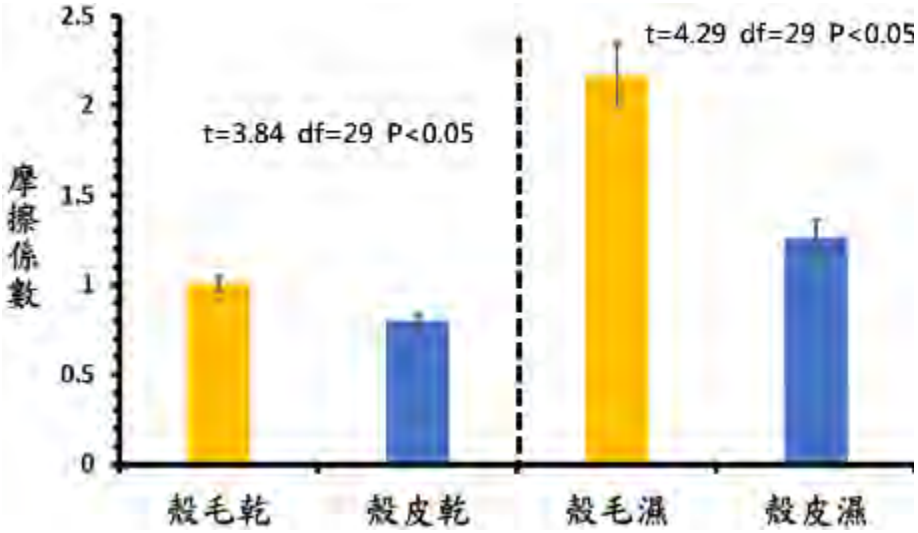
(圖二十九)殼毛與殼皮在壓克力板上乾濕環境最大靜摩擦係數測定結果

另外在野外環境調查中，發現台灣盾蝸牛多棲息於姑婆芋葉，因此為了使實驗環境更貼近真實條件，另將姑婆芋葉覆於壓克力板上，之後進行相同實驗，而實驗結果(圖三十)與在壓克力板上相同，皆是殼皮可產生更多的摩擦力，進一步值得探討的地方在於，以姑婆芋葉為

實驗條件得到的最大靜摩擦係數，皆比在壓克力板上操作來的大，也就是**殼毛在姑婆芋葉可以產生更大的摩擦力**。

(表五) 殼毛與殼皮在姑婆芋上乾濕環境最大靜摩擦係數測定結果			
	最大靜摩擦系數	標準差	次數
殼毛乾	1.00	0.04	15
殼皮乾	0.80	0.03	15
殼毛濕	2.17	0.18	15
殼皮濕	1.26	0.10	15

*P*值<0.05



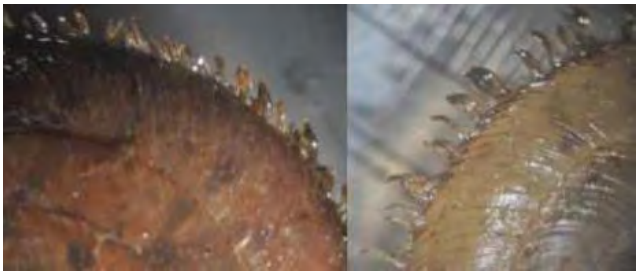
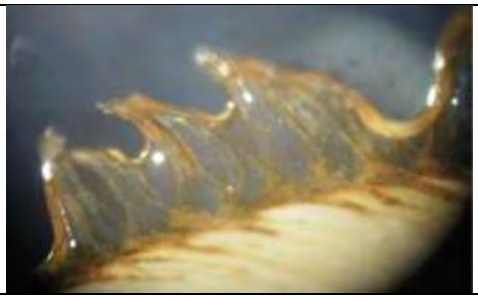
(圖三十)殼毛與殼皮在**姑婆芋葉**上乾濕環境最大靜摩擦係數測定結果

四、 殼毛顯微構造研究

經顯微鏡觀察殼毛表面構造後能發現，**殼毛與殼皮具有相同的粗糙程度，表面上均有粗糙的紋路和凸起，可以增加摩擦力**。另外也可以發現殼毛外緣具有類似骨架的明顯線條與殼皮殼面相連，黃色突起是殼皮突出的延伸，因此殼毛表面不是光滑的材質，而是與殼皮同樣的粗糙紋路。

殼皮表面粗造的顯微構造	殼毛表面粗造的顯微構造
(圖三十一)殼皮與殼毛顯微構造的比較圖	

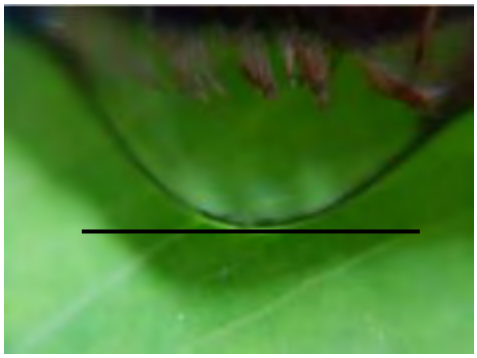
當蝸牛停棲在潮濕表面時，發現殼毛很容易吸附水分，將水凝聚一起並**覆蓋在一整圈的殼毛上，甚至形成類似「水膜」的狀態，而在沒有殼毛的殼皮沒有此水膜現象**。水是極性分子，具有氫鍵，水與水會產生電荷相吸，水也會與接觸面的葉子產生吸附作用，因此產生更大的附著力，因此我們推測是水的氫鍵作用力造成摩擦力增加。

	
殼毛潮濕時還沒形成水膜	殼毛非常潮濕時形成一層水膜
(圖三十二)在潮濕環境下殼毛很容易吸附水分，形成水膜	

五、 殼毛氫鍵實驗

氫鍵在含有氫的極性共價鍵（例如水分子中的 O-H 鍵）中，氫將具有輕微的正電荷，因為電子鍵被更強地拉向另一元素。由於這種輕微的正電荷，氫將被吸引到任何相鄰的負電荷，而這種相互作用稱為氫鍵；氫鍵並非真實之鍵結，而是一種庫倫靜電力在特定且局部的正電荷氫原子和局部負中會出現。而單獨的氫鍵十分脆弱，但許多氫鍵組合力量非常大，**共價鍵：氫鍵：凡得瓦引力得強度大小為 100：10：1**，關於氫鍵的特性裡提及**液體分子間若有氫鍵形成，則分子間作用力增大，黏度較大。**

山芋葉表面微小的蠟質結構，產生蓮葉效應，使水分子無法與之產生氫鍵吸附，(圖三十三)，而從實驗結果也發現，殼毛在潮濕姑婆芋葉面的最大靜摩擦係數(2.13)比在山芋葉上(1.15)大，表示**殼毛的水膜與姑婆芋葉上的水珠所產生之氫鍵可增加最大靜摩擦係數。**

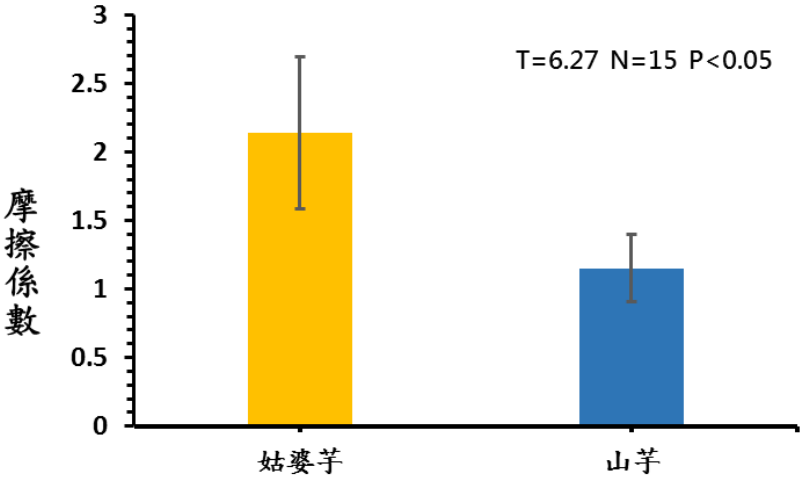


水分子黏附於**姑婆芋**葉面上	水分子無法附著在**山芋**葉面上

(圖三十三)殼毛吸水後在姑婆芋與山芋葉表面水膜形態的比較圖

(表六)殼毛在姑婆芋與山芋表面的最大靜摩擦係數大小比較

	最大靜摩擦係數	標準差	次數
姑婆芋	2.13	0.55	15
山芋	1.15	0.24	15

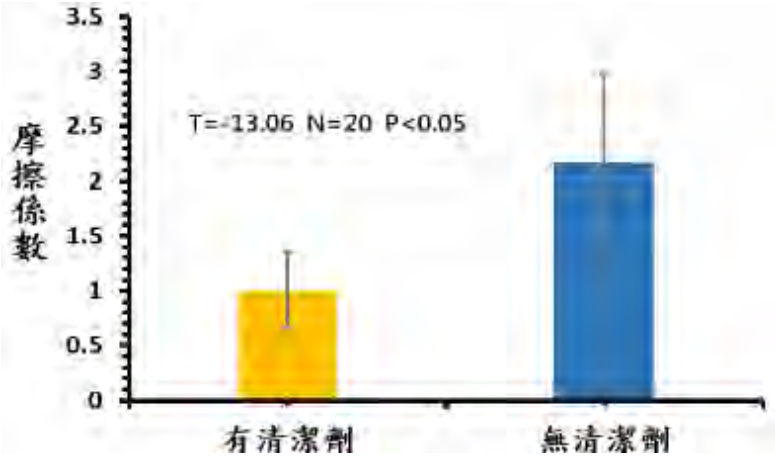


*P*值<0.05

(圖三十四)殼毛在姑婆芋與山芋葉表面的最大靜摩擦係數大小比較

由於清潔劑中介面活性劑的親水性來自極性基團與水分子的電性相互作用或是與之形成氫鍵，皆由非極性的疏水(親油)原子團與極性的親水基團組成，在很低濃度時能顯著降低水的氫鍵作用力；而從有、無清潔劑對殼毛的磨擦係數測量實驗結果裡也能發現，殼毛在沒有清潔劑的姑婆芋葉面測得的最大靜摩擦係數大於塗上清潔劑的姑婆芋葉面，此結果也說明**介面活性劑會破壞氫鍵的吸附作用會降低殼毛的摩擦力。**

(表七)姑婆芋葉上有無清潔劑最大靜摩擦係數大小比較			
	最大靜摩擦系數	標準差	次數
有清潔劑	1.00	0.34	15
無清潔劑	2.17	0.81	15



(圖三十五)殼毛在姑婆芋葉上，**有、無清潔劑**測量出的最大靜摩擦係數大小比較圖

以上兩種實驗均顯示在有氫鍵作用力的條件下，殼毛的最大靜摩擦係數較大，以物理的摩擦力公式($\mu s = \tan\theta$)得到，在此條件所產生之最大靜摩擦力較大，使物體能有更大的附著力以承受更大的下滑力。

陸、　討論

從前面研究結果可以得知蝸牛在停棲或少部分爬行時，殼會傾向特定方向傾斜(第三、四象限)，而其殼面便經常與其他物體表面接觸，那些部分(第三、四象限)也受到比較大的磨損，我們推測原因在於蝸牛有殼毛的會比沒有殼毛的殼皮能產生更大的摩擦力，特別是在潮濕環境。而摩擦力的產生使得蝸牛與其他物體表面產生較大的附著力以防止其滑落，另外在潮濕環境殼毛會產生水膜，我們認為其水膜會與葉面上的極性芬子形成氫鍵作用，幫助蝸牛增加附著力。

一、已發表之研究與本研究之比較

(一) 殼毛與潮濕環境的演化關係

在 Pfenninger M, Magnin F 等人在 2005 年時發表的論文〈Why do snails have hairs？〉中提到同一類群的蝸牛中，棲息於潮濕環境的蝸牛具有殼毛構造，而棲息於乾燥環境的蝸牛卻沒有。以主要針對之物種 *Tochulus* 來說，在假設蝸牛外殼層的蛋白質結構能在潮濕棲息地的運動的前提下，Pfenninger 等人的實驗調查結果顯示殼毛對濕表面的黏附性增加，當濕度百分比高時，蝸牛擁有殼毛即有助於其覓食期間將自身黏附至其生長環境之草本植物上。對於殼毛，在基因定序的過程裡，他們猜測殼毛為 *Tochulus* 屬蝸牛的祖徵，其中亦發現殼毛特徵曾在其演化過程中出現已獨立失去三次的現象，文獻裡留下些許尚未有後續發展的問題 — 究竟殼毛是否為祖徵抑或特殊演化後的表現特徵？如果是祖徵，那麼棲息於乾燥環境的 *Tochulus* 屬蝸牛沒有殼毛的原因是否起因於環境差異所造成的退化機制？

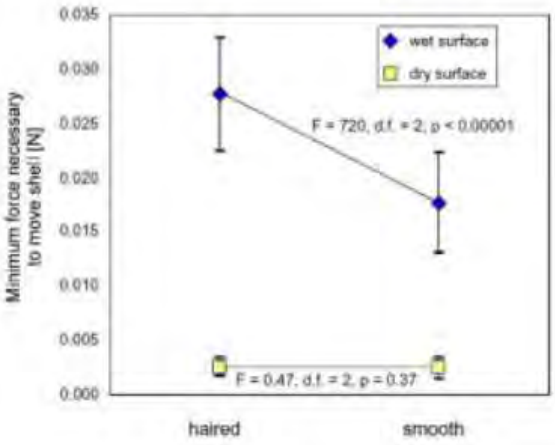
此文獻另外針對起初發現之同一類群蝸牛裡在不同環境的殼毛有無現象設計實驗，他們將 *Tochulus* 屬具有殼毛的蝸牛從潮濕環境移至相對乾燥的環境成長，結果顯示原本在潮濕環境具有殼毛構造的蝸牛個體，到了乾燥環境後殼毛特徵便逐漸消失。**此現象證明了時間和棲息地狀態的改變著實能改變一物種的特徵進而適應變遷的環境，因此他們更加確定了殼毛構造為 *Tochulus* 屬蝸牛祖徵的猜測**。而在物種演化史中，一個特徵可能獨立消失三次的情形也間接驗證了蝸牛殼毛可能在演化過程中的消失與出現(Pfenninger

et al. 2005)。另外從蝸牛的祖先，也就是生活在海中的螺貝類來看，許多螺貝類也具有殼毛特徵，顯示殼毛在蝸牛演化中屬於早期特徵。

藉由上述資料闡述，本研究物種—盾蝸牛屬的臺灣盾蝸牛，和與其不同科不同屬，屬於蛳蝸牛科蛳蝸牛屬的臺灣蛳蝸牛，牠們同樣生活在潮濕的環境中且同樣具有殼毛，加上發現臺灣盾蝸牛與臺灣蛳蝸牛整體外型相似度極高，進一步比照發現牠們皆經常出沒於岩縫處，推論出其極為相似的生活環境造就兩者相似的外型；其他在臺灣出現的蝸牛種類裡有殼毛的蝸牛他們生長的環境皆有一共通點，即為潮濕的環境。**因此我們推論，綜合外國文獻指出的種種結論與現象推測，有長殼毛的蝸牛會為了更容易生存在潮濕的環境，而保留殼毛這種構造，至於其他生存在較乾燥環境的蝸牛，會因不符合生物生存法則中的經濟效益，而退化掉殼毛。**對於其殼毛生長位置的不同，可以分成兩種: 密布全殼的與環繞殼緣一圈的生長模式，依照經濟效益的推論，那麼是否為退化程度不一造成的不同現象？***這個問題是我們未來要研究的方向。*

(二) 殼毛能增加與物體表面的附著力

在 Pfenninger M, Magnin F 等人在 2005 年時發表的論文〈Why do snails have hairs？〉中，除了分析蝸牛親緣關係與環境的分析外，另外在討論中提出殼毛具疏水性構造以幫助其在潮濕環境更容易減少與水表面的附著力進而有助於爬行，然而更進一步的研究結果與之相反。實驗顯示蝸牛殼毛在潮濕表面移動時需要較大的力，因為殼毛增加了與水表面的附著力，但此研究尚未解釋增加附著力的根本原因 (實驗結果如上頁圖所示)。



(圖三十六)〈Why do snails have hairs？〉

而本研究經由摩擦力實驗與殼毛氫鍵實驗，得出沾濕殼毛的摩擦係數較大，因此認為增加附著力的因素為附著於殼毛的水膜與棲息葉面產生氫鍵作用，而有較大的摩擦力。這個研究成果是以前的文獻所沒有提到的，是一項創新的假說證實。

二、殼毛功能與演化關連

在許多蝸牛圖鑑、文獻報導中，大部分提到蝸牛殼毛的功能以感覺、防禦與保濕三種的可能性，但是學界還未能十分定論殼毛確切的功能。本研究提出另一項全新的創見觀點，就是摩擦力假說。而我們初步的實驗結果是可以支持這個假說的成立，而且我們還從中想到一個更新的功能假說：摩擦保護假說。因此未來如果殼毛摩擦保護假說是正確的話，就可以去探討在臺灣同屬於扁蝸牛科，有殼毛的蝸牛與沒有殼毛蝸牛的演化適應問題：

1. 與臺灣盾蝸牛同屬的**薄鱗盾蝸牛**(*Aegista* impexa)，也同樣棲息在潮濕的環境下，**也具有殼毛**，其殼毛的功能是否與臺灣盾蝸牛相同？如果是，是不是可以從殼毛特徵來探討物種的演化適應？

   與臺灣盾蝸牛同屬的**臺灣大臍蝸牛**（*Aegista subchinensis*），也同樣棲息在潮濕的環境下，**但不具有殼毛**，其殼毛是退化？還是有不同的環境壓力造成沒有演化出殼毛？或者是臺灣大臍蝸牛的爬行方式與盾蝸牛或薄鱗盾蝸牛不同，沒有接觸到物體表面，因此不需要殼毛來保護殼面磨損？

http://sincethen.pixnet.net/album/photo/42871067	http://catalog.digitalarchives.tw/item/00/5f/d3/33.html
薄鱗盾蝸牛 *Aegista impexa*	台灣大臍蝸牛 *Aegista subchinensis*
(圖三十七)	

三、實驗研究討論

(一) 臺灣盾蝸牛棲地環境統計

我們發現到隨著棲息地的抬高，從地上到植物上再到岩壁上，蝸牛的殼寬有逐漸變小的趨勢。推測一是因為較大的蝸牛體型較大，在地面活動比起體型較小的盾蝸牛有較大的競爭力搶奪食物，使的較大的蝸牛需要到較高的環境生存，可能需要殼毛的某些幫助；

二是因為較大的蝸牛在較高的環境活動有較高的危險性，除了摔下來的力道可能會造成殼的破損，體型太大還可能會被天敵發現，因此較小的蝸牛可能因為體型較小較容易在較高的環境適應生存。

目前結果僅附上圖片與一些數據，未來將進行更完整的實驗，即將蝸牛固定在一區域內，此區域僅有一顆植物，經一段時間後觀察並測量蝸牛殼長與高度之間的關係並製成統計圖表。

(二) 臺灣盾蝸牛爬行行為觀察

我們將蝸牛放置在容易觀察的平台，像是桌子、姑婆芋葉面平面等。用相機拍照紀錄。經過爬行觀察後，我們發現蝸牛的行為有一定的模式。不管是蝸牛爬行時，還是休憩時，**殼毛的某一個部分會特別接觸到其生活環境，不管是摩擦還是支撐。而蝸牛在休眠時腹足收回殼內，僅以殼口所分泌的殼摩固定，很容易就會剝落，衰落地面造成受傷或死亡。因此我們推測殼毛有助於蝸牛在休眠時增加摩擦力使其較不容易滑落，增加其適應力。**

(三) 摩擦力假說探究實驗

1. 不同象限殼毛長度測量

經過爬行實驗，我們觀測到殼毛某一個特地區域會被觸碰到，因此我們決定將此結果做一個量化的處理。**分成四個象限**，幫助我們定義到底是哪一個區域最容易磨損。**實驗結果的數據顯示第三四象限的殼毛，相較一、二象限，有比較短的趨勢**

2. 不同殼層數殼毛密度測量

由於蝸牛的殼是一圈一圈，繞著殼緣生長，因此可以合理推論，**殼層數等於其年齡**。統計結果顯示，臺灣盾蝸牛的平均殼層數介於 5 到 8 之間，而且隨著蝸牛的年齡增長其殼的平均密度**有越老越稀疏的趨勢**。因此我們可以更進一步的證明殼毛的磨損高峰期在第三四象限。

3. 不同象限殼毛密度測量

(1) 不同傾斜角度坡面爬行觀察

經過蝸牛生活環境觀察後，發現其生活環境多變險峻。因此我們組裝了一個儀器，可以透過電腦程式控制其傾斜角度，模擬其生活環境。我們發現，不同的角度，**殼毛所接觸**

的地方有所不同，當傾斜角越大，重力所產生的摩擦力會因為角度越大，sinθ的值越大，所產生的力便越大，更助於其爬行時的便利性。

(2) 殼毛與殼皮的摩擦係數測量實驗

經過先前的實驗，我們推測在先前的文獻中提到的**附著力就是摩擦力**，因此我們不但欲測出具有殼毛這個構造會不會增加摩擦力，還要進一步的證明，**潮濕的環境下會比乾燥的環境，擁有更多的助力。**為了測出蝸牛有長毛和沒有毛時的差異，我們決定測其摩擦係數，因為在相同的重量下，物體之間的摩擦力會因為摩擦係數越大，所產生的力越大。經過實際測試之後，我們得到一個結論，**具有殼毛的蝸牛所產生的摩擦力相較於沒有殼毛的，具有更大的摩擦力；相較於在乾燥的環境下，在潮濕的環境下，殼毛和殼皮的摩擦係數有明顯的提升。**

4. 殼毛與殼皮顯微構造觀察

我們將蝸牛的殼毛做了兩個處理。一個是做成玻片，放在顯微鏡下觀察其細微構造，我們發現有一種特別的構造，我們推測可能是幫助增加其粗糙程度，也就是摩擦力。另一個處理就是直接放在解剖顯微鏡下，做整體構造的觀察，我們發現其殼皮也有和在玻片時觀察到的構造，有凸起的殼皮，我們推測應該也是增加摩擦力。

而在潮濕環境也可以看到殼毛表面會形成一層水膜，而水分子之間有氫鍵作用，我們推論，氫鍵也是影響蝸牛附著力的因素，因此才接著做殼毛氫鍵實驗。

5. 殼毛氫鍵實驗

水極性分子，**分子之間會產生氫鍵增加物體間的黏滯力，進而增加物體的摩擦係數。**

透過殼毛氫鍵實驗的結果來看，氫鍵的存在確實能增加殼毛在潮濕環境的附著力，這也解釋在姑婆芋實驗中，殼毛在潮濕環境的最大靜摩擦係數會遠大於殼皮的原因。

(四) 殼毛摩擦力效用對台灣盾蝸牛生存適應之影響

從野外考觀察中發現蝸牛腹足可以幫助其攀附在爬行表面上(圖三十八)，但是當牠處於休眠狀態時，腹足收回殼內，而殼口會形成殼膜附在其他物體表面上(圖三十九)，此時蝸牛殼容易因外力掉落，然而我們發現當蝸牛處於此種狀態時，蝸牛殼毛會接觸到物體

表面，我們推測此現象能幫助蝸牛附著於棲息表面，從最大靜摩擦力係數實驗得到的結果亦顯示殼毛在潮濕環境時產生的摩擦力比沒有殼毛的條件大，也就是有殼毛能產生更大的摩擦力。透過顯微觀察，我們認為潮濕環境中水的氫鍵也是增加摩擦力的因素，從氫鍵實驗裡也證實有氫鍵的存在確實增加了殼毛摩擦力，此種結果更解釋了文獻提出有殼毛的蝸牛大多棲息於潮濕環境的現象，因殼毛確實能幫助臺灣盾蝸牛適應。最後，我們探討殼大小與棲息高度之間的關係，發現臺灣盾蝸牛殼較小的個體通常棲息於較高的環境，而其殼毛也較完整，呈現出棲地越高，殼長越小，殼毛越完整的情形，此結果也表示殼毛能幫助台灣盾蝸牛適應較高的棲地。

(圖三十八)蝸牛腹足可吸附樹枝爬行	(圖三十九)蝸牛休眠時僅以殼膜附著在葉面上，殼毛會接觸葉面

柒、 結論

一、 蝸牛殼毛愈常與爬行表面接觸其磨損程度愈嚴重

由蝸牛爬行觀察及 Arduino 斜面儀器可知，臺灣盾蝸牛爬行時蝸牛殼常會傾斜至特定一處，通常向右側傾斜，表示最常與其他物體表面接觸的部分為三、四象限，因此第三、四象限也是最容易與接觸面產生摩擦進而磨損殼毛處。

而由四象限與殼毛長度與密度之關係中可以得出，第三、四象限的殼毛長度比其他象限短，且其密度明顯小於其他象限，表示第三、四象限的殼毛磨損程度最為嚴重。此結果與初始發現殼毛磨損最頻繁處與實際數據結果顯示相符合，總論證實出蝸牛殼毛愈常與爬行表面接觸其磨損程度就愈嚴重。

臺灣盾蝸牛殼層數大約為 5~8 層，可以表示殼層數 8 的蝸牛幾乎不能再繼續成長，而殼毛是殼生長的衍生物，因此殼毛在第 8 殼層便不會增加。殼層數與殼毛密度關係之結果表示具 8 殼層之台灣盾蝸牛殼毛數最少，表示當蝸牛殼層數不再增加時，殼毛會因為磨損等原因而逐漸消失，與前面所提之論點相符合。

二、 殼毛能增加摩擦力

由上述所得出之殼毛磨損，我們以物理學中摩擦力的概念量化其磨損程度。從殼毛最大靜摩擦係數之測定可知殼毛在潮濕環境能產生最大的摩擦係數，即能比沒有殼毛的條件下產生更大的摩擦力。而摩擦力的論點也可以上述結論印證—與其他物體表面越常接觸的部分，殼毛就會因為這之間產生的摩擦力造成磨損。綜上所述殼毛增加的摩擦力能增加蝸牛對爬行面的附著力，優勢在於較防止蝸牛滑落到地面，從覓食的葉面滑落至地上望往超過一公尺，對蝸牛來說此等距離會耗費許多能量再爬回原處，更可能在滑落後造成殼的破損，因此殼毛的存在對生活在潮濕環境的蝸牛來說是一大優勢。

三、 殼毛能提高台灣盾蝸牛之生存適應

當臺灣盾蝸牛在休眠靜止狀態時，其腹足縮回而無助於其在棲息環境中附著，僅存殼口分泌之透明薄膜的支撐，從研究中我們得出其殼毛在蝸牛靜止時會與所處表面接觸進而

藉由實驗推論出其增加摩擦力的效能，再以潮濕環境所觀察出的顯微現象中深入探討´證實出殼毛與水及葉面之間會產生氫鍵的吸引力，以此總論臺灣盾蝸牛之殼毛確實能增加其生存適應。而此適應效用體現於體型較小的台灣盾蝸牛個體較棲息於高度相對體型大的個體為高的地方，同時呼應到殼層數較少的蝸牛其殼毛密度較為完整，因殼層數少的蝸牛體型較小，為適應較高的棲息位置而利用殼毛增加附著力。

捌、　參考資料及其他

一、臺灣蝸牛圖鑑：謝柏娟、吳書平、蔡奇立 (民 102)。臺灣蝸牛圖鑑 Landsnails of Taiwan (三版一刷 ，中華民國一零二年十二月)。出版地點：行政院農業委員會林務局。

二、謝伯娟 (2004)。蝸牛不思議：21 個不可思議主題&100 種台灣蝸牛圖鑑(2004 年 11 月 1 日初版一刷)。出版地點：遠流出版社。

三、臺北市立建國高級中學學生：周承蔚、蔡博倫、謝秉翰，指導老師: 童禕珊。〈蝸牛〉小論文。

四、Markus Pfenninger. , Magda Hrabáková. , Dirk Steinke ＆ Aline Dèpraz. (2005). Why do snails have hairs? A Bayesian inference of character evolution. BMC Evolutionary Biology (5:59)

五、KHAN Academy website。Biology: https://www.khanacademy.org/

六、科學 online 高瞻自然科學教學資源平臺: http://highscope.ch.ntu.edu.tw/

七、陳溫其編譯，三雲次郎原著，”肥皂與合成清潔劑”，民國五十一年七月初版，臺灣區肥皂工業同業公會。

八、趙承琛。”界面科學基礎”(民國八十八年二月十八版)。出版地點；復文書局。

【評語】052007

本研究分析蝸牛殼毛功能，發現爬行時愈常與表面接觸的部位殼毛較短，密度較小，檢測殼毛接觸面產生摩擦而造成磨損，同時發現潮濕的殼毛具較大之摩擦力，其摩擦力在水中加入界面活性劑破壞氫鍵或蠟質結構葉表面，則摩擦力變小，顯示殼毛吸水後，用氫鍵吸引力增加摩擦力，且殼長較小且殼毛較完整者棲息較高的環境，本研究觀察詳實。研究動機起於在野外自然生態觀察而啟發，在蝸牛附著力相關的研究中屬於較新穎性之領域。實驗設計與操作符合邏輯且用心細膩；統計方法適合正確含有標準差，t-test。建議作者可以進一步思考與討論，殼毛提供的摩擦力是否一定為提供蝸牛生存的優勢，因為摩擦力大造成爬行的阻力亦同樣變大。整體而言作品結構相當完整，數據結果可證明假設，屬於傑出有創造力之科展作品。

作品海報

壹、研究動機

扁蝸牛科中的**臺灣盾蝸牛**(*Aegista mackensii*)殼型為盾狀，且殼緣上長著一圈毛狀的構造，稱之為「**殼毛**」。殼毛由硬蛋白組成，為殼皮的一部分 (臺灣蝸牛圖鑑，吳書平，2013) 。而具有殼毛的蝸牛在全世界都有分佈，在臺灣有殼毛的蝸牛種類約有2屬8種。關於殼毛功能的假說主要有三點：**感覺**、**防禦**、**保濕**，但至今還沒有明確的定論(蝸牛不思議，謝伯娟，2013) 。有文獻指出有殼毛的蝸牛多棲息潮濕環境，**推測殼毛的功能該是有助於蝸牛在潮濕環境下生存**(Pfenninger *et al.*, 2005) ，由於科學界對於殼毛功能尚未有一致性見解，因此我們進行以下**殼毛功能研究**。

貳、研究假說

殼毛會增加「**摩擦力**」，幫助蝸牛停棲在潮濕的表面，減少下滑力，增加其生存適應能力。

參、研究內容

台灣盾蝸牛殼毛功能探究實驗

- 野外生態行為實驗
  - 爬行行為觀察
  - 棲息高度調查
- 摩擦力假說驗證實驗
  - 殼毛的生長形態測量
  - 最大靜摩擦係數測量
- 水附著作用驗證實驗
  - 殼毛微構造研究
  - 氫鍵附著力研究

一.野外生態行為實驗

(一)棲息高度調查

結果與討論

1.體型較小的**幼體**多停棲在較高植物或岩壁上
2.體型較大的**成體**經常發現在地面活動或休眠

→幼體與成體盾蝸牛有著不同的生態棲位

(二)爬行行為觀察

結果與討論

盾蝸牛在停棲不動或在垂直面爬行時殼面常會往爬行方向的右側旋轉傾斜

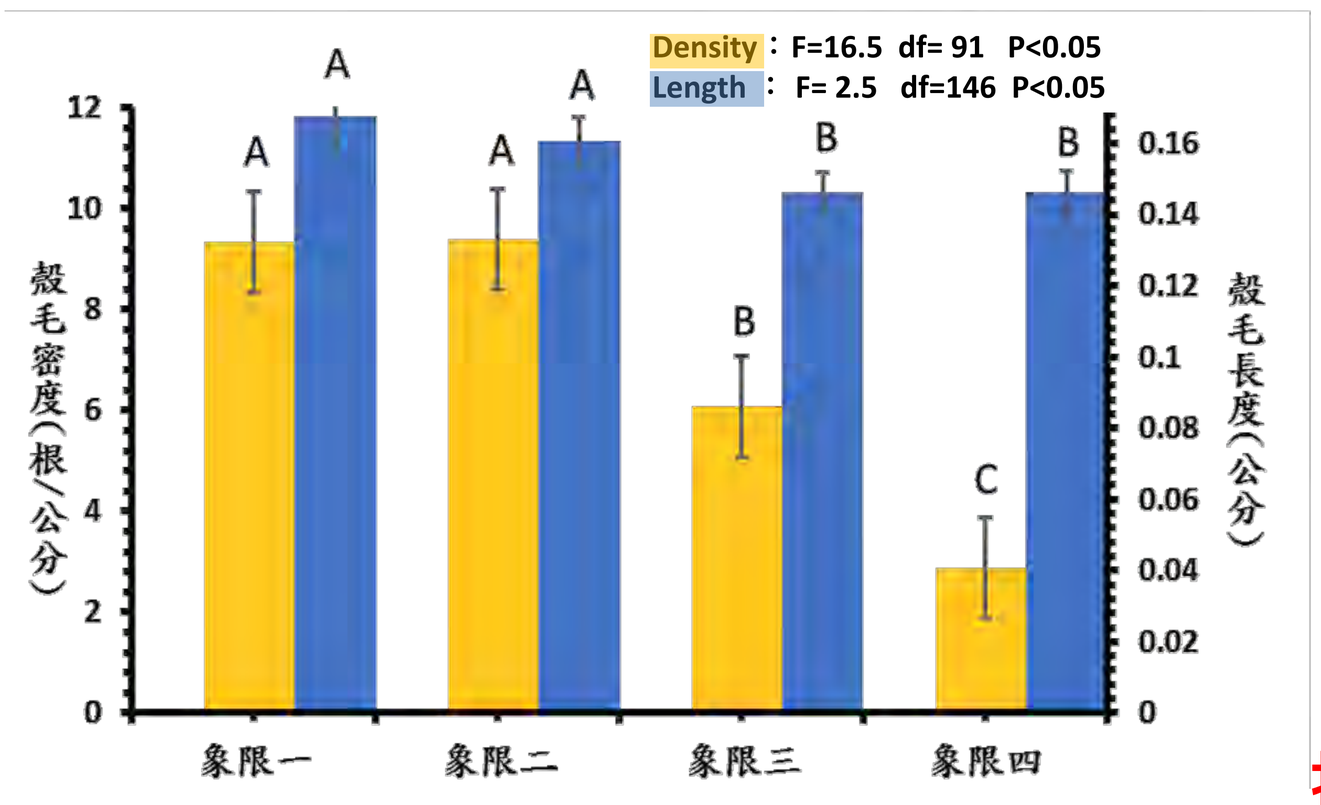
→接近殼口的殼毛較其他稀疏

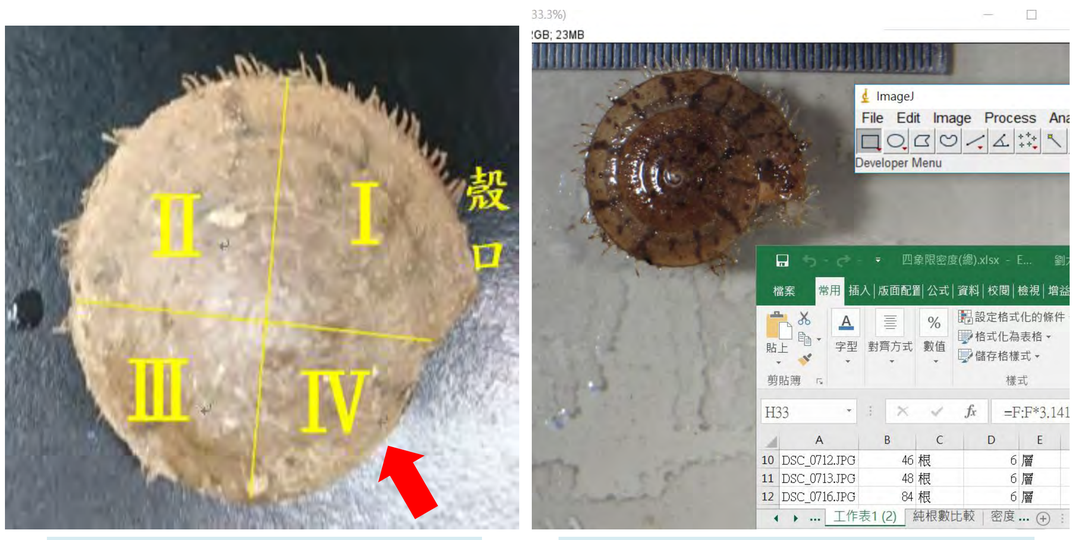
→特定部位經常與爬行面摩擦

二.摩擦力假說驗證實驗

(一)殼毛的生長形態測量

1.不同部位殼毛長度與密度測量

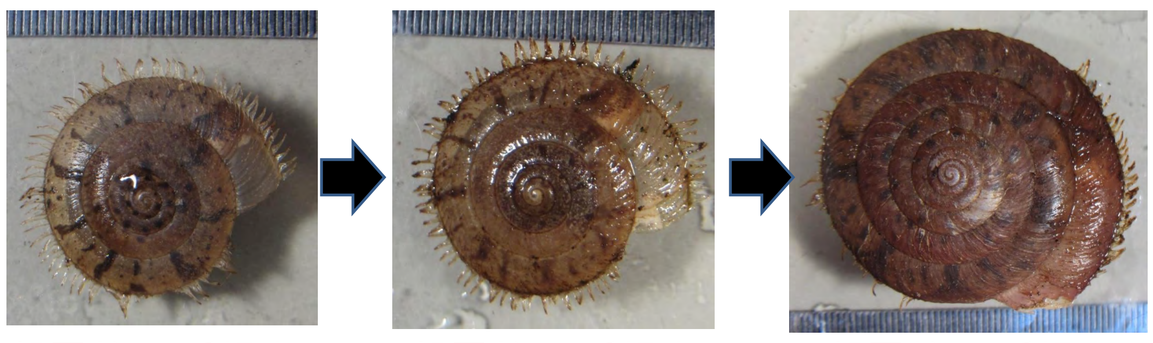




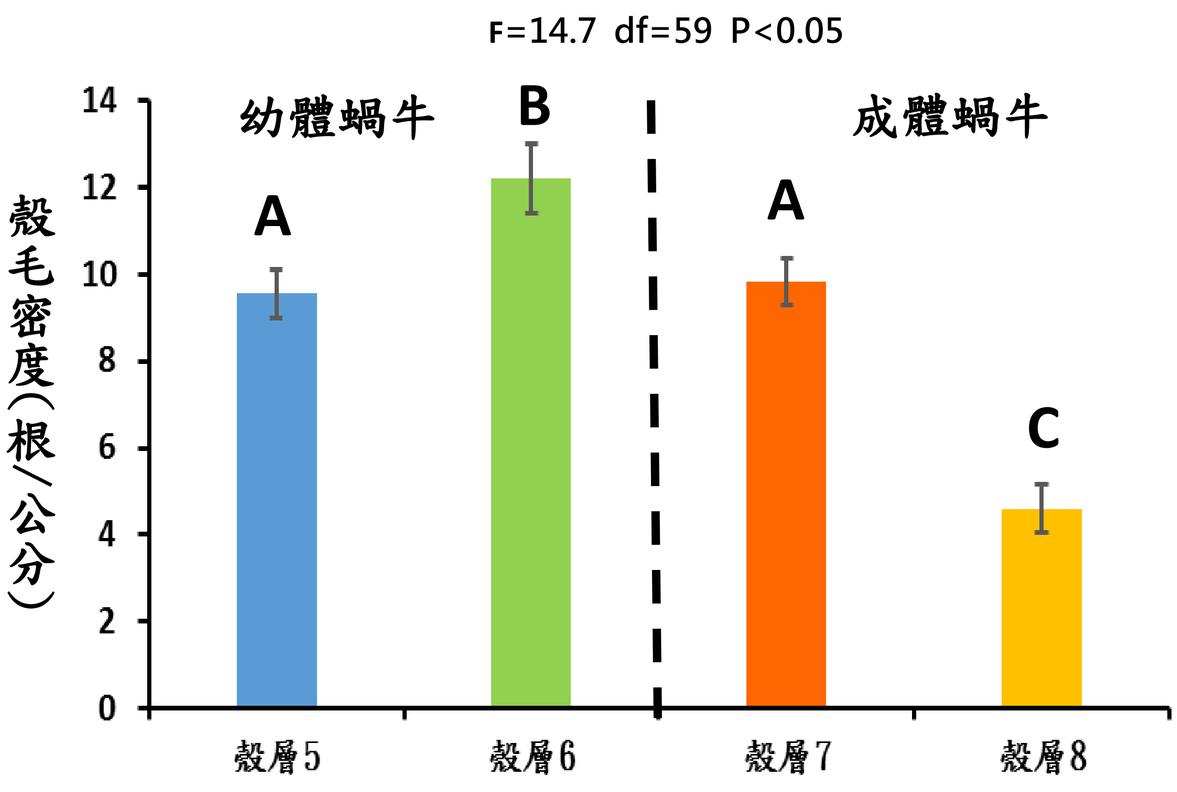
殼毛長度	殼毛密度
象限四最短	象限四最低
Ⅳ＜Ⅲ＜Ⅰ,Ⅱ	Ⅳ＜Ⅲ＜Ⅰ,Ⅱ

接觸面的殼毛確實有功用而被磨損

2.不同殼層數(年齡)殼毛密度測量



殼層數 5 盾蝸牛　殼層數 6 盾蝸牛　殼層數 7 盾蝸牛



結果與討論

1.蝸牛成長階段，外殼會一層一層螺旋增加
2.體型越大殼層數越多，直至成體不再增加

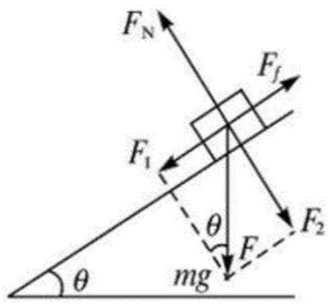
→成體蝸牛殼毛密度較低於幼體蝸牛

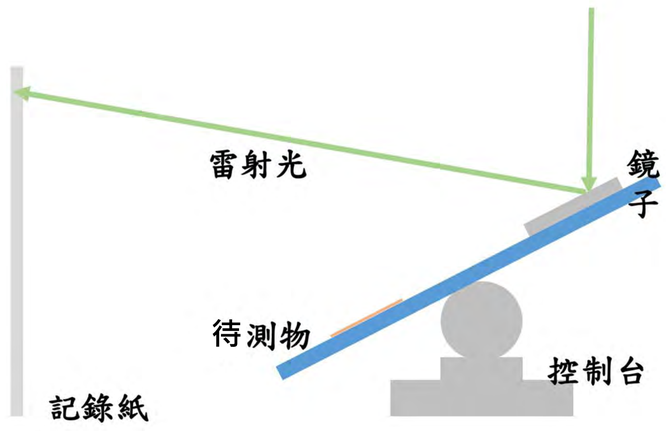
(二) 最大靜摩擦係數測量

公式推導摩擦係數量值為tanθ

在相同重量下，摩擦係數越大

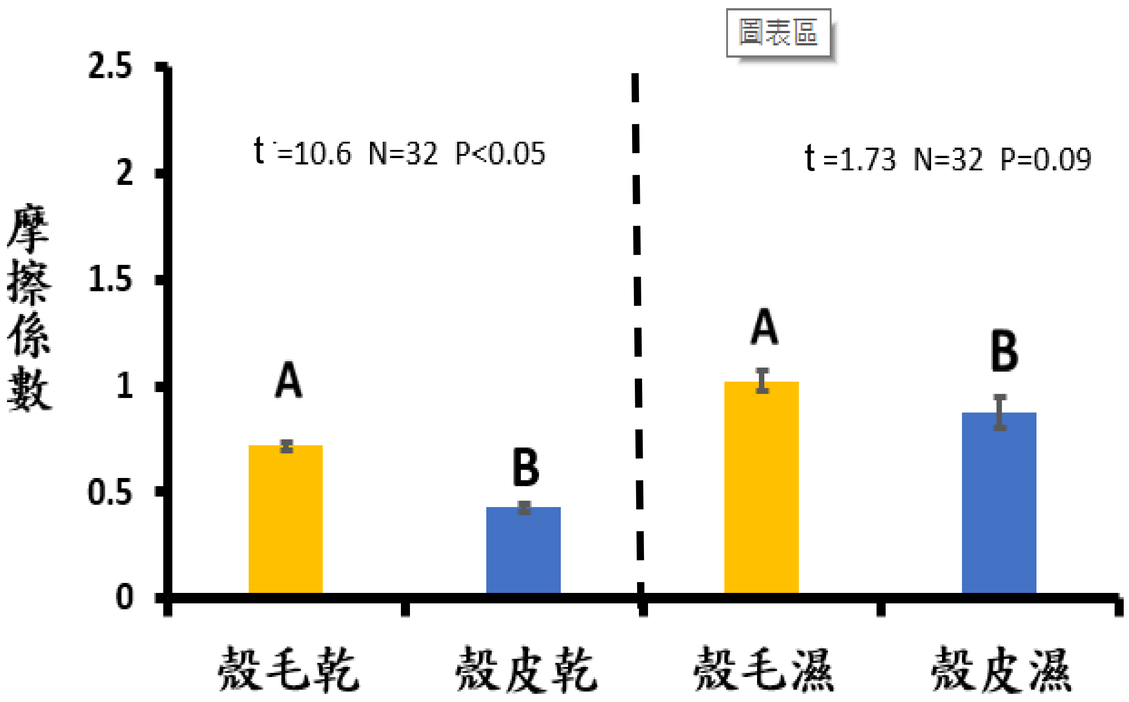
→摩擦力越大→物體越難下滑



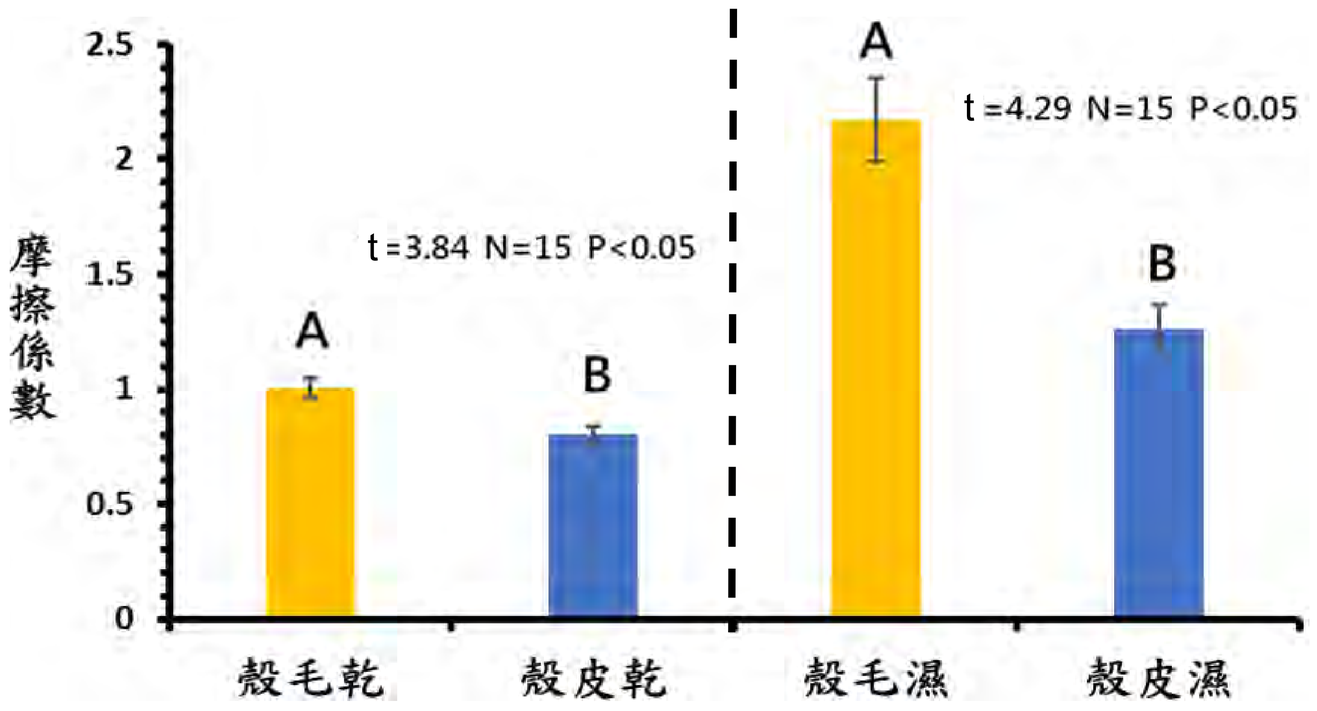


殼毛(實驗組)

殼皮(對照組)



壓克力板(疏水性表面) 最大靜摩擦係數比較



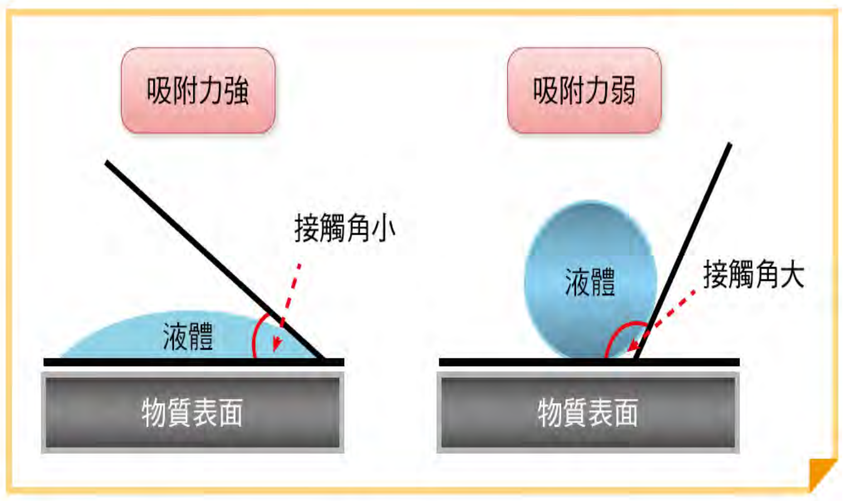
姑婆芋葉(親水性表面) 最大靜摩擦係數比較

結果與討論

1.「殼毛」在壓克力板或姑婆芋葉上，在潮濕或乾燥環境下，tanθ值都較大→最大靜摩擦係數都大於「殼皮」(對照組)

2.最大靜摩擦力等於其係數乘上物體正向力 ($fs_{max}=\mu s \cdot N$)
當物體重量一樣時，摩擦係數越大，則摩擦力越大
→蝸牛殼演化出殼毛構造，能增加更大的摩擦力

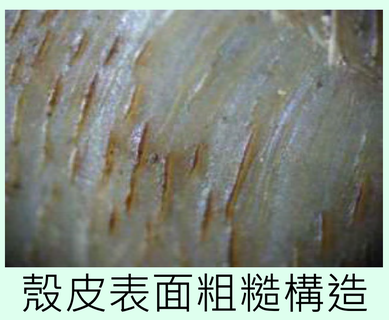
圖片引用來源：科學研習月刊，2013 年1 月，No. 52-1



親水性表面 疏水性表面

三.水附著作用驗證實驗

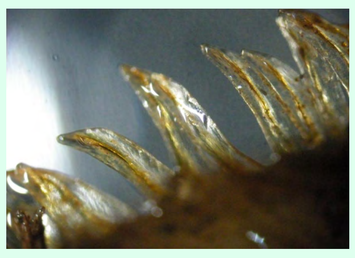
(一)殼毛的顯微構造研究



殼皮表面粗糙構造

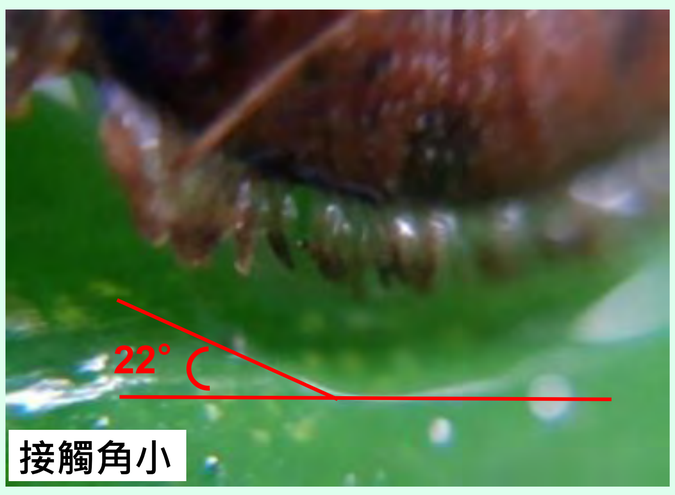
殼毛表面粗糙構造

殼毛殼皮乾燥狀態

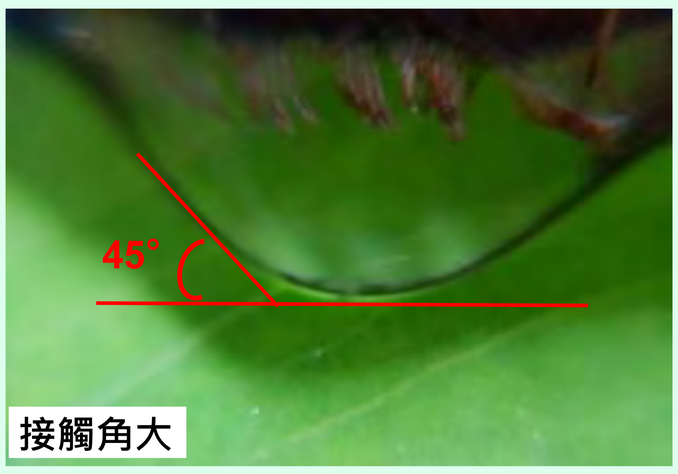


殼毛容易吸附水分

殼毛為蛋白質，極性分子
水吸附在殼毛後形成水膜



水膜因殼面傾斜附著姑婆芋葉面

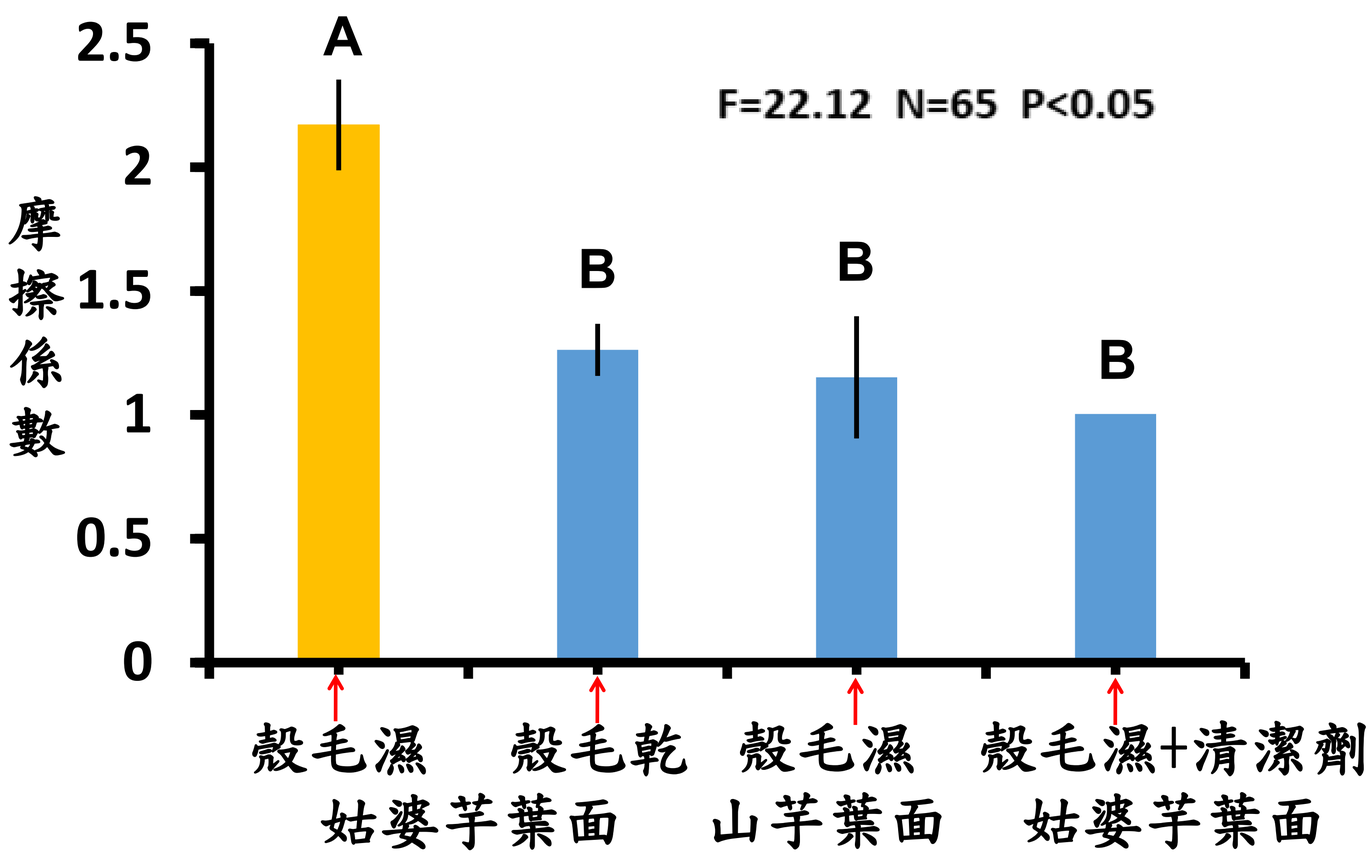


水膜因蓮葉效應難以附著山芋葉面

結果與討論

1.殼毛具粗糙紋路突起，潮濕環境殼毛突出殼皮較容易吸附水
2.水是極性分子，具氫鍵，水分子會因表面張力作用形成水膜

(二)氫鍵附著力作用研究



結果與討論

1.殼毛摩擦係數在山芋與乾燥婆芋相似
→山芋葉表面微小的疏水性蠟質結構
→使濕殼毛較難附著於山芋葉表面

2.加入清潔劑後，殼毛在潮濕姑婆芋葉面的摩擦係數下降至乾燥姑婆芋葉面相似
→清潔劑中含非離子性界面活性劑
→含許多氧原子，可以和水形成氫鍵
→使濕殼毛較難附著於姑婆芋葉表面

肆、結果討論

一.殼毛功能與生存適應

(一)共價鍵：氫鍵：凡得瓦爾力 的強度大小

100：10：1 →**濕殼毛摩擦力增加的原理**

1.水為極性分子，分子之間會產生氫鍵增加物體間的黏滯力，進而增加物體摩擦係數

2.**最大靜摩擦力**等於其係數乘上物體正向力(fs max =μs•N)，可知當物體重量固定時最大靜摩擦係數越大，越不容易下滑移動

(二)殼寬(齡)越大的蝸牛會棲息在較低的棲地

→**殼毛長度與密度對靜摩擦係數之影響**

(三)殼毛增加摩擦力有助於在休眠時附著葉面

→蝸牛休眠時在殼口形成殼膜封住殼口

→殼毛使蝸牛不容易滑落，增加適應力

同一棵樹上不同高度棲息盾蝸牛體型差異

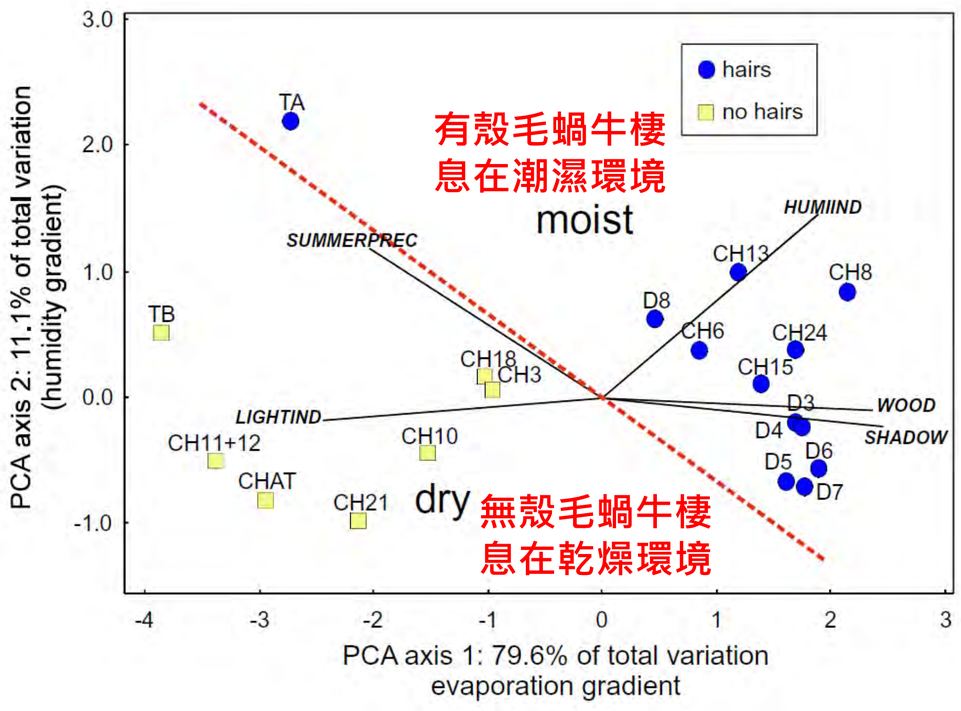
殼齡大的盾蝸牛
殼毛較短且稀疏
棲息地高度較低

殼齡小的盾蝸牛
殼毛較長且濃密
棲息地高度較高

休眠時腹足縮入殼內

移動時以腹足爬行

圖片引用來源：BMC Evolutionary Biology 2005, **5**:59



二.殼毛功能與演化關聯

(一)殼毛在濕表面的附著性增加

1.殼毛特徵曾在其演化過程中，出現後又獨立失去三次

2.殼毛特徵 →祖徵? 特殊演化特徵? 之前未有定論

(二)*Trochulus* 屬蝸牛環境遷移實驗

1.潮溼與乾燥環境之演化差異

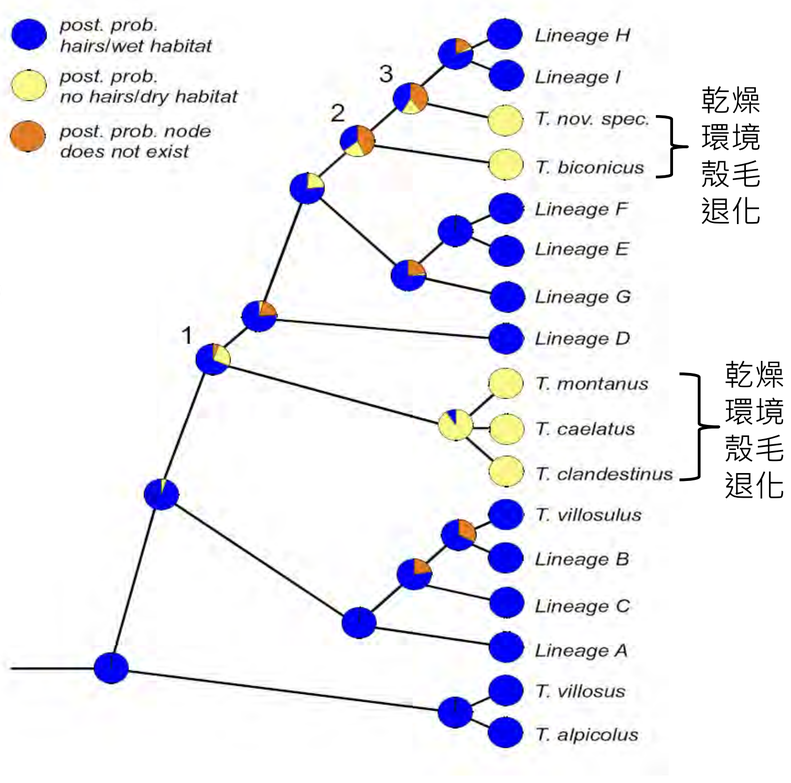
(1)有殼毛的蝸牛被移動到乾燥環境中棲息生存

→不符合生存法則中的經濟效益而退化殼毛

(2)有殼毛的蝸牛為更容易生存在潮濕環境

→保留殼毛特徵

2.時間與棲地能改變物種特徵進而適應環境 →**殼毛為「祖徵」**



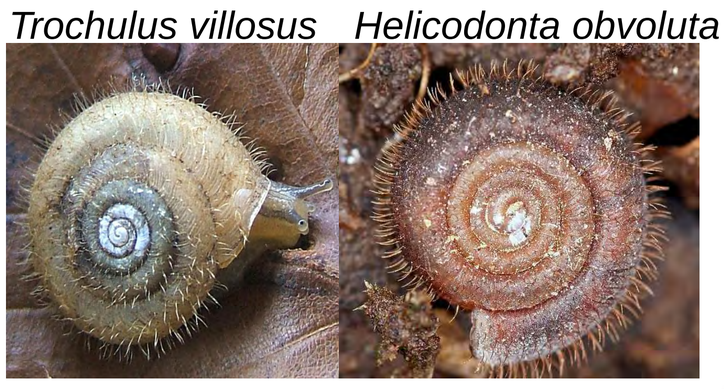
(三)不同蝸牛殼毛生長位置差異

1.*Trochulus*、*Helicodonta* 屬蝸牛:整個殼面佈滿殼毛

2.盾蝸牛*Aegista*屬：殼毛只在殼緣

→**殼毛功能上的異同？**

Trochulus villosus *Helicodonta obvoluta*



(四)台灣地區蝸牛殼毛功能與演化研究

1.扁蝸牛科*Aegista*屬的其他種蝸牛

→生活在相似潮濕環境

→**有殼毛與無殼毛之演化適應?**

2.蝸蝸牛科蝸蝸牛屬

→生活在相似潮濕環境

→扁平殼型與殼毛分佈相似度極高

→**殼毛功能上的異同？**

扁蝸牛科　　蝸蝸牛科

台灣盾蝸牛 有殼毛

薄鱗盾蝸牛 有殼毛

臺灣大臍蝸牛 **無殼毛**

臺灣蝸蝸牛 有殼毛

伍、參考文獻

1. 謝柏娟、吳書平、蔡奇立，2013。臺灣蝸牛圖鑑，遠流出版社。
2. 謝伯娟，2013。蝸牛不思議：21個不可思議主題&100種台灣蝸牛圖鑑。遠流出版社。
3. 蕭蓉禎、邱垂生、溫育德，2013。生物表面的奈米現象。科學研習｜ 2013 年1 月，No. 52-1：8-13。
4. Markus Pfenninger, Magda Hrabáková, Dirk Steinke and Aline Dèpraz. 2005. Why do snails have hairs? A Bayesian inference of character evolution. BMC Evolutionary Biology 2005, 5:59.
5. You et., al. 2014. Diversity of the snail-eating snakes Pareas (Serpentes, Pareatidae) from Taiwan. Supplementary Information Chung-Wei You Nikolay Poyarkov Si-Min Lin.

陸、研究結論

1. 大、小盾蝸牛有著不同的生態棲位
2. 接觸面的殼毛確實有功用而被磨損
3. 殼毛能產生更大摩擦力附著在葉面
4. 水膜因氫鍵附著力作用增加摩擦力

柒、研究展望

本研究解決殼毛功能未定論的困境，提出新的「摩擦力假說觀點」，野外測量與驗證實驗支持假說的成立，確認盾蝸牛在潮濕環境下殼毛構造能提供更大的附著力，增加在較高傾斜棲地生存適應力。未來我們的實驗成果可以延伸至不同型態的殼毛和環境與演化適應的研究。