中華民國第54屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組　生物科

030315

收放自如－蝸牛腹足構造與運動功能的分析

學校名稱：臺中市立居仁國民中學

作者：	指導老師：
國二 蔡丞玟 國二 簡言庭 國二 鄭涴議	蔡明致

關鍵詞：腹足、皺褶、黏滯力

摘　要

本研究以六層殼高的成體非洲大蝸牛為研究對象，觀察蝸牛的背脊、足腹及足緣等構造，並進行顯微切片。並以吸盤及 PVA 膠水模擬蝸牛的腹足與黏液，測試腹足形狀、皺摺、纖毛及黏液黏滯力對載重量與運動速率的影響。

結果顯示：蝸牛能在粗糙面爬行是以**黏液黏附力、足腹各皺褶的空腔吸力**及**足緣形成肉爪攀附力**為主；在光滑平面則以背脊中海綿體膨壓的支撐力以及藉足腹各個皺褶調整負壓吸附力方便移動為主。爬行時腹足內部的波動則是在海綿體中藉由黏液的擠壓產生向前膨脹伸長腹足而產生移動，並藉黏滯性降低下滑速率，因此可減少往上爬行過程體液向下流動的能量消耗。而向下爬行則會加速下滑易失去平衡，所以這應是**蝸牛具有向上爬行趨性的主要原因**。

壹、 研究動機

在一年級生物課中介紹蝸牛這種特殊的腹足吸盤，它不只能夠吸附在光滑平面，甚至連塑膠吸盤無法吸附的粗糙面、網狀面或是鐵絲上都能爬行，它的腹足運動引起我們的好奇。在自然界中，大部分具有吸盤的生物，運動過程吸盤要能隨時調整吸附與脫離。而且就分類及演化順序而言，腹足綱是軟體動物中最高等的一類〔1〕，它們所具備的肌肉組織，能產生吸附與輕易脫離。由於在日常生活中，吸盤的應用十分廣泛，從牆壁掛勾到爬壁機器人都有。因此，所以我們以庭院中常見的非洲大蝸牛為題材，探討蝸牛腹足的結構與其吸附力，希望提供未來在仿生學上的應用。

貳、 研究目的

一、 非洲大蝸牛腹足運動相關構造與運動功能的分析。

二、 非洲大蝸牛腹足運動相關構造與運動功能的模擬。

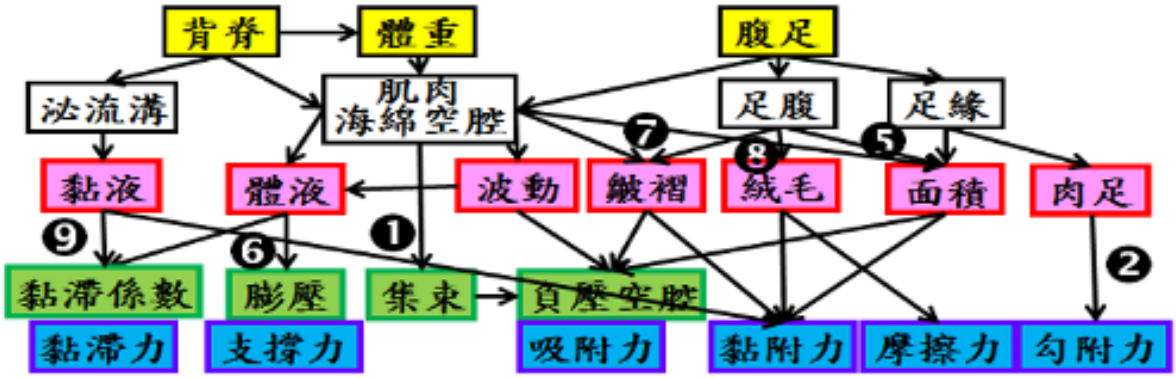


圖1、研究架構

參、 研究設備及器材

成體蝸牛(六層殼高)、解剖顯微鏡、電子天平、數位相機及腳架、600*mℓ* 及 4*ℓ* 寶特瓶、棉繩、壓克力板、30*30cm 磁磚、塑膠吸盤(直徑 45mm、φ30mm、φ27mm)、強力吸盤(有蓋，直徑 50mm)、PVA(聚乙烯醇$(C_2H_4O)_x$)、硼酸鈉($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$，又稱硼砂)、砂紙(#600、#800、#1000、#1200、#1500、#2000、#3000)、漏斗、量筒、乒乓球、鋁軌、腳架、筆記型電腦、Cool edit 錄音程式。

肆、 研究方法

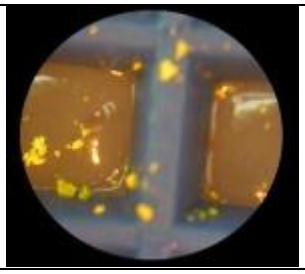
一、 非洲大蝸牛腹足運動相關構造與運動功能的分析。

(一) 背脊與腹足形態構造及爬行運動過程的觀察：

1. 以解剖顯微鏡及數位相機觀察並拍攝蝸牛背脊與腹足構造，記錄在爬行與負重時背脊與腹足的變化，分析蝸牛的背脊與腹足在運動過程中各部位構造的變化。

圖 2、非洲大蝸牛背部形態的觀察	圖 3、非洲大蝸牛腹足構造的觀察

2. 以解剖顯微鏡及數位相機觀察並拍攝蝸牛在透明投影片及 5×5mm 塑膠網格上爬行，記錄蝸牛在運動過程中，黏液、腹足足腹與足緣的變化。

	
圖 4、蝸牛在透明投影片上爬行的觀察	圖 5、蝸牛在 5×5mm 塑膠網格上爬行的觀察

(二) 非洲大蝸牛腹足組織構造顯微切片的觀察：

先將蝸牛腹足的頭腹段進行石蠟切片，並以常規 H.E 染色(蘇木精-伊紅染色)，再以顯微鏡放大(40×、100×、600×)拍攝蝸牛腹足中與運動相關的組織構造及功能。

圖 6、非洲大蝸牛腹足石蠟標本(橫切)	圖 7、非洲大蝸牛腹足切片(橫切，H.E 染色)
圖 8、蝸牛腹足石蠟標本(鉛直縱切)	圖 9、蝸牛腹足切片(鉛直縱切，H.E 染色)

(三)　在不同粗糙平面對成體蝸牛切向吸附力的影響：

1.為了瞭解蝸牛腹足在不同平面上(光滑磁磚及不同號數砂紙) 的最大切向吸附力，先讓蝸牛吸附於接觸面，並在蝸殼上吊掛 4L 寶特瓶，接觸面以水平放置。

2.以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。

3.依序測量蝸牛腹足在粗造平面與光滑平面的最大切向吸附力。

(四)　成體蝸牛**腹足面積**對**切向吸附力**的影響：

1.為了瞭解蝸牛在光滑平面上運動過程，腹足面積與切向吸附力的關係，先讓蝸牛吸附光滑磁磚上，接觸面以水平方式固定。

2.蝸牛爬行時，在蝸殼上吊掛 600ml 寶特瓶，並等速灌注不同重量自來水以提供載重。

3.以相機照相並測量在不同載重(切向吸附力)的狀態下，腹足面積的變化。

(五)　成體蝸牛腹足的**頭尾及兩側位置**對**切向吸附力**的影響：

1.為了瞭解蝸牛在光滑平面上運動過程，腹足的切向吸附力是否具**方向性差異**(**前後**及**左右**)，先讓蝸牛吸附在光滑壓克力板上，接觸面以水平方式固定。

2.於蝸牛爬行至另一片可滑動的壓克力板時(依序爬行至 1、2、3、4、5、6、7cm 處)以及在兩片壓克力板交界處爬行時，在該可滑動壓克力板上拖吊容積 1L 的空寶特瓶，以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重拖拉可滑動的壓克力板。

3.測量在運動過程頭尾不同位置及左右方向拖拉時的切向吸附力。

(六)　成體蝸牛足緣構造對**吸附力**及**切向吸附力**的影響：

1.梯架間距對蝸牛最大切向吸附力的影響

(1)為了分析足腹與足緣肉爪數量在爬行過程的施力影響程度，將成體蝸牛(6 層殼高)吸附於不同間距(2、4、7、10、15mm)的鐵絲梯架上。

(2)將蝸牛吸附於水平固定的鐵絲梯架，並在蝸殼吊一寶特瓶，以固定流速的水管(水流流速 = 1123.6 ***ml/min***)灌注寶特瓶，測量蝸牛的最大切向吸附力。

圖 10、成體蝸牛	圖 11、成體蝸牛在砂紙上的切向吸附力測量	圖 12、成體蝸牛在鐵絲梯架及瓦楞板梯架爬行

2.腹足吸附面積對切向吸附力的影響。

(1)為了比較腹足吸附面積與肉爪數量對切向吸附力的影響程度。

(2)固定腹足橫跨 3 個梯數形成 3 個肉爪，梯面積寬度依序為 3、5、9、12、15mm。

(3)將蝸牛吸附於水平固定的塑膠瓦楞板梯架上，並在蝸殼上吊掛寶特瓶，以固定流速的水

管(水流流速=1123.6 ***ml/min***)灌注寶特瓶，測量蝸牛的最大切向吸附力。

二、　非洲大蝸牛腹足運動相關構造與運動功能的模擬：

(一)吸盤面積對吸盤**吸附力**的影響：

1. 將直徑 4.7cm 之圓形吸盤以不同長寬比（固定長度 4.7cm，寬度改為 4.7cm 、4.5cm 、4.0cm 、3.5cm 、3.0cm 、2.5cm 、2.0cm ）剪裁吸盤，吸盤下方吊掛 4L 空寶特瓶，接觸面以鉛直及水平倒掛方式依序測量吸附力與切向吸附力。
2. 以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。
3. 測量吸盤在不同吸盤面積的最大吸附力。

(二)吸盤皺摺對吸盤**吸附力**的影響：

1. 直徑 47cm 寬 3.5cm 圓形吸盤，以雕刻刀刻劃數量逐漸增加的 2cm 縱線及 0.5cm 橫線。
2. 具刻痕的吸盤下方吊掛 4L 空寶特瓶，接觸面以鉛直及水平倒掛方式依序測量吸附力與切向吸附力。
3. 以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。
4. 測量吸盤在不同刻劃長度及刻劃方向的最大吸附力。

(三)黏液濃度對吸盤**吸附力**及**切向吸附力**的影響：

1.由於蝸牛爬行過程不斷往頭部分泌黏液，因此推測黏液應可協助蝸牛在爬行過程的吸附力。為了瞭解黏液濃度對蝸牛腹足吸附力的影響，依序倒入 1ml 純水及不同濃度之 PVA 膠水(10%、9%、8%、7%、6%、5%、4%、3%、2%、1%)在直徑 27mm 之圓形吸盤上，並將吸盤吸附在不同粗糙程度的平面上(光滑磁磚、不同號數砂紙) 並與塗抹蝸牛黏液的吸盤作比吸盤吸力是否受到黏液的影響。

2.在直徑 27mm 之圓形吸盤下方吊掛 4L 空寶特瓶，接觸面以鉛直及水平倒掛方式依序測量吸附力與切向吸附力。

3.以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。

4.測量吸盤在不同粗糙程度平面的最大吸附力與切向吸附力。

5.比較乾燥、純水、蝸牛黏液、不同濃度 PVA 膠水對吸盤吸附力與切向吸附力的影響。

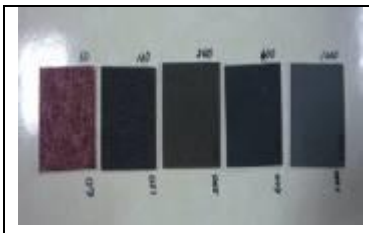


圖 13、光滑磁磚 及不同號數砂紙	圖 14、塑膠吸盤(27mm) 吸附於砂紙	圖 15、吸盤吊掛保特瓶 灌水掛重

(四)背脊對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：

1.背脊支撐面積對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：

(1) 為分析蝸牛背脊寬度與腹足寬度比例對吸附力與切向吸附力的影響，利用有背蓋之強力塑膠吸盤模擬蝸牛背脊與腹足。(比值 0.4、 0.6、 0.76、 0.8、 1.0，如圖 18)

(2) 取直徑 25mm 強力塑膠吸盤，將背蓋裁成直徑不同大小的圓盤，固定在強力塑膠吸盤腹面當成腹蓋，並以螺絲固定，方便載重時模仿背脊內部肌肉層的支撐面積。(如圖 17)
(3) 將改造的吸盤吸附在磁磚平面，並依序以水平拖拉及鉛直倒掛方式吊掛一保特空瓶，以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。測量吸盤在不同支撐位置的最大吸附力與切向吸附力。比較吸盤支撐面積對吸附力與切向吸附力的影響。

2. 背脊支撐位置對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：
(1) 為分析蝸牛背脊肌肉層分布位置對吸附力與切向吸附力的影響。
(2) 取直徑 25mm 有背蓋的強力塑膠吸盤，將背蓋裁成直徑不同大小的圓盤，附蓋在強力吸盤的背面，並以吸盤固定架固定圓盤，方便載重時模仿背脊肌肉層的支撐點位置。
(3) 將改造的吸盤吸附的磁磚平面以水平拖拉及鉛直倒掛方式吊掛一保特空瓶，以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。測量吸盤在不同支撐位置的最大吸附力與切向吸附力。比較吸盤的支撐位置對吸附力與切向吸附力的影響。

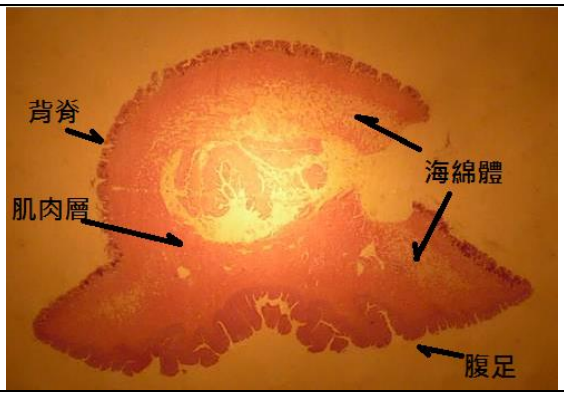


圖 16、蝸牛背脊肌肉層顯微切片(40× H.E 染色)

圖 17、不同腹蓋大小的強力吸盤

圖 18、不同背蓋大小的強力吸盤

1. 腹足面積對吸附力的影響：
(1) 取直徑 47mm 塑膠吸盤，將背蓋裁成長寬比值不同大小的圓盤。
(2) 將改造的吸盤吸附在磁磚平面，並依序以水平拖拉及鉛直倒掛方式吊掛一保特空瓶，以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。測量吸盤在不同支撐位置的最大吸附力。

（五）足緣絨毛組織對吸附力及切向吸附力的影響：

(1) 為分析蝸牛腹足底部表皮細胞絨毛分布面積對吸附力與切向吸附力的影響。

(2) 取直徑 45mm 的塑膠吸盤，將貼紙裁成直徑不同大小(8、15、20、25、30、35、40mm) 貼在圓盤，以#120 的砂紙，將吸盤連同貼紙一起打磨，使吸盤在貼紙以外區域磨砂變成粗糙，藉以模仿蝸牛腹足腹面的表皮層有絨毛的分部。(如圖)

(3) 將改造的吸盤滴加 3mlPVA 膠水，並吸附在磁磚平面，以水平拖拉及鉛直倒掛方式吊掛一保特空瓶，以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。測量不同磨砂面積對吸盤最大吸附力與切向吸附力的影響。比較腹足絨毛分布面積對吸附力與切向吸附力的影響。

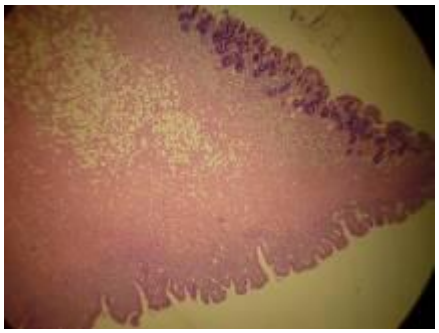
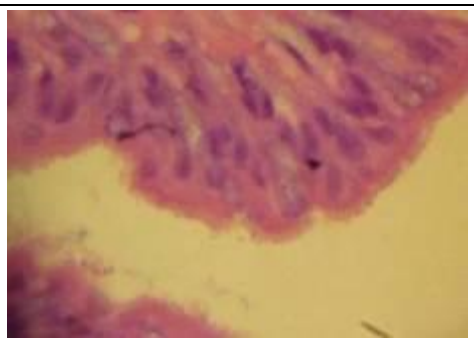
	

圖 19、腹足腹面皺摺	圖 20、腹足腹面皺摺上皮細胞的絨毛構造

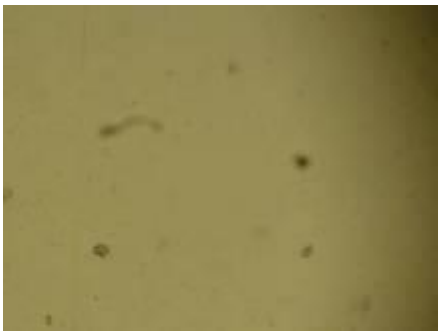
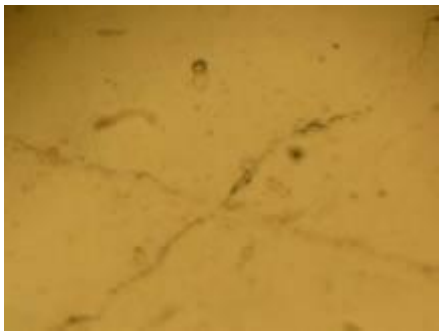

	

圖 20、光滑吸盤表面(×40)	圖 21、以#120 砂紙磨砂的吸盤表面(×40)
圖 22、不同磨砂面積的吸盤	

四、體液黏滯力對爬升力的影響：

(一)　不同濃度膠水的黏滯力測量：

根據黏滯係數的測量實驗資料【7】，黏滯係數(η)=面積(A)*質量(M)/速度(V)

以水的黏滯係數(20℃水 1.002cp)當標準，測量相同水壓(水深 30cm)狀況下，各種液體的流速(V)，此時流速與黏滯力成反比。因此，換算各種濃度膠水溶液的黏滯係數，藉以比較後續實驗中，膠水的黏滯係數對蝸牛爬行運動的影響。

(二)　液體黏滯力對乒乓球滾動摩擦的影響：

1. 將乒乓球裝入不同高度(0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4cm)的水及 10%與 5%PVA 膠水溶液。
2. 利用鋁軌、腳架與量角器，測量液體黏滯力對乒乓球起始滾動的傾斜角度影響。

(三)　液體黏滯力對乒乓球滾動速率的影響：

1. 由於我們觀察到蝸牛爬行時是以腹足間歇式的收縮波紋向前移動，因此除了腹足的吸附力限制了蝸牛的爬行速度之外，我們想知道蝸牛體液及黏液的黏稠度是否能減緩向上爬行時的下墜速度？因為黏液雖然減緩了向上爬行的速度，卻也減少了重力所造成的能量損耗。
2. 於將乒乓球裝入不同高度(0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4cm)的水及 10%與 5%PVA 膠水溶液，利用液體對乒乓球內壁的吸附力在乒乓球滾動過程，影響重心位置減低下滑滾動下滑的速率。
3. 利用腳架與量角器固定鋁軌傾斜角度(10 度)，以錄音程式(Cool Edit)錄測量製乒乓球滾動的起迄時間，換算液體黏滯力對乒乓球滾動速度的影響。

圖 23、膠水黏滯力的測量

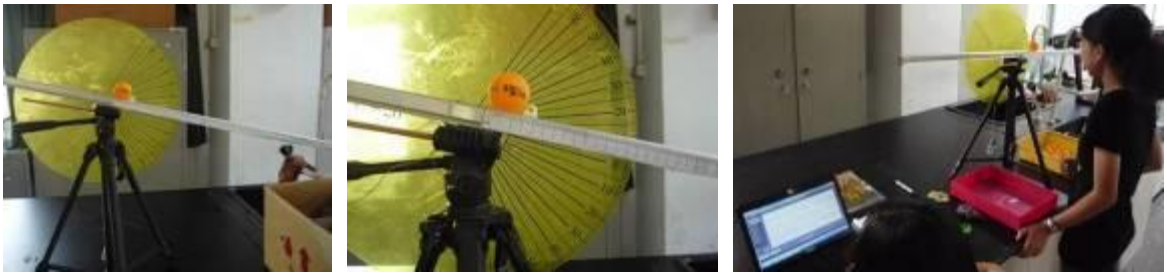


圖 24、乒乓球裝入不同體積的水及膠水溶液測試液體黏滯力對乒乓球滾動角度的影響

伍、 結果及討論

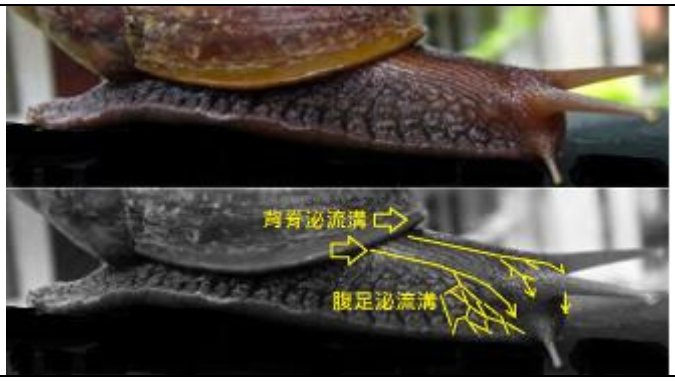
一、　非洲大蝸牛運動相關構造形態及運動功能的觀察。

(一)　　背脊與腹足形態構造及爬行運動的觀察：

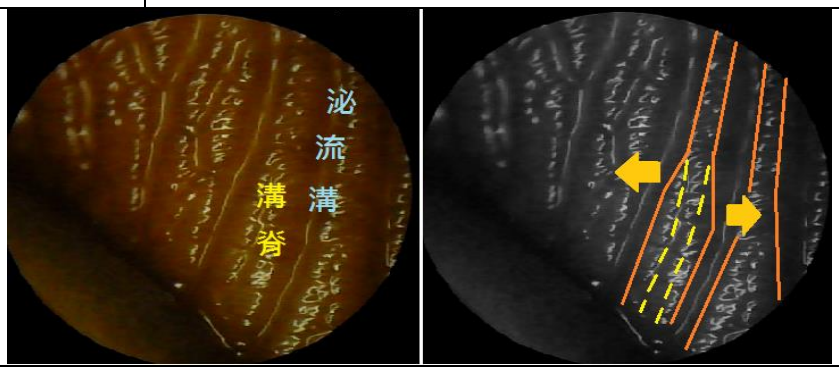
1. 背脊在運動過程之觀察記錄：

非洲大蝸牛在移動過程，背脊上的泌流溝會間歇式的膨脹溝脊，將黏液藉由泌流溝往頭部推擠，提供腹足在爬行運動過程所需的黏液。(如圖 25)可見黏液在蝸牛爬行過程具有相當程度的重要性。後續我們將設計實驗探討黏液對爬行運動的影響。

腹足與背脊構造



腹足與背脊泌流溝的構造(上圖右為黏液泌流方向示意圖)



背脊泌流溝以兩側溝脊膨脹擠壓泌流溝的黏液向前流動(上圖右為膨脹方向示意圖)

圖 25、非洲大蝸牛背脊的泌流溝構造

2. 腹足在運動過程之觀察記錄：

(1) 蝸牛以水瓶拖拉掛重時，當載重越重，背脊會逐漸縮短，並使腹足收縮成圓形吸盤狀，以增加切向吸附力。當負重超過腹足的切向吸附力時，背脊會由口部開始向上外翻，進而使腹足脫離吸附面。(如圖 26 右圖)

(2) 觀察蝸牛的運動構造，腹面足緣有皺摺，而中央足腹較平滑。當爬行時，腹面會產生深色橫紋波動，向頭部推擠。(如圖 27)

(3) 蝸牛的腹面足緣在不平整的吸附面(如蝸牛梯)會產生皺摺狀之肉爪，推測柔軟的足緣肉爪可深入凹縫後脹大固定以產生鉤附力，增加蝸牛的切向吸附力，有助於蝸牛在不平整的鉛直表面爬行。(如圖 27 右圖)

圖 26、蝸牛負重增加時背脊與腹足的變化

非洲大蝸牛的腹足 分為足腹及足緣兩種構造	足腹在運動時 產生向前移動之波紋	足緣在運動時 可產生勾附地形之肉爪

圖 27、蝸牛腹足運動時各項運動構造的外觀與名稱

3. 非洲大蝸牛腹足的組織構造顯微分析：

(1)石蠟切片及蘇木精-伊紅染色(H.E 染色)結果：

a.蝸牛背脊具泌流溝，會間歇性的向頭部脹縮擠壓，除了加速黏液的分泌之外。切片中也觀察到上皮組織包含黏液細胞及漿細胞(如圖 28)。推測：黏液對於蝸牛的爬行運動應有相當程度的影響。

b.蝸牛腹足由上而下的構造分為背脊區、肌肉海綿體區(含有海綿狀空腔)以及足腹皺褶區(如圖 29)。海綿體區有鉛直排列及縱向排列的肌肉細胞，推測蝸牛爬行運動過程，背脊在前後縱向的拉力大於鉛直上下方向的拉力，可調控背脊與海綿體空腔的膨壓，提供腹足吸盤支撐力。

c. 蝸牛爬行過程，足腹會產生前進橫向波紋，應是海綿體區發達的環狀肌肉組織，間歇性的收縮，將空腔中的體液往頭部擠壓所造成的。推測蝸牛的爬行是利用體液的黏滯性，降低下滑的速率，並節省能量的消耗。

d. 腹足底部的足腹面，外層是具絨毛與多重褶皺構造的上皮組織，內部為漿細胞與中空的海綿組織(如圖 30)。由於漿細胞會使足腹比背脊柔軟，而海綿組織可灌注體液及擠壓體液，使足腹可以伸張及收縮。因此推測：腹足底部外層具絨毛與多重褶皺構造的上皮組織，應是為了增加黏液的蓄含量與增加黏附面積，甚至柔軟的足緣可貼附地形形成大小不同的肉爪，進而造成蝸牛可以在粗糙平面黏附與爬行。

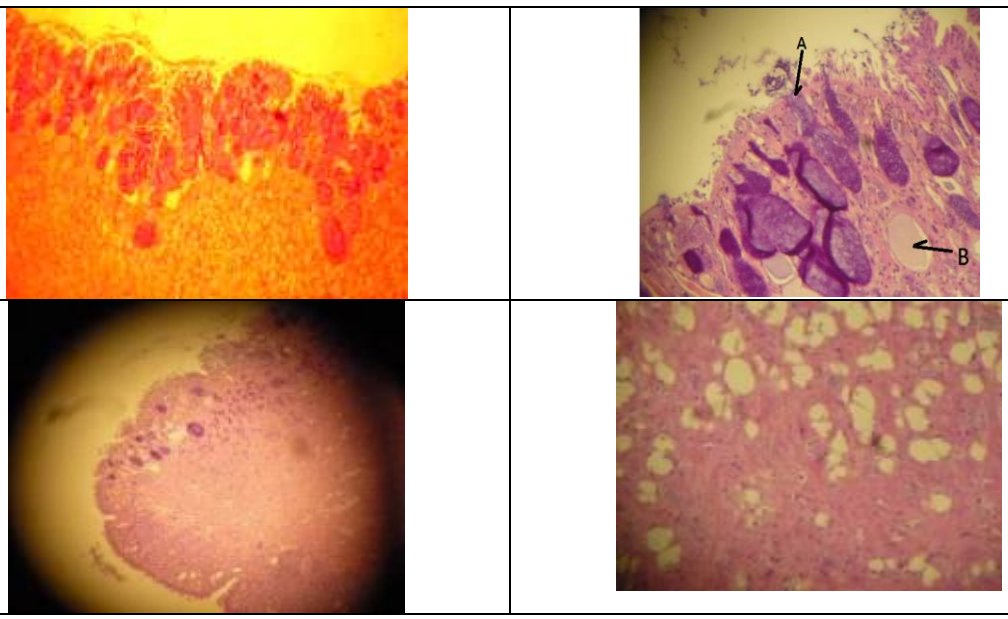


圖 28、蝸牛腹足背脊的上皮細胞(橫切，H.E 染色，左圖 X40，右圖 X100)
右圖圖中 A 是深藍色的黏液細胞往體外分泌黏液，B 是淡藍色的漿細胞)

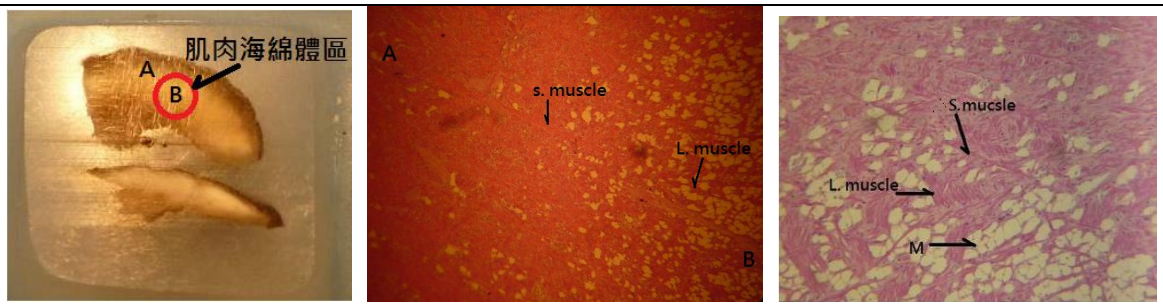


圖 29、腹足肌肉海綿體區的顯微照片 (鉛直縱切，H.E 染色，圖左為石蠟切片，圖中 X100，圖右 X600)腹足的海綿體區有橫向鉛直排列的肌肉細胞(S. muscle)及縱向排列的肌肉細胞(L.muscle)，A 為背脊區，B 肌肉海綿體區。M 是海綿狀空腔。

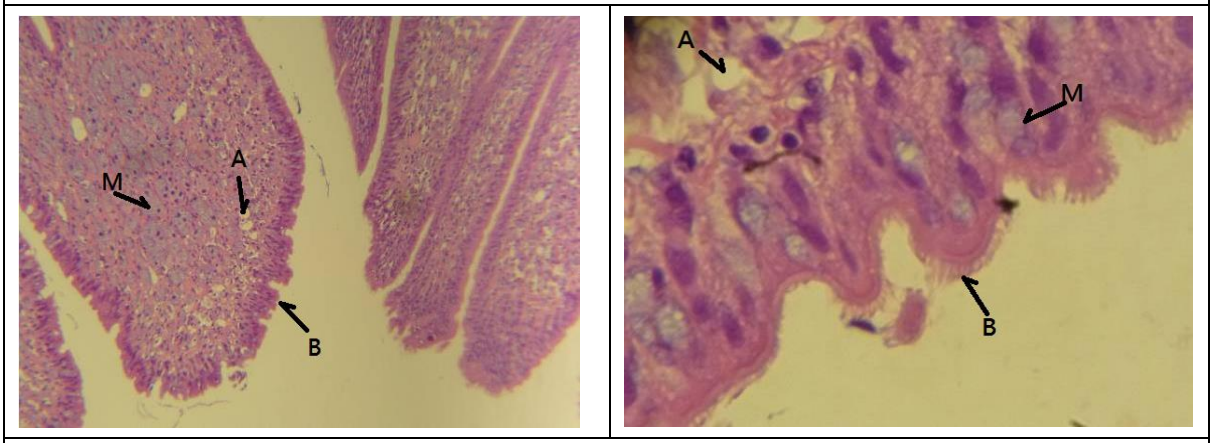


圖 30、腹足足腹面的上皮組織(鉛直縱切，H.E 染色，左圖 X100，右圖 X600)
M：漿細胞(藍紫色)：A：海綿組織(中空狀)， B：具絨毛與多重皺褶構造的上皮組織)

二、　非洲大蝸牛腹足運動相關構造與運動功能的模擬：

(一)吸盤面積對吸盤**吸附力**的影響：

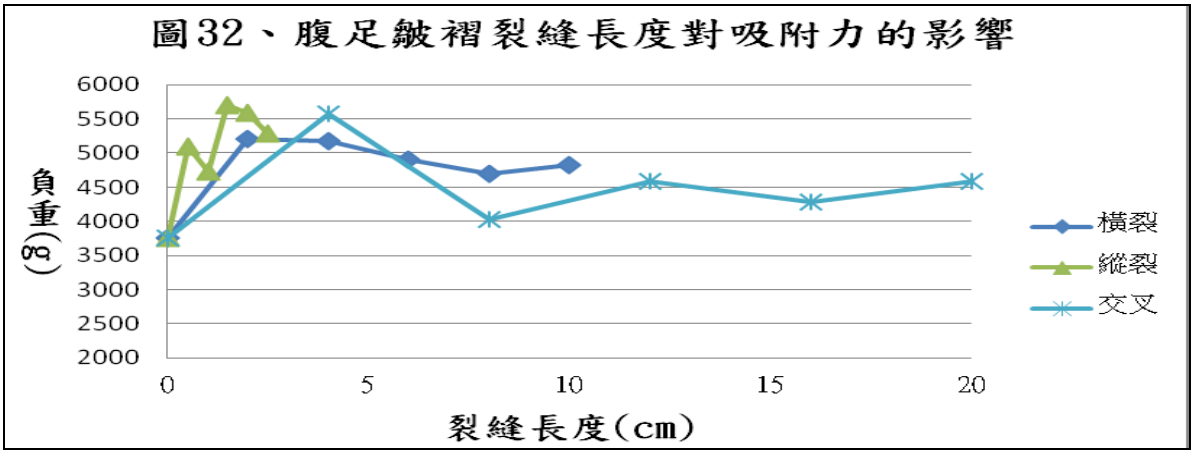
1. 將直徑 4.7cm 之圓形吸盤以不同長寬比（固定長度 4.7cm，寬度改為 4.7cm 、4.5cm 、4.0cm 、3.5cm 、3.0cm 、2.5cm 、2.0cm ）剪裁吸盤，吸盤下方吊掛 4L 空寶特瓶，接觸面以鉛直及水平倒掛方式依序測量吸附力與切向吸附力。
2. 以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。
3. 測量吸盤在不同吸盤面積的最大吸附力。

面積	10.34	11.28	12.22	13.16	14.1	15.04	15.98	16.92	17.86	18.8	18.8	19.74	20.68
吸附力	2037.6	2167.7	3487.7	4004.4	3759.1	4642.9	5092.9	7690.7	7369.3	8410.7	8250.7	8910.7	9871.2

(二)吸盤皺摺對吸盤**吸附力**的影響：

1. 直徑 47cm 寬 3.5cm 圓形吸盤，以雕刻刀刻劃數量逐漸增加的 2cm 縱線及 0.5cm 橫線。
2. 具刻痕的吸盤下方吊掛 4L 空寶特瓶，接觸面以鉛直及水平倒掛方式依序測量吸附力與切向吸附力。
3. 以固定流速(1123.6ml/min)的自來水灌注寶特瓶以提供載重。
4. 測量吸盤在不同刻劃長度及刻劃方向的最大吸附力。

長度(cm)	0	2	4	6	8	10
橫裂吸附力	3759.1	5210	5180.7	4900	4699.6	4824.3
長度(cm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
縱裂吸附力	3759.1	5096	4730.3	5694	5590	5287.2
長度(cm)	0	4	8	12	16	20
交叉吸附力	3759.1	5569	4026	4589	4279.2	4579.2

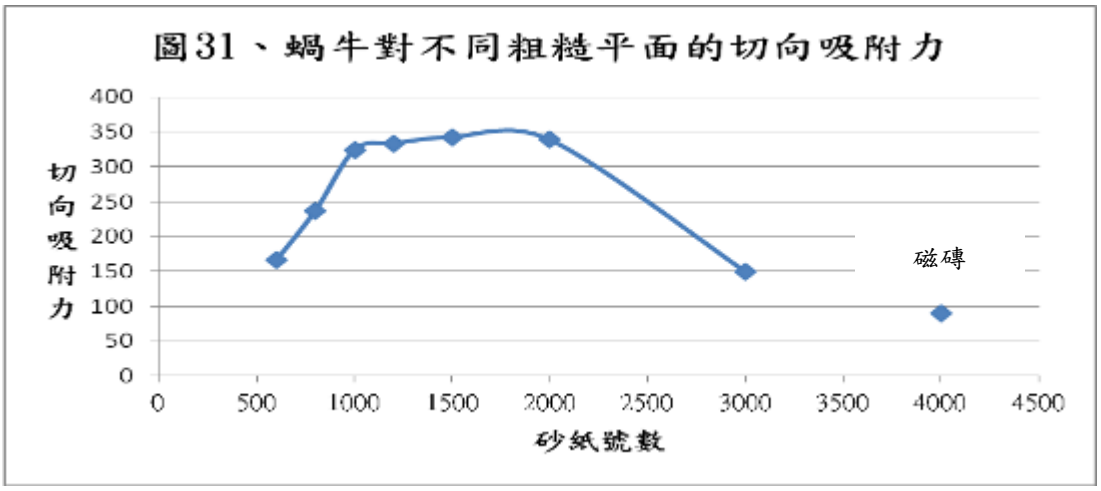


（三）成體蝸牛在不同粗糙平面的切向吸附力之測量：

1. 實驗室培養四隻成體蝸牛(六層殼高)，平均體重 40.3g。
2. 蝸牛在粗糙平面的切向吸附力比在光滑平面(磁磚)還大，在粗糙平面的切向吸附力可達體重的八倍，在光滑平面的切向吸附力可達體重的兩倍。對於蝸牛而言，負重鉛直爬行，並非負擔。
3. 根據表 1.測量結果，砂紙顆粒大小在#1000 到#2000 之間，蝸牛的切向吸附力最大，回顧顯微切片推測：蝸牛足腹具絨毛的上皮組織，可以在砂紙顆粒的縫隙之間，擴大接觸面積，因此可以藉由接觸的摩擦力與黏液的黏滯力，增加蝸牛在粗糙平面的吸附力，並不是全靠吸盤的負壓吸力。

表 1.蝸牛在不同平面切向吸附力之測量

不同粗糙平面	#600	#800	#1000	#1200	#1500	#2000	#3000	磁磚
切向吸附力(gw)	166.6	237.6	324.6	333.6	342.6	338.6	149.6	90.7

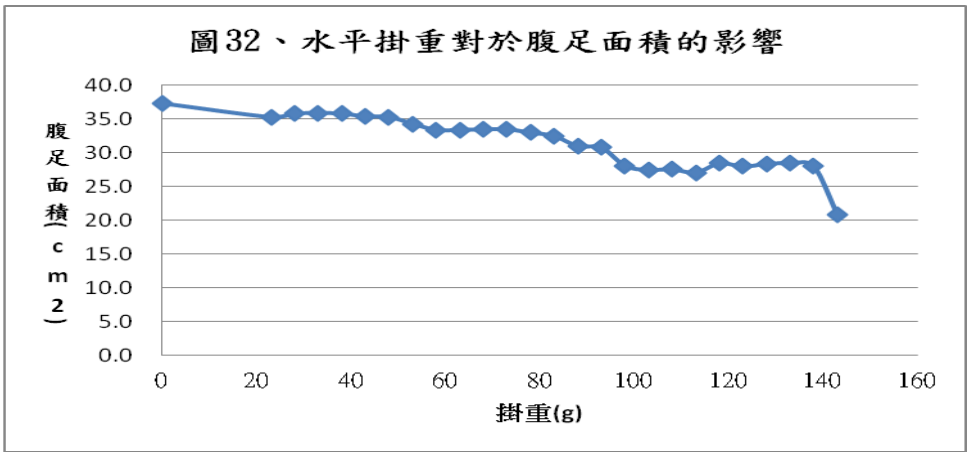


（四）成體蝸牛腹足面積對切向吸附力的影響：

1. 當蝸牛增加水平拉力達負荷極限之前，背脊會先縮短，並使腹足面積變小。並且在脫離吸附面之前，蝸牛口部開始內縮後並往上翻翹起(如圖 26)。
2. 增加蝸牛拖拉的負重量後，腹足面積逐漸縮小，最小吸附面積約為全展開時的 74.7%。(如圖 32)減少 25%的面積約可增加體重(40gw)3.5 倍(138gw)的切向吸附力。推測蝸牛應是藉由縮小腹足面積，增加腹足與接觸面之間的空腔體積，降低空腔內的氣壓，利用內外壓力差所產生的負壓來增加接觸面的正向力，增加腹足的切向吸附力，提高蝸牛爬行時的拖行負重力。(如圖 33)

表 2.不同水平掛重對蝸牛腹足面積的影響

掛重量(g)	0	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78
腹足面積(cm^2)	37.3	35.3	35.8	35.9	35.8	35.4	35.3	34.3	33.4	33.4	33.5	33.5	33.0
掛重量(g)	83	88	93	98	103	108	113	118	123	128	133	138	143
腹足面積(cm^2)	32.5	31.0	30.8	28.1	27.5	27.6	27.1	28.5	28.0	28.4	28.5	28.0	20.9



空腔變大
氣壓變小
負壓增大

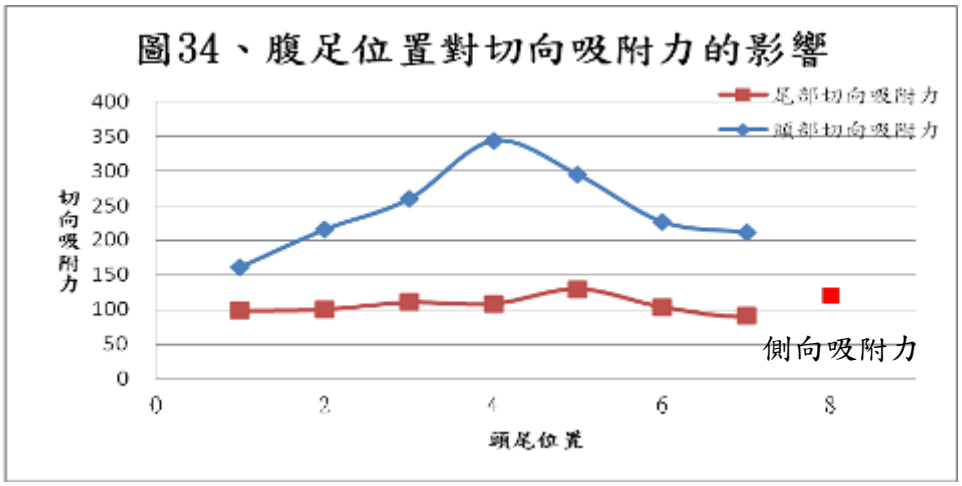
圖 33、蝸牛吸附面積與空腔體積關係示意圖及塑膠吸盤掛重時空腔變大情形

(五)成體蝸牛腹足的頭尾及兩側位置對切向吸附力的影響：

1. 成體蝸牛腹足的頭尾及兩側位置的切向吸附力測量(如表 3)，結果發現蝸牛的吸附力具有方向性。蝸牛體長 8cm，頭部有背脊可後縮加強切向吸附力，頭部切向吸附力可達蝸牛體重(40gw)的 4~8 倍，尾部切向吸附力可達蝸牛體重的 2~3 倍。這一現象可以說明為何蝸牛具有背地爬行的趨性，因為蝸牛比較方便施力且不易受蝸殼的推擠而影響爬行。
2. 根據顯微切片的構造分析：背脊內部具有縱向肌肉，可以將背脊往殼內收縮，但是背脊要伸長，卻是靠海綿體空腔周圍的環形肌肉，將體液灌入海綿體，藉由液體膨壓形成吸盤的支撐力。所以，頭部往殼後縮方向的收縮力量，是所有背脊運動中最大的。

表 3. 腹足的頭尾及兩側吸附長度對切向吸附力的影響

吸附長度	1cm	2cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm
頭部切向吸附力	161.48	215.62	259.54	343.45	294.88	227	211.72
尾部切向吸附力	98.00	99.93	110.36	108.35	129.72	103.77	90.7
兩側切向吸附力	119.5						



（六）成體蝸牛足緣構造對吸附力及切向吸附力的影響：

1. 足緣肉爪數對蝸牛最大切向吸附力的影響

(1)以不同間距的鐵絲梯架測定蝸牛最大切向吸附力的影響因素，結果(如圖 35)發現肉爪數影響切向吸附力，但是肉爪的深度卻與吸附力無關。

(2)原先假設在爬行過程足腹提供吸附力，而足緣則在縫隙間提供鈎附力。經測量結果在鐵絲梯架上的最大切向吸附力卻是間距越小力量越大。

(3)此外，原先認為在無間距的光滑平面，腹足的吸附面積會最大，吸附力最大會切向吸附力最大，但是測試結果卻是切向吸附力最小。在蝸牛爬行過程足緣所形成的肉爪所提供的鈎附力大於足腹的切向吸附力，也就是，在光滑平面的切向吸附力小於鐵絲梯架。因此證明，蝸牛爬行時，足緣所形成的肉爪可提供鈎附力增加足腹的切向吸附力，有助於適應在粗糙面的爬行。

表 4. 足緣肉爪數對蝸牛最大切向吸附力的影響

梯間距 cm	0	0.2	0.4	0.7	1	1.5
肉爪數(個)	0	30	16	9	6	4
肉爪深 cm	1	2	2	7	5	7

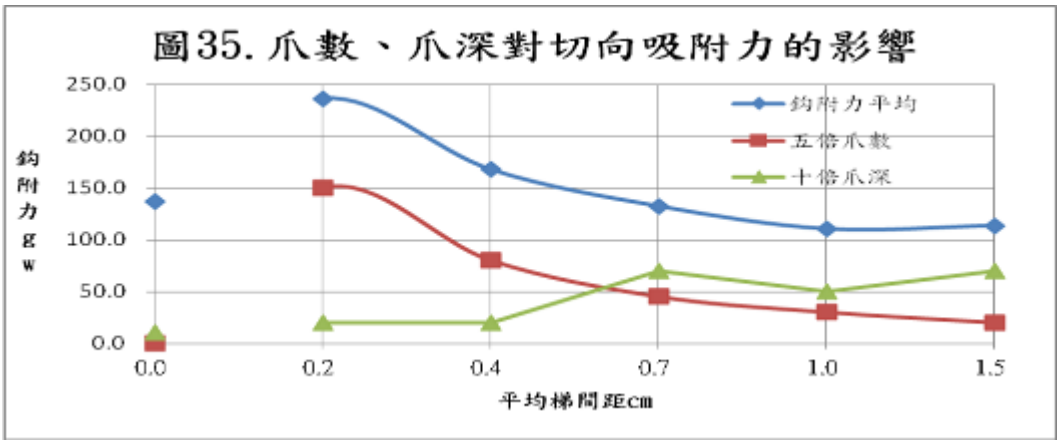


圖 35. 足緣肉爪數對蝸牛最大切向吸附力的影響

2. 腹足鏤空面積對切向吸附力的影響。

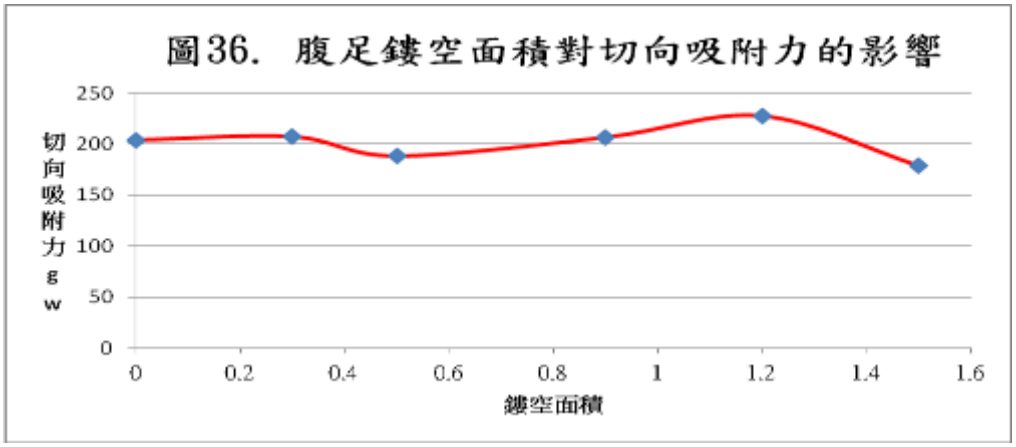
固定瓦楞紙梯的梯數讓蝸牛腹足橫跨 3 個梯數形成 3 個肉爪，梯面積寬度依序為 3、5、9、12、15mm，加大梯子的間隔藉以比較腹足鏤空面積對切向吸附力的影響程度。

結果如下表，相同肉爪數的情況下， 切向吸附力的變化並沒有隨著鏤空間隔變化，且與光

滑平面的切向吸附力相同，可見腹足接觸面積對切向吸附力的影響不大。所以，肉爪在粗糙面所提供的鉤附力，是蝸牛爬行運動中切向吸附力的主要施力來源。

表 5. 鏤空面積對切向吸附力的影響

鏤空間隔(cm)	光滑平面	0.3	0.5	0.9	1.2	1.5
切向吸附力(gw)	204.06	207.32	188.3	206.6	227.68	178.7

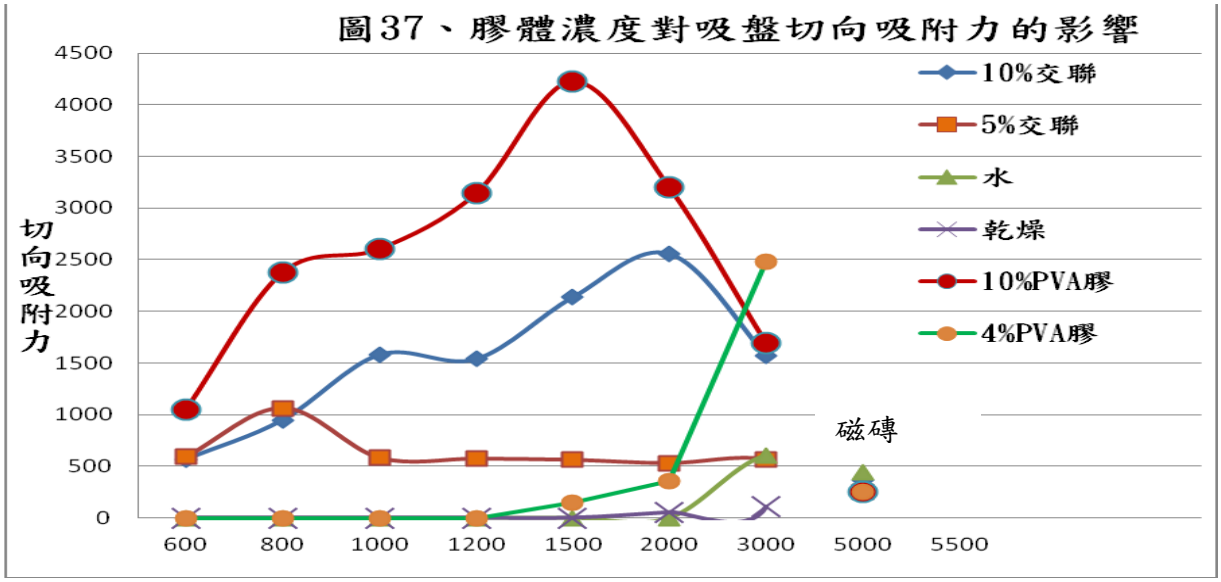


（七）黏液濃度對吸盤在不同平面之**切向吸附力**的影響：

1. 本來無法在#2000 以下的粗糙乾燥砂紙上產生切向吸附力的塑膠吸盤，再加了膠水之後，黏液濃度越高對吸盤在不同平面之切向吸附力越大(如圖 37)。推測是長鏈的膠水分子可以填補縫隙，並且增加吸盤與粗糙平面之間的黏附力，所以蝸牛分泌黏液應不只是具有保護腹足不易受傷而已，還可以增加對粗糙面的黏附力，有助於在各種平面上行走。
2. 實驗將 PVA 膠水加入硼砂以進行分子交聯，使膠體分子變大，但是吸盤的切向吸附力卻不如 PVA 膠水。推測應是膠體分子不宜太大，避免加大吸盤與接觸面之間的距離而造成載重時容易滑動與漏氣，降低吸附力。

表 6. 黏液濃度對吸盤在不同平面之切向吸附力的影響

砂紙號數	600	800	1000	1200	1500	2000	3000	磁磚	蝸牛黏液
10%交聯	566.2	948	1580.48	1538.28	2138.28	2559	1566	361.78	136.8
5%交聯	591.4	1061.6	579.78	571.8	560.8	528.7	566.2	249.78	
水	0	0	0	0	0	0	606.8	442.5	
乾燥	0	0	0	0	0	53.8	108.8	3306.2	
10%PVA 膠	1052.8	2377.8	2605.0	3143.8	4228.8	3198.8	1691.8	249.1	
4%PVA 膠	0	0	0	0	147.26	353.55	2483.8	251.58	



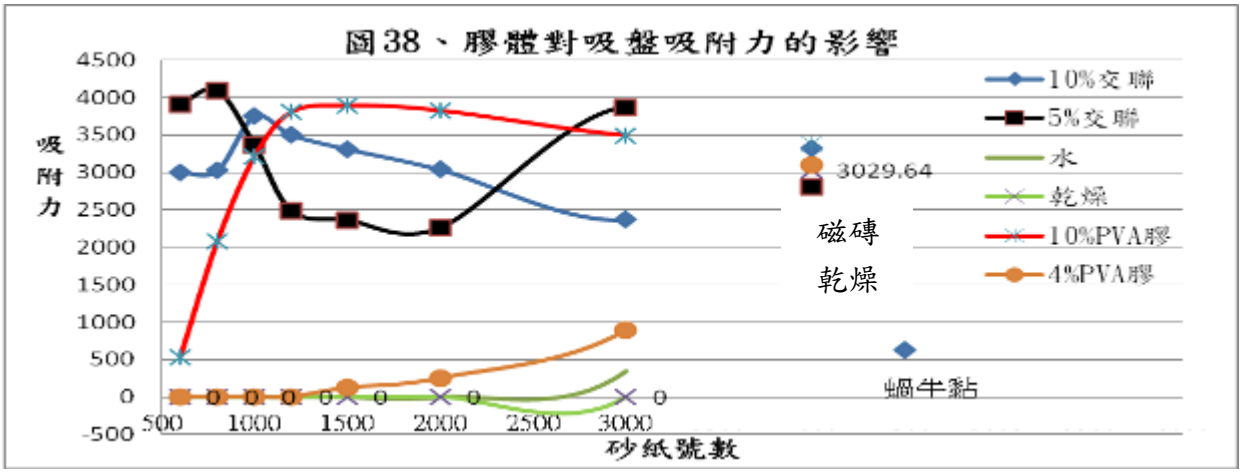
（八）黏液對吸盤**吸附力**的影響：

1. 本來無法在任何粗糙乾燥砂紙上產生吸附力的塑膠吸盤，再加了膠水之後，黏液濃度越高對吸盤在不同平面之吸附力越大，如圖 38。推測是長鏈的膠水分子可以填補縫隙，並且增加吸盤與粗糙平面之間的黏附力，所以蝸牛分泌黏液應不只是具有保護腹足不易受傷而已，還可以增加對粗糙面的黏附力，有助於在各種平面上行走。

2. 實驗將 PVA 膠水加入硼砂以進行分子交聯，使膠體分子變大，但是吸盤的吸附力已接近 PVA 膠水的填補效果。推測應是較大的膠體分子，可以填補大顆粒的砂紙縫隙避免漏氣，進而增加吸附力。

表 7. 膠體濃度吸盤吸附力的影響

砂紙號數	600	800	1000	1200	1500	2000	3000	磁磚面	蝸牛黏液
10%交聯	3002	3027	3750.8	3502.8	3313	3040	2370	3328.3	635.04
5%交聯	3910	4090	3360	2482	2361	2258	3871	2800	
水	0	0	0	0	0	0	346.5	3658.74	
乾燥	0	0	0	0	0	0	0	3029.64	
10%PVA 膠	524.4	2074.8	3208.8	3806.3	3893.8	3826.8	3493.5	3385	
4%PVA 膠	0	0	0	0	121.6	249.86	889.8	3100	



（九）背脊對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：

1. 背脊支撐面積對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：

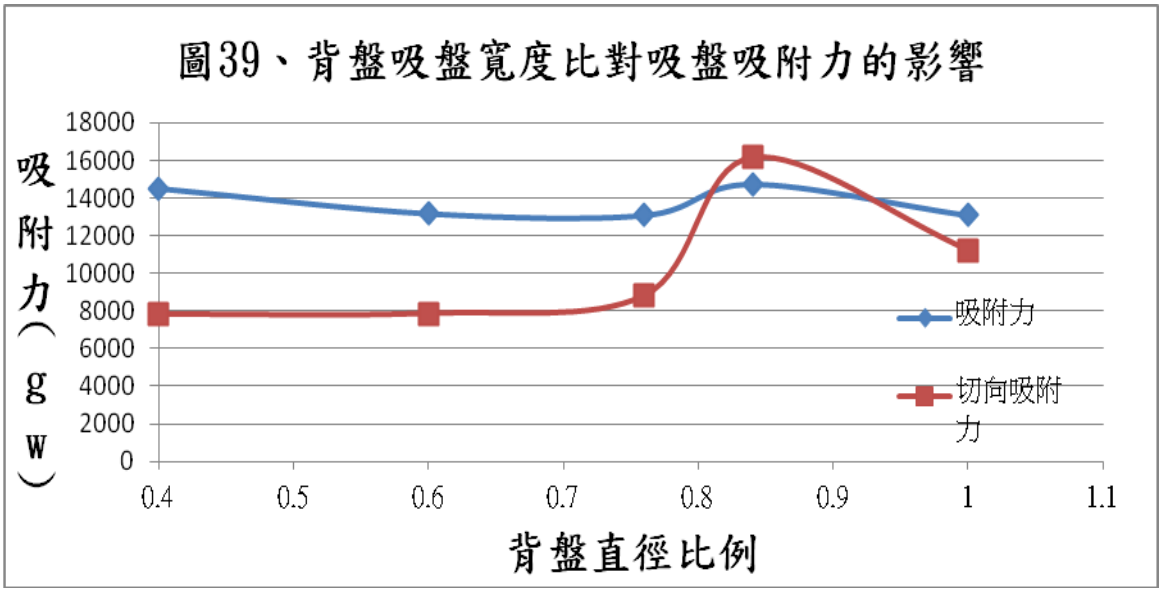
(1)利用有背蓋(背脊)之強力塑膠吸盤模擬蝸牛背脊與腹足，寬度比例對吸附力與切向吸附力的影響，結果如下表：背盤大小的影響主要以切向吸附力為主，經觀察水平拖拉吸盤時，受力越大，吸盤中央會凸起變形，背蓋寬度(背脊)若接近吸盤邊緣則有加壓固定塑膠吸盤的作用，因此會使切向吸附力變大。對於強力吸盤掛鉤而言，背盤的大小的確會影響吸盤的切向吸附力。

(2)對於倒掛的吸盤而言，背盤因無法影響塑膠吸盤的形變過程，所以不論背盤(背脊)的寬度大小，對於吸附力都沒有明顯的影響。

(3)所以蝸牛的背脊主要分布在頭部，可將吸盤固定在蝸殼口，這時有利於利用吸盤抵擋蝸殼重物的切向拖力，也就是背脊有調節吸盤面積及固動吸盤位置的功能，是蝸牛運動的調節機制。

表 8. 背盤對吸盤切向吸附力與吸附力的影響

背盤吸盤寬度比	0.4	0.6	0.76	0.84	1
吸附力	14507.3	13183.3	13093.3	14726.3	13087.3
切向吸附力	7805	7849	8795	16146.8	11227.8



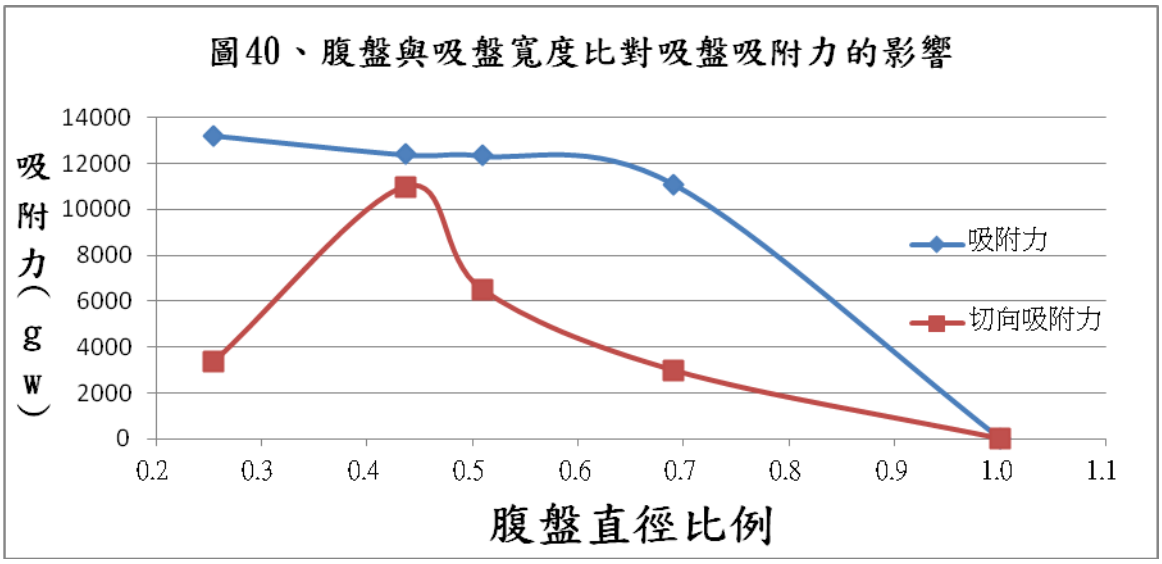
2. 背脊腹盤支撐位置對吸盤吸附力與切向吸附力的影響：

(1) 經由腹盤大小的實驗，分析蝸牛背脊內部肌肉層分布位置對吸附力與切向吸附力的影響。發現：蝸牛或塑膠吸盤在水平載重時，背脊內部肌肉層的支撐點位置應以腹足半徑的一半為主。推測應是切向拖拉過程，腹盤的支撐力可以支撐吸盤、降低變形，所以腹盤的作用主要影響仍是以切向吸附力為主。

(2)不過腹盤越大，卻會降低吸附力的大小，推測應是鉛直吊掛過程腹盤會加大吸盤的形變範圍並使支點往外移，因此降低吸盤的密合度。

表 9. 腹盤與吸盤寬度比對吸盤吸附力的影響

腹盤寬度比	0.3	0.4	0.5	0.7
吸附力	13231.3	12398.55	12348.8	11106
切向吸附力	3338.8	10976.94	6498.3	2975.8



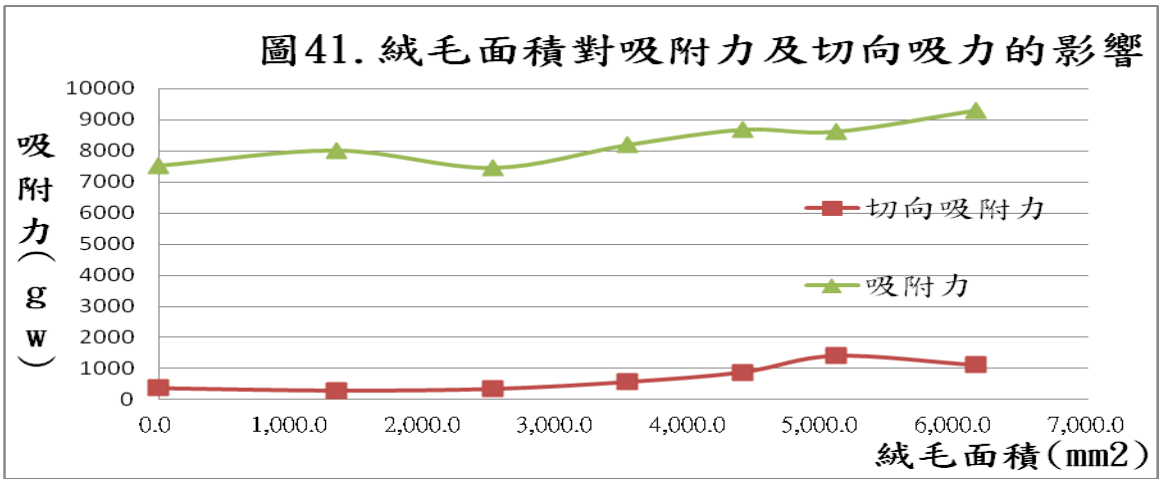
3. 足腹絨毛組織對吸附力及切向吸附力的影響：

(1)由於蝸牛腹足邊緣有具絨毛結構的上皮組織，為分析絨毛組織對於吸盤吸附力的影響，將塑膠吸盤進行不同面積大小的磨砂，並添加膠水模仿蝸牛吸附方式，測定絨毛面積對吸附力的影響。

(2)結果發現：磨砂面積越大，吸盤的吸附力及切向吸附力均有提升的效果，推測在光滑平面，磨砂效果會使吸盤蓄積膠水分子，增加接觸面積，提高分子之間的黏附力，**吸附力可增加 23.2%，切向吸附力可增加 202%**。

表 10. 足緣絨毛組織對吸附力及切向吸附力的影響

絨毛面積 mm2	6157.54	5102.5	4396	3532.5	2512	1334.5	0
切向吸附力	1120.6	1419.6	884.6	572.14	344.14	291.14	370.14
吸附力	9290.8	8619.8	8679.8	8193.8	7468	8021.8	7536



四、體液黏滯力對爬升力的影響：

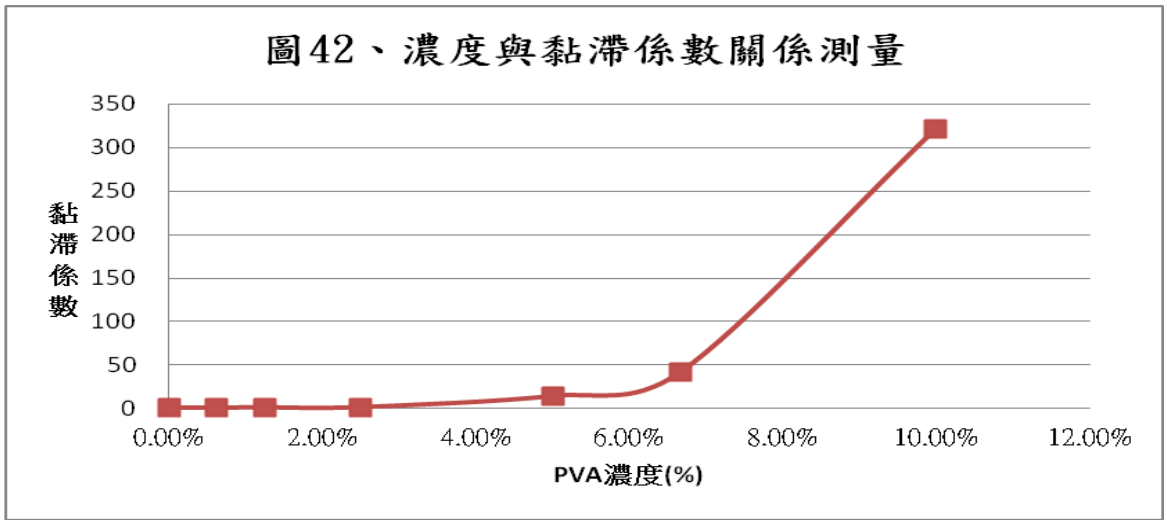
(一)　不同濃度膠水的黏滯力測量：

根據黏滯係數的測量實驗資料【7】，黏滯係數(η)=面積(A)*質量(M)/速度(V)

以水的黏滯係數(20℃水 1.002cp)當標準，測量相同水壓(水深 30cm)狀況下，各種液體的流速(V)，此時流速與黏滯力成反比。因此，換算各種濃度膠水溶液的黏滯係數，藉以比較後續實驗中，膠水的黏滯係數對蝸牛爬行運動的影響。推算結果發現膠水稀釋一倍以後，黏滯係數及大幅降低，所以推測蝸牛黏液黏滯性高，原因在於其濃度高。

表 11、膠水濃度與黏滯力的推算

PVA 濃度	0	0.63%	1.25%	2.50%	5%	6.67%	10%
流速	1.52	1.50	2.05	2.55	21.95	63.60	487.70
黏滯係數	1.002	0.989	1.351	1.679	14.470	41.926	321.497

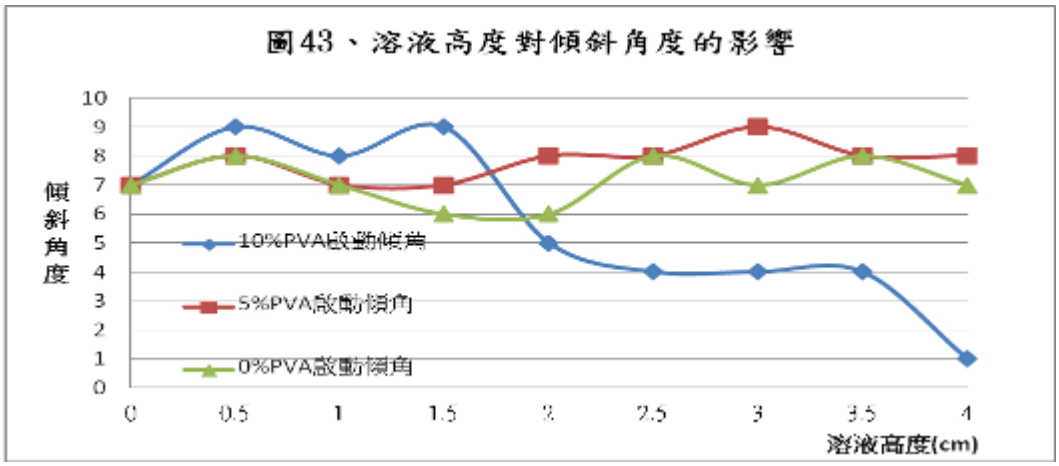


(二)　乒乓球填裝黏液高度對滾動摩擦的影響：

1. 黏滯性高的 PVA 膠水溶液，因不易流動，在液體高度未達半徑之前均有不錯的緩衝效果，反之超過乒乓球半徑則會因為轉動力矩變大而加速滾動。
2. 因此要利用黏滯性液體來降滾動速率，應維持在滾動半徑以內，才會有緩衝的效果。

表 12、溶液高度對乒乓球滾動摩擦的影響

溶液高度(cm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
10%PVA 啟動傾角	7	9	8	9	5	4	4	4	1
5%PVA 啟動傾角	7	8	7	7	8	8	9	8	8
0%PVA 啟動傾角	7	8	7	6	6	8	7	8	7

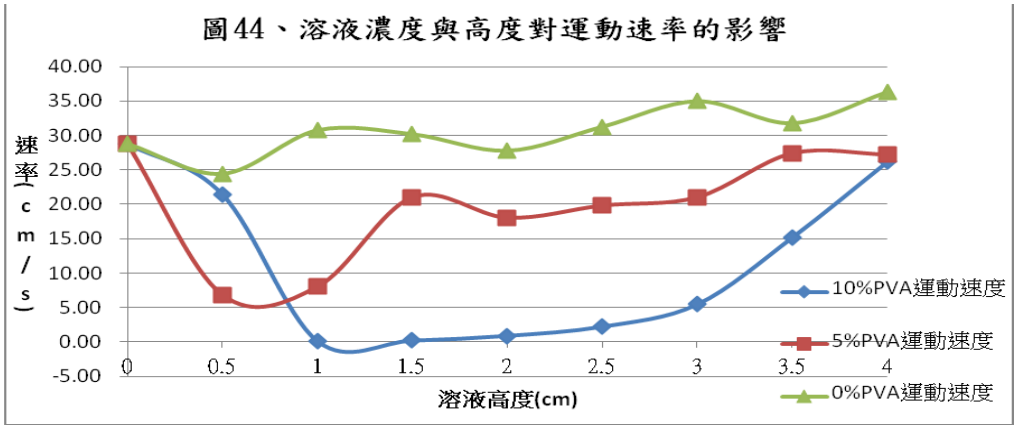


(三)　乒乓球填裝黏液高度對球體滾動速率的影響：

1. 液體黏滯力對乒乓球滾動速度的影響相當顯著，黏滯係數遠低於 10%PVA 膠水的 5%PVA 膠水溶液，竟然也能降低滾動速度將近三分之一的效果。
2. 由於我們觀察到蝸牛爬行時是以腹足間歇式的收縮波紋向前移動，因此除了腹足的吸附力限制了蝸牛的爬行速度之外，蝸牛體液及黏液的黏稠度的確能減緩向上爬行時的下墜速度，卻也減少了重力所造成的能量損耗。

表 13. 表、溶液濃度與溶液高度對運動速率的影響

溶液高度(cm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
10%PVA 運動速度	28.78	21.43	0.12	0.21	0.89	2.23	5.47	15.17	26.17
5%PVA 運動速度	28.78	6.86	8.04	21.03	18.05	19.82	21.04	27.41	27.22
0%PVA 運動速度	28.78	24.39	30.75	30.17	27.76	31.27	35.00	31.78	36.34



陸、 結論

本次研究在尋找蝸牛腹足在粗糙面能產生切向吸附力的原理。

一、 非洲大蝸牛在腹足運動爬行過程，與吸附力及切向吸附力相關的構造有：腹足足緣皺摺、足腹面積、足腹皺摺與絨毛組織、背脊肌肉組織與海綿體空腔、黏液及空腔體液。

二、 非洲大蝸牛腹足運動過程，利用背脊縱向的溝脊膨脹擠壓縮小泌流溝，將殼內蓄積的黏液不斷往頭部擠壓，提供腹足足夠的黏液以便在黏液上波動前進。黏液會降低摩擦力可減少腹足受傷害，但是卻可以增加對粗糙面的吸附力及切向吸附力。

三、 腹足足緣形成肉爪越多，鈎附的力量越大。與肉爪抓附深度無關。肉爪在粗糙面所提供的鈎附力，是蝸牛爬行運動中切向吸附力的主要施力來源。足腹皺摺與絨毛組織可以蓄涵黏液，提升腹足的吸附面積，經塑膠吸盤以磨砂處理，測試結果可知吸附力可增加 1/3 的強度，而切向吸附力更可以增加將近 3 倍，對於蝸牛的運動相當有利。

四、 蝸牛頭部有背脊可後縮加強切向吸附力，頭部切向吸附力可達蝸牛體重的 4~8 倍，尾部切向吸附力可達蝸牛體重的 2~3 倍。這可說明蝸牛有背地爬行趨性的原因，因為背地爬行蝸牛比較方便施力，避免蝸殼的推擠。

五、 蝸牛的背脊主要分布在頭部，可將吸盤固定在蝸殼口，這時有利於利用吸盤抵擋蝸殼重物的切向拖力，也就是背脊有調節吸盤面積及固動吸盤位置的功能，是蝸牛爬行運動的調節機制。掛重越重大，背脊會以集束方式使腹足面積會縮小，增加空腔體積，降低空腔氣壓，產生負壓，增加腹足對接觸面的正向力，提升吸附力。

六、 腹足以橫紋波動前進，改變腹足吸附位置，造成個體移動。 而且液體黏滯力對滾動速度的影響相當顯著，黏滯係數遠低於 10%PVA 膠水的 5%PVA 膠水溶液，竟然也能降低滾動速度將近三分之一的效果。由於我們觀察到蝸牛爬行時是以腹足間歇式的收縮波紋向前移動，因此除了腹足的吸附力限制了蝸牛的爬行速度之外，蝸牛體液及黏液的黏稠度的確能減緩向上爬行時的下墜速度，也減少了重力所造成的能量損耗。

七、 觀察結果顯示：蝸牛腹足內有海綿狀空腔可藉由膨壓變化，調整足腹面積及足緣形狀形成肉足。足緣的皺摺柔軟，可依附各種平面形成肉足；背脊的上皮組織有黏液細胞可以分泌黏液增加黏附力。以膠水及吸盤模擬發現膠水能幫助吸盤吸附在顆粒大於#1000 的砂紙上;塑膠吸盤經磨砂後配合 PVA 膠水，可使吸附力增加 23.2%，證實蝸牛足腹的多重皺摺及具絨毛的上皮組織，可以蓄含黏液及調整足腹各部位的吸附力與勾附力。經測試乒乓球填充 1/4~3/4 球體高度的 10%PVA 膠水，可使乒乓球滾動速度降至原速率的 1/6~1/30，證實海綿體空腔內富含黏滯力大的體液，可降低蝸牛下滑的速率，而且壓力大黏液流速變快，因此可減少往上爬行過程的能量消耗，這應是蝸牛具有向上爬行趨性的主要原因。

綜合以上研究結果可知，蝸牛運動的爬行及吸附的力量來源：**在粗糙面**是以**絨毛上皮組織及體表黏液所產生的黏附力**，以及**足緣形成肉爪的鈎附力**為主；**在光滑平面**則除了上述力量外，藉由**背脊與海綿體膨壓的支撐**，**足腹皺摺產生空腔吸盤負壓吸附力**為另一主要力量。此外，爬行過程是以海綿體空腔肌肉**向頭部擠壓具黏滯力的體液來降低下滑及滾動的速度**，另一方面空腔肌肉壓送黏滯性體液所造成的膨壓，(如同抓不住的球)，可**提供延伸體長造成滑動前進的力量**。根據本次研究的腹足動物運動原理，未來應可提出一種能在脈動流場中(血管、輸送管…)穩定可靠的運行介入機器人(例如：血管醫療機器人等)。

參考資料

【1】貝類導覽，CITES 珍貴貝類參考圖冊，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://subject.forest.gov.tw/books/book_04/books_0403.htm

【2】十水四硼酸鈉(硼砂)，常見化學品 CAS 號清單，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB1187397.htm

【3】聚乙烯醇(PVA)，常見化學品 CAS 號清單，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB7264573.htm#MSDSA

【4】江波，陳埔，向明，高分子材料科學與工程，1994，10 (1)，130

【5】A+醫學百科，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://cht.a-hospital.com/w/%E9%A6%96%E9%A1%B5

【6】四硼酸鈉，ChemicalBook，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://www.chemicalbook.com/CAS_1303-96-4.htm

【7】黏滯係數測定實驗，民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://faculty.ndhu.edu.tw/~phys2/PHYS20300/download/1-1.pdf

【8】王文彬，劉良國，2005，普通生物學Ⅱ實驗教材，湖南文理學院生物學基礎實驗教學中心。民 103 年 2 月 5 日，取自：
http://www.huas.cn:83/jpkc/c47/Course/Content/N27/200805091330.htm

【9】Salvini-Plawen, L. von; Haszprunar, G. (1987). "The Vetigastropoda and the systematics of streptonerous Gastropoda (Mollusca)". *Journal of Zoology* (London) **211** (4): 747–770 [762]. Retrived February 5,2013, from the World Wide Web:
http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jzo.1987.211.issue-4/issuetoc

【評語】030315

1. 實驗主題具實用性，但如何落實未有結論。

2. 建議增加參考文獻討論並聚焦於研究主題上。

3. 建議增加實驗樣本數，以驗證實驗結果是否具有再現性。