

螺類在流體逆境之行爲與型態

Behaviors and Morphology Responses of Freshwater Snails to Hydraulic Stress

國立台灣大學生物環境系統工程學系

碩士

林秉石

Bing-Shi Lin

國立台灣大學生物環境系統工程學系

教授

張文亮

Wen-Lian Chang

摘要

生態工法必須以生物的觀點來設計，特別對於位居食物鏈底層且對環境敏感性高的淡水螺類。本研究是以生物流體力學觀點，探討淡水螺類對於不同流速下所產生生物機械之反應，以及其適應的能力，以提供生態工程設計之參考。

研究物種為石田螺、川蜷、瘤蜷等三種常見的淡水螺類，研究中發現，三種螺類分別在形狀上，以及行爲上（腹足吸附力、攻角改變）對適應流體動力的差異性。實驗求得三種螺類在不同流速下的升力係數與阻力係數，在 Re 為 500 時，石田螺、川蜷、瘤蜷的阻力係數值分別為 15.97、14.76、10.56；升力係數值分別為 19.26、17.57、18.23， Re 為 5000 時，阻力係數分別為 1.79、1.30、0.91；升力係數分別為 0.91、0.46、0.39。螺殼的長寬比、偏心距與螺高比越低，殼口直徑與螺高比越高，表示螺殼型態越呈流線型，升力係數與阻力係數值也越低。

由水槽實驗中發現，瘤蜷 76cm/sec，石田螺 105cm/sec，川蜷 165cm/sec 為 50% 螺類不被沖走之流速上限。工程設計上也需要維持斷面多樣性以及不同流速提供不同物種棲息。

關鍵詞：淡水螺類，流體力學，生態工程。

ABSTRACT

Ecological engineering should be designed with the living organisms in mind, especially the freshwater snails which are at the bottom layer of the food chains, and they are highly sensitive to the environment. This paper discusses the response and the adaptability of the freshwater snails in different water velocities in view of bio-fluid mechanics to provide information for ecological engineering design.

This study focuses on three species of freshwater snails, which are not rare in Taiwan (*Sinotaia quadratus*, *Semisulcospira libertine*, *Tarebia granifera*). According to our data, each species is different with regard to its shell shape and behaviors for adapting fluid dynamics. Consequently, we can explain why different species have different distributions with various water velocities. The lift coefficient and drag coefficient of the snails in different water velocities can be obtained by experiments. As Reynolds number is 500, the respective drag coefficient of three species is 15.97, 14.76, 10.56; and the respective lift coefficient is 19.26, 17.57, and 18.23. When Reynolds number is 5000, the respective drag coefficient of three species is 1.79, 1.30, 0.91; and the respective lift coefficient is 0.91, 0.46, and 0.39. Therefore, the lower the ratio of shell length to shell width and the ratio of shell eccentric distance to shell height, or the higher the ratio of the diameter of shell cavity to shell height, which means the shell shape is nearly streamlining, the lift coefficient and drag coefficient will be lower.

By the flume experiment, we found that the maximum velocity for the dislodged ratio lower than 50% is 76cm/sec, 105 cm/sec, 165 cm/sec, for *Tarebia granifera*, *Sinotaia quadratus*, *Semisulcospira libertine* respectively. Various water velocities and channel sections should be maintained in engineering design, to provide multiple habitats for different aquatic species.

Keywords: Freshwater snails, Bio-fluid mechanics, Ecological engineering.

一、前言

螺類在食物鏈當中位居於底層，有些保育性昆蟲（例如黃胸黑翅螢 *Luciola* sp.，鹿野氏黑脈螢 *P. kanoi*）或動物也以螺類為主食。再加上其對環境的敏感性高，遷移性低等特性，可以作為環境生態之「指標生物」（趙大衛，2000）。螺類的分布特性不但反應水質，也可直接反映出水理條件的不同。而對淡水螺類而言，其中最重要的就是水流的流速。

對於水中生物而言，水流可以幫助營養物質的輸送與代謝廢物的功能，但同時也會對生物體產生作用力，所以生物體也經常發展出獨特的型態以及行為來適應水流外力。流體對生物體所產生的外力包括阻力、升力與加速度反應力。隨著流速的增加，螺體所需承受的外力也隨之增加，所以在生長在不同的流速的螺類，也會有不同形狀特徵與行為，來適應流體動力的影響（Branch, 1978；Denny, 2000）。

一般來說，水中的底棲性動物會以三種方式

來適應流體動力：發展出流線型的外型，增加應變的能力，增加組織的韌度（林明炤，1995）。對於螺類，則是以殼型、改變攻角的行為、腹足吸附力強度來適應流體動力（Denny, 1989；Grenon and Walker, 1981；Denny, 2000）。本研究也希望對淡水螺類適應流體動力的形態與行為加以分析。

國外對於生物流體力學的相關研究相當豐富，如 Pace (1973)，曾對台灣的螺貝類做過鑑定與調查，並且研究其分布狀況，指出在世界上，台灣為川蜷（*Semisulcospira libertina*）分布之南界。Miller (1974)研究螺類運動方式與腹足吸附行為，他發現腹足的型式不同，其運動之前進波與吸附行為也不同。Grenon and Walker (1981)研究笠螺的正向吸附力與抗剪吸附力的關係，發現笠螺抗剪吸附力約為 20%~30%的正向吸附力。

Alfaro (1999)研究影響一種海岸邊螺科螺類（*Astraea lithopoma*）對流體運動、水深、生存競爭與掠食者之反應，發現體型大的能承受較大的剪力，並認為流體動力是決定淺灘潮間帶螺類分布的最主要因素。

Denny (2000)研究岩岸生長的一種青螺科螺類 (*Lottia gigantea*) 適應海岸邊高流速與水流動力的機制，包括以實驗量測螺的腹足吸附力、壓力、升力與阻力係數，以及沖落的機率分析。他也探討螺殼形狀與流體動力學的關係，發現較低的 H/R (螺殼高與底半徑比值)，對升力影響較大，反之較高的 H/R 對阻力的影響較大，H/R 在等於 1.6 時有最小的沖落風險。

Kaj (2003)也量測五種淡水沉水性植物在水流中所受的阻力，證實莖部的彈性越大其阻力係數越小，在水中所能承受的阻力也較大，彈性越大的水草其阻力係數，隨流速增大的遞減率也越大。陳建志(2002)討論在不同流速下，對川蝸與石田螺的阻力係數以及螺殼攻角的影響，並以沖落流速實驗，建議流速 80cm/sec 為水工設計上讓川蝸不被沖走之上限。

這些研究都偏重於生物流體力學理論探討，但是較缺乏工程上的應用，而近年來，生態深受重視而為工程所必須考慮的重要因子，但工程界卻很欠缺生物與環境間的相關資料以作為施工依據。有鑑於此，本研究即是想要以生物流體力學觀點，探討淡水螺類對於不同流速下所產生生物機械之反應，以及其適應的能力，以提供生態工程設計之參考。

二、研究理論與方法

當一隻螺靜止於水流當中，若在穩定流的狀態下，分析螺所承受的力，主要可以分為兩個部分：第一部分為水流施加的外力，包括升力、阻力、水流浮力，第二部分為螺本身造成的力，包括螺的重力、腹足吸附力、底質間的摩擦力，與底質對螺體的正向力。

(1) 升力：升力的形成，是因流體流經物體時所造成上下壓差的不相等所致，升力值的大小與流體速度的平方，或流體動壓成正比，也與水平於流向的投影面積成正比。

$$L = p_d A_{pl} C_L = \frac{1}{2} C_L A_{pl} \rho U^2 \dots\dots\dots(1)$$

L 為升力(N)

$$p_d = \frac{1}{2} \rho U^2 \text{ 為動壓 (kg/m sec}^2\text{) or (N/m}^2\text{)}$$

ρ 為流體密度 (kg/m³)

U 為流速 (m/sec)

A_{pl} 為水平於流向之投影面積 (m²)

C_L 為升力係數

(2) 阻力：阻力的形成，是因為流體流經物體時所造成物體前後，流況不同，水流壓力差的不相等所致。阻力與流體動壓成正比，也與垂直於流向之投影面積成正比。

$$D = p_d A_{fr} C_D = \frac{1}{2} C_D A_{fr} \rho U^2 \dots\dots\dots(2)$$

D 為阻力(N)

A_{fr} 為垂直於流向之投影面積 (m²)

C_D 為阻力係數

(1)、(2)為流體動力項，生物體在水流之下，除了受到水流對本身所產生的阻力與升力以外，還有加速度反應力，與流體加速度以及生物體本身的運動加速度有關。由於螺類移動相當緩慢，而且水流運動為常態，未產生時間加速度，故相對於阻力與升力是可忽略的(Denny, 1988; Gaylord, 1997)。

(3) 重力：螺本身重量所產生向下的力。

$$W = \rho_{bio} V \dots\dots\dots(3)$$

W 為螺重 (kg)

ρ_{bio} 為螺體密度 (kg/m³)

V 為螺體體積 (m³)

(4) 浮力：螺所受水壓向上的力。

$$B = \rho V \dots\dots\dots(4)$$

B 為浮力 (N)

ρ 為流體密度 (kg/m³)

V 為螺體體積 (m³)

其中螺體體積可視為螺體排出水的體積，流體密度在淡水鹽分較低，本研究以純水的密度代表之。

(5) 靜摩擦力：螺抵抗運動的反向力。

$$F_s = \mu_s N \dots\dots\dots(5)$$

F_s 為靜摩擦力 (N)

μ_s 為靜摩擦係數

N 為正向力(N)

摩擦力又可分為靜摩擦力 F_s 與動摩擦力 F_k ，對應的為靜摩擦係數 μ_s 與動摩擦係數 μ_k ，最大靜摩擦力大於動摩擦力，所以螺一受水流外力啓動即被沖落，所以此處討論的為靜摩擦係數 μ_s 。若以接觸面的潤滑狀態區分，又可分為乾摩擦、邊界摩擦與流體摩擦，故靜摩擦係數與接觸介質間的特性、接觸面積（微觀的接觸面積）、外在荷重、流體黏滯性等多項因子有關，一般認為摩擦力 $F = \mu N^k$ ， $k=2/3 \sim 1$ ，為了簡化還是以最簡單的古典摩擦定律式表示。

(6) 腹足吸附力(T)：螺腹足產生向下吸住底質的力，是生物本身對底質的吸附力，較難以數學方程式表示，因為生物體會藉由降低腹足底部與底質間的滲透壓來增加吸引的能力 (Denny, 2000)。

(7) 正向力(N)：螺向下總力對底質的反作用力。

螺在水中，若需維持不被沖走，則需保持力學平衡，其關係式為：

在 X 方向合力為 0，

$$T+W=B+L+N \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{或 } N=T+W-L-B \dots\dots\dots(7)$$

在 Y 方向合力為 0，

$$F_s = \mu_s N = D \dots\dots\dots(8)$$

將(7)帶入(8)可得

$$\mu_s (T+W-L-B) = D \dots\dots\dots(9)$$

將(1)、(2)代入得

$$\begin{aligned} \mu_s (T + \rho_{bio} V - \frac{1}{2} C_L A_{pl} \rho U^2 - \rho V) \\ = \frac{1}{2} C_D A_{fr} \rho U^2 \end{aligned} \dots\dots\dots(10)$$

當無水流時，討論此時的摩擦係數 μ_s ：

為測定 μ_s 可用垂直拉力 F_1 與水平拉力 F_2 ，當施以向上垂直拉力 F_1 時，在拉起的剎那，腹足產生 T_{max} 吸附力抵抗，

$$F_1 = W + T_{max} \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{或 } T_{max} = F_1 - W \dots\dots\dots(12)$$

當施以水平拉力 F_2 時，假設腹足亦產生 T_{max}

吸附力以提供足夠的摩擦力，

$$\begin{aligned} F_2 = F_s = \mu_s N = \mu_s (W + T_{max}) = \mu_s F_1 \\ \mu_s = F_2 / F_1 \end{aligned} \dots\dots\dots(13)$$

由式(12)，當 F_1 遠大於 W 時，此處的垂直拉力 F_1 可以代表螺的最大正向吸附力，水平拉力 F_2 可以代表螺的最大抗剪吸附力，摩擦係數為兩者間比值。

當有水流時，討論此時的摩擦係數 μ_s * (水流情況下的摩擦係數)：

施以向上垂直拉力 F_1 時，腹足亦產生 T_{max} 吸附力抵抗，在 Y 方向合力為 0，

$$T_{max} + W = B + L + F_1 + N \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{或 } N = T_{max} + W - L - B - F_1 \dots\dots\dots(15)$$

在 X 方向合力為 0，

$$F_s = \mu_s * N = D \dots\dots\dots(16)$$

將(15)代入得

$$F_s = \mu_s * (T_{max} + W - L - B - F_1) = D \dots\dots(17)$$

當施以水平拉力 F_2 時，假設腹足亦產生 T_{max} 吸附力以提供足夠的摩擦力，如圖：

在 X 方向合力為 0，

$$F_s = \mu_s * N = D + F_2 \dots\dots\dots(18)$$

將(1)、(2)代入得

$$\mu_s * (T_{max} + \rho_{bio} V - \frac{1}{2} C_L A_{pl} \rho U^2 - \rho V) \dots\dots\dots(19)$$

$$= \frac{1}{2} C_D A_{fr} \rho U^2 + F_2$$

升力與阻力係數：

由(1)、(2)可得：

$$C_L = \frac{L}{\rho_d A_{pl}} \dots\dots\dots(20)$$

$$C_D = \frac{D}{\rho_d A_{fr}} \dots\dots\dots(21)$$

以阻力來說，可以分為壓力阻力，與摩擦阻力，壓力阻力起因於流體慣性力與黏滯力，為作用於物體在平行流向的壓力之總和，理論上，主要與正向水流的投影面積成正比，且與水流速度的平方成正比。摩擦阻力起因於流體

黏滯性，為黏滯性作用於物體表面的邊界層所產生的剪力所形成，與物體表面的粗糙度有關，用微觀的角度看，即是與總濕潤表面積有關，理論上是與速度成正比。在低雷諾數時，摩擦阻力佔重要的比例，於較高雷諾數（ $Re > 10^5$ ）時，由於慣性力的影響遠較黏滯性來的大，所以壓力阻力會比較顯著。而這兩者的差異也都反應於阻力係數上。

如上所述，流體的阻力係數與流體的慣性力與黏滯力有關，包括因子有：物體特性長度(l)、流體流速(U)、流體黏滯性(μ)與流體密度(ρ) (Vogel, 1994)，所以阻力可以寫成：

$$D = \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_{fr} \right) \left(\frac{\rho l U}{\mu} \right)^a \dots\dots\dots(22)$$

若升力也以同樣方式討論，可以寫成：

$$L = \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_{pl} \right) \left(\frac{\rho l U}{\mu} \right)^b \dots\dots\dots(23)$$

而這些因子可以雷諾數(Re)表示，比較(2-2)與(2-6)可得：

$$C_D \propto Re^a \dots\dots\dots(24)$$

$$C_L \propto Re^b \dots\dots\dots(25)$$

可由此式探討阻力係數或升力係數對雷諾數的關係。

三、試驗與方法

所選的實驗螺類有：

石田螺 (*Sinotia quadratus*)

川 蝸 (*Semisulcospira libertina*)

瘤 蝸 (*Tarebia granifera*)

三種螺類在尺寸與外形上各異，分布上石田螺喜好淡水湖泊、池塘、水田等，川蝸喜好乾淨且流速快的淡水溪流，渠道或池塘也有分布，瘤蝸較常出現於河口緩流區，此三種螺類皆為台灣各水域常見之螺類(Pace, 1973；邱郁文, 2000)。

量測的數據有螺殼長(L_s)、螺殼寬(B_s)、螺殼高(H)、殼口直徑(D_s)、偏心距(E)、重量(W)及體積(V)。長度及寬度用游標卡尺(精確度 $\pm 0.001\text{cm}$)量測，殼口直徑為假設殼口為橢圓，量測殼口

長、寬後再換算成相對於圓面積的直徑，偏心距與螺殼高的量測，是使螺殼殼口向下平貼於底部，再如圖示上方式量測。重量則用電子秤(精確度 $\pm 0.001\text{g}$)測得，體積則利用小量筒(精確度 $\pm 0.1\text{cm}$)裝水，紀錄放入螺之前與之後的體積，其差值即為螺體體積。螺類各項尺寸可用在比較形狀上的差異，重量與體積則可推求密度。

利用數位相機，透過透明壓克力板，拍攝螺類底部腹足面積，套用 AutoCad 中的面積計算功能，依照所測得的面積像素與尺的像素之比例，即可計算出實際底部腹足面積大小。投影面積分為垂直投影與水平投影面積，拍攝過程需放置尺標當作比例尺。

以電子數位張力計(Digital force gauge FGE-0 5X)分別量測螺類在無水流狀態，與有水流狀態的吸附力。在壓克力板上以垂直與水平兩種方向進行實驗，垂直拉力或水平拉力各進行二到三次取平均值。實驗前，以釣魚線綁繫於螺殼背面，再以快乾膠黏著，放置於壓克力平板上，待螺腹足完全貼緊平板，再以拉力計拉之。拉力的時間會影響拉力計讀值，故需保持速率均一與快速(一隻 2~5sec 內拉動)。分別記錄垂直拔起時的最大拉力(F_1)與水平滑動時的最大拉力(F_2)。水流狀態控制流速在 2、5、10、20cm/sec，進行水平與垂直方向的拉螺實驗，並記錄水深與流速。

實驗進行於水槽當中，水槽的渠道材質為壓克力板，以氯仿粘著製成，設計為一循環水流系統，動力來自於底下的幫浦，幫浦最大出水量為 35.36 (l/sec)，水槽通水區域長度 150cm，高 30cm，寬 20cm。水流大小經由變頻器控制輸入電壓來進行微調，最大流速約為 100cm/sec (距渠底 1cm 之流速)。渠道前方為頭水箱，內部設置消能格網以及洗衣球，減緩水流力道，以免水流衝力過大，造成出流流況不穩定。在擋水板及頭水箱間擺設 20 公分長的蜂巢網狀格網管，導正入流水源流向，使水流平緩流入通水區域。通水區域中央有設計一凹槽，供裝置阻力感應器及升力感應器之用。水槽裝設地點於台大校區內的室外實驗地點，但設置有遮雨棚，水源則來自於學校供應的自來水。

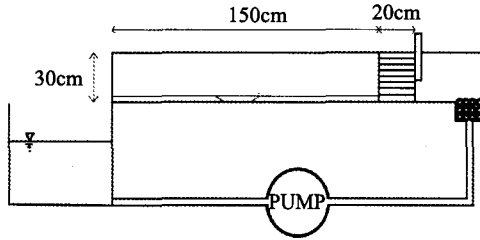


圖 1 水槽示意圖

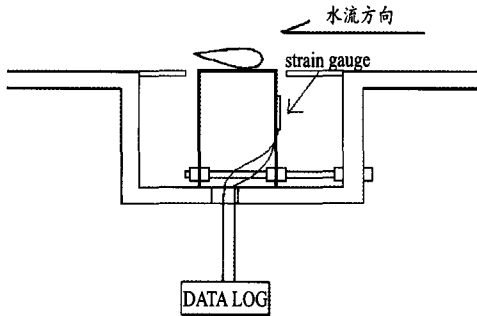


圖 2 阻力感應元件組

流速計為 2 維電磁式流速計，流速讀取範圍 0~250cm/sec，讀取距渠底 1cm 之流速。

阻力感測元件組分為兩個部分，一為金屬材質薄鋁板，一為應變計，應變規型號為防水型 (KFW-5-120-D16-11-L1M2S)。首先將應變規貼於薄鋁板上，貼成惠斯頓電橋型式，去感應金屬材質的變形量與電阻的關係，測定原理為利用三個固定電阻與一個可變電阻，利用線路接於訊號輸出器(型號：Omega DP41-S)上，當材料發生形變，電阻值便產生改變，訊號輸出器上變可讀取相對應的電壓值。整組元件設計圖如下，設計為垂直方向固定，使其只能承受水平方向外力而產生變形，當螺吸附於鋁板上，鋁板會因受到水流對螺體的阻力與水流對鋁板的剪力而變形，故實驗中扣除水流對鋁板的剪力。

實驗時將螺放置於阻力感應元件上，調整水槽變頻器改變水流之流速，每間隔固定的時距(約 20sec)即改變變頻器頻率讀取 data log 的壓力差值、螺殼攻角及流速。在無螺狀況下也進行三組讀值，以作為平板剪力的扣除。並且使用電子張力計與阻力感應組，進行力檢定，作出壓差與

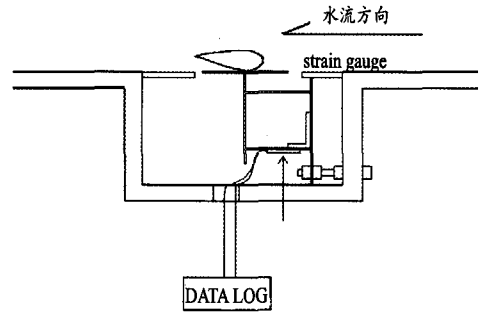


圖 3 升力感應元件組

力的檢定線，以供換算出相對的阻力。

阻力實驗一共觀察紀錄石田螺 4 隻，重量介於 1.376g 至 2.791g 之間、川蜷 6 隻，重量介於 0.534g 至 1.324g 之間、瘤蜷 7 隻重量介於 0.304g 至 0.945g 之間。

升力感測元件組原理與阻力感應元件組類似，水平裝置應變計於鋁板底部，鋁板設計為水平方向固定，使其只能承受垂直方向外力而產生變形。並裝置於水槽中進行實驗。

實驗進行與阻力量測相似，將螺放置於升力感應元件上，調整水槽變頻器改變水流之流速，每間隔固定的時距(約 20sec)即改變變頻器頻率讀取 data log 的壓力差值、螺殼攻角及流速。並且使用電子張力計與升力感應組，進行力檢定。

升力實驗一共觀察紀錄石田螺 3 隻重量介於 2.126g 至 3.338g 之間、川蜷 5 隻，重量介於 0.578g 至 1.333g 之間、瘤蜷 5 隻重量介於 0.515g 至 0.986g 之間。

每次放置三~四隻螺於水槽行水區之上，放置於水槽的中後段，為了避免螺體間的相互干擾，每隻螺保持一段間隔。待螺伸出螺殼後，調整變頻器頻率使流速依序的增加，在 0~100 cm/sec 之間(水槽流速上限)，共選用 11 個不同的流速，每個流速變換之間間隔約一分鐘。記錄螺沖落時之流速。若超過 100cm/sec 未被沖落，則以每半分鐘為一間隔，記錄其被沖落之耐久時間。實驗所測之流速為距離水槽底部 1cm 之流速，平均流速則以流速計量測並繪製速度剖面，由速度剖面換算可得。

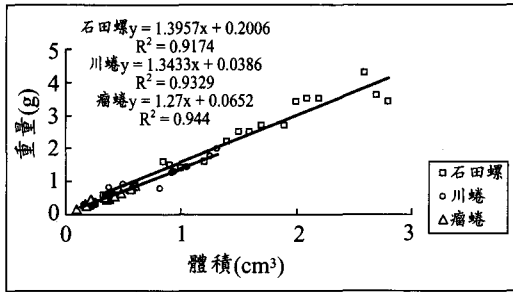


圖 4 螺類重量對體積關係圖

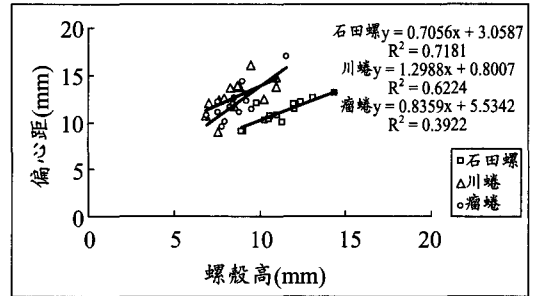


圖 6 偏心距與螺殼高關係

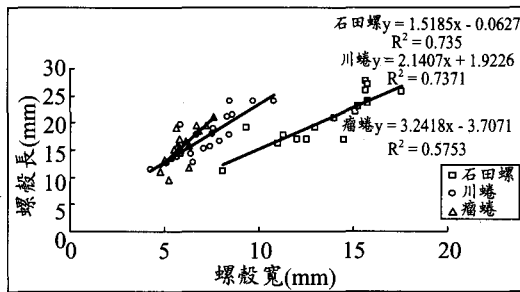


圖 5 螺類長寬關係

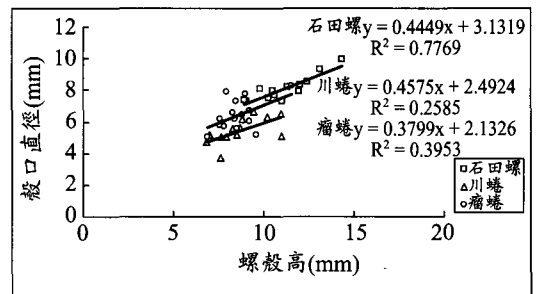


圖 7 殼口直徑與螺殼高關係

四、結果與討論

4.1 螺類形狀與密度的特性：

由圖(4)顯示三種供試螺類體積與重量的關係，螺類的體積越大，重量幾乎等比例的增加，石田螺增加的比率最大，其次分別為川蜷與瘤蜷。

由圖(5)螺類長寬關係可以明顯看出三種螺類細長程度上的差異，長寬比越高，細長的程度越顯著。而瘤蜷高於川蜷，而瘤蜷與川蜷均高於石田螺許多。長寬比越高，則物體越類似於流線型體。

由圖(6)偏心距與螺高關係，可以反映出螺殼尾端傾斜的程度，偏心距與螺高比越大，表示殼尾越傾斜，螺殼尾端越接近水平，圖上所示，瘤蜷最為傾斜，川蜷次之，而石田螺較不傾斜，其殼軸的形態上較為直立。

由圖(7)殼口直徑與螺高關係可以反映出殼尾傾斜以及殼尾拉長的程度，一般而言殼尾越直立或越拉長，則殼口直徑與螺高比值越小，圖上所示，石田螺大於川蜷大於瘤蜷。

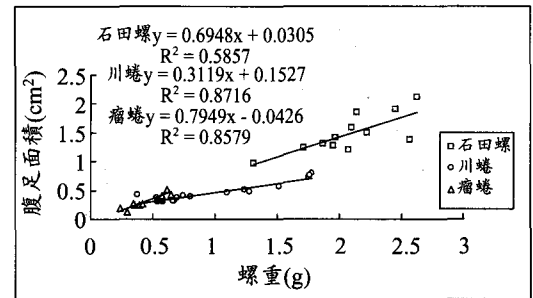


圖 8 螺類腹足面積與螺重關係

由圖(8)螺類腹足面積與螺重關係，可以看出川蜷的斜率較為平緩，表示其腹足面積隨體型增大的增加程度較小，而由於三種螺類在體型大小上就具有差異，所以腹足面積石田螺也大於兩者很多，川蜷其次，瘤蜷最小。

由圖(9)螺類垂直投影與螺重關係可以看出石田螺大於川蜷大於瘤蜷。

圖(10)螺類水平投影與螺重關係可以看出體型與水平投影之間的關係，體型大的石田螺投影面積最大，川蜷次之，瘤蜷最小。斜率為水平投影隨著體型的增加率，瘤蜷為最高，川蜷次之，石田螺最低。

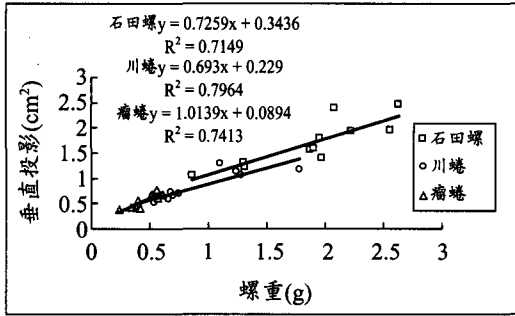


圖 9 螺類垂直投影與螺重關係

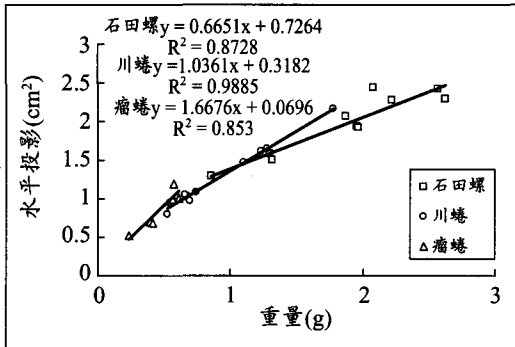


圖 10 螺類水平投影與螺重關係

4-2 腹足最大吸附力與摩擦係數：

量測垂直拉力 F_1 與水平拉力 F_2 ，可由式(13)換算出最大吸附力以及最大靜摩擦係數。正向吸附力可以式(11)以 F_1 表示：

由圖(11)最大正向吸附力對重量關係可以看出由於石田螺體型較大，所以正向吸附力也較大，最大可以達到 0.5~1N，川蜷大於瘤蜷，其值在 0~0.2N 之間。

圖(12)螺類最大抗剪吸附力對重量關係可知，抗剪吸附力為石田螺最大，川蜷其次，瘤蜷最小，而即使是在重量相等的情況石田螺還是具有較大的抗剪吸附力，川蜷次之，瘤蜷最差，所以不只體型大小，生物本身的差異性也決定吸附力大小。比較圖 11 與圖 12，三種螺類最大正向吸附力都約為最大抗剪吸附力的 3~6 倍，此結果也與 Grenon and Walker (1981)針對笠螺實驗的結果相似。

由圖(13)摩擦係數對重量可以看出三種螺類的摩擦係數對重量的增加而有遞減的現象，三

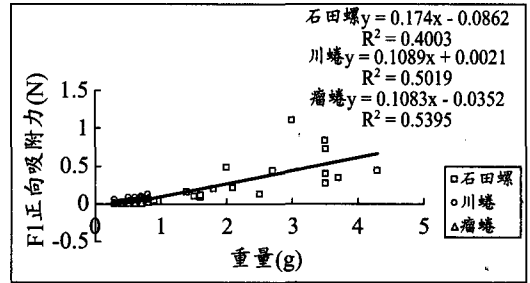


圖 11 最大正向吸附力對重量關係

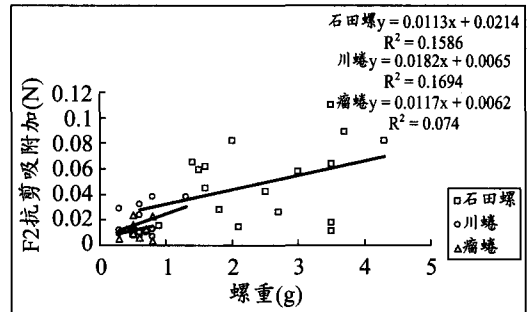


圖 12 螺類最大抗剪吸附力對重量關係

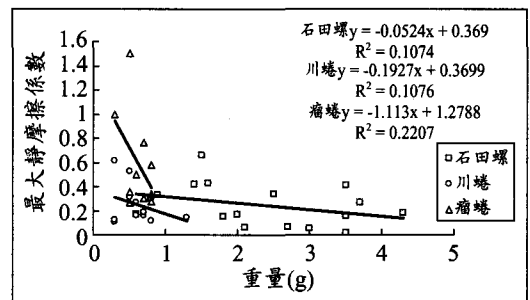


圖 13 最大靜摩擦係數(μs)與重量關係

者的差異為，無流速下的摩擦係數值，瘤蜷大於石田螺與川蜷，且瘤蜷摩擦係數對重量增加的遞減率最大，川蜷次之，石田螺最低。

由圖(14)低流速下摩擦係數(μs)對重量的關係發現在低流速下關係很不顯著。低流速下的摩擦係數值在 0.2~0.4 之間，大小為川蜷大於石田螺大於瘤蜷。

4-3 螺類流體力學實驗：

由圖(15)可以很明顯的看出石田螺所受阻力大於川蜷大於瘤蜷，在流速大於 50cm/sec 時，

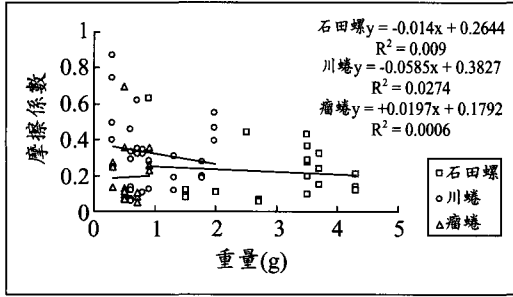


圖 14 低流速下摩擦係數(μ_s)對重量關係

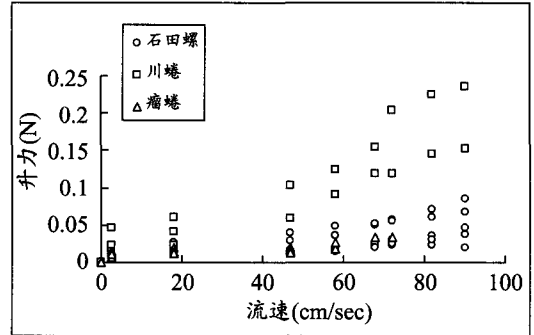


圖 16 升力對流速關係圖

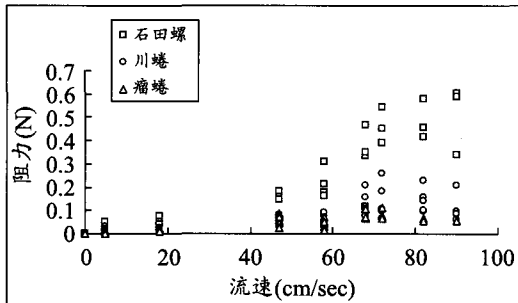


圖 15 阻力對流速關係圖

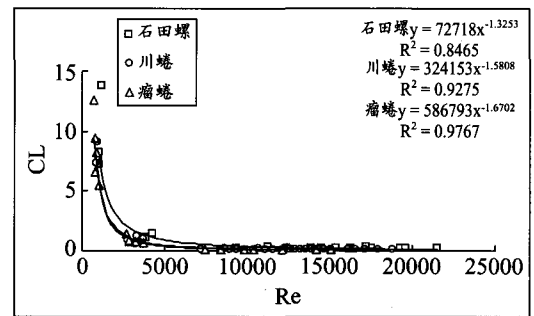


圖 17 升力係數對雷諾數關係圖

石田螺阻力值在 0.3~0.6N，川蜷為 0.1~0.3N，瘤蜷為 0.04~0.1N。

由圖(16)看出升力大小關係依然是石田螺大於川蜷大於瘤蜷，在流速大於 50cm/sec 時，石田螺阻力在 0.1~0.25N 之間，川蜷在 0.08N 以下，瘤蜷在 0.05N 以下。

由圖(15)、圖(16)可知對流速的增加，阻力以及升力皆有明顯的增加，而阻力值的大小為升力值的 2~4 倍，所以推測實際情況螺體抵抗的外力絕大部分為水流阻力而非升力。

4-4 升力係數與阻力係數：

阻力係數與升力係數由(20)、(21)求得，投影面積以螺類投影面積對螺重的回歸曲線計算，動壓值以流速計量測距渠道底部 1 公分的流速計算。阻力可以分為摩擦阻力與壓力阻力，而壓力阻力可以反應形狀上的差異，根據 Vogel (1994)， $Re=100$ 時，pressure drag 佔 71%， $Re=10000$ 時，pressure drag 可佔 total drag 的 97%，故主要針對形狀因子作討論。

由圖(17)升力係數對雷諾數關係討論分別討論在 $5000 < Re < 20000$ ； $500 < Re < 5000$ ； $200 < Re < 500$ 下三種類型的比較：

$5000 < Re < 20000$ 石田螺 C_L 為 0.15~0.91

川蜷 C_L 為 0.05~0.46

瘤蜷 C_L 為 0.04~0.39

比較為石田螺最大，川蜷次之，瘤蜷最小。

$500 < Re < 5000$ 石田螺 C_L 為 0.91~19.26

川蜷 C_L 為 0.46~17.55

瘤蜷 C_L 為 0.39~18.23

也是為石田螺最大，川蜷次之，瘤蜷最小。

$200 < Re < 500$ 石田螺 C_L 為 19.26~64.88

川蜷 C_L 為 17.57~74.69

瘤蜷 C_L 為 18.23~84.20

低雷諾數下，升力係數為瘤蜷大於川蜷，大於石田螺。

由此比較可知，就升力的角度而言，石田螺較適合於低流速，瘤蜷較適合於高流速，川蜷居於其中。

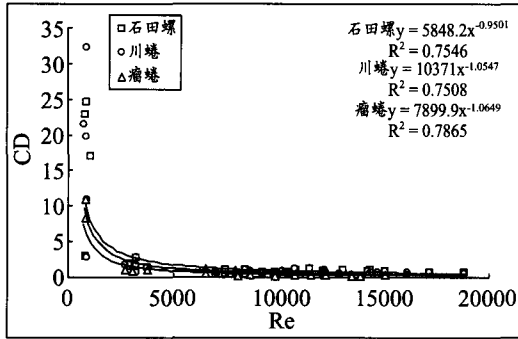


圖 18 阻力係數對雷諾數關係圖

式(24)當中的 b 值，石田螺 b 值為-1.325，川蝸為-1.581，瘤蝸為-1.670，此值可以顯示三種螺類對流速的適應性，其值越低，升力係數對流速增加的遞減速率也越快。也顯示瘤蝸就升力而言，對流速增加的適應能力最好，川蝸次之，石田螺最差。

由圖(18)阻力係數對雷諾數關係討論分別討論在 $5000 < Re < 20000$; $500 < Re < 5000$; $200 < Re < 500$ 下三種螺類的比較：

$5000 < Re < 20000$ 石田螺 C_D 為 0.48~1.79

川蝸 C_D 為 0.30~1.30

瘤蝸 C_D 為 0.21~0.91

比較為石田螺最大，川蝸次之，瘤蝸最小。

$500 < Re < 5000$ 石田螺 C_D 為 1.79~15.97

川蝸 C_D 為 1.30~14.76

瘤蝸 C_D 為 0.91~10.56

也是石田螺最大，川蝸次之，瘤蝸最小。

$200 < Re < 500$ 石田螺 C_D 為 15.97~38.13

川蝸 C_D 為 14.76~38.81

瘤蝸 C_D 為 10.56~28.00

為川蝸最大，石田螺次之，瘤蝸最小。

所以由阻力的角度來說，不管高流速或低流速，瘤蝸都有最小的阻力係數值，高流速時，川蝸阻力係數小於石田螺，低流速時，石田螺阻力係數低於川蝸。

式(23)當中的 a 值，石田螺 a 值為-0.95，川蝸為-1.05，瘤蝸為-1.06，其值越低，阻力係數對流速增加的遞減速率也越快，所以，瘤蝸就阻力而言，對流速增加的適應能力最好，川蝸次之，

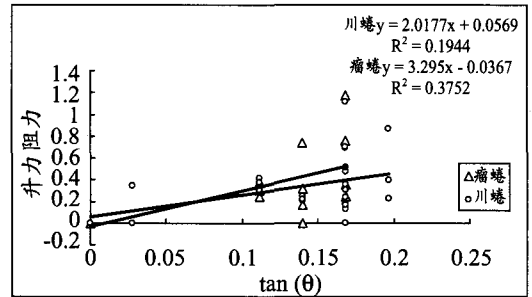


圖 19 升力阻力比值與攻角(θ)關係

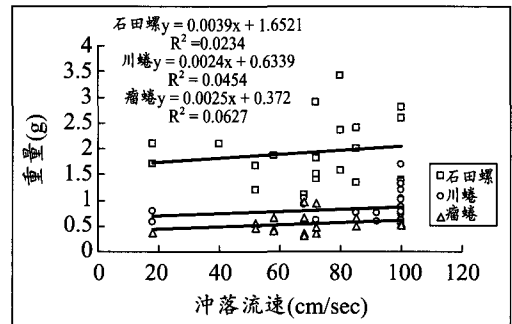


圖 20 螺沖落流速與重量關係圖

石田螺最差。

若將上述之結果，與圖 5、6、7 討論螺殼形狀的結果相比較，可以得到：(1)長寬比(L_s/B_s)越高，阻力係數值與升力係數值越低。(2)偏心距與螺高比(E/H)越高，阻力係數值與升力係數值越低。(3)殼口直徑與螺高比(D_s/H)越高，阻力係數值與升力係數值也越高。所以殼形較為細長，殼軸較為傾斜或接近於水平，殼尾形態越長，對於阻力或升力皆為形態上適應能力較佳的殼形。也說明了形狀上，對水流的適應力為瘤蝸最佳，川蝸其次，石田螺最差。

除了形狀上，螺類在行為上也可以由圖(19)升力阻力比與攻角關係看出螺殼攻角會隨升力與阻力的比值增大而抬升，瘤蝸與川蝸均有此行為，而石田螺在流速變化之下攻角並沒有變化。所以攻角變化行為上是受流體動力直接影響的。

4-5 螺類最大沖落流速

由圖(20)螺沖落流速與重量關係可知，三種螺類沖落流速，與螺重量並無顯著的關係，因為

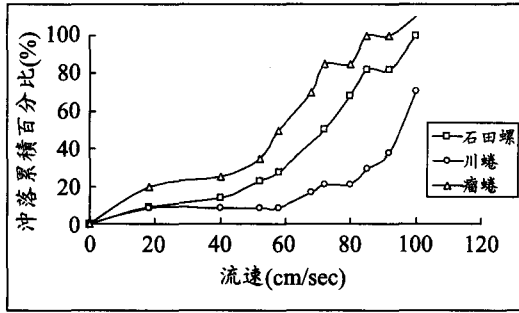


圖 21 沖落累積百分比與流速關係

體型較大的螺類所受的的水流外力也較大。

圖(21)為沖落累積百分比與流速關係，石田螺與瘤蝸在最大流速 100cm/sec 以內，皆達到 100%被沖落(100cm/sec 時 5 分鐘以內被沖落)，而川蝸在 100cm/sec (5 分鐘內)只達到 71%被沖落。此實驗中，川蝸最耐高流速，其次為石田螺，瘤蝸最不耐流速。

由圖(21)可以求出三種螺類 50%沖落流速，石田螺 72cm/sec，川蝸 95cm/sec，瘤蝸 64cm/sec 下，會有半數被沖落，此流速為距離渠底 1cm 之流速，若換算為水槽之平均流速，則石田螺、川蝸、瘤蝸的 50%沖落流速分別為 105cm/sec、165cm/sec、76cm/sec。

五、結 論

1. 三種螺類在吸附能力比較，無論是正向吸附力或抗剪吸附力，均為石田螺大於川蝸，而川蝸大於瘤蝸，所以就吸附力觀點而言，對水流外力的適應性為石田螺最佳，川蝸次之，瘤蝸最差。
2. 吸附力實驗所求得的水向抗剪吸附力大小，約為正向吸附力的 20%~40%，低流速下的摩擦係數值在 0.2~0.4 之間。
3. 實驗所得的阻力值約為升力值大小的 2~4 倍，而正向吸附力又約為抗剪吸附力的 3~6 倍，表示螺類抵抗水流外力以阻力為主，而沖落情形也大多為抗剪吸附力無法抵抗阻力而產生滑動而沖落。
4. 在中雷諾數下 ($200 < Re < 500$)，石田螺的升力係數值小於川蝸與瘤蝸，所以就升力係

數而言，石田螺對低流速的適應較佳。在高雷諾數下 ($Re > 5000$)，就升力係數而言，瘤蝸適應力最佳，川蝸次之，石田螺適應力最低。就阻力而言，無論在高雷諾數或低雷諾數下，瘤蝸的適應力均最佳，川蝸再高流速下優於石田螺，在低流速下劣於石田螺。

5. 三個形狀因子與阻力係數及升力係數均有明顯的關係，可以解釋瘤蝸對流速的型態適應力為最好，川蝸次之，石田螺最差，其中，型態上的適應包括了較高的長寬比、較高的偏心距與螺高比，與較低的殼口直徑與螺高比。
6. 除了型態上，螺類在行為上也有適應水流的能力，而最主要的行為就是攻角的改變。在無流速時，攻角幾近於零以達到省力，流速增加，攻角的改變不一定明顯的上升或下降，而是對水流外力的合力夾角作出適應，川蝸與瘤蝸均有此適應的行為，而石田螺則沒有。
7. 綜合以上所述，石田螺吸附力最大，形狀上卻不能有效的適應水流外力。瘤蝸在外形上最為適應水流外力，但吸附力太小。川蝸在外型上與吸附能力上均較佳，所以沖落流速高於其他兩者。
8. 吸附力值在實驗過程中容易被低估，尤其是抗剪吸附力，其一是因為最大靜摩擦產生在瞬間，讀值上容易產生誤差，其二是螺類敏感的特性，導致實驗狀況不如實際於水流的受力狀況。
9. 三種螺類的 50%水槽平均沖落流速分別為：石田螺 105cm/sec，川蝸 165cm/sec，瘤蝸 76cm/sec，可以針對現場不同螺種採取不同的設計流速。

六、建議

由三種螺類對流速適應行為的討論，做出以下的建議：

1. 維持同一斷面有多樣的流速，使不同螺種亦能生存其中，所以施工當中不能將斷面整治太過平整與一致，深水或淺水，急流或淺灘

都要有。

2. 需要避免流速在區段上形成斷層，以提供螺類適應上的緩衝區，所以設計坡度上需避免過陡。
3. 若以瘤螯為主要保護物種時，段面平均流速於水槽實驗的設計上限為 76cm/sec，工程中，可以採增加底質粗糙度，或植生方法幫助瘤螯吸附。
4. 若以石田螺為保護物種時，則湖泊、池塘或水田的前後溪流應避免過高的流速，以提供其緩衝區，段面平均流速於水槽實驗的設計上限為 105cm/sec，可提供現場流速設計之參考。
5. 以川螯為主要保護物種時，段面平均流速於水槽實驗的設計上限為 165cm/sec，可提供現場流速設計之參考。
6. 施工過程，應避免水流的阻隔，以幫助物種的行動與繁衍。
7. 減少人為的干擾。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會「潮間帶螺類對熱逆境的防避機制(1/2)」(NSC91-2523-S-002-0025)計畫經費補助，使研究得以順利完成在此致上感謝。

參考文獻

1. 吳書平，1999。哈盆溪之川螯(*Semisulcospira libertina*)生殖生態研究，國立臺灣大學動物學研究所碩士論文，台北市。
2. 林明炤，1996。軟珊瑚的生物力學研究：體型態、機械特性和水流的關係。國立臺灣大學海洋研究所博士論文，台北市。
3. 陳建志，2002。流體動力影響川螯與石田螺環境適應與吸附行為。國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，台北市。
4. 趙大衛，2000。貝類生物指標在環境變遷及污染評估上的應用，環境教育季刊 (42)：67-76。
5. Alexander, D. E. and T. Chen, 1990. Comparison of swimming speed and hydrodynamic drag in two species of *Idotea* (*Isopoda*). *Journal of Crustacean Biology*, Vol. 10. p. 406-412.
6. Alfaro, A. C. and R. C. Carpenter, 1999. Physical and biological influencing zonation patterns of subtidal population of marine snail, *Astraea* (*Lithopoma*) *undosa* Wood 1828. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 240. p. 259-283.
7. Boudreau, B. P. and B. B. Jorgensen, 2001. *The Benthic Boundary Layer~ Transport Processes and Biogeochemistry*, Oxford University Press, Oxford, U.S.A.
8. Branch, G. M. and A. C. Marsh, 1978. Tenacity and shell shape in six *Patella* species: adaptive features., *Journal of Experimental Marine Biological and Ecology*, Vol. 34. p. 111-130.
9. Daugherty, R. L. and J. B. Franzini, 1980. *Fluid Mechanics with Engineer Application*, The South Book Company Press, 564pp. U.S.A.
10. Denny, M. W. and C. A. Blanchette, 2000. Hydrodynamics, shell shape, behavior and survivorship in the owl limpet *Lottia gigantean*. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 203, p. 2623-2639.
11. Denny, M. W., 2000. Limit to optimization : fluid dynamics, adhesive strength and the evolution of shape in limpet shells. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 203, p. 2603-2622.
12. Denny, M. W., 1988, *Biology and the Mechanics of The Wave-swept Environment*, Princeton University Press, Princeton, U. S. A.
13. Denny, M. W., T. L. Daniel and M. A. R. Koehl, 1985, Mechanical limits to size in water-swept organisms, *Ecological Monogr.*, Vol. 55. p. 69-102.
14. Denny, M. W., 1989. A limpet shell that reduces drag: laboratory demonstration of a hydrodynamic mechanism and an exploration of its effectiveness in nature., *Canada Journal of*

- Zoogyl.*, Vol. 67. p. 2098-2106.
15. Dillon JR. R. T., 2000. The Ecology of Freshwater Molluscs. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
 16. Emily, C. B. and M. G. John, 1997. Strategies for life in flow: tenacity, morphometry and probability of dislodgment of two *Mytilus* species. *Marine Ecology.*, Vol. 159. p. 197-208.
 21. Grenon J.-F. and G. Walker 1981. The tenacity of the limpet, *Patella Vulgata* L.: an experimental approach. *J. Experimental Marine Biological Ecology.*, Vol. 54, p. 277-308.
 22. Kaj S.-J., 2003. Drag and reconfiguration of freshwater macrophytes. *Freshwater Biology.*, Vol. 48, p. 271-283.
 23. Martin, W. 1996. Fouled snails in flow: potential of epibionts on *Littorina littorea* to increase drag and reduce snail growth rate., *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 138, 157-168.
 24. Miller, S. L. 1974. Adaptive design of locomotion and foot form in prosobranch gastropods. *J. Experimental Marine Biological Ecology.*, Vol 14, p. 99-156.
 25. Pace, G. L. 1973. The freshwater snail of Taiwan (Formosa). *Nalacological Review. Suppl.* 1.1-118.
 26. Vogel, S., 1994. Life in Moving Fluids: *The Physical Biology of Flow.*, Princeton University Press, Princeton, U.S.A.

收稿日期：民國 92 年 7 月 14 日
修正日期：民國 92 年 9 月 3 日
接受日期：民國 92 年 9 月 8 日