

潮間帶螺類之螺殼形態對其熱收支的影響

Effects of the Shell Morphology to the Heat Budget of an Intertidal Snail (*Batillaria zonalis*)

國立台灣大學生物環境系統工程學系
碩士

高裕群

Yu-Chun Kao

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

螺殼形態對其熱收支的影響可以表面反照率以及紐塞爾數(Nusselt number)與雷諾數(Reynolds number)的關係量化；本研究中量化並比較了潮間帶的燒酒海蜷與另一種淡水螺川蜷之螺殼形態對其熱收支的影響。燒酒海蜷的螺殼顏色較暗，但在螺殼上的白色橫帶及粗糙螺殼表面影響下，平均表面反照率仍高達 22.4%，優於整體顏色較淡，平均表面反照率為 12.0%的川蜷。由於迎風方向的不同，燒酒海蜷紐塞爾數與雷諾數的關係可以表為三種形式；在殼口、殼頂及側面迎風的狀況下，紐塞爾數與雷諾數的關係分別為：

$$\text{Nu} = 0.34\text{Re}^{0.61}, R^2 = 0.79$$

$$\text{Nu} = 0.64\text{Re}^{0.59}, R^2 = 0.79$$

$$\text{Nu} = 0.49\text{Re}^{0.59}, R^2 = 0.77$$

而川蜷在在殼口、殼頂及側面迎風的狀況下，紐塞爾數與雷諾數的關係分別為：

$$\text{Nu} = 0.25\text{Re}^{0.62}, R^2 = 0.77$$

$$\text{Nu} = 0.46\text{Re}^{0.54}, R^2 = 0.62$$

$$\text{Nu} = 0.18\text{Re}^{0.59}, R^2 = 0.78$$

此結果顯示燒酒海蜷有很強的對流散熱能力，這是因為其螺殼上許多與橫肋交錯瘤狀縱肋，造成副流而增加了熱交換的機會所致。比較川蜷及其他小型變溫動物的對流散熱能力，顯示表面光滑且尺寸相近的動物，形狀差異並不會使對流散熱能力產生顯著的不同，表面的粗糙度才是對流散熱能力產生差異的關鍵。燒酒海蜷螺殼上的白色橫帶，以及螺肋與瘤狀縱肋造成的粗糙螺殼，使其擁有較高的表面反照率以及良好的對流散熱能力；此一特殊的形態幫助其適應潮間帶的熱逆境，可以說是長期演化下最適當的結果。

關鍵詞：燒酒海蜷，川蜷，表面反照率，紐塞爾數，雷諾數。

ABSTRACT

Effects of the shell morphology to the heat budget of the snail can be quantified by the surface reflectivity and the relationship between Nusselt number (Nu) and Reynolds number (Re). In this study, effects of the shell morphologies to the heat budgets of an intertidal snail (*Batillaria zonalis*) and a freshwater snail (*Semisulcospira libertina*) were investigated and compared. Although the shell of the *Batillaria zonalis* is darker, its rougher surface with white stripes of the shell contributes the *Batillaria zonalis* a surface reflectivity of 22.4% higher than that of *Semisulcospira libertina*, which has a value of 12.0%. Due to the difference of wind direction, the relationships between Nusselt number and Reynolds number of the *Batillaria zonalis* shall be expressed in three forms. When the apex, anterior, and side orientated to the wind, the Nu/Re relationships of the *Batillaria zonalis* can be respectively expressed as:

$$\text{Nu} = 0.34\text{Re}^{0.61}, \quad R^2 = 0.79$$

$$\text{Nu} = 0.64\text{Re}^{0.59}, \quad R^2 = 0.79$$

$$\text{Nu} = 0.49\text{Re}^{0.59}, \quad R^2 = 0.77$$

When the apex, anterior, and side orientated to the wind, the Nu/Re relationships of the *Semisulcospira libertina* can be respectively expressed as:

$$\text{Nu} = 0.25\text{Re}^{0.62}, \quad R^2 = 0.77$$

$$\text{Nu} = 0.46\text{Re}^{0.54}, \quad R^2 = 0.62$$

$$\text{Nu} = 0.18\text{Re}^{0.59}, \quad R^2 = 0.78$$

These relationships indicated that the *Batillaria zonalis* has a strong convective cooling ability. The longitudinal granulated ribs crossed by the cords on its shell result in a secondary flow being superimposed on the main flow, and thus the heat has a greater chance to exchange. Comparing the convective cooling ability of the *Semisulcospira libertina* and those of other small poikilothermal animals indicates the animals with smooth surfaces and of similar sizes will have similar convective cooling ability. Therefore, significant differences between animals' convective cooling abilities do not result from the different shapes but from the differences of surface roughness. The rougher surface with longitudinal granulated ribs crossed by cords and white stripes of the shell offer the *Batillaria zonalis* a high surface reflectivity and strong convective cooling ability. This special shell morphology aids them to avoid the heat stress in the intertidal zone and is the most appropriate result of evolution.

Keywords: *Batillaria zonalis*, *Semisulcospira libertina*, Surface reflectivity, Nusselt number, Reynolds number.

一、前言

潮間帶的螺類，通常在形態上(morphological)、生理構造上與行為上具有特殊的方法與機制，以抵抗波浪的沖擊與受到潮汐影響而變化劇

烈的環境(Garrity, 1984)。

熱逆境是潮間帶螺類所必須克服的主要物理性危害之一，在亞熱帶及熱帶地區，熱逆境對於潮間帶生物的影響在於過熱的潛勢，Hofmann與 Somero(1995)便發現潮間帶的貽貝類會因為

溫度過高而導致組織上的傷害。潮汐造成潮間生物每天規律性體溫的劇烈變化，漲潮時潮間帶生物被海水浸沒，其體溫與海水溫度一致；但在退潮時，潮間帶生物暴露在空氣中，其體溫可能會高於海水溫度 15°C 以上(Seed and Suchanek, 1992)。對於熱逆境的適應性也被證實為影響許多潮間帶無脊椎動物分佈的主要因子，例如藤壺類(*Chthamalus* spp. 與 *Semibalanus* spp., Wethey, 1984)、貽貝類(*Mytilus* spp., Seed and Suchanek, 1992; Hofmann and Somero, 1996)、笠螺類(*Cellana grata*, Williams and Morritt, 1995)、玉黍螺類(*Littorina sitkana*, Jones and Boulding, 1999)等。

沈重的螺殼對於螺類的移動性(mobility)造成阻礙，使得潮間帶的螺類無法如同昆蟲與爬蟲類一般，可藉由行為的調整以適應其周遭的環境(Berwaerts et al. 2001; Hazel, 2002; Forsman et al. 2002)。因此，潮間帶的螺類必須選擇適當的棲地或是藉由形態上的改變以適應過高溫度造成的熱逆境。

變溫動物的體溫是由其所接收的能量所控制(Angilletta Jr. et al. 2002)，能量經由不同的熱傳遞機被潮間帶螺類接收或釋放。其收支情形可以下式表示：

$$Q_{stored} = Q_{sol} + Q_{long} + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{evap} \dots\dots\dots(1)$$

其中 Q_{cond} 、 Q_{conv} 、 Q_{evap} 、 Q_{sol} 、 Q_{long} 分別為熱經由傳導、強制熱對流、蒸發散、太陽短波輻射和長波輻射等不同機制進入或離開的速率， Q_{stored} 是熱貯存於螺體內的量隨時間變化率。Helmuth (1998)、高裕群(2002)研究結果顯示，在潮間帶的極端溫度條件發生時，太陽短波輻射、強制熱對流、蒸發散三個機制主導了整個熱收支，控制潮間帶生物體溫的高低。一般而言，潮間帶的螺類在體內水分散失達 45% 體重時，便有乾燥致死的危險性(Willmer et al. 2000)，無法持續地蒸發體內的水分用於散熱。因此，潮間帶螺類在形態上對熱逆境的防避機制，便在於增加強制熱對流的散熱效果與對降低太陽短波輻射的吸收率。

潮間帶的螺類在其螺殼形態上通常有較淡的顏色以增加表面反射率，或是具有螺肋或是凹凸皺紋可增加散熱之表面積。越粗糙的表面也越容易造成更多的亂流，增加強制熱對流散熱的效率(Nybakken, 1993)。然而，在生物與物理間架起橋樑的定率性熱收支模式(deterministic heat budget model)中，生物形態對於其熱收支的影響也很少經由實驗而被量化(例如: Porter and Gates, 1969; Riechert and Tracy, 1975; Kingsolver, 1983; de Jong et al. 1996; McCafferty et al. 2001)，而使得這些模式的真實性降低。本研究的目的便在於提出一個量化螺殼形態對其熱收影響的方法，量化一種潮間帶螺類—燒酒海蝓(*Batillaria zonalis*)形態對於熱收支的影響，並與另一種淡水螺類川蝓(*Semisulcospira libertina*)做比較，以瞭解潮間帶螺類在形態上有何優越性以防避潮間帶的熱逆境。

二、實驗理論

(一) 形態對太陽短波輻射反照率的影響

生物體所接受的太陽短波輻射包括直接由太陽而來與擴散而來兩部分(Campbell and Norman, 1998)。在晴朗無雲的天氣下，直接的由太陽而來的短波輻射主控了這個機制(Monteith and Unsworth, 1990)，因此太陽短波輻射可以表示為：

$$Q_{sol} = \frac{(1-\alpha)}{\sin\theta} A_{sol} S + (1-\alpha) A_d S_d \approx \frac{(1-\alpha)}{\sin\theta} A_{sol} S \dots\dots\dots(2)$$

S 是太陽輻射通量(W/m^2)， A_{sol} 是螺類正對太陽方向的投影面積， S_d 是所有擴散而來的太陽短波輻射通量， A_d 則為沒有被太陽所直接照射到的總面積， α 為表面反照率， θ 是太陽高度角(solar elevation angle)，其求法可參考 Campbell 和 Norman(1998)。以生物逆境機制觀點，(2)式中最主要的參數為表面反照率 α ，它直接影響到螺類能量接收的多寡；表面反照率越高表示越多的太陽短波輻射被反射，螺類接收到的熱能也越低。

因此螺殼形態對於太陽短波輻射接收率的影響，可用表面反照率來量化。

(二) 形態對於強制熱對流的影響

強制熱對流的發生是因為螺殼周圍空氣的流動，其速率可簡單表示為：

$$Q_{conv} = -h_c A_{conv} (T_{shell} - T_a) \quad (3)$$

其中 A_{conv} 表示螺殼暴露於流體中的總面積， h_c 是強制熱對流係數 (forced convection coefficient)， T_{shell} 是螺殼的表面溫度， T_a 為鄰近螺殼的空氣溫度。(3)式中強制熱對流係數 h_c 是最重要的參數，它不只受到螺殼形態的影響，同時也是流體與流場的函數 (Monteith and Unsworth, 1990; Helmuth, 1998); 若只考慮螺殼形態對於強制熱對流係數的影響，則須先將流體與流場的影響消除。

流速與黏滯力是影響強制熱對流最主要的因子，因此無因次的雷諾數 (Reynolds number, Re) — 表示慣性力與黏滯力比值的無因次參數，適合用於描述此流場：

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (4)$$

其中 u 是流體的流速， L 是螺殼的特徵長度 (在此以殼長與寬的幾何平均數代表)， ν 是空氣的動力黏滯係數，如在 30°C 下其值為 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Holman, 1997)。而流體的性質則以另一代表動力黏滯係數和熱擴散率的比值的，普朗特數 (Prandtl number, Pr) 代表：

$$Pr = \frac{\nu}{k_a / \rho_a c_a} \quad (5)$$

其中 ρ_a 是空氣的密度， c_a 空氣的比熱。當流體與流場具有相同的雷諾數與普朗特數時，對強制熱對流的機制而言，可視為處於相同的流體和流場下。

紐塞爾數 (Nusselt number (Nu)) 是描述強制熱對流大小的無因次參數，它是強制熱對流量與熱傳導通量的比值：

$$Nu = \frac{h_c L}{k_a} \quad (6)$$

其中 k_a 空氣的熱傳導係數，如在 30°C 其值為 $0.026 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Holman, 1997)。由於強制熱對流是流體、流場與螺殼形態的函數，紐塞爾數、雷諾數與普朗特數三者的關係可以寫為一般式：

$$Nu \propto Re^n Pr^m \quad (7)$$

其中 n 、 m 為經由實驗而決定的常數。在一般狀況下，空氣的普朗特數近似於常數 0.71，並獨立於溫度 (Monteith and Unsworth, 1990)。因此 (7) 式可以簡化為：

$$Nu = B Re^n \quad (8)$$

其中 B 為常數。 B 與 n 可經由風洞實驗決定，量測風速與螺殼的長寬得到雷諾數 (Re)，經由 (8) 式可以得到紐塞爾數 (Nu)，而強制熱對流係數 h_c 便可 (6) 式求得。經由實驗的設計，風洞中螺殼的熱收支可不考慮太陽短波輻射、熱傳導與蒸發散。風洞中螺殼的熱收支僅受到強制熱對流以及長波輻射的影響：

$$\begin{aligned} Q_{stored} &= Q_{conv} + Q_{long} \\ \Rightarrow m_{shell} c_{shell} \frac{dT_{shell}}{dt} &= -h_c A_{conv} (T_{shell} - T_a) \\ &+ Q_{long} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 m_{shell} 、 c_{shell} 為螺殼的質量與比熱，而：

$$Q_{long} = -\sigma A_{long} (\epsilon_{shell} T_{shell}^4 - \epsilon_{surr} T_a^4) \quad (10)$$

其中 σ 為 Stefan-Boltzmann 常數，其值為 $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ (Holman 1997)， A_{long} 為長波輻射發散的面積； ϵ_{shell} 與 ϵ_{surr} 為螺殼與風洞的長波輻射放射率 (emissivity)，一般生物表面的長波輻射放射率都大於 0.97 (Willmer et al. 2000)。Helmuth (1998) 建議貝殼的放射率可以視為 1.0，而風洞的長波輻射放射率可以視為 0.94，且在固定風速下量測螺殼溫度隨時間變化的時間序列，令時間為 0 時螺殼的初始溫度為 $T_{shell,0}$ ，繪出 $\ln\left(\frac{T_{shell} - T_a}{T_{shell,0} - T_a}\right)$ 與時間的關係圖並做最小方差

法線性回歸，得到其斜率為 s 。在空氣溫度維持定值或是空氣溫度變化遠小於螺殼溫度變化時，螺殼溫度隨時間的變化率可以單一塊狀系統分析法推估 (single-lumped system analysis, Holman, 1997) 為：

$$\frac{dT_{shell}(t)}{dt} \approx \frac{d[T_{shell}(t) - T_a(t)]}{dt} = -s(T_{shell,0} - T_a)e^{-st} \dots\dots\dots(11)$$

將(10)與(11)式帶入(9)，繪出 $(m_{shell}c_{shell} \frac{dT_{shell}}{dt} - Q_{long})$ 與 $(T_{shell} - T_a)$ 的關係圖，再用一次最小方差法做線性回歸，以求得強制熱對流係數 h_c 。使用不同尺寸的螺殼並在不同風速下重複此步驟，以建立專屬於這種螺類的螺殼之紐塞爾數與雷諾數關係。相同雷諾數下若有越大的強制熱對流係數表示螺殼形態對於散熱幫助越大；因此，紐塞爾數與雷諾數的關係可以用來量化螺殼形態對強制熱對流的影響。

三、材料與方法

(一) 實驗材料

燒酒海蜷是臺灣地區最具有代表性的潮間帶螺類之一，屬於海蜷科(Potamididae)，以燒酒螺為俗名，主要棲息於臺灣西海岸河口附近的泥灘地；以往產量十分豐富，但近年來幾乎絕跡，僅在澎湖地區的潮間帶有較大的族群(本研究2001年在臺灣西海岸調查訪問結果)。川蜷屬於川蜷科(Pleuroceridae)，是台灣北部溪流上游的代表性水生軟體動物；主要棲息於乾淨、未受污染的上游溪流中，但是其他淡水水域如灌溉渠道、湖泊、稻田、池塘也都有分佈。燒酒海蜷螺塔高而瘦，螺殼為黑褐色，縫合下有白色橫帶，有細的螺肋與瘤狀縱肋；川蜷螺殼為較寬的塔型，有四到五層螺塔，表面光滑顏色為黃綠色或者是淡棕色。

本研究中燒酒海蜷採自澎湖潮間帶，川蜷的採集地點為台北外雙溪。活體樣本採集後飼養於本研究室之水族箱(80×40×40 立方公分)，實驗前將活體樣本以蒸餾水煮熟拔肉，再以蒸餾水洗

淨之後，置於蔭涼處風乾，作為實驗樣本。

(二) 螺殼形態量測

螺殼的長度(L_x)與高度(L_y)均以游標卡尺量測到 0.05 公釐的精確度；螺殼(m_{shell})的重量以電子秤量測到 0.01 克的精度。將螺殼以錫箔紙包裹，使用錫箔紙面積與重量的線性回歸關係式可以得到螺殼的表面積(A)；在強制熱對流係數的實驗中，(8)式及(9)式所提到的螺殼暴露於流體中的總面積(A_{conv})及長波輻射發散的面積(A_{conv})均可視為螺殼總表面積(A)。螺殼的平均比熱(c_{shell})以絕熱降溫實驗量測。

在計算上，所有的長度單位為公尺(m)，面積單位為平方公尺(m^2)，質量單位為公斤(kg)，溫度單位為凱氏溫度(K)。

(三) 表面反照率量測

本研究中所使用到的表面反照率量測儀器是改良 Willmer 與 Unwin(1981)所設計儀器而來；此儀器包含一個模擬太陽光的白熾光源，以及一個量測反照光強度的裝置，適用於量測各種小型生物的表面反照率，其配置如圖 1 所示。白熾光源是將一個特製的白熾燈泡置於一不透光內部為反射鏡的光盒中，使其光束僅由前後方射出而不逸散；它外接一個 12 伏特、2~3 安培可調整式電源供應器，使用時將電壓調強，以產生足夠白光以模擬太陽光的光源。半球殼是由紙黏土覆蓋於乒乓球風乾後製成，其外部噴漆為黑色，以隔絕外部光源的干擾；內部為米白色，以增加反射率；其中央有一裂縫，前方的光束經過光柵片與凸透鏡後通過此裂縫聚焦於螺殼，光自螺殼表面反射後映照於半球殼的內部。

半球殼內部的光照強度是由一對光敏電阻所製成感應器量測，此感應器的電路如圖 2 所示。感應器使用前需以反照率 18% 的標準反射平面(灰卡，Kodak 公司出品)校正；調整 1K 的可變電阻，使光源照度與電流關係為線性。校正完成後，製作球殼內部照度(可視為 18% 照度計讀數)一電流檢量線。光敏電阻的電源為兩個串聯的 9V 電池，光源的照度由固定於光盒後方照度

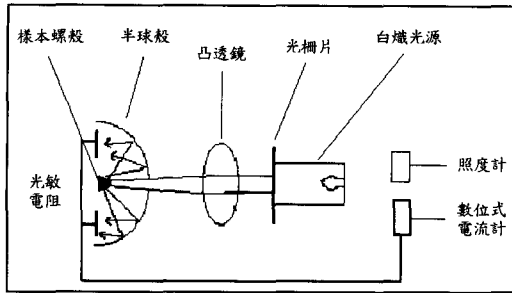


圖 1 表面反照儀器配置圖

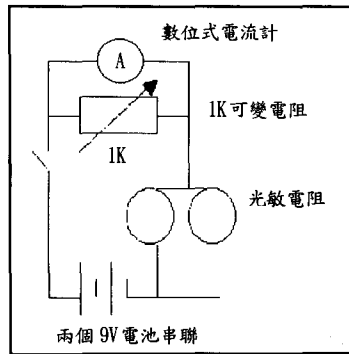


圖 2 表面反照量測儀器之感應器的電路圖

計量測，通過光敏電阻的電流以數位式電流計量測。本實驗在暗處進行，以避免其他的光線干擾到光敏電阻。

將新鮮的螺殼樣本放入反照率量測儀器中，量測通過光敏電阻之電流，以檢量線計算出球殼內部的光線強度，求得螺殼的表面反照率。

(四) 強制熱對流係數量測

本研究在實驗式中使用一個開放式的低速風洞系統以量測螺殼的強制熱對流係數；在此風洞測試段大部分區域(除邊界層外)，空氣的流動可以視為均勻流(uniform flow)。此風洞系統如圖 3 所示，關於其設計的細節可參考 Liao 與 Chiu (2002)。本研究中風速的範圍為 0-5m/s，室內空氣溫度以空調設備維持約在 303K，以符合(11)式的使用條件。由於實驗中僅使用螺殼並在室內進行，並將螺殼放置於風洞的測試段，以一極細的木條支撐於邊界層之上；因此，(1)式中之短波太陽輻射、蒸發散與熱傳導等機制均可忽略。將

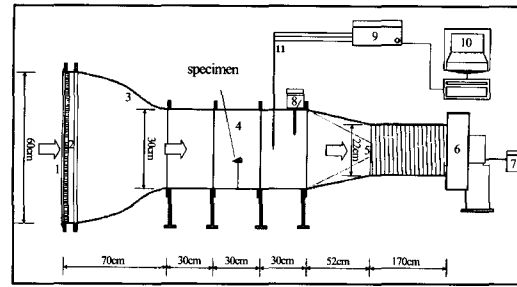


圖 3 本研究中所使用的風洞系統：1.保護網；2.蜂巢式整流板；3.校正束縮段；4.測試段；5.空氣導入段；6.風扇；7.整流器；8.熱線式風速計；9.CR10 資料處理器；10.個人電腦；11.熱電偶線；(本圖引用自 Liao 與 Chiu, ; 2002)

螺殼加熱至高於氣溫約 10K，在風洞中進行強制對流降溫實驗直到螺殼溫度高於氣溫 2-3K 為止。螺殼溫度與氣溫均以熱電偶每秒量測一次，並以 CR10 資料處理器記錄，風速以熱線式風速計量測；經由(9)-(11)式計算出強制熱對流係數。由於螺殼各部為的形態不同，迎風方向不同會導致不一樣的雷諾數和紐塞爾數關係。為此，本研究建立在殼頂、殼口、側面三個方向迎風時雷諾數和紐塞爾數關係，以符合實際的狀況。

四、結果與討論

燒酒海蜷的表面反照率均勻散佈於 15.3%至 30.7%之間，平均表面反照率為 $22.4 \pm 1.04\%$ (平均值 $\pm 95\%$ 信賴區間)。川蜷的整體顏色雖較燒酒海蜷為淡，但其表面反照率仍小於燒酒海蜷，介於 9.6%至 14.1%之間，平均值為 $12.0 \pm 0.75\%$ 。Gates(1980)指出非常暗的動物之平均表面反照率為 5.5%，Willmer 等(2000)亦指出暗色表面的螺殼表面反照率介於 2%至 30%之間，但純白色的螺殼表面反照率可高達 95%以上。因此，擁有白色橫帶、黑褐色與白色相間的燒酒海蜷螺殼平均表面反照率也比黃綠色的川蜷螺殼為高，而白色橫帶面積的大小也是造成不同燒酒海蜷間表面反照率差異的主因。反照率的差異將會導致生物種分佈的改變，Levinton(1995)研究

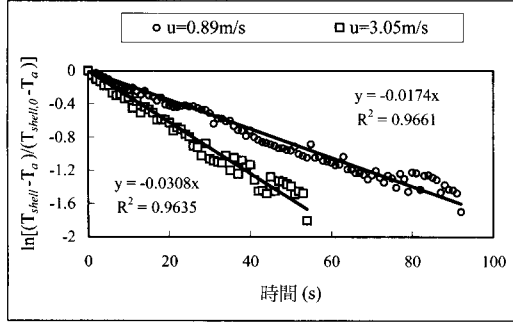


圖 4 以單一塊狀系統分析法推估燒酒海蜷在殼口迎風、風速為 0.89m/s 與 3.05m/s 的狀況下，殼溫隨時間的變化率

褐色與黑色貽貝(*Mytilus edulis*)的分佈，指出在加拿大東部的族群 100%為黑色，但在美國西南部的族群僅有 40%為黑色。顏色的差異可使得正對太陽投影面積(A_{sol})相同的燒酒海蜷在同一時刻接收的太陽短波輻射能量差異達到 20%；由這點可以推測分佈於潮間上帶的個體或是低緯度的族群，其螺殼會以褐色為主並擁有較大的白色橫帶面積。

此外，熱帶的潮間帶螺類通常具有較粗糙的表面使其更容易反射太陽短波輻射(Nybakken, 1993)，燒酒海蜷的螺肋與瘤狀縱肋便可達到此一效果。燒酒海蜷形態造就了其高表面反射率，可以是一種為了適應潮間帶環境長期演化的結果。

圖 4 為兩次燒酒海蜷殼口迎風的風洞試驗結果，此燒酒海蜷的殼長為 29.85mm，殼寬為 8.25mm，重 0.96g，表面積為 537.21mm²。貝殼的比熱常被視為碳酸鈣的比熱—815 Jkg⁻¹K⁻¹，但絕熱降溫實驗結果顯示燒酒海蜷及川蜷的螺殼比熱分別為 1320 ± 20 Jkg⁻¹K⁻¹ 及 1190 ± 60 Jkg⁻¹K⁻¹，將其比熱視為碳酸鈣之比熱並不恰當。此二次試驗的風速分別為 0.89m/s 以及 3.05m/s。將 $\ln\left(\frac{T_{shell} - T_a}{T_{shell,0} - T_a}\right)$ 與時間的關係做最小方差法線性回歸，其斜率分別為 -0.0174 及 -0.0308；由(11)式，螺殼溫度隨時間的變化率以單一塊狀系統分析法推估分別為：

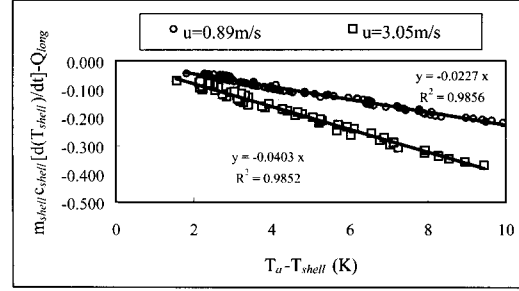


圖 5 計算燒酒海蜷在殼口迎風，風速為 0.89m/s 與 3.05m/s 狀況下的強制熱對流係數

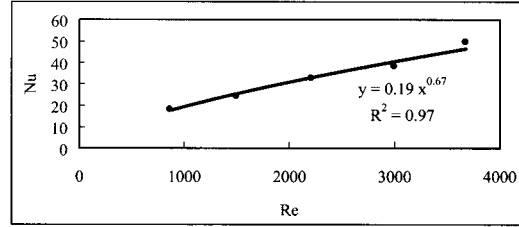


圖 6 單一燒酒海蜷殼口迎風時紐塞爾數和雷諾數的關係

$u = 0.89\text{m/s}$,

$$\frac{dT_{shell}(t)}{dt} = -0.0174(T_{shell,0} - T_a)e^{-0.0174t} \dots (12)$$

$u = 3.05\text{m/s}$,

$$\frac{dT_{shell}(t)}{dt} = -0.0308(T_{shell,0} - T_a)e^{-0.0308t} \dots (13)$$

將(12)、(13)式與(10)計算出的 Q_{long} ，繪出 $(m_{shell}c_{shell} \frac{dT_{shell}}{dt} - Q_{long})$ 對 $(T_{shell} - T_a)$ 的關係圖，用最小方差法做線性回歸後(圖 5)，可以(9)式求得強制熱對流係數 h_c ：

$u = 0.89\text{m/s}$,

$$-A_{conv}h_c = -0.0227 \Rightarrow h_c = 30.97(Wm^{-2}K^{-1}) \quad (14)$$

$u = 3.05\text{m/s}$,

$$-A_{conv}h_c = -0.0403 \Rightarrow h_c = 63.40(Wm^{-2}K^{-1}) \quad (15)$$

改變風速重複實驗與運算步驟，結果如圖 6 顯示燒酒海蜷的紐塞爾數與雷諾數形成一個良

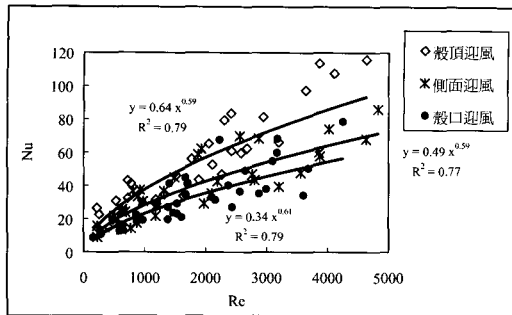


圖 7 燒酒海蝿的紐塞爾數與雷諾數關係

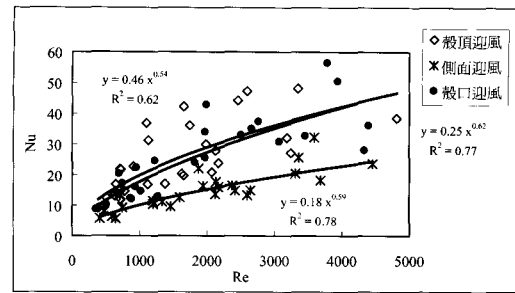


圖 8 川蝿的紐塞爾數與雷諾數的關係

好的冪函數關係；此燒酒海蝿在殼口迎風時的紐塞爾數與雷諾數關係可寫為：

$$Nu = 0.19Re^{0.67}, \quad R^2 = 0.97 \dots\dots\dots(16)$$

由於不同燒酒海蝿在螺殼形態上的差異，特別是同樣殼長的燒酒海蝿在於殼寬上常有很大不同(高裕群, 2002)，導致每一燒酒海蝿的紐塞爾數與雷諾數關係略有不同。此外，當迎風方向改變時，燒酒海蝿的紐塞爾數與雷諾數關係會產生極大的變化，如圖 7 所顯示。因此，屬於燒酒海蝿紐塞爾數與雷諾數的關係可以表為三種形式；在殼口、殼頂及側面迎風的狀況下，紐塞爾數與雷諾數的關係分別為：

$$Nu = 0.34Re^{0.61}, \quad R^2 = 0.79 \dots\dots\dots(17)$$

$$Nu = 0.64Re^{0.59}, \quad R^2 = 0.79 \dots\dots\dots(18)$$

$$Nu = 0.49Re^{0.59}, \quad R^2 = 0.77 \dots\dots\dots(19)$$

(17)、(18)、(19)三式量化了燒酒海蝿螺殼形態對強制熱對流的影響。同樣地，川蝿在在殼口、殼頂及側面迎風的狀況下，紐塞爾數與雷諾數的關係分別為：

$$Nu = 0.25Re^{0.62}, \quad R^2 = 0.77 \dots\dots\dots(20)$$

$$Nu = 0.46Re^{0.54}, \quad R^2 = 0.62 \dots\dots\dots(21)$$

$$Nu = 0.18Re^{0.59}, \quad R^2 = 0.78 \dots\dots\dots(22)$$

川蝿殼頂處常被腐蝕(賴景陽 1988)，造成川蝿間在殼頂處形態的差異，也因此影響到風洞實驗的結果，使得(21)式之相關係數較低。

比較圖 7 與圖 8，很顯然燒酒海蝿有比川蝿為強的對流散熱能力。但燒酒海蝿和川蝿的螺殼

表 1 一些小型變溫動物的雷諾數與紐塞爾數的關係；雷諾數與紐塞爾數的關係表為 $Nu = BRe^n$

種名	迎風方向	B	n
蝴蝶 <i>Colias</i> spp.	-	0.60	0.50
瓢蟲 <i>Adalia bipunctata</i>	-	0.37	0.60
貽貝 <i>Mytilus californianus</i>	殼口迎風	0.63	0.47
	殼頂迎風	0.38	0.51
燒酒海蝿 <i>Batillaria zonalis</i>	殼口迎風	0.34	0.61
	殼頂迎風	0.64	0.59
	側面迎風	0.49	0.59
川蝿 <i>Semisulcospira libertina</i>	殼口迎風	0.25	0.62
	殼頂迎風	0.46	0.54
	側面迎風	0.18	0.59

均為塔形，導致兩者強制熱對流散熱效果差異的主因，在於燒酒海蝿螺殼上有許多橫肋及與其交錯的瘤狀縱肋，使流經燒酒海蝿的空氣產生了額外的副流而增加了熱交換的機會；反之川蝿螺殼相當光滑，無法產生此效果。圖 7 亦顯示了在不同迎風方向，燒酒海蝿的對流散熱效果也有所差異；以殼長 27mm(平均殼寬約為 8.61mm)的燒酒海蝿為例，殼頂迎風時的強制熱對流係數是殼口迎風時的 1.63 倍，側面迎風時的 1.31 倍；因此，燒酒海蝿在面對熱逆境時，可以調整迎風方的方式增加對流散熱的效率。

表 1 為其他小型變溫動物如蝴蝶(可視為光滑圓柱, Kingsolver, 1983)、瓢蟲(可視為光滑球殼, de Jong et al., 1996)、貽貝(Helmuth, 1998)的紐塞爾數與雷諾數關係；當特性長度固定時，強制熱對流係數便只是風速的函數。圖 9 與表 2 比較了殼長為 27mm 的燒酒海蝿與其他身長或是

表 2 殼長 27mm 的燒酒海蜆與其他身長或是殼長同樣為 27mm 的小型變溫動物強制熱對流係數之比較；殼長 27mm 的燒酒海蜆平均殼寬為 8.61mm，殼長 27mm 的川蜆平均殼寬為 11.68mm，蝴蝶及瓢蟲的特性長度可視為身長(Kingsolver, 1983, de Jong et al., 1996)，貽貝的特性長度約為三分之二殼長(Helmuth, 1998)

風速 u (m/s)	強制熱對流係數 h_c ($Wm^{-2}K^{-1}$)									
	燒酒海蜆			蝴蝶	瓢蟲	貽貝		川蜆		
	殼口迎風	殼頂迎風	側面迎風	-	-	殼口迎風	殼頂迎風	殼口迎風	殼頂迎風	側面迎風
0.2	14.3	24.2	18.5	10.6	11.7	11.6	8.7	10.4	12.5	6.4
0.5	24.9	41.5	31.8	16.8	20.3	17.8	13.9	18.4	20.4	11.0
1.0	38.1	62.5	47.8	23.7	30.8	24.7	19.8	28.3	29.7	16.5
1.5	48.7	79.3	60.7	29.1	39.2	29.9	24.3	36.4	37.0	21.0
2.0	58.1	94.0	72.0	33.6	46.6	34.2	28.1	43.5	43.2	24.8
2.5	66.6	107.2	82.1	37.5	53.3	38.0	31.5	49.9	48.7	28.3
3.0	74.4	119.4	91.4	41.1	59.5	41.4	34.6	55.9	53.8	31.6
3.5	81.7	130.8	100.1	44.4	65.3	44.5	37.4	61.5	58.4	34.6
4.0	88.7	141.5	108.3	47.5	70.7	47.4	40.1	66.8	62.8	37.4

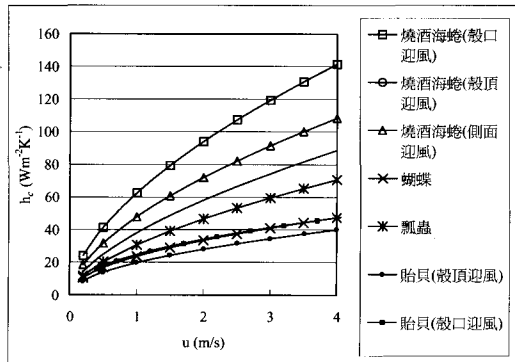


圖 9 殼長為 27mm 的燒酒海蜆與其他身長或殼長為 27mm 的小型變溫動物的強制熱對流係數比較

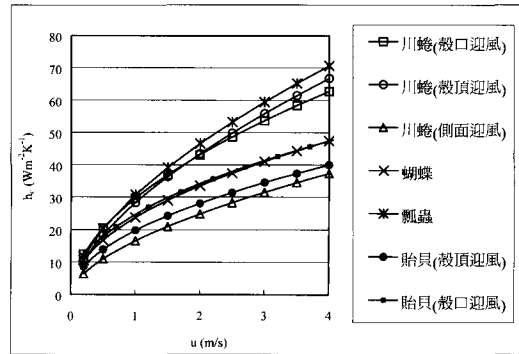


圖 10 殼長為 27mm 的川蜆海蜆與其他身長或殼長為 27mm 的小型變溫動物的強制熱對流係數比較

殼長同樣為 27mm 的小型變溫動物的強制熱對流係數，顯示燒酒海蜆在任何迎風方向都擁有大於這些小型變溫動物的對流散熱能力，但川蜆螺殼的強制熱對流係數卻與這些小型變溫動物相近(圖 10)；由此可知若是表面光滑且尺寸相近的動物，形狀差異並不會使對流散熱能力產生顯著的不同，表面的粗糙度才是對流散熱能力產生差異的關鍵；也因此證明了生長在潮間帶的螺類例如海蜆科、玉黍螺科、錐蜆科等，其較粗糙的螺殼確實有幫助其適應熱逆境的功用。

本研究結果顯示對流散熱能力高為潮間螺類形貌的特色，因此在為潮間帶螺類設計棲地或復育其棲地時，必須將空氣的流動性加以考慮，所設計的工事或植生不可妨礙空氣流動。適當的植生存在固然可以為潮間帶螺類提供遮蔽，降低太陽短波輻射的進入，但當植生過密阻礙到氣體的流動時，便會導致潮間帶螺類散熱的困難。例如關渡地區水筆仔密度過高，使得生長於其間的粗紋玉黍螺必須爬上水筆仔的枝幹，以增加對流散熱的機會。

五、結論與建議

1. 本研究量化了潮間帶螺類燒酒海蝨與另一種淡水螺類川蝨之螺殼形態對於熱收支的影響；若適當改變實驗儀器的設計尺寸，在本研究中所使用的量化螺殼形態對熱收影響的方法，可適用於各種尺寸的螺類。
2. 燒酒海蝨的螺殼顏色較暗，但在螺殼上的白色橫帶及粗糙螺殼表面影響下，平均表面反照率仍高達 22.4%，優於整體顏色較淡，平均表面反照率為 12.0% 的川蝨。
3. 燒酒海蝨螺殼上的白色橫帶，以及螺肋與瘤狀縱肋造成的粗糙螺殼，使其擁有較高的表面反照率以及良好的對流散熱能力；此一特殊的形態幫助其適應潮間帶的熱逆境，可以說是長期演化下最適當的結果。
4. 川蝨的螺殼光滑，其對流散熱能力與其他小型變溫動物相近。顯示表面光滑且尺寸相近的動物，形狀差異並不會使對流散熱能力產生顯著的不同，表面的粗糙度才是對流散熱能力產生差異的關鍵；也因此說明了潮間帶的螺類例如海蝨科、玉黍螺科、錐蝨科等，其較粗糙的螺殼對於適應熱逆境確實有幫助。
5. 本研究建議在為潮間帶螺類設計棲地或復育其棲地時，必須將空氣的流動性加以考慮，所設計的工事或植生不可阻礙空氣流動，以免不利於潮間帶螺類的對流散熱。

誌 謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會「潮間帶燒酒海蝨對熱逆境的防避機制」(NSC90-2515-S-002-002)計畫經費補助，廖中明老師出借風洞，張倉榮老師之觀念指正，趙之瑜小姐指導電路板製作，使得研究得以順利完成，在此致上感謝。

參考文獻

1. 高裕群。民國 91 年。潮間帶燒酒海蝨之避熱機制。國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
2. 賴景陽。民國 87 年。貝類。渡假出版社，臺北。
3. Angilletta Jr., M. J., P. H. Niewiarowski, and C. A. Navas. 2002. The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal of Thermal Biology* 27: 249-268.
4. Berwaerts, K., H. Van Dyck, E. Vints, and E. Matthysen. 2001. Effect of manipulated wing characteristics and basking posture on thermal properties of the butterfly *Pararge aegeria* (L.). *Journal of Zoology* 255: 261-267.
5. Campbell, G. S. and J. M. Norman. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*, second edition. Springer-Verlag, New York, USA.
6. de Jong, P. W., W. S. Gussekloo, and P. M. Brakefield. 1996. Differences in thermal balance, body temperature and activity between non-melanic and melanic two-spot ladybird beetles (*Adalia bipunctata*) under controlled conditions. *Journal of Experimental Biology* 199: 2655-2666.
7. Forsman, A., K. Ringblom, E. Civantos, and J. Ahnesjo. 2002. Coevolution of color pattern and thermoregulatory behavior in polymorphic pygmy grasshoppers *Tetrix undulata*. *Evolution* 56: 349-360.
8. Garrity, S. T. 1984. Some adaptations of gastropods to physical stress on a tropical rocky shore. *Ecology* 65: 559-574.
9. Hazel, W. N. 2002. The environmental and genetic control of seasonal polyphenism in larval color and its adaptive significance in a swallowtail butterfly. *Evolution* 56: 342-348.
10. Helmuth, B. S. T. 1998. Intertidal mussel microclimate: predicting the body temperature of a sessile invertebrate. *Ecological Monographs* 68: 51-74.
11. Hofmann, G. E. and G.N. Somero. 1995. Evidence for protein damage for environmental

- temperatures: seasonal changes in levels of ubiquitin conjugates and hsp70 in the intertidal mussel *Mytilus trossulus*. *Journal of Experimental Biology* 198: 1509-1518.
12. Hofmann, G. E. and G. N. Somero. 1996. Interspecific variation in thermal denaturation of proteins in the congeneric mussels in *Mytilus trossulus* and *Mytilus galloprovincialis*: evidence from the heat-shock response and protein ubiquitination. *Marine Biology* 126: 65-75.
 13. Holman, J. P. 1997. *Heat Transfer*, Eighth Edition. McGraw-Hill, New York, USA.
 14. Jones, K. M. M. and E. G. Boulding. 1999. State-dependent habitat selection by an intertidal snail: the costs of selecting a physically stressful microhabitat. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 242: 149-177.
 15. Kingsolver, J. G. 1983. Thermal and flight in *Colias* butterflies: elevational patterns and mechanistic limitations. *Ecology* 64: 534-545.
 16. Levinton, J. S. 1995. *Marine Biology*. Oxford University Press, New York, USA.
 17. Liao, C. M. and K. H. Chiu. 2002. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment* 37: 177-187.
 18. McCafferty, D. J., J. B. Moncrieff and I. R. Taylor. 2001. How much energy do barn owls (*Tyto alba*) save by roosting? *Journal of Thermal Biology* 26: 193-203.
 19. Monteith, J. L. and M. H. Unsworth. 1990. *Principles of Environmental Physics*, second edition. Edward Arnold, London, UK.
 20. Nybakken, J. W. 1993. *Marine Biology: An Ecological Approach*, Third Edition. Harper-Collins College Publishers, New York, USA.
 21. Porter, W. P. and D. M. Gates. 1969. Thermodynamic equilibria of animals with environment. *Ecological Monographs* 39: 245-270.
 22. Riechert, S. E. and C. R. Tracy. 1975. Thermal balance and prey availability: bases for a model relating web-site characteristics to spider reproductive success. *Ecology* 56: 265-284.
 23. Seed, R. and T. H. Suchanek. 1992. Population and community ecology of *Mytilus*. Pages 87-169 in E.M. Gosling, editor. *The mussel Mytilus: ecology, physiology, genetics and culture*. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
 24. Wethey, D. S. 1984. Sun and shade mediate competition in the barnacles *Chthamalus* and *Semibalanus*: a field experiment. *Biological Bulletin* 167: 176-185.
 25. Williams, G. A. and S. Morrill. 1995. Habitat partitioning and thermal tolerance in a tropical limpet, *Cellana grata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 124: 89-103.
 26. Willmer, P. G. and D. M. Unwin. 1981. Field analyses of insect heat budgets: reflectance, size and heating rates. *Oecologia* 50: 250-255.
 27. Willmer, P., G. Stone and I. Johnston 2000. *Environmental Physiology of Animals*. Blackwell Science, Malden, UK.

收稿日期：民國 92 年 3 月 10 日
 接受日期：民國 92 年 3 月 25 日