

第二十二屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA22-487

姓名：曾宇綸

作品名稱：雙殼綱潛沙行為之物理機制探討

參賽類別：物理

關鍵字：雙殼綱、潛沙行為、殼型

摘要

文蛤與西施舌為台灣西南沿海沙岸常見的潛沙型雙殼綱動物，兩者棲地與生物分類地位相近；然殼型瘦長的西施舌潛沙總深度遠大於鈍胖的文蛤，且文蛤於潛沙過程中會以重複轉動的方式潛沙，故本研究欲探討兩者殼型是否具導致行為差異之物理特性。透過觀測潛沙行為、受力特性，發現西施舌不僅單次潛沙深度較文蛤大，潛沙時的受力、耗能還小於文蛤。此外，西施舌潛沙時相比文蛤幾乎不轉動，應是受限於較大的單位質量轉動慣量。進一步以模型殼分析後，發現其受力與殼長(L)、殼寬平方(W²)和殼高平方(D²)等參數呈線性正相關，其中 W、D 直接影響殼體潛沙時的最大截面，L 則間接影響殼體在沙面下的外殼弧形。本研究在受力實驗、轉動慣量實驗所得物理實驗結果，皆可回扣生物觀察結果並藉殼型因素解釋其採取行為之意義，實具推廣、預測之意義，即以雙殼綱之殼型判斷其潛沙行為與演化意義。本研究結果可解釋潛沙型雙殼綱動物以特定入沙角度潛沙之行為實具有減少潛沙阻力之物理意義，未來值得應用於鑽研工具之設計；此外，西施舌較容易潛沙的殼型參數，實具有房屋地基鑽掘的應用意義，可將工具前端設置為如西施舌的狹長形並搭配轉動方式進行鑽掘，再以其他方式固定於土壤中即可穩固地基，值得作為避免土壤液化所致災害的應用參酌。

壹、前言

一、研究動機與文獻回顧

文蛤 (*Meretrix lusoria* Roeding, 1798) 與西施舌 (*Sanguinolaria diphos* Linnaeus, 1771) 是兩種台灣重要的經濟型貝類 (巫, 1997)，然而經文獻查詢後，我們發現同為雙殼綱、簾蛤目且棲地相近的兩種雙枚貝生物，文蛤平均潛沙深度約 6cm (赫崇波, 1997)，西施舌卻可深達 30cm (台灣貝類資料庫, 2023)，兩者在自然環境中的潛沙深度為什麼會有這麼巨大差異？這點引發我們相當大的好奇。

已知這兩種廣鹽性雙殼綱生物 (台灣貝類資料庫, 2023) 平時會以強而有力的斧足潛沙，並棲息於 15°C~25°C 之砂質沿岸 (劉德經等, 1997; 張安國等, 2014)，此種「潛沙行為」是許多雙殼綱動物於沙灘環境中用以呼吸、濾食或躲避天敵驚擾的常見運動行為 (Phelps et al., 1983)。以文蛤為例，潛沙步驟主要包括伸足期、豎殼期、潛沙期 (鄭豐州, 1995)，其中在潛沙期 (圖 1-1)，文蛤會反覆利用斧足與收縮肌交互運動，帶動

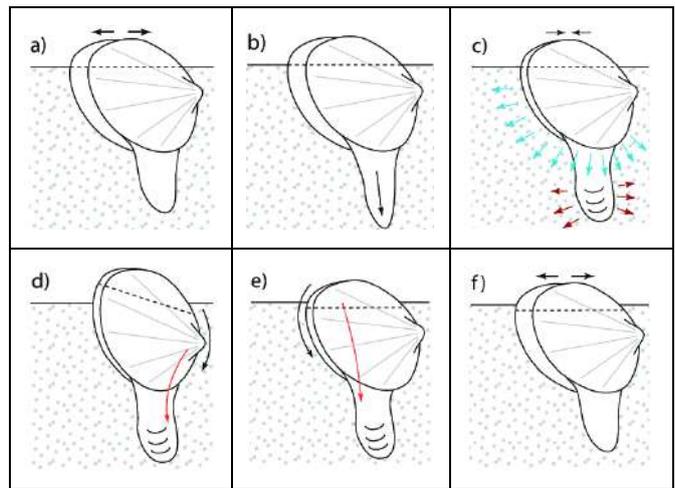


圖 1-1：文蛤潛沙期示意圖

殼體以轉動方式 (圖 1-1-d、e) 逐漸下潛 (Stanley, 1970)。然而相比之下，西施舌在潛沙時轉動幅度並不明顯，潛沙速度也較文蛤快 (柯海倫, 2004)，我們因此聯想到兩者的潛沙時殼體的轉動特性是否受到殼型的影響？

過去曾有研究嘗試探討雙殼綱貝類殼型與潛沙能力的關係，例如：比較文蛤或魁蛤 (*Anadara broughtonii* Schrenck, 1867)，種內間的潛沙深度與潛沙率比較，發現殼長越長的雙殼綱貝類的潛沙深度與潛沙率皆較高 (周玮等, 2011; 張安國等, 2014)。Stanley (1970) 利用模型模擬文蛤潛沙行為時，則發現雙殼結構上若缺乏小月面 (lunule) 組成時，即使在相同作用力下潛，潛沙深度都會較正常文蛤淺。我們因此進一步觀察文蛤和西施舌，發現兩者殼型有明顯差異，其中文蛤殼型主要呈卵圓近三角形 (圖 1-2)，而西施舌 (圖 1-3) 的殼型則較接近紡錘狀且厚度極薄 (柯海倫, 2004)。殼型差異，會否就是影響兩者潛沙深度差異的因素之一呢？



圖 1-2：文蛤 圖 1-3：西施舌

由於過去有關雙殼綱貝類的潛沙特性研究，多著重於探討潛沙環境的顆粒體運動機制，或同種貝類在不同條件下的潛沙行為比較，鮮有直接針對殼型差異來探討潛沙時的物理影響意義。因此我們期望能藉本次研究，以文蛤與西施舌為例，結合生物運動機制觀察與潛沙過程中殼體物理特性分析，嘗試以殼體受力差異及轉動慣量觀點，來解釋不同雙殼綱生物的殼型對潛沙力的可能影響性。

二、研究目的

(一) 生物觀察

1. 觀察文蛤與西施舌的潛沙行為之差異

(二) 物理實驗－依據生物觀察結果

1. 分析不同潛沙角度對文蛤與西施舌潛沙深度與受力關係的影響
2. 比較文蛤與西施舌的殼型參數差異對轉動慣量、潛沙深度與受力關係的影響

貳、研究設備與器材

一、實驗設備

品名：SpotCam 網路攝影機 型號：FHD2 用途：長時間錄影追蹤。	品名：3D 列印機 用途：列印模型
--	----------------------

二、實驗器材

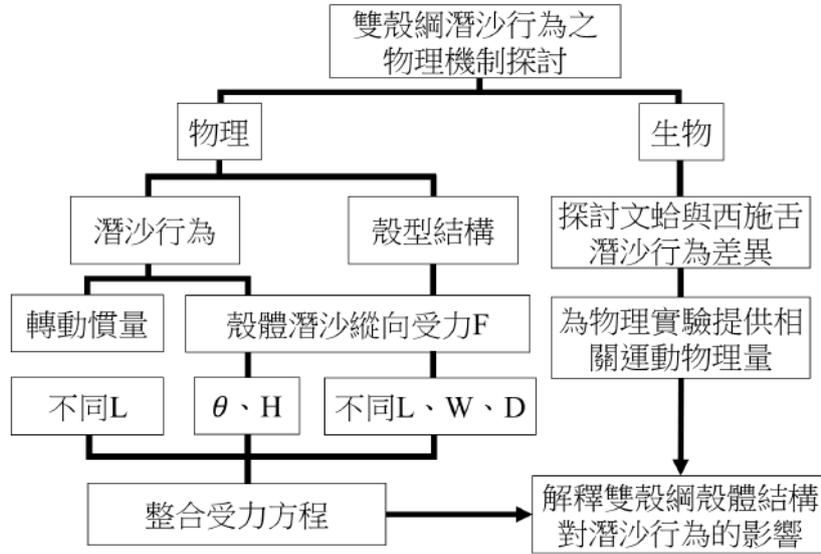
1. 模型 ML	2. 模型 MD	3. 模型 MW	4. 模型 SW
			
5. 角鋼 6. 壓克力板(40*40cm ²) 7. 壓克力盒(40*6*23cm ³)	8. 鐵片 9. 電子秤(0.2gw~10000gw) 10. 方形玻璃飼養箱		11. 檯燈 12. 沙粒(0.300~0.710 微米)

三、實驗軟體

Excel：分析數據、繪製科學圖像	威力導演：同步放映數據影片
ImageJ：計算長度	Tracker：追蹤物體軌跡

參、研究過程或方法

一、實驗架構圖



二、實驗相關原理

(一) 文蛤、西施舌質心推導公式

由垂線法測得殼體的質心位置，並測量殼頂點與後端點距離(AB 線段)、殼頂點與質心距離(BC 線段)、AB 線段與 BC 線段之夾角 θ ，即可由下列公式得到雙殼綱潛沙過程質心座標(圖 3-1)。

$$\begin{bmatrix} x_{cm} \\ y_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \frac{BC}{AB} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \end{bmatrix}$$

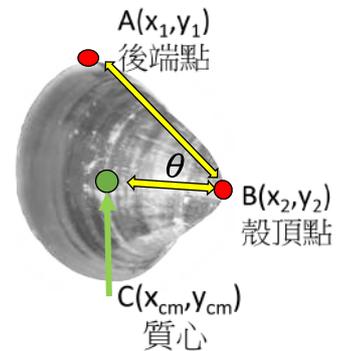


圖 3-1

(二) 殼體潛沙裝置力圖：

施力使殼體下潛時沙粒會對殼體產生正向力 \vec{N} 及摩擦力 \vec{f}_k ，

合力 $\vec{\Sigma F}_y$ 向上作用於電子秤上產生讀數。(圖 3-2)

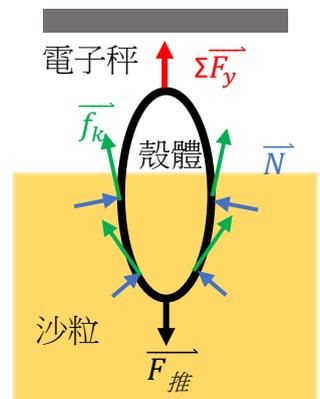


圖 3-2

(三) 複擺實驗原理

在實驗中所使用的殼體，如右圖 3-3 所示質量為 m 並以原點 O 點為轉動軸，其中 h 為轉動軸到重心之距離，

在 θ 小於 5 度時的擺動其理論震盪週期如下：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{c.m.} + md^2}{mgd}}$$

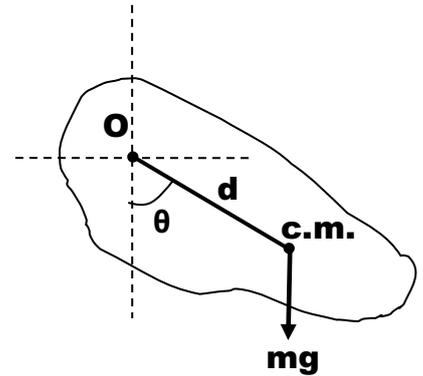


圖 3-3

(此物體以質心為轉軸之轉動慣量 $I_{c.m.}$)

三、本實驗相關物理量定義

(一) 殼型定義 (圖 3-4)：

1. 殼長(L)：殼的前端到殼的後端的最長水平距離。
2. 殼高(D)：殼頂到殼緣的垂直距離。
3. 殼寬(W)：又稱為殼幅，兩殼完全閉合時，左右兩殼的最寬距離。

(二) 殼上定位點定義 (圖 3-5)：

殼上定位點	定義	殼上定位點	定義
殼頂點	左、右兩殼的連接處。	殼緣	殼頂點的對側，為左右兩殼開閉之處。
前端	雙殼綱潛沙時靠近沙土一端。	後端	雙殼綱潛沙時靠近水面一端。

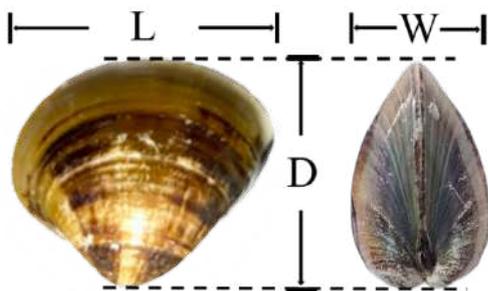


圖 3-4：雙殼綱 L、W、D 示意圖

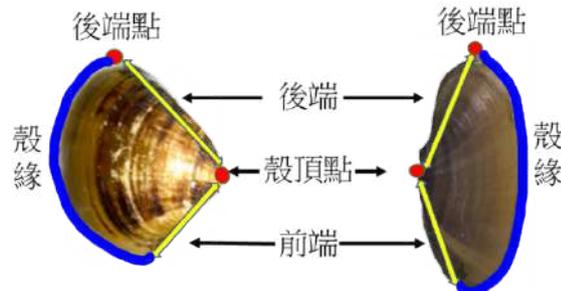


圖 3-5：文蛤、西施舌的殼上定位點

(三) 潛沙行為觀測座標系定義 (圖 3-6、圖 3-7)：

1. 轉動座標系：
 - (1) 以殼頂點作為座標原點。
 - (2) 分析雙殼綱潛沙過程中，後端點相對殼頂點的角位置變化。

2. 移動座標系：

- (1) 以殼頂點的初始位置作為座標原點。
- (2) 分析雙殼綱潛沙過程中，後端點與殼頂點 X、Y 座標變化。

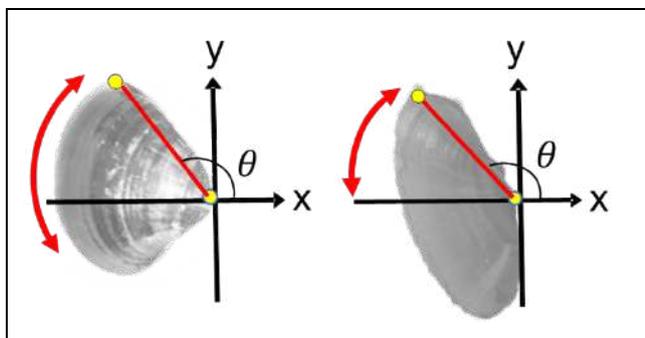


圖 3-6：文蛤、西施舌的轉動座標系。

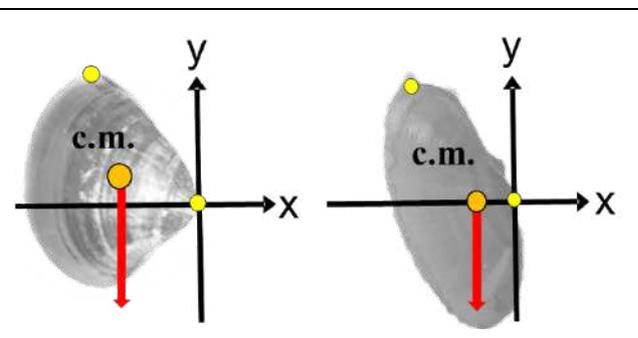
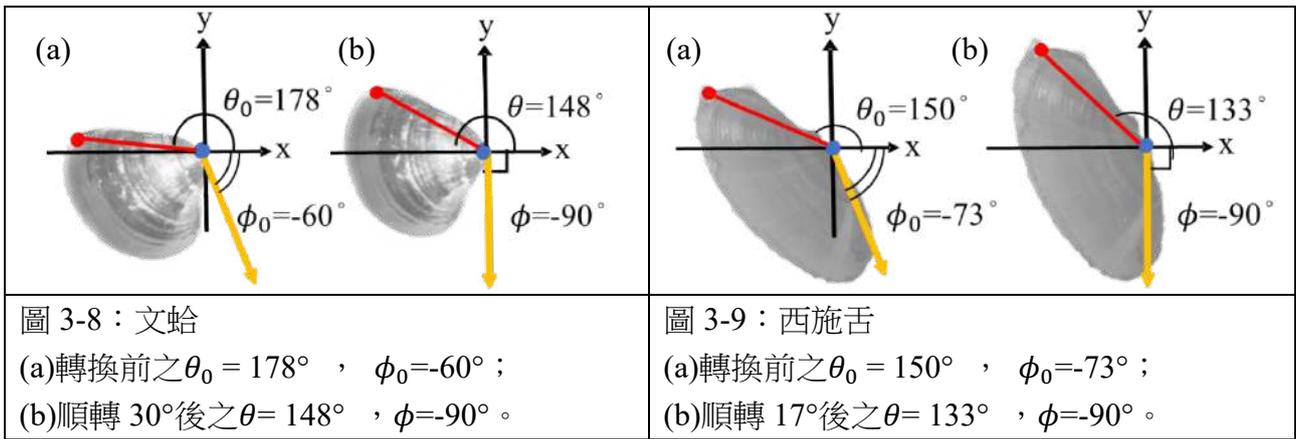


圖 3-7：文蛤、西施舌的移動座標系。

(四) 本文相關符號定義 (如下表)

符號	意義	符號	意義
L(cm)	殼長	h(cm)	雙殼綱單次下潛平均深度
W(cm)	殼寬	ϕ (°)	生物下潛軌跡與 X 軸的夾角
D(cm)	殼高	θ (°)	殼體角位置向量與 x 軸夾角
x(cm)	雙殼綱 x 軸方向位置	ω (°/s)	後端點角速度
y(cm)	雙殼綱 y 軸方向位置	v_y (cm/s)	雙殼綱鉛直速度
$ML_{1\sim6}$	以文蛤殼型改殼長之模型	$MD_{1\sim6}$	以文蛤殼型改殼高之模型
$MW_{1\sim7}$	以文蛤殼型改殼寬之模型	$SW_{1\sim6}$	以西施舌殼型改殼寬之模型

我們實際觀察 30 隻文蛤與 18 隻西施舌下潛時穩定的 θ 後發現，文蛤的平均 $\theta=190^\circ$ ，西施舌的平均 $\theta=150^\circ$ 。文蛤的 ϕ 主要介於 $-50^\circ\sim-80^\circ$ ，西施舌的 ϕ 主要介於 $-50^\circ\sim-70^\circ$ ，考慮到物理實驗裝置只允許將雙殼綱生物以 $\phi=90^\circ$ 下潛，為了實際模擬雙殼綱生物的下潛軌跡，我們做了下列座標轉換。(圖 3-8、圖 3-9)



而在雙殼綱模型的設計中，我們以真實文蛤的 $L : W : D = 1 : 0.54 : 0.83$ 、真實西施舌的 $L : W : D = 1 : 0.23 : 0.48$ 為基準，分別以 L 、 W 、 D 為操作變因製作模型。字首 M 、 S 分別是以文蛤、西施舌殼型為基礎設計的模型，字尾的字母為該模型改變的參數。（見附錄一）

四、文蛤與西施舌潛沙行為觀察方法

(一) 文蛤的潛沙行為觀察：

1. 將文蛤以後端點初始角位置 100° 放置於觀察箱中（圖 3-10）。
2. 分別利用側視與俯視的攝影機拍攝生物體潛沙的過程。
3. 利用 **tracker** 追蹤文蛤後端點與殼頂點的位置變化。

(二) 西施舌的潛沙行為觀察：

1. 將西施舌以前端垂直於觀察箱的玻璃板，平放於觀察箱中的沙上。
2. 重複步驟（一）-2、（一）-3。

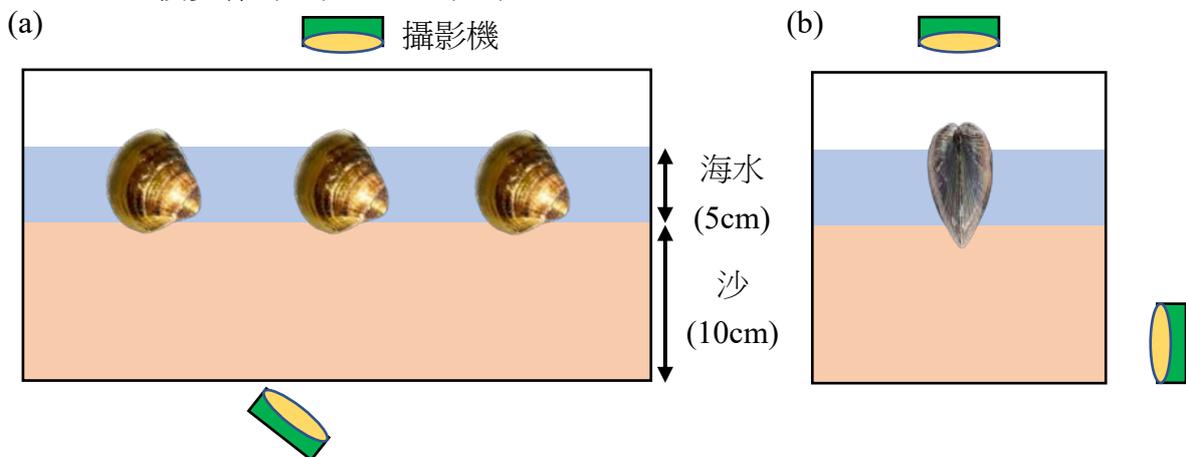


圖 3-10：文蛤、西施舌潛沙行為觀察箱：(a)正視圖；(b)側視圖。

五、實驗前置作業

(一) 殼體潛沙受力測量實驗裝置架設

1. 器材：角鋼、螺絲、壓克力板、千斤頂、電子秤、鐵片、鐵夾
2. 架設
 - (1) 將角鋼由螺絲固定成底面積為 $42*42(\text{cm}^2)$ 之長方體。
 - (2) 將鐵片組合後黏著於電子秤平台。
 - (3) 將千斤頂兩面分別與電子秤及壓克力板黏接後利用角鐵及鐵夾將電子秤倒置固定於角鋼組內。
 - (4) 利用水平儀確保裝置處於水平狀態。

(二) 受力測量實驗前置處理

由於沙+水環境條件較複雜，因此參考先前於香山溼地的調查結果，將潛沙實驗環境調整為潛沙受力值接近真實值（雙殼綱生存環境）的條件：

1. 潛沙環境設置
 - (1) 在壓克力容器中加入沙子至 10 公分高，並加水至水位高於沙面 0.5 cm
 - (2) 於電鑽前緣接上細長金屬棒，將其伸入沙+水中攪拌 5 秒
 - (3) 攪拌後靜置 1 分鐘，待容器中沙粒沉降
2. 潛沙深度刻度校準
 - (1) 將容器中的沙面整至一致高度，並將殼體調整至其下緣恰觸及沙面
 - (2) 調整量尺，使得此時下潛深度恰為 $H=0 \text{ cm}$

(三) 轉動慣量實驗裝置架設

1. 器材：瓦楞板、螺絲釘
2. 架設：將瓦楞板垂直固定，並將螺絲釘垂直瓦楞板釘入後黏著固定。

(四) 殼體受力實驗對象

1. 取樣
 - (1) 文蛤：將生物觀察後的文蛤殼編號後由大至小排列，在最大及最小殼長間以相差 0.2cm 為原則取 8 對殼，共 10 對。

- (2) 西施舌：將生物觀察後的西施舌殼編號後由大至小排列，在最大及最小殼長間以相差 0.16cm 為原則取 8 對殼，共 10 對。

2. 加工

- (1) 文蛤殼：將雙殼黏合後利用電鑽及打磨機在殼體後端距離殼頂點 0.5cm 處製造一條長 2cm 之溝槽。
- (2) 西施舌殼：將雙殼閉合後於殼體後端距離殼頂點 0.5cm 處預留 2cm 溝槽，其餘以熱熔膠密封。
- (3) 模型：利用打磨機在殼體後端距離殼頂點 0.5cm 處製造一條長 2cm 之溝槽。

(五) 轉動慣量實驗對象

1. 文蛤殼：將螺絲墊片分別黏著於殼緣中點、殼緣兩端點、前端中點、後端中點，共 5 片。
2. 西施舌殼：同 1.

六、實驗裝置圖

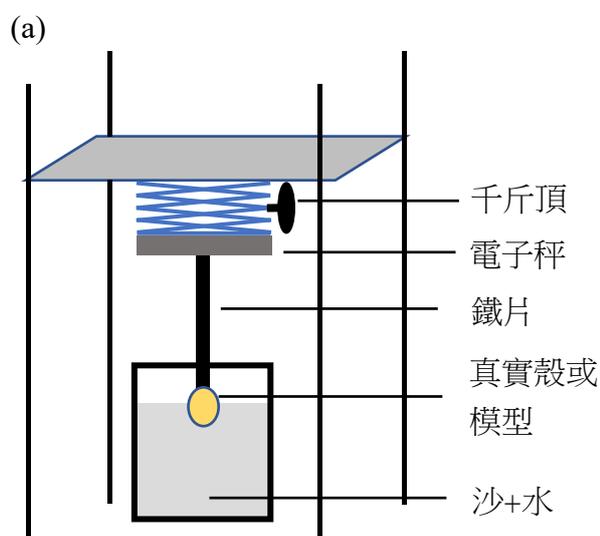


圖 3-11：(a)真實殼與 3D 模型潛沙受力測量實驗裝置

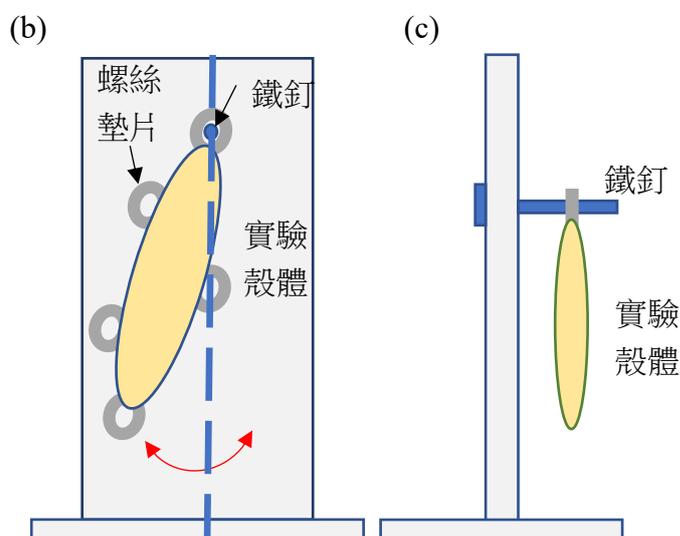


圖 3-12：轉動慣量測量實驗裝置：(b)正視圖、(c)側視圖。

七、實驗方法

(一) 真實殼體之潛沙受力測量實驗

1. 實驗(一)-1：探討文蛤、西施舌殼的潛沙受力隨深度變化的趨勢
 - (1) 將文蛤以 $\theta=180$ 度固定於裝置上。

- (2) 轉動千斤頂，使殼體下潛至 7cm；同時用兩支手機錄下深度與電子秤讀數。
- (3) 10 對文蛤各操作 3 次。
- (4) 改用西施舌以 $\theta=138$ 度固定於裝置上，重複步驟(2)、(3)。

2. 實驗 1 (一) – 2：探討文蛤、西施舌殼的潛沙角度與固定深度潛沙受力的關係

- (1) 將文蛤殼以 $\theta=110$ 度固定於裝置上。
- (2) 轉動千斤頂，使殼體下潛至 6cm；同時用兩支手機錄下深度與電子秤讀數。
- (3) 將 4 對文蛤殼分別以 $\theta=110$ 度、 $\theta=120$ 度、 $\theta=130$ 度、 $\theta=140$ 度、 $\theta=150$ 度、 $\theta=160$ 度、 $\theta=170$ 度、 $\theta=180$ 度各操作 3 次並記錄。
- (4) 改將 4 對西施舌殼以 $\theta=110$ 度固定於裝置上，重複步驟(2)、(3)。

(二) 殼體轉動慣量實驗

1. 實驗 (二) – 1：探討文蛤、西施舌殼的殼長對轉動慣量的影響

- (1) 利用棉線懸吊於文蛤殼上的墊片測量質心位置。
- (2) 在裝置上將文蛤殼上五個墊片位置懸掛擺盪，測量週期。
- (3) 五對文蛤殼分別進行 3 次。
- (4) 改將棉線懸吊於西施舌殼上的墊片測量質心位置，重複步驟(2)、(3)。

(三) 雙殼綱模型之潛沙受力測量實驗

1. 實驗 (三) – 1：探討雙殼綱模型的殼型參數與固定深度潛沙受力的關係

- (1) 將模型殼體以 $\theta=140$ 度固定於裝置上
- (2) 轉動千斤頂，使殼體下潛至 6cm；同時用兩支手機錄下深度與電子秤讀數。
- (3) 將 $ML_{1\sim6}$ 、 $MD_{1\sim6}$ 、 $MW_{1\sim7}$ 、 $SW_{1\sim6}$ 分別操作 3 次並記錄。

2. 實驗 (三) – 2：探討雙殼綱模型的潛沙角度與固定深度之潛沙受力的關係

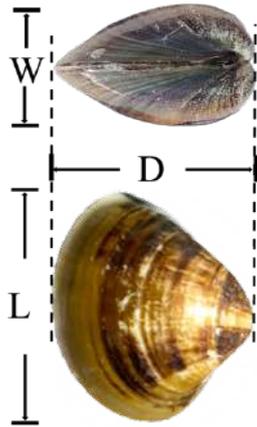
- (1) 將模型 ML_1 以 $\theta=110$ 度固定於裝置上。
- (2) 轉動千斤頂，使殼體下潛至 6cm；同時用兩支手機錄下深度與電子秤讀數，操作 3 次。
- (3) 將 $ML_{2\sim6}$ 、 $MD_{1\sim6}$ 、 $MW_{1\sim7}$ 、 $SW_{1\sim6}$ 以 $\theta=110$ 度、 $\theta=120$ 度、 $\theta=130$ 度、 $\theta=140$ 度、 $\theta=150$ 度、 $\theta=160$ 度、 $\theta=170$ 度、 $\theta=180$ 度分別操作 3 次並記錄。

肆、實驗結果

一、生物潛沙行為觀測

(一) 文蛤與西施舌殼型的基本參數：

針對本實驗使用到的文蛤與西施舌其殼型量測，共記錄了 42 隻文蛤與 65 隻西施舌，並將結果呈現於（表 4-1），詳細數據請見附錄 1。



物種		殼長高比 (L/D)	殼長寬比 (L/W)	殼高寬比 (D/W)
文蛤 N=42(隻)	平均	1.21	1.85	1.54
	標準差	0.05	0.08	0.07
	變異係數	0.04	0.04	0.05
西施舌 N=65(隻)	平均	2.10	4.40	2.10
	標準差	0.07	0.40	0.19
	變異係數	0.03	0.09	0.09

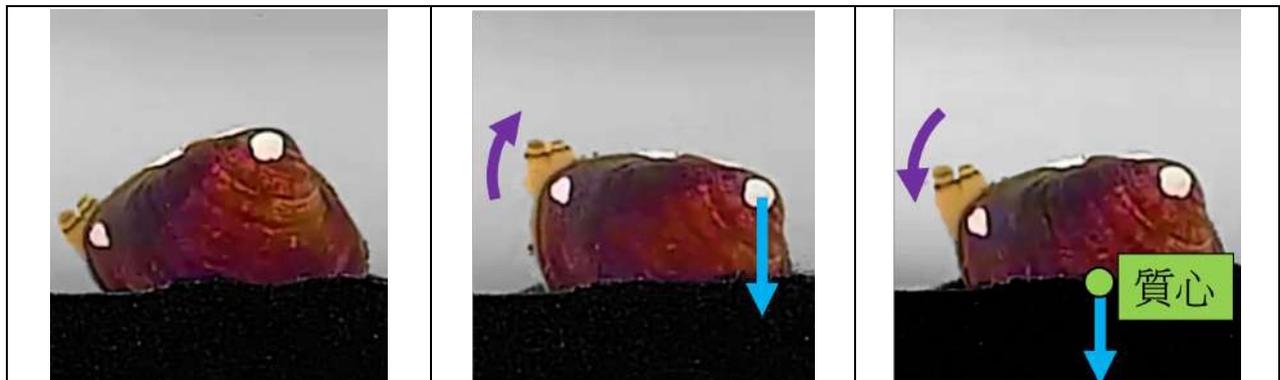
表 4-1：文蛤與西施舌殼型的基本參數
(變異係數 = 標準差 / 平均)

由上表 4-1 顯示：文蛤與西施舌種內殼型差異不大；而在種間的比較中可知，文蛤的 L/D、L/W、D/W 三個比值皆較西施舌小，反映出西施舌的殼型相較文蛤扁平。

(二) 文蛤與西施舌的潛沙機制：

1. 文蛤的潛沙機制

(1) 文蛤潛沙行為描述：



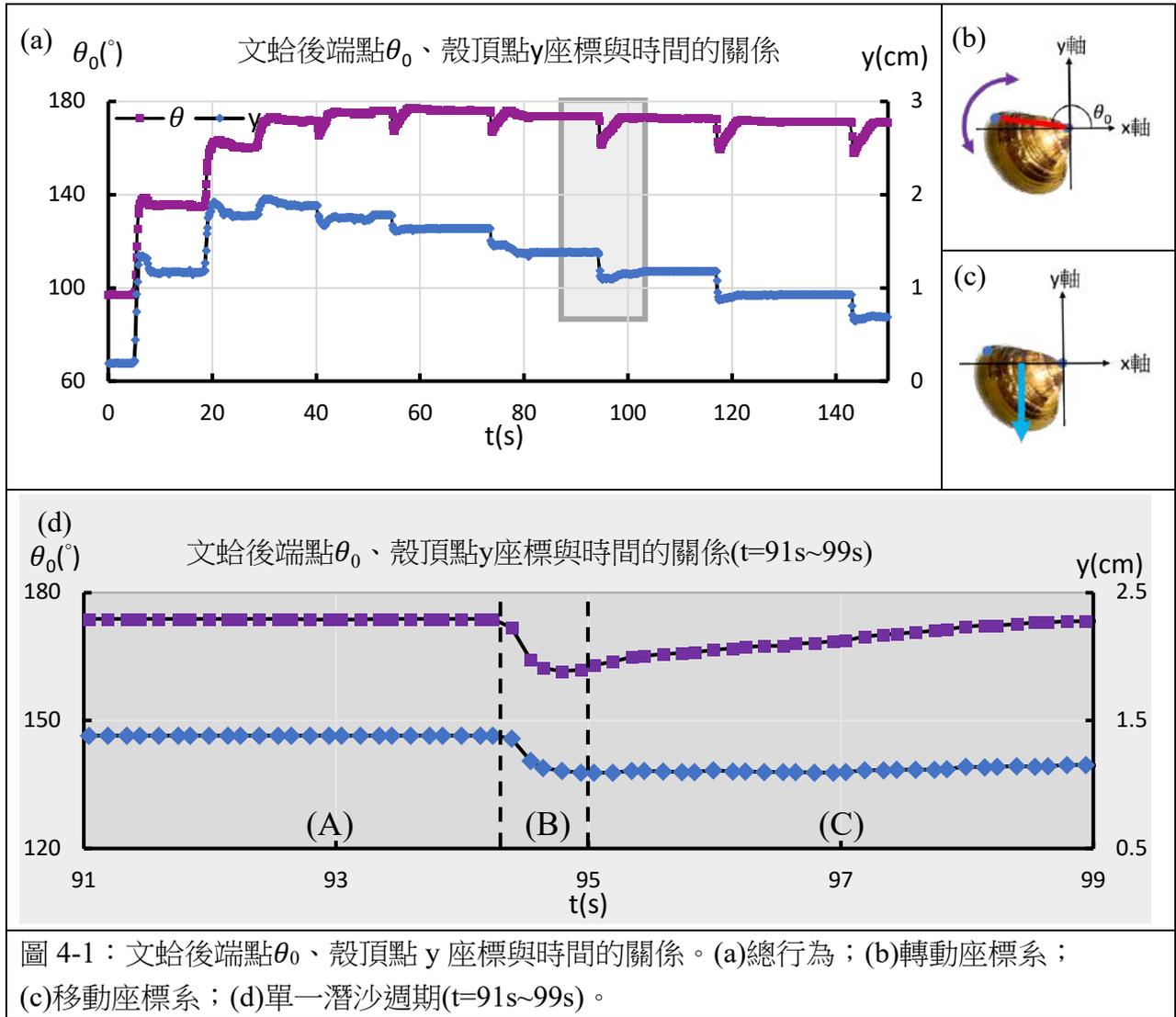
(A) 文蛤的後端點角位置 θ_0 為 178° 。

(B) 以質心為軸順時針轉動 11.4° ，殼頂點下潛 0.22cm 。

(C) 以殼頂點為軸逆時針轉動回復原 θ_0 ，質心下潛 0.22cm 。

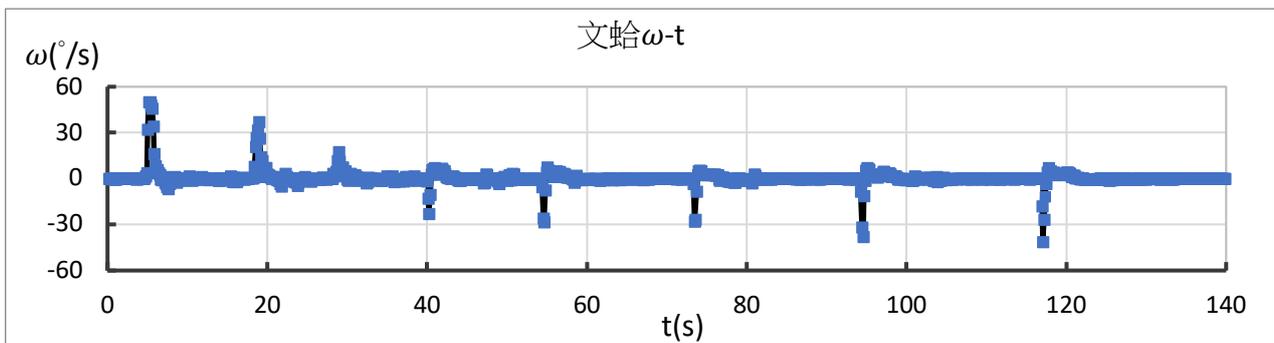
表 4-2：文蛤潛沙行為描述

(2) 文蛤殼體後端點角位置 θ_0 、殼頂點位置 y 與時間 t 的關係：



本研究共觀察 32 隻文蛤的潛沙行為，並在（圖 4-1）以其中一隻文蛤為例，說明文蛤後端點 θ_0 、殼頂點 y 座標與時間的關係。並發現文蛤以轉動方式潛沙，潛沙時後端點角位置 θ_0 平均為 178° ；每個週期的潛沙深度平均為 0.22cm 。

(3) 後端點 ω 、殼頂點 v_y 與時間 t 的關係：



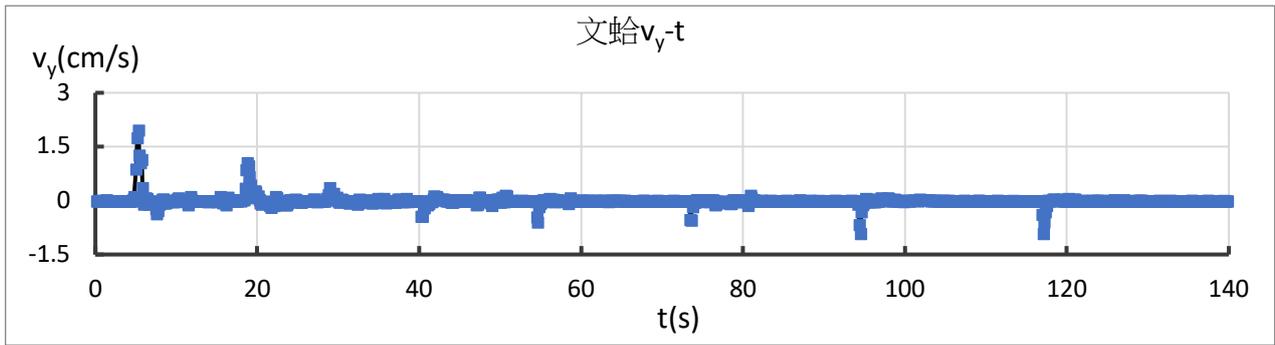


圖 4-3：殼頂點 v_y 與時間 t 關係圖

由上（圖 4-2、4-3）在潛沙期中（ $t > 30s$ ），文蛤每個潛沙週期的 ω 介於 $-20(^{\circ}/s)$ 至 $-40(^{\circ}/s)$ ； v_y 介於 $-0.5(cm/s)$ 至 $-1(cm/s)$ 。

(4) 文蛤後端點 θ_0 與質心 y 座標、殼頂點 y 座標的關係：

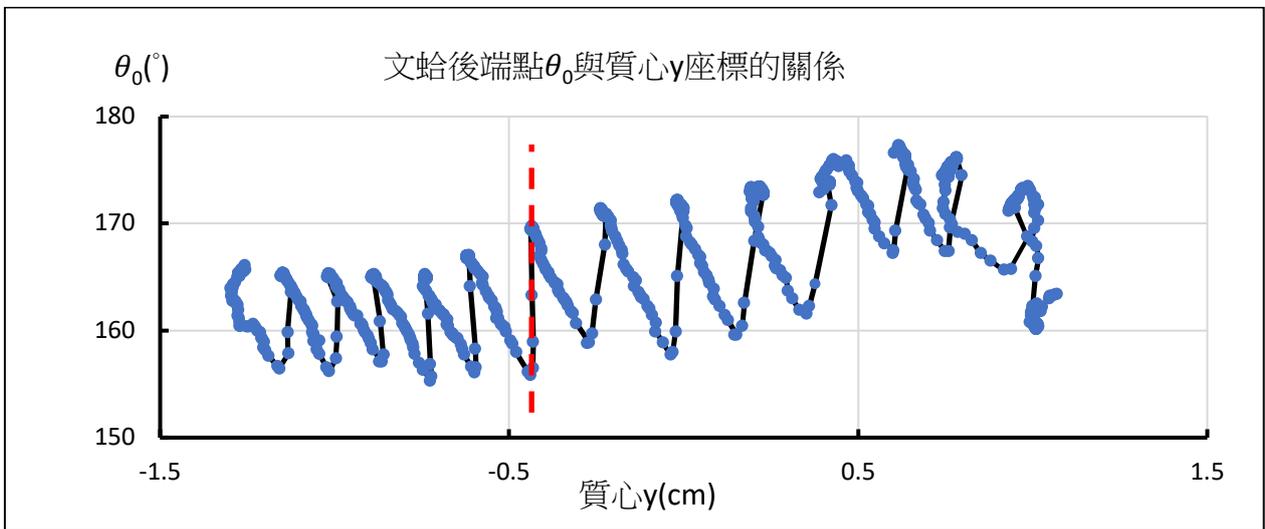


圖 4-4：文蛤後端點 θ_0 與質心 y 座標的關係

進一步分析文蛤潛沙過程轉動情形後，可在文蛤後端點 θ_0 與質心 y 座標的關係圖（圖 4-4）中發現，隨著文蛤逐漸潛入沙粒中，質心 y 座標逐漸下降。而圖表中，每個倒 V 代表文蛤經順時針（ θ_0 減少）與逆時針（ θ_0 增加）轉動後而完成的一個潛沙週期。當文蛤潛沙至質心 y 座標小於 $0.5cm$ 後，順時針轉動時（即紅線標示），其質心 y 無明顯變化，所以推測質心為文蛤順時針轉動時的轉軸。

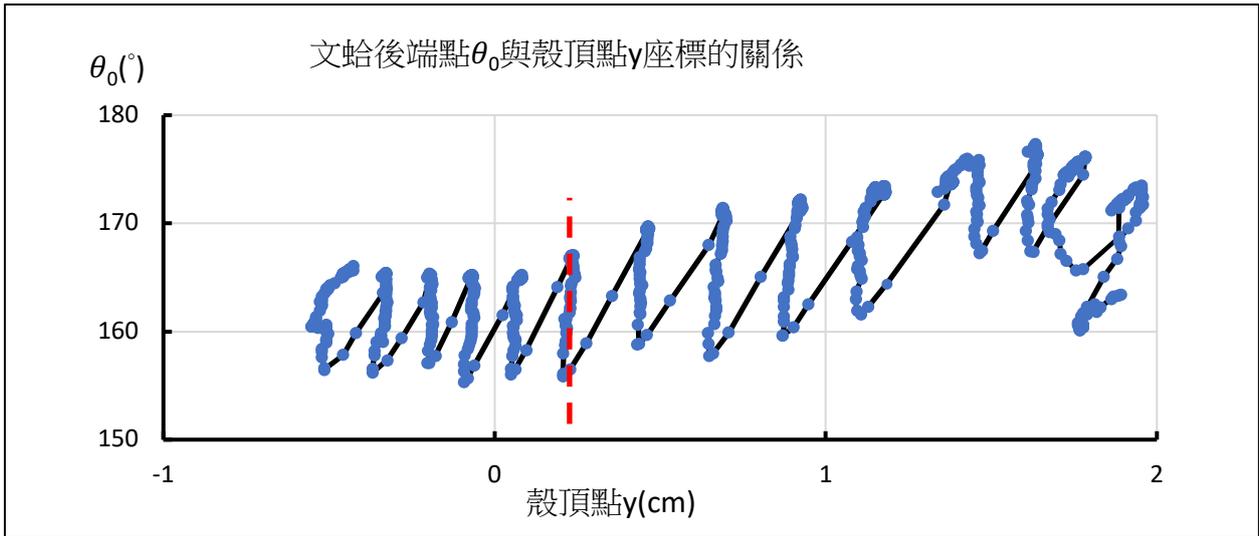
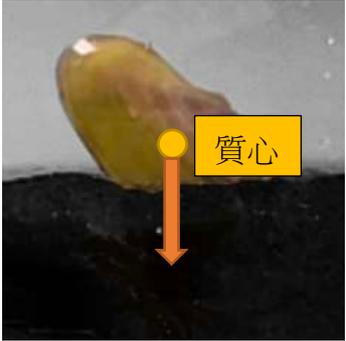
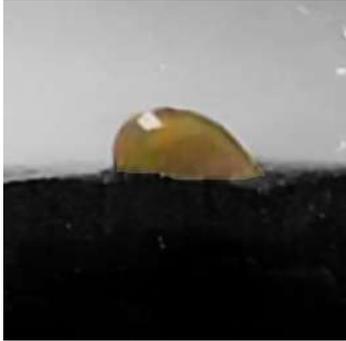


圖 4-5：文蛤後端點 θ_0 與殼頂點 y 座標的關係

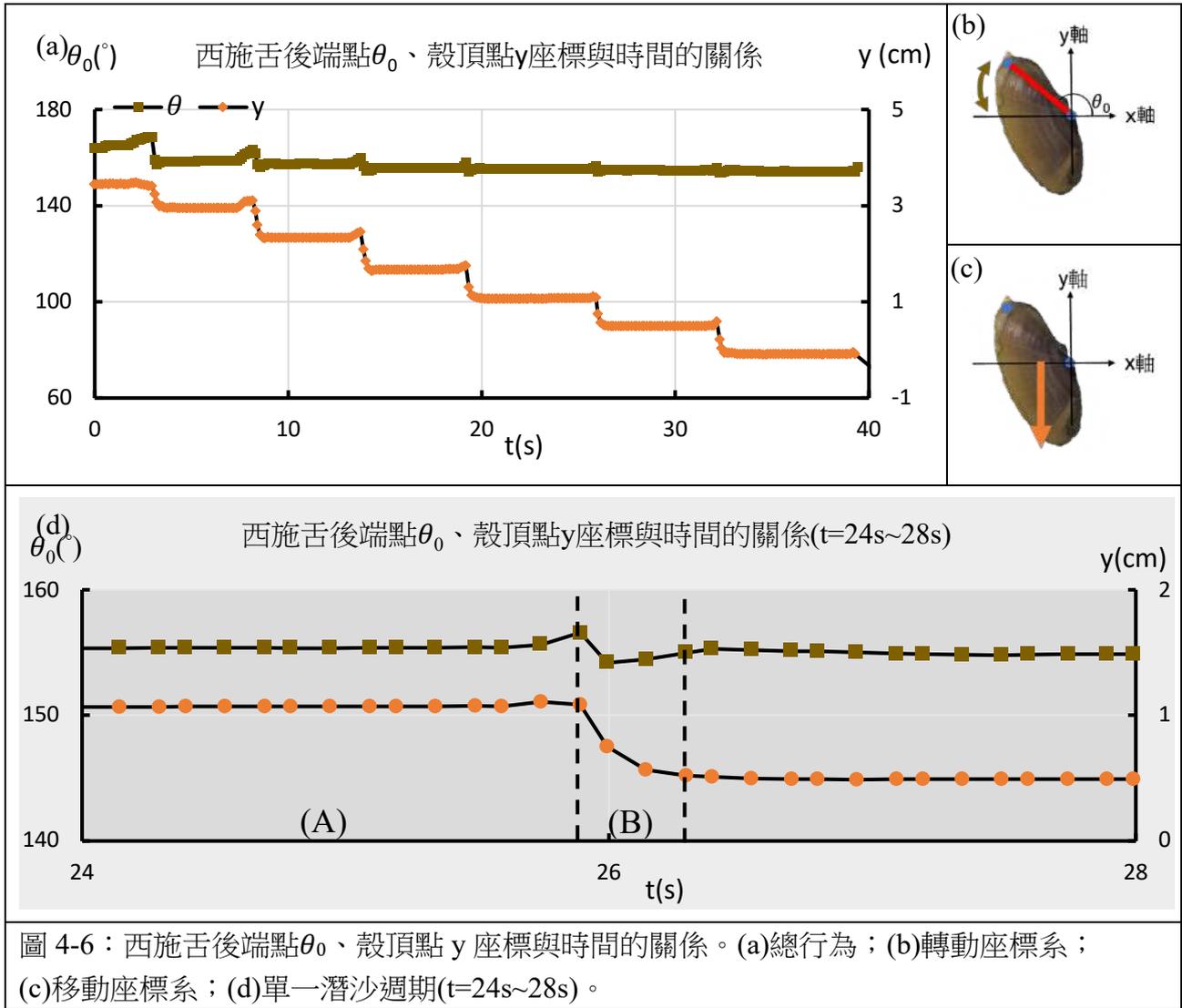
進一步分析文蛤潛沙過程轉動情形後，可在文蛤後端點 θ_0 與殼頂點 y 座標的關係圖（圖 4-5）中發現，隨著文蛤逐漸潛入沙粒中，殼頂點 y 座標逐漸下降。而圖表中，每個倒 V 代表文蛤經順時針（ θ_0 減少）與逆時針（ θ_0 增加）轉動後而完成的一個潛沙週期。當文蛤潛沙至殼頂點 y 座標小於 1cm 後，逆時針轉動時（即紅線標示），其殼頂點 y 無明顯變化，所以推測殼頂點為文蛤逆時針轉動時的轉軸。

2. 西施舌的潛沙機制

(1) 潛沙行為描述

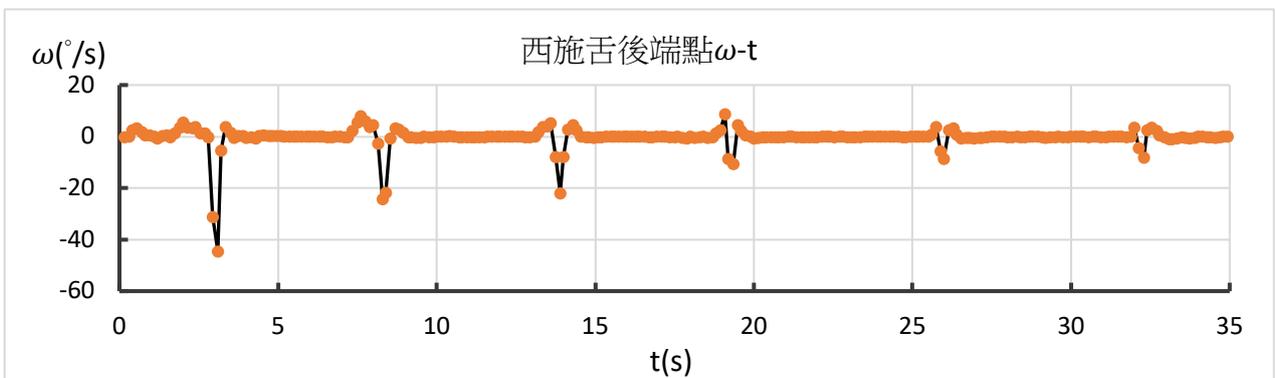
		
<p>(A)西施舌利用斧足將殼立起，此時的殼與觀察箱玻璃平行。</p>	<p>(B)西施舌持續斧足向下挖掘沙土，並利用斧足定錨於沙土中，同時收縮斧足將殼向下拉移 0.41cm。</p>	<p>西施舌持續下潛。</p>
<p>表 4-3：西施舌的潛沙行為描述</p>		

(2) 西施舌殼體後端點角位置 θ_0 、殼頂點位置 y 與時間 t 的關係：



本研究共觀察 17 隻西施舌的潛沙行為，僅以移動方式潛沙，潛沙時後端點角位 θ_0 平均 150° ；每個週期的潛沙深度 h 平均為 0.41cm 。

(3) 後端點 ω 、殼頂點 v_y 與時間 t 的關係：



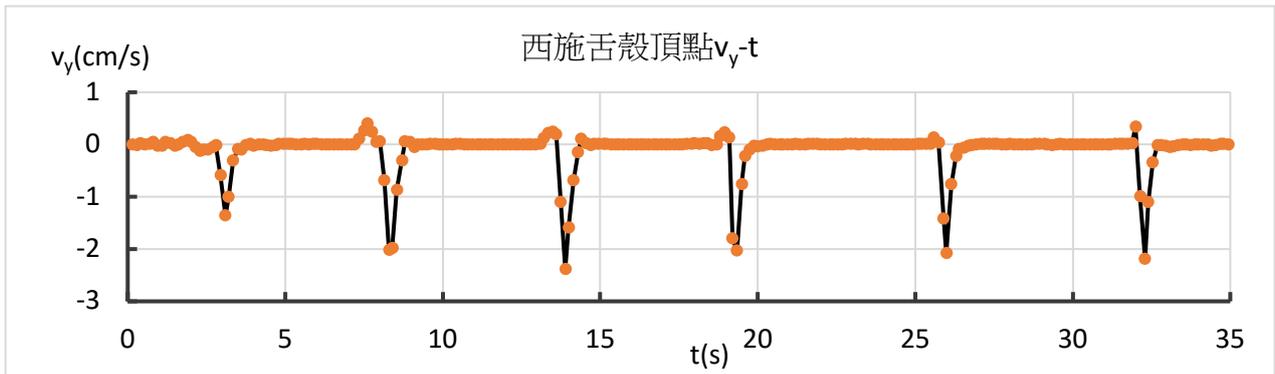


圖 4-8：殼頂點 v_y 與時間 t 關係圖

如上（圖 4-7、4-8）西施舌在潛沙期（ $t > 0s$ ），首個潛沙週期的 ω 為 $-42(^{\circ}/s)$ ； v_y 為 $-1.5(cm/s)$ 。隨潛沙次數增加，西施舌的 ω 值逐漸下降至 $-5(^{\circ}/s)$ ；而 v_y 維持 $-2(cm/s)$ 。

3. 文蛤與西施舌的潛沙軌跡

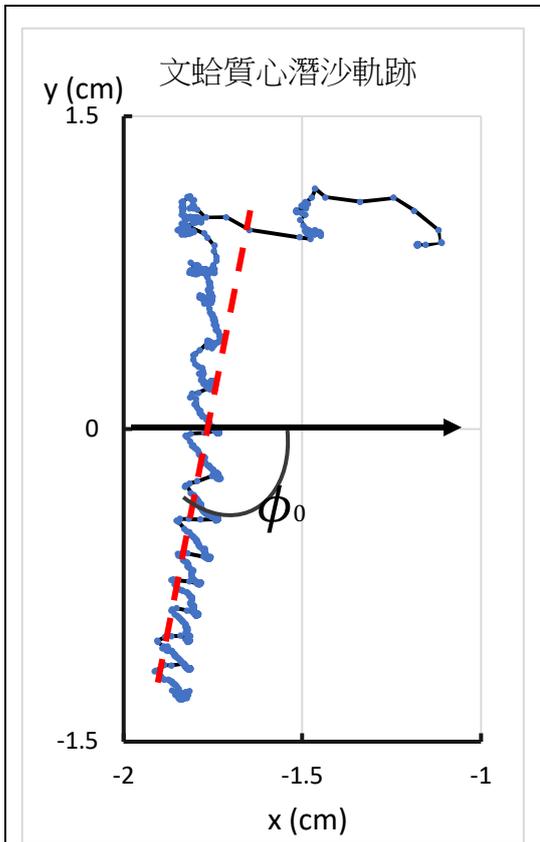


圖 4-9：文蛤質心潛沙軌跡

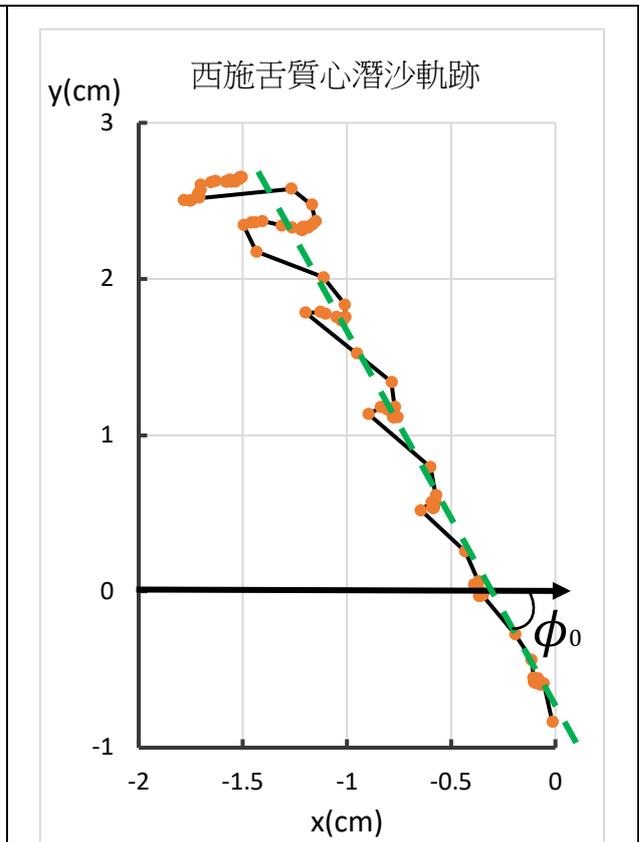


圖 4-10：西施舌質心潛沙軌跡

由（圖 4-9、4-10）可知，文蛤在每個潛沙週期中，質心會以 z 字型運動；西施舌則在首 3 個潛沙週期中，質心以 z 字型運動，而隨著潛沙週期增加，西施舌的質心運動趨近直線運動。綜合文蛤與西施舌多個潛沙週期質心的運動，可發現質心的軌跡是一條斜直線，我們將此條斜直線與 x 軸夾角的定義為 ϕ 。

二、雙殼綱潛沙受力模擬實驗

(一)文蛤與西施舌殼在相同角度潛沙 F-H 關係

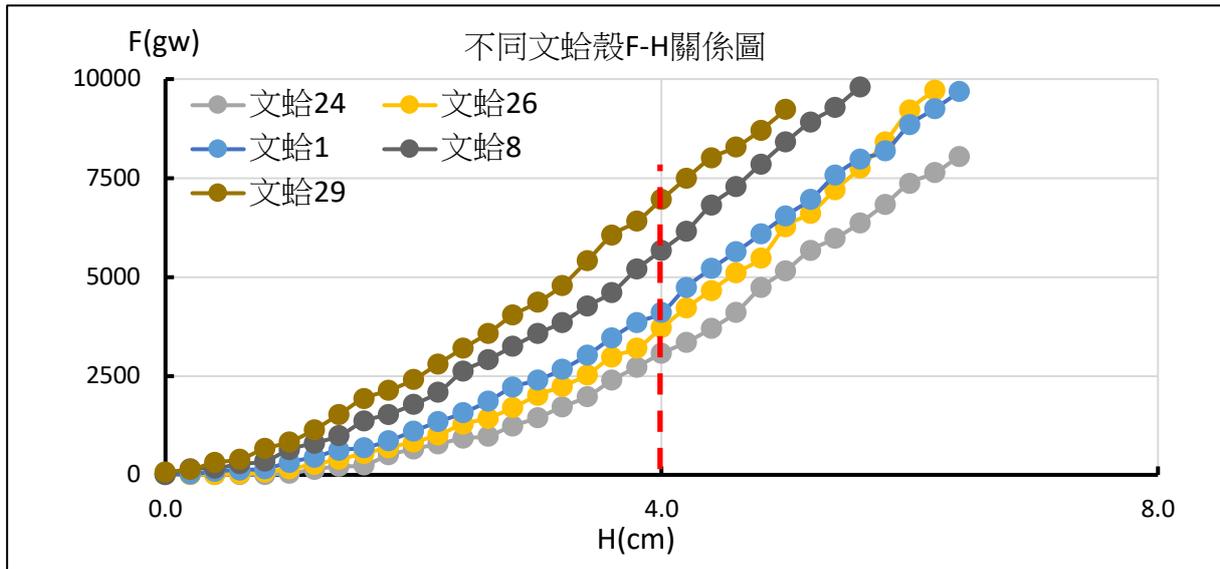


圖 4-11：文蛤殼受力 F 對潛沙深度 H 關係圖

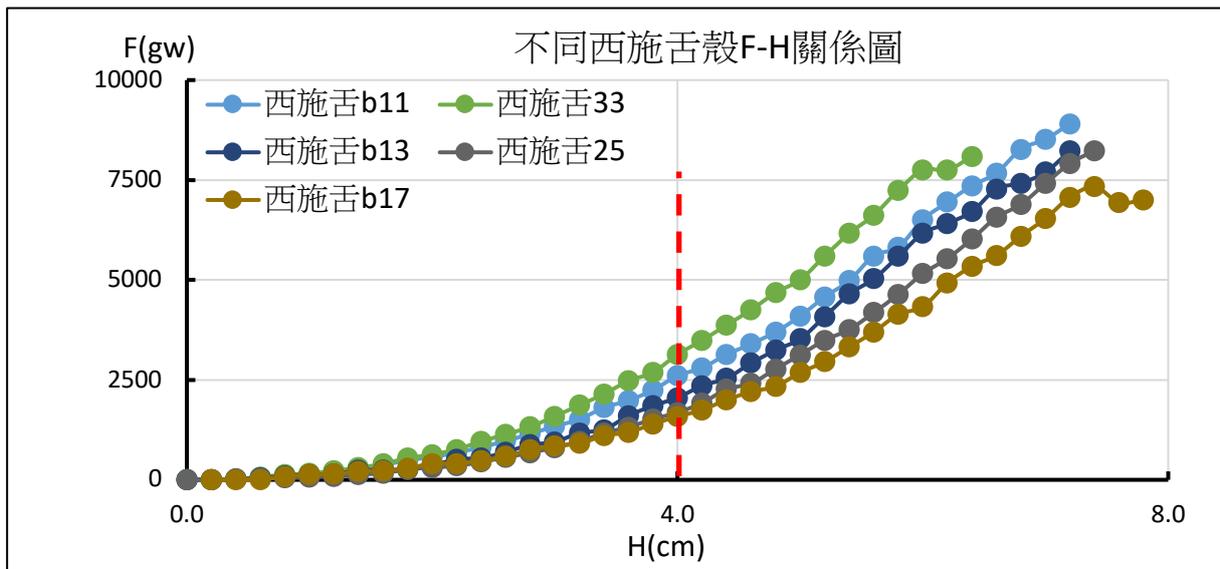


圖 4-12：西施舌殼受力 F 對潛沙深度 H 關係圖

比較圖 4-11、圖 4-12，文蛤殼及西施舌殼潛沙深度越深時受力即愈大，增加幅度亦隨潛沙深度增加而愈大。在不同取樣的殼體中，西施舌殼在種內的受力差異範圍較文蛤殼小；潛沙至 $H=4\text{cm}$ 時，文蛤落在 3070.4gw 至 6406.3gw 之間；西施舌受力範圍則落在 1413.0gw 至 3121.4gw 之間，整體而言，文蛤殼潛沙受力大於西施舌殼潛沙受力。另外，西施舌在 $H>6\text{cm}$ 時，部分殼體受力值 F 出現隨深度 H 增加而減少的數據現象。

(二)文蛤與西施舌殼在不同角度潛沙 F-H 關係

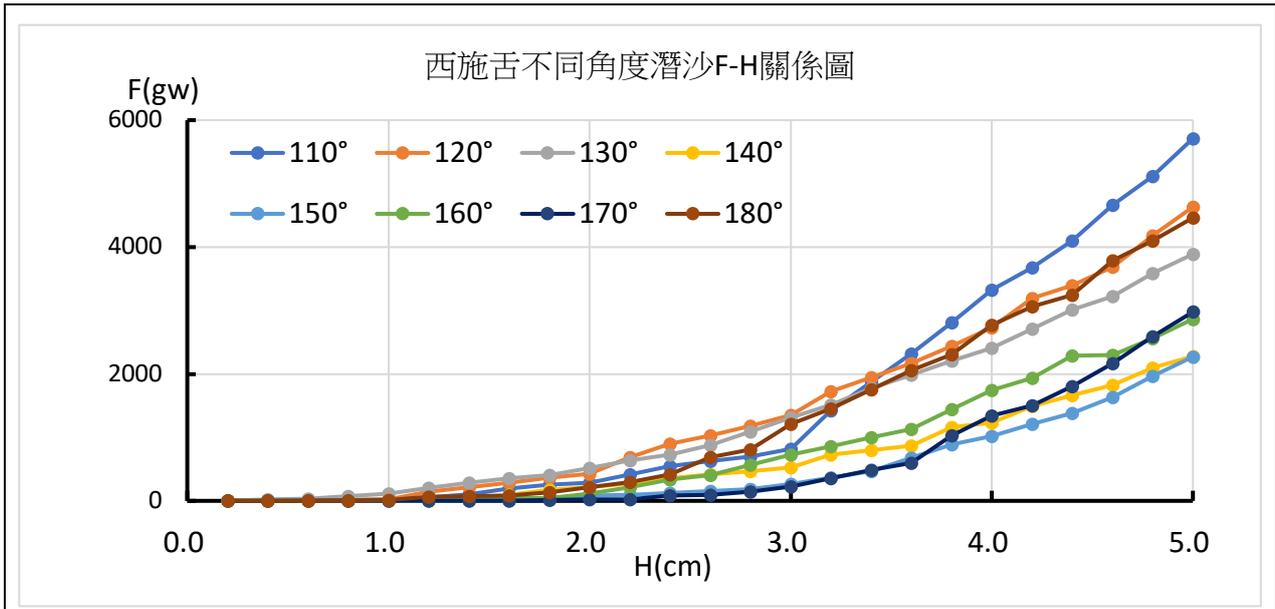


圖 4-13：文蛤殼不同潛沙角度 F-H 圖

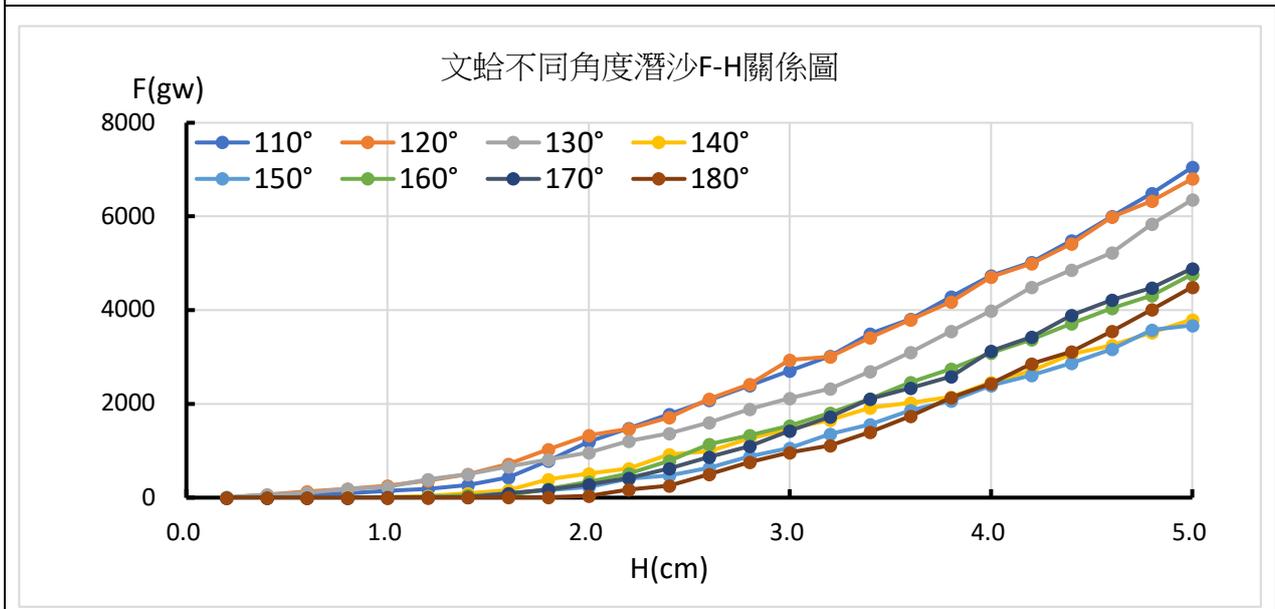


圖 4-14：西施舌殼不同潛沙角度 F-H 圖

由圖 4-13 及圖 4-14，文蛤殼以不同角度潛沙，在不同深度中受力由大至小皆分別為 110°、120°、130°、160°、170°、180°、140°、150°；而西施舌殼以不同角度潛沙，其受力由大至小皆分別為 110°、120°、180°、130°、170°、160°、150°、140°。文蛤與西施舌在不同深度中受力最大皆為 110°，最小兩個角度則皆為 140°、150°。整體而言，文蛤受力大於西施舌許多。

(三)文蛤與西施舌殼的質心轉動慣量

根據結果一測量之殼形數據，挑選各尺寸極大、極小值的殼體進行質（重）心測量及複擺實驗。經實驗測量週期 T 、懸掛點與質心距 d 後，利用複擺實驗原理線性式。

$$T^2 d = \frac{4\pi^2}{g} d^2 + \frac{4\pi^2}{mg} I_{c.m.}$$

回歸並推算各殼體通過質心的轉動慣量 $I_{c.m.}$ 。

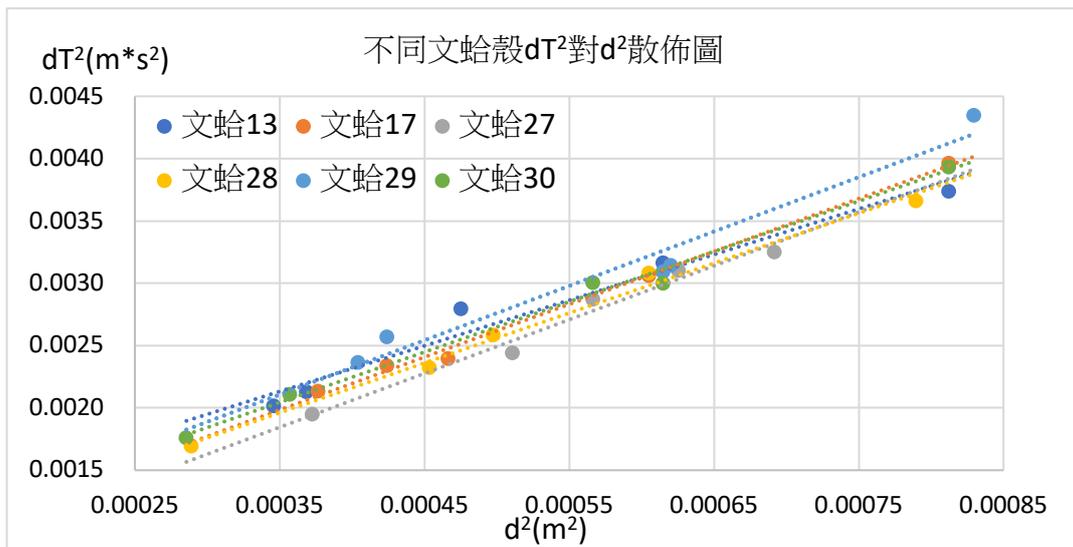


圖 4-15：文蛤殼殼複擺實驗結果散佈圖

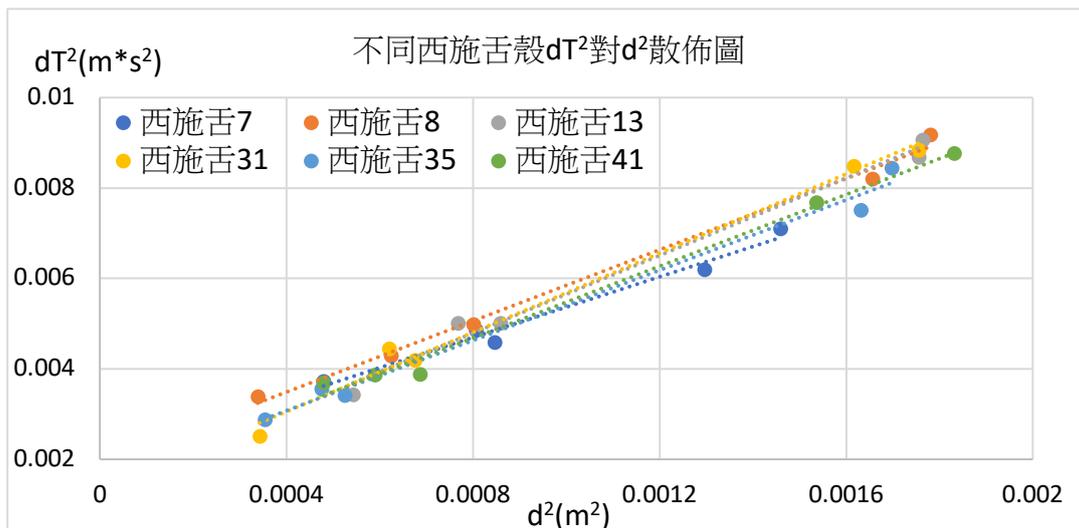


圖 4-16：西施舌殼殼複擺實驗結果散佈圖

編號	文蛤 13	文蛤 17	文蛤 27	文蛤 28	文蛤 29	文蛤 30
斜率	4.0223	4.2151	4.1428	4.0763	4.0500	4.2619
截距	4.48E-04	4.79E-04	2.83E-04	4.05E-04	5.54E-04	4.25E-04
I _{c.m.}	0.0147	0.0125	0.0019	0.0070	0.0313	0.0083
I _{c.m./m}	1.1140	1.1372	0.6841	0.9932	1.3683	0.9972
編號	西施舌 7	西施舌 8	西施舌 13	西施舌 31	西施舌 35	西施舌 41
斜率	3.9729	4.1054	4.1772	4.2071	3.9748	4.1675
截距	6.99E-04	9.96E-04	8.33E-04	9.33E-04	6.50E-04	7.75E-04
I _{c.m.}	0.0166	0.0385	0.0167	0.0266	0.0101	0.0183
I _{c.m./m}	1.7606	2.4263	1.9931	2.2175	1.6346	1.8595

表 4-4：文蛤殼及西施舌殼複擺實驗結果圖表資訊

由上結果（圖 4-14、4-15），不同殼體以複擺實驗結果分別對 T^2d-d^2 關係做圖，並以線性回歸推得斜率及截距，再處理計算出重力加速度 g 及質心轉動慣量 $I_{c.m.}$ 。其結果呈現於（表 4-4）；文蛤殼及西施舌殼實驗結果的斜率平均約為 $4.128(s^2/m)$ 及 $4.101(s^2/m)$ ，兩者差異極小且不同殼體結果之斜率變異量亦極小，即實驗中測得重力加速度相近。截距部分則可推得轉動慣量，然而在實驗結果文蛤與西施舌並無明顯關係，經單位質量處理之後，則可將文蛤殼及西施舌分為明顯差異的兩區段。

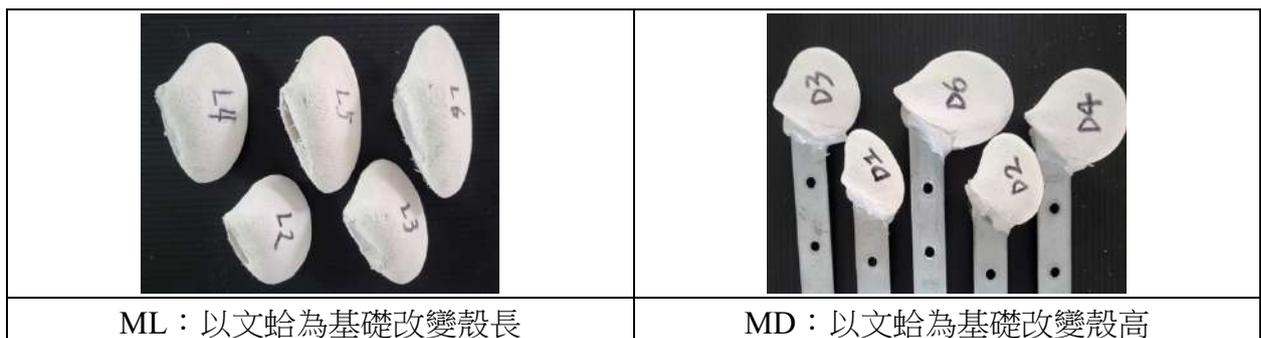
(四)雙殼綱模型潛沙力學實驗

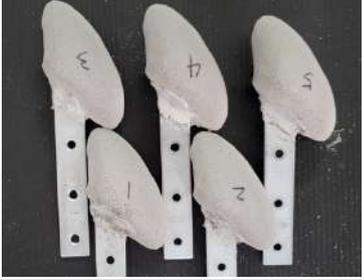
1. 模型基本參數：

根據實驗結果一測量之殼形數據，以平均之文蛤、西施舌殼尺寸參數、設計模型，並改變不同模型的殼長、寬、高，模擬文蛤及西施舌殼型差異變化。

2. 雙殼綱模型潛沙力學實驗：

將不同雙殼綱模型（ML、MD、MW、SW）（如下表 4-5）使用 $\theta=140^\circ$ 潛沙至總深度 $H=4\text{cm}$ 時的受力分別與其改變的 L 、 D^2 、 W^2 作圖：



	
MW：以文蛤為基礎改變殼寬	SW：以西施舌為基礎改變殼寬
表 4-5：雙殼綱模型	

(1) ML 的 F-L 關係

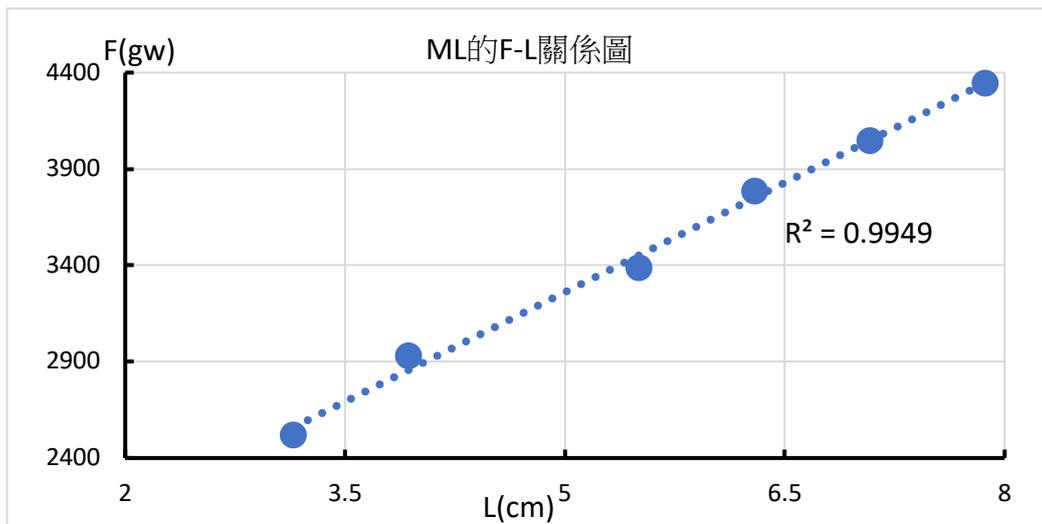


圖 4-17：ML 的 F-L 關係圖

(2) MD 的 F-D² 關係

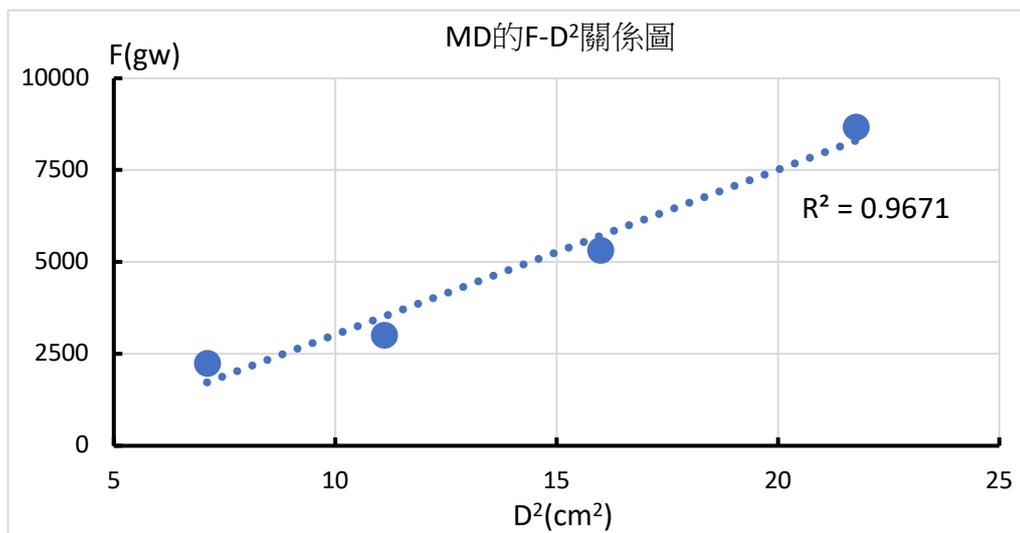


圖 4-18：MD 的 F-D² 關係圖

(3) MW 的 F-W² 關係

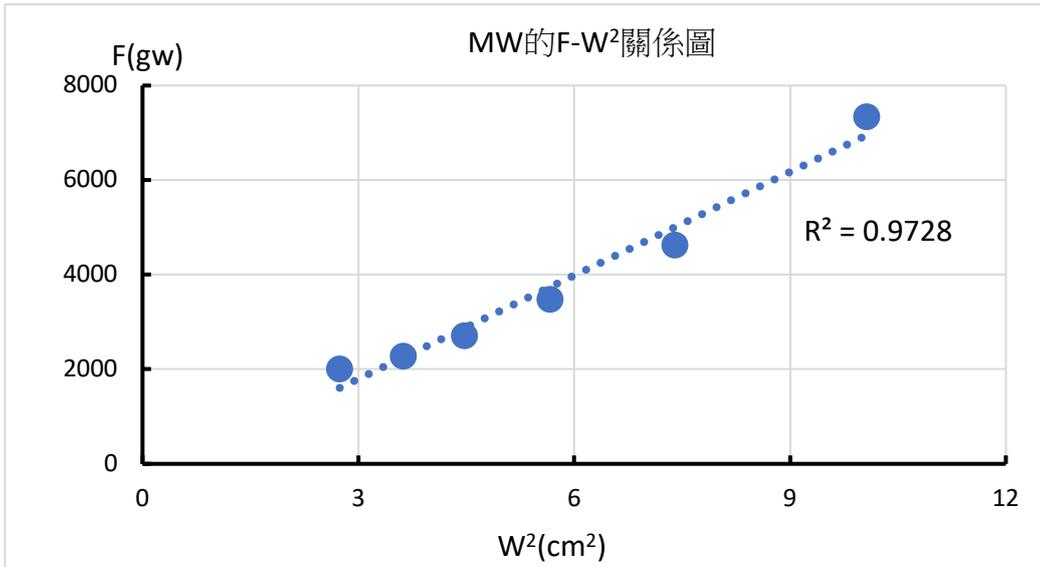


圖 4-19：MW 的 F-W² 關係圖

(4) SW 的 F-W² 關係

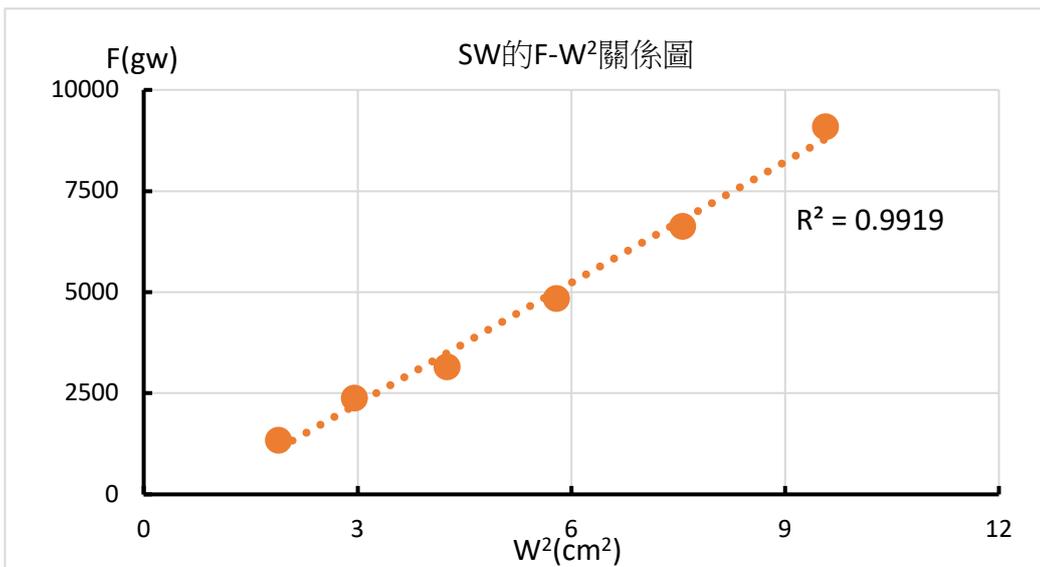


圖 4-20：SW 的 F-W² 關係圖

由以上四張圖可得下列四點結果：

ML 模型的受力 F 與 L 呈線性正相關

MD 模型的受力 F 與 D² 呈線性正相關

MW 模型的受力 F 與 W² 呈線性正相關

SW 模型的受力 F 與 W² 呈線性正相關

伍、討論

一、文蛤與西施舌會根據潛沙過程受力 F 選擇適合的潛沙角度 θ 進行潛沙

我們在實際觀察文蛤 (N=32) 與西施舌(N=17)潛沙過程後，發現此兩種雙殼綱的潛沙軌跡皆會以特定的角度下潛（下潛軌跡與 x 軸夾角為 ϕ_0 ，見圖 4-9、4-10 質心軌跡圖）。但由於力學實驗裝置的限制，僅能以潛沙 $\phi=-90^\circ$ 垂直向下潛沙。所以，為了綜合比較真實雙殼綱潛沙過程所選用的後端點角位置 θ 與受力 F 的關係。我們對真實雙殼綱潛沙過程中的後端點角位置進行座標轉換（見圖 3-8、3-9 座標轉換）：

$$\text{座標轉換後後端點角位置 } \theta = \theta_0 - (90 + \phi_0)。$$

（一）文蛤會選擇的受力 F 較小的後端點角位置 θ 進行潛沙：

比較文蛤數量與其選用的後端點 θ 關係（圖 5-1）後可發現，文蛤選用的 θ 主要落在 $135^\circ \sim 155^\circ$ (56%)，此時的潛沙受力 F 為 5018 ± 187.09 (gw)，而因為受力 F 增加至 6000(gw) 以上，因此選用其他角度為 θ 進行下潛的文蛤較少。

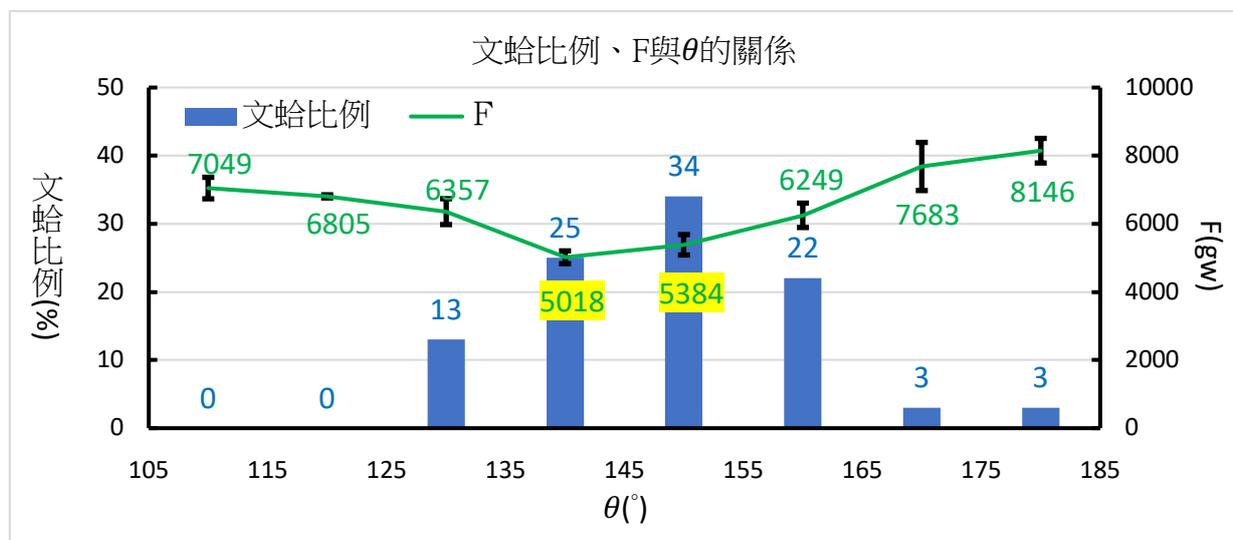


圖 5-1：文蛤數量比例、 F 與 θ 的關係

(二) 西施舌會選擇的受力 F 較小的後端點角位置 θ 進行潛沙

比較西施舌數量與其選用的後端點 θ 關係 (圖 5-2) 後可發現，西施舌選用的 θ 主要落在 $115^\circ \sim 145^\circ$ (88%)，此時西施舌的潛沙受力 F 介於 $3068 \pm 255.33(\text{gw})$ ，而隨著 θ 增加至 160° 以上，西施舌潛沙受力 F 大幅度增加至 $4941 \pm 415.62(\text{gw})$ ，而因為受力 F 的增加，沒有西施舌選用 160° 以上為 θ 進行下潛。

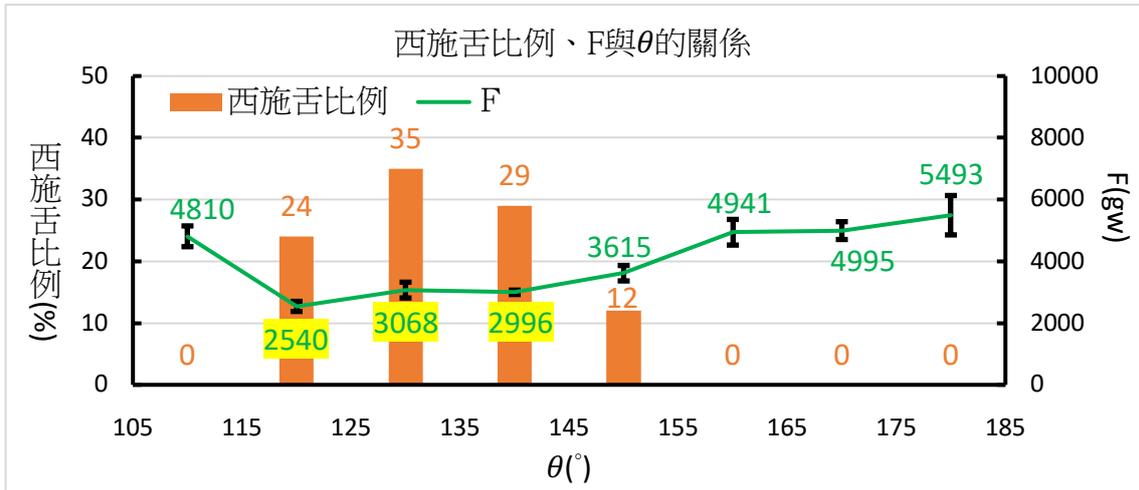


圖 5-2：西施舌數量比例、 F 與 θ 的關係

二、文蛤與西施舌單次潛沙深度 h 、潛沙總深度 H 與潛沙過程中所受阻力 F 有關

(一) 文蛤單次潛沙深度 h 、潛沙總深度 H 皆比西施舌淺：

如圖 5-3，比較文蛤($N=32$)與西施舌($N=17$)首 5 個潛沙週期的 h ，發現文蛤的 h 約為 0.22cm ，小於西施舌的 0.4cm 。文獻中又得知文蛤在自然環境中的潛沙總深度 H 約為 6cm ，西施舌則為 30cm 。由此可知文蛤的 h 、 H 皆小於西施舌許多。

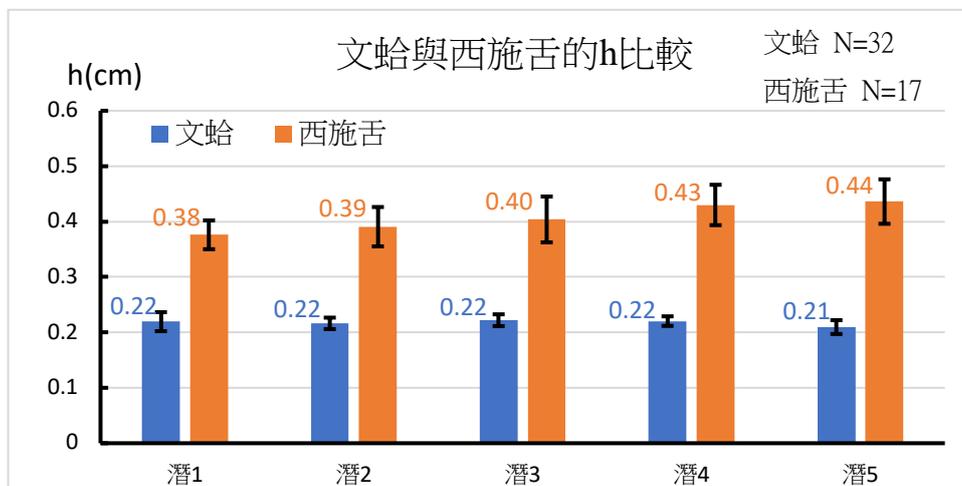


圖 5-3：文蛤與西施舌首 5 個潛沙週期的 h 比較

(二) 文蛤潛沙過程中的受力 F 及單位質量耗能 E/m 在不同深度時皆大於西施舌：

如圖 5-4，我們綜合了真實文蛤殼($N=10$ 個)與真實西施舌殼($N=10$ 個)在不同潛沙總深度 H 時的受力 F ，將兩者潛沙 $F-H$ 圖的迴歸線積分並同除其質量，得到單位質量耗能並做 E/m 與 H 關係圖 (圖 5-5)，發現文蛤潛沙過程中受力 F 及單位質量耗能 E/m 在不同深度 H 時皆大於西施舌。

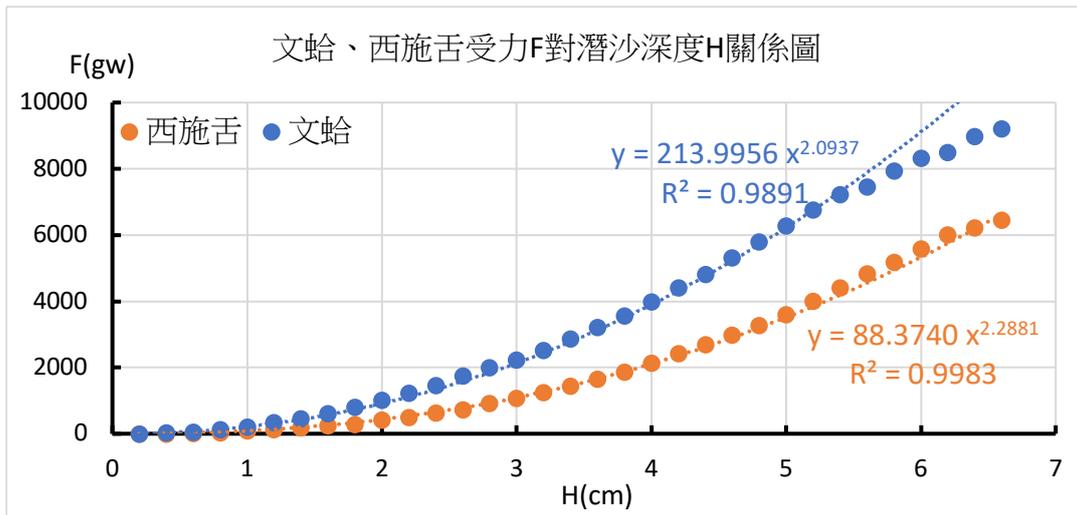


圖 5-4：文蛤、西施舌受力 F 對潛沙深度 H 的關係圖

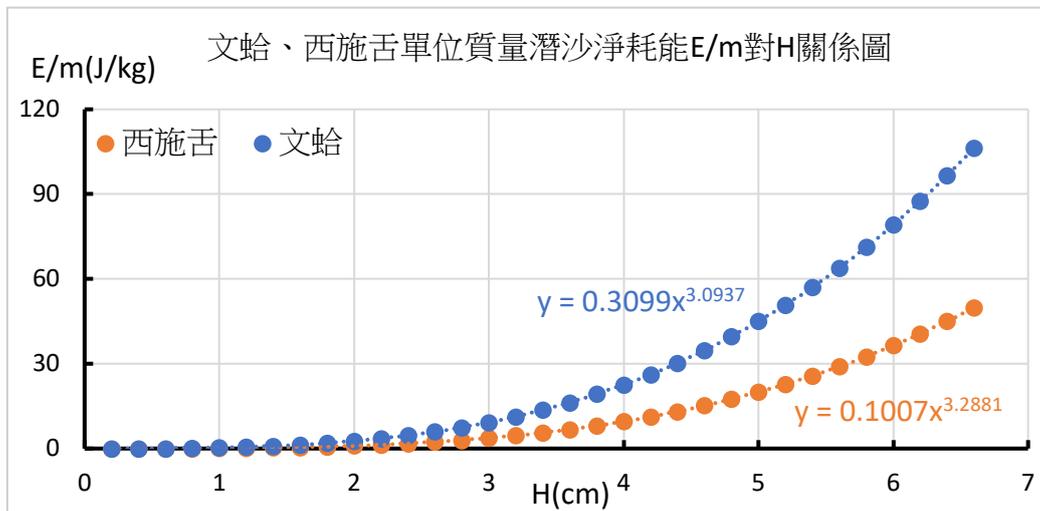


圖 5-5：文蛤、西施舌單位質量潛沙淨耗能對潛沙深度 H 的關係圖

綜合 (一)、(二) 所述可知，由於文蛤與西施舌兩者的殼型差異，使前者在潛沙過程中的受力 F 及單位質量耗能 E/m 皆大於西施舌，所以文蛤的單次潛沙深度 h 與潛沙總深度 H 皆小於西施舌。

三、文蛤與西施舌每個潛沙週期後端點角位置變化 $\Delta\theta$ 與其殼長有關

(一) 文蛤每個潛沙週期的後端點角位置變化 $\Delta\theta$ ，大於西施舌的 $\Delta\theta$ 。

如圖 5-6，比較文蛤(N=32)與西施舌(N=17)首 5 個潛沙週期後端點的角位置變化 $\Delta\theta$ 可發現，文蛤的 $\Delta\theta$ 為 11.42° ，大於西施舌的 1.44° 許多。

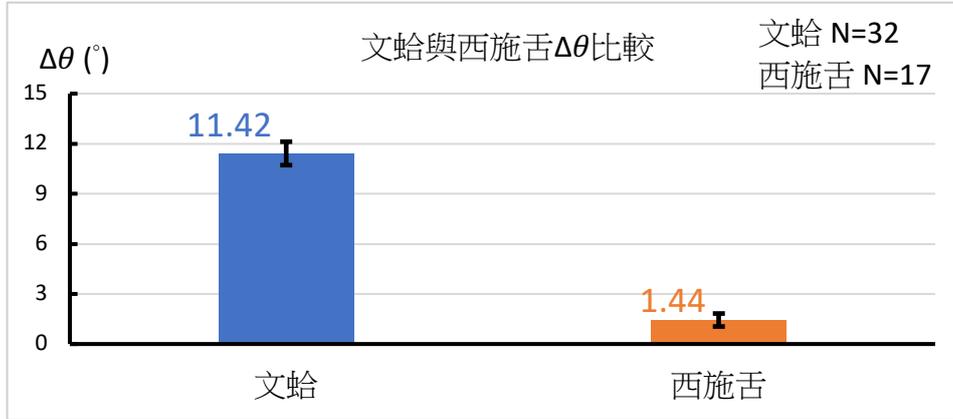


圖 5-6：文蛤與西施舌個潛沙週期後端點角位置變化 $\Delta\theta$ 比較圖

(二) 文蛤與西施舌單位質量質心轉動慣量 $I_{c.m.}$ 與殼長成正相關：

如下（圖 5-7）所示，文蛤與西施舌單位質量質心轉動慣量 $I_{c.m.}$ 與殼長成線性正相關，而由於文蛤的殼長皆小於西施舌的殼長，所以文蛤單位質量質心轉動慣量 $I_{c.m.}$ 皆小於西施舌。

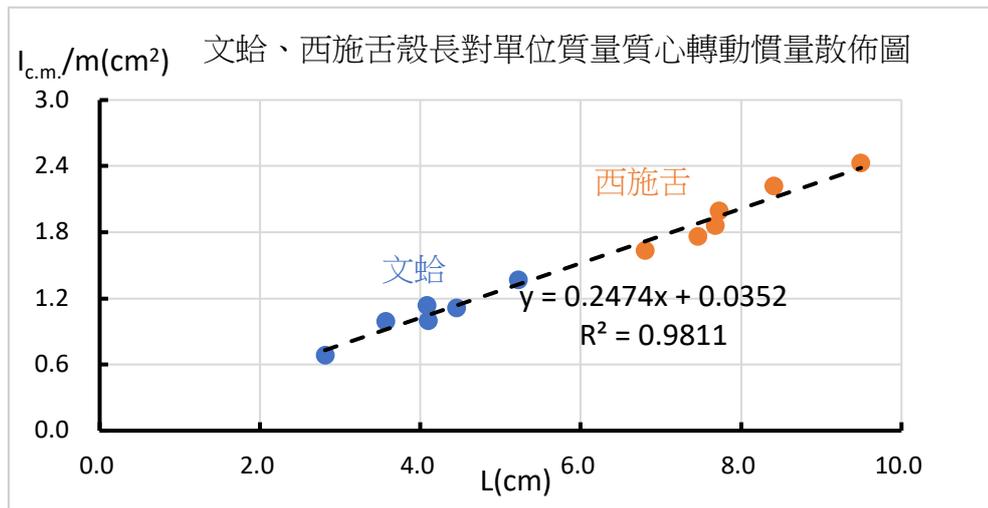


圖 5-7：文蛤、西施舌殼長對單位質量質心轉動慣量散佈圖

綜合（一）、（二）文蛤單位質量 $I_{c.m.}$ 小於西施舌單位質量 $I_{c.m.}$ ，所以文蛤相較西施舌較易由轉動方式潛沙。我們推測殼長越小的雙殼綱在潛沙機制上會越趨向使用轉動方式潛沙。

四、真實殼與相似模型於不同潛沙角度的受力比較

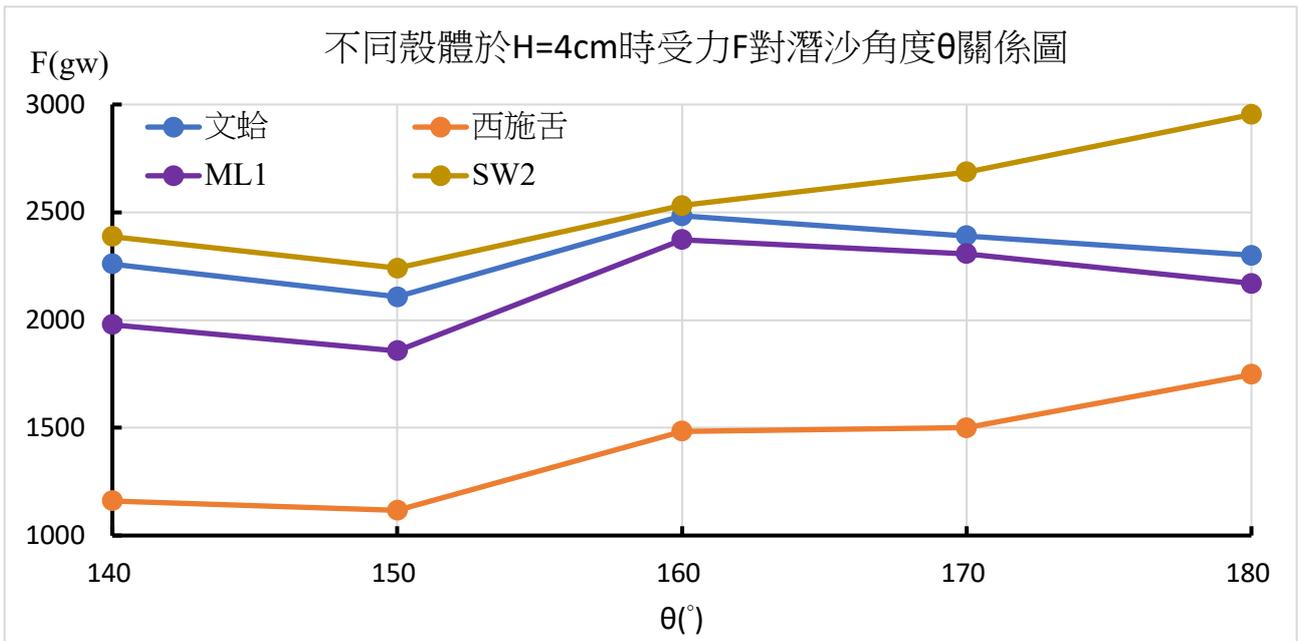


圖 5-8：不同殼體於 H=4cm 時受力 F 對潛沙角度 θ 關係圖

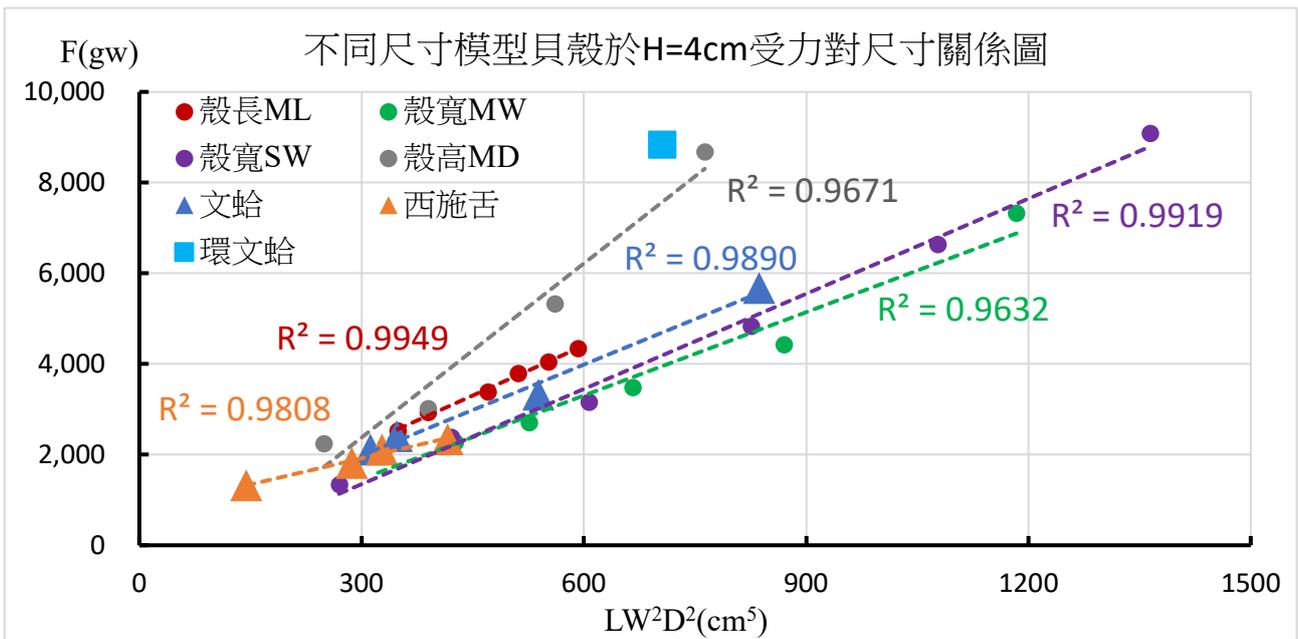


圖 5-9：不同尺寸模型貝殼於 H=4cm 受力對尺寸關係圖

由圖 5-8，取外殼殼型接近真實文蛤、西施舌的模型 ML1、SW2，兩組殼型相近的真實殼與模型在不同角度下受力的變化趨勢相近，唯因 SW2 模型是以文蛤模型更改為西施舌之殼型參數，故實際結果仍因殼型不同與西施舌殼受力仍因殼型有截距差異。由圖 5-9 發現不同參數模型結果顯示潛沙受力 F 與 LW^2D^2 成線性正相關，且真實文蛤殼、西施舌殼的結果亦接近此線性趨勢，另以環文蛤結果擬合後發現結果接近 MD 模型

之線性趨勢。其中 W 、 D 直接影響殼體潛沙時的最大截面積，與阻力正向力較有關。 L 則間接影響殼體潛至 $H = 4\text{cm}$ 時在沙面以下的外殼弧形，亦影響殼體潛至 $H = 4\text{cm}$ 時截面積與最大截面積的關係。

陸、 結論

- 一、文蛤以轉動方式潛沙，平均每個潛沙週期轉動 11.42° 並下潛 0.22cm ；而西施舌潛沙方式近乎不轉動，平均每週期僅轉動 1.44° 並下潛 0.41cm ，每週期潛沙深度大於文蛤。
- 二、大部分的文蛤與西施舌皆會以受力較小的角度潛沙；前者選擇 $135^\circ\sim 155^\circ$ ，後者則選擇 $125^\circ\sim 145^\circ$ 。
- 三、在潛沙受力的測量上，西施舌殼的受力小於文蛤殼許多；且綜合兩者與不同參數模型的實驗後，可得知真實殼體與模型殼體受力模式相近，且殼體受力 F 與 LW^2D^2 皆呈現線性正相關。然而由複擺實驗推得的轉動慣量，可得知真實殼體 $I_{c.m.}/m$ 與其殼長 L 趨勢呈線性關係，故西施舌殼轉動難度較文蛤殼大。
- 四、西施舌外殼具較容易潛沙的殼型，具有房屋地基鑽掘的應用意義。設計鑽掘工具時，前端可設置為如西施舌的狹長外形，並搭配適當的轉動進行鑽掘，再以潛沙中定錨作用將地基固定於土壤中使其穩固，具有避免土壤液化所致災害的應用價值（圖 6-1）。

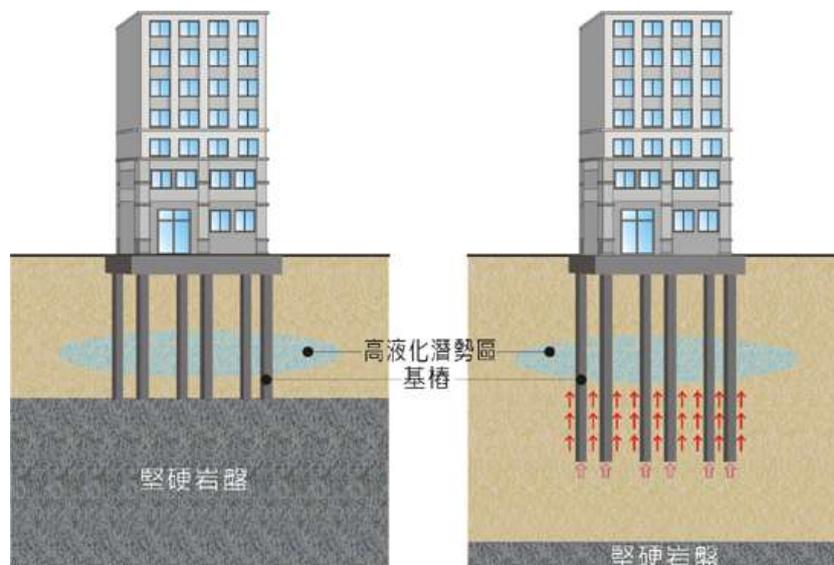


圖 6-1 土壤液化與地基結構示意圖

柒、未來展望

- 一、力學實驗中，以電動升降平台代替千斤頂，減少人為操作誤差。
- 二、設計實驗測量殼體在沙粒中轉動所需力矩，進一步探討潛沙時轉動及移動的難易程度與生物行為的關係。
- 三、設計不同參數模型（如殼高、曲率、雙殼夾角、表面結構等），建立物理模型描述殼型與受力的關係。
- 四、針對其他雙殼綱（如環文蛤、竹蛭等）的潛沙行為與殼型進行探討，嘗試以不同雙殼綱殼型推測其潛沙行為，並以演化角度解釋殼型與行為的演化機制。

捌、參考資料

- 一、Huang, S., & Tao, J. (2020). Modeling Clam-Inspired Burrowing in Dry Sand Using Cavity Expansion Theory and DEM. *Springer-Verlag GmbH Germany, Part of Springer Nature, 2020*.
- 二、Winter, A. G., Deits, R. L. h., & Hosoi, A. E. (2012). Microstructural View of Burrowing with a Bioinspired Digging Robot. *The Journal of Experimental Biology* 215, 2072-2080.
- 三、Dorgan, K. M. (2015). The Biomechanics of Burrowing and Boring. *The Journal of Experimental Biology, 2015*.
- 四、Stanley, S. M. (1975). Why Clams Have the Shape They Have: An Experimental Analysis of Burrowing. *Department of Earth and Planetary Sciences, The Johns Hop- Kins University, Baltimore, Maryland 21218., 1975*.
- 五、臺灣貝類資料庫. (n.d.). 中央研究院生物多樣性研究中心。 <https://shell.sinica.edu.tw/>
- 六、刘德经, 邱文仁、 齐秋贞. (n.d.). 西施舌栖息环境及人工养殖的研究 《动物学杂志》, 1997(4)。 <http://www.cqvip.com/QK/94741X/199704/2603303.html>
- 七、周玮, 刘一兵, 李坤, & 徐浩然. (n.d.). 魁蚶苗种的潜沙行为观察。大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室, 辽宁大连 116023; 2. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁大连 116023。

附錄

附錄一：雙殼綱模型名稱與殼形參數對照表

模型	L(cm)	W(cm)	D(cm)	模型	L(cm)	W(cm)	D(cm)
<i>ML</i> ₁	3.147	2.156	3.332	<i>MD</i> ₁	3.934	2.156	2.666
<i>ML</i> ₂	3.934	2.156	3.332	<i>MD</i> ₂	3.934	2.156	3.332
<i>ML</i> ₃	5.508	2.156	3.332	<i>MD</i> ₃	3.934	2.156	3.998
<i>ML</i> ₄	6.294	2.156	3.332	<i>MD</i> ₄	3.934	2.156	4.665
<i>ML</i> ₅	7.081	2.156	3.332	<i>MD</i> ₅	3.934	2.156	5.331
<i>ML</i> ₆	7.868	2.156	3.332	<i>MD</i> ₆	3.934	2.156	5.664
<i>MW</i> ₁	4.496	1.656	3.808	<i>SW</i> ₁	7.506	1.375	3.581
<i>MW</i> ₂	4.496	1.904	3.808	<i>SW</i> ₂	7.506	1.719	3.581
<i>MW</i> ₃	4.496	2.116	3.808	<i>SW</i> ₃	7.506	2.063	3.581
<i>MW</i> ₄	4.496	2.380	3.808	<i>SW</i> ₄	7.506	2.407	3.581
<i>MW</i> ₅	4.496	2.720	3.808	<i>SW</i> ₅	7.506	2.750	3.581
<i>MW</i> ₆	4.496	3.173	3.808	<i>SW</i> ₆	7.506	3.094	3.581
<i>MW</i> ₇	4.496	3.808	3.808				

附錄二：文蛤殼長、殼寬、殼高的參數測量

編號	殼長(cm)	殼寬(cm)	殼高(cm)	原始重量(gw)	體積(cm ³)
1	3.49	1.98	2.81		
2	2.8	1.5	2.305		
3	3.8	2.055	3.11		
4	3.5	2	2.78		
5	4.1	2.12	3.25		
6	3.57	1.92	3		
7	3.53	1.95	3		
8	3.46	2.135	2.9		
9	4.18		3.18		
10	4.22		3.66		
11	4.4		4.15		
12	3.68		3.26		
13	4.12	2.15	3.38	16.92	11
14	4.1	2.2	3.3	17.12	14
15	4.02	2.05	3.21	15.26	9
16	4.23	2.17	3.4	16.47	12
17	4.14	2.1	3.38	17.04	9

18	3.99	2.08	3.11	15.24	11
19	3.91	2.17	3.3	15.53	14
20	3.96	2.1	3.27	15.82	12
21	4.7	2.43	3.83	24.87	18
22	4.7	2.43	3.87	24.71	19
23	5.04	2.64	4.2	30.18	23
24	4.54	2.34	3.76	22.04	15
25	4.5	2.56	3.9	24.4	18
26	4.85	2.56	4.08	27.71	19
27	4.43	2.3	3.55	19.49	15
28	4.36	2.36	3.58	19.77	15
29	4.49	2.4	3.62	21.88	17
30	4.63	2.52	3.83	23.65	21
31	4.1	2.23	3.2	16.92	13
32	4.15	2.19	3.3	18.2	13
33	3.44	1.89	2.9	10.62	8
34	3.5	1.92	2.86	10.85	8
35	3.2	1.85	2.82	9.25	
36	3.45	1.76	2.96	9.96	8
37	3.3	1.87	2.76	9.75	7
38	3.46	1.93	2.94	10.92	8
39	3.58	1.95	3	11.95	8
40	3.37	1.8	2.9	10.04	7
41	3.48	1.94	2.91	11.22	7
42	3.44	1.88	2.97	10.61	7
43	3.42	1.98	3.49	11.49	8
44	3.44	1.85	2.7	9.7	6
45	3.37	1.89	2.88	10.16	8
46	3.5	1.92	2.9	11.55	8
47	3.54	1.79	3.08	11.02	8
48	3.46	1.91	2.85	9.97	7

西施舌殼長、殼寬、殼高的參數測量

編號	殼長(cm)	殼高(cm)	殼寬(cm)	原始重量(gw)
1	7.17	3.12	1.51	22.7
2	7.37	3.5	1.64	25.17
3	6.92	3.26	1.63	22.34
4	6.39	3.03	1.57	20.85

5	7.13	3.53	1.43	25.95
6	7.54	3.62	1.78	32.92
7	8.54	3.78	1.95	39.37
8	6.69	3.23	1.6	23.96
9	6.67	3.17	1.55	22.86
10	6.75	3.36	1.7	25.03
11	7.24	3.4	1.54	24.24
12	7.17	3.3	1.61	27.22
13	6.9	3.36	1.7	25.04
14	7.47	3.69	1.84	33.94
15	7.16	3.48	1.55	25.74
16	6.74	3.18	0.97	20.58
17	6.4	3	1.44	19.81
18	7	3.17	1.64	20.23
19	7.5	3.27	1.55	24
20	6.75	3.31	1.54	24.47
21	7.48	3.54	1.73	29.79
22	7.95	3.63	1.66	34.49
23	7.52	3.5	1.7	32.41
24	7.3	3.35	1.61	24.91
25	7.550	3.710	1.665	
26	8.475	3.905	1.930	
27	7.900	3.730	1.715	
28	8.565	4.275	1.900	
29	8.250	3.930	1.855	
30	7.350	3.675	1.700	
31	7.460	3.750	1.730	
32	9.495	4.785	2.180	
33	7.585	3.460	1.730	
34	8.000	3.930	2.100	
35	8.040	3.705	1.645	
36	7.785	3.810	1.825	
37	7.725	3.880	1.700	
38	8.035	3.840	1.945	
39	7.790	3.580	1.870	
40	8.330	4.085	1.845	
41	7.700	3.670	1.910	
42	7.660	3.760	1.745	

43	8.350	4.085	2.020	
44	7.820	3.655	1.770	
45	8.550	4.210	2.090	
46	7.580	3.555	1.880	
47	7.600	3.515	1.745	
48	7.825	3.830	1.790	
49	6.655	3.300	1.600	
50	6.675	3.305	1.580	
51	7.105	3.325	1.530	
52	8.205	3.885	1.855	
53	7.185	3.375	1.750	
54	7.170	3.475	1.715	
55	8.405	3.975	1.975	
56	7.575	3.530	1.660	
57	7.125	3.585	1.755	
58	7.450	3.490	1.815	
59	6.800	3.200	1.540	
60	7.750	3.640	1.715	
61	6.915	3.230	1.540	
62	7.085	3.455	1.770	
63	7.380	3.750	1.640	
64	7.555	3.525	1.790	
65	7.680	3.615	1.755	