

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

第三名

052012

白棘三列海膽管足的吸附脫離機制探討

學校名稱：桃園市立武陵高級中等學校

| | |
|-------------------------|--------------|
| 作者： 高二 吳采霓 高二 林妮臻 | 指導老師： 蔡靜宜 |
|-------------------------|--------------|

關鍵詞：海膽、管足、吸附-脫離

摘要

管足為棘皮動物的特有構造。本實驗利用自製的實驗裝置，測得白棘三列海膽的管足在水中具有強大的吸附力，且該吸附力主要源自於黏性物質。在觀察管足吸附與脫離的過程中，我們發現管足在吸附時會朝向介質面做出擠壓動作，藉吸盤內部片狀的小骨關節產生形變，以釋放更多的黏性物質，也透過管足腳印的染色結果證實黏性物質的存在及分布。本研究歸納出白棘三列海膽吸附脫離的完整過程：黏性物質預先分布於吸盤表面及儲存於吸盤內部，當接觸介質面時，透過擠壓動作釋放大量黏性物質，並藉由去除黏性物質使管足快速脫離介質面。這種黏性物質可在水中作用，並且能夠被迅速移除，在仿生學上極具應用潛力。

壹、前言

一、研究動機

飼養白棘三列海膽時，我們試圖移動海膽，過程中發現他們不易抓取，這不僅是因為海膽表面尖銳的棘刺，更導因於其藉管足牢牢地將自己固定於魚缸側壁的強大吸附力，若強行移動海膽將使其吸附在缸壁的管足柄斷裂。查閱文獻後發現，卵石海膽 (*Echinocyamus crispus Mazzetti*) 的管足末端具有吸盤，使他們能藉由真空吸附產生吸附力 (Robert et al., 2020)；而鑽岩海膽 (*Paracentrotus lividus*) 卻是透過管足末端分泌黏性物質使其產生吸附力 (Daniel Gilpin, 2013)，這個線索讓我們很好奇白棘三列海膽的管足吸附力是屬於何種機制？而且海膽生活於水中，這種能於水中輕易吸附脫離的能力更引發我們高度的興趣。配合選修生物IV「生物與環境」主題中的次主題「生物多樣性」的內容，於是我們以白棘三列海膽為題材，藉由形態學和生物力學的相關實驗，探討管足的微結構、管足形變及管足吸附脫離的可能機制，以期提供未來在仿生學上應用的新思維。

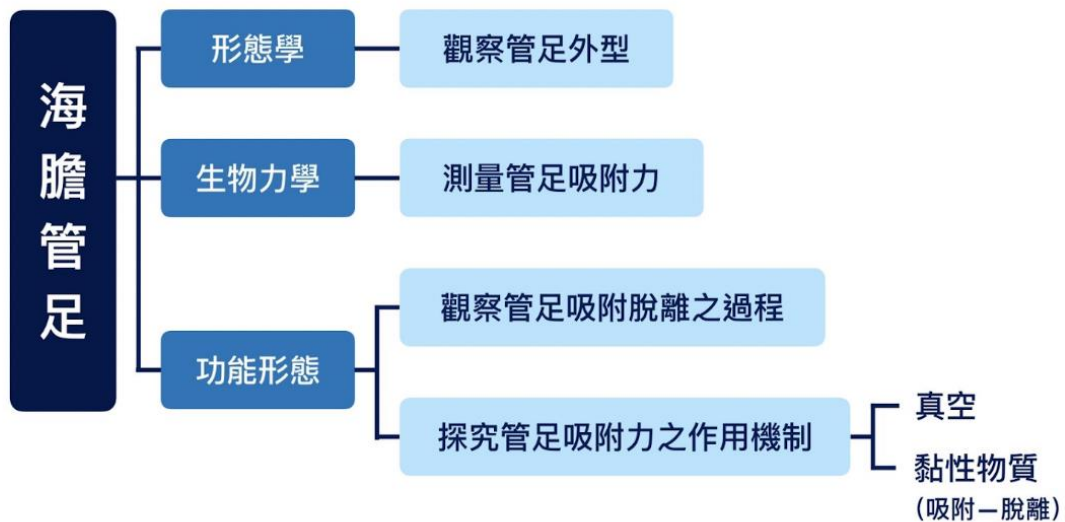
二、研究目的

- (一)觀察白棘三列海膽的管足型態
- (二)測量白棘三列海膽單一管足的最大吸附力
- (三)推測白棘三列海膽之管足產生吸附力的可能方式
- (四)探討管足吸附脫離的運作模式

三、文獻回顧

管足為棘皮動物特有的構造，能夠協同水血管系統產生吸附力 (Mulcrone, 2012)。其中，卵石海膽(*Echinocyamus crispus Mazzetti*)利用形成真空產生吸附力(Palumbi, 2017)；而鑽岩海膽(*Paracentrotus lividus*)則是利用分泌黏性物質產生吸附力(Daniel Gilpin, 2013)。海膽所產生之黏性物質的成分多為無機物、蛋白質及酸性醣類(Marin Et al., 2018)。

四、研究架構圖



貳、研究設備及器材

一、實驗動物

台灣常見的海膽有紫海膽(*Anthocidaris crassispina*)、口鰓海膽(*Stomopneustes variolaris*)、白棘三列海膽(*Tripneustes gratilla*)。在研究前期，我們飼養了此三種海膽，發現紫海膽具有紫黑色且細長的棘刺；口鰓海膽則具有墨黑色、較為粗長的棘刺，他們的管足相較於其棘刺較短且顏色相近，使其管足較不易分辨。因此，我們選擇了相對較好觀察的白棘三列海膽，它具有較短的棘刺，以及細長、較易辨認的管足。

(一)來源

白棘三列海膽 *Tripneustes gratilla* (俗名：馬糞海膽)主要分布於朝鮮半島、日本、中國沿海的潮間帶至水深低於 20 米的淺海海域。本研究實驗動物取自於新北市萬里區的第二類漁港(龜吼漁港)。

(二)外型

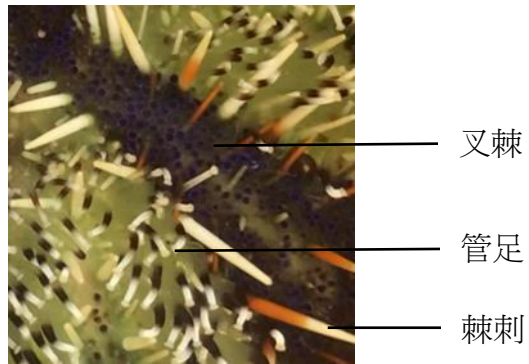
白棘三列海膽呈半球形，成體直徑約六至八公分，屬中小型海膽，其外殼堅硬，表面密布棘刺、叉棘、管足。



《白棘三列海膽的反口面》



《白棘三列海膽的口面》



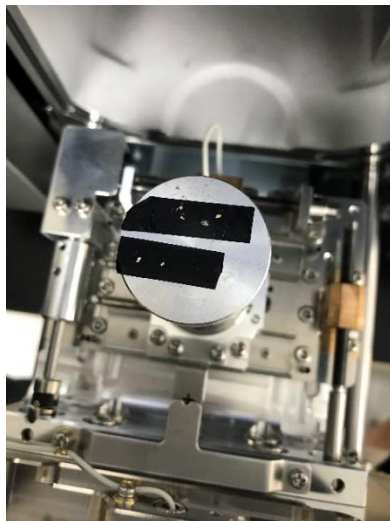
《白棘三列海膽區域放大圖》

二、海膽飼育缸與冷水機



《海膽飼育缸》

三、製備 SEM 標本



《電子顯微鏡標本台》

四、解剖顯微鏡(SZ6745)、複式顯微鏡(MOTIC RED-130)、電子顯微鏡(TM3030)



《複式顯微鏡》



《解剖顯微鏡》



《可攜式電子顯微鏡》

五、自製道具相關器材：棉線、鐵絲、口罩、砝碼、定滑輪、防水蠟、膠帶、三秒膠、離型紙、投影片、載玻片、燒杯

六、其他器材：海水素、電子秤、濾水器、冷卻機、塑膠盆

七、使用染劑：結晶紫染劑、碘液染劑

參、研究過程或方法

一、管足外型之觀察

(一)直接測量：以游標尺進行量測。

(二)解剖顯微鏡

1.側面觀

- (1)將海膽置於解剖顯微鏡下。
- (2)調整焦距以觀察管足的側面型態。

2.吸盤正面觀

- (1)將海膽倒置於解剖顯微鏡下。
- (2)使口部附近的管足吸附於載玻片上。
- (3)調整焦距以觀察管足的底部型態。

(三)複式顯微鏡

1.吸盤正面觀

- (1)剪下管足並置於複式顯微鏡下觀察。

(四)電子顯微鏡

1.製作標本 A(冷凍)

- (1)分別剪下自然狀態下的管足及吸附於蓋玻片上的管足。
- (2)將兩種不同狀態的管足置於培養皿中並冷凍隔夜。

2.製作標本 B(乙醇)

- (1)配置 95%的乙醇。
- (2)分別剪下自然狀態下的管足及吸附於蓋玻片上的管足。
- (3)將兩種不同狀態的管足置於乙醇培養皿中固定隔夜。

3.製作標本 C(丙酮)

- (1)配置 100%的丙酮。
- (2)分別剪下自然狀態下的管足及吸附於蓋玻片上的管足。
- (3)將兩種不同狀態的管足置於丙酮培養皿中固定隔夜。

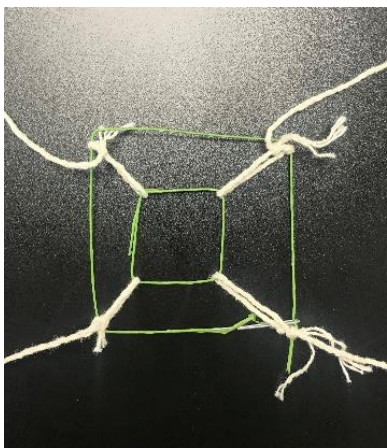
4.將標本 A、B、C 取出並待其自然風乾。

- 5.將標本 A、B、C 分別固定於標本台上(側面觀、底面吸盤)。
- 6.將標本台置於電子顯微鏡內。
- 7.調整不同倍率及位置並記錄觀察結果。

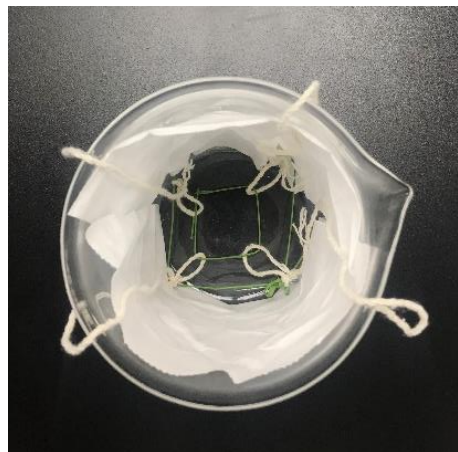
二、海膽管足吸附力之測量

(一)單一管足的最大吸附力(底面—方便觀察)

- 1.將細鐵絲折成底座並綁上棉線(網架)。
- 2.將口罩剪開取其融噴不織布層(中層)。
- 3.用膠帶將中層固定於燒杯內側杯緣(中層僅用於防止海膽側面的管足吸附杯壁故仍可自由移動)。
- 4.將海膽置於網架上並放入充滿水的燒杯底部。
- 5.架設定滑輪組。
- 6.將棉線繞於定滑輪上。
- 7.把燒杯置於三腳架上並以拍攝器材置其下，由下而上拍攝。
- 8.將砝碼置於定滑輪的另一端，每五秒增加 100 克，直到管足全數脫離燒杯。
- 9.計算不同重量下完整堅持五秒後的管足數量。
- 10.計算不同重量下單一管足的平均拉力大小。



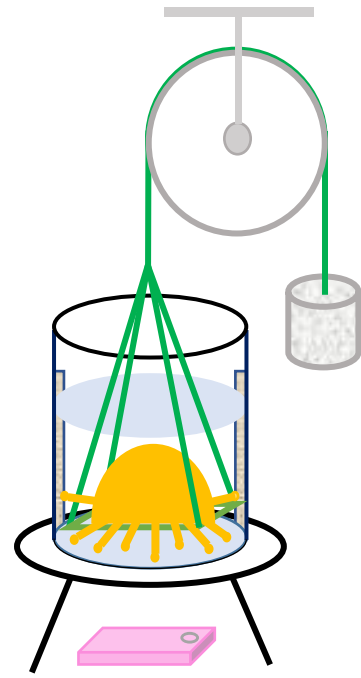
《自製器材：網架》



《自製器材：網架與燒杯》



《拉力測量的實驗裝置》



《實驗裝置的示意圖》

三、觀察管足吸附的過程

(一)由側面觀察管足吸附的過程

- 1.將海膽置於解剖顯微鏡下。
- 2.調整焦距以觀察管足吸附時側面型態的變化並錄影紀錄。

(二)由底面觀察管足吸附的過程

- 1.將海膽倒置於解剖顯微鏡下。
- 2.使底部管足吸附於載玻片上。
- 3.調整焦距以觀察管足吸附時底面吸盤型態的變化並錄影紀錄。

(三)由側面觀察管足吸盤是否產生形變

- 1.尋找小於管足直徑 1mm 的圓柱狀物體。
- 2.將海膽置於解剖顯微鏡下。
- 3.誘導管足吸附於此圓柱狀物體。
- 4.調整焦距以觀察管足吸附時其末端的吸盤是否能隨著介質面產生形變而彎曲。

四、觀察管足脫離的過程

(一)由側面觀察管足脫離的過程

- 1.將海膽置於解剖顯微鏡下。
- 2.調整焦距以觀察管足脫離時側面型態的變化並錄影紀錄。

(二)由底面觀察管足脫離的過程

- 1.將海膽倒置於解剖顯微鏡下。
- 2.使底部管足吸附於載玻片上。
- 3.調整焦距以觀察管足脫離時底面吸盤型態的變化並錄影紀錄。

五、推測吸附力可能的產生機制

(一)真空

1.自製適合的多孔材質

使用透明投影片，並用大頭針在其上均勻穿孔。孔面積大小為 0.6mm^2 ，密度約為 96.75 孔/ cm^2 ，遠小於海膽管足之直徑，故可防止管足穿透投影片接觸燒杯，也可避免管足透過真空吸附於投影片上。

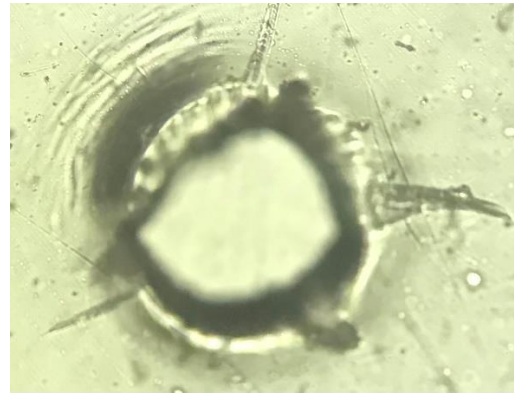
2.利用多孔材質去除真空條件

- (1)將細鐵絲折成底座並綁上棉線(網架)。
- (2)將口罩剪開取其融噴不織布層(中層)。
- (3)用膠帶將中層固定於燒杯內側杯緣(中層僅用於防止海膽側面的管足吸附杯壁，故仍可自由移動)。
- (4)以防水蠟將均勻穿孔的投影片固定於燒杯底部。
- (5)將海膽置於網架上並放入充滿水的燒杯底部。
- (6)架設定滑輪組。
- (7)把燒杯置於三腳架上並以拍攝器材置其下，由下而上拍攝。
- (8)將砝碼置於定滑輪的另一端，每五秒增加 50 克，直到管足全數脫離燒杯。

(9)計算在此條件下單一管足的平均拉力大小。



《自製多孔透明投影片》



《顯微鏡下的孔(孔面積 0.6mm^2)》

(二)黏性物質

1.尋找合適的防沾黏材質

使用透明離型紙進行實驗。

2.利用防沾黏材質去除黏附條件

(1)將細鐵絲折成底座並綁上棉線(網架)。

(2)將口罩剪開取其融噴不織布層(中層)。

(3)用膠帶將中層固定於燒杯內側杯緣(中層僅用於防止海膽側面的管足吸附杯壁，故仍可自由移動)。

(4)以防水蠟將透明離型紙固定於燒杯底部。

(5)將海膽置於網架上並放入充滿水的燒杯底部。

(6)架設定滑輪組。

(7)把燒杯置於三腳架上並以拍攝器材置其下，由下而上拍攝。

(8)將小夾鏈袋置於定滑輪的另一端，並用滴管將水滴入夾鏈袋，直到管足全數脫離燒杯。

(9)待管足脫離後，分別測量塑膠板及含水夾鏈袋之重量。

(10)計算在此條件下單一管足的平均拉力大小。



《透明離型紙》

六、黏性物質的作用機制

(一)確認黏性物質的存在

1.使用結晶紫染劑與碘液染劑，進行黏性物質染色實驗。

- (1)使管足黏附於在玻片上，並將其剪下。
- (2)移除被剪下的管足。
- (3)以濃度 7g/L 的結晶紫染劑滴於載玻片上，停留 40 秒。
- (4)用蒸餾水去除多餘染劑。
- (5)以碘液染劑滴於載玻片上，停留 40 秒。
- (6)用蒸餾水去除多餘染劑。
- (7)蓋上蓋玻片，於複式顯微鏡下觀察。

2.使用電子顯微鏡觀察管足表面是否具有黏性物質。

- (1)使管足吸附於蓋玻片上，並將其剪下。
- (2)將蓋玻片及其上管足一起放入 95%的乙醇培養皿中固定一夜。
- (3)取下固定後的管足，並待其自然風乾。
- (4)將管足固定於標本台上並放入電子顯微鏡中觀察。

(二)黏性物質的分泌

1.製作不同的黏性物質標本

(1)製作標本 A

- a.使管足黏附於在玻片上，並將其剪下。
- b.移除被剪下的管足。

(2)製作標本 B

a.使載玻片輕輕碰觸吸盤表面並於管足黏附之前移除。

(3)製作標本 C

a.使管足黏附於在玻片上，並將其剪下。

b.以十公克砝碼置於管足上，並對其均勻施壓，5 秒後移除。

c.移除被剪下的管足。

(4)以濃度 7g/L 的結晶紫染劑滴於標本 ABC 上，停留 40 秒。

(5)用蒸餾水去除多餘染劑。

(6)以碘液染劑滴於標本 A、B、C 上，停留 40 秒。

(7)用蒸餾水去除多餘染劑。

2.黏性物質分泌的時機

比較染色後的標本 A 及標本 B。

3.擠壓是否會影響黏性物質量

比較染色後的標本 A 及標本 C。

(三)管足脫離的機制

1.使管足吸附於在玻片上，並待其自然脫離。

2.以濃度 7g/L 的結晶紫染劑滴於載玻片上，停留 40 秒。

3.用蒸餾水去除多餘染劑。

4.以碘液染劑滴於載玻片上，停留 40 秒。

5.用蒸餾水去除多餘染劑。

6.蓋上蓋玻片，於複式顯微鏡下觀察。

肆、研究結果

一、管足外型之觀察

(一)直接測量：白棘三列海膽的棘刺長度約為 5-6mm；叉棘的長度約為 1-2mm；管足伸長時的長度可超過 2cm。

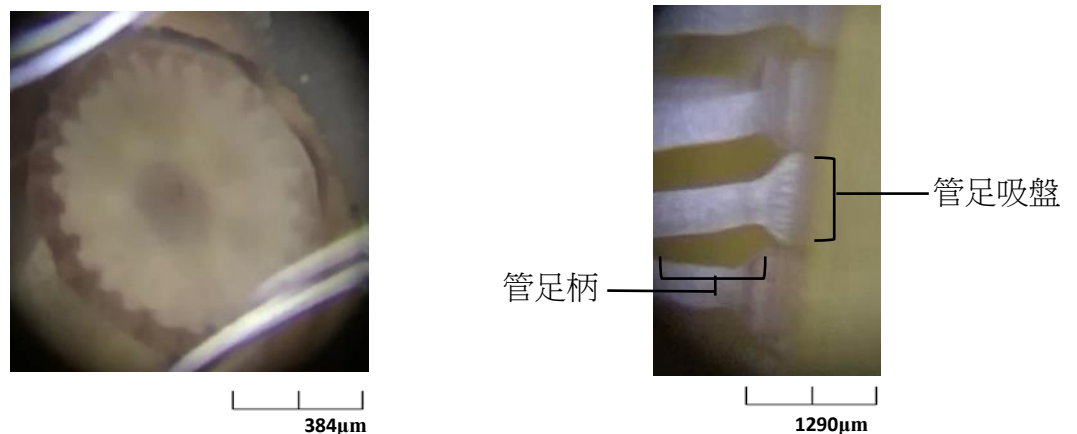
(二)複式顯微鏡



圖一 以複式顯微鏡觀察管足

實驗結果：在複式顯微鏡的影像中，觀察到片狀的小骨(Ossicle)、周圍分布色素細胞(Pigment cell)，以及可折疊的管足柄。管足吸盤的直徑約為 0.7-1mm，小骨的片數多為 5-8 片，也有少數吸盤內的小骨超過 10 片。

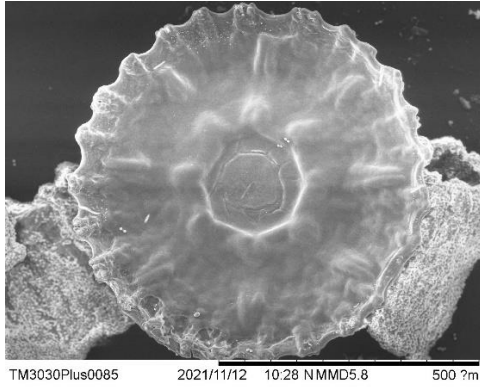
(三)解剖顯微鏡



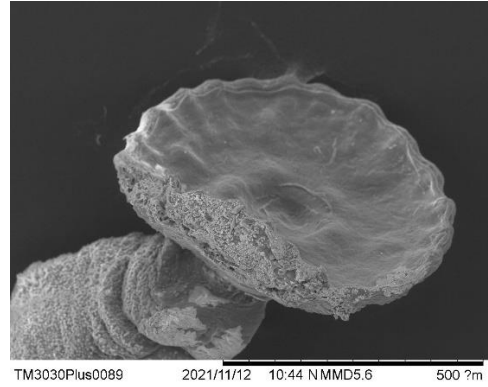
圖二 以解剖顯微鏡觀察管足的底面(左圖)與側面(右圖)

實驗結果：在解剖顯微鏡的影像中，觀察到管足底面的吸盤具有中央凹陷，吸附時管足柄無明顯折疊。

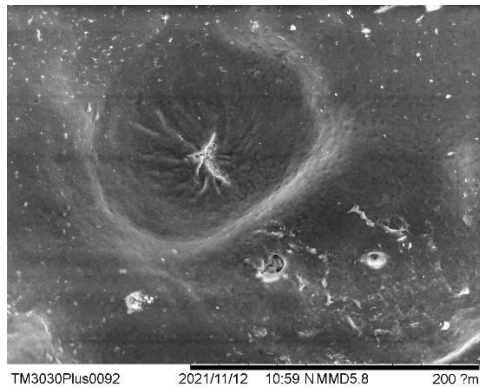
(四)電子顯微鏡



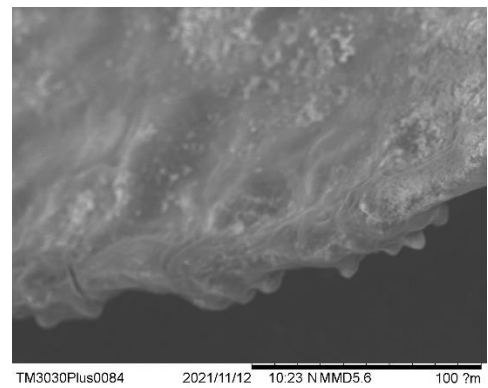
圖三之 1



圖三之 2



圖三之 3



圖三之 4

圖三 電子顯微鏡下的管足

實驗結果：在電子顯微鏡的影像中，觀察到管足脫水後小骨的立體結構(圖三之 1)、折疊的管足柄(圖三之 2)、中央的凹陷(圖三之 3)及小骨在吸盤邊緣的突起(圖三之 4)。吸盤表面並無可增加面積的其他微結構。

二、海膽吸附力大小之測量

(一)單一管足最大吸附力

嘗試比較後發現口面的管足吸附力遠大於反口面的管足的吸附力，故後續的力

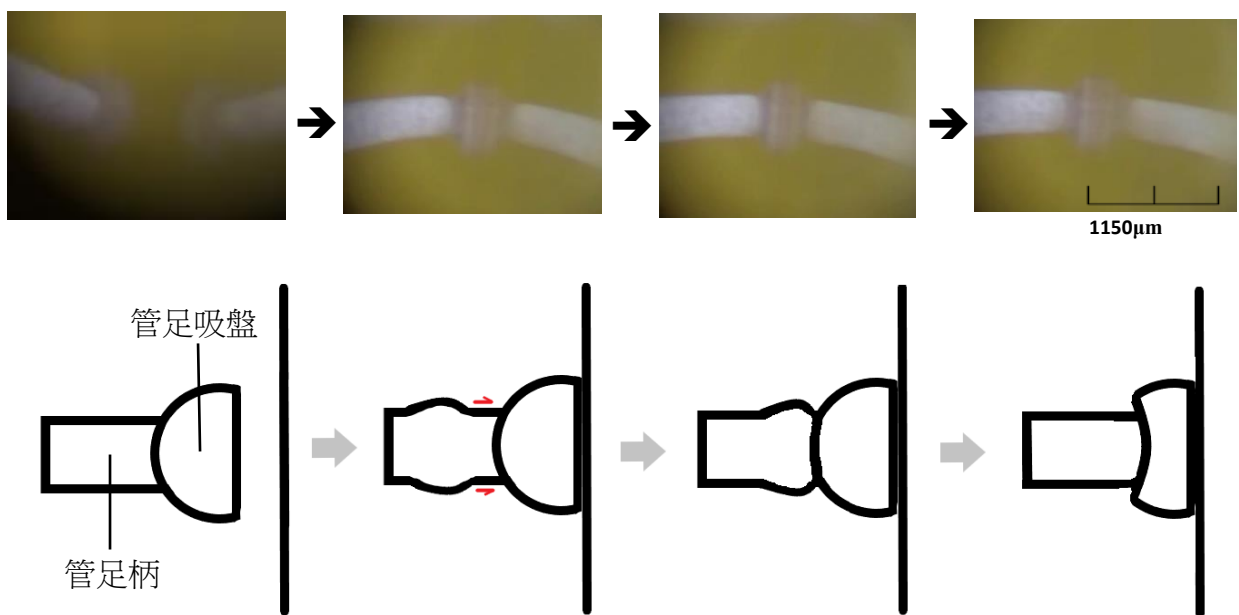
學研究皆以口面的管足進行量測。

我們對六隻海膽進行以玻璃材質作為介質面的吸附力測量實驗，每隻重複兩次。在測量過程中，觀察到海膽有時會有不願意吸附的狀況，又本實驗的主要目的為測量單一管足的平均最大吸附力，為避免在此類情況下的數據影響實驗結果，故僅採用總拉力值超過 1000gw 的數據加以平均。

實驗結果：以玻璃材質作為介質面時，單一管足的平均最大吸附力為 $14.16 \pm 3.31 \text{gw}$ (n=4)

三、觀察管足吸附的過程

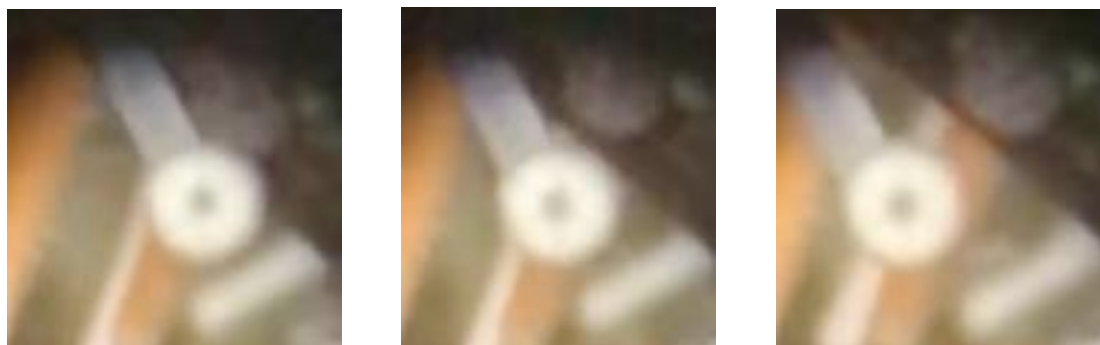
(一)由側面觀察管足吸附的過程



圖四 管足的吸附過程及其示意圖

實驗結果：從側面觀察管足吸附時的連續變化，發現管足會先輕觸介質面，待整個吸盤垂直於介質面時，管足柄末端會稍微膨大(推測是藉由水血管系統將水注入管足內)，並朝向介質面進行擠壓的動作。

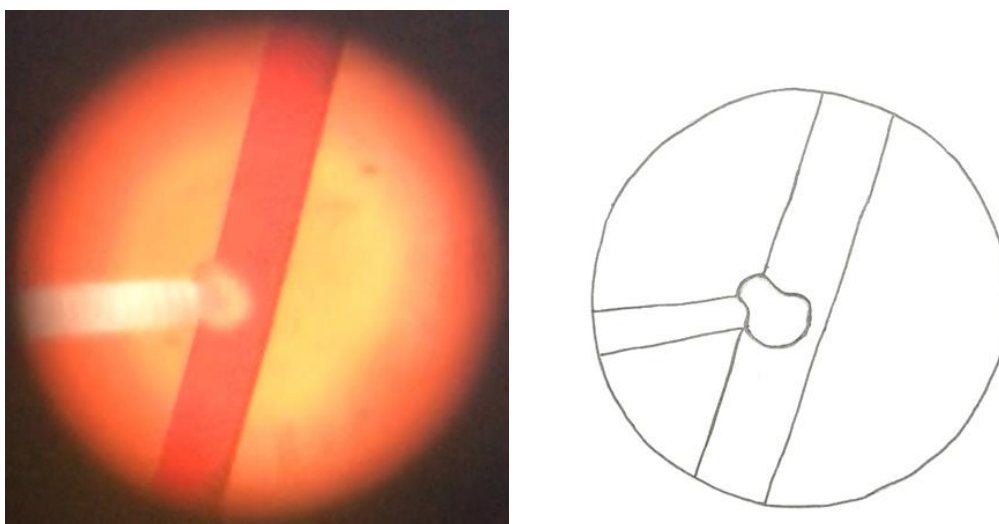
(二)由管足底面觀察吸盤吸附的過程



圖五 管足正面吸附之連續變化圖

實驗結果：從底面觀察管足吸附時的連續變化，發現無明顯形變。

(三)由側面觀察吸盤是否可以產生形變

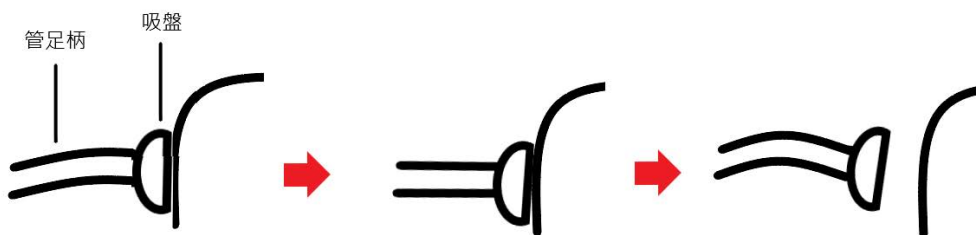


圖六 管足吸附時吸盤可產生形變

實驗結果：管足吸附於彎曲面時，管足末端的吸盤可隨著介質面曲度產生形變而彎曲。藉此推測小骨應具有關節，可使吸盤產生形變。

四、觀察管足脫離的過程

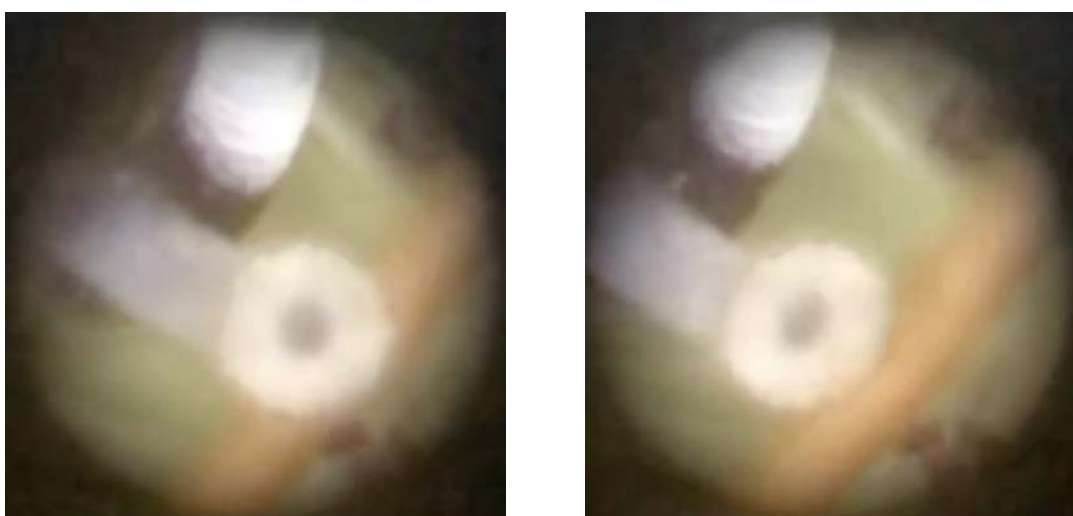
(一)由側面觀察管足脫離的過程



圖七 管足側面脫離之連續變化圖及其示意圖

實驗結果：從側面觀察管足脫離時的連續變化，發現無明顯形變。同時也觀察到，管足能夠迅速脫離並快速收回。

(二)由底面觀察管足脫離的過程



圖八 管足底面脫離之連續變化圖

實驗結果：從底面觀察管足脫離時的連續變化，並無明顯形變。

五、推測管足吸附力可能的產生機制

(一)真空

1.正常狀態—以無戳孔投影片為介質面進行吸附力測量實驗

實驗結果：以投影片為介質面時，單一管足的平均最大吸附力為

$8.14 \pm 1.01 \text{gw}$ (n=3)。

2.去除真空條件—以均勻戳孔投影片為介質面進行吸附力測量實驗

實驗結果：在去除真空的條件時，單一管足的平均最大吸附力為 $7.72 \pm 1.36 \text{gw}$

(n=3)，吸附力略低於正常條件下的管足，但仍然具有明顯的吸附力。

(二)黏性物質

去除黏附條件—以離型紙為介質面進行吸附力測量實驗

實驗結果：在使用防沾黏材質下，管足吸附力變得相當微弱。去除黏附條件下單一管足的平均最大吸附力為 $1.2 \pm 0.37 \text{gw}$ (n=3)，遠低於正常條件下的管足吸附力。

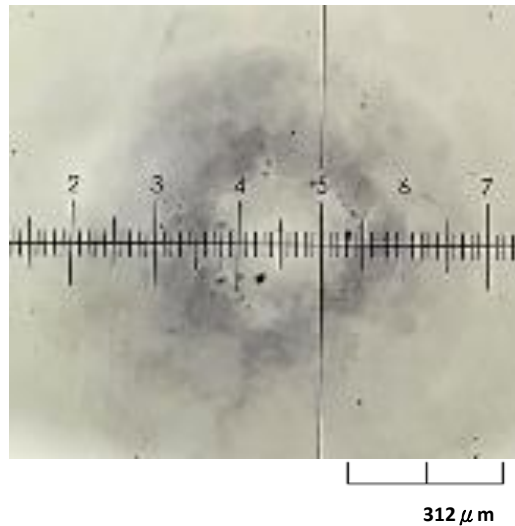
延伸想法：從上述測試結果可推知：管足主要是透過黏性物質產生吸附力，故我們進一步研究黏性物質的作用機制。

六、黏性物質的作用機制

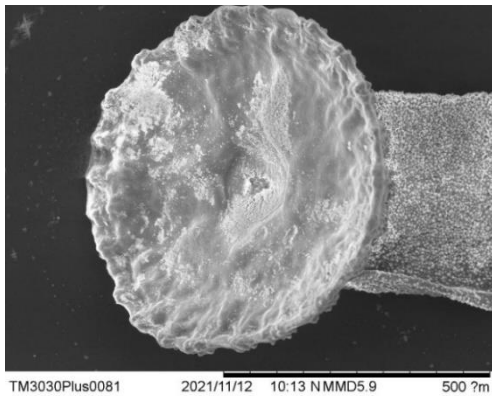
由文獻得知，動物產生的黏性物質成分多為無機物、蛋白質及酸性醣類，故我們嘗試以結晶紫確認黏性物質的存在並標示其分布位置。

(一)確認黏性物質的存在

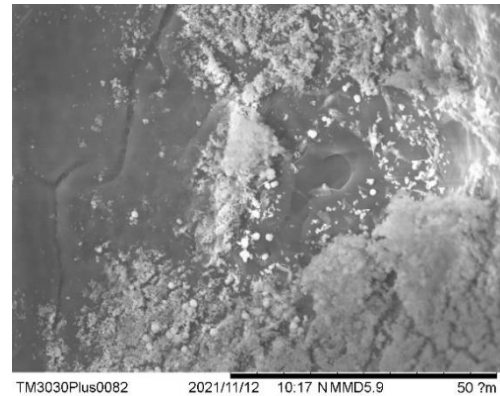
為了避免黏性物質在管足脫離時被移除，我們選擇於管足吸附在介質面上時自管足柄處快速剪斷管足。



圖九之 1 管足腳印以結晶紫染色的結果



圖九之 2 吸盤表面可能的黏性物質



圖九之 3 可能的黏性物質(局部放大)

實驗結果：由管足腳印的染色結果並輔以電子顯微鏡照片對照，證實黏性物質確實存在。

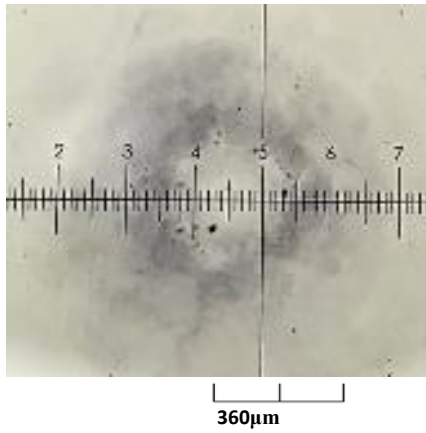
由此實驗說明白棘三列海膽可分泌黏性物質用於吸附。在確認黏性物質的存在後，為了進一步了解黏性物質的作用機制及分佈區域，於是我們進行了以下實驗。

(二)黏性物質的分泌

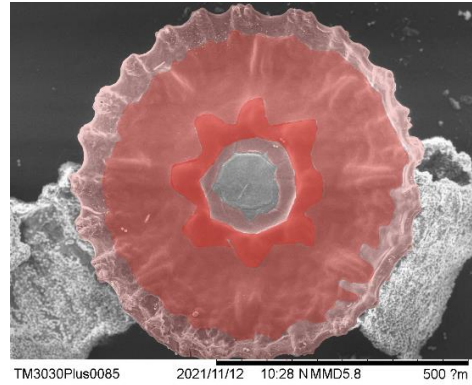
1.黏性物質的分泌時機

由側面觀察管足吸附過程的實驗時，發現管足在輕觸介質面後會有一向介質面擠壓的動作，因此我們想了解管足是否是藉由擠壓來分泌黏性物質。

標本 A：管足正常吸附於玻片上，經移除管足後遺留在玻片上的管足腳印
染色結果：

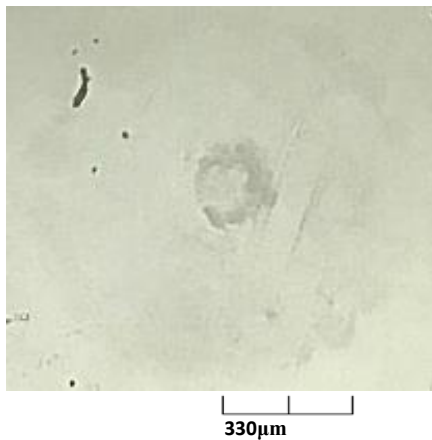


圖十之 1 標本 A
(管足正常吸附的腳印染色結果)

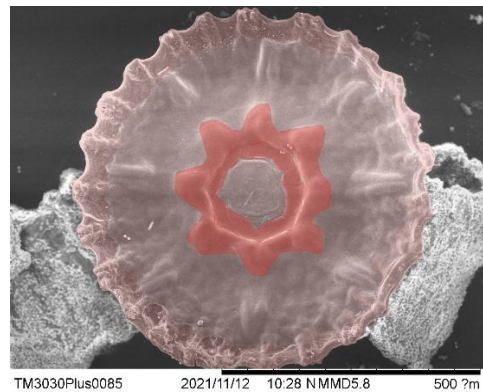


圖十之 2 管足正常吸附的黏性物質
分布範圍示意圖

標本 B：玻片輕觸吸盤表面後(但未吸附)，遺留在玻片上的管足腳印
染色結果：

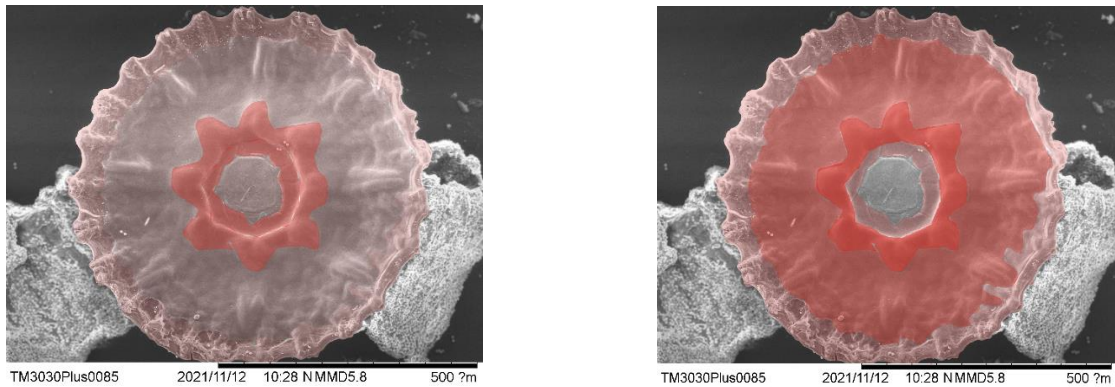


圖十一之 1 標本 B
(管足輕觸的腳印染色結果)



圖十一之 2 管足輕觸的黏性物質
分布範圍示意圖

→ 統整比較：標本 B、A 的黏性物質分布範圍示意圖



圖十二 標本 B：管足輕觸(左圖)與標本 A：管足正常吸附(右圖)

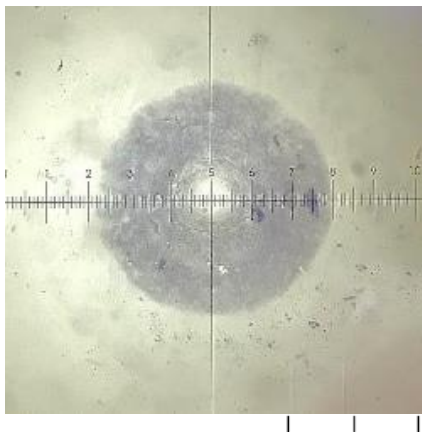
的黏性物質分布範圍示意圖比較

延伸想法：由圖十二左右兩圖比較可知，管足於吸附之前黏性物質就已存在於吸盤表面，而且不論是輕觸或確實正常吸附，黏性物質分布範圍大致相同，於是我們進一步討論管足朝向介質面擠壓對於黏性物質分泌的影響。

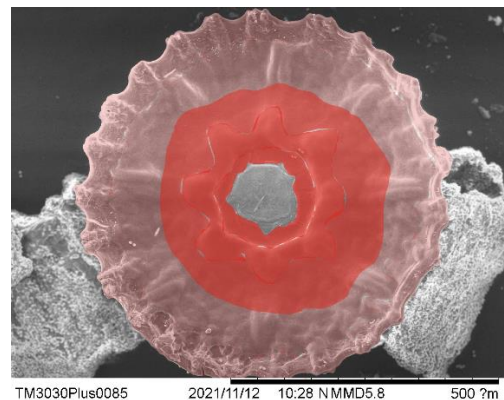
2. 擠壓動作是否會影響黏性物質分泌量

標本 C：管足正常吸附於玻片上，其上以十公克砝碼對管足均勻施壓 5 秒，
移除管足後遺留在玻片上的管足腳印

染色結果：

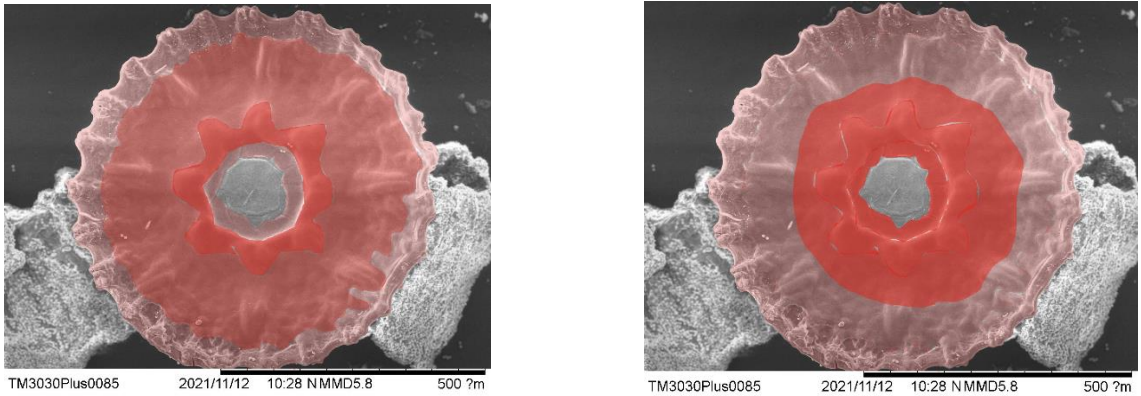


圖十三之 1 標本 C
(管足加壓吸附的腳印染色結果)



圖十三之 2 管足加壓吸附的黏性物質
分布範圍示意圖

→ 統整比較：標本 A、C 的黏性物質分布範圍示意圖



圖十四 標本 A：管足正常吸附(左圖)與標本 C：管足加壓吸附(右圖)

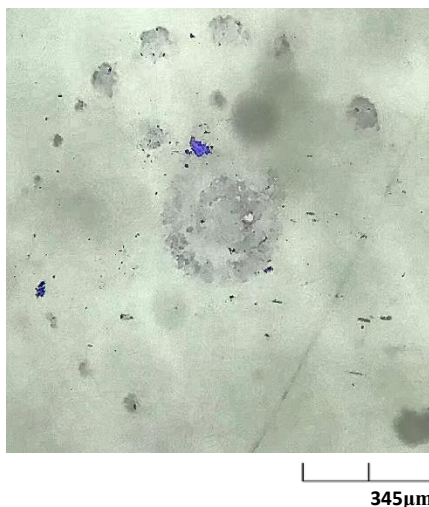
的黏性物質分布範圍示意圖比較

實驗結果：由標本 A、C 之比較可知，外加壓力可增加介質面表面的黏性物質分泌量。因此我們推測，管足可能藉由擠壓的動作朝向介質面釋放更多量的黏性物質。

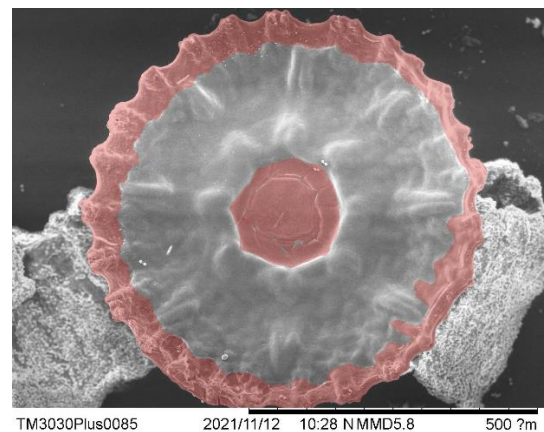
(三)脫離的機制

我們藉由比較海膽是否經正常脫離程序的玻片染色結果，推測管足脫離的機制。

經海膽管足自然吸附脫離後的玻片染色結果：

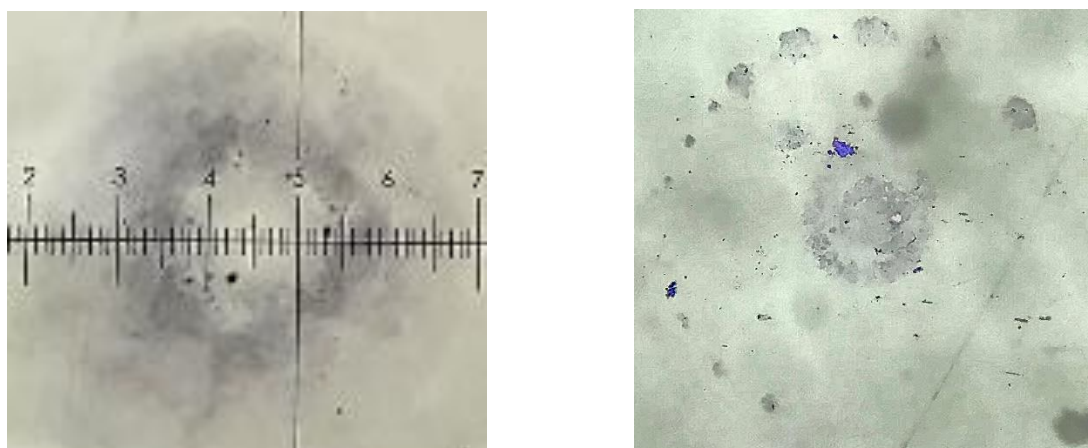


圖十五之 1 管足自然脫離的腳印染色結果



圖十五之 2 管足自然脫離的黏性物質分布範圍示意圖

→ 統整比較：海膽管足有無正常脫離的腳印染色結果比較

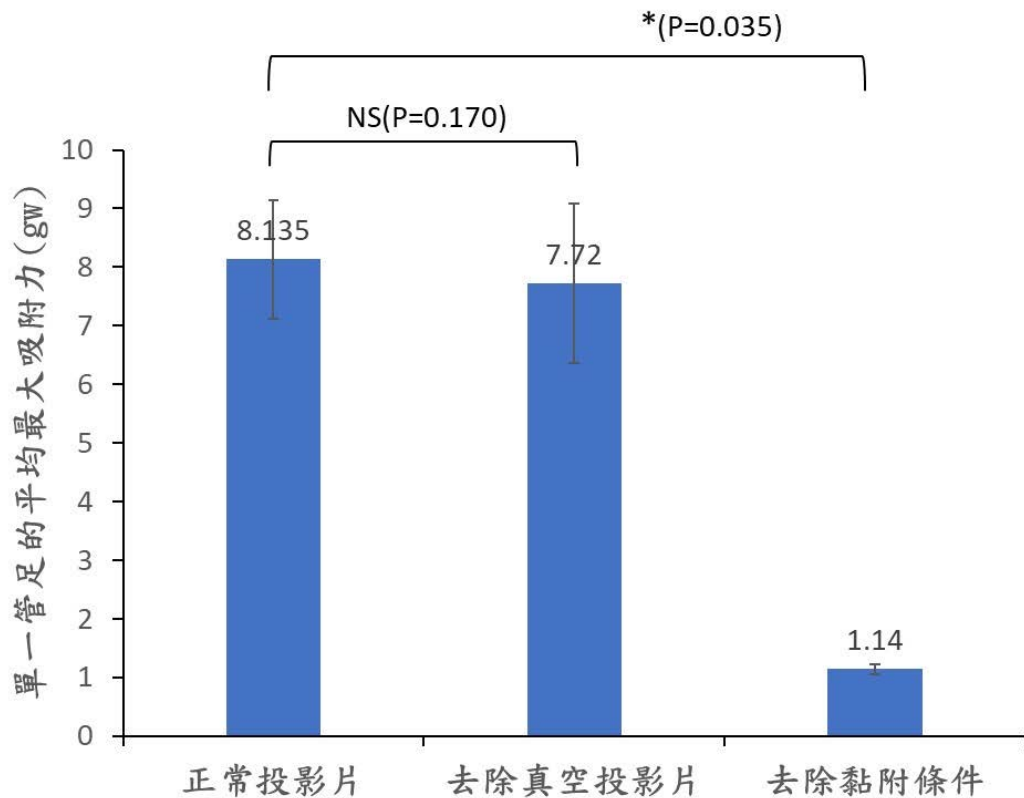


圖十六 管足未正常脫離(圖左)與管足正常脫離(圖右)的腳印染色結果

實驗結果：比較圖十六左右兩圖後，發現管足正常脫離後殘留於玻片上的黏性物質含量會減少，所以我們推測管足應是藉由去除部分黏性物質以達到脫離目的。

伍、討論

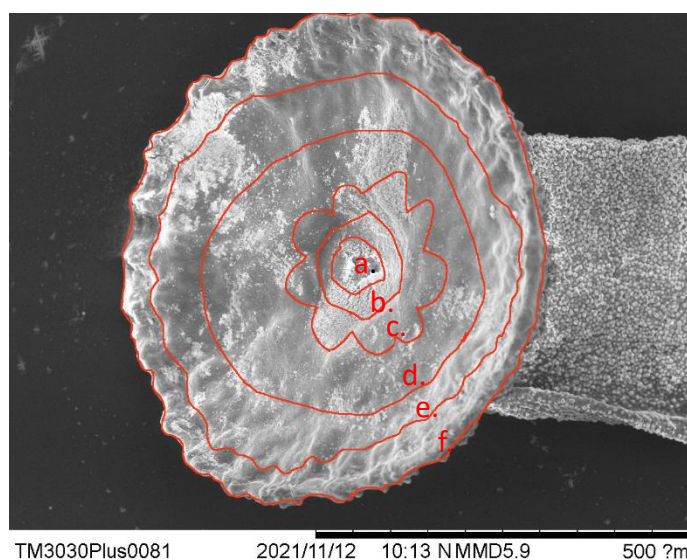
- 一、實驗結果測得白棘三列海膽在玻璃介質面下單一管足的平均最大吸附力為 14.16gw。當以投影片作為介質面時，單一管足的平均最大吸附力為 8.14gw，以戳孔投影片去除真空條件後仍然具有大部分的吸附力，但若使管足吸附於離型紙則吸附力會明顯減弱。使用 T test 分析後，正常狀態與去除真空狀態兩者並無差異 (p value : 0.170)；但正常狀態與去除黏附條件則具顯著差異(p value : 0.035)，故我們推測白棘三列海膽的管足主要是藉由分泌黏性物質而產生吸附力，同時藉由管足腳印染色實驗及以電子顯微鏡觀察吸盤表面時，我們也證實吸盤表面確實有黏性物質的存在。



圖十七 不同介質面狀態下單一管足的平均最大吸附力比較

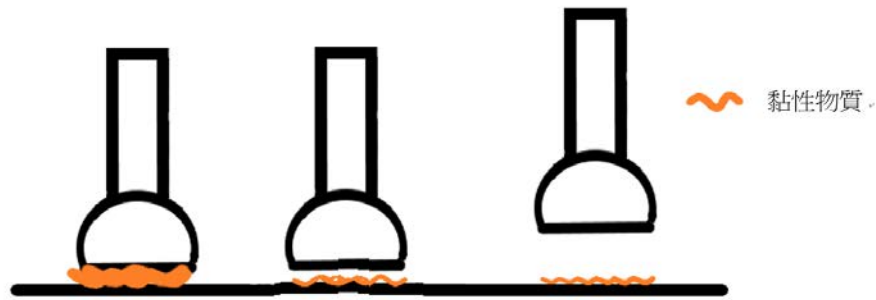
- 二、在推測管足的吸附力主要源自於黏性物質後，我們進一步探討管足於吸附時的形態變化與黏性物質之間的關聯性。經觀察後發現，管足於吸附時會朝向介質面產生一擠壓動作，為了確認此形變是否導致管足分泌黏性物質，因此我們誘使管足的吸盤輕觸玻片，並於產生擠壓之動作之前將玻片移除。經染色後我們發現即使只有輕觸(尚未進行進行擠壓動作)，玻片上仍可染到顏色較淺的腳印，因此我們推測管足在尚未接觸介質面之前，少量黏性物質即已經存在於吸盤表面。而管足產生擠壓形變的目的為增加接觸介質面的黏性物質釋出量，並非誘導黏性物質分泌。
- 三、為確認上述推測是否正確，我們將吸附於玻片上的管足剪下後，在其上放置十公克的砝碼加壓，而後將砝碼與管足於玻片上取下，將此玻片染色後與未放置砝碼的玻片比較。經過對比後，我們發現相較於未經加壓的管足，加壓後所產生之黏性物質的顏色明顯加深，藉此結果顯示管足產生形變與擠壓動作確實可以增加黏性物質的釋出量。

四、觀察管足吸附於具彎曲面的長條柱體後，我們發現管足末端的吸盤於吸附時確實可以產生形變，藉此增大吸盤與介質面的接觸面積，同時我們也推測吸盤內的小骨為具有關節的構造。對照先前於管足上加壓所產生的黏性物質染色結果，我們發現黏性物質顏色顯著加深的區域大致與小骨區(圖十七的 b.c.d.區)重合，因此我們推測管足於吸附時的擠壓動作可能是協同水血管系統及小骨形變所產生。

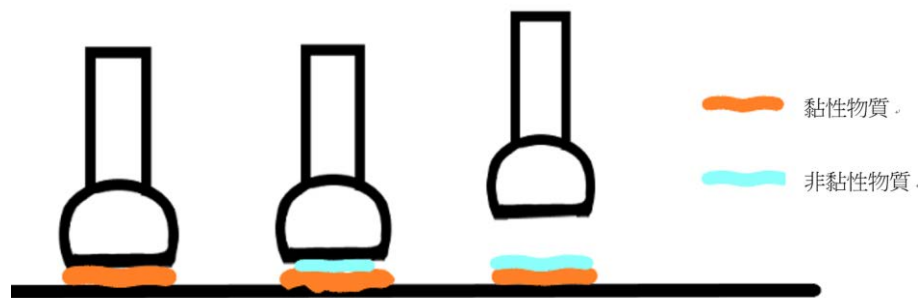


圖十八 管足分區示意圖

五、在探討管足脫離機制時，我們發現管足可迅速脫離介質面，脫離過程中管足並沒有明顯的形變，因此我們針對管足脫離的方式做了兩種假設：一、管足透過去除黏性物質使自身脫離；二、管足透過分泌非黏性物質取代黏性物質，使自身脫離介質面。觀察管足自然吸附且自然脫離的實驗結果，發現自然脫離後殘留的黏性物質染色後顏色明顯變淡，但並未完全消失。此結果與我們的第一種假設較為相符，因此我們推測管足藉由去除黏性物質到脫離的目的。此外，觀察自然脫離後殘留的黏性物質染色結果可發現，小骨區域的黏性物質明顯減少，故推測被去除的黏性物質主要分布於此，換言之，黏性物質主要作用於小骨所在位置。



圖十九 假設一示意圖



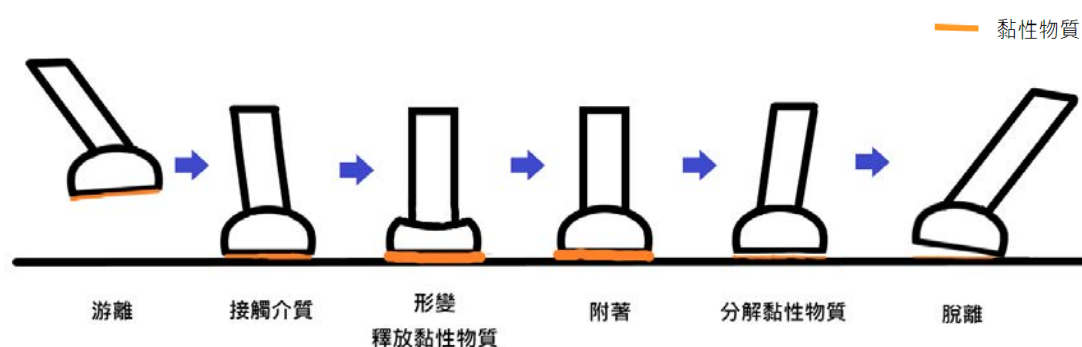
圖二十 假設二示意圖

六、一般市面上的黏性產品在水中吸附力會明顯下降，甚至無法使用。而常見的水生生物黏合劑如藤壺的黏性物質，雖可在水中使用，但卻有無法被分解的問題。相較之下，白棘三列海膽能夠牢固但暫時的吸附在介質面，藉由釋放黏性物質和去除黏性物質，反覆使管足黏附在介質面上並從介質面脫離，具有可在水中作用並且可被迅速移除的特性，在仿生膠的應用上相當具有優勢。

陸、結論

- 一、白棘三列海膽的管足柄具有可伸長縮回的特性，管足伸長時的長度可超過 2cm。管足末端具有吸盤，吸盤的直徑約為 0.7-1mm，具中央凹陷，周圍分布色素細胞。吸盤表面平滑不具細毛或其他微結構，吸盤內部可觀察到多個片狀的小骨構造。
- 二、白棘三列海膽在玻璃介質面下單一管足能產生的平均最大吸附力為 14.16 克重。
- 三、白棘三列海膽的管足吸附力主要源自於黏性物質。

- 四、管足末端的吸盤可隨著介質面曲度產生形變而彎曲。
- 五、管足在吸附過程時會先輕觸介質面，待吸盤垂直於介質面時，管足柄末端稍微膨大，朝向介質面進行擠壓動作；在脫離過程時管足能夠快速脫離介質面，脫離時管足無明顯形變。
- 六、管足進行吸附之前，少量黏性物質已預先存在於吸盤表面，當實際接觸到介質面時，管足可透過擠壓動作釋放更多黏性物質以增加吸附力；當管足欲脫離時，則藉由去除黏性物質使管足迅速脫離介質面而使管足不致斷裂。



圖二十一 管足吸附脫離完整過程示意圖

柒、應用及未來展望

- 一、分別測量真空與黏性物質對白棘三列海膽管足吸附力的功能占比。
- 二、我們目前的研究顯示，黏性物質的作用可能與吸盤內的小骨具有密切關連，後續研究期望能深入探討小骨在吸盤吸附與脫離的過程中，小骨關節的型態變化。
- 三、海膽主要生長在礁石上，相對於本研究的實驗器材(光滑玻璃)表面粗糙許多，後續研究期望能探討在相同材質的光滑面與粗糙面下，管足吸附能力的差異。
- 四、白棘三列海膽所產生的黏性物質可在水中發揮黏附作用，且具有可快速移除的可逆性，非常適合應用於仿生學研究。期望未來能從仿生的角度，開發出在水中具高度黏附效果，能兼用於光滑及粗糙的表面，且可迅速去除黏性並能分解移除的仿生黏合劑，在醫療方面應用於外科手術或牙科治療時的黏合材料。

捌、參考文獻資料

- 高緒生、常亞青，(1999)中國經濟海膽及其培養殖，中國農業出版社，第1版，第15頁。
- Stephen R. Palumbi, Anthony R. Palumbi (2017)潘震澤譯《海洋的極端生物》，衛城出版。
- 丹尼爾·吉爾平(2013)餘知融譯，渾身疙瘩的棘皮動物，黃山書社，第22頁，英國。
- 上海辭書出版社編，辭海 生物分冊(1981)，上海辭書出版社，第584頁。
- Robert Pjeta ,Herbert Lindner ,Leopold Kremser ,Willi Salvenmoser ,Daniel Sobral ,Peter Ladurner ,Romana Santos (2020).*Integrative Transcriptome and Proteome Analysis of the Tube Foot and Adhesive Secretions of the Sea Urchin Paracentrotus lividus*. MDPI ,Switzerland.
- Hyman, L. H. (1955). *The Invertebrates. Volume IV: Echinodermata*. McGraw-Hill, New York.
- Akira Yamada, Masaki Tamori, Tomoaki Iketani, Kazuhiro Oiwa and Tatsuo Motokawa.(2010)*A novel stiffening factor inducing the stiffest state of holothurian catch connective tissue*. The Journal of Experimental Biology. 213: 3416-3422.
- Hyunwoo Yuk, Jingjing Wu, Tiffany L. Sarrafian, Xinyu Mao, Claudia E. Varela, Ellen T. Roche, Leigh G. Griffiths, Christoph S. Nabzdyk & Xuanhe Zhao(2021)*Rapid and coagulation-independent haemostatic sealing by a paste inspired by barnacle glue*. Nature Biomedical Engineering.
- Elise Hennebert, Romana Santos, Patrick Flammang.(2012) . *Echinoderms don't suck: Evidence against the involvement of suction in tube foot attachment*. Université de Mons. Belgium.
- Michael P Lesser, Karen Carleton, Charles W Walker. (2011). *Sea urchin tube feet are photosensory organs that express a Rhabdomeric-like Opsin and PAX6*. The Royal Society. the UK, London.

【評語】 052012

1. 利用自製的生物力學實驗裝置，探討白棘三列海膽的管足在水中具有強大的吸附力之機制，在仿生學研究上十分有趣，實驗設計有創意，觀察仔細記錄詳實，對黏性物質之化性及物性的分析可再加強，在鑽岩海膽管足黏性機制的研究上曾指出醣類分子可能是參與的物質，因此醣類分子及蛋白質分子是否為組成黏性物質的成分亦是本研究值得再探討的方向，另外去除黏性物質使管足迅速脫離介質面亦是值得深入探討，本研究對開發仿生黏合材料有潛力。
2. 作品說明書的參考文獻有疏漏，例如文中多處陳述 Daniel Gilpin, 2013 實際參考文獻為中文版丹尼爾·吉爾平(2013)。重要的 Mulcrone, 2012 和 Marin Et al., 2018 則無參考文獻資料。鑽岩海膽的引用文獻在作品說明書中是 Daniel Gilpin, 2013 但在簡報中是引述 Robert et al., 2020 (此應為 Pjeta et al., 2020 之誤)。作品說明書陳述是使用結晶紫染黏性物質，但在實驗日誌顯示是使用結晶紫+碘液才能染黏性物質，應在作品說明書澄清並書寫清楚。

作品簡報

白棘三列海膽管足的 吸附脫離機制探討

組別：高級中等學校組

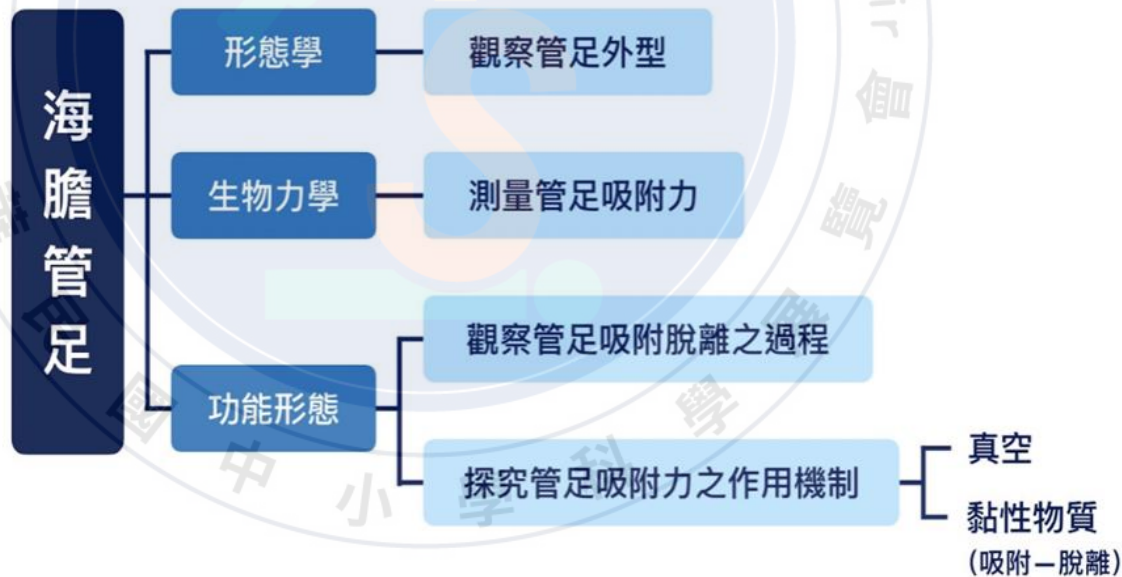
科別：動物與醫學學科

研究動機

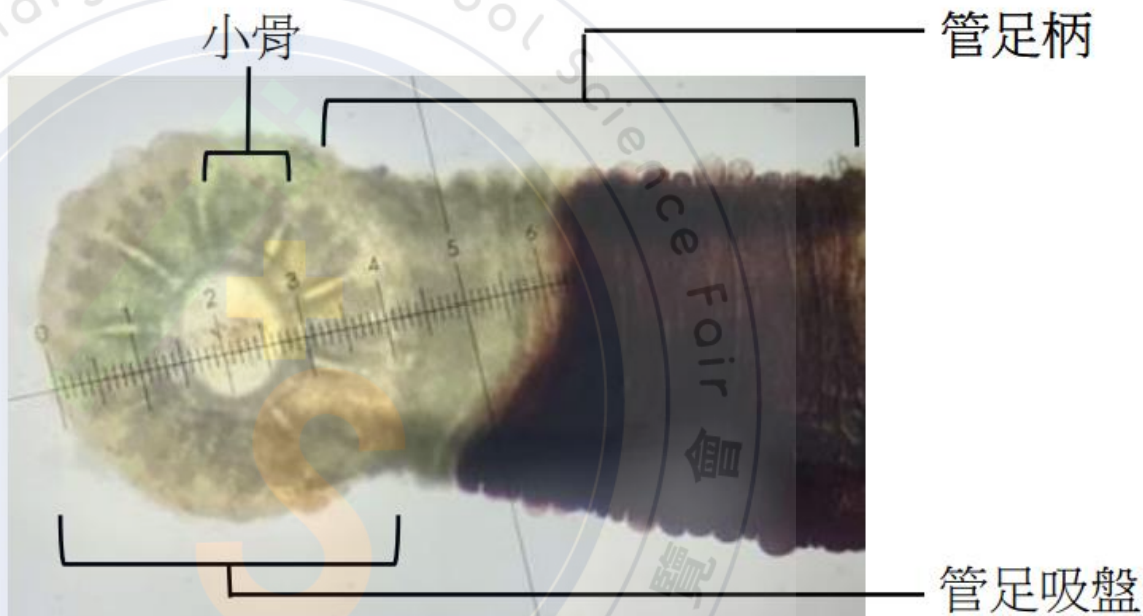
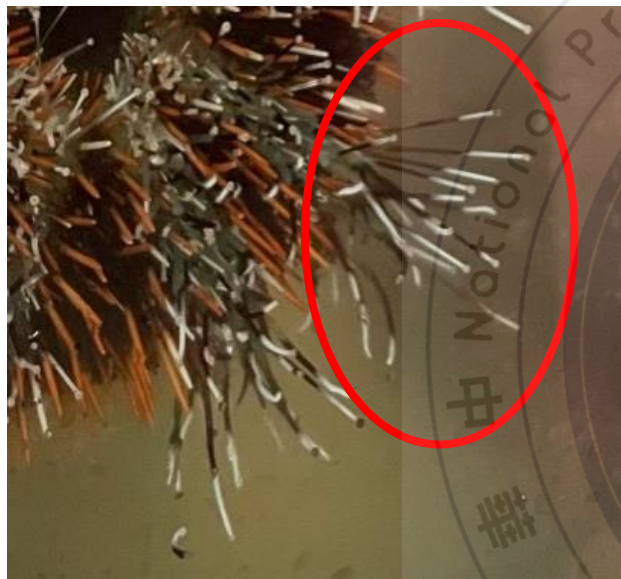
- 飼養白棘三列海膽時，試圖移動海膽，發現牠不易抓取，因為其管足具強大吸附力。
- 卵石海膽的管足藉由**真空吸附**產生吸附力(Daniel Gilpin, 2013)；
鑽岩海膽的管足藉由**分泌黏性物質**產生吸附力(Robert et al., 2020)。

⇒ 因此我們想探討白棘三列海膽的吸附力是屬於何種機制？

研究目的及流程



管足外觀



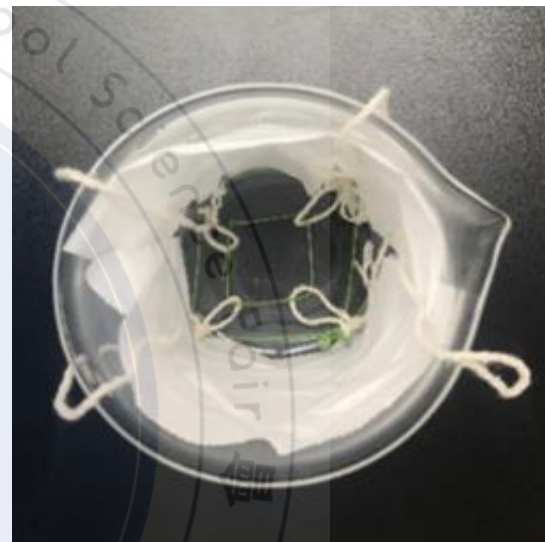
管足型態：

- 伸長時長度可超過2公分
- 管足直徑約為0.7-1毫米

管足構造：

- 管足柄
- 管足吸盤(內部具有小骨)

測試管足的吸附力---自製實驗裝置

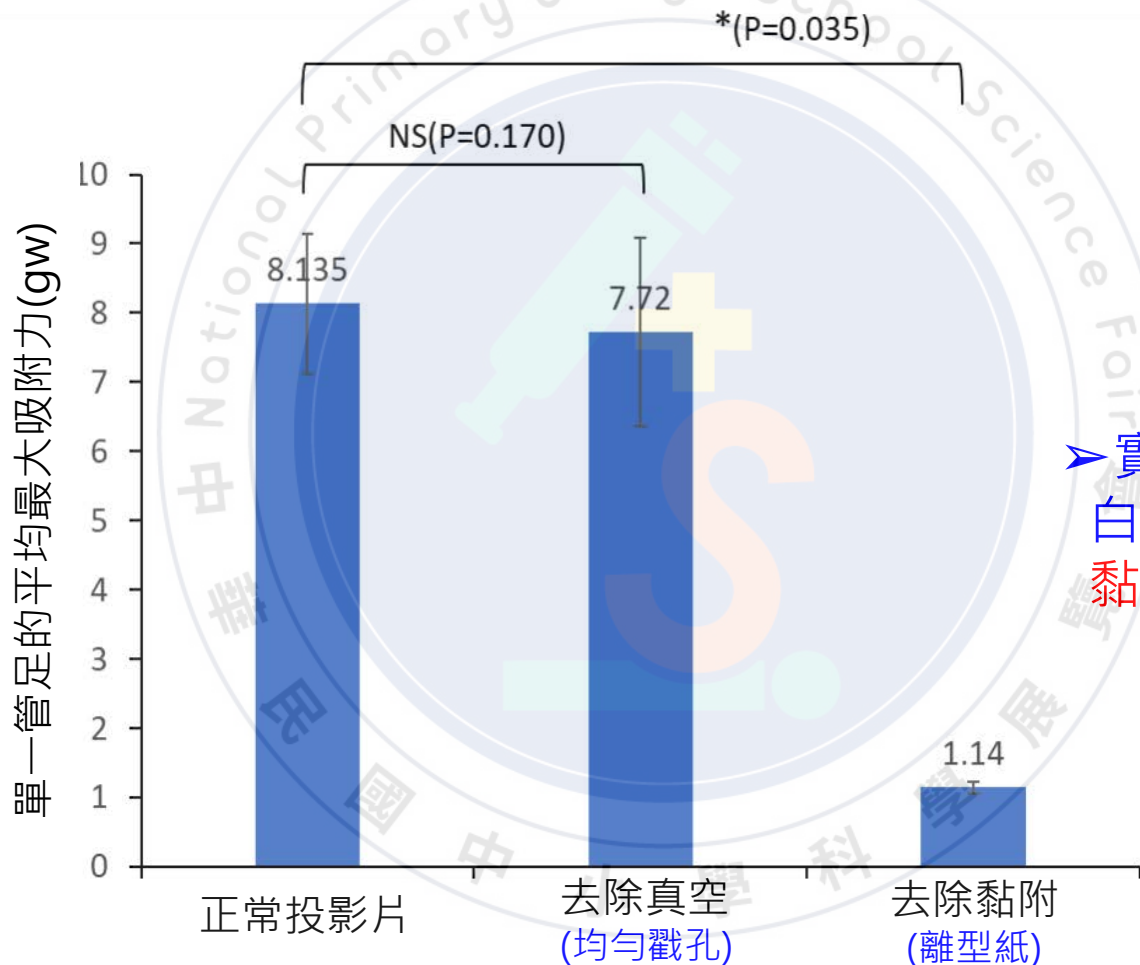


拉力重量 / 管足數目 = 單一管足平均吸附力

➤ 實驗結果：

以玻璃為介質面時，單一管足的平均最大吸附力為 14.16 ± 3.31 gw

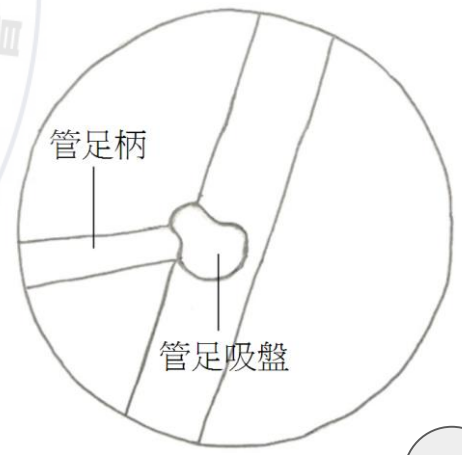
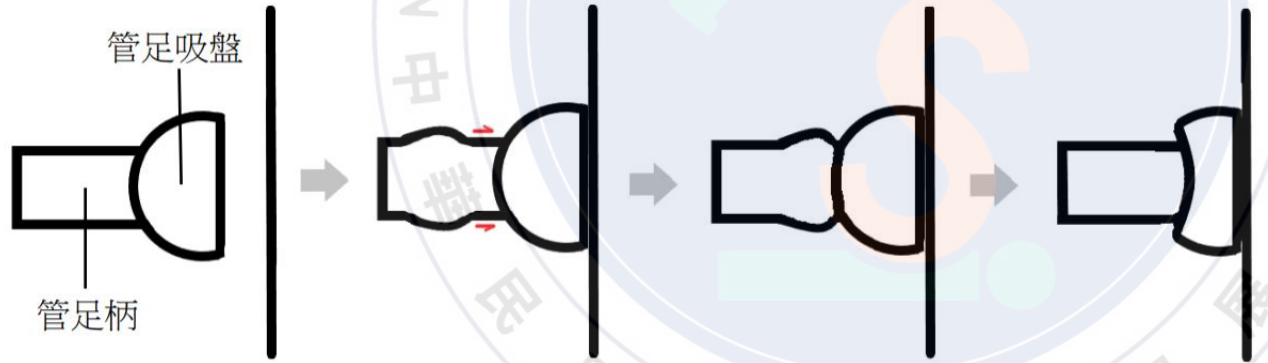
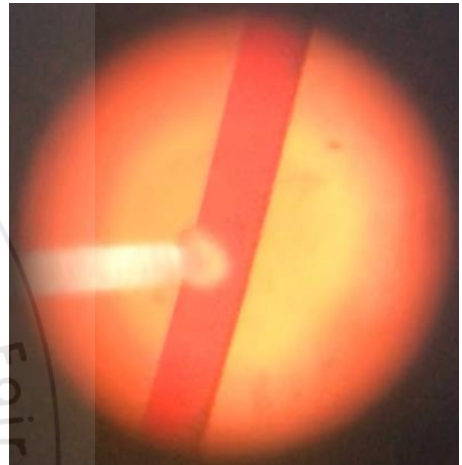
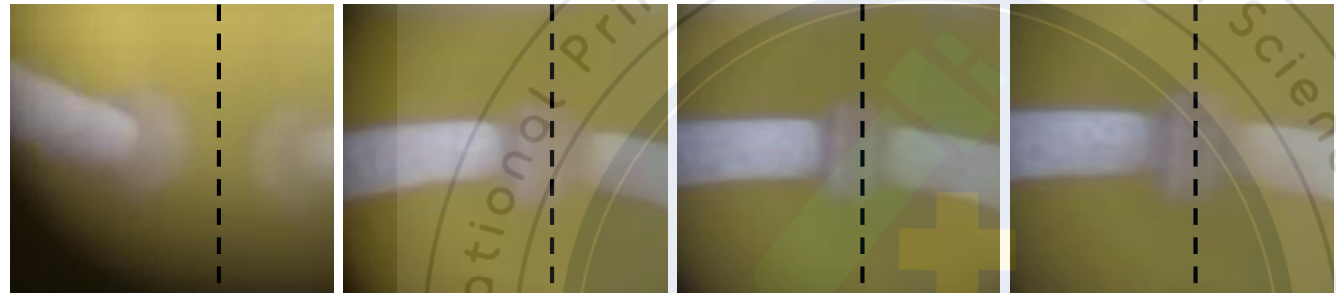
管足吸附力來源---真空或是黏性物質？



➤ 實驗結果：
白棘三列海膽主要藉
黏性物質產生吸附力

管足進行吸附的過程

介質面

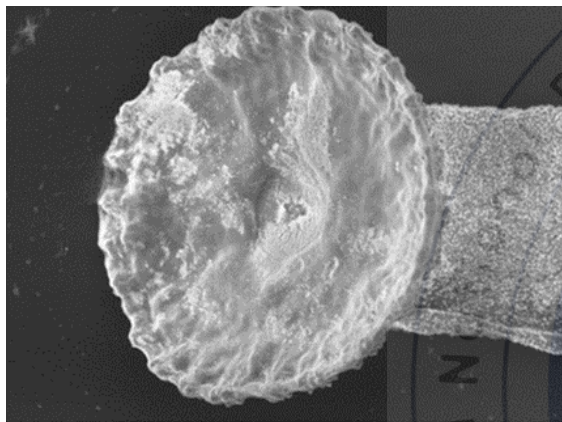


➤ 實驗結果：
管足有擠壓動作且吸盤能產生形變

管足擠壓形變與分泌黏性物質的關聯

以結晶紫染色

電顯(示意圖)

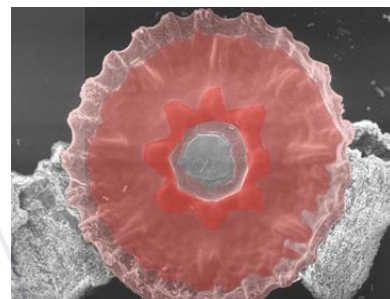
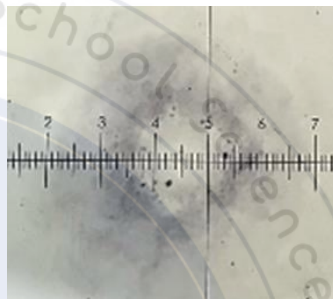


TM3030Plus0081 2021/11/12 10:13 NMMD5.9 500 2μm

《電子顯微鏡下吸盤表面的物質》

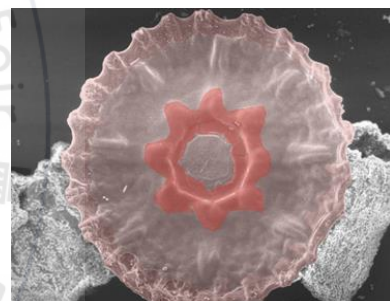
標本A

管足自然吸附：



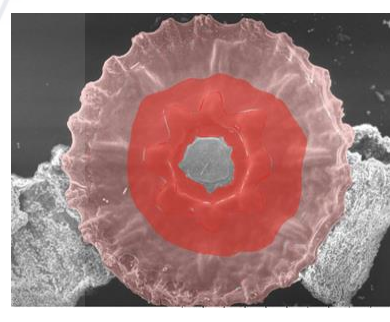
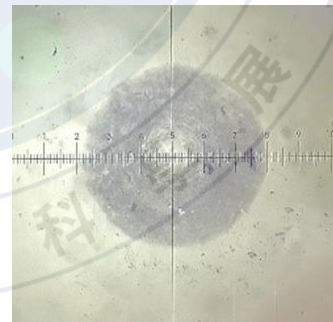
標本B

管足輕觸介質面但
尚未吸附(未擠壓)：



標本C

管足自然吸附後剪下
並放置10g的砝碼對
其均勻加壓：



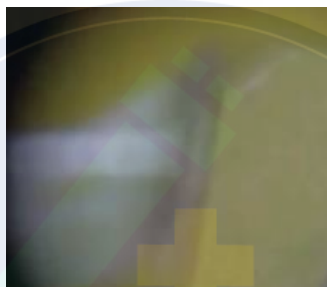
► 實驗結果：
擠壓動作可增加
黏性物質的分泌量

推測管足吸附的過程



1. 接觸介質面之前，吸盤表面即已存在少量黏性物質。
2. 接觸介質面時，藉擠壓動作使吸盤內的小骨關節形變，以釋出更多黏性物質。
3. 使管足牢牢吸附於介質面。

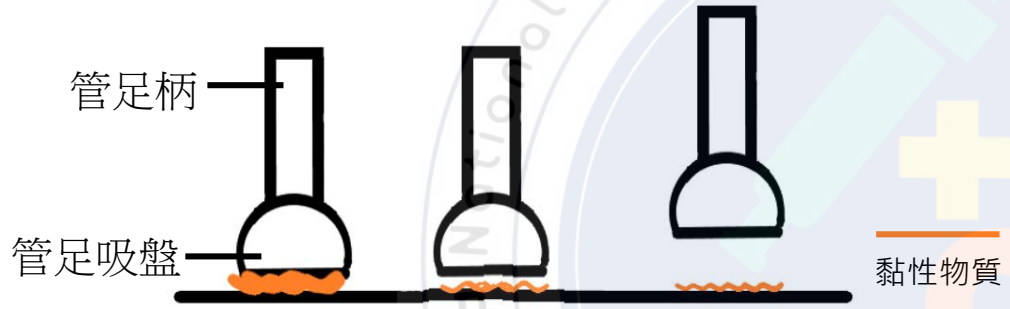
管足脫離的過程



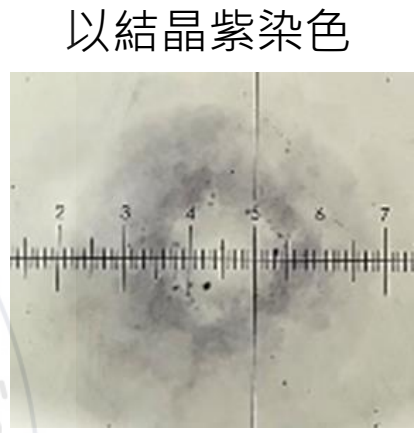
➤ 實驗結果：管足脫離時吸盤無明顯形變

推測管足快速脫離的機制

● 假設一：去除黏性物質

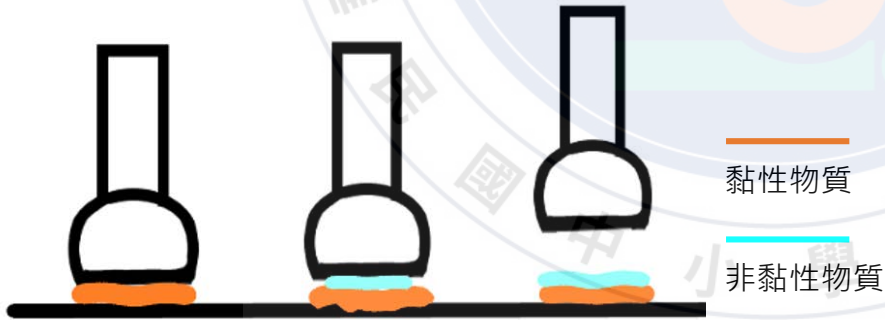


管足
未自然脫離

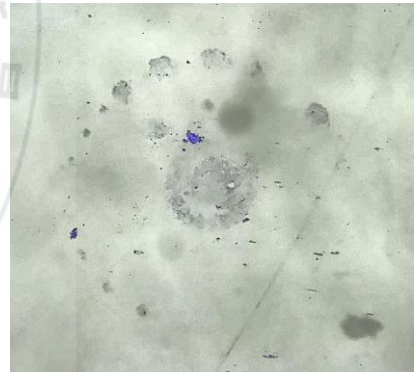


以結晶紫染色

● 假設二：分泌非黏性物質



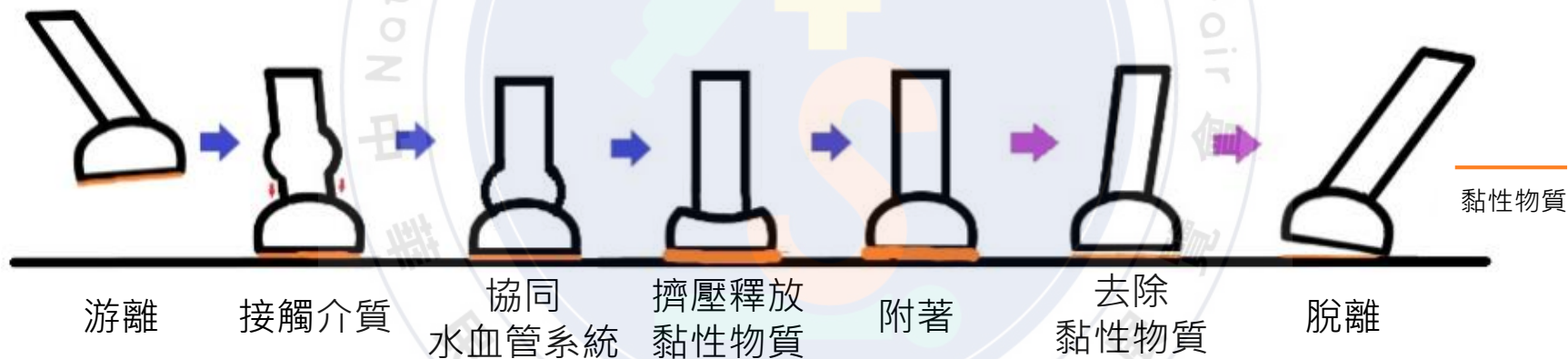
管足
自然脫離



➤ 實驗結果：
藉由去除黏性物質脫離

結論

- 一、單一管足對玻璃材質介質面的平均最大吸附力為 $14.16 \pm 3.31 \text{ gw}$ 。
- 二、管足吸附力主要源自於黏性物質，藉由去除黏性物質脫離。
- 三、完整的吸附-脫離模式：



※ 本研究觀察到海膽管足有「擠壓動作」為學界首次發現

未來展望與應用

海膽的黏性物質可在水中作用且可被移除，
在仿生黏合劑的應用發展上極具潛力。

| | 一般膠 | 藤壺 生物膠 | 海膽 黏性物質 |
|------|-----|-----------|------------|
| 水中作用 | ✗ | ✓ | ✓ |
| 可被移除 | ✗ | ✗ | ✓ |

參考資料

- Robert Pjeta ,Herbert Lindner ,Leopold Kremser ,Willi Salvenmoser ,Daniel Sobral ,Peter Ladurner ,Romana Santos (2020)Integrative Transcriptome and Proteome Analysis of the Tube Foot and Adhesive Secretions of the Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. MDPI ,Switzerland
- 丹尼爾·吉爾平(2013)餘知融譯，渾身疙瘩的棘皮動物，黃山書社，第22頁。
- Stephen R. Palumbi, Anthony R. Palumbi (2017)潘震澤譯《海洋的極端生物》，衛城出版