

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

探究精神獎

051807

逆流而上--馬拉高尼效應之探討與應用

學校名稱：臺中市立臺中女子高級中等學校

作者： 高二 李苡甄 高二 盧宥姝	指導老師： 邱雅雯
---------------------------------	------------------

關鍵詞：馬拉高尼流(Marangoni flow)、表面張力、
水上機器人

摘要

馬拉高尼效應是流體力學中常見的現象，由於表面張力梯度力，使得不同種類或是不同溫度的液體間產生相對位移，從表面張力小的往表面張力大的方向移動。本研究想藉由此微小的表面張力梯度力作為仿水黽的小型水上機器人移動的動力來源。研究過程中以 tinkercad 軟體設計模型，盡可能減輕機體重量並利用 3D 列印技術列印機器人本體。再藉由滴出界面活性劑並控制滴出方向以產生特定方向的馬拉高尼流，作為整體的動力來源。研究過程中探討界面活性劑濃度與模型移動速度以及表面張力梯度力的大小之關聯，和模型管徑與模型運動型態的關聯。

壹、 研究動機

相信大家都有看過肥皂船的小實驗。在小船後端滴加一些肥皂水，也就是我們所熟知的界面活性劑，並把小船放到水上，小船就會移動。我們也在網路上查到倒熱茶時茶葉會有逆流而上的特殊現象。在我們的深入探討後，發現這些都是因為「馬拉高尼流」所造成的效應，於是我們好奇是否能將馬拉高尼流作為物體移動的動力，推進物體前進。後來我們查到日本的鈴木健司教授研發了可在水上漂浮及移動的小型仿水黽機器人，於是我們想設計一個以馬拉高尼流作為移動動力來源的小型水上機器人原型機，未來可以使用在環境監測、教學、娛樂等用途中。

貳、 研究目的

- 一、 探討與水接觸面積和不同種類的界面活性劑濃度與模型承重的關聯
- 二、 探討模型孔徑的大小與模型移動速度、加速度之關聯
- 三、 探討界面活性劑濃度與模型位移、速度、加速度之關聯
- 四、 探討模型運動型態和表面張力梯度力的大小

參、 研究設備及器材

一、 實驗儀器

表 1-1、3D 列印模型所需器材

Phrozen Sonic Mini 8K 3D 列印機	Tinkercad 軟體	打磨機
Phrozen 湖水灰 8K 模型樹脂	FM1000 透明模型材 ABS LIKE	CHITUBOX 軟體

表 1-2、奈米微結構腳所需器材

0.5mm 銅線	Delta 桌上型超音波洗淨機	DLAB 電磁加熱攪拌器
電子天秤	氮氣噴氣機	各種化學溶液、化合物

表 1-3、實驗所需器材

75%酒精	95%酒精	白雪香乳皂 洗手乳
相機腳架	canon G7X 相機	Tracker 軟體

肆、 研究過程或方法

一、 文獻探討

(一)馬拉高尼效應(Marangoni effect)

液體表面張力會隨著表面溫度或表面成分的變化而改變。當表面張力不均勻時，會在液體表面產生表面張力梯度力，表面張力強的會對表面張力弱的產生拉力，導致表面張力弱的液體會往表面張力強的移動，產生馬拉高尼流，即為馬拉高尼效應。

接著我們參考期刊 *Physics Today* <Walking on water: Biocomotion at the interface>，期刊中提出某些陸生生物在意外落水之後藉由釋出界面活性劑，產生馬拉高尼流將自己推向陸地。有些生物像是小寬蝽屬的昆蟲，以馬拉高尼流作為移動的動力甚至能產生比在陸地上更大的速度移動。

(二)水黽腿部的奈米微結構

水黽的腿部覆蓋著數千根微米尺寸的鋼毛，這些直徑大多不到 3 微米的鋼毛按同一方向排列形成多層構造。鋼毛的表面布滿螺旋狀奈米結構的溝槽，使得空氣能吸附其中，形成一層氣墊，讓水黽的腿部表現出超疏水的特性。對具有特殊微奈米結構的水黽腿進行力學測量，結果顯示單條腿在水面上的最大支持力能達到其身體總重量的 15 倍。這種卓越的負載能力，使得水黽能夠在水面上自如行動，即使在狂風暴雨和急速流動的情況下也能保持穩定。

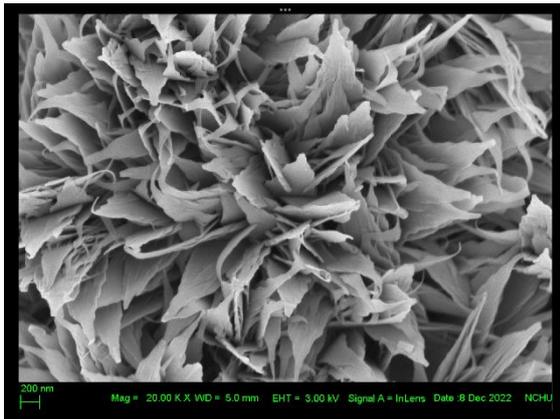


圖 1-1、奈米微結構

(本圖由實驗室學長拍攝)

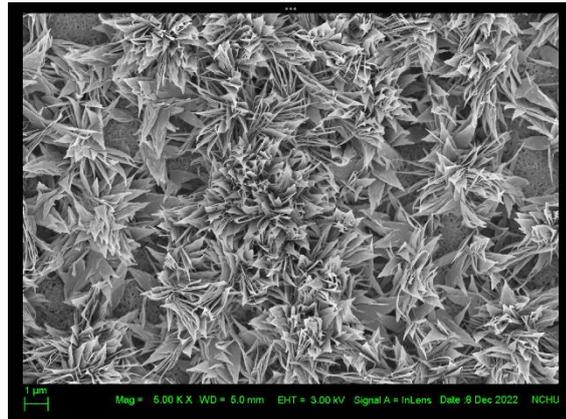


圖 1-2、奈米微結構

(本圖由實驗室學長拍攝)

(三)小型水上機器人

鈴木健司教授借鏡水黽的生物工學，成功地開發出這款小型機器人，能夠在水上漂浮並自由移動。此機器人擁有 18 條被噴上高效防水噴霧的長腳，使其能夠在水面上漂浮。此外，機器人還搭載了類似手機震動功能的馬達，透過微調振動頻率和長腳的方向，實現對前進和轉彎的靈活控制。

(四)表面張力

表面張力狹義來說是液體表面試圖獲得最小表面位能的傾向，而廣義來說是指兩種不同物態的物質在接觸面所產生的張力。表面張力主要受到溫度、界面活性劑的濃度、液體種類等影響，且正比於接觸長度。

表 2、不同物質的表面張力

液體	表面張力(mN/m)	液體	表面張力(mN/m)
n-戊烷	16.00	洗手乳	21.56
n-己烷	18.40	硬脂酸鈉	24.25
聚四氟乙烯	2.50	聚乙烯	36.10
乙醇	22.55	水	72.75
甲醇	2.60	汞	476.00

計算表面張力造成的力公式：

$$F_s = 2\pi R\gamma \quad (1)$$

$$F_w = F_s \cos \theta + F_{\text{浮}} \quad (2)$$

$$mg = 2\pi R\gamma \cos \theta + V_{\text{排}} \cdot \rho_{\text{水}} \cdot g \quad (3)$$

表面張力公式的單位為 mN/m 和 σ ，因次為 MT^{-2} 。

(五)體積流率與管徑的關係

體積流率是單位時間內通過特定表面的流體體積，通常由 Q 表示。

由泊肅葉定律(Poiseuille's law)可知：

$$\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi r^4} \quad (4)$$

(ΔP ：壓力損失、L：細管長度、 μ ：黏度、Q：體積流率、r：半徑)

移項得 $Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\mu L}$

由此可證，r(管徑半徑)的四次方正比於 Q(體積流率)。

二、 模型設計

(一)模型繪製

1.目的：用來盛裝界面活性劑的容器並可以在水上漂浮和移動。

我們使用 Tinkercad 軟體繪製模型圖案。模型中包含界面活性劑槽、界面活性劑流通管道、底板和微結構銅線腳的孔洞。繪製完成後以 Phorzen Sonic Mini 8k 3D 列印機印出模型。

2.模型一：界面活性劑由中心的中空圓柱流入上層的管道，流經管道後順著碗壁向下流至銅線腳，再沿著腳往下流到模型漂浮的水面上以產生馬拉高尼流並前進。其中管道的半徑的大小決定了界面活性劑流出的速度，並藉由封住不同管道以控制物體的移動方向。而下層的管道是用來裝入銅線腳，所以管道半徑遠比上層小。上下層分別各有 8 個管子，16 個孔洞。由於下層管道孔徑過小，彼此間隔也非常小，3D 列印機時常會出現誤差，而銅線腳也沒有足夠空間放置。

表 3、模型一的規格

長	3.0 cm	寬	3.0 cm	碗高	1.8 cm
重量	2.9 g	容量	7.2 ml	模型體積	3.2 cm ³



圖 2-1、模型一的透視圖

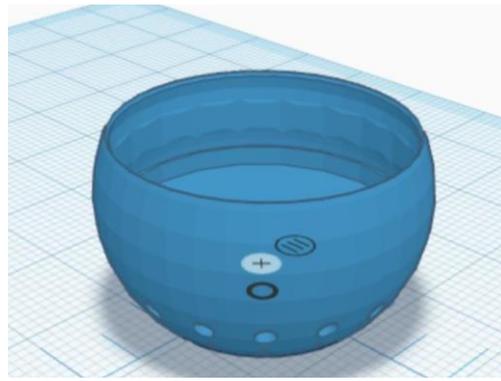


圖 2-2、模型一的立體結構

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製) (本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)

3.模型二：去除銅線腳的部分，改用薄的方形底板代替，因薄板比銅線腳穩定且可以承受的重量也較大。薄板上有隔板，界面活性劑經由管道流出後會沿著底板上繪製好的方向流向四個不同的方位。我們將圖形分成八等分並以封住其中幾邊的洞口來控制模型在水上的移動方向。

表 4、模型二的規格

底板長	6.7 cm	底板上模型容量	3.6 ml
底板寬	6.7 cm	底板上模型高度	1.13 cm
底板厚度(不包括擋板)	0.1 cm	模型二體積	4.9 cm ³
底板內模型直徑	2.1 cm	模型二重量	5.4 g

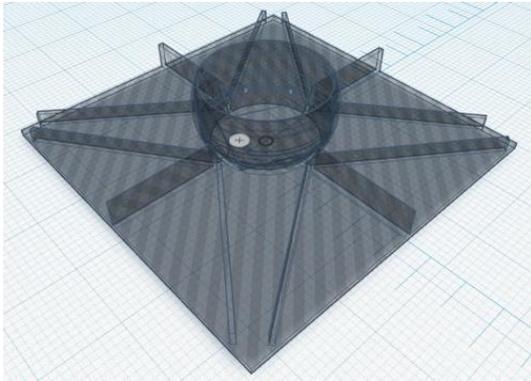


圖 3-1、模型二的透視圖

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)

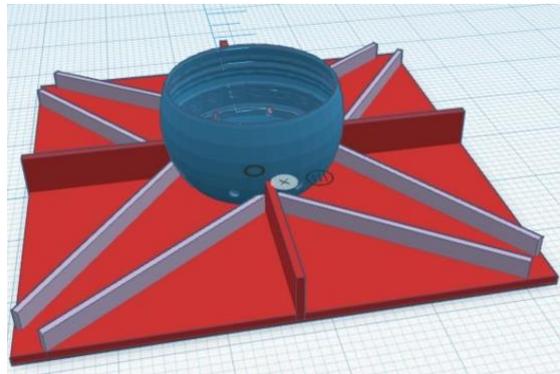


圖 3-2、模型二的立體結構

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)

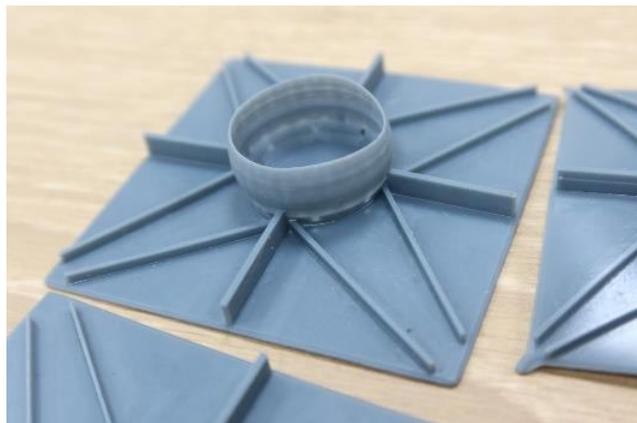


圖 3-3、模型二的實體模型

(本圖由第一作者親自拍攝)

4. 模型三：由於方形底板容易彎曲變形，且圓形底板的受力較為平均，所以我們改用圓形底板取代。另外為了避免周遭的水淹上去，除了留出通道以外，我們將模型的四周圍起圍牆，並將通道更改為一個以延長界面活性劑流出的時間，且將通道變窄，以此更精準的控制界面活性劑流出的方向。

表 5、模型三的規格

底板直徑	6.7 cm	底板上模型容量	6.0 ml
底板厚度(不包括擋板)	0.1 cm	底板面積	$44.89\pi \text{ cm}^2$
底板上模型高度	1.5 cm	模型三重量	10.2 g
底板上模型直徑	3.0 cm	模型三體積	7.9 cm^3

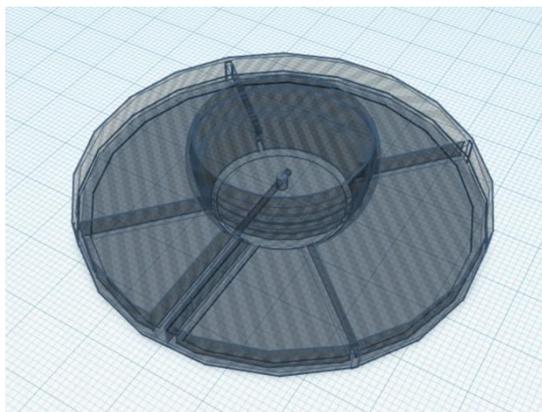


圖 4-1、模型三的透視圖

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)

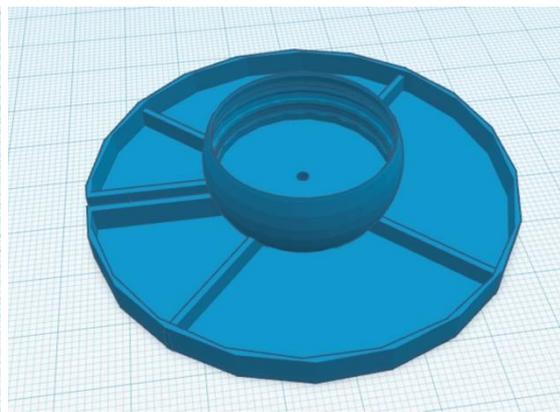


圖 4-2、模型三的立體結構

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)



圖 4-3、模型三的實體照片

(本圖由第一作者親自拍攝)

5.模型四：將流出的通道改為原本較寬的設計，因為通道出口過小造成表面張力施力的接觸長度很小，因此造成的馬拉高尼流不明顯。而圍牆的效果沒有預期的好，不但會增加模型重量更可能讓水更容易吸上來，因此我們去除圍牆的設計。此外，我們增加了容器的容量已延長模型在水上移動的時間。

表 6、模型四規格

底板直徑	6.7 cm	模型容量	6.0 ml
容器管徑	0.09、0.1 0.12、0.15 cm	底板上模型容器直徑	3.0 cm
		模型三重量	6.6 g
底板上模型高度	1.5 cm	模型三體積	6.03 cm ³

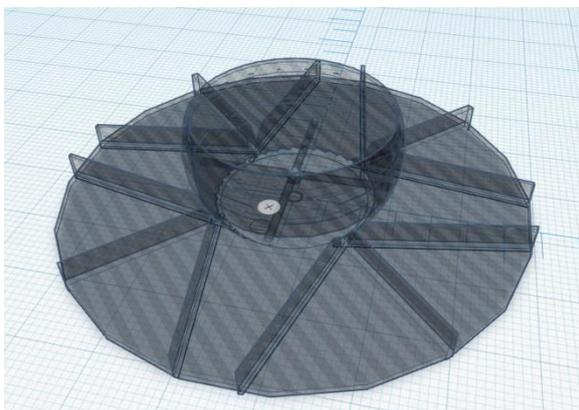


圖 5-1、模型四透視圖

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)

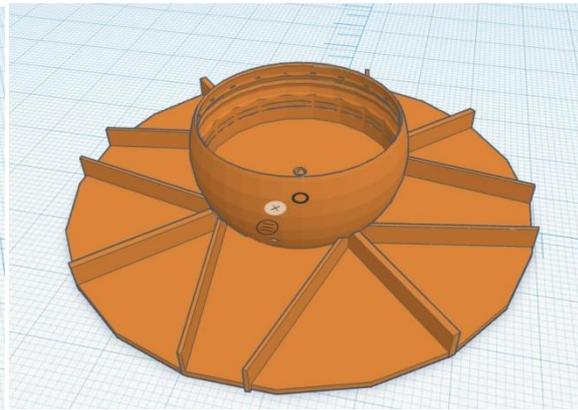


圖 5-2、模型四立體結構圖

(本圖由第一作者以 Tinkercad 軟體繪製)



圖 5-3、模型四的實體模型(本圖由第一作者親自拍攝)

(二)奈米微結構腳

1.目的：鍍上奈米微結構可增加與水的接觸長度，進一步增加表面張力。

2.實驗步驟

(1)將裸銅線摺成腳的形狀

(2)泡入丙酮後放入超音波震盪機震動 10 分鐘

- (3)依序用 IPA、無水酒精、DI water 沖洗銅線再用氮氣吹乾
- (4)泡入 35% 鹽酸後放入超音波震盪機震動 10 分鐘
- (5)用 DI water 沖洗後再用氮氣吹乾
- (6)混合氫氧化鈉 5 克、十二水合磷酸鈉 10 克、亞氯酸鈉 3.5 克、水 100 克
- (7)將混合液用電磁加熱攪拌器加熱至 90 度
- (8)樣品浸入 10 分鐘
- (9)混和無水酒精 100 毫升、0.02 M 十六烷硫醇 0.52 克
- (10)將混合液用電磁加熱攪拌器加熱至 56 度
- (11)樣品浸入 30 分鐘
- (12)用 DI water 輕輕沖洗後再用氮氣吹乾

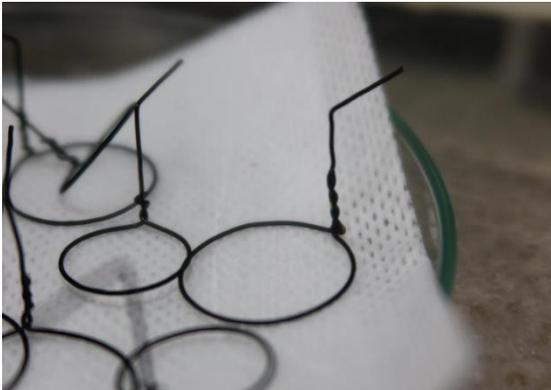


圖 6-1、奈米微結構腳

(本圖由第一作者親自拍攝)

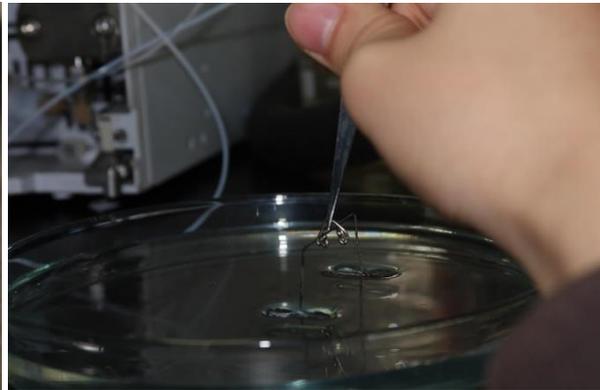


圖 6-2、測試奈米微結構腳的承重

(本圖由第一作者親自拍攝)

3.後續利用：我們後來放棄以奈米微結構腳作為模型與水之間加強表面張力的結構。首先，奈米微結構腳的銅線形狀是手作的，難以保證其平整度和一致性。其次，銅線長上微結構後雖然能直接在水上漂浮，承重卻也不大，且不太穩定，只要水面有波動就容易沉沒。最後，由於奈米微結構非常微小，必須謹慎收藏，避免各種碰種等等，就算微結構受損也不可能用肉眼察覺之，故不是一個非常適合的實驗對象。因此我們最後決定改以 3D 列印的底板來增加承重。

三、 實驗設計

(一)實驗一：承重測試

A.肥皂水的承重：

1.實驗目的：水面接觸面積、底板厚度、肥皂水濃度和承重的關聯

2.實驗變因：

(1)操縱變因：底板厚度和底面積、肥皂水濃度

(2)控制變因：肥皂水溫度

(3)應變變因：不同底板、不同濃度肥皂水可承載的重量

3.實驗步驟：

(1)準備清水、10%、25%、50%的肥皂水並測量溫度

(2)讓底板平衡漂浮在液面上

(3)依序增加迴紋針在底板上直到底板下沉

(4)秤量承載的迴紋針重量

(5)分析處理數據

B.酒精的承重：

1.實驗目的：水面接觸面積、底板厚度、酒精濃度和承重的關聯

2.實驗變因：

(1)操縱變因：底板厚度和底面積、酒精濃度

(2)控制變因：酒精溫度

(3)應變變因：不同底板、不同濃度酒精可以承載的重量

3.實驗步驟：

(1)準備清水、10%、25%、50%、75%、95%的酒精並測量溫度

(2)讓底板平衡漂浮在液面上

(3)依序增加迴紋針在底板上直到底板下沉

(4)秤量承載的迴紋針重量

(5)分析數據

(二)實驗二：模型的管徑與流率之關聯

- 1.實驗目的：測量模型在不同管徑下液體的流率
- 2.實驗變因：
 - (1)操縱變因：模型管徑
 - (2)控制變因：液體在模型內流動的秒數、液面高度
 - (3)應變變因：由模型流出的液體體積
- 3.實驗步驟：
 - (1)將模型的其中 3 個管道堵住
 - (2)將清水不斷注入模型容器內，等到容器滿了按下計時器
 - (3)計時 60 秒，過程中持續加水以維持相同水位高度
 - (4)紀錄 60 秒內由模型流出的水量
 - (5)步驟 1~4 重複五次取平均

(三)實驗三：模型管徑與模型運動型態之關聯

- 1.實驗目的：模型管徑與其運動中最大速度和加速度等運動型態的關係
- 2.實驗變因：
 - (1)操縱變因：模型管徑
 - (2)控制變因：酒精濃度與體積
 - (3)應變變因：模型的位移、速度、加速度
- 3.實驗步驟：
 - (1)架設相機
 - (2)使模型靜止漂浮在水面上
 - (3)用滴管將 5 毫升 25%的酒精滴入模型容器內靜待其流出
 - (4)觀察酒精接觸水面後模型的運動過程
 - (5)依序使用管徑為 0.9 毫米、1 毫米、1.2 毫米、1.5 毫米的模型重複步驟 1 ~ 4
 - (6)利用 Tracker 分析位移、速度、加速度

(四)實驗四：界面活性劑濃度與模型運動型態之關聯

- 1.實驗目的：界面活性劑濃度和模型位移、速度之關聯、推算表面張力梯度力
- 2.實驗變因：
 - (1)操縱變因：界面活性劑濃度
 - (2)控制變因：界面活性劑體積、模型規格
 - (3)應變變因：模型移動方向與運動型態
- 3.實驗步驟：
 - (1)架設相機

- (2)將底板大小為 6.7 公分*6.7 公分*0.09 公分的模型放在水面上並使其靜止
- (3)將不同濃度的酒精依次滴在模型與水面交界處使模型移動
- (4)每種濃度進行 5 次實驗，取其中運動狀態較平穩的 3 組
- (5)利用 Tracker 分析位移與速度並觀察模型運動型態
- (6)單獨測試清水由管道中流出來模型移動的距離以分析液體流出時的產生的推力
- (7)由 $F=ma$ 推得模型所受合力大小並扣掉水的推進力所得應為表面張力梯度力

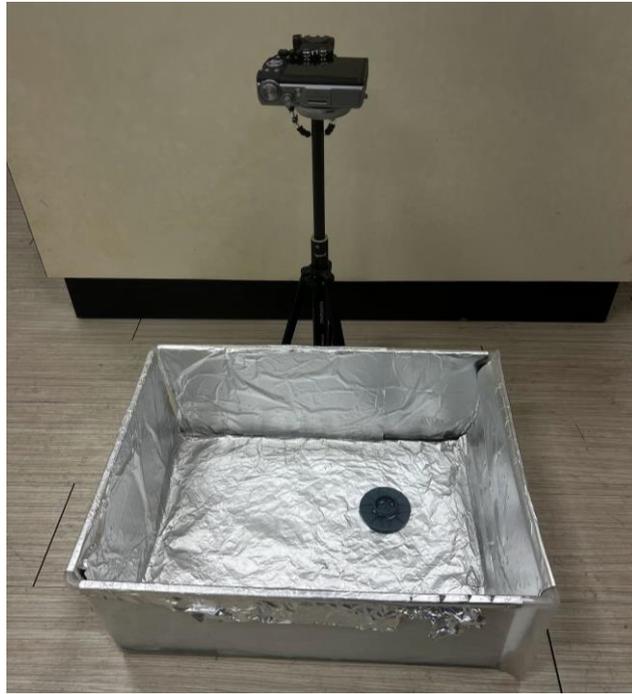


圖 7、實驗四實驗裝置
(本圖由第一作者親自拍攝)

伍、 研究結果

一、 實驗一：承重測試

A.肥皂水：

表 7-1、不同濃度肥皂水對不同底面積的承重

底面積 (cm^2)	底板厚度 (cm)	底板質量 (g)	清水承重 (g)	10%肥皂水 承重(g)	25%肥皂水 承重(g)	50%肥皂水 承重(g)
25.00	0.08	2.59	5.29	2.99	2.99	2.79
25.00	0.10	3.11	5.51	3.41	3.31	3.31
30.25	0.08	4.54	7.74	5.04	5.04	5.14
30.25	0.10	4.65	7.85	5.15	5.15	5.15
36.00	0.08	4.42	8.22	5.52	5.42	5.12
36.00	0.10	5.00	8.90	5.80	5.80	5.50
44.89	0.08	6.02	11.42	8.22	8.02	7.12
44.89	0.10	6.67	11.97	8.57	8.27	7.47
49.00	0.08	6.51	11.61	8.91	8.81	7.51
49.00	0.10	7.34	12.14	9.44	9.24	8.24

註：承重=底板本身質量+底板上承載的物體質量

註：水溫 20°C

(一)第一組：20°C 清水

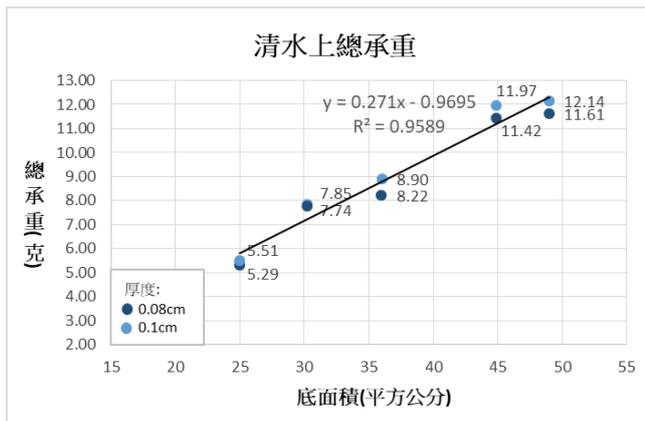


圖 8-1、清水上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(二)第二組：10% 肥皂水

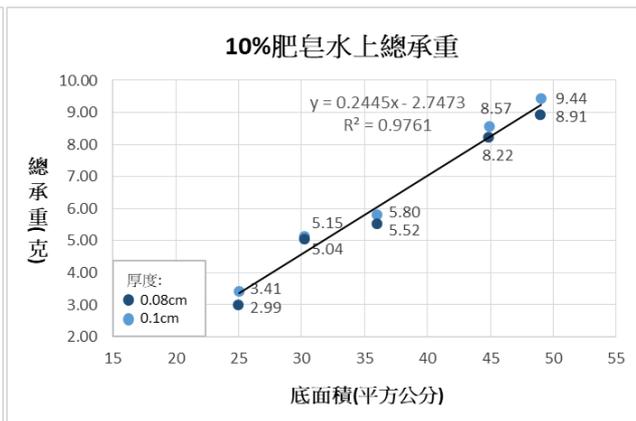


圖 8-2、10% 肥皂水上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(三)第三組：25% 肥皂水

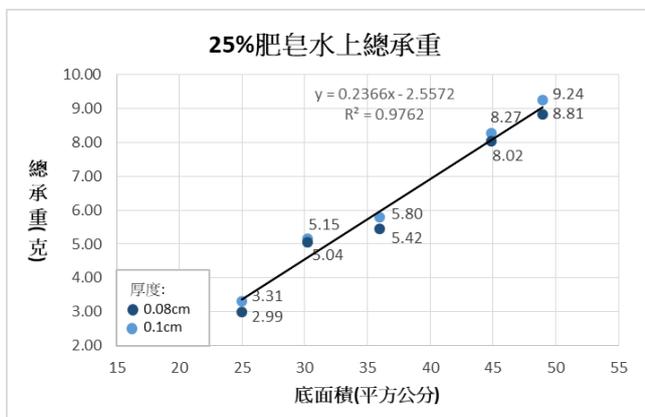


圖 8-3、25% 肥皂水上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(四)第四組：50% 肥皂水

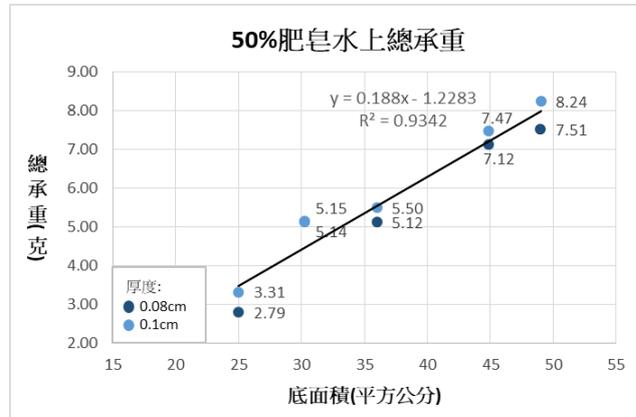


圖 8-4、50% 肥皂水上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

B.酒精：

表 7-2、清水、10%酒精、25%酒精對不同底面積的承重

底面積 (cm^2)	底板厚度 (g)	底板質量 (g)	清水承重 (g)	10%酒精 承重(g)	25%酒精 承重(g)
25	0.08	2.59	5.39	4.99	4.30
25	0.1	3.11	5.61	5.86	4.14
30.25	0.08	4.54	7.74	7.62	6.60
30.25	0.1	4.65	8.05	8.42	7.05
36	0.08	4.42	9.42	9.91	7.17
36	0.1	5.00	9.50	10.15	7.06
44.89	0.08	6.02	12.22	12.88	9.45
44.89	0.1	6.67	12.37	13.19	9.42
49	0.08	6.51	12.61	12.78	9.59
49	0.1	7.34	13.54	13.52	10.09

表 7-3、50%酒精、75%酒精、95%酒精對不同底面積的承重

底面積 (cm^2)	底板厚度 (g)	底板質量 (g)	50%酒精 承重(g)	75%酒精 承重(g)	95%酒精 承重(g)
25	0.08	2.59	3.27	2.59	2.59
25	0.1	3.11	3.56	3.11	3.11
30.25	0.08	4.54	5.32	4.64	4.54
30.25	0.1	4.65	5.33	4.75	4.65
36	0.08	4.42	6.14	4.62	4.52
36	0.1	5.00	6.37	5.10	5.00
44.89	0.08	6.02	8.86	7.04	6.22
44.89	0.1	6.67	9.08	8.05	6.77
49	0.08	6.51	9.25	7.63	6.51
49	0.1	7.34	10.09	8.37	7.34

註：承重=底板本身質量+底板上承載的物體質量

註：水溫 18°C

(一)第一組：18°C 清水

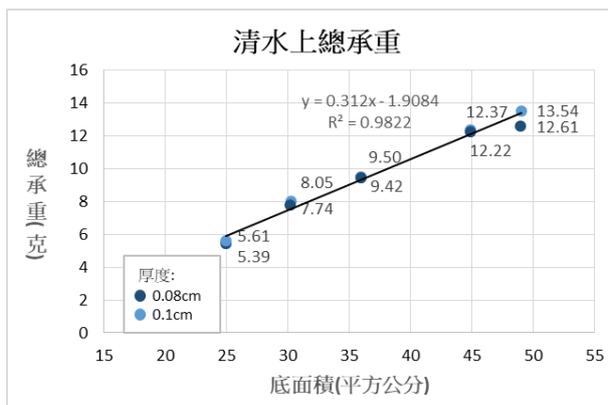


圖 9-1、清水上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(二)第二組：10%酒精

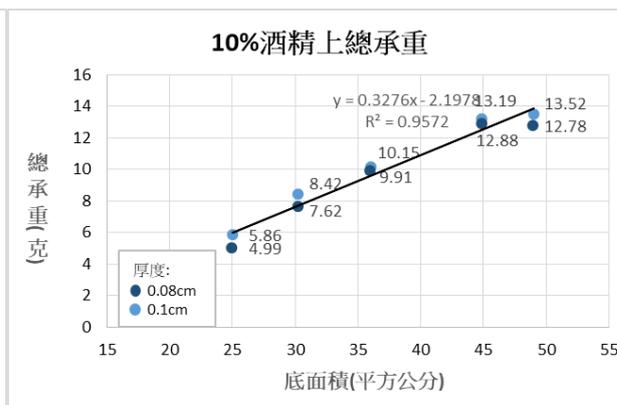


圖 9-2、10%酒精上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(三)第三組：25%酒精

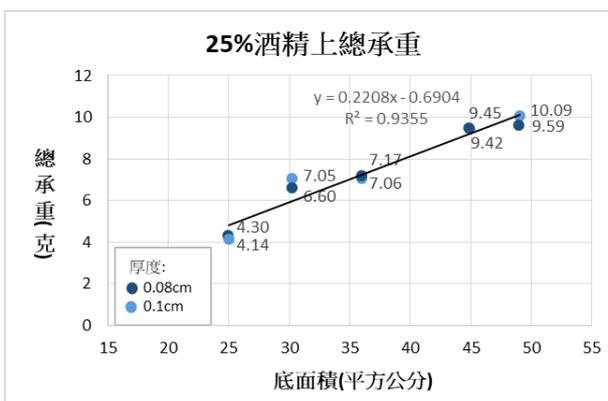


圖 9-3、25%酒精上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(四)第四組：50%酒精

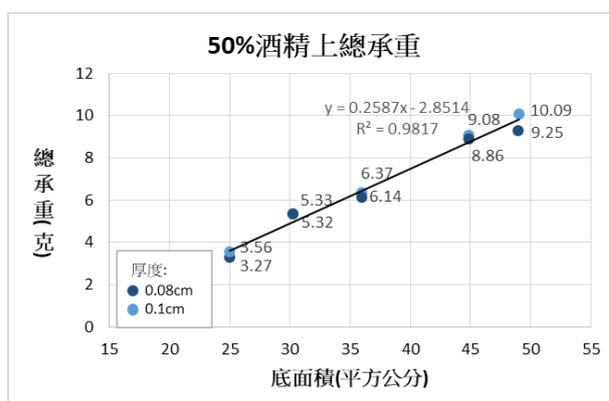


圖 9-4、50%酒精上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(五)第五組：75%酒精

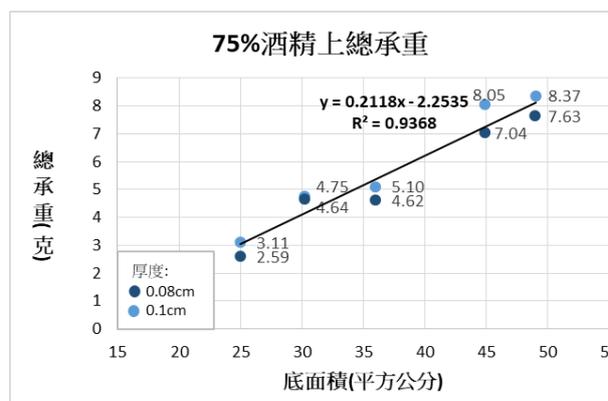


圖 9-5、75%酒精上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(六)第六組：95%酒精

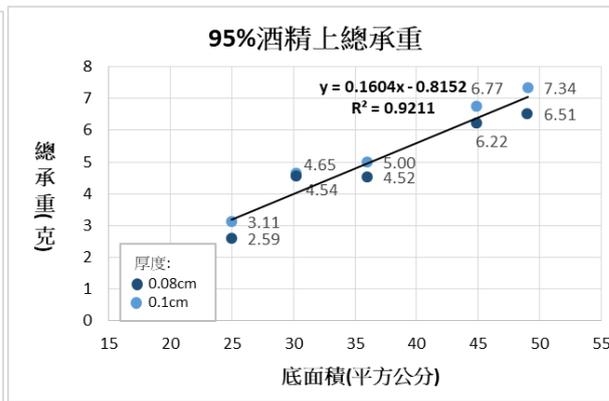


圖 9-6、95%酒精上底面積對總承重關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

二、 實驗二：模型管徑與流率的關聯

表 8、不同管徑下純水的流率

管徑 次數	0.9 mm	1 mm	1.2 mm	1.5 mm
1	0.032 mL/s	0.040 mL/s	0.102 mL/s	0.230 mL/s
2	0.038 mL/s	0.046 mL/s	0.110 mL/s	0.253 mL/s
3	0.017 mL/s	0.048 mL/s	0.083 mL/s	0.235 mL/s
4	0.030 mL/s	0.050 mL/s	0.077 mL/s	0.250 mL/s
5	0.027 mL/s	0.041 mL/s	0.102 mL/s	0.233 mL/s
平均	0.029 mL/s	0.045 mL/s	0.095 mL/s	0.240 mL/s

三、 實驗三：模型管徑與運動型態之關聯

(一)管徑 0.9 mm

1.運動狀態：

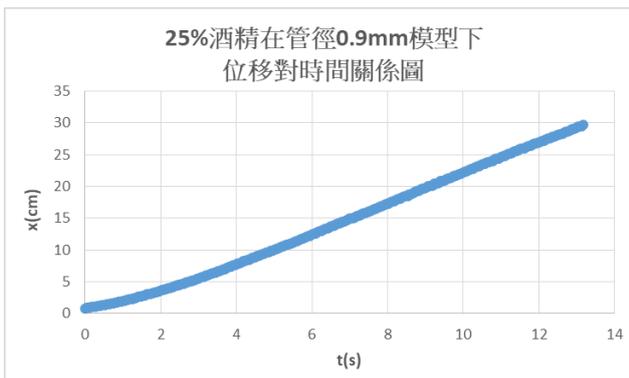


圖 10-1、管徑 0.9 mm 下位移對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

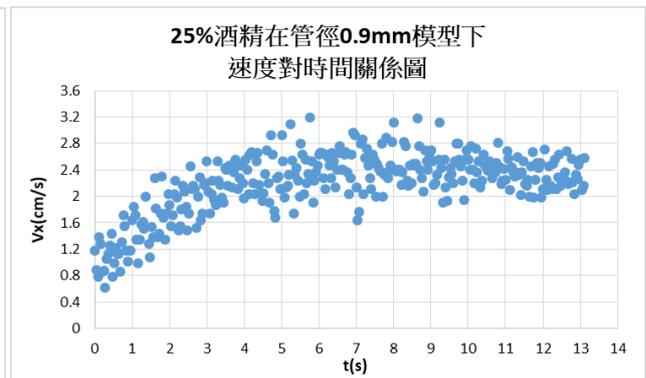


圖 10-2、管徑 0.9 mm 下速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

2.近似等加速度運動：0~4 秒

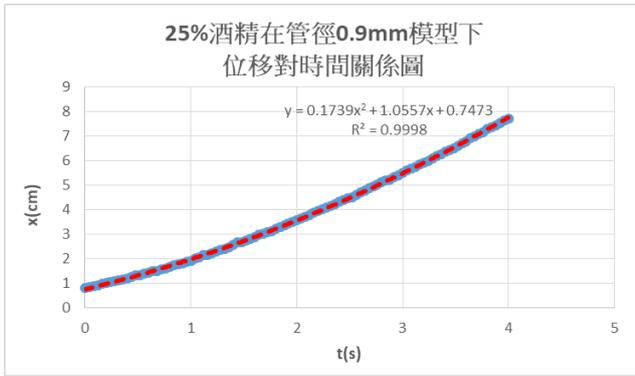


圖 10-3、管徑 0.9 mm 等加速運動部分 x-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

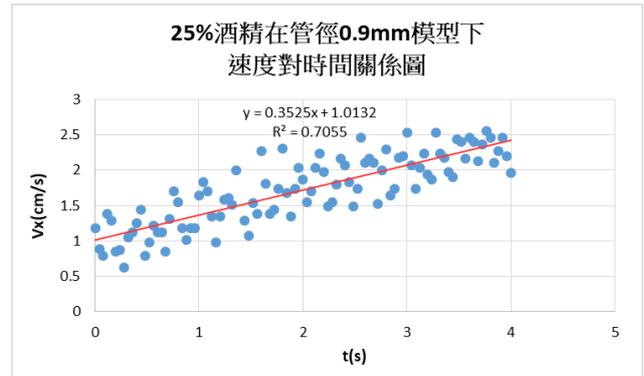


圖 10-4、管徑 0.9 mm 下等加速運動部分 v-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(二)管徑 1.0 mm

1.運動狀態：

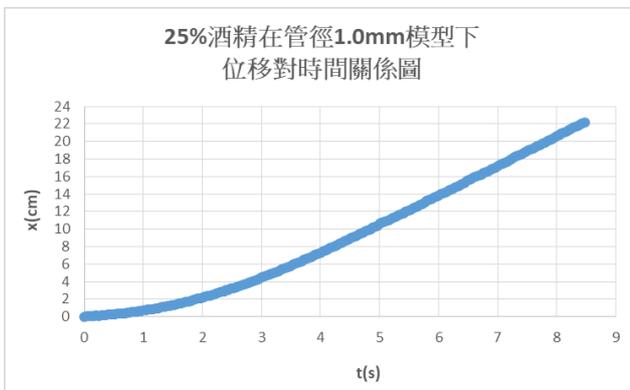


圖 11-1、管徑 1.0 mm 下位移對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

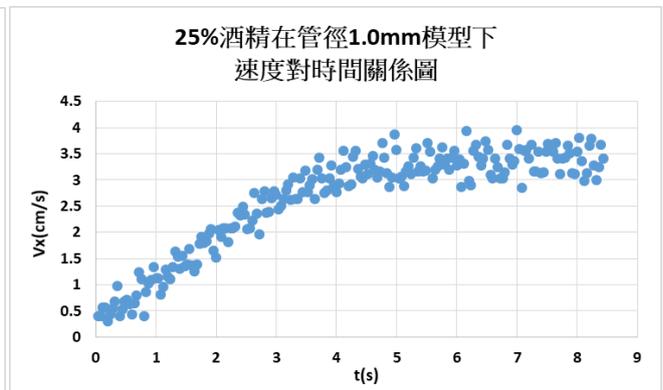


圖 11-2、管徑 1.0 mm 下速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

2.近似等加速度運動：0~4 秒

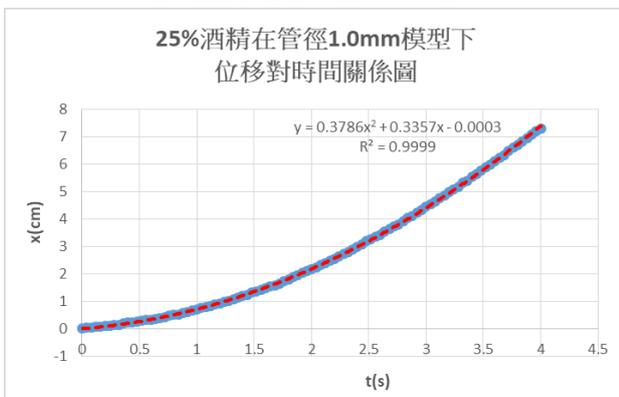


圖 11-3、管徑 1.0mm 下等加速運動部分 x-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

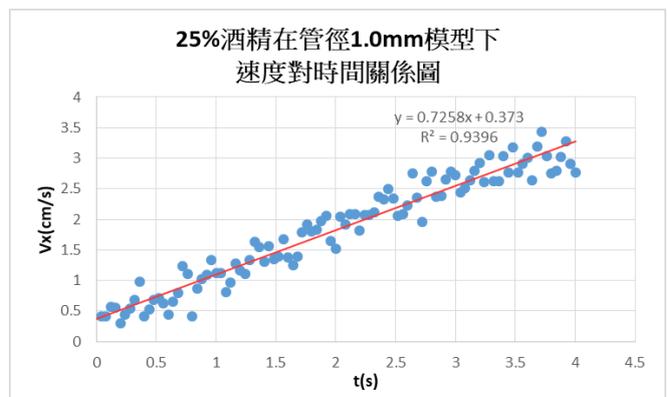


圖 11-4、管徑 1.0 mm 下等加速運動部分 v-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(三)管徑 1.2 mm

1.運動狀態：

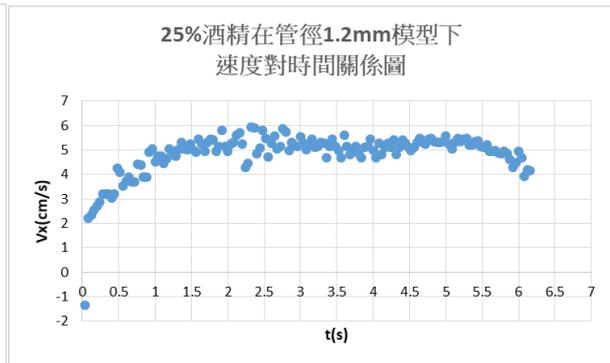
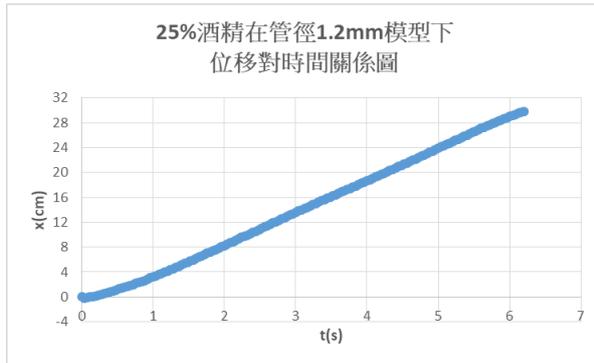


圖 12-1、管徑 1.2 mm 下位移對時間關係圖

圖 12-2、管徑 1.2 mm 下速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

2.近似等加速度運動：0~2 秒

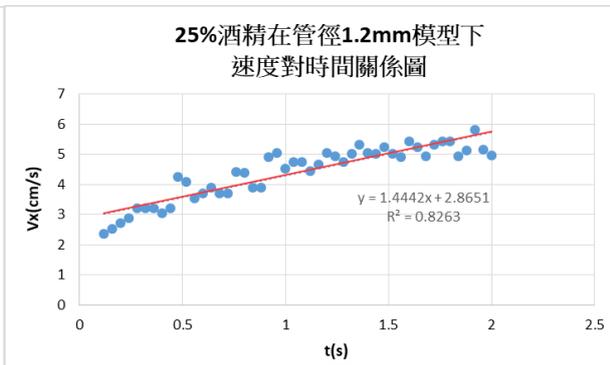
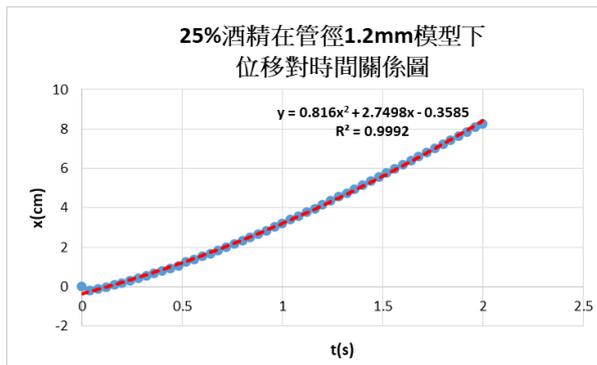


圖 12-3、管徑 1.2mm 下等加速運動部分 x-t 圖

圖 12-4、管徑 1.2 mm 下等加速運動部分 v-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(四)管徑 1.5 mm

1.運動狀態：

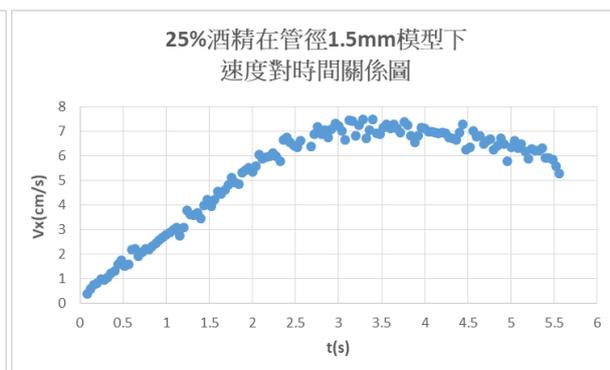
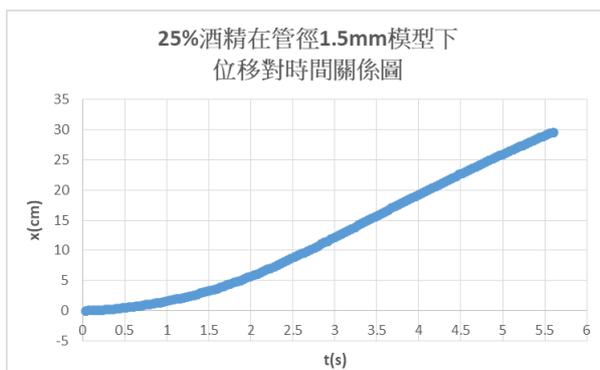


圖 13-1、管徑 1.5 mm 下位移對時間關係圖

圖 13-2、管徑 1.5 mm 下速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

2. 近似等加速度運動：0~3 秒

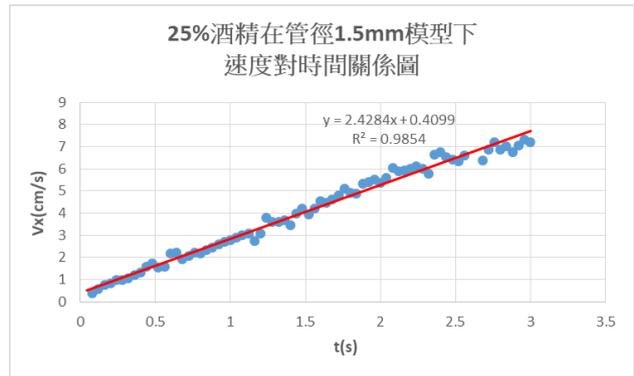
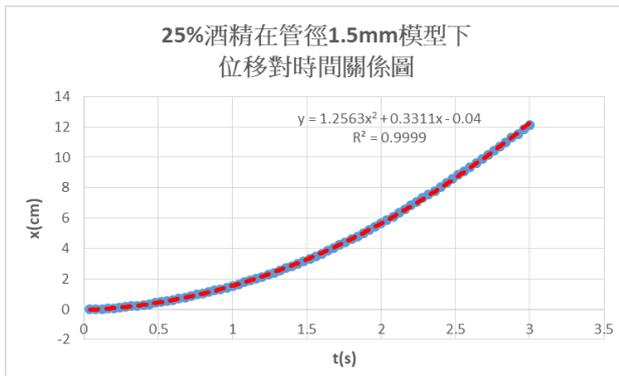


圖 13-3、管徑 1.5mm 下等加速運動部分 x-t 圖

圖 13-4、管徑 1.5 mm 下等加速運動部分 v-t 圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

四、 實驗四：界面活性劑濃度與模型運動型態之關聯

使用底板為 $6.7*6.7*0.09 \text{ cm}^3$ 的模型進行實驗

註：因空間限制僅摘錄部分實驗數據圖表

(一) 清水

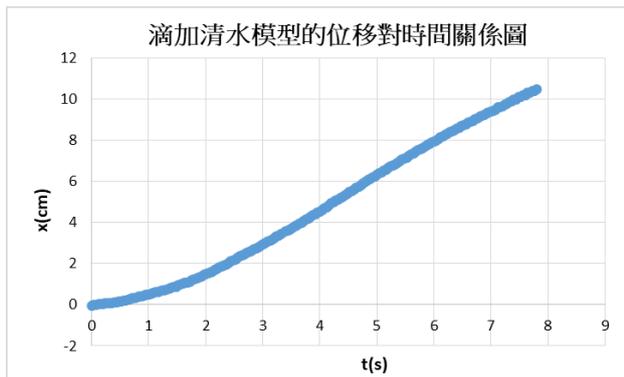


圖 14-1、滴加清水位移對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

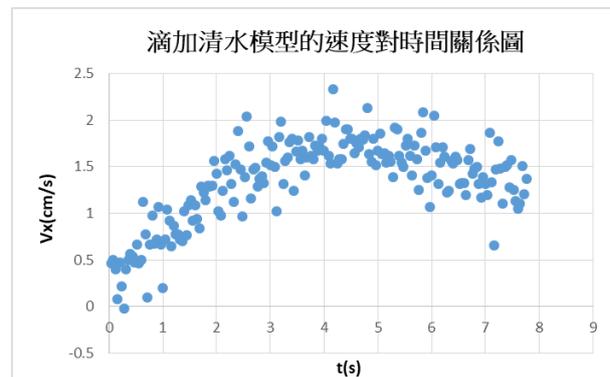


圖 14-2、滴加清水速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(二)10%酒精

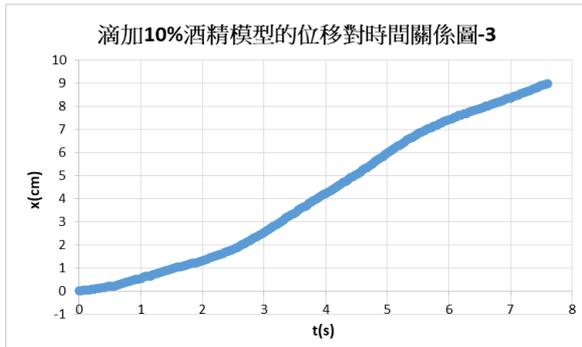


圖 15-1、滴加 10%酒精位移對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

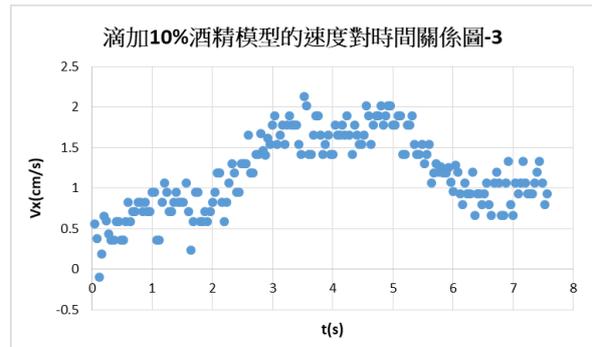


圖 15-2、滴加 10%酒精速度對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(三)25%酒精

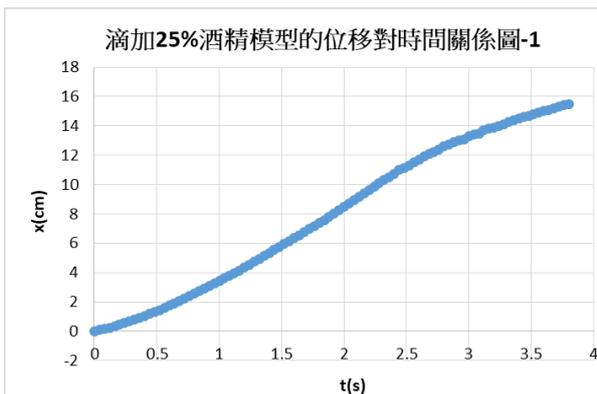


圖 16-1、滴加 25%酒精位移對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

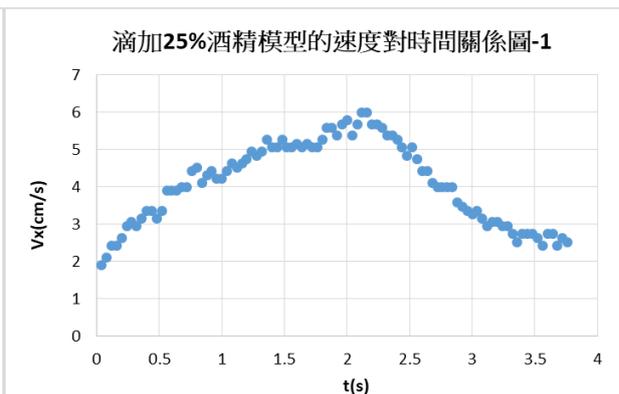


圖 16-2、滴加 25%酒精速度對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(四)50%酒精

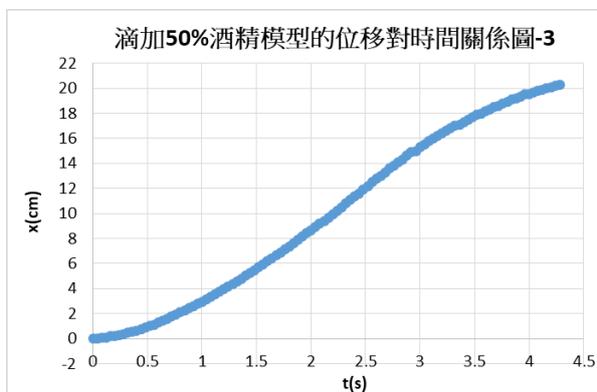


圖 17-1、滴加 50%酒精位移對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

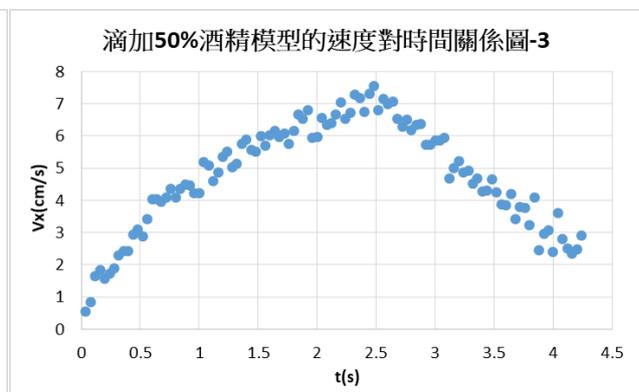


圖 17-2、滴加 50%酒精速度對時間關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(五)75%酒精

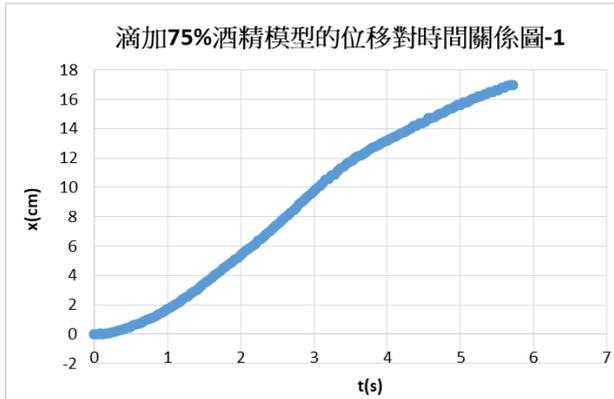


圖 18-1、滴加 75%酒精位移對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

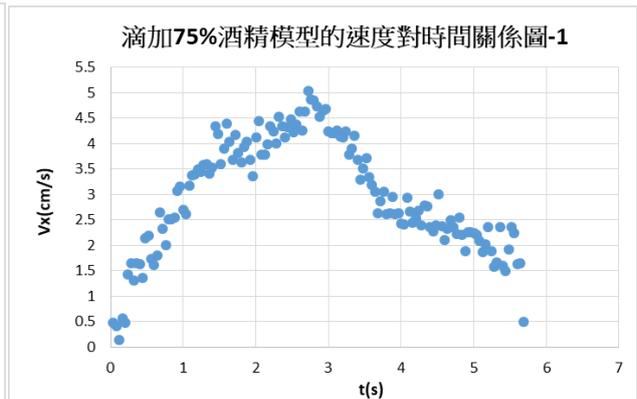


圖 18-2、滴加 75%酒精速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(六)95%酒精

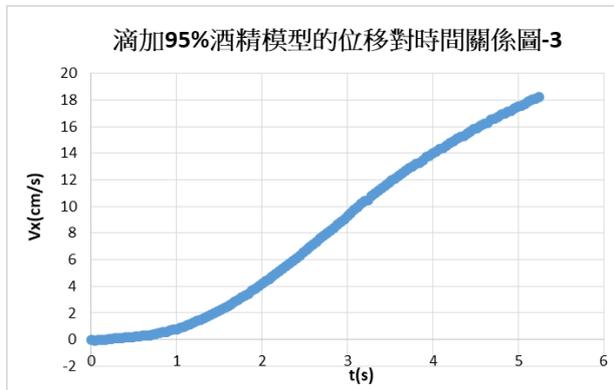


圖 19-1、滴加 95%酒精位移對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

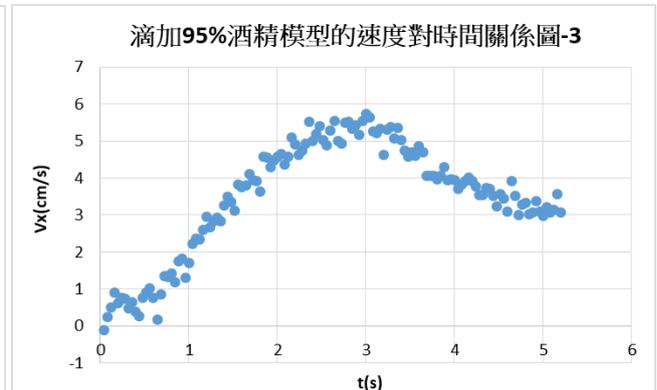


圖 19-2、滴加 95%酒精速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

陸、 討論

一、 實驗一：承重測試

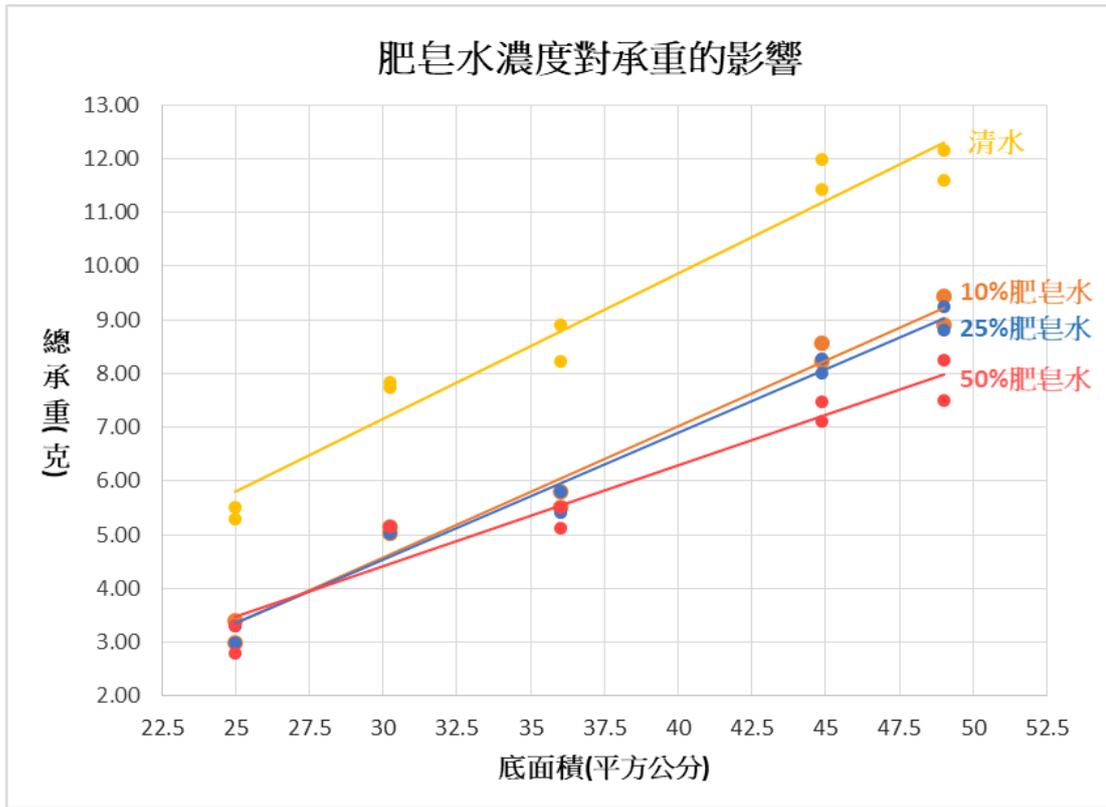


圖 20-1、肥皂水濃度對承重的影響(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

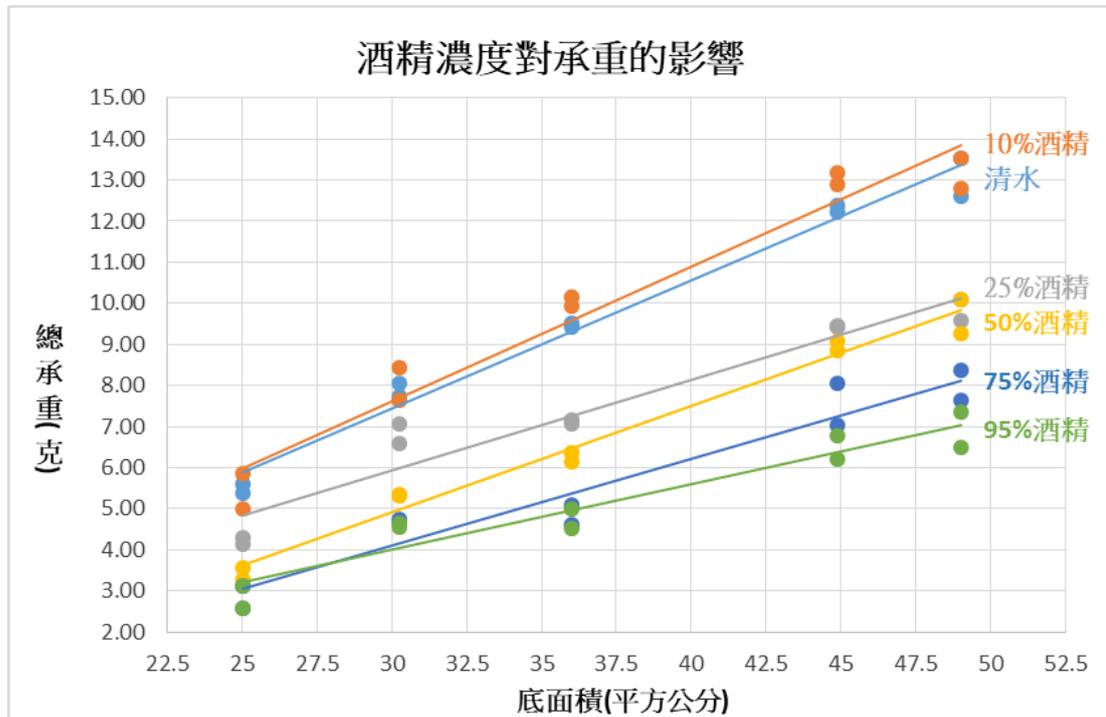


圖 20-2、酒精濃度對承重的影響(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)由圖 20-1、圖 20-2 可知，底板總承重與底板底面積呈現線性正相關。

(二)雖然較厚的底板重量相對較重，但更不容易變形，因此承重不一定會比薄的底板差。

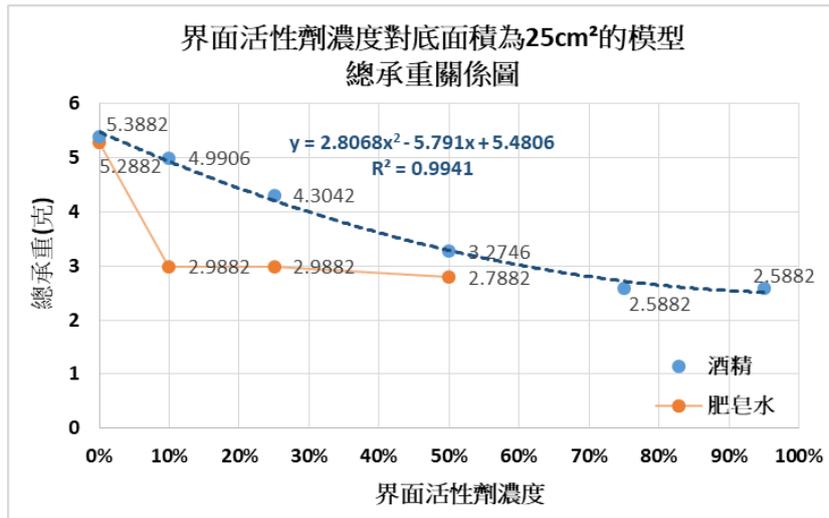


圖 21、界面活性劑濃度對總承重關係圖

(此圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)肥皂的表面張力相較於酒精更小，在低濃度（10%）的時候承重急遽減少，但隨著濃度的增加，承重的變化量不大，僅有些微的減少。

(二)酒精的表面張力隨濃度的變化較肥皂輕緩且規律，在低濃度（10%）時與水的承重相差不遠，並且隨著濃度的增加承重漸漸下降。且酒精濃度與承重不呈線性關係。

二、 實驗二：模型管徑與流率之關聯

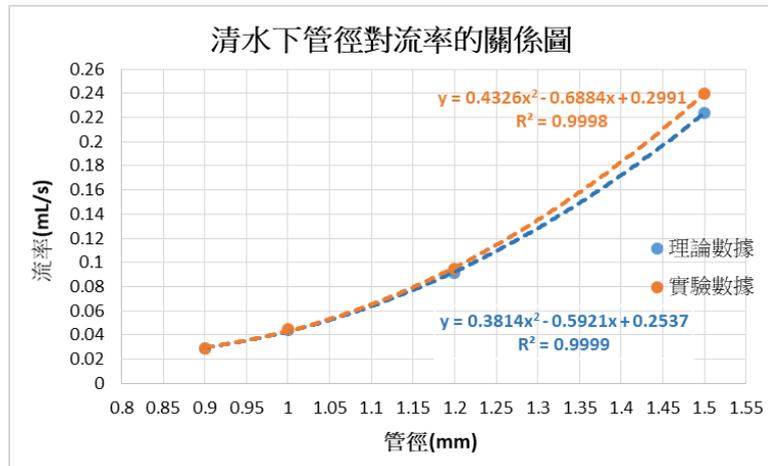


圖 22-1、清水下管徑對流率的關係圖(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

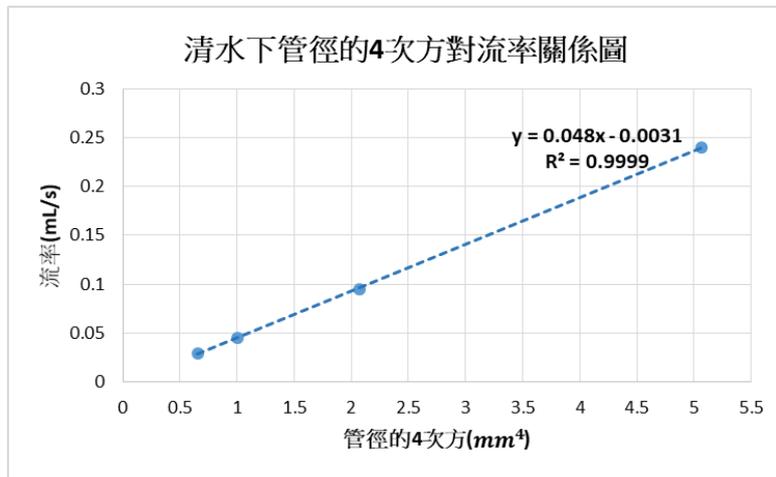


圖 22-2、清水下管徑的 4 次方對流率關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)實驗數據與理論值非常接近，實驗結果具有一定的可信度，方便後續進行各種分析。

(二)由圖 22-2，管徑的 4 次方與流率幾乎成正比，且相關係數高達($R^2 = 0.9999$)，可作為準確率的保證。

(三)雖然數據並沒有完全符合泊肅葉定律的公式(4)，不過也相當接近。可能的誤差有按下計時器的時間不夠精準，或是由於我們的模型是由 3D 列印機列印，我們無法確認中心的管道孔徑是否精準到與設計的一致。

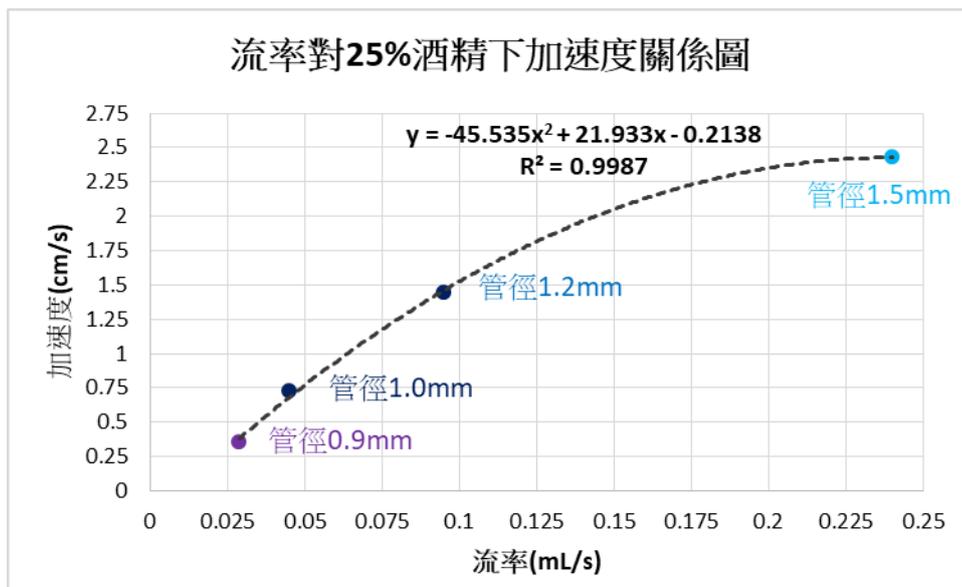


圖 23、流率對 25% 酒精下加速度關係圖(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

三、 實驗三：模型管徑與運動型態之關聯

表 9、管徑與模型最大速度、加速度關係

管徑(mm)	最大速度(cm/s)	加速度(cm/s ²)
0.9	3.1920	0.3525
1.0	3.9480	0.7258
1.2	5.9247	1.4442
1.5	7.4879	2.4284

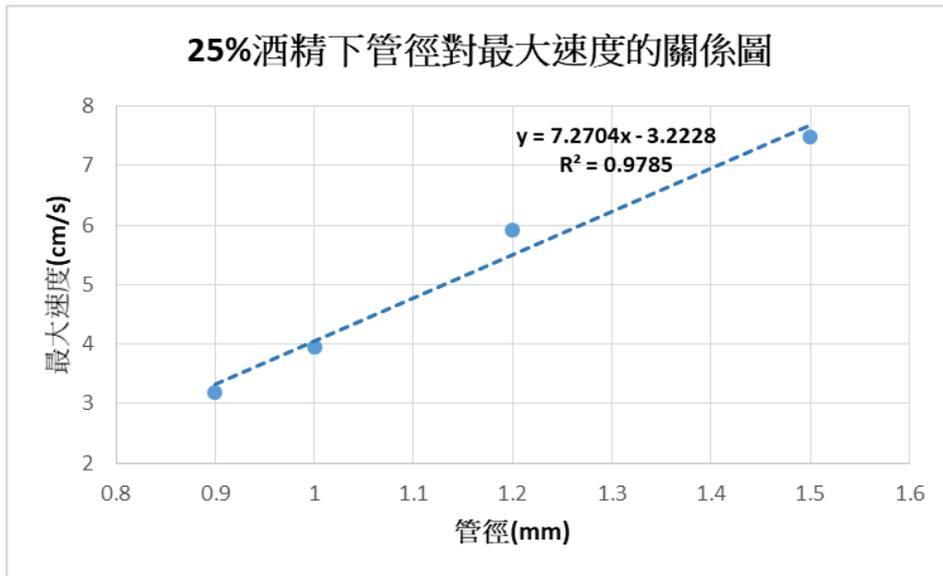


圖 24-1、25%酒精下管徑對最大速度的關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

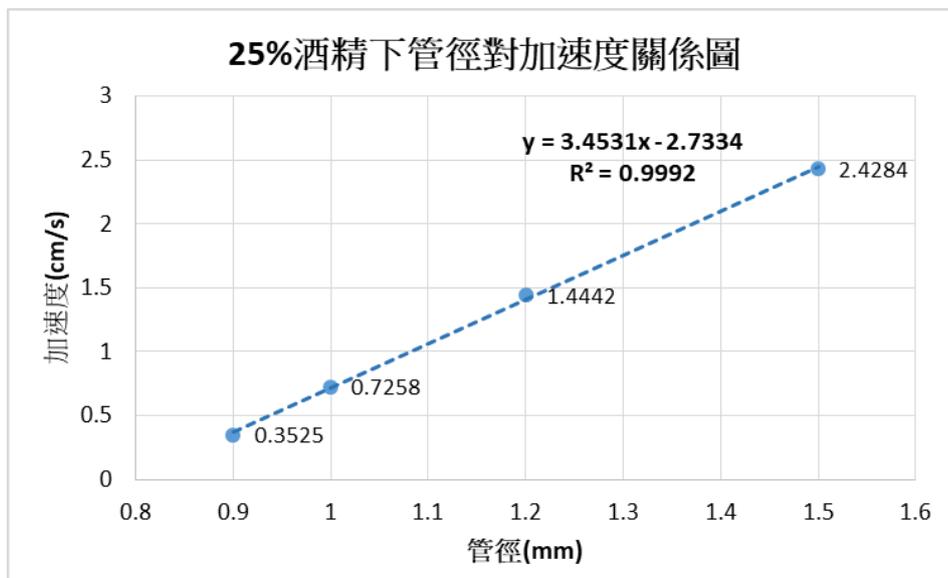


圖 24-2、25%酒精下管徑對加速度關係圖
(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)承上可知，管徑越大則流率越大。流率大則瞬時濃度差異越大，故形成的表面張力差越大，又模型前半段呈近似等加速運動，此時 $F=ma=\Delta\gamma L \Rightarrow F \propto \Delta\gamma \propto a$ ，故管徑與加速度呈線性正相關。

(二) 模型後半段運動呈現等速度運動，此時 $F=f(\text{阻力})=kv_{\max}=\Delta\gamma L \Rightarrow F \propto \Delta\gamma \propto v_{\max}$ ，又管徑越大則流率越大，流率大則瞬時濃度差異越大，故形成的表面張力差越大，故管徑與最大速度呈線性正相關。

(F:合力、 $\Delta\gamma$:表面張力差、a:加速度、L:接觸長度、f:阻力、k:比例係數、 v_{\max} :最大速度)

四、 實驗四：酒精濃度與運動型態的關聯

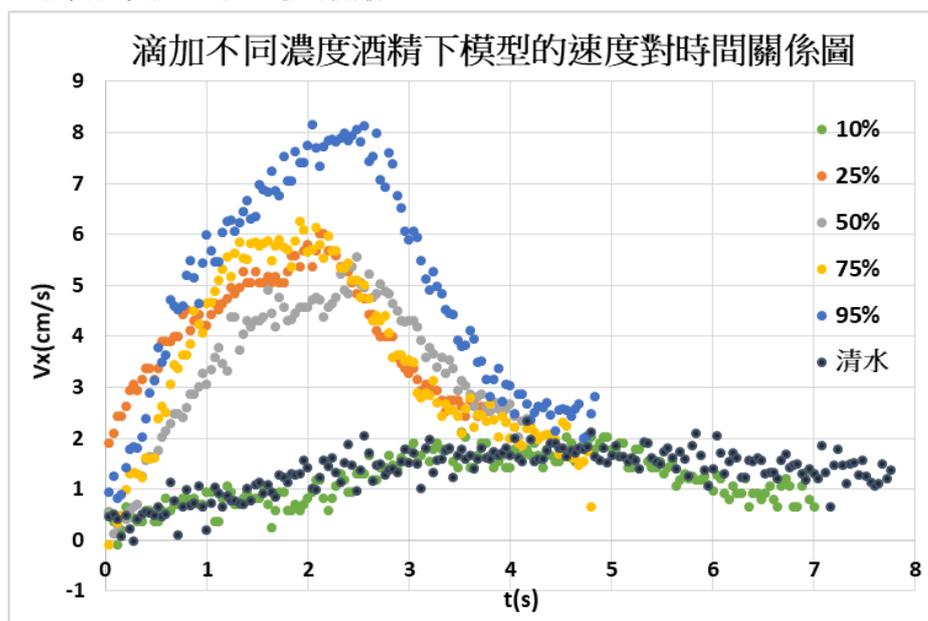


圖 25、滴加不同濃度酒精模型的速度對時間關係圖

(本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)25%酒精、50%酒精、75%酒精、95%酒精大致都在 0 ~ 2 秒期間將酒精不斷地滴在模型與水的交界處，因為一滴酒精的體積相較於整缸水非常小，因此一滴入就被快速稀釋。連續滴加酒精的過程使的在水面上的酒精濃度能一直提高，產生越來越大的馬拉高尼流推動模型移動，故速度呈現上升的趨勢。2 秒後停止滴入酒精，速度就急遽的下降，顯示推動模型前進的主力是馬拉高尼流造成的推進力。

10%的酒精由於濃度很小，位移量也非常小。為了方便觀察，我們共滴了 5 秒的酒精。因此如上圖中所見，雖然速度變化不明顯，仍能看出 0 ~ 5 秒間速度有些微上升的趨勢，5 秒以後就開始下降。

(二)由上圖可得 10%酒精速度變化量較小對比其他濃度酒精相對更急遽的變化，此結果可對應到實驗一酒精承重的結果。10%酒精跟水的承重相去不遠，亦即與水的表面張力相差不大，故馬拉高尼效應較不明顯；而滴入 25% ~ 95%酒精的模型速度變化量大但是彼此之間的分佈卻相差不大，與實驗一的結果相符。

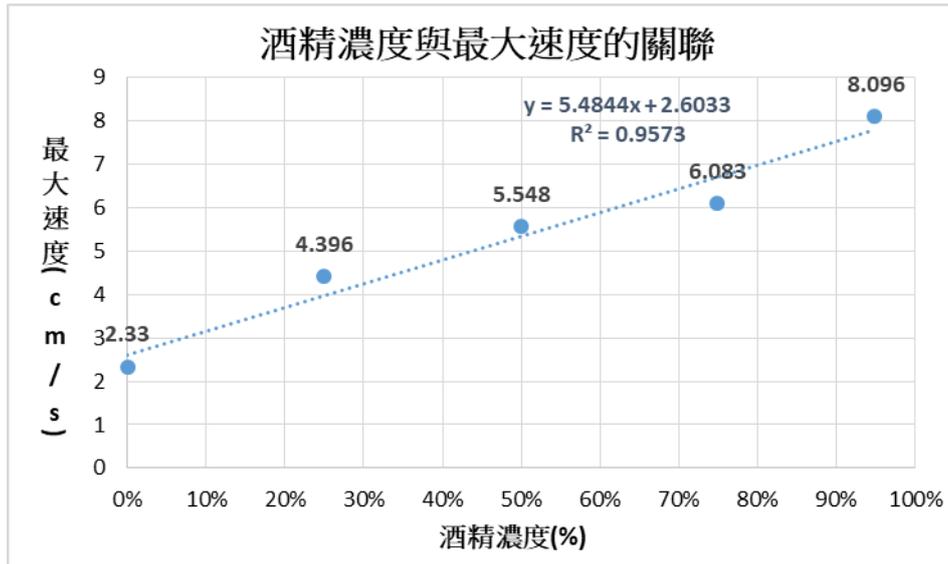


圖 26、酒精濃度與最大速度的關聯 (本圖由第二作者以 Excel 繪製)

(一)滴加的酒精濃度與模型的最大速度呈現線性正相關，由相關係數高達($R^2 = 0.9573$)可證明其準確度。

(二)酒精濃度越大，其表面張力梯度力越大，因此產生較大馬拉高尼流推進力，使的模型最大速度越大。

柒、 結論

- 一、 物體在液面上的承重與該物接觸液體的表面積呈現線性正相關。
- 二、 固定滴入的酒精濃度，則模型的最大速度與加速度與管徑呈現線性正相關。
- 三、 固定模型管徑，則模型的最大速度與滴加的酒精濃度呈現線性正相關。
- 四、 實驗三中讓酒精順著模型管道流出可使模型進行近似等加速度運動的狀態，隨著模型速度增加，阻力逐漸增加，故模型呈近似等速度運動。
- 五、 實驗四中沿著模型與水的交界處連續滴加酒精可使模型呈現加速度一直減少的變加速度運動；一停止滴加酒精，模型立刻行反向加速度一直下降的變加速度運動，由此可推測模型的主要動力來源為馬拉高尼流。

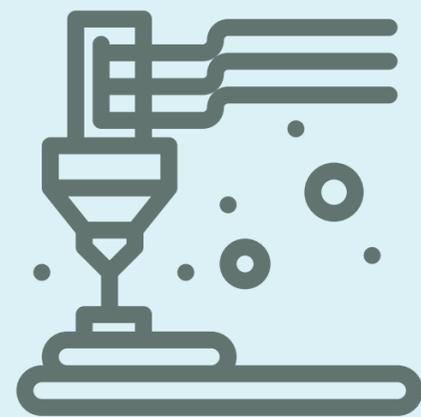
捌、 參考資料及其他

- 一、 高梓根(2019)。輕功水上漂 日本開發水黽型機器人利用表面張力原理，日本開發模仿水黽在水上移動的機器人。台灣英文新聞。
- 二、 吳尹傑、吳振華、洪鶴祐、林達(2004)。被忽略的神秘力量——表面張力。中華民國第四十四屆中小學科學展覽會。
- 三、 王怡婷(2005)。表面接觸腳介紹。國立陽明交通大學機構典藏。
- 四、 孫翠翠(翻譯)(2015)。學學水上漂：我們能在水面上行走嗎(組圖)。《科學世界》雜誌 2015 年第 1 期。
- 五、 陳良宇、陳雅芳、陳怡伶、徐品家(2009)。內標準校正氣相層析法分析稀釋液體中之酒精濃度
- 六、 Yunus A. Cengel, John M. Cimbala(2017).Fluid mechanics : fundamentals and application.McGraw-Hill Education.
- 七、 John W M Bush, David Hu(2005).Walking on water: Bioloocomotion at the interface.*Physics Today*.
- 八、 Mitchel Timm and Hassan Masoud(2021).Guest Blog: Why We Built a Bug Robot That Can Surf.Michigan Tech.
- 九、 Harvard University(2016).Jumping on Water: Robotic Water Strider.youtube.
- 十、 Ho-Young Kim, Ph.D.and Kyu Jin Cho, Ph.D.and Seoul National University and Harvard team(2015)Robotic insect mimics Nature’s extreme moves.Wyss Institute.

【評語】 051807

該作品以馬拉高尼效應為主題，深入探討了流體表面張力差異引起的流動現象，並展示了其在實際應用中的潛力。實驗設計精巧，團隊以3D 列印技術製造模型，探討與水接觸面積和不同種類的界面活性劑濃度的影響，且數據分析嚴謹，內容豐富。整體而言，該作品展示了參賽者的學術能力，如果能夠在應用方面加以說明，會是一個不錯的作品。

作品簡報



逆流而上...



馬拉高尼效應之探討與應用

壹、摘要

馬拉高尼效應是由於表面張力梯度力，在流體介面使表面張力小液體的往表面張力大的方向移動。本研究以馬拉高尼流作為小型水上機器人的動力，並藉由調整界面活性劑流出的方向與濃度控制模型移動。模型以Tinkercad軟體設計，並用3D列印機列印。研究旨在探討模型管徑與模型運動狀態之關係，和界面活性劑濃度與模型運動狀態及表面張力梯度力大小的關聯，並計算馬拉高尼流產生的表面張力梯度力。

貳、研究動機

在小船後端滴肥皂水，再把小船放到水面上，小船會前進；倒熱茶時，茶葉有時會逆流而上。我們很好奇為甚麼會有這些現象，深入探討後，發現是因為「馬拉高尼效應」的緣故。而後我們在網路上看到日本鈴木健司教授研發了可在水上漂浮並移動的小型仿水黽機器人。於是我們想設計一個以馬拉高尼流作為移動動力來源的小型水上機器人原型機，未來期望可應用在環境監測、教學、娛樂等用途。

參、研究目的

探討底板面積和不同界面活性劑濃度與底板承重的關係

探討模型孔徑大小與模型位移、速度、加速度之關係

探討界面活性劑濃度與模型位移、速度、加速度之關係

探討模型移動路程和表面張力梯度力的大小

肆、研究過程或方法

模型設計：

(一)模型結構

模型一(圖1、4) 模型二(圖2、5) 模型三(圖3、6)

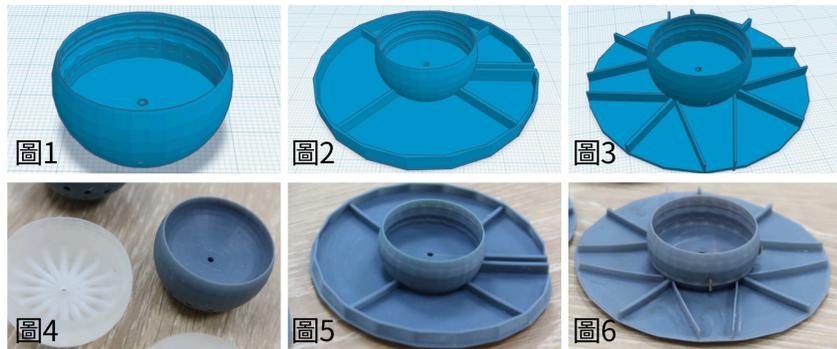


圖1、圖2、圖3由第一作者以Tinkercad軟體繪製

圖4、圖5、圖6由第一作者親自拍攝

(二)最終模型(模型三)規格

底板直徑：6.7 cm 容量：6.0 ml
容器直徑：3.0 cm 管徑：0.9、1.0、
總重量：6.6 g 1.2、1.5 mm

(三)奈米微結構銅線腳

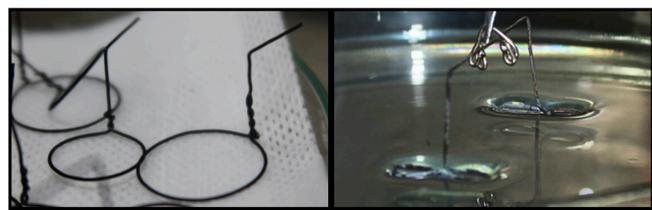


圖7(左)、圖8(右)由第一作者親自拍攝

實驗設計：

(一)承重測試

測量底面積不同的底版在不同濃度的肥皂水、酒精上的乘載重量。

(二)模型管徑與流率之關聯

測量不同管徑的模型中，清水流出的流率變化。

(三)模型管徑與模型運動型態之關聯

滴加酒精至不同管徑的模型容器內，觀察酒精接觸到水面後模型的運動狀態。以Tracker分析模型位移、速度、加速度。

(四)酒精濃度與模型運動狀態之關聯

將清水和不同濃度的酒精滴在模型與水面交界處，觀察模型運動型態。以Tracker分析模型位移、速度、加速度。

實驗中遇到的問題：

- 奈米微結構腳可承受的重量小，無法穩定支撐模型本體，因此將模型一更改為模型二。
- 模型二因溶液無法從模型流出去，且擋板無法起任何的作用，使水易沿著管道淹上來。因此將模型二改為模型三。
- 管徑過小時，3D列印機時常不夠精細，導致管徑堵塞，模型製作失敗率提升。
- 透明樹脂易塑型較難固化，灰色樹脂易固化但易碎。比較下，灰色樹脂為較佳的材料。

伍、研究結果與討論

一、介面活性劑濃度、底面積對承重的影響

(一) 底板總承重與底板底面積大致呈現**線性關係**。

(二) 肥皂水的表面張力比酒精小，在低濃度(10%)時承重急遽減少。

但隨著濃度增加，承重僅有些微減少，變化不大。

(三) 酒精的表面張力隨濃度變化較肥皂水平緩、規律。濃度10%時與水的承重相似，但濃度由10%升至25%間承重大幅減少，且**酒精濃度與其承重不呈現線性關係**。

承重與表面張力關係式：

$$mg = \gamma \cdot 4L \cos \theta \Rightarrow mg \propto \gamma$$

(γ :表面張力、 L :底板邊長、 θ :接觸角)

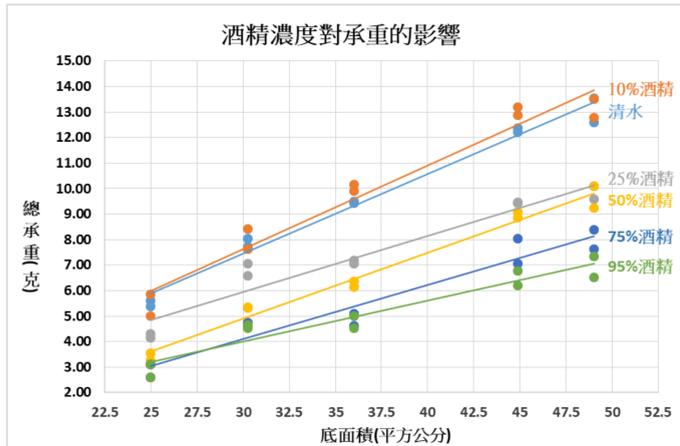


圖9、酒精濃度對承重的影響
(本圖由第二作者以Excel繪製)

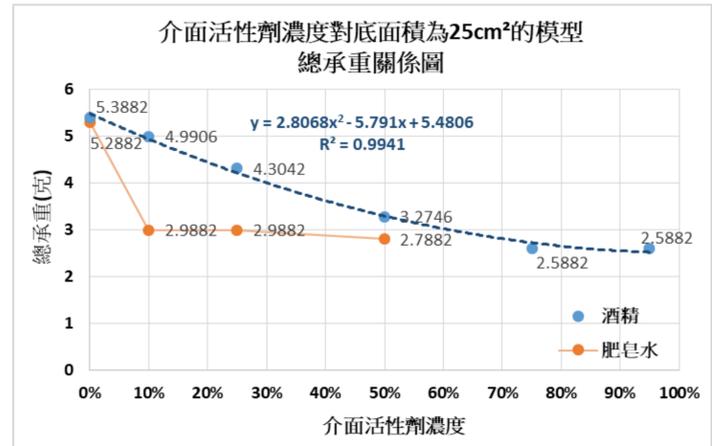


圖10、介面活性劑濃度對承重關係圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

二、模型管徑對運動型態的影響

(一) 酒精一接觸到水面時與水的表面張力差即為模型的推進力，當管徑愈大時造成的 $\Delta\gamma$ 愈大，且 $F = \Delta\gamma L \Rightarrow F \propto \Delta\gamma \propto a$ ，故**加速度與管徑呈正相關且有線性關係**。

(二) 在最大速度時模型做近似等速度運動，故 $F = f = k \times v_{max} = \Delta\gamma L \Rightarrow F \propto v_{max} \propto \Delta\gamma$ ，且管徑愈大時 $\Delta\gamma$ 愈大，故**模型最大速度與管徑成線性正相關**。
(F :合力、 $\Delta\gamma$:表面張力差、 a :加速度、 L :接觸長度、 f :阻力、 k :比例係數、 v_{max} :最大速度)

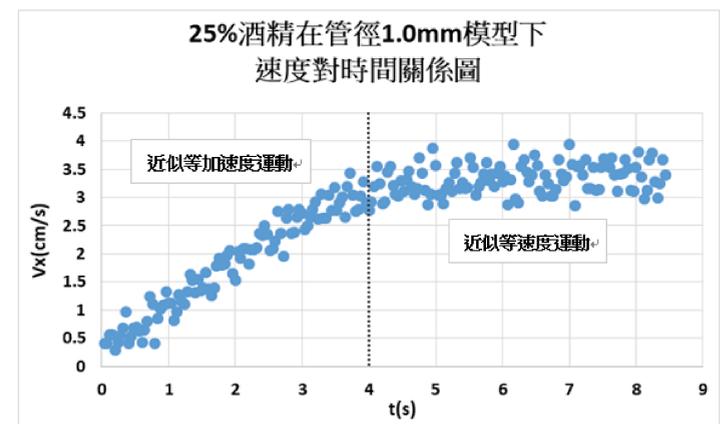


圖11、實驗三(改變模型管徑)中模型的運動狀態
(本圖由第二作者以Excel繪製)

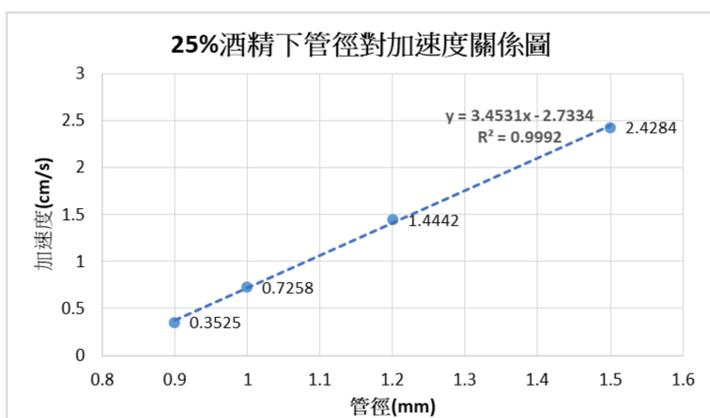


圖12、25%酒精下管徑對加速度關係圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

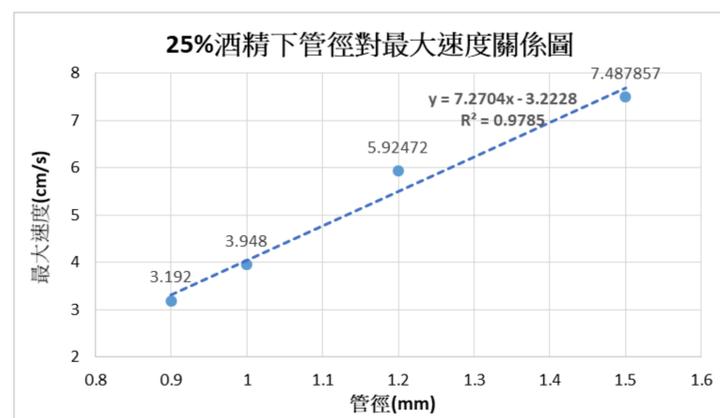


圖13、25%酒精下管徑對最大速度關係圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

三、酒精濃度對運動型態的影響

(一) 滴加酒精時，模型移動速度上升。停止滴入酒精後，速度便急遽下降。由此可推論**推動模型前進主力為馬拉高尼流**。

(二) 10%酒精速度變化量較小，幾乎與清水重疊，而其他濃度的酒精造成的速度變化較大。此結果對應酒精承重實驗--10%酒精跟水的承重相似，與水的表面張力相差不大，故馬拉高尼效應較不明顯；滴入25%~95%酒精的模型速度變化量較大，但彼此間相差不遠。

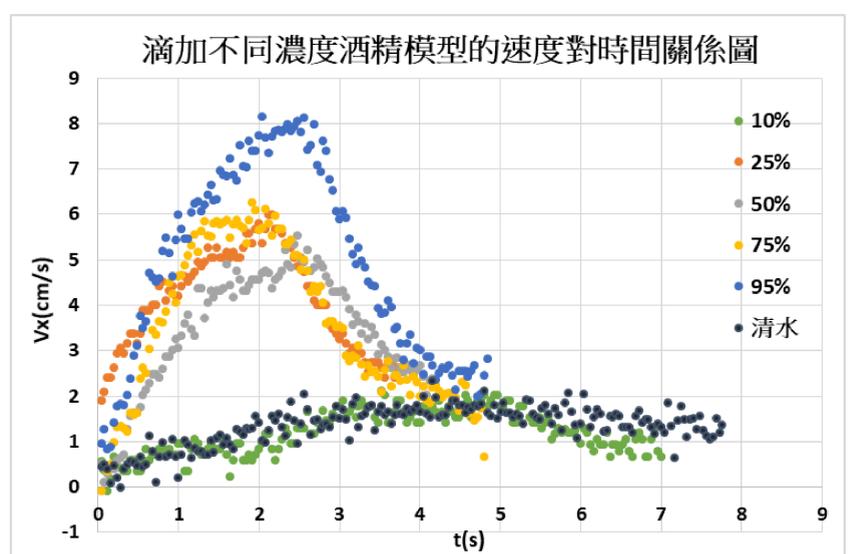


圖14、滴加不同濃度酒精速度對時間關係圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

四、實驗三、實驗四運動型態分析

(一)實驗三中讓酒精從模型中流出，酒精接觸水面瞬間產生馬拉高尼流推動模型前進，其中阻力 $f = kv$ 。由於速度極小，阻力可忽略，我們將前段運動狀態**近似等加速度運動**。隨模型中酒精減少， $F - kv = 0 = ma \Rightarrow a = 0$ ，模型**近似等速度運動**。

(二)實驗四將酒精滴在模型與水面交界處，瞬時濃度變化量較大。模型所受合力為 $F - f = F - kv = ma$ ，其中 m 固定， v 不斷上升，故模型呈**a一直下降的變加速度運動**。停止滴入酒精後，模型所受合力 $-kv = ma \Rightarrow kv = m(-a)$ ，其中 m 固定， v 不斷下降，模型呈**反向a持續下降的變加速度運動**。

(F:表面張力造成的力、f:阻力、k:比例係數、m:模型質量、v:速度、a:加速度)

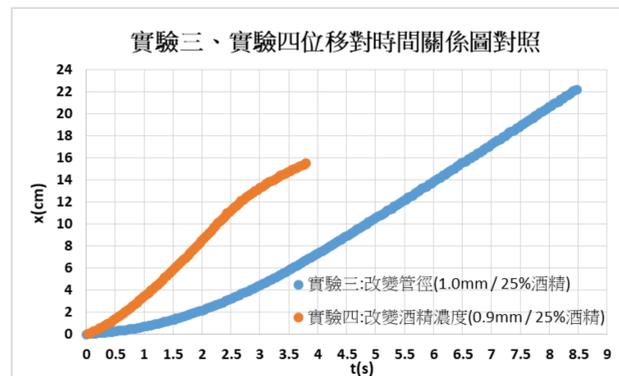


圖15、實驗三、實驗四位移對時間關係對照圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

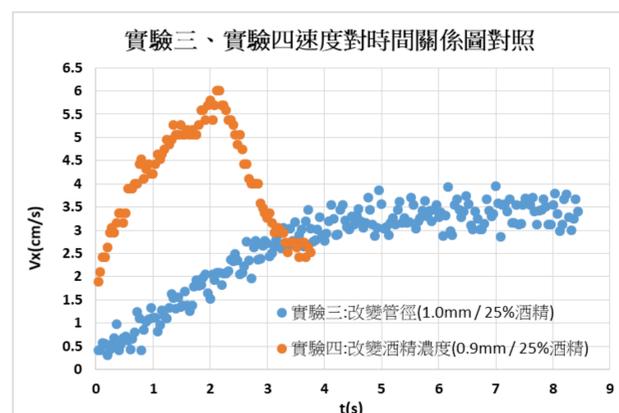


圖16、實驗三、實驗四速度對時間關係對照圖
(本圖由第二作者以Excel繪製)

陸、結論

- 一、物體在液面上的承重與該物接觸液體的表面積呈現線性正相關。
- 二、固定濃度滴入的酒精，模型最大速度和加速度與管徑呈線性正相關。
- 三、固定模型管徑，則模型的最大速度與酒精濃度呈高度正相關。
- 四、實驗三中讓酒精順著模型管道流出可使模型進行近似等加速度運動，隨著模型速度增加，阻力逐漸增加，故模型呈近似等速度運動。
- 五、實驗四中沿著模型與水的交界處連續滴加酒精可使模型呈現加速度一直減少的變加速度運動；一停止滴加酒精，模型立刻行反向加速度一直下降的變加速度運動，由此可推測模型的主要動力來源為馬拉高尼流。

柒、參考資料

- 1.高梓根(2019)。輕功水上漂 日本開發水黽型機器人利用表面張力原理，日本開發模仿水黽在水上移動的機器人。台灣英文新聞。
- 2.王怡婷(2005)。表面接觸腳介紹。國立陽明交通大學機構典藏。
- 3.陳良宇、陳雅芳、陳怡伶、徐品家(2009)。內標準校正氣相層析法分析稀釋液體中之酒精濃度
- 4.Yunus A. Cengel, John M. Cimbala(2017).Fluid mechanics : fundamentals and application.McGraw-Hill Education.
- 5.John W M Bush, David Hu(2005).Walking on water: Biocomotion at the interface.Physics Today.
- 6.Mitchel Timm and Hassan Masoud(2021).Guest Blog: Why We Built a Bug Robot That Can Surf.Michigan Tech.
- 7.Harvard University(2016).Jumping on Water: Robotic Water Strider.youtube.
- 8.Ho-Young Kim, Ph.D.and Kyu Jin Cho, Ph.D.and Seoul National University and Harvard team(2015)Robotic insect mimics Nature' s extreme moves.Wyss Institute.