

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080101

墨墨在舞動~探討以酒精驅動墨滴鋪展的物理現象

學校名稱： 高雄市左營區舊城國民小學

作者： 小六 洪睿廷 小六 張競仁	指導老師： 蕭妃茹 周采蓉
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞： 表面張力、馬倫哥尼效應、鋪展現象

墨墨在舞動~探討以酒精驅動墨滴鋪展的物理現象

摘要

本研究是探究以大豆沙拉油為基底相的開放系統中，酒精驅動書法墨滴鋪展的物理現象。透過鋪展面積倍率分析，發現以墨滴當鋪展相比其他顏料更適合，乙醇驅動墨滴鋪展的效果優於甲醇、丙醇及丁醇。基底相的高度會影響墨滴的鋪展倍率及鋪展現象的可重複性。0.054 公克的墨滴在油高 0.54cm，鋪展倍率最大，聚合效果最好。若油高超過墨滴的理論直徑時，控制墨滴重量在 0.031 公克，可使 2 公分高度落下的墨滴以花瓶狀懸掛在油面。驅動液酒精濃度越高，面積鋪展的倍率越明顯；可用酒精調整墨滴表面張力，使墨滴以碗狀懸掛油面，再以酒精驅動鋪展，若酒精墨水表面張力低於 31.1mN/m 以下，可產生自發性的鋪展現象。上述液體系統可設計成用來認識物理現象科學玩具。

關鍵詞：表面張力、馬倫哥尼效應、鋪展現象

壹、前言

一、研究動機

在一個偶然的機會中我們在大豆沙拉油中加入書法墨汁，再滴進酒精，結果看到墨滴在油上分分合合構成許多獨特的圖案（如圖 1-1，1-2，1-3），我們看了覺得很有趣，跟老師討論及上網找相關資料後，發現這好像與酒精墨水在油上產生馬倫哥尼效應的現象類似，這個新奇的物理原理對我們而言有些陌生，不過看著墨滴產生的獨特圖案，感覺很療癒，驅動了我們探究的好奇心，所以我們決定要來探究物理世界中深奧的原理，並利用這個有趣的液體組合設計出一款科學玩具，用來認識表面張力與表面積的關係、表面張力梯度、馬倫哥尼效應、普拉托瑞力不穩定性，以及液體會以最穩定狀態存在等等的物理現象。

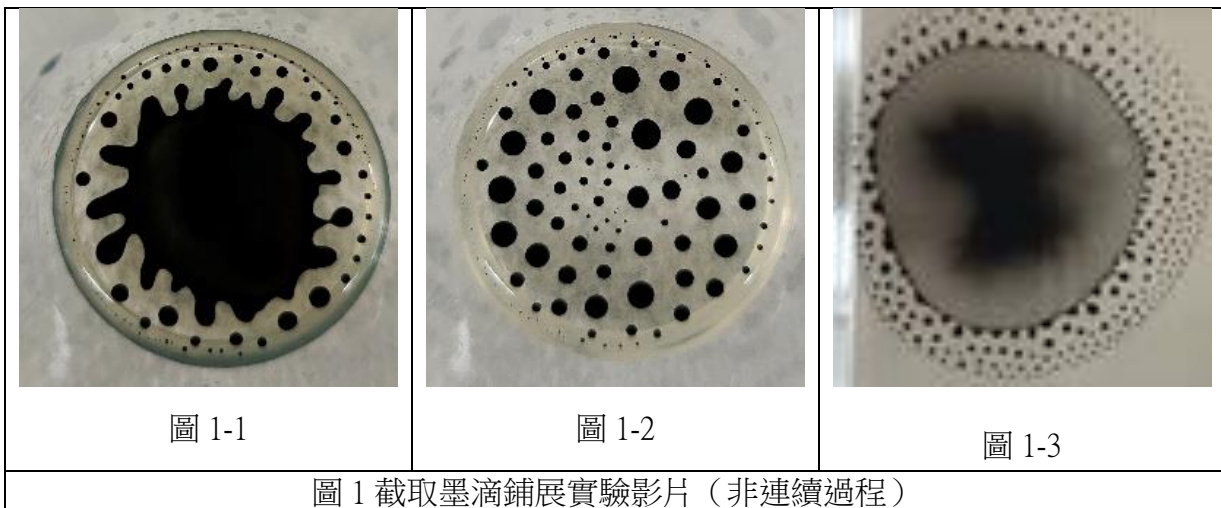


圖 1 截取墨滴鋪展實驗影片（非連續過程）

二、研究目的

- (一) 分析墨滴形狀與基底相油品高度的關係。
- (二) 探討墨滴、水性藍墨水及廣告顏料當鋪展相的鋪展效果差異性。
- (三) 探討不同醇類驅動墨滴鋪展的效果。
- (四) 探討如何控制墨滴重量使墨滴以花瓶狀懸掛油面下。
- (五) 設計科學玩具~舞動的墨滴盒。
- (六) 探討墨滴自發性鋪展的條件。

三、文獻探討

(一) 墨汁的成分

本研究所使用的墨水為書法書寫用之墨汁，墨汁的主要原料是煤煙、松煙、明膠等物質組成，黑煙是一種非晶質型態的碳元素，這些碳粒可透過天然膠或樹脂膠使它分散不沉澱。

(二) 表面張力

液體的內聚力是形成表面張力的原因，在液體內部，每個分子在每個方向都會受到鄰近分子的吸引力（也包括排斥力）。然而，在液體與氣體的分界面上的液體分子，在各個方向受到的引力是不均衡的（圖 2），造成表面層中的分子受到指向液體內部的吸引力，並且有一些分子被「拉」到液體內部。因此，液體會有縮小液面面積的趨勢，在宏觀上的表現即為表面張力現象。如果從能量的角度來說明表面張力，液體本體內分子相較之下是屬於較穩定的狀態，所以分子勢能較低，相反的，液體表面分子勢能較高，為達低能量的穩定狀態，表面分子有向液體內部移動的趨勢，所以液體的表面積會儘量減少。（維基百科）

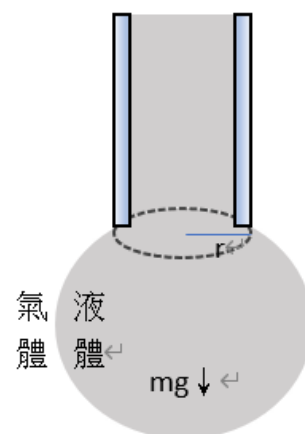
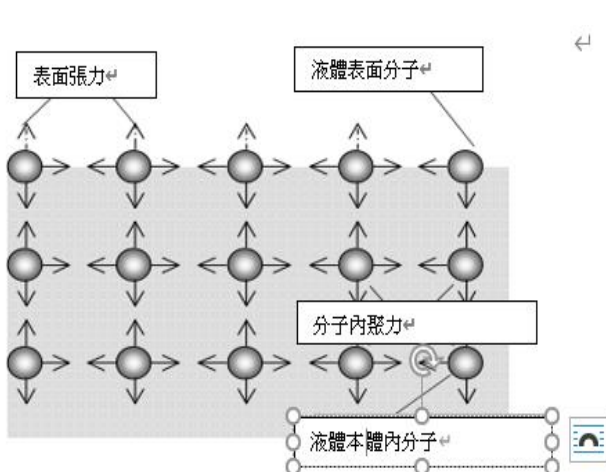


圖 2 【什麼是表面張力？】引自技術論文-南北潮商城

圖 3 懸滴法測量液體的表面張力（作者電腦繪製）
參考 <https://www.youtube.com/watch?v=qfBbNHXlrvw>

表面張力定義為液面上單位長度所受的平行表面、但垂直於欲測長度的拉力，單位：牛頓/公尺。有一種測量表面張力的方式稱為懸滴法（上頁圖 3），利用滴管滴出液滴懸掛在滴管口，測量滴管口的直徑，算出滴管口的周長（ $2\pi r$ ），及每顆液滴的重量（mg），表面張力= $mg/2\pi r$ 。

（三）瑞利泰勒不穩定性

在重力場中，當密度較大的液體壓在密度較小的液體上面時，它們邊界上一定波長的小擾動會發展成為不穩定的流動，即所謂瑞利泰勒不穩定性。要製造出液體系統的瑞利泰勒不穩定性，可利用物體對液面造成的單位長度重力小於液體表面張力即可以達成此現象。

（四）馬倫哥尼效應與普托瑞力不穩定性

義大利物理學家卡羅·馬倫哥尼在 1865 年論文中研究發表馬倫哥尼效應，他指出在流體介面中會因為表面張力梯度差異，而造成的傳質現象。也就是說當兩種液體互相接觸時，表面張力強的液體會將表面張力弱的液體拉過來，因此會出現表面張力弱的液體向強的方面滲透，舉例而言，若在墨滴中心位置滴入酒精，墨滴中心處的表面張力變小（圖 4-1），外圍處表面張力相對來說是較大的，墨滴會自發性產生向外鋪展流動（圖 4-2），即為馬倫哥尼效應，這些向外凸出的形狀具有不同的表面能，為了要維持最小表面能，墨滴會內縮，最終會使凸出的部分分裂為小液滴（圖 4-3），此狀態即為普托瑞力不穩定性。（維基百科），故本研究中以指狀邊界及細小的液滴做為發生馬倫哥尼效應的依據。

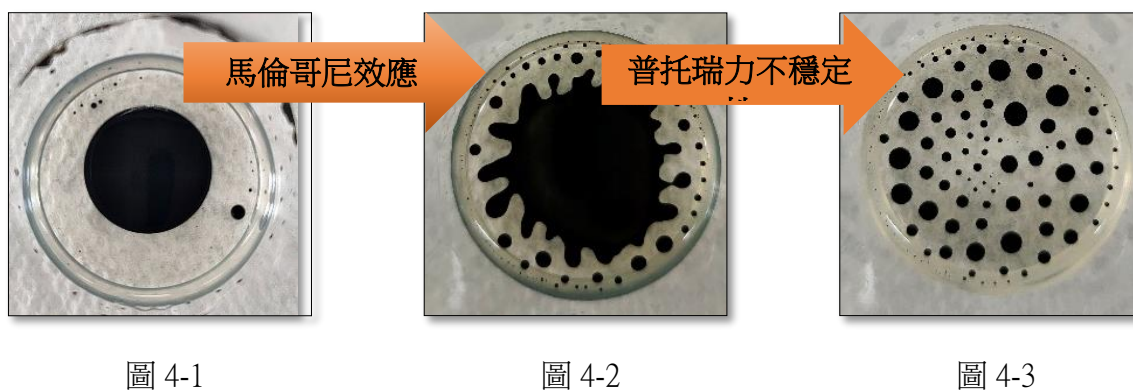


圖 4 墨滴鋪展歷程實驗照片（由作者拍攝）

四、相關研究內容分析

- (一) 【基於 Marangoni 效應的液-液驅動鋪展過程】 赵文景等人 (2021) 物理学报
- 1、研究在液體基底上，低表面張力的液體對另一液體的驅動情形，用來理解 Marangoni 效應在自發驅動體系中的作用。
 - 2、透過高速攝影機拍照及影象軟體的分析，探討以十二烷基硫酸鈉為基底相，正十六烷為鋪展相，矽油為驅動液的液體系統，分析其鋪展的過程。
- (二) 【液滴爆炸】 伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛《62 屆全國科展高中組 物理與天文學科》
- 1、探討酒精水溶液在油品上的分裂情形。
 - 2、分析液滴分裂的過程，將酒精液滴在油品上的移動分成 4 個不同原因造成的階段，包括重力使液滴呈扁平狀、第二階段為濃度梯度造成的馬倫哥尼效應，第三階段是指不同形狀的液滴產生的不同表面能，產生指狀邊界，最終分裂為細小液滴，產生一種名為普托瑞力不穩定性的現象。
 - 3、以 Tracker 軟體測量液滴的擴散半徑、液滴大小及反應時間。探討酒精濃度、酒精體積及油的厚度對液滴分裂的影響。
- (三) 【醇醇欲動滑油滋-利用馬蘭戈尼作用探討苦茶油純不純】 張玉燕、廖宥婷《63 屆全國科展 國中組 化學科》
- 1、探討八種油品及丙醇、酒精的液滴擴散實驗，發現丙醇擴散速度太快，所以選用酒精進行液滴擴散實驗。
 - 2、以不同濃度的酒精在油面上進行擴散實驗，結果發現不同濃度的酒精搭配不同油品，造成的擴散效果不同。有些會擴散，有些不會。
 - 3、發現 85% 的染色酒精可以判斷苦茶油的濃度是否達 94% 以上。
- (四) 【液滴開花】 《63 屆高雄市科展 國小組物理科》
- 1、找出在芥花油、亞麻仁油和椰子油上產生液滴開花效果最明顯的酒精濃度。
 - 2、分析液滴開花的動態過程。
 - 3、確認馬倫哥尼效應是因為酒精與蔬菜油兩種不相溶的液體表面張力相近，同時上方的酒精溶液揮發性極強而導致酒精濃度下降、表面張力增加造成液滴開花的效果。

(五) 【樹突狀圖形的生長機制與影響變因】《63 屆高雄市科展 高中組物理與天文學科》

- 1、在壓克力板上塗上廣告顏料薄層，滴入酒精，以相機進行錄影，觀察分析樹突狀圖形的生長機制。
- 2、研究發現樹突狀圖形的生長會經歷兩個階段，首先是馬倫戈尼效應造成的擴張現象，使液滴往外擴張，再來是樹突狀圖形的生長。

表 1 各篇文獻中液體系統中基底相、鋪展相、驅動液整理

成份 系統組成 文獻名稱	基底相	鋪展相	驅動液
【基於 Marangoni 效應的液-液驅動鋪展過程】	十二烷基硫酸鈉	正十六烷	矽油
【液滴爆炸】	大豆沙拉油	酒精墨水	無
【醇醇欲動滑油滋-利用馬蘭戈尼作用探討苦茶油純不純】	不同的油品	酒精顏料 丙二醇顏料	無
【液滴開花】	不同蔬菜油	酒精色素	無
【樹突狀圖形的生長機制與影響變因】	壓克力板	壓克力顏料	酒精
本研究【墨墨在舞動】	大豆沙拉油	書法墨汁	酒精

由表 1 資料發現基底相可以是固相或液相，大部份研究都以酒精混合少量顏料做為鋪展相，一旦鋪展出去的酒精揮發，剩餘的少量顏料無法使鋪展現象再次呈現；另外驅動液可分為具有揮發性的酒精及不具揮發性的矽油，不具揮發性的驅動液驅動後，因鋪展相表面張力減弱，鋪展相無法再聚合，所以整個鋪展過程不可重覆。本研究以高表面張力之墨滴為鋪展相，具揮發性酒精為驅動液，驅動液揮發，鋪展相可再次聚合為初始墨滴，再次加入驅動液即可再發生鋪展，此系統的鋪展現象具有重覆性。

貳、研究材料及軟體

一、實驗材料

吳竹墨汁、大豆沙拉油、水性藍色墨水、廣告顏料、甲醇、乙醇、丙醇、丁醇、DLAB 微量吸管 20-200 μ L、塑膠滴管、塑膠安全吸球，0.1mL 微量玻璃吸管、培養皿、專業型高精度電子天平

二、分析軟體

- (一) 軟體 Tracker (二) 軟體 ImageJ

參、研究過程與方法

一、研究發想與架構

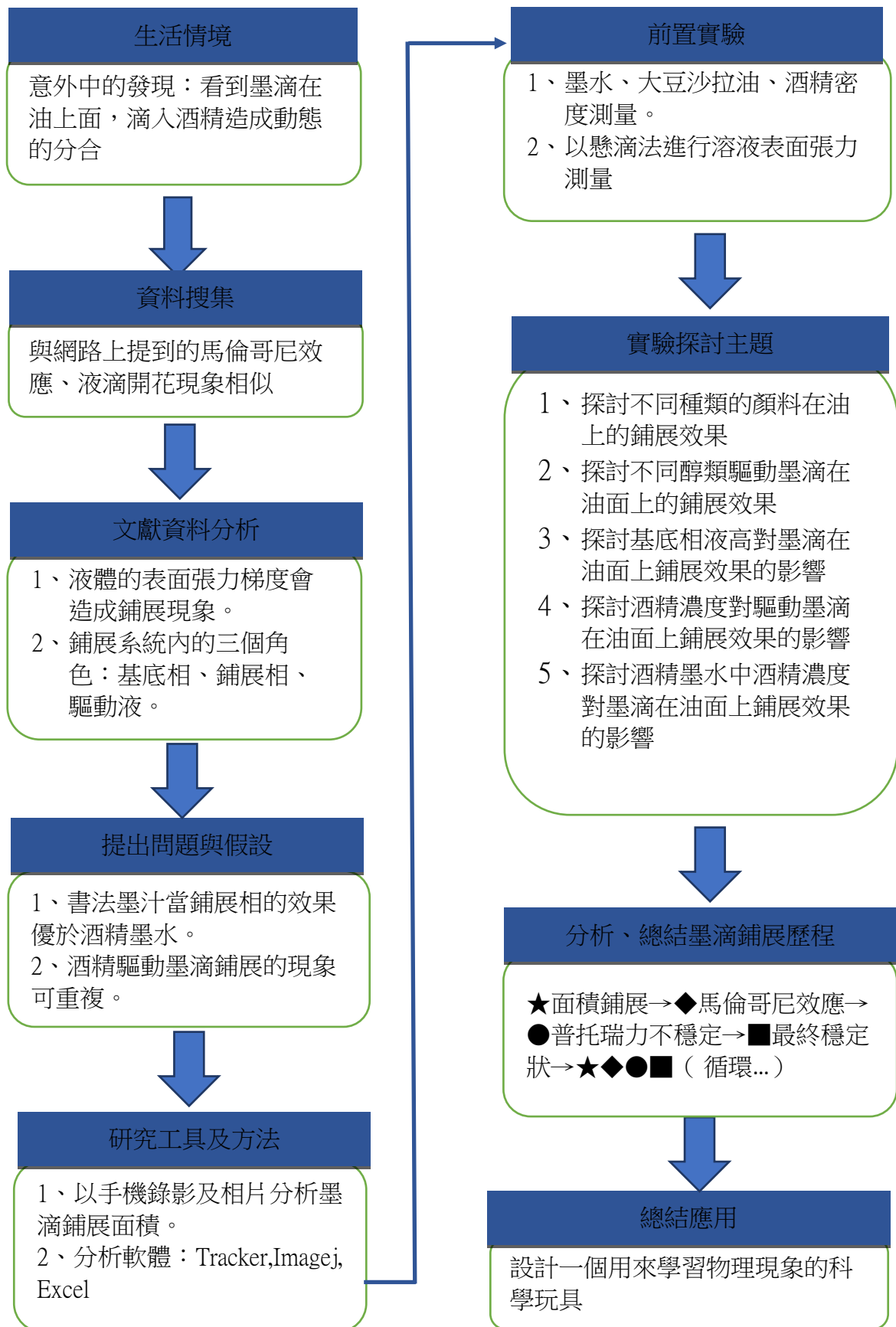


圖 5 研究發想與架構圖

二、名詞解釋

- (一) **鋪展**：液體在另外一種不互溶的液體表面自動展開成膜的過程，狹義來說就是面積的擴展。（百度百科）
- (二) **初始液滴**：一開始滴入油品的墨滴或酒精墨滴。
- (三) **指狀邊界**：參考【液滴爆炸】作品中提到因馬倫哥尼效應，鋪展出去的液滴，以減小面積的方式維持最小的表面位能，所以原本平滑的邊界會變為指狀邊界（圖 6）。

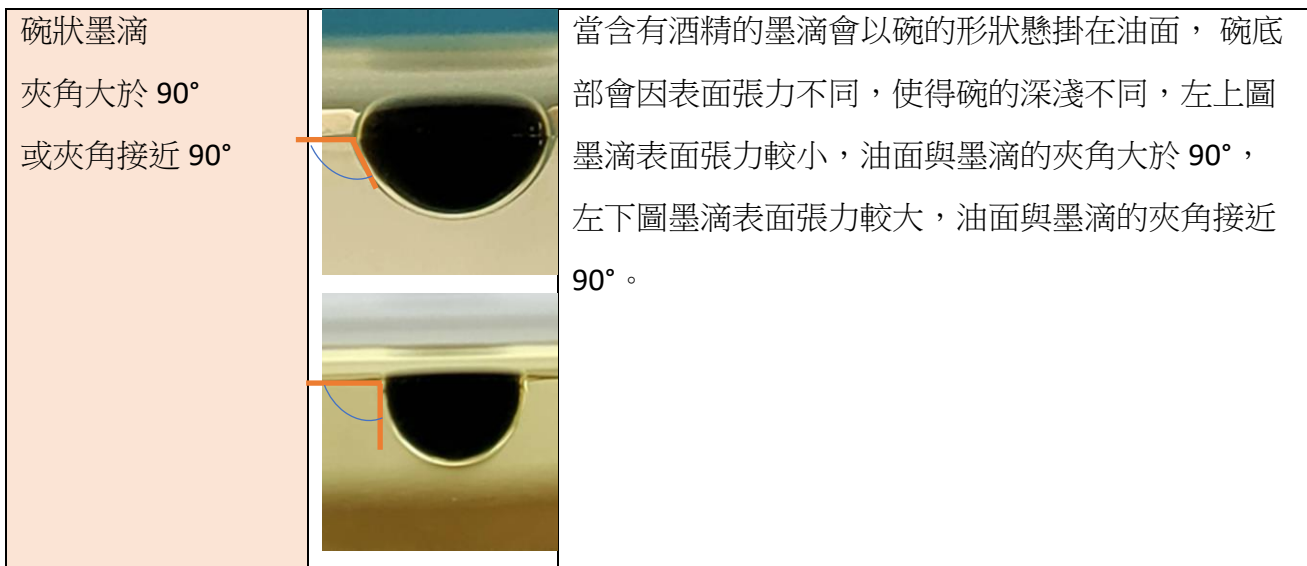


圖 6 指狀邊界

- (四) **鋪展倍率**：鋪展後面積/初始液滴面積，比值大於 1 且數值越大時，代表面積鋪展程度，若比值小於 1，代表有物質未聚合回液滴中或是液滴太細小，計算面積的軟體無法辨認。
- (五) **墨滴的形狀命名**：墨滴的密度比大豆沙拉油大，而且墨滴與油不互溶，所以在正常狀態下，密度大的墨汁應該沉入油底，但透過側面照的圖片分析歸納，依墨滴與油面的夾角可分出四種不同墨滴形狀，我們依形狀予以命名，分別為**球狀墨滴**、**透鏡狀墨滴**、**花瓶狀墨滴**、**碗狀墨滴**，詳細說明如表 2：

表 2 墨滴形狀說明

墨滴與油面的夾角	墨滴圖片	說明
球狀墨滴 無夾角		當油品高度大於墨滴直徑時，墨滴受重力影響，且墨滴密度比油大，故沉到油底。此時墨滴內分子內聚力大，墨滴以球狀存在。
透鏡狀墨滴 小於 90° (底部扁平)		當油品高度小於墨滴最穩定狀態直徑時，墨滴為保持較小表面積狀態，會以透鏡狀保持在油面下方。
花瓶狀墨滴 小於 90°		當滴入的墨滴重量小於大豆沙拉油的表面張力時，墨滴會懸掛在油面，側面圖如左圖，形狀類似花瓶的形狀，瓶口位於油面上方，瓶頸及瓶身在油面下。



肆、研究步驟與結果

實驗一：實驗溶液基礎物理特性的測量

密度測量：

【實驗步驟】：

1、以微量滴管吸取 $200\ \mu\text{L}$ 的液體，以電子天平秤量液體質量，利用質量 \div 體積計算出液體密度，每種液體進行 10 次測量，求平均密度 (g/cm^3)。

【結果】：

表 3 大豆沙拉油、墨汁、95%的酒精之密度 (N=10)

質量 次數	大豆沙拉油	墨汁	95%酒精
200 μL 的平均質量 (g)	0.18	0.20	0.17
平均密度 (g/cm^3)	0.89	1.02	0.84

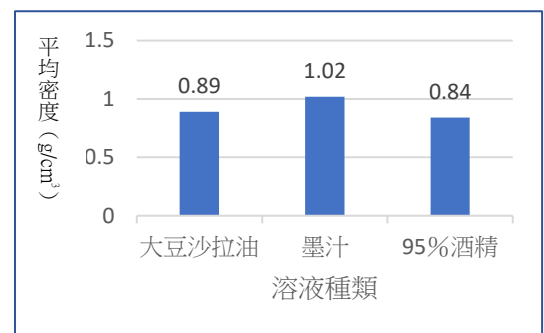


圖 7 大豆沙拉油、墨汁、95%的酒精之密度

懸滴法測量表面張力

【實驗步驟】：

1、測量滴管的直徑：將滴管沾取墨汁後，不斷的在宣紙上蓋印，即可得到滴管口徑的印痕，配合比例尺拍照後，換算滴管口的直徑。

2、以滴管滴入 60 滴液體，稱量 60 滴液體的質量，利用懸滴法計算出液體的表面張力。

【結果】：

1、滴管口直徑：0.002m，周長=0.0068m

2、液滴平均質量及表面張力

表面張力=滴液平均質量 (kg) *9.8/滴管口周長 (m)

表 4 大豆沙拉油、墨汁、95%的酒精之表面張力 (N=60)

質量及表面張力 項目	大豆 沙拉油	墨汁	95% 酒精
滴液平均質量 (g)	0.030	0.054	0.017
表面張力 mN/m	43.4	54.0	23.9

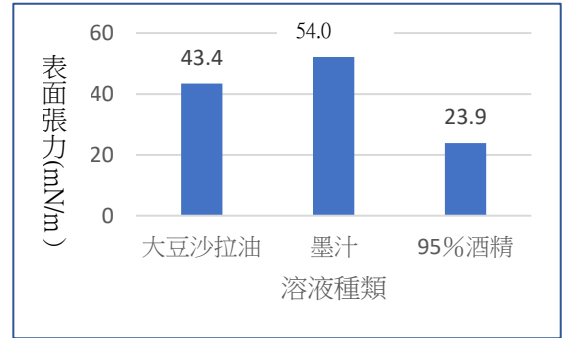


圖 8 大豆沙拉油、墨汁、95%的酒精之表面張力

表 5 不同濃度酒精的表面張力 (N=60)

質量及 張力 項目	95% 酒精	76% 酒精	66.3% 酒精
滴液平均質量 (g)	0.017	0.021	0.022
表面張力 (mN/m)	23.9	29.6	31.6

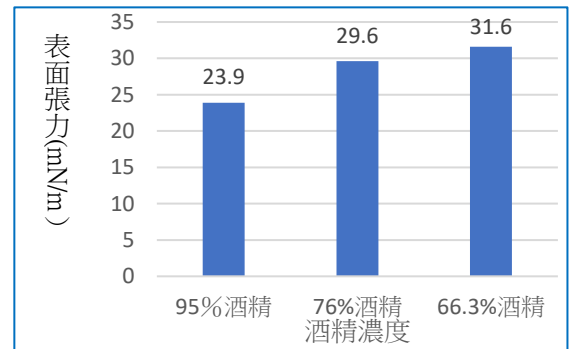


圖 9 不同濃度酒精的表面張力

表 6 不同酒精濃度之酒精墨水的表面張力 (N=60)

酒精墨水之 酒精濃度	75% 酒精墨水	66.6%酒 精墨水	50% 酒精墨水	33.3% 酒精墨水
滴液平均質量 (g)	0.02	0.022	0.023	0.028
表面張力 (mN/m)	28.9	31.1	33.7	40.0

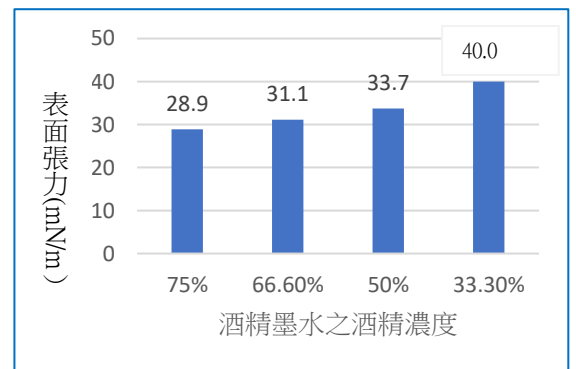


圖 10 不同酒精濃度之酒精墨水的表面張力

【小結】：

1、密度的關係：墨汁 > 大豆沙拉油 > 95%酒精。

2、表面張力大小關係為墨汁 > 大豆沙拉油 > 95%酒精。

3、酒精濃度越高，表面張力越大。

4、墨水與酒精混合會使墨汁的表面張力減小，酒精濃度越高，墨汁的表面張力越小。

實驗二：探討不同種類的顏料在大豆沙拉油上鋪展效果

【前言】：

由文獻分析中發現多篇的研究中使用的酒精為鋪展液，顏料功能都只是讓酒精的鋪展更容易觀察。本研究欲以墨汁為鋪展液，若改其他顏料為鋪展物質時，此液體系統產生的現象有何差異？所以我們將實驗影片透過電腦軟體分析時間與液滴鋪展面積倍率關係圖，探討不同顏料在大豆沙拉油上，經酒精驅動後產生的鋪展現象分析。

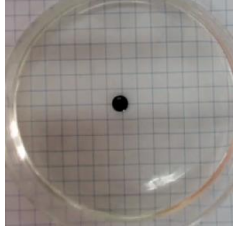
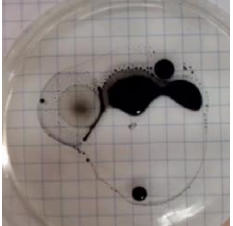
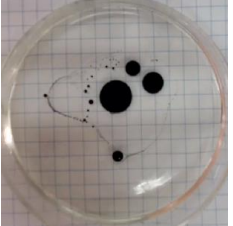
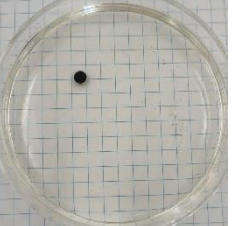
【實驗步驟】：

- 1、在直徑為 7.3cm 的培養皿中倒入 12 公克的大豆沙拉油（油品高度 0.32cm），以滴管吸取 1 滴顏料，滴入培養皿中央。
- 2、以微量滴管吸取 0.1mL 95%的酒精，滴入在液滴中心，以手機錄製鋪展過程。
- 3、以軟體 Tracker 截取滴入酒精後液滴圖片，透過軟體 ImageJ 分析墨滴鋪展過程中的面積。
- 4、以 Excel 軟體計算出鋪展倍率，每種顏料進行三次實驗，並繪製時間與面積鋪展平均倍率之關係圖。


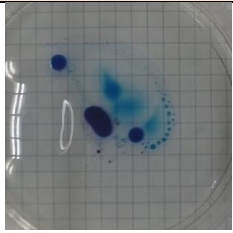
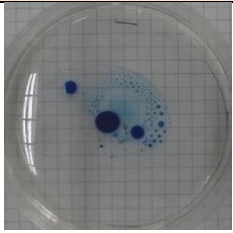
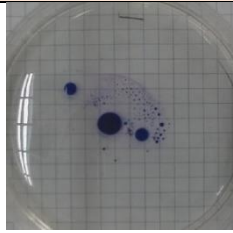
註：因面積鋪展到最大值發生在 10 秒內，故時間 1-10 秒間每秒一張，接下來為了解聚合狀態，10 秒後每 5 秒一張，直到 60 秒，再取靜置後最終墨滴。

【結果】：

1、書法墨水

鋪展時間 照片、說明	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	鋪展後 600 秒
照 片				
說 明	鋪展後分裂成 3 顆較大的液滴，靜置後聚合為一個液滴。			

2、水性藍墨水

鋪展時間 照片、說明	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	鋪展後 600 秒
照 片				
說 明	鋪展時出現 3 個較大液滴，周圍有淺藍色小液滴，鋪展後 600 秒則是有紅色小液滴漂散在外。			

3、廣告顏料

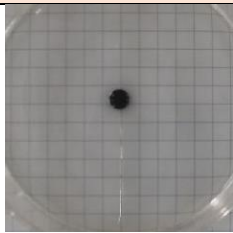
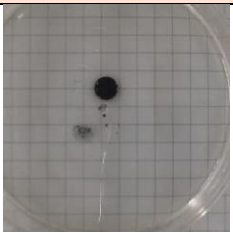
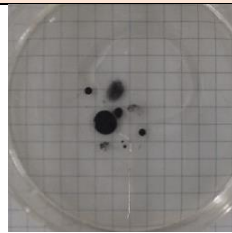
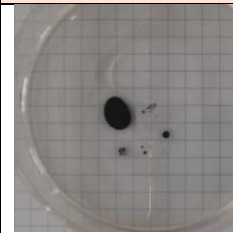
鋪展時間 照片、說明	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	鋪展後 600 秒
照 片				
說 明	鋪展後出現一個較大的主液滴，及數顆小液滴，無法完全聚合為一顆。			

表 7 不同顏料鋪展時間與面積鋪展平均倍率 (N=3)

鋪展時間 (秒)	書法墨水	水性 藍墨水	廣告顏料
0	1.00	1.00	1.00
1	12.25	3.04	4.43
2	12.26	2.86	4.93
3	12.41	2.84	4.40
4	12.58	2.58	3.43
5	13.90	2.48	3.25
6	15.15	2.44	3.23
7	15.11	2.42	3.10
8	16.05	2.41	3.08
9	13.73	2.41	3.04
10	11.81	2.40	2.43
15	8.14	2.41	2.62
20	8.25	1.80	2.46
25	4.22	1.83	2.24
30	2.66	1.66	2.24
35	2.66	1.75	2.09

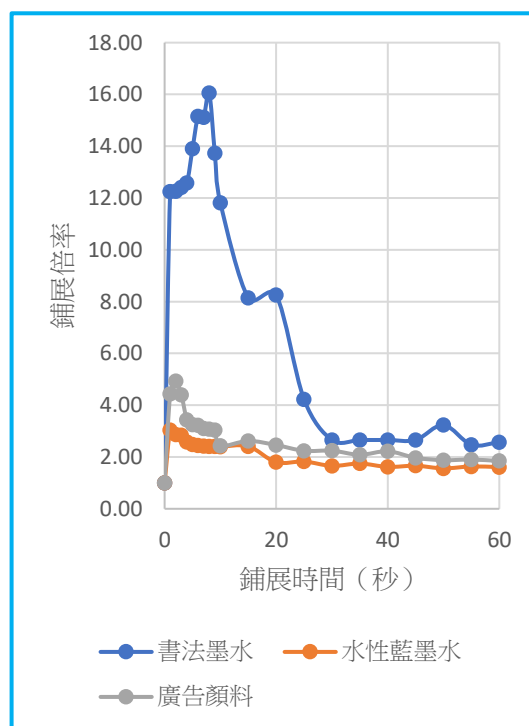


圖 11 不同顏料鋪展時間與面積鋪展平均倍率之曲線

40	2.66	1.62	2.22
45	2.66	1.66	1.97
50	3.24	1.56	1.88
55	2.57	1.64	1.90
60	2.47	1.61	1.85

【小結】：

- 1、由鋪展時間與鋪展倍率的關係圖可以發現書法墨水的鋪展倍率最高，水性藍墨水的鋪展倍率最低。
- 2、由曲線的走向可知，墨滴在大豆沙拉油上鋪展與聚合效果最明顯，水性藍墨水最不明顯。
- 3、由實驗中發現水性藍色墨汁和廣告顏料鋪展至最大面積的時間均在 5 秒內，鋪後 10 秒，其鋪展倍率變動較小，書法墨汁鋪展面積倍率高，且有明顯的鋪展與聚合的現象，適合用來觀察鋪展過程的物理變化。

實驗三：探討不同醇類驅動墨滴在油面上鋪展效果

【前言】：

由實驗一可知以書法墨汁當鋪展相優於其他顏料，以下實驗都以墨汁為鋪展相，接著探討何種醇類適合用來驅動墨滴產生鋪展現象？所以我們探討不同醇類對墨滴在油面上鋪展情形。

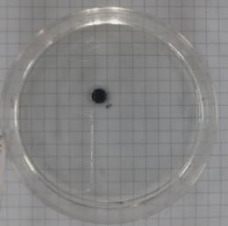
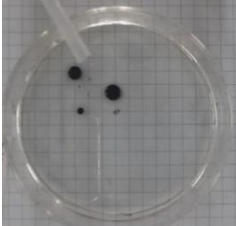
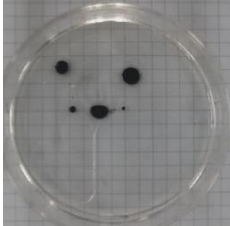
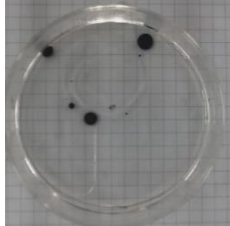
【實驗步驟】：

- 1、在直徑為 7.3cm 的培養皿中倒入 12 公克的大豆沙拉油（油品高度 0.32cm），以滴管吸取 1 滴墨滴，滴入培養皿中央。
- 2、以微量滴管吸取 0.1mL 的醇類（甲醇、乙醇、丙醇、丁醇），滴在液滴中心，以手機錄製鋪展過程。
- 3、以軟體 Tracker 截取滴入酒精後液滴圖片（時間 1-10 秒每秒一張，15 秒後每 5 秒一張），再透過軟體 ImageJ 分析墨滴鋪展過程中的面積。
- 4、以 Excel 軟體計算出鋪展倍率，每種醇類進行 3 次實驗，並繪製時間與平均面積鋪展倍率之關係圖。

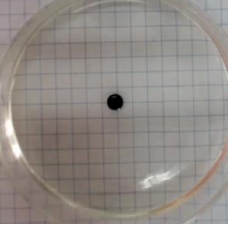
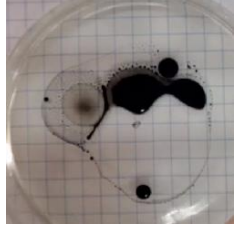
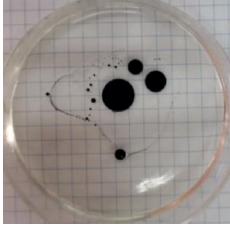

註：因醇類驅動鋪展時，面積鋪展到最大值發生在 10 秒內，故時間 1-10 秒間每秒一張，接下來為了解聚合狀態，10 秒後每 5 秒一張，直到 60 秒，再取靜置後最終墨滴。

【結果】：

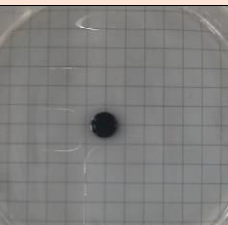
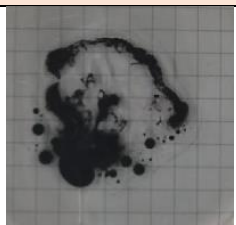
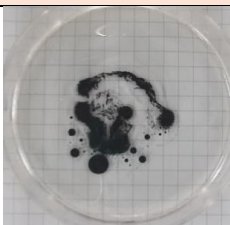
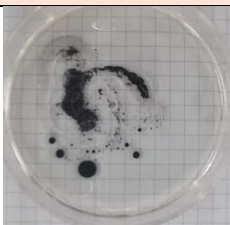
1、 甲醇

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	靜置後
照 片				

2、 乙醇

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	靜置後
照 片				

3、 丙醇

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	靜置後
照 片				

4、 丁醇

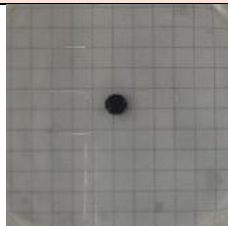
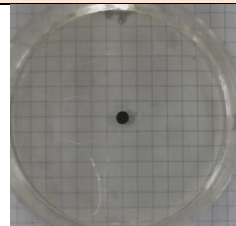

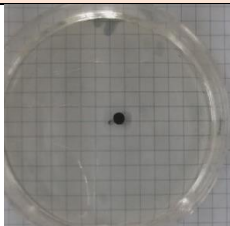
鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	靜置後
照 片				

表 8 不同醇類鋪展時間與面積鋪展平均倍率 (N=3)

醇類 鋪展 時間 (秒)	甲醇	乙醇	丙醇	丁醇
0	1.00	1.00	1.00	1.00
5	2.25	16.78	15.89	1.01
10	1.73	14.04	15.09	1.18
15	2.02	8.14	17.44	1.16
20	2.72	8.25	17.02	1.08
25	2.84	4.22	14.72	1.18
30	2.40	2.66	13.83	1.74
35	2.31	2.66	11.84	1.43
40	2.05	2.66	9.52	1.39
45	-	2.66	7.82	1.33
50	-	3.24	7.59	1.28
55	-	2.47	-	1.29
60	-	2.57	-	1.13

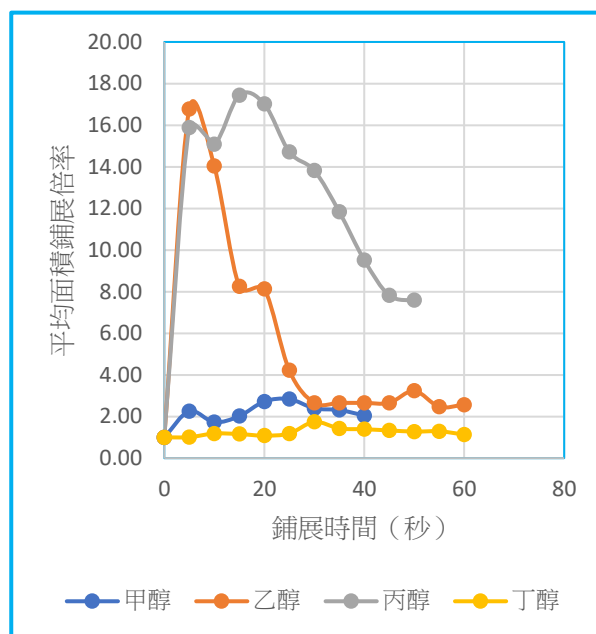


圖 12 不同醇類鋪展時間與平均鋪展倍率曲線

【小結】：

- 1、以 0.1mL 醇類驅動墨滴鋪展，面積鋪展的最高倍率大小依序為丙醇 > 乙醇 > 甲醇 > 丁醇。
- 2、從鋪展穩定性來說，丙醇在 20 秒內，面積會由小變大後，再縮小，再變大又再縮小；乙醇 10 秒內面積由小鋪展變大後，就開始變小，30 秒後面積的變化就不是很明顯了，顯示丙醇鋪展變化穩定性較小，乙醇面積鋪展穩定性較高。
- 3、丁醇的表面張力較其他 3 種醇類大，丁醇驅動墨滴鋪展的效果較差。

實驗四：探討基底相液高度對墨滴在油面上鋪展效果的影響

【前言】：

在趙文景等人文獻中提到基底層的厚薄程度會影響到鋪展效果，本研究想了解大豆沙拉油油品高度對墨滴（平均質量為 0.054g）鋪展現象有何影響？

【實驗步驟】：

- 1、在直徑為 7.3cm 的培養皿中分別倒入不同質量的大豆沙拉油（密度為 0.89g/cm³），換算油品高度（H）。

表 9 油品質量與油品高度換算表

油品質量 (g)	體積 (cm ³)	油品高度 (cm)
4	4.49	0.11
8	8.99	0.21
10	11.24	0.27
12	13.48	0.32
14	15.73	0.38
16	17.98	0.43
20	22.47	0.54
24	26.97	0.64
28	31.46	0.75

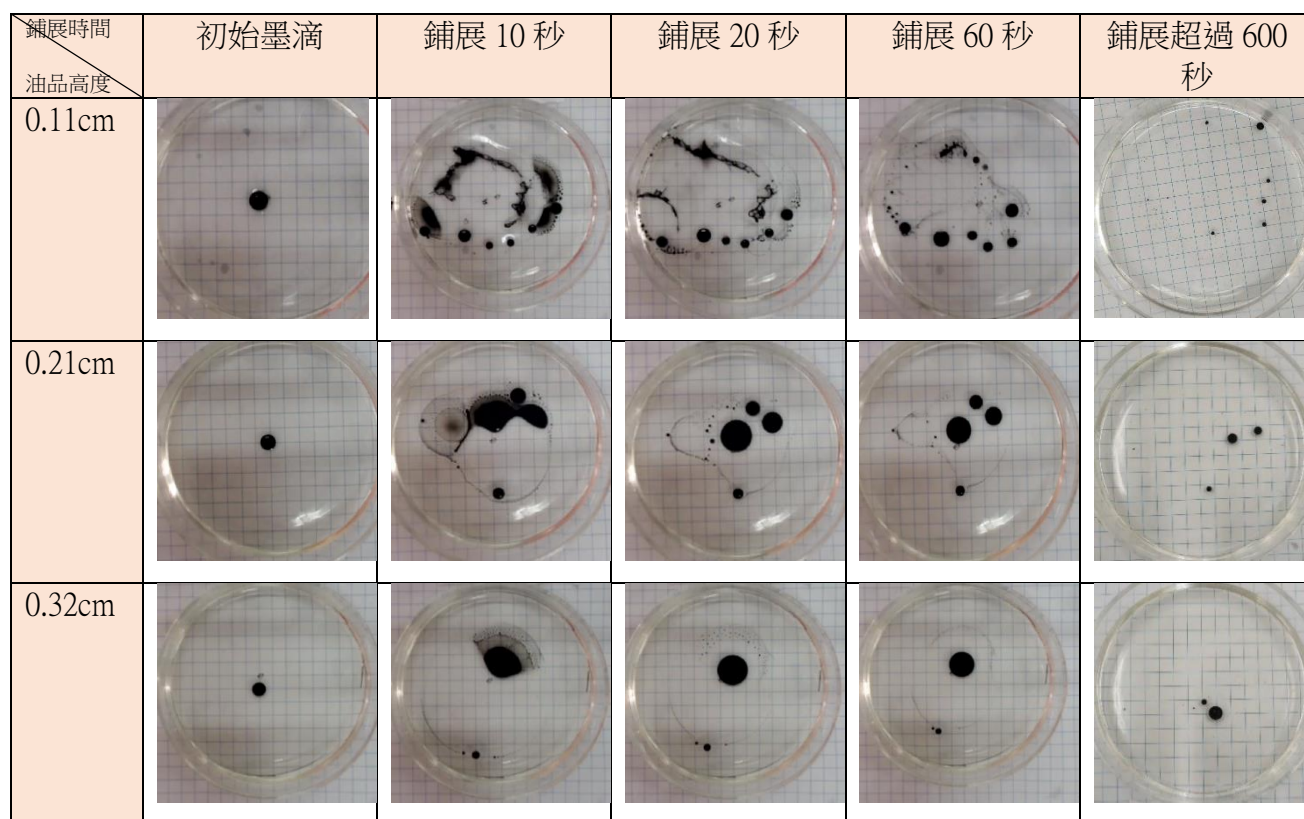
2、以滴管吸取 1 滴墨滴（平均重量為 0.054g，換算墨滴理論半徑 R 為 0.233cm，直徑 2R 約 0.47cm），滴入培養皿中央。

3、以微量滴管吸取 0.1mL 95%的酒精，滴在液滴中心，以手機錄製鋪展過程。

4、以軟體 Tracker 截取滴入酒精後液滴圖片（時間每 5 秒一張），再透過軟體 ImageJ 分析墨滴鋪展過程中的面積。

5、以 Excel 軟體計算出鋪展倍率，並繪製時間與面積鋪展倍率平均值之關係圖。

【結果】：



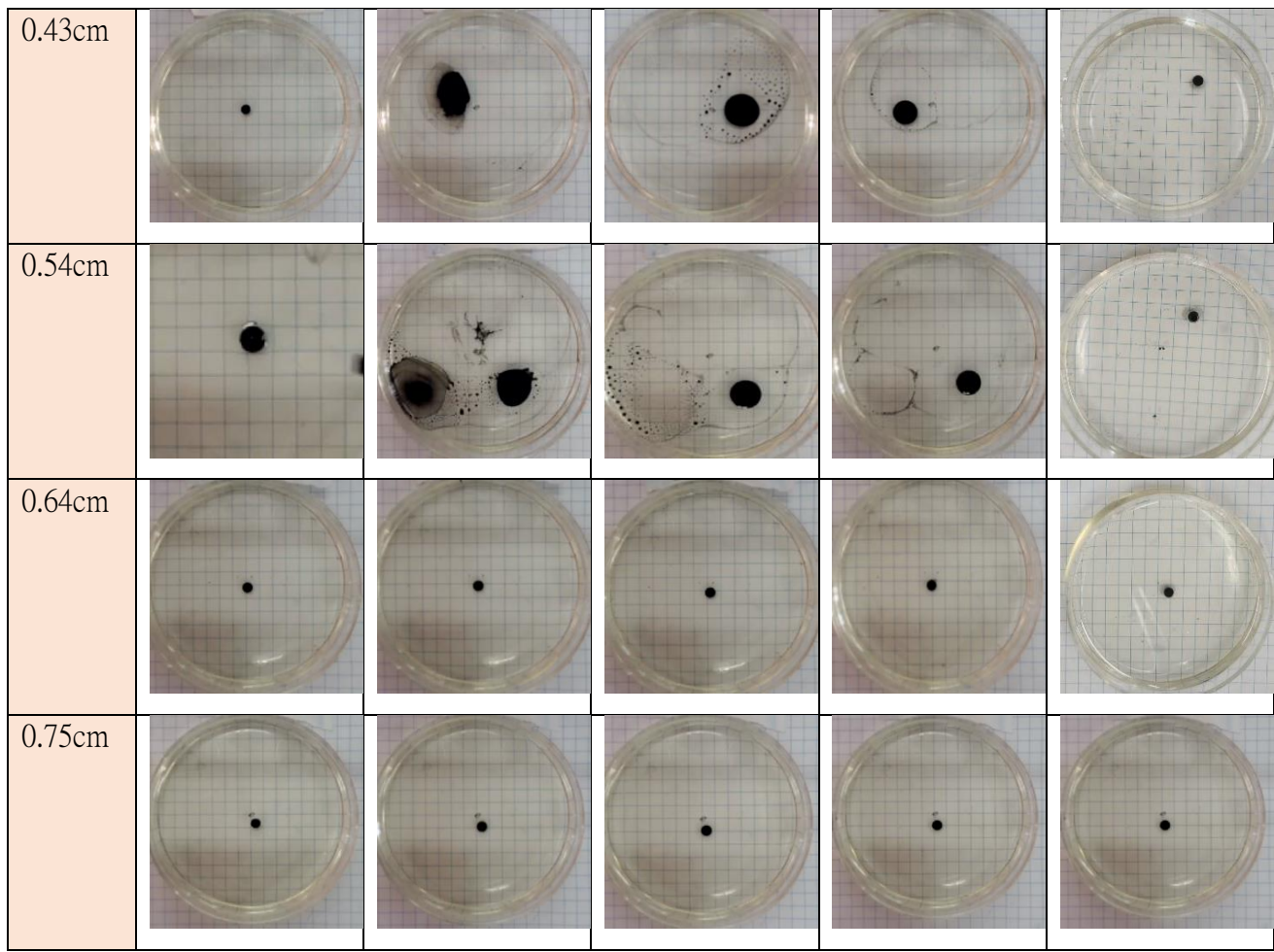


表 10 不同油品高度墨滴側面圖（圖片右側黑線段為比例尺 0.5cm）

油品高度	0.11cm	0.21cm	0.32m	0.43m	0.54cm	0.64cm	0.75cm
側面圖	 油4與1	 油16	 油16	 油16	 油16	 油16	 油16
	透鏡狀	透鏡狀	透鏡狀	透鏡狀	花瓶狀	球狀	球狀

表 11 不同油品高度墨滴鋪展時間與面積鋪展平均倍率

鋪展時間 (秒) \ 油品高度 H (cm)	H=0.11	H=0.21	H=0.32	H=0.43	H=0.54	H=0.64	H=0.75
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	14.58	11.50	15.15	7.06	24.49	1.00	1.00
10	14.87	15.56	11.81	17.70	43.71	0.98	1.18
15	11.43	8.91	8.14	41.64	13.98	0.98	1.18

20	8.34	8.46	8.25	12.51	7.28	0.99	1.19
25	6.90	7.07	4.22	9.58	6.23	0.99	1.19
30	6.02	6.61	2.66	8.28	6.16	0.99	1.19
35	5.80	6.33	2.66	7.94	5.65	0.99	1.19
40	5.29	6.23	2.66	7.46	5.59	0.99	1.19
45	5.07	6.02	2.66	7.22	5.45	0.99	1.19
50	4.64	5.80	3.24	7.00	5.26	0.99	1.19
55	4.21	5.65	2.47	6.85	5.48	0.99	1.19
60	3.51	5.64	2.57	6.73	5.29	0.97	1.22

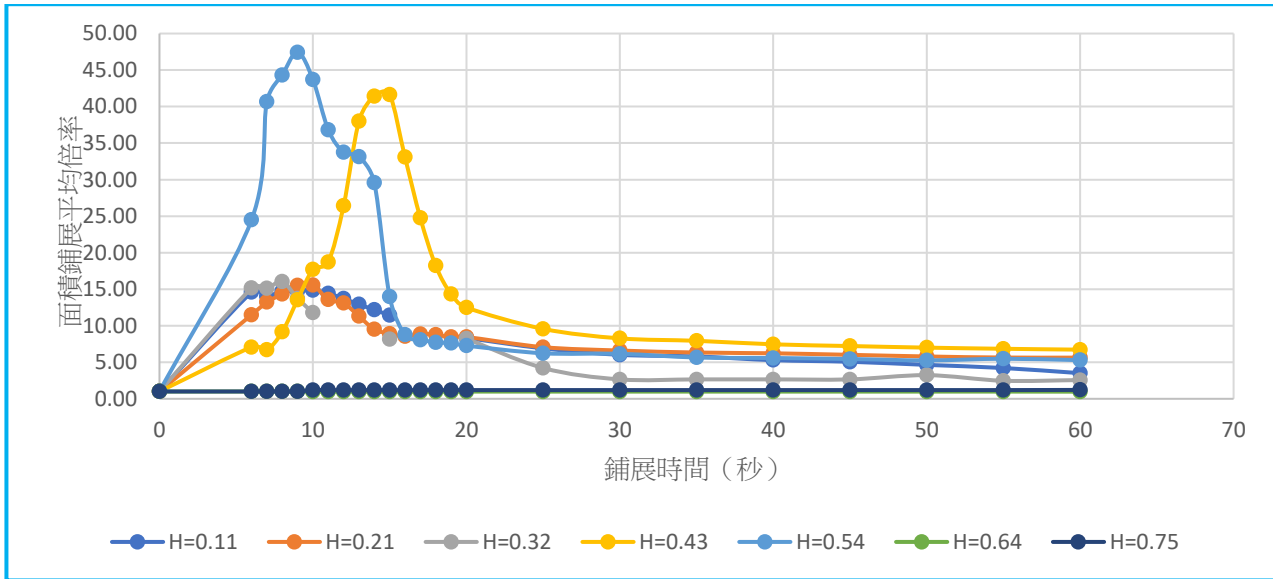


圖 13 不同油品高度墨滴鋪展時間與鋪展倍率曲線

【小結】：

- 1、油品高度小於 0.43cm 時，此高度值小於墨滴的理論直徑，側面圖可知此時初始墨滴會以透鏡狀存在油底，墨滴上方可以酒精作用，驅動墨滴鋪展，但從鋪展後 600 秒後鋪展倍率都還很高，表示墨滴鋪展後分散為小液滴，靜置重新再聚合的效果不佳。
- 2、油品高度為 0.54cm 時，雖然此值大於墨滴的理論直徑，但墨滴以花瓶狀短暫停留懸掛在油面，可被酒精驅動而鋪展，但靜置後聚合，最終墨滴還是會沉入油中，因此最終測出的面積反而比初始墨滴小。
- 3、若油品高度 (H) 大於 0.64cm 時，墨滴的面積幾乎沒變化，再由側面圖可知此時初始墨滴會以球狀沒入油底，表示酒精無法驅動墨滴鋪展。
- 4、實驗結果發現油品高度 0.43cm 與 0.54cm 面積最大鋪展倍率高達 41.6 及 47.43，顯示油品高度較高時，墨滴與油面會有下凹現象，有利周圍小液滴滑動到大液滴旁邊，使液滴重新再聚合。

實驗五：探討形成花瓶狀墨滴的質量條件

【前言】：

由實驗四的結果發現，當油品高度大於墨滴的理論直徑時，因墨滴密度比油大，所以會沉入油中，油品高度略大於理論直徑時，墨滴會以花瓶狀懸掛在油面下一段時間，但最終仍會沉入油底，所以我們想知道什麼質量條件可以使墨滴呈花瓶狀懸掛，進而與酒精接觸引發鋪展現象。

【實驗設計】：

- 1、墨滴自油面上方 2 公分處滴落，自由落體時，墨滴會呈現球狀，利用墨滴重量 m 及密度推算墨滴的體積 V ，再利用球形體積為 $\frac{4}{3} \pi R^3$ 推算墨滴的理論半徑 R 。
- 2、當墨滴滴到油面是會產生一個衝擊力 F ，在墨滴理論周長 ($2 \pi R$) 產生一單位長度的向下力量，若此單位長度上的受力比大豆沙拉油的表面張力 (43.4mN/m) 小時，則墨滴會懸掛在油面。

【實驗步驟】：

- 1、將塑膠滴管口以打火機加熱後，將滴管口壓小或是全部密封住後，再以加熱的圖釘、迴紋針刺出大小不同的口徑。
- 2、取裝 10 公分高油品的容器，每種滴管分別從距離油面高度 2 公分的高度滴下墨滴，總共滴 10 滴墨滴，稱量 10 滴墨滴的質量，算出每顆墨滴的平均質量。
- 3、計數懸掛在油面的墨滴數量。

【結果】：

表 12 墨滴質量與懸掛率

墨滴平均質量 (g)	0.031	0.049	0.054	0.06
懸掛率	100%	50%	20%	10%
註：滴管口類別	原滴管 (口徑 2.2mm)	滴管口加熱後內壓縮小	密封後以迴紋針加熱後戳洞	密封後以圖釘加熱後戳洞

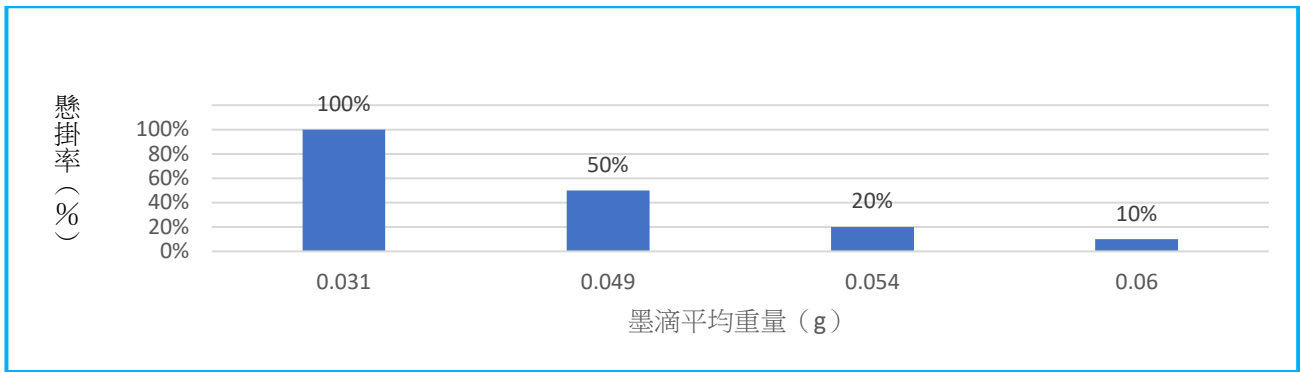


圖 14 墨滴質量與懸掛率

【小結】：

- 1、實驗發現當墨滴質量約在 0.031g，墨滴產生的單位長度作用力小於大豆沙拉油的表面張力，所以墨滴會以花瓶狀懸吊在油面。此時密度大的液體浮在密度小的液體上，油面和墨滴的接觸面會產生一些不穩定的擾動，稱為瑞利泰勒不穩定性。



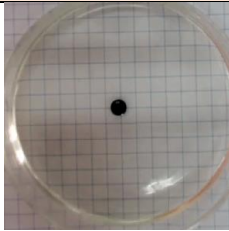
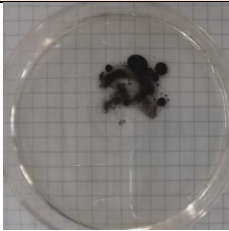
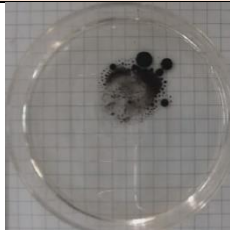
實驗六：探討酒精濃度對驅動墨滴鋪展的影響

【實驗步驟】：

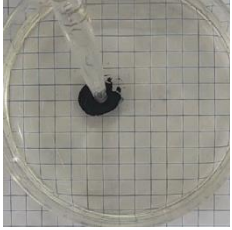
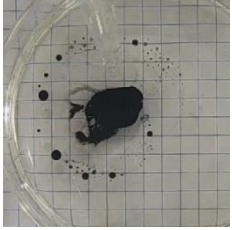
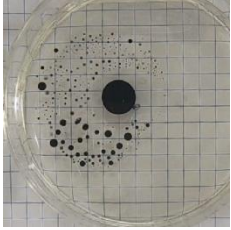
- 1、取 95%酒精分別調配出 76%、63.3%、47.5%、31.7%的酒精。
- 2、在直徑為 7.3cm 的培養皿中倒入 16 公克的大豆沙拉油，以滴管滴入 1 滴墨滴，在培養皿中央。
- 3、以微量滴管吸取 0.1mL 的不同濃度的酒精，滴在墨滴中心，以手機錄製鋪展過程。
- 4、以軟體 Tracker 截取滴入酒精後液滴圖片（時間 1-10 秒每秒一張）

【結果】：

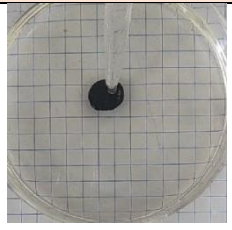
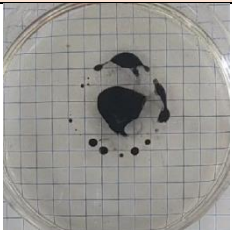
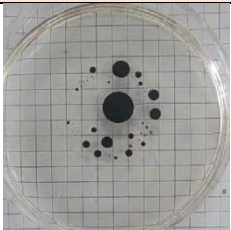
- 1、酒精濃度 95%

鋪展時間	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
照片			

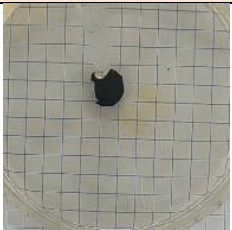
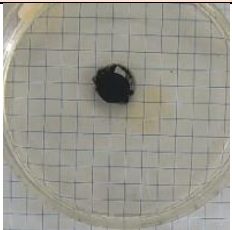
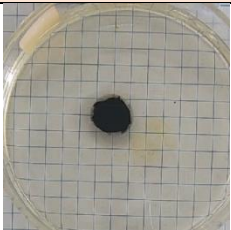
2、酒精濃度 76%

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
照片			

3、酒精濃度 63.3%

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
照片			

4、酒精濃度 47.5%

鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
照片			

5、酒精濃度 31.7%

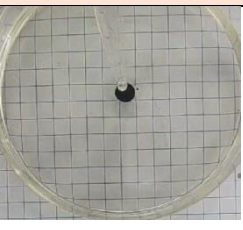
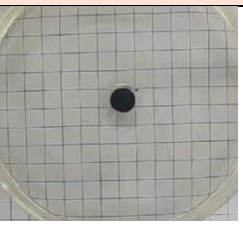
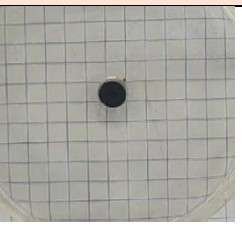
鋪展時間 照片	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
照片			

表 13 不同酒精濃度驅動墨水鋪展時間與面積鋪展倍率

酒精濃度 (%) 鋪展時間 (秒)	酒精濃度 95%	酒精濃度 76%	酒精濃度 71%	酒精濃度 63.3%	酒精濃度 47.5%	酒精濃度 31.7%
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	12.58	13.62	9.39	3.38	5.27	4.72
2	13.90	17.59	18.03	5.35	4.93	5.81
3	12.26	23.75	20.22	5.07	4.81	5.90
4	12.41	28.66	22.47	5.23	4.81	6.10
5	12.25	25.37	25.23	5.24	4.89	5.92
6	15.15	25.59	24.53	4.66	5.02	6.03
7	16.05	26.43	24.40	4.61	5.14	5.93
8	15.11	21.14	19.86	11.55	5.10	5.93
9	13.73	19.41	17.65	11.54	5.51	5.94
10	11.81	17.23	13.76	11.70	5.62	5.93

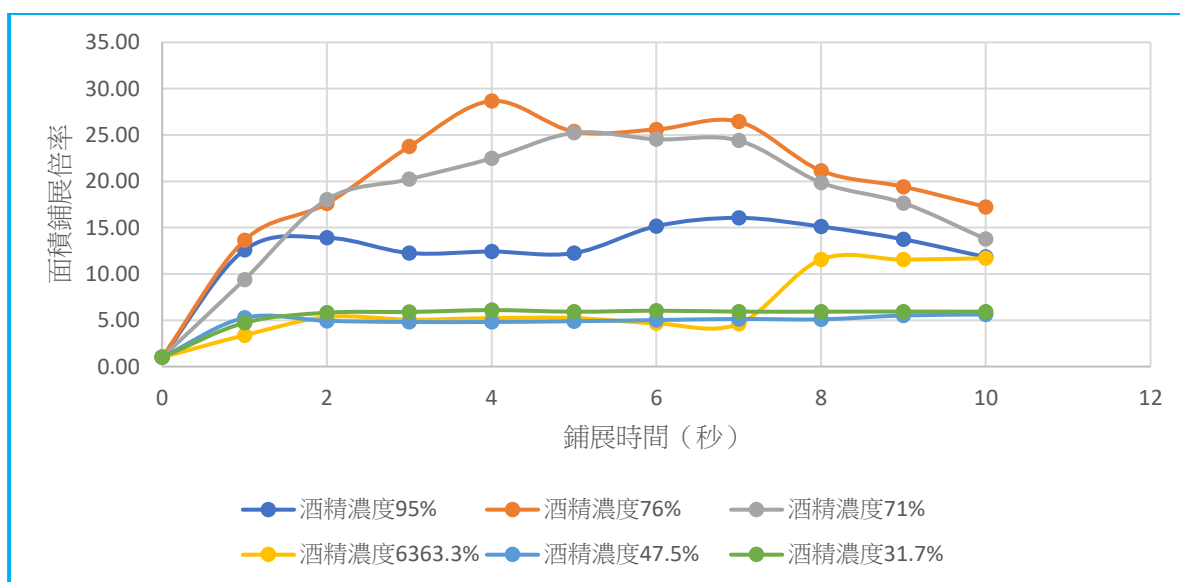


圖 15 不同酒精濃度驅動墨滴鋪展時間及面積鋪展倍率

【小結】：

- 1、酒精濃度 63.3%以上，可驅動墨滴鋪展。並且分散為小液滴後，再慢慢聚合。酒精濃度 47.5%只能讓墨滴產生面積鋪展，無法產生指狀邊界及分散成小液滴的情形，當酒精濃度為 31.7%時，鋪展現象不明顯。

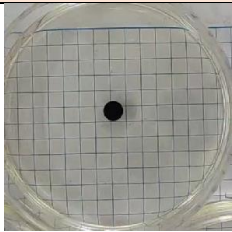
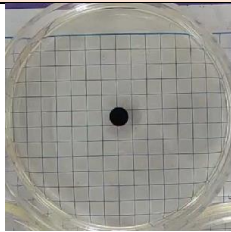
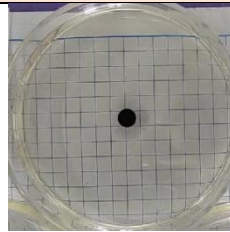
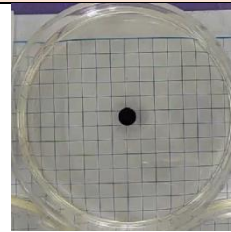
實驗七：探討酒精墨水中酒精濃度對墨滴鋪展的影響

【實驗步驟】：

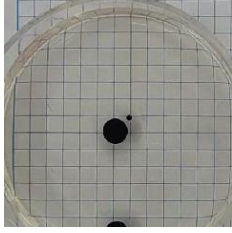
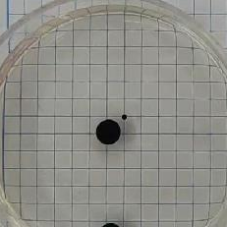
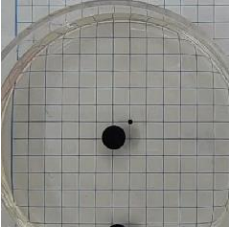
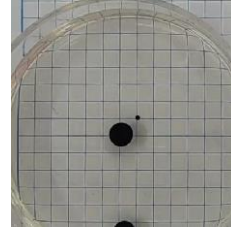
- 1、稱量 1 公克的墨汁，分別加入 1 公克、2 公克、3 公克、4 公克、的 95%酒精調配出 50%、66.6%、75%、80%的酒精墨水。
- 2、在培養皿中倒入 16 公克的大豆沙拉油，以滴管滴入 1 滴墨滴，在培養皿中央。
- 3、以微量滴管吸取 0.1mL 的不同濃度的酒精，滴在墨滴中心，以手機錄製鋪展過程。
- 4、以軟體 Tracker 截取滴入酒精後液滴圖片（時間 1-10 秒每秒一張），再透過軟體 ImageJ 分析墨滴鋪展的最大寬度。
- 5、以 Excel 軟體繪製時間與鋪展最大寬度之關係圖。

【結果】：

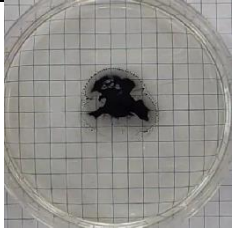
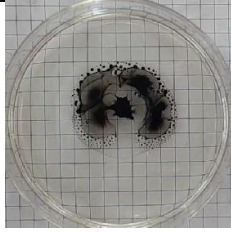
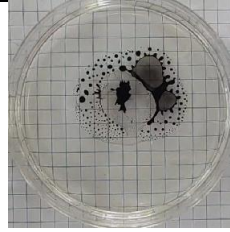
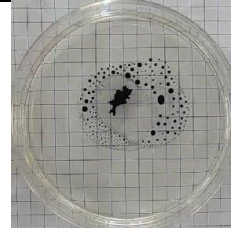
1、酒精墨水中酒精濃度 50%

鋪展時間 照片	鋪展後 1 秒	鋪展後 3 秒	鋪展後 5 秒	鋪展後 7 秒
照片				

2、酒精墨水中酒精濃度 66.6%

鋪展時間 照片	鋪展後 1 秒	鋪展後 3 秒	鋪展後 5 秒	鋪展後 7 秒
照片				

3、酒精墨水中酒精濃度 75%

鋪展時間 照片	鋪展後 1 秒	鋪展後 3 秒	鋪展後 5 秒	鋪展後 7 秒
照片				

4、酒精墨水中酒精濃度 80%

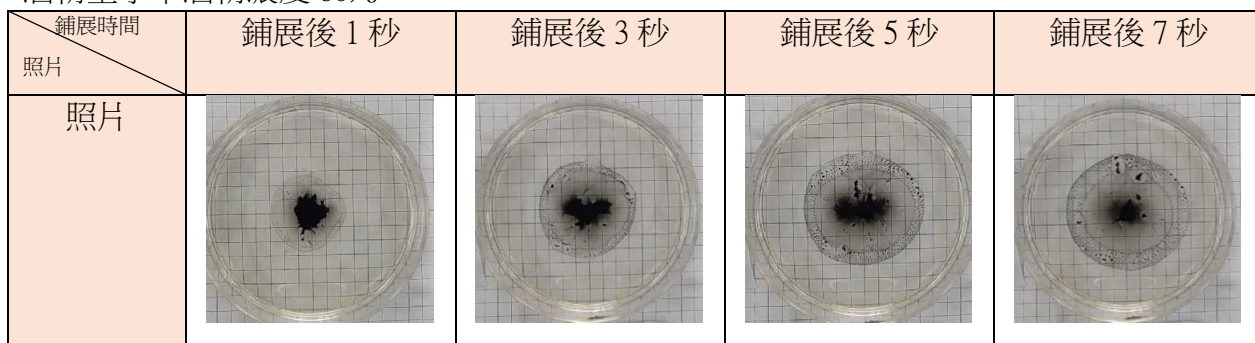


表 14 不同濃度酒精墨水鋪展時間與鋪展最大寬度 (cm)

酒精墨水之酒精濃度 (%) 鋪展時間 (秒)	酒精墨水酒精濃度 50%	酒精墨水酒精濃度 66.6%	酒精墨水酒精濃度 75%	酒精墨水酒精濃度 80%
1	0.64	0.65	2.1	2.39
2	0.64	0.62	2.76	2.91
3	0.61	0.6	2.95	3.15
4	0.62	0.6	2.98	3.38
5	0.64	0.62	3.06	3.5
6	0.6	0.62	3.29	3.7
7	0.6	0.6	3.26	3.87
8	0.6	0.59	3.25	4.03
9	0.6	0.59	3.17	4.19
10	0.6	0.59	3.17	4.2

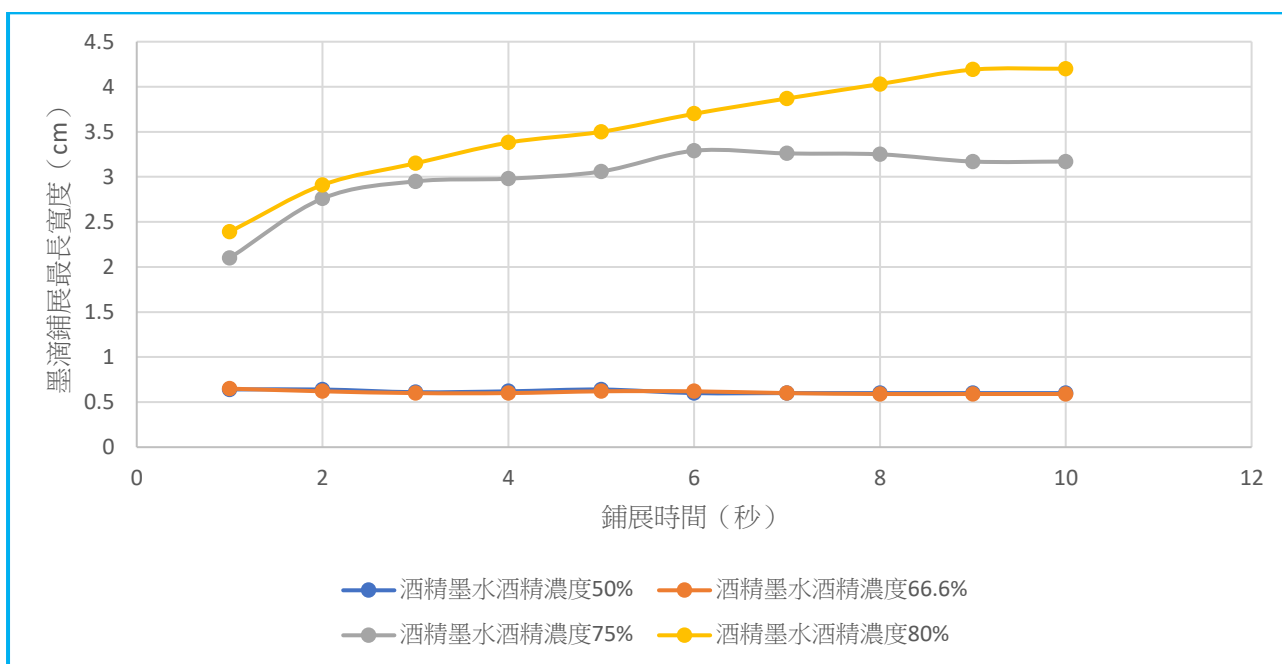


圖 16 酒精墨水酒精濃度對鋪展時間及墨滴鋪展最大寬度關係圖

【小結】：

- 1、由墨水鋪展最大寬度可以發現，當酒精墨水的酒精濃度越高，10 秒內墨水鋪展寬度越大，代表鋪展速度越快，如果酒精墨水酒精濃度低於 66.6%時，墨滴的最大寬度變化不大，由側面圖得知墨滴會以碗狀墨滴停留在油面。
- 2、實驗中發現墨滴中的酒精濃度 75%以上，只要一滴在油面上，隨即產生鋪展現象，由前面表面張力測量得到 66.6%的酒精墨水表面張力為 31.1mN/m，50%的酒精墨水表面張力為 33.7mN/m，表示以大豆沙拉油為基底液時（43.4mN/m），墨滴要產生鋪展效果，它的表面張力必需降到 31.1mN/m 以下。

應用：科學玩具設計~舞動的墨滴盒

【設計原理】：利用酒精造成墨滴表面張力的差異，使在油面的墨滴產生擴散及聚合。

【設計圖】：圖 17

【使用方式】：

- (一) 透明罐中添加少量的油，滴入 1 滴墨滴。罐子上方有個小洞口，平時塞住避免油外漏，要操作時，以滴管一滴一滴加入墨滴方上，觀察墨滴的舞動。
- (二) 操作完畢，可將洞口打開靜置一天，即可重新加入酒精啟動墨滴舞動。

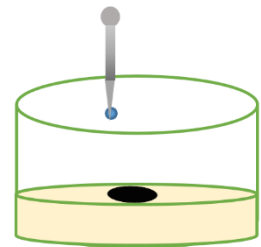
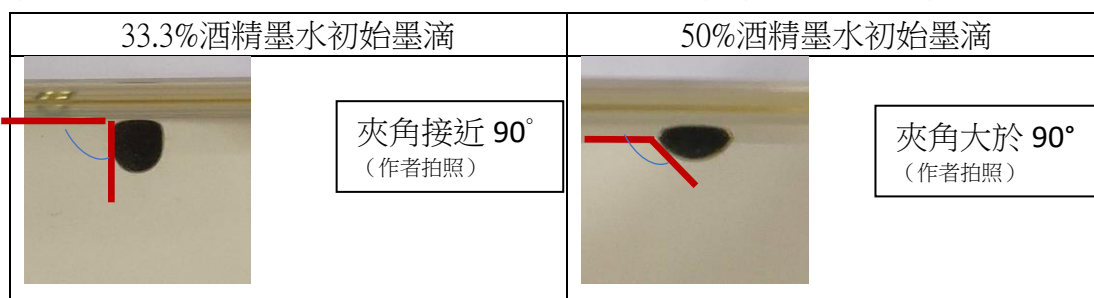


圖 17 舞動的墨滴盒設計圖
(作者繪圖)

伍、討論

- 一、液面上的鋪展現象是一個快速且變化明顯的物理現象，再加上滴入的鋪展相墨滴大小難以固定，驅動液加入時可能對基底相產生擾動，這些都可能影響鋪展的方向及效果，前人的研究大多以時間與鋪展半徑做為量化依據，本研究鋪展形狀可能有指狀邊界及小液滴出現，所以利用軟體分析鋪展時間與面積，透過面積鋪展倍率分析鋪展效果及聚合效果，鋪展倍率越大，代表墨滴越薄，靜置後若鋪展倍率接近 1 代表墨滴與初始墨滴相似。
- 二、**實驗二**由初始墨滴鋪展後，前 10 秒及往後每 5 秒的面積變化分析，發現墨滴鋪展系統中，面積的鋪展倍率變化趨勢為由小到大，再慢慢變小。由實驗後面積鋪展倍率及聚合後的倍率可以發現書法墨滴比水性藍墨水及廣告顏料更適合做為鋪展相。當酒精滴入墨滴中心時，因表面張力梯度差異，使得墨滴向外鋪展，接著因普拉托瑞力不穩定性發生指狀邊界及小液滴，靜置後，驅動液酒精蒸發會蒸發，墨滴會慢慢聚合，故以墨滴做為鋪展物質可以使鋪展現象重複。

- 三、由水性藍墨水鋪展 10 秒後的圖片可發現，顏料鋪展後，主液滴旁有許多藍色小液滴，小液滴的聚集較慢，靜置後主液滴旁有紅色顏料析出。廣告顏料滴入酒精時，主液滴會先膨脹鋪展，再縮聚，過程中從有許多細小的染料漂流出，無法聚集成一顆液滴，漂散在主液滴外的物質會影響第二次的鋪展觀察。
- 四、實驗三中發現不同的醇類驅動墨滴鋪展的效果都不同，乙醇及丙醇的鋪展倍率較甲醇、丁醇大許多，但丙醇的面積變化出現兩次的極大值，顯示鋪展的現象變化較不穩定，因此使用乙醇做為驅動液較適合。
- 五、實驗四發現油品高度（H）會影響墨滴在油上面積鋪展倍率的最大值，當油品高度比墨滴理論直徑小時，墨滴可鋪展；油品高度遠大於墨滴理論直徑時，受重力影響，墨滴以球狀沒入油中，無法產生鋪展現象。實驗中推算墨滴理論直徑為 0.47cm 時，油品高度為 0.54mm 可使面積鋪展倍率高達 47.43，油品高度為 0.43mm 時面積鋪展倍率為 41.64。顯示略高於理論直徑的油品高度，可提高墨滴面積鋪展倍率，推則油品高度較高，分散後的在墨滴與油的交界處有下凹現象，當墨滴越大顆，有利於小液滴向較大墨滴靠近聚合。
- 六、實驗五中透過慢動作攝影發現，當滴管從較高的位置滴下墨滴時，墨滴會以球狀從空中落到油面，墨滴向油面產生一個衝擊力，與油面的表面張力抗衡，若單位長度上的衝擊力大於油的表面張力時，墨滴會直接落入油底；有時墨滴會懸掛一小段時間再落下，表示墨滴的質量略大於表面張力。如果若單位長度上的衝擊力小於油的表面張力時，則墨滴會產生瑞利泰勒不穩定，以花瓶狀懸掛在油面下。研究發現 2 公分高處滴落的墨滴若質量小於 0.031 公克，即可達到此種不穩定狀態，進而被酒精驅動產生鋪展。
- 七、實驗七發現在墨水中加入酒精，酒精會破壞墨滴分子間的引力，使得墨滴表面強力減小；調配的酒精墨水酒精濃度超過 75% 時，墨滴滴入油品中因表面張力減弱，導致驅動自發性鋪展，但因酒精濃度較高，所以墨滴中碳粒相對較少，不容易計算出面積的鋪展倍率，本實驗以鋪展時間和墨滴鋪展開的最大直徑表示酒精墨水自發性鋪展速度。
- 八、由實驗七側面照片得知，酒精比例越低，墨滴的表面張力較大，滴入的酒精墨滴與油面的夾角接近 90° ，由上方往下看墨滴表面積越小。調配的酒精濃度越高，墨滴的表面張力較小，滴入的墨滴與油面的夾角大於 90° ，由上方往下看墨滴表面積越大。



陸、結論

一、以酒精驅動墨滴在大豆沙拉油的鋪展現象可分為以下幾個階段，此開放系統中墨滴鋪展倍率高，鋪展與聚合明顯易於觀察，驅動液酒精具揮發性，可重覆鋪展歷程：

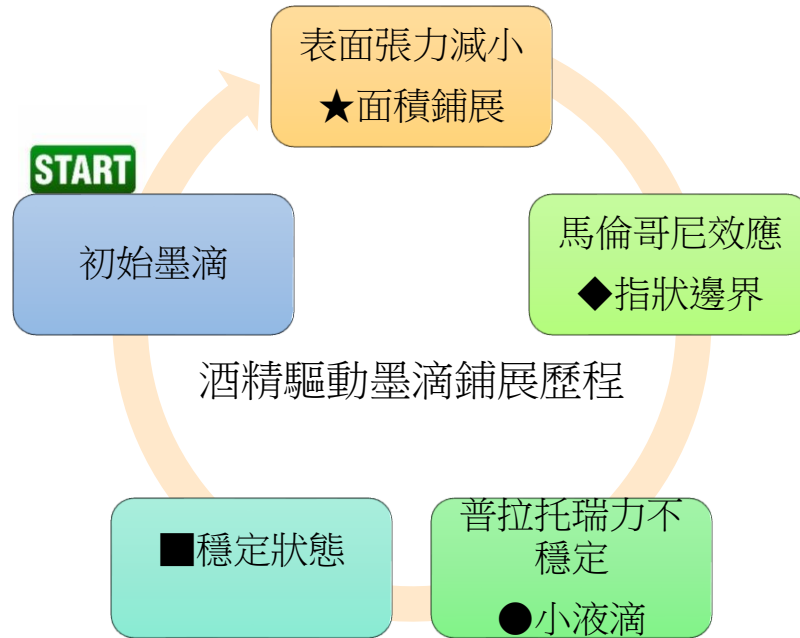


圖 18 酒精驅動墨滴鋪展歷程

二、要讓墨滴與油面上的酒精作用有三種方法：

- (一) 第一種方法是控制油的高度小於墨滴直徑，使墨滴形成透鏡狀墨滴，最高點接近油面，滴入的酒精直接接觸墨滴，造成墨滴的表面張力減小，因而浮上油面形成碗狀墨滴。接下即可滴入酒精產生一系列的物理變化。
- (二) 第二種方法是控制墨滴的重量，當墨滴重量小於大豆沙拉油的表面張力時，墨滴可以花瓶狀墨滴懸掛在油品上。
- (三) 第三種方法是以酒精稀釋墨汁，當墨汁中的酒精濃度小於 66.6%時，滴下的墨滴會以碗狀墨滴懸掛在油面下。

三、以低表面張力的液體驅動墨滴鋪展，需將墨滴的表面張力降低到 31.1mN/m 以下，才可在大豆沙拉油品上產生面積鋪展並且觀察到馬倫哥尼效應及普托瑞力不穩定 形成小液滴等物理現象。

綜合以上研究條件，以大豆沙拉油、墨滴及酒精等簡易材料，可組合出一個具有複雜物理現象的系統，將其設計成科學玩具，讓學習者在玩的過程中對物理領域有更多的認識，包括液體的表面張力與表面積的關係、表面張力梯度、馬倫哥尼效應、普托瑞力不穩定性，以及液體會以最穩定狀態存在等物理現象。

柒、參考資料

一、科展作品

- (一) 【液滴爆炸】伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛《62 屆全國科展高中組 物理與天文學科》
- (二) 【醇醇欲動滑油滋-利用馬蘭戈尼作用探討苦茶油純不純】張玉燕、廖宥婷《63 屆全國科展 國中組 化學科》
- (三) 【液滴開花】《63 屆高雄市國小組物理科作品》
- (四) 【樹突狀圖形的生長機制與影響變因】《63 屆高雄市科展 高中組物理與天文學科》

二、網路資料

- (二) <https://scigame.ntcu.edu.tw/water/water-004.html> 「水上年輪」。
- (二) <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%A0%E5%8A%9B> 維基百科「表面張力」
- (三) 赵文景, 王进, 秦威广, 纪文杰, 蓝鼎, 王育人 (2021) 【基於 Marangoni 效應的液-液驅動鋪展過程】物理学报, 70(18)<https://wulixb.iphy.ac.cn/article/doi/10.7498/aps.70.20210485>
- (四) 物理雙月刊 <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=492>
- (五) 【什麼是表面張力?】技術論文-南北潮商城 (nbchao.com)
- (六) <https://www.youtube.com/watch?v=qfFbNHXlvrw> 利用滴管測量液體的表面張力
- (七) 黄彦如, 黄睿雯, 马雪, 李真珍, 滕宏辉 (2024) 【溶质引起的自由液面 Marangoni 铺展研究综述】力学学报. 56 (6)
<https://lxxb.cstam.org.cn/cn/article/pdf/preview/10.6052/0459-1879-23-532.pdf>。

【評語】 080101

研究液體之間交互作用所產生的二維型態變化。該研究的文獻回顧相當完整，對基本的原理：馬倫哥尼效應，也有掌握。在過去以來，相關的實驗已經有相對完整的研究，要做出具有獨特性的研究並不容易。該研究，實際上，是有關三種液體之間的交互作用，對比於過去常見的兩種液體，現象更為複雜。作者能夠整理出頗有系統的觀察是相當不容易的，可見其細心與用心的科學精神。該研究比較著重於整體動態的發展觀察，而非最終穩定態形成的狀態與時間。可以加強一下對後者的描述與研究，對於掌握住整個動態行為的精神應該會有幫助。

作品簡報

墨墨在舞動～

探討以酒精驅動墨滴鋪展的物理現象

本研究是探究以大豆沙拉油為基底相的開放系統中，酒精驅動書法墨滴鋪展的物理現象。透過鋪展面積倍率分析，發現以墨滴當鋪展相比其它顏料更適合，乙醇驅動墨滴鋪展的效果優於甲醇、丙醇及丁醇。基底相的深度會影響墨滴的鋪展倍率及鋪展現象的可重複性。0.054公克的墨滴在油深0.54cm，鋪展倍率最大，聚合效果最好。若油深超過墨滴的理論直徑時，控制墨滴重量在0.031公克，可使2公分高度落下的墨滴以花瓶狀懸掛在油面。驅動液酒精濃度越高，面積鋪展的倍率越明顯；可用酒精調整墨滴表面張力，使墨滴以碗狀懸掛油面，再以酒精驅動鋪展，若酒精墨水表面張力低於31.1mN/m以下，可產生自發性的鋪展現象。上述液體系統可設計成用來認識物理現象科學玩具。

前言

一、研究動機

在一個偶然的機會中我們在大豆沙拉油中加入書法墨汁，再滴進酒精，結果看到墨滴在油上分分合合構成許多獨特的圖案，我們看了覺得很有趣，跟老師討論及上網找相關資料後，發現這好像與酒精墨水在油上產生馬倫哥尼效應的現象類似，這個新奇的物理原理對我們而言有些陌生，不過看著墨滴產生的獨特圖案，感覺很療癒，驅動了我們探究的好奇心，所以我們決定要來探究物理世界中深奧的原理，並利用這個有趣的液體組合設計出一款科學玩具，用來認識表面張力與面積的關係、表面張力梯度、馬倫哥尼效應、普拉托瑞力不穩定性，以及液體會以最穩定狀態存在等等的物理現象。

二、研究目的

- (一)分析墨滴形狀與基底相油品深度的關係。
- (二)探討墨滴、水性藍墨水及廣告顏料當鋪展相的鋪展效果差異性。
- (三)探討不同醇類驅動墨滴鋪展的效果。
- (四)探討如何控制墨滴重量使墨滴以花瓶狀懸掛油面下。
- (五)設計科學玩具~舞動的墨滴盒。
- (六)探討墨滴自發性鋪展的條件。

三、文獻探討

(一) 瑞利泰勒不穩定性

在重力場中，當密度較大的液體壓在密度較小的液體上面時，它們邊界上一定波長的小擾動會發展成為不穩定的流動。要製造出液體系統的瑞利泰勒不穩定性，可利用物體對液面造成的單位長度重力小於液體表面張力即可以達成此現象。

(二) 馬倫哥尼效應與普托瑞力不穩定性

義大利物理學家卡羅·馬倫哥尼在1865年論文中研究發表馬倫哥尼效應，他指出在流體介面中會因為表面張力梯度差異，而造成的傳質現象。也就是說當兩種液體互相接觸時，表面張力強的液體會將表面張力弱的液體拉過來，因此會出現表面張力弱的液體向強的方面滲透，舉例而言，若在墨滴中心位置滴入酒精，墨滴中心處的表面張力變小（左圖），外圍處表面張力相對來說是較大的，墨滴會自發性產生向外鋪展流動（中圖），即為馬倫哥尼效應，這些向外凸出的形狀具有不同的表面能，為了要維持最小表面能，墨滴會內縮，最終會使凸出的部分分裂為小液滴（右圖），此狀態即為普托瑞力不穩定性（維基百科），故本研究中以指狀邊界及細小的液滴做為發生馬倫哥尼效應的依據。

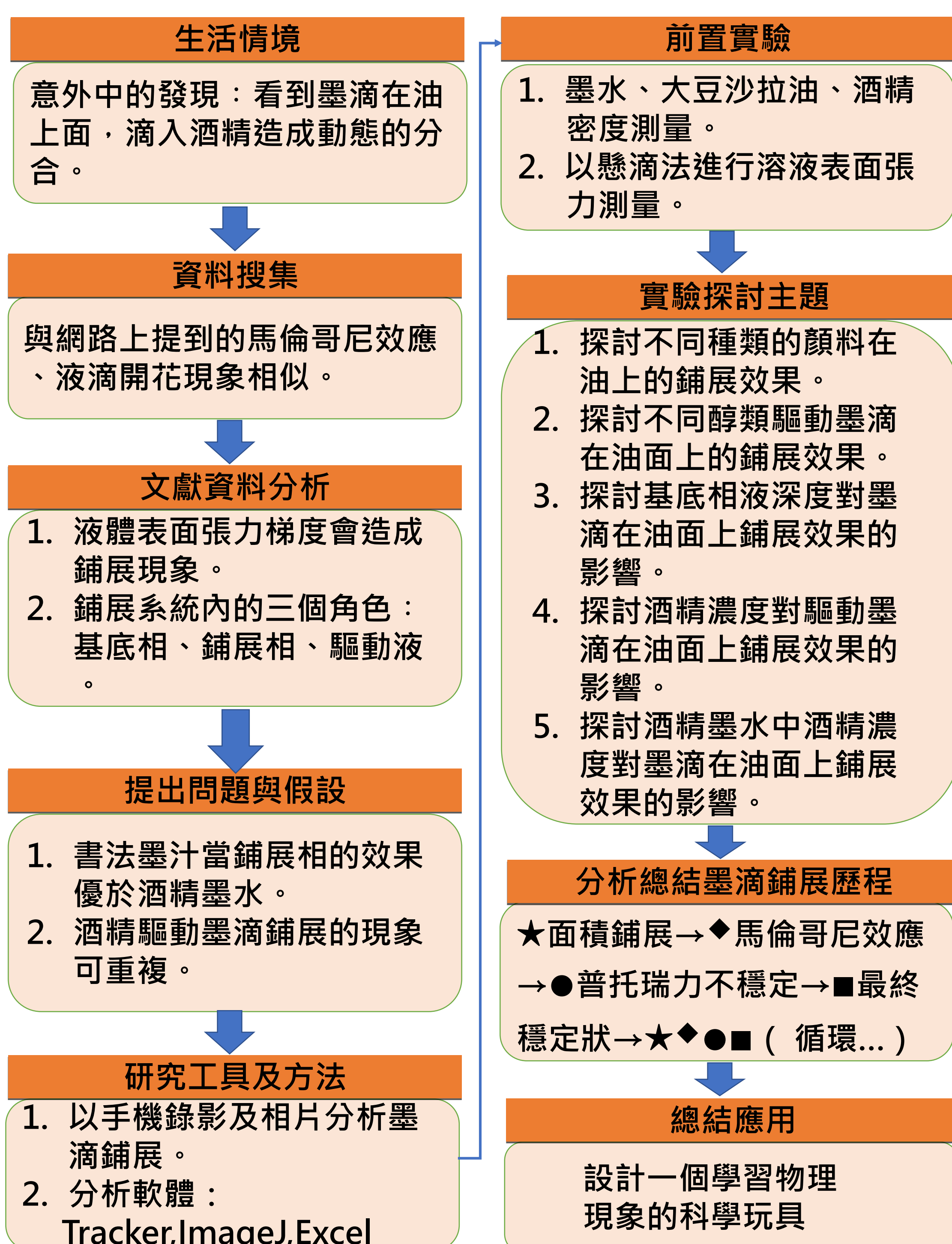


四、相關研究內容分析

成分	系統組成	基底相	鋪展相	驅動液
文獻名稱				
【基於Marangoni效應的液-液驅動鋪展過程】		十二烷基硫酸鈉	正十六烷	矽油
【液滴爆炸】		大豆沙拉油	酒精墨水	無
【醇醇欲動滑油滋-利用馬蘭戈尼作用探討苦茶油純不純】		不同的油品	酒精顏料 丙二醇顏料	無
【液滴開花】		不同蔬菜油	酒精色素	無
【樹突狀圖形的生長機制與影響變因】		壓克力板	壓克力顏料	酒精
本研究【墨墨在舞動】		大豆沙拉油	書法墨汁	酒精

研究過程與方法

一、研究發想與架構



二、墨滴形狀說名 【實驗者拍攝】

墨滴形狀	墨滴圖片	說明
球狀墨滴		當油品深度大於墨滴直徑時，墨滴受重力影響，且墨滴密度比油大，故沉到油底。此時墨滴內分子內聚力大，墨滴以球狀存在。（與油面無夾角）
透鏡狀墨滴		當油品深度小於墨滴最穩定狀態直徑時，墨滴為保持較小表面積狀態，會以透鏡狀保持在油面下方。（底部扁平，與油面夾角小於90°）
花瓶狀墨滴		當滴入的墨滴重量小於大豆沙拉油的表面張力時，墨滴會懸掛在油面，側面圖如左圖，形狀類似花瓶的形狀，瓶口位於油面上方，瓶頸及瓶身在油面下。（與油面夾角小於90°）
碗狀墨滴		當含有酒精的墨滴會以碗的形狀懸掛在油面，碗底部會因表面張力不同，使得碗的深淺不同，左上圖墨滴表面張力較小，油面與墨滴的夾角大於90°，左下圖墨滴表面張力較大，油面與墨滴的夾角接近90°。（與油面夾角大於90°或夾角接近90°）

前置實驗

實驗一：實驗溶液高度基礎物理的測量

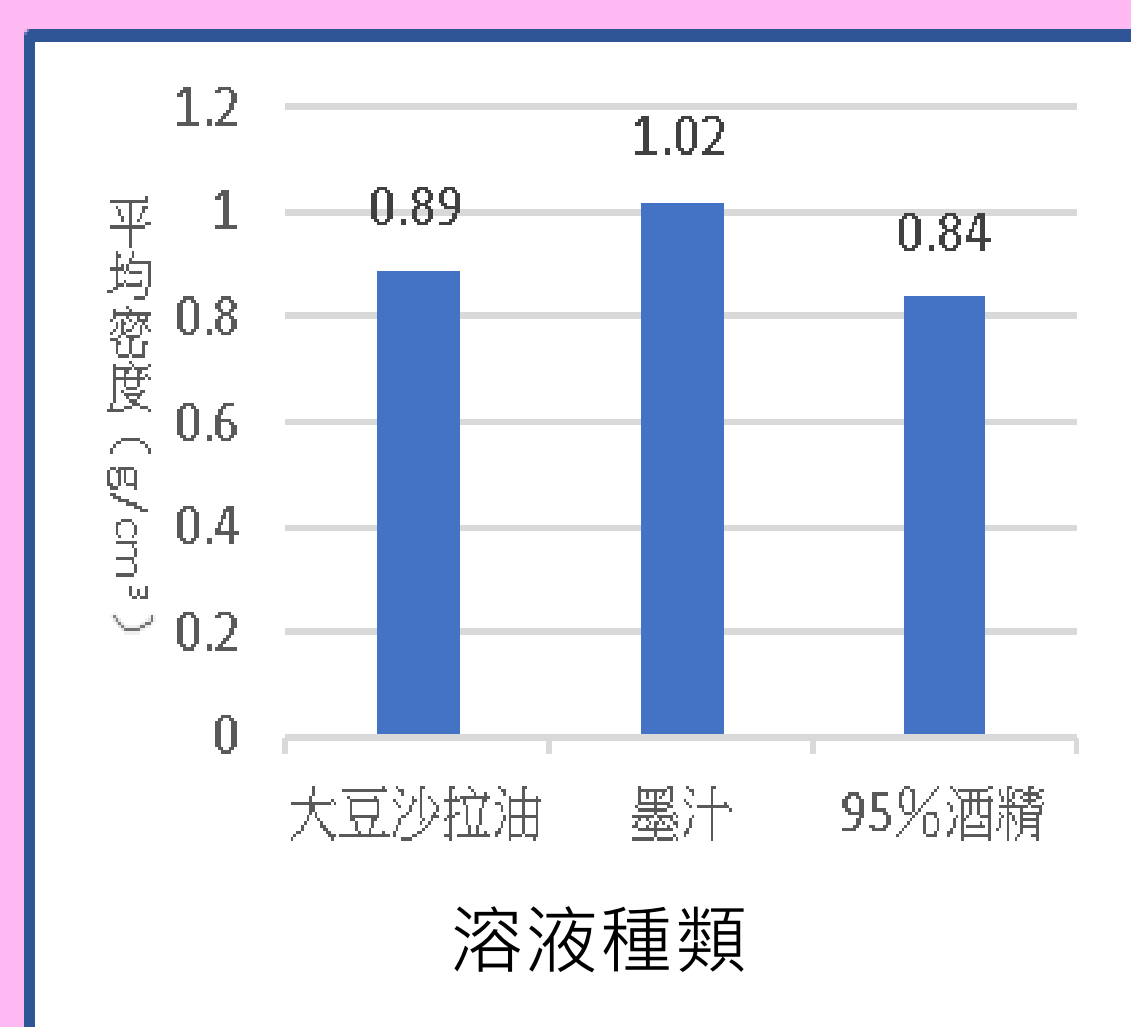


圖7 大豆沙拉油、墨汁、95%的酒精之密度 (N=10)

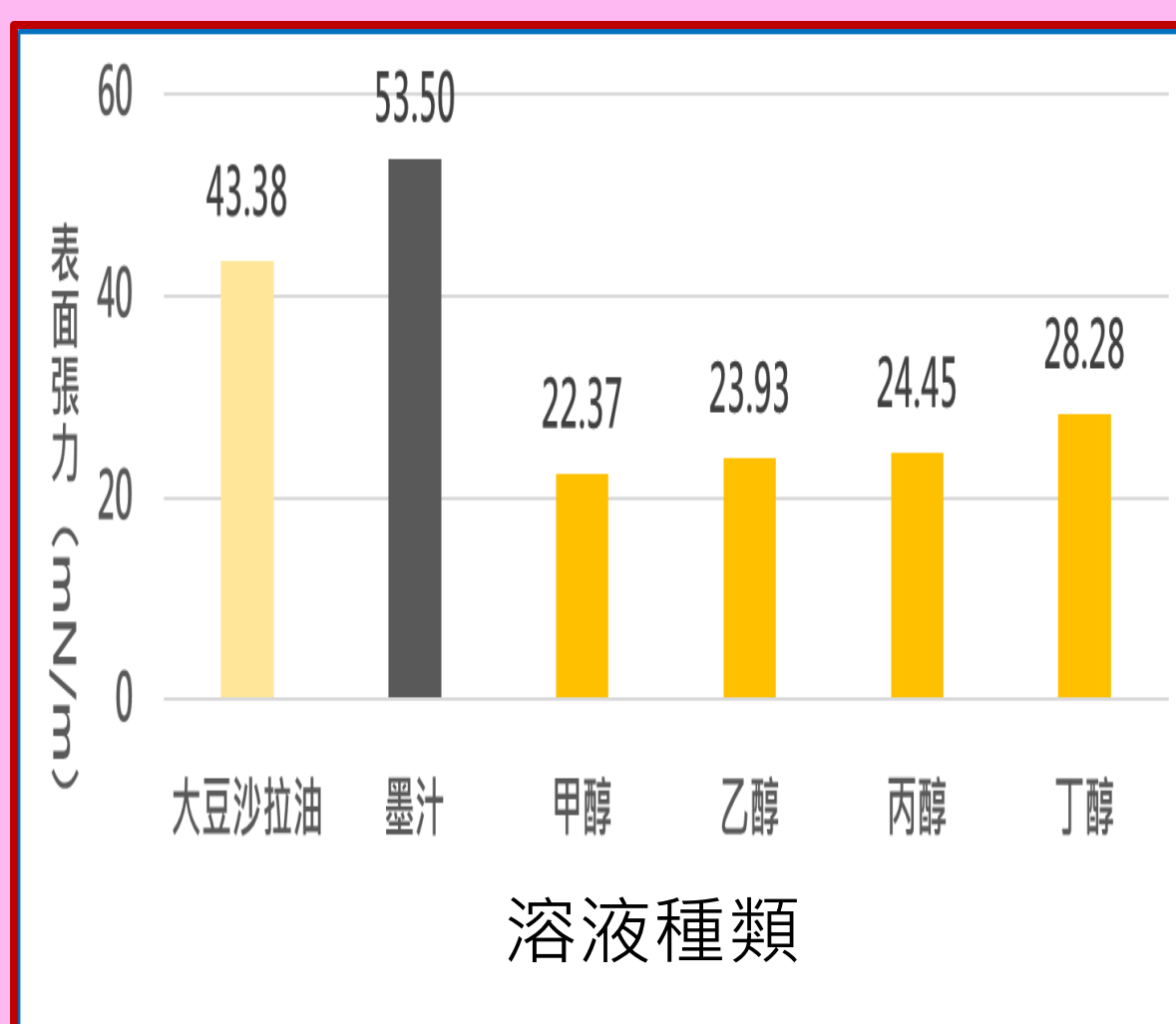


圖8 大豆沙拉油、墨汁、醇類之表面張力 (N=60)

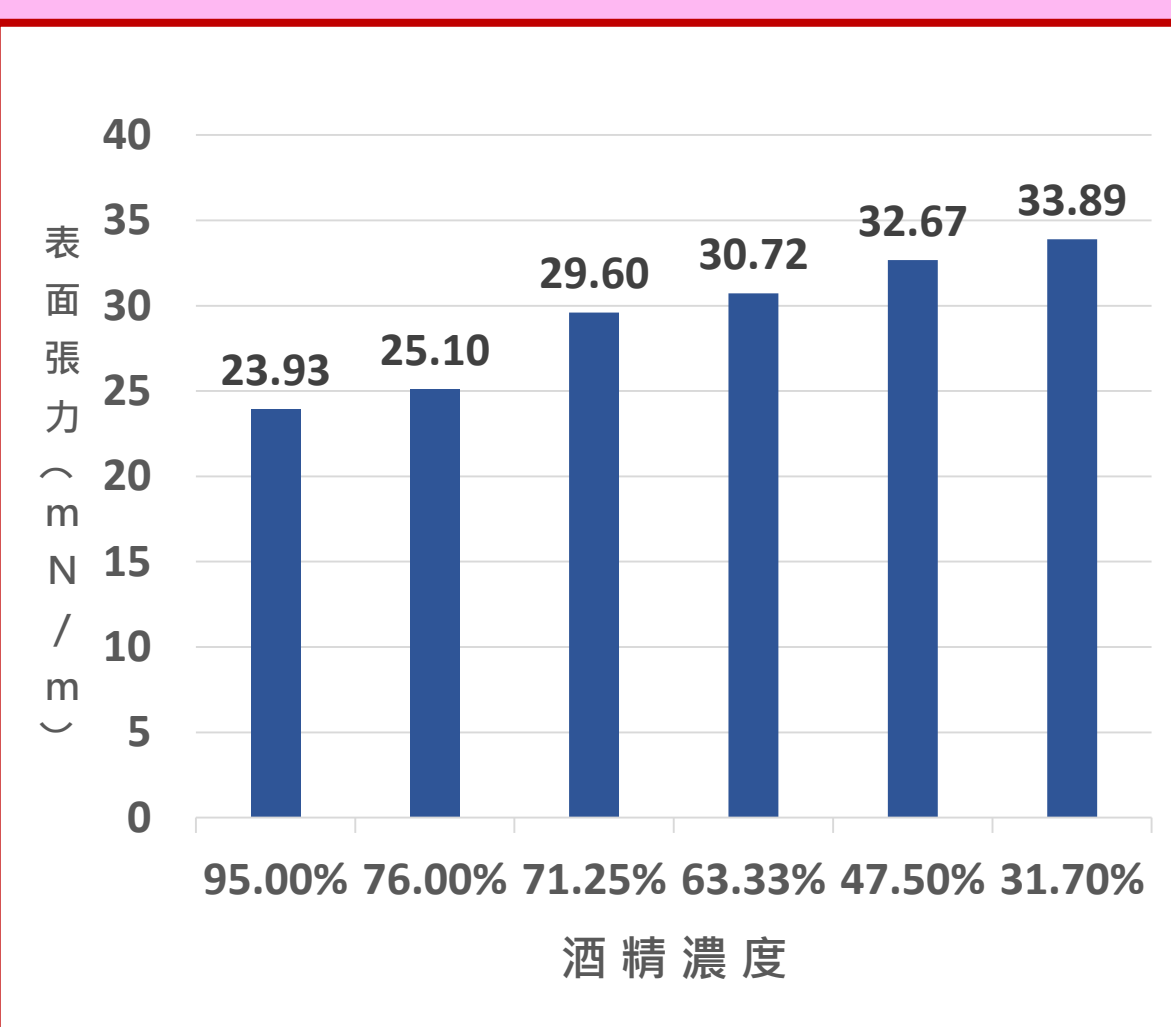


圖9 不同酒精濃度之表面張力

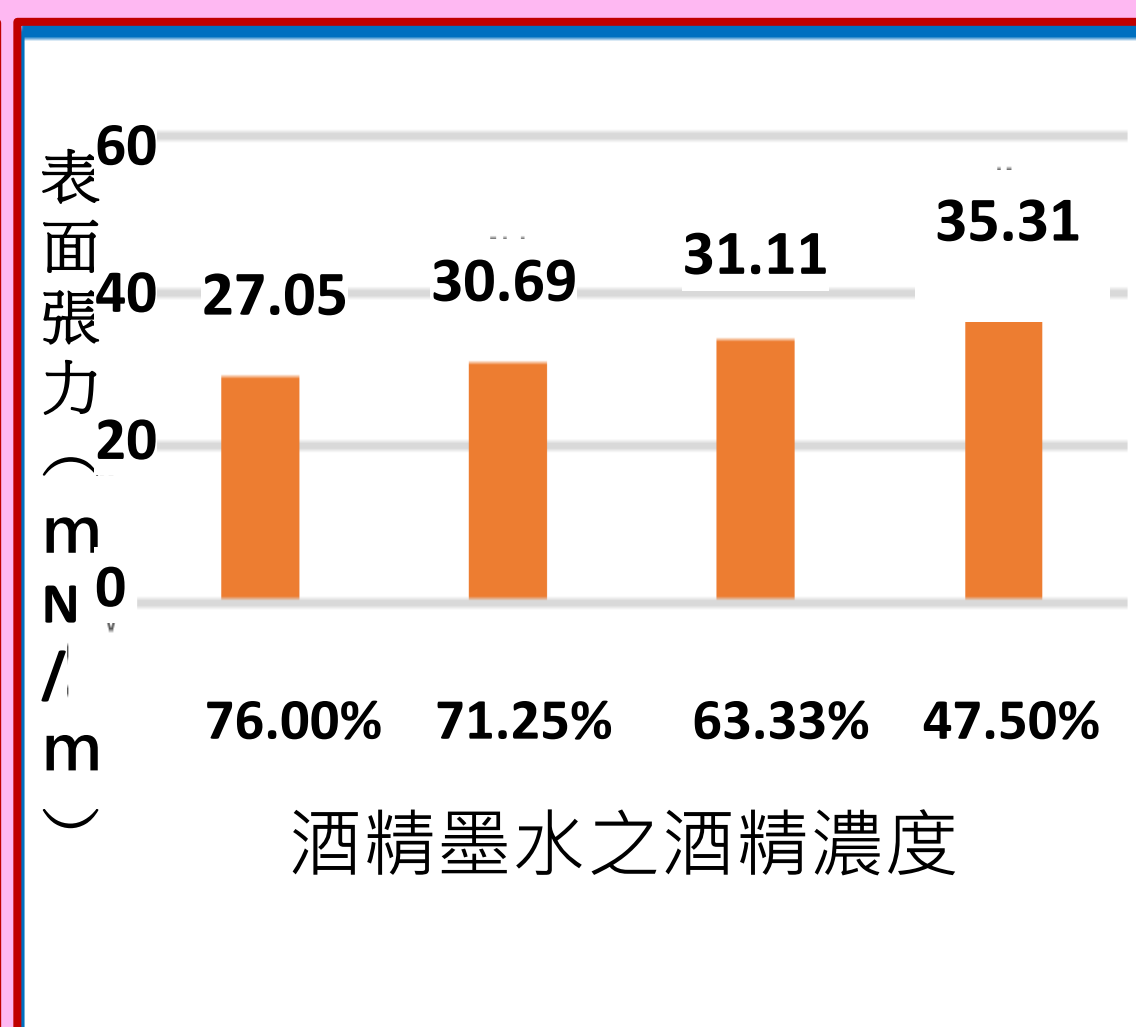


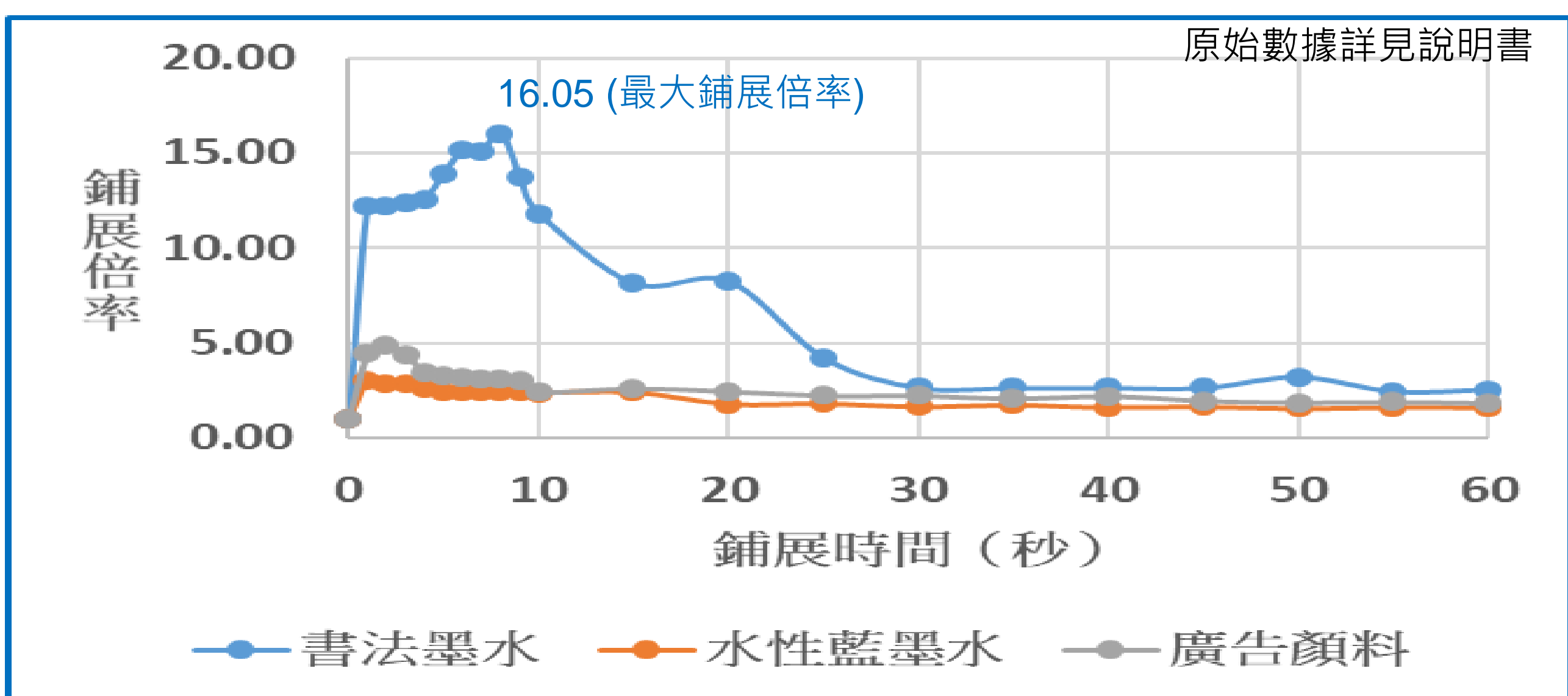
圖10 不同酒精濃度之酒精墨水的表面張力

實驗結果

實驗二：探討不同種類的顏料在油上鋪展效果

【實驗者拍攝】

鋪展時間 顏料種類	初始墨滴	鋪展後 10秒	鋪展後 20秒	鋪展後 600秒	說明
墨汁					鋪展後分裂成3顆較大的液滴，靜置後聚合為一個液滴。 鋪展倍率0.45
水性藍色墨汁					周圍有淺藍色小液滴，鋪展後600秒則是有紅色小液滴漂散在外。 鋪展倍率1.58
廣告顏料					無法完全聚合為一顆。 鋪展倍率1.72



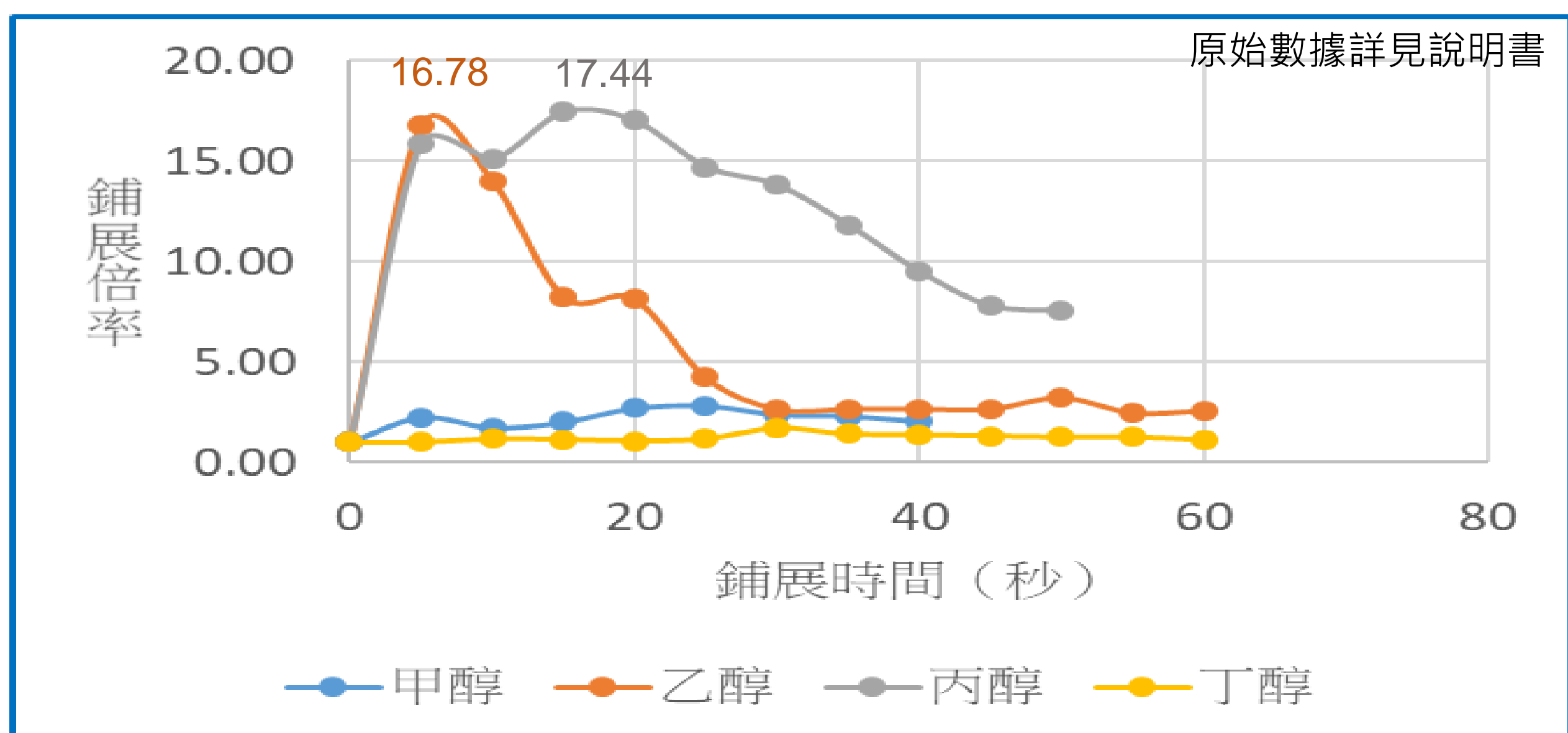
【小結】：

- 1.由鋪展時間與鋪展倍率的關係圖可以發現書法墨水的鋪展倍率最高，水性藍墨水的鋪展倍率最低。
- 2.由曲線的走向可知，墨滴在大豆沙拉油上鋪展與聚合效果最明顯，水性藍墨水最不明顯。
- 3.由實驗中發現水性藍色墨汁和廣告顏料鋪展至最大面積的時間均在5秒內，鋪展後10秒，其鋪展倍率變動較小，書法墨汁鋪展面積倍率高，且有明顯的鋪展與聚合的現象，適合用來觀察鋪展過程的物理變化。

實驗三：探討不同醇類驅動墨滴在油面上鋪展效果

【實驗者拍攝】

鋪展時間 醇類	初始墨滴	鋪展後 10 秒	鋪展後 20 秒	靜置後	
甲醇					鋪展倍率3.01
乙醇					鋪展倍率0.45
丙醇					鋪展倍率4.03
丁醇					鋪展倍率0.64



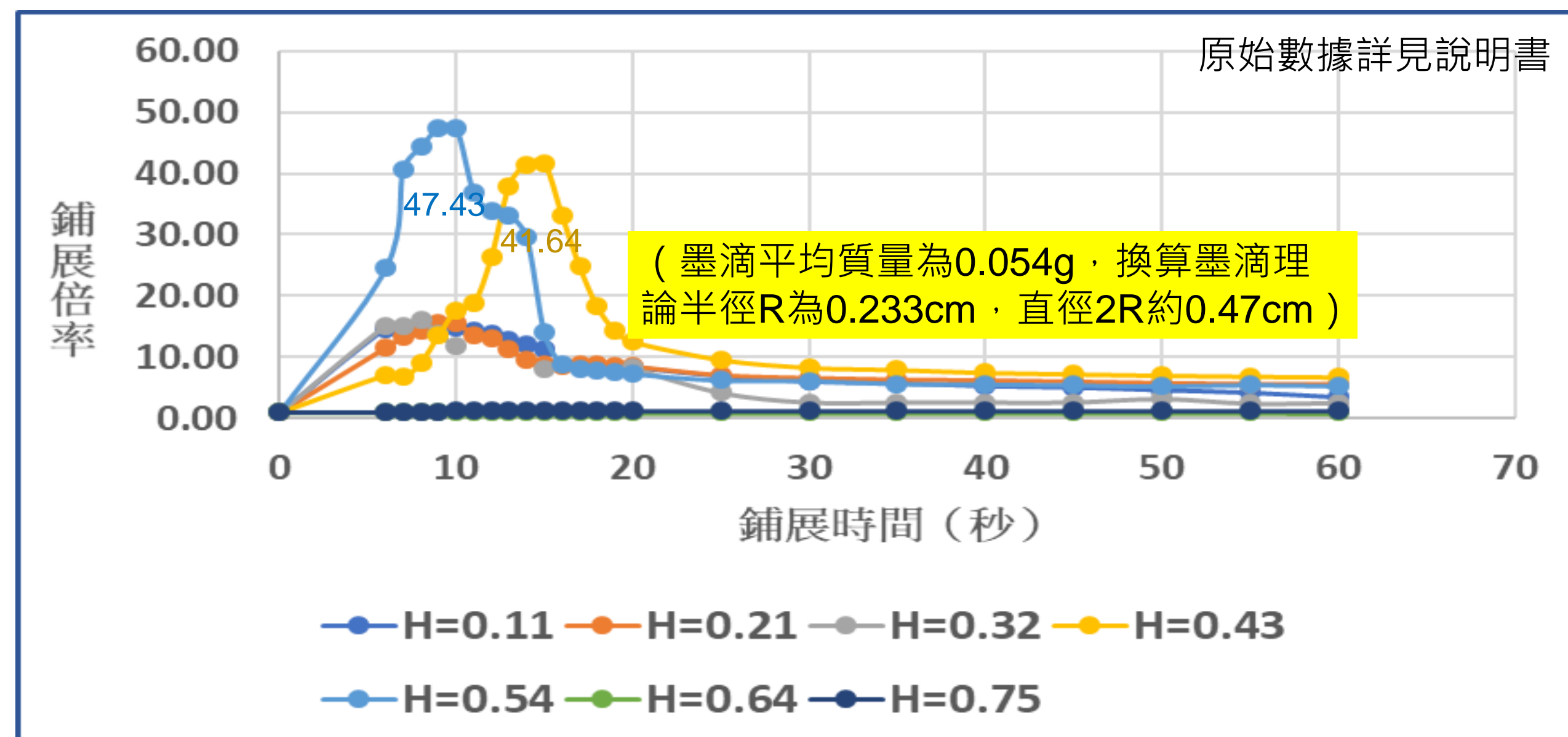
【小結】：

- 1.以0.1mL醇類驅動墨滴鋪展，面積鋪展的最高倍率大小依序為丙醇 > 乙醇 > 甲醇 > 丁醇。
- 2.從鋪展穩定性來說，丙醇在20秒內，面積會由小變大後，再縮小，再變大又再縮小；乙醇10秒內面積由小鋪展變大後，就開始變小，30秒後面積的變化就不是很明顯了，顯示丙醇鋪展變化穩定性較小，乙醇面積鋪展穩定性較高。
- 3.丁醇驅動墨滴鋪展的倍率接近1，代表鋪展效果較差。

實驗四：探討基底相深度對墨滴在油面上鋪展效果的影响

【實驗者拍攝】

油品高度	0.11cm (油 4g)	0.21cm (油 8g)	0.32cm (油 12g)	0.43cm (油 16g)	0.54cm (油 20g)	0.64cm (油 24g)	0.75cm (油 28g)
側面圖							
鋪展600秒後							
	(鋪展倍率0.33)	(鋪展倍率0.72)	(鋪展倍率0.86)	(鋪展倍率0.75)	(鋪展倍率0.54)	(鋪展倍率0.97)	(鋪展倍率1.12)

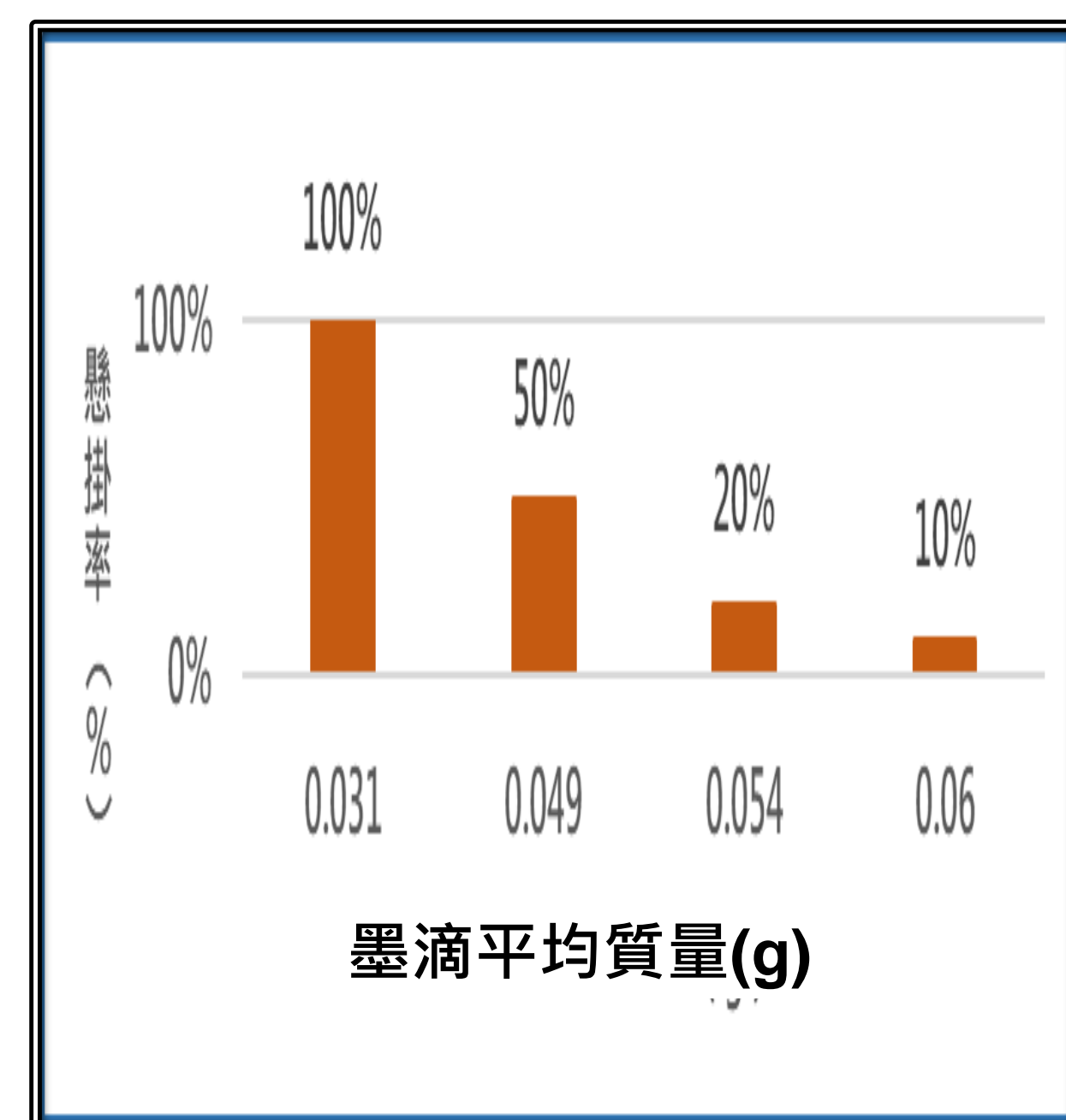


【小結】：

- 1.油品深度小於0.43cm時，此高度值小於墨滴的理論直徑，側面圖可知此時初始墨滴會以透鏡狀存在油底，墨滴上方可以酒精作用，驅動墨滴鋪展，但從鋪展600秒後鋪展倍率都還很高，表示墨滴鋪展後分散為小液滴，靜置重新再聚合的效果不佳。
- 2.油品深度為0.54cm時，雖然此值大於墨滴的理論直徑，但墨滴以花瓶狀短暫停留懸掛在油面，可被酒精驅動而鋪展，但靜置後聚合，最終墨滴還是會沉入油中，因此最終測出的面積反而比初始墨滴小。
- 3.若油品深度 (H) 大於0.64cm時，墨滴的面積幾乎沒變化，再由側面圖可知此時初始墨滴會以球狀沒入油底，表示酒精無法驅動墨滴鋪展。

實驗五：探討形成花瓶狀墨滴的質量條件

墨滴平均質量(g)	懸掛率	滴管口類別
0.031	100%	密封後以圖釘加熱後戳洞
0.049	50%	密封後以迴紋針加熱後戳洞
0.054	20%	滴管口加熱後內壓縮小
0.06	10%	原滴管 (口徑 2.2mm)



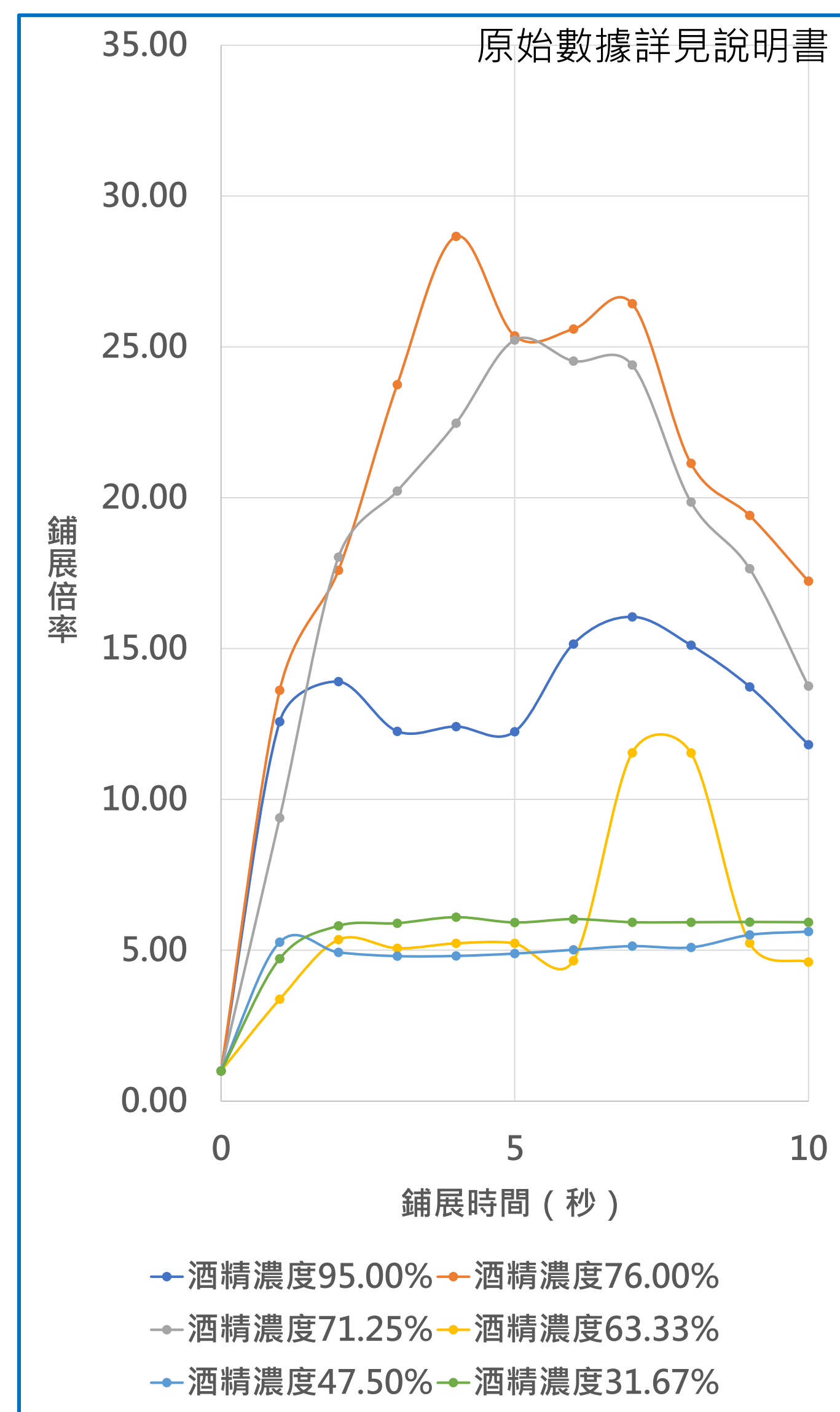
【小結】：

實驗發現當墨滴質量約在0.031g，墨滴產生的單位長度作用力小於大豆沙拉油的表面張力，所以墨滴會以花瓶狀懸吊在油面。此時密度大的液體浮在密度小的液體上，油面和墨滴的接觸面會產生一些不穩定的擾動，稱為瑞利泰勒不穩定性。

實驗六：探討酒精濃度對驅動墨滴鋪展的影响

【實驗者拍攝】

鋪展時間 醇類	初始墨滴	鋪展後 5 秒	鋪展後 10 秒
95.00%			
76.00%			
71.25%			
63.33%			
47.50%			
31.67%			



【小結】：

酒精濃度63.33%以上，可驅動墨滴鋪展。鋪展後再分散為小液滴，靜置再慢慢聚合。若酒精濃度47.50%或31.67%時只能讓墨滴產生面積鋪展，無法產生指狀邊界及分散成小液滴的情形，此濃度的酒精驅動墨滴鋪展現象不明顯。

