

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

第二名

探究精神獎

030102

探討特定因素對馬倫哥尼效應的影響

學校名稱： 桃園市立東興國民中學

作者：	指導老師：
國二 廖翊澄	陳竑廷
國一 蘇彥旭	林佩姿
國二 廖杞登	

關鍵詞： 馬倫哥尼效應、表面張力、表面能

摘要

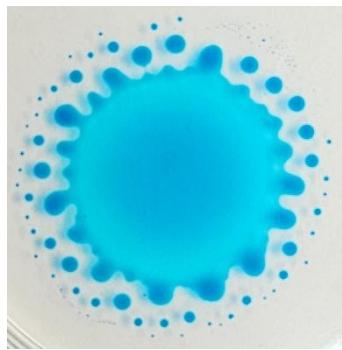
本研究探討乙醇水溶液滴入沙拉油中之液滴分裂行為，分析液滴滴落高度與有限邊界對液滴分裂行為影響。研究液滴擴散最大、分裂完成與分裂後兩分鐘的最終狀態，並修正反應時間模型。結果顯示，滴落高度越高擴散範圍與分裂液滴數量增加，最大擴展直徑呈 U 型變化，反應時間於中間高度（約 10 cm）出現局部最小。邊界越大時分裂更完整，液滴平均面積較小，邊界過小則影響母液滴為維持最小表面能而收縮、分裂的速度，使反應時間增加。首次提出液滴內縮機制，觀察到液滴分裂未完成即出現內縮（Type II 現象），由乙醇與水揮發差異導致擴散接著內縮形成圓環，為文獻未提及之新現象。整體結果補充液滴分裂行為，未來可應用於微流體與表面張力相關研究。

壹、研究動機

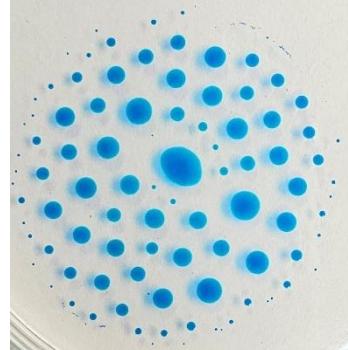
我們在網路上看到一個有趣的影片：一開始將乙醇水溶液滴在油上時（圖一），會慢慢向外擴散（圖二），最終分裂成許多更小的液滴（圖三），這引起我們的好奇，仔細搜尋後發現它是 2022 年 IYPT 的題目 Droplet Explosion，我們便開始思考是否還有其他因素會影響此現象。



圖一、現象初始狀態



圖二、中央液滴持續擴散



圖三、最終分裂許多小液滴
(照片皆作者拍攝)

一、名詞解釋與定義

為後續研究中所使用，我們就以下名詞進行解釋與定義。

(一) 名詞解釋

1. 馬倫哥尼效應 (Marangoni Effect)

是指兩種表面張力不同的流體在接觸後，表面張力高者的周圍液體拉力較強，致使表面張力低者被較高的液體所吸附並混合的現象。而無論同種液體，也會因濃度高低而產生馬倫哥尼流。

2. 普托瑞利不穩定性 (Plateau Rayleigh Instability)

液滴為了維持最小表面能，會分裂成數個總體積不變，但個別表面積較原液滴小的液滴。

3. 不確定度分析 (Measurement Uncertainty)

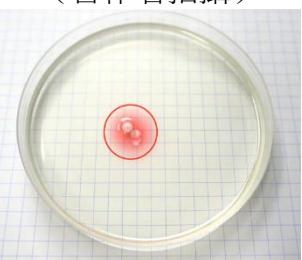
不確定度分析是在科學實驗或測量中用來評估測量結果的準確程度或可靠性的過程。在進行實驗或測量時，通常存在各種因素和限制，這些因素可能會導致測量結果的不確定性。因此，進行不確定度分析可以幫助我們了解這些不確定性的來源以及它們對最終結果的影響。

(二) 名詞定義

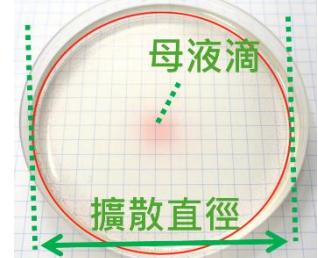
1. 液滴分裂現象

：本研究所涉指的現象為乙醇滴入油時，產生液滴分裂的現象（如上圖一至圖三），同時在本研究中發現除了液滴擴散外，液滴分裂完畢後會有回縮的現象，這也包含在本研究中對於液滴分裂現象的涉指。

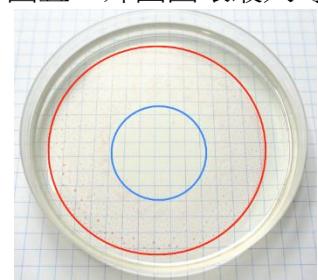
2. **有限邊界**：容器的內徑小於最大擴散直徑，稱之為有限邊界，液滴在反應過程中必定碰到邊界，反之若沒限定邊界，則稱為無限邊界。
3. **無限邊界下，液滴分裂情形**：
- (1) Type I 現象：液滴擴散後分裂成多個小液滴，符合文獻中常見之液滴分裂描述。（如圖一至圖三）
 - (2) Type II 現象：液滴分裂後形成圓環狀結構，並伴隨內縮行為，為本研究觀察到有別於文獻的新現象，為後續實驗重點探討現象。（圖四至圖七）
4. **母液滴**：當液滴滴入油面時，會產生乙醇液滴聚集處，如圖四與圖五，並且隨時間往外擴散分裂，我們定義中央擴散處為母液滴。
5. **擴散直徑**：液滴在變化過程中，所測得的外圍圓環（紅色圓環）最大直徑，如下圖五。
6. **分裂完成**：液滴擴散後開始分裂出許多小液滴，直到母液滴消失時定義為分裂完成。
7. **反應時間**：液滴一接觸到油面直至母液滴分裂完成的這段時間。
8. **內縮**：在我們實驗中發現分裂出的液滴向外擴散後，還會向內移動，在本研究中稱之為內縮，如下圖六紅色圓圈為液滴範圍，圖五是液滴擴散達最大擴散直徑時，接著，外圍液滴會向圓心移動，如圖六，藍色圓環是觀察到內部幾乎沒有液滴分裂情形，即自內部擴散出一個圓環。
9. **最終狀態**：由於我們觀察到液滴並非分裂完後就不會再變化，而是會持續內縮，因此我們將最終定義為液滴分裂完成後 2 分鐘的狀態，以便測量了解液滴的變化。而在最終狀態時若液滴以圓環狀聚集，則稱之為**最終圓環**，如圖七，此時圖六的藍線會與紅線重疊。
10. **分裂完成時直徑**：母液滴消失時的外圍圓環直徑。
11. **分裂完成時液滴數量與面積**：母液滴消失時的微小液滴數量與總面積。



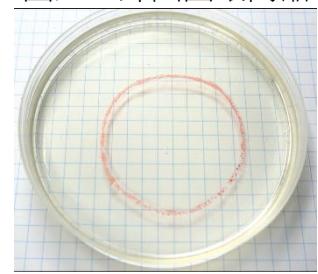
圖四、母液滴示意圖



圖五、外圍圓環最大時



圖六、外圍圓環內縮



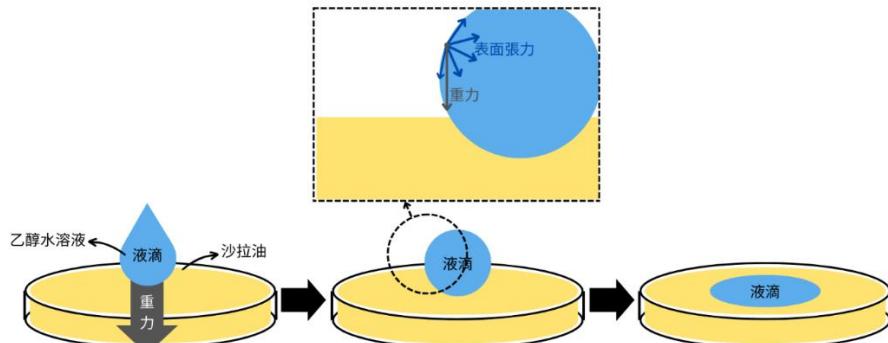
圖七、最終圓環

二、文獻回顧

伍瀚煦等(2023)曾指出，將乙醇水溶液滴在疏水性液滴，會出現液滴分裂現象，即液滴先擴散然後分裂的現象，可透過定性分析以下列四個階段說明：

(一) 重力影響

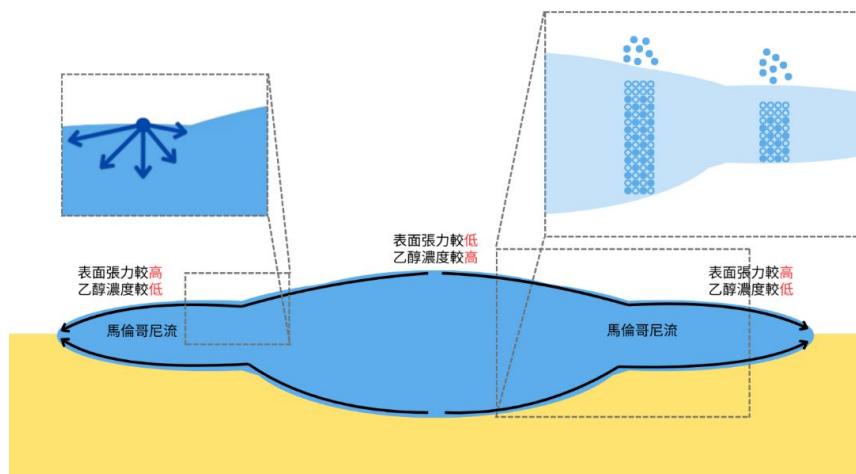
當液滴接觸油面時，由於受到的重力大於液滴的表面張力，液滴因此無法維持球形，呈現扁平狀態（如圖八所示）。



圖八、實驗下落、接觸示意圖（重新繪製自伍瀚煦等(2023)）

(二) 濃度梯度、馬倫哥尼流

由於乙醇的蒸發速率高於水，液滴邊緣較中央更薄，導致邊緣乙醇濃度下降速度較快，由於液滴中心的乙醇濃度大於液滴邊緣，且乙醇的表面張力低於水，因此液滴中心的表面張力低於液滴邊緣，形成馬倫哥尼流，促使液滴向外擴散。如圖九所示。



圖九、馬倫哥尼流成因示意圖（重新繪製自伍瀚煦等(2023)）

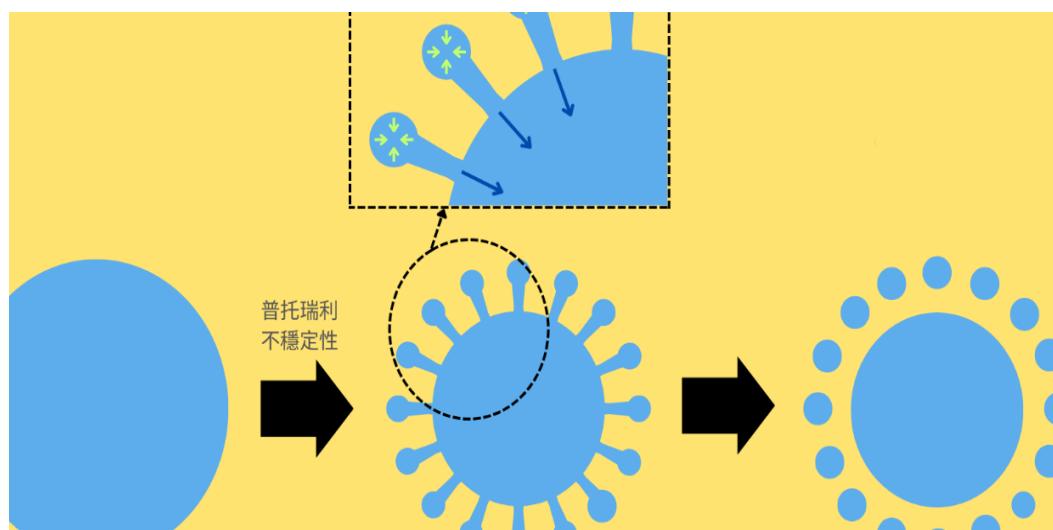
受馬倫哥尼效應驅動，液滴持續擴散，直到乙醇-油介面與乙醇-空氣介面的表面張力總和，平衡油-空氣介面的表面張力為止。

(三) 不同形狀之間的不同的表面能

為達最小表面能，母液滴傾向減少其表面積，並出現收縮現象，使液滴邊界由平滑轉變為指狀邊界。

(四) 普托瑞利不穩定性

因為液滴仍會維持最小表面能，因此指狀邊界的溶液也會向自身中心收縮，分裂成數個小液滴，此為普托瑞利不穩定性。



圖十、液滴分裂示意圖（重新繪製自伍瀚煦等(2023)）

(五) 影響液滴分裂現象之關鍵變因探討

在伍瀚煦等(2023)的研究中，進一步探討了五項影響液滴分裂現象的關鍵變因，分析其對液滴行為的影響如下：

1. 液滴乙醇濃度

當液滴乙醇濃度提高時，反應時間延長、擴散直徑增大，且最終液滴尺寸變小。原因在於乙醇濃度愈高，達到臨界濃度（液滴停止擴散時的乙醇濃度）所需時間亦愈長，液滴因此有更多時間向外擴散，擴散直徑增加。而由於液滴總體積不變，擴散更大後，最終液滴的尺寸相對減小。

2. 液滴體積

液滴體積增大時，反應時間延長、擴散直徑增大，且最終液滴尺寸也隨之增大。體積愈大，需更多時間蒸發至臨界濃度。然而，當液滴體積增加至一定程度時，其重量過大，表面張力不足以持續推動擴散，導致擴散直徑增大的趨勢受限，過剩體積則累積於最終液滴中。

3. 油層厚度

油層厚度減少時，反應時間延長、擴散直徑減小，且最終液滴尺寸增大。由於油層厚度變薄，介面層厚度固定，造成流場厚度下降，流速受限，進而延長反應時間。在液滴尚未擴散至較大範圍前，乙醇便已蒸發至臨界濃度，導致擴散直徑較小。由於總體積不變，擴散範圍縮小時，最終液滴體積相對較大。

4. 油的黏度

油的黏度提高時，反應時間延長、擴散直徑減小。黏度較高時，油層內流動速度下降，液滴擴散所需時間增加。同樣地，在尚未擴散至較大範圍前，乙醇即蒸發至臨界濃度，使擴散直徑減小。

5. 液滴蒸發速率

液滴蒸發速率提高時，反應時間縮短、擴散直徑減小。蒸發速率愈快，液滴更快達到臨界濃度，液滴分裂現象亦更迅速完成，整體擴散時間縮短，擴散範圍隨之減小。

Keiser, L 等人 (2017) 提出以上變因與液滴擴散可由以下兩個方程式加以概括說明：

$$R^* = \left[\frac{(\phi_0 - \phi_c)\Delta\gamma H\Omega_0}{(1 - \phi_c)\eta_o j_v} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{式一}$$

$$\tau = \frac{R^*}{V} = \left[\frac{(\phi_0 - \phi_c)\eta_o \Omega_0}{(1 - \phi_c)\Delta\gamma H j_v} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式二}$$

其中 R^* 為初始液滴的特徵半徑， ϕ_0 為液滴初始乙醇濃度， ϕ_c 為液滴停止擴散時的乙醇濃度（臨界濃度）， $\Delta\gamma$ 為乙醇濃度為 ϕ_c 時與乙醇濃度為 ϕ_0 時的表面張力差， H 為油厚， Ω_0 為液滴的初始體積， η_o 為油的黏度， j_v 為乙醇的蒸發通量， τ 為反應時間， V 為馬倫哥尼流的流速。

從式一中我們看出，初始液滴的特徵半徑 R^* 是由多個因素共同影響的。當液滴初始濃度 (ϕ_0) 和臨界濃度 (ϕ_c) 差距大時，液滴會花費較久時間使濃度下降至 ϕ_c ，因而有更多的反應與擴散的時間。其次，兩者的表面張力差 ($\Delta\gamma$) 的值越大，意味著濃度 ϕ_0 時和濃度 ϕ_c 的表面差較大。相對的，馬倫哥尼流的反應也會較為劇烈。接著，之所以油越厚 (H)，擴散得越遠，是因為當油層較薄，液滴的流動會受到固體表面的影響，摩擦力也相對較大，擴散的阻力也會增加。而初始液滴的量，則會讓液滴花費更多的時間蒸發至臨界濃度 ϕ_c ，因而有較長的擴散時間。

分母項的 $(1 - \phi_c)$ 越大，代表濃度下降範圍變小，導致擴散距離相對縮小。 η_o 則是油的黏度，黏度越高則意味著液滴擴散的阻力越大，因而擴散範圍較小。而蒸發通量越高，便會加快 ϕ_0 至 ϕ_c 的反應過程而導致擴散時間的減少。

式二則進一步揭示了反應時間 τ 、特徵半徑 R^* 與馬倫哥尼流流速 V 之間的關係。與式一相呼應，分母項 $(\phi_0 - \phi_c)\eta_o \Omega_0$ 均會延長反應時間。而式二分母部分，之所以式一位在分子的在式二為分子，是因為馬倫哥尼流的現象產生目的是使液滴整體到達臨界濃度，因此，加快該現象的 $\Delta\gamma$ 和 H 會使液滴更快到達臨界濃度，進而停止反應。

綜合文獻可知，現有研究多著重於液滴擴散與分裂現象中的基本影響因素，如液滴濃度、體積及油層性質，對於滴落高度與有限邊界的影響則無探討。此外，液滴分裂後外圍圓環出現向內收縮，其形成原因及不同分裂形態下的變化機制，至今尚無明確說明。上述缺口為本研究關注重點，期望能補充現有理解。

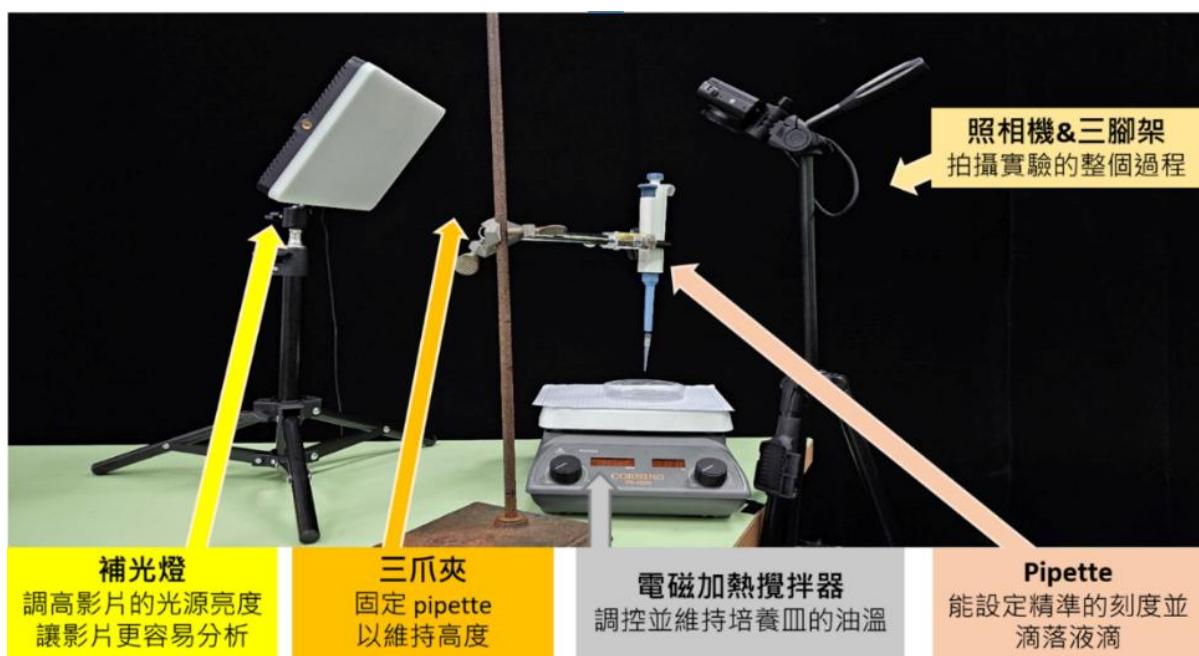
貳、研究目的

- 一、探討不同滴落高度對乙醇液滴於沙拉油中擴散與分裂行為之影響。
- 二、將液滴滴落高度作為參數納入物理建模，建立與擴散及分裂行為相關之理論分析。
- 三、改變容器大小，觀察並分析有限邊界條件下乙醇液滴之擴散與分裂現象。
- 四、探究乙醇液滴分裂後出現內縮現象的成因。

參、研究設備及器材

本研究所使用之液體材料為 95% 乙醇與沙拉油，並添加食用色素以利觀察液滴擴散行為。液體操作器材包含 Pipette 微量吸管與吸管尖、100 mL 燒杯、玻棒、滴管、量筒及鐵尺。為監控實驗條件，配備溫度計監測液體溫度，影像記錄則使用數位相機搭配腳架與補光燈，以提升畫面清晰度。液滴滴落高度由鐵架臺與三爪夾固定調整，確保實驗過程中高度一致，如圖十一。

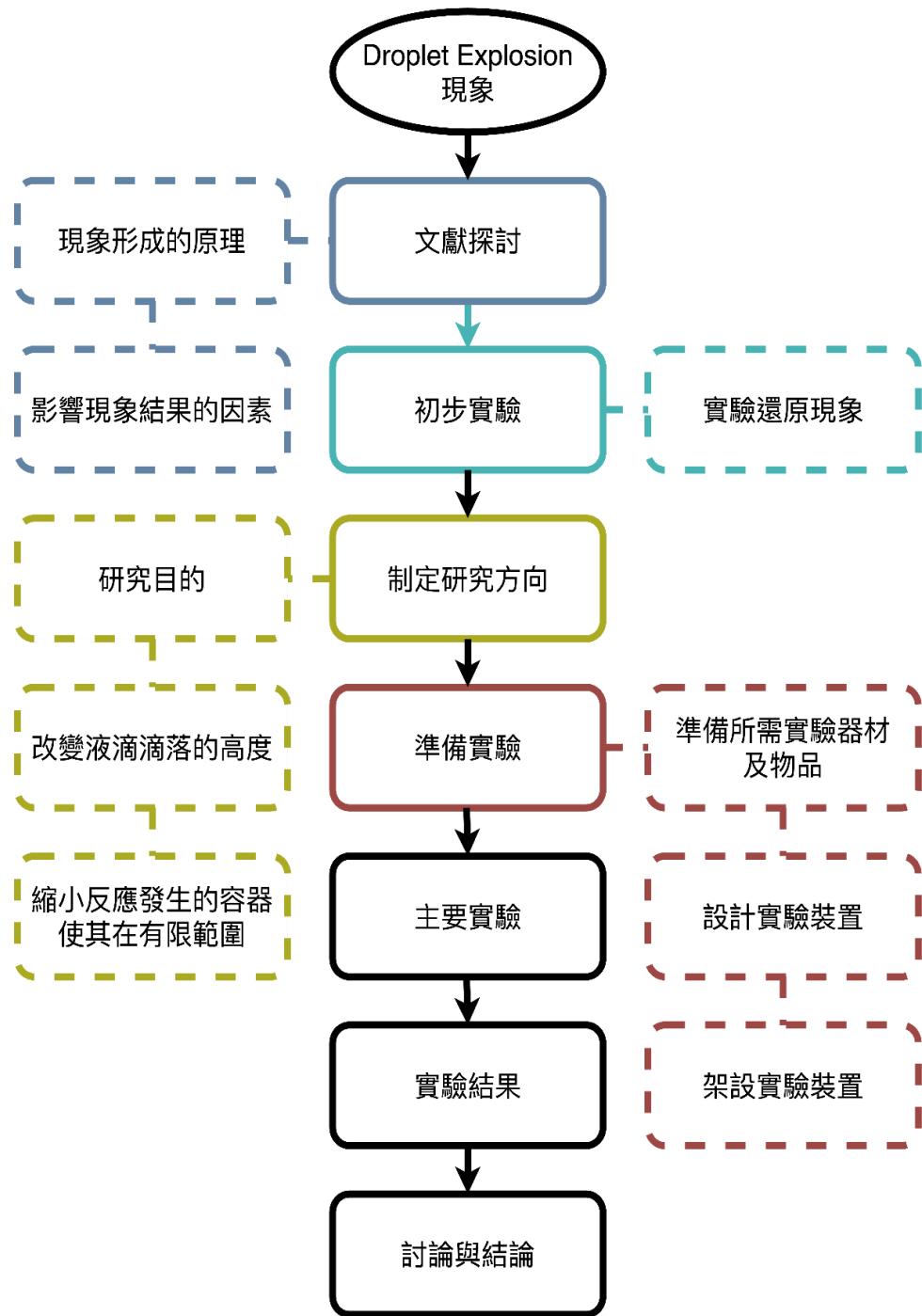
針對**液滴滴落高度變化實驗**，液滴滴落於培養皿中進行，此實驗中液滴擴散範圍不會接觸容器邊緣。針對**有限邊界實驗**，液滴滴落於內徑分別為 1.4 cm、1.9 cm、2.4 cm、2.9 cm 及 3.4 cm 之塑膠圓盒中，**擴散範圍必定接觸邊界**，以模擬有限邊界條件下之擴散與分裂行為。



圖十一、實驗裝置設備圖（作者拍攝）

肆、研究過程或方法

一、研究流程



圖十二、研究流程圖（作者自製）

二、前導實驗

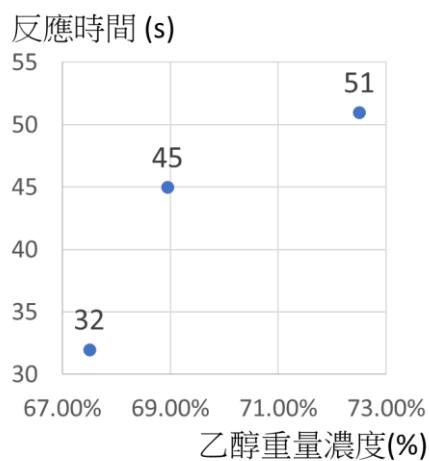
在閱讀相關文獻並充分理解液滴分裂現象的形成機制後，研究團隊首先依據文獻中所述方法設計實驗流程，並準備所需器材以嘗試還原該現象。實驗中進一步改變乙醇濃度，測量反應時間及最大擴散半徑，並觀察結果是否符合理論公式之預測。

(一) 還原現象實驗

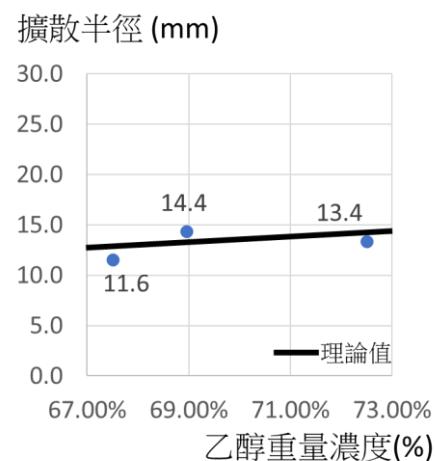
將 75% 乙醇、沙拉油與紅色食用色素混合製備染色乙醇溶液，將沙拉油倒入培養皿內，使用滴管將染色乙醇滴加於培養皿中央，並以平板電腦錄影觀察液滴擴散與分裂現象。

(二) 改變濃度（本段落數據圖皆由作者自繪）

分別調配重量濃度為 72.5%、70% 及 67.5% 乙醇溶液。實驗前將室溫穩定控制於約 21 °C，沙拉油溫度維持於 30 °C，液滴體積設定為 50 μL，滴落高度為距油面 3 cm。過程中以數位相機錄影，並量測反應時間及最大擴散半徑進行分析。



圖十三、不同乙醇濃度的母液滴最大擴散半徑 圖十四、不同乙醇濃度的反應時間



(三) 前導實驗結果

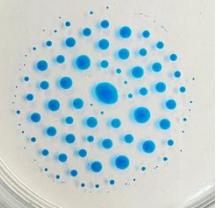
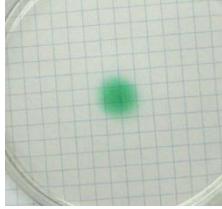
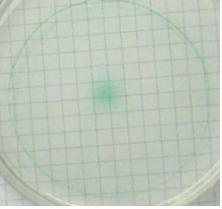
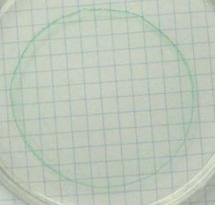
1. 文獻現象重現與理論趨勢驗證

在不同濃度條件下進行實驗後，我們成功重現文獻中所描述之液滴分裂現象。進一步測量相關物理參數並透過理論模型進行計算後，發現實驗所得之反應時間整體趨勢與理論預測相符。由此可確認現有實驗架設具備穩定性與可行性，已可作為後續深入探討之基礎。

2. 發現不同液滴分裂現象

在前導實驗時，起初並未控制室溫，竟意外觀察到兩種不同液滴分裂現象，部分液滴分裂後形成圓環狀，與既有文獻所述不同。液滴分裂現象可區分為以下兩種類型，Type I 現象與文獻中所描述之液滴分裂行為一致；Type II 則為本研究新發現，亦為後續實驗之主要探討對象，如下表一。

表一、液滴不同分裂現象（作者拍攝）

種類	現象描述	滴落瞬間	擴散最大	分裂完成
Type I	擴散後分裂數個小液滴			
Type II	擴散後分裂成圓環狀			

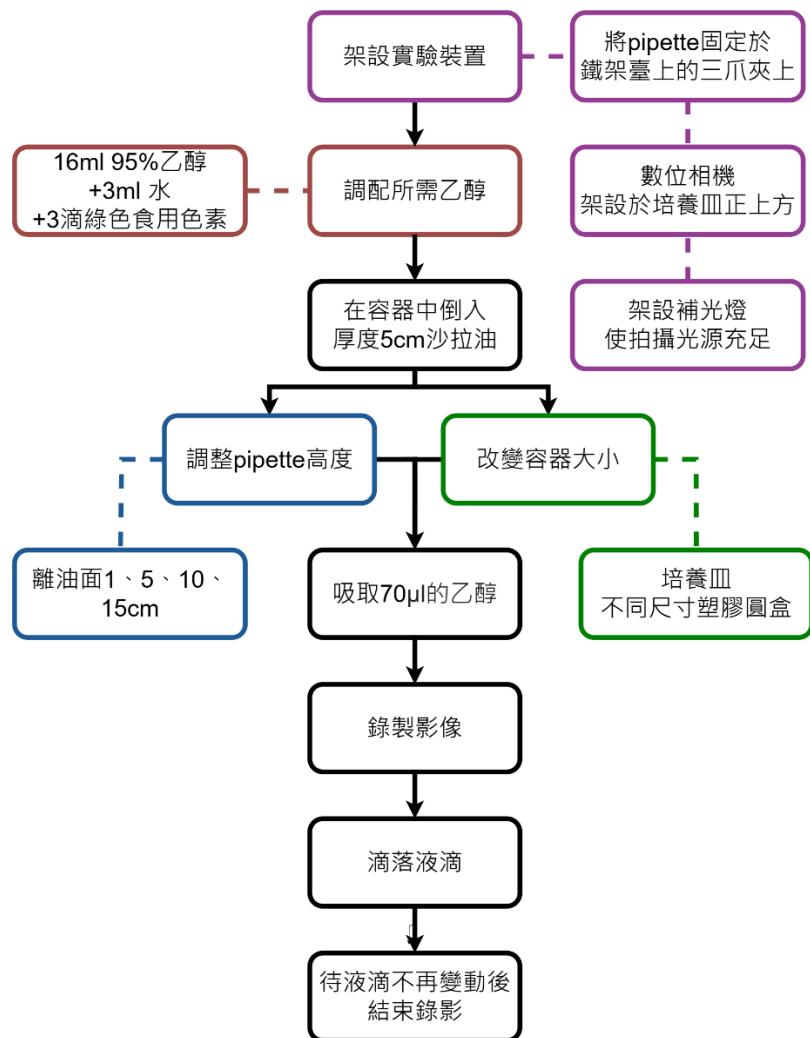
經仔細比對控制變因後，我們發現分裂現象差異與液滴內縮速度有關。Type I 現象中，液滴於分裂完成後才開始出現內縮；而在 Type II 現象中，分裂後液滴外擴受限較快，因油溫較高致液滴邊緣水分蒸發加速，進一步改變液滴邊緣與中心之表面張力梯度（由於水之表面張力大於乙醇），驅動液滴向內縮。此內縮現象於分裂完成前即已出現，且部分內縮液滴會與尚在外擴之液滴接觸融合，導致分裂速度減緩，最終形成較穩定且易觀察之圓環結構，並伴隨反應時間延長。

綜合觀察結果，我們推論 Type I 與 Type II 現象之主要差異，源自油溫高於室溫所產生之溫差效應。

完成定性實驗後，本研究將控制變因設定為：乙醇濃度 76%、液滴體積 70 μL 、油層厚度 0.5 cm、油溫 30 °C、室溫 21 °C、相對濕度約 40%。並以 Type II 現象為主要觀察對象，進一步進行液滴滴落高度及有限邊界條件之系統性實驗。

三、實驗流程

我們根據定性實驗，發展如下圖十五的實驗流程



圖十五、實驗流程圖（作者自製）

四、實驗 1：

改變初始液滴滴落的高度，觀察液滴擴散與分裂現象

本實驗旨在探討不同初始液滴滴落高度對液滴擴散與分裂行為之影響。推測隨滴落高度增加，液滴受重力影響，在接觸油面後展開面積將增大，進而影響最大擴散半徑。

(一) 關於實驗 1 的實驗設計

參考伍瀚煦等(2023)之科展作品「液滴爆炸」之方法，實驗設定固定條件為油層厚度 0.5 cm、乙醇濃度 76%、液滴體積 70 μL 。變因為液滴滴落高度，分別設為 1 cm、5 cm、10 cm 及 15 cm，搭建成實驗裝置進行觀測。

(二) 實驗步驟

1. 調配重量百分濃度 76% 染色乙醇溶液（食用色素比例保持一致）。
2. 將微量吸管固定於指定高度（吸管尖端至油面距離為 1、5、10、15 cm）。
3. 使用 Pipette 吸取 70 μL 染色乙醇溶液。
4. 將液滴滴入盛有 0.5 cm 厚沙拉油之培養皿中央，並以數位相機錄影紀錄實驗過程。
5. 當液滴完成擴散、分裂與內縮，現象穩定後結束錄影。

五、實驗 2：改變容器大小，觀察有限邊界下液滴擴散與分裂現象

本實驗旨在探討當液滴擴散範圍受限時，對液滴擴散與分裂行為之影響。推測容器越小，液滴擴散範圍受限，最終液滴尺寸將增大。

(二) 關於實驗 2 的實驗設計

實驗設定與實驗 1 相同，固定條件為油層厚度 0.5 cm、乙醇濃度 76%、液滴體積 70 μL 。變因為盛裝沙拉油之容器大小，內徑分別為 1.4 cm、1.9 cm、2.4 cm、2.9 cm 及 3.4 cm，搭建成實驗裝置進行觀測。

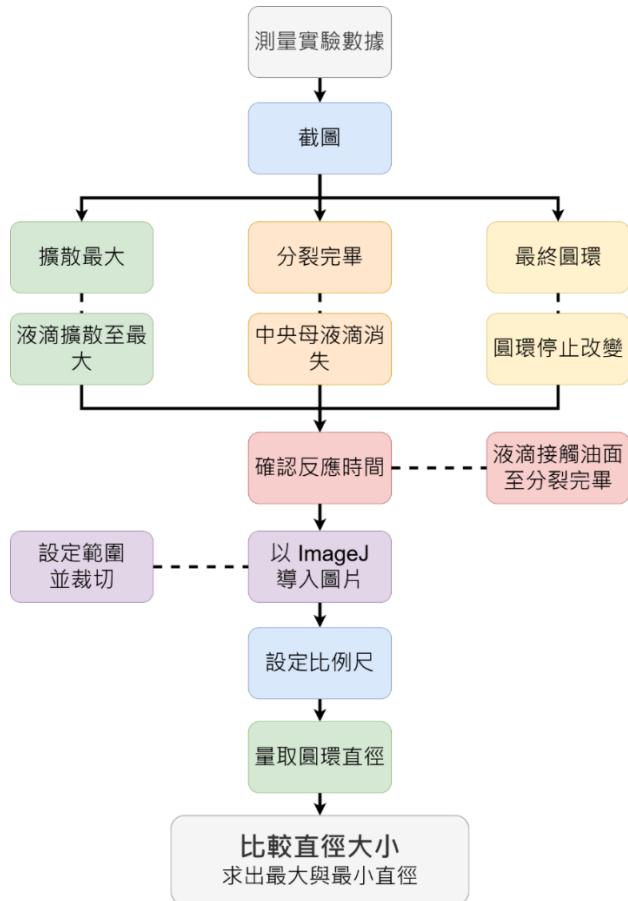
(三) 實驗步驟

1. 調配重量百分濃度 76% 染色乙醇溶液（食用色素比例保持一致）。
2. 將微量吸管固定於 5 cm 高度（吸管尖端至油面距離）。
3. 使用 Pipette 吸取 70 μL 染色乙醇溶液。
4. 將液滴滴入盛有 0.5 cm 厚沙拉油、內徑分別為 1.4、1.9、2.4、2.9、3.4 cm 之塑膠圓盒，並以數位相機錄影紀錄實驗過程。
5. 當液滴完成擴散、分裂與內縮，現象穩定後結束錄影。

六、實驗數據的測量與計算方式

本次研究中是透過 ImageJ 做為主要分析工具，其測量方式可以以下圖表示

(一) 測量數據流程



圖十六、測量數據流程圖（作者自製）

(二) 取反應時間數值

開啟錄影影片，觀察液滴擴散、分裂與聚合過程。當液滴停止擴散並逐漸聚合，中央液滴完全消失（即分裂完成）時，記錄液滴接觸油面至分裂完成所耗費之總時長，作為該次實驗之反應時間。

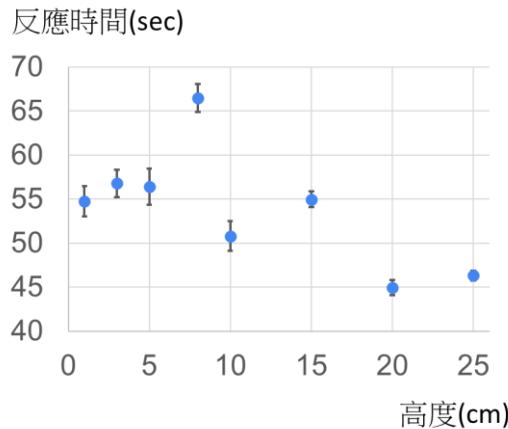
(三) 最大與最小直徑計算

1. 開啟 ImageJ 軟體，匯入待分析之圖片。
2. 使用 Rectangle 工具選取分析區域，並執行裁切。
3. 以 Straight 工具測量方格紙上一格距離 (5 mm)，設定比例尺 (Set Scale)。
4. 拉取圓環兩側直徑並執行測量，讀取結果中的 Length 值。
5. 重複測量多次，取最大與最小值作為該圓環之最大與最小直徑。

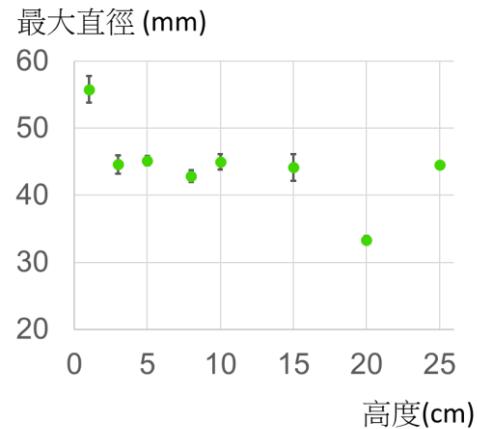
伍、研究結果

一、不同初始液滴滴落高度（本段落數據圖皆由作者自繪）

圖十七到二十四分別為不同初始液滴滴落高度，形成液滴分裂現象的反應時間、最大擴散直徑、分裂完成時直徑以及分裂完成時液滴數量與面積，依據實驗結果所得的數據繪製的圖表。



圖十七、不同初始液滴滴落高度的反應時間



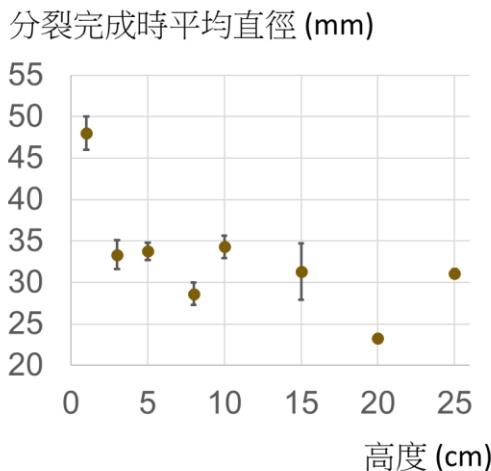
圖十八、不同初始液滴滴落高度的最大擴散直徑

不同初始液滴滴落高度的反應時間依序為：1.0 cm 為 54.77 ± 1.74 秒；3.0 cm 為 56.81 ± 1.56 秒；5.0 cm 為 56.40 ± 2.07 秒；8.0 cm 為 66.51 ± 1.60 秒；10.0 cm 為 50.81 ± 1.69 秒；15.0 cm 為 54.99 ± 0.92 秒；20.0 cm 為 44.96 ± 0.84 秒；25.0 cm 為 46.32 ± 0.54 秒，如圖十七。

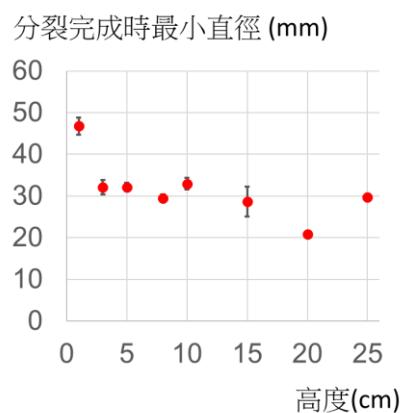
不同初始液滴滴落高度的最大擴散直徑依序為：1.0 cm 為 55.76 ± 1.99 mm；3.0 cm 為 44.40 ± 1.40 mm；5.0 cm 為 45.16 ± 0.73 mm；8.0 cm 為 42.88 ± 0.88 mm；10.0 cm 為 44.98 ± 1.11 mm；15.0 cm 為 44.17 ± 1.99 mm；20.0 cm 為 33.31 ± 0.58 mm；25.0 cm 為 44.50 mm，如圖十八。

不同初始液滴滴落高度的分裂完成時平均直徑：1.0 cm 為 47.99 ± 2.02 mm；3.0 cm 為 33.33 ± 1.75 mm；5.0 cm 為 33.76 ± 1.06 mm；8.0 cm 為 28.63 ± 1.34 mm；10.0 cm 為 34.31 ± 1.37 mm；15.0 cm 為 31.32 ± 3.40 mm；20.0 cm 為 21.53 ± 0.21 mm；25.0 cm 為 31.04 ± 0.59 mm，如圖十九。

不同初始液滴滴落高度的分裂完成時最大直徑：1 cm 為 49.19 ± 2.00 mm；3 cm 為 34.54 ± 1.77 mm；5 cm 為 35.38 ± 1.20 mm；8 cm 為 30.97 ± 0.89 mm；10 cm 為 35.66 ± 1.37 mm；15 cm 為 34.02 ± 3.24 mm；20 cm 為 25.77 ± 0.30 mm；25 cm 為 32.37 ± 0.41 mm，如圖二十。

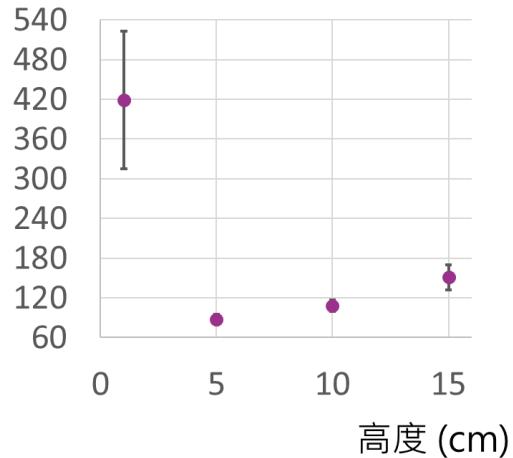


圖十九、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時平均直徑



圖二十、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時最大直徑

分裂完成時液滴數量 (個)



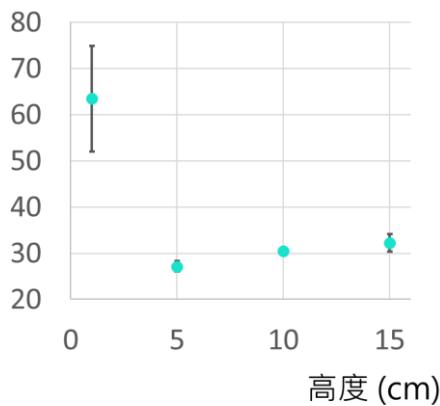
圖二十一、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時最小直徑

圖二十二、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時液滴數量

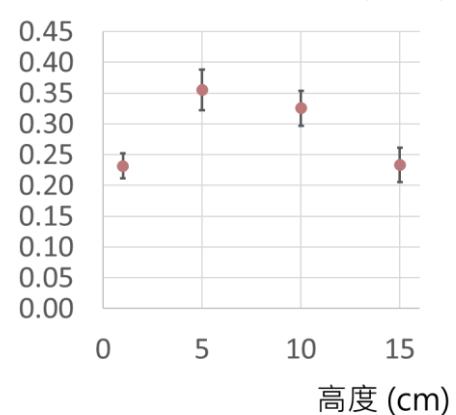
不同初始液滴滴落高度的分裂完成時最小直徑：1.0 cm 為 46.79 ± 2.03 mm；3.0 cm 時降至 32.13 ± 1.74 mm；5.0 cm 時降至 32.14 ± 0.96 mm；8.0 cm 為 29.52 ± 0.92 mm；10.0 cm 為 32.94 ± 1.41 mm；15.0 cm 時則上升至 28.62 ± 3.58 mm；20.0 cm 時則上升至 20.78 ± 0.27 mm；25.0 cm 時則上升至 29.7 ± 0.53 mm，如圖二十一。

不同初始液滴滴落高度的分裂完成時液滴數量：1.0 cm 為 419.20 ± 103.82 個；5.0 cm 為 87.80 ± 6.95 個；10.0 cm 為 108.00 ± 8.49 個；15.0 cm 為 151.33 ± 18.90 個。我們可以發現：數據在 5.0 cm 時降至相對低點，隨後隨高度上升而回升，整體呈 U 型趨勢，如圖二十二。

分裂完成時液滴面積總和 (mm^2)



分裂完成時液滴面積平均 (mm^2)



圖二十三、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時液滴面積總和

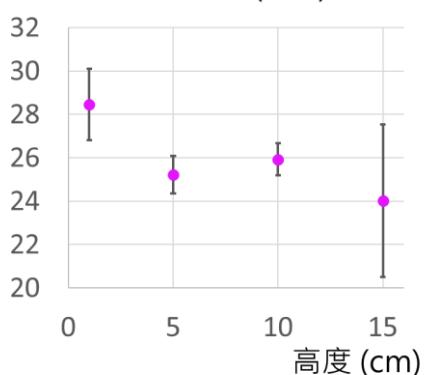
圖二十四、不同初始液滴滴落高度的
分裂完成時液滴面積平均

不同初始液滴滴落高度的分裂完成時液滴面積總和：1.0 cm 為 $63.49 \pm 11.45 \text{ mm}^2$ ；5.0 cm 為 $27.13 \pm 1.18 \text{ mm}^2$ ；10.0 cm 為 $30.49 \pm 0.69 \text{ mm}^2$ ；15.0 cm 為 $32.22 \pm 1.90 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：數據在 5.0 cm 時降至相對低點，隨後隨高度上升而回升，整體呈 U 型趨勢，如圖二十三。

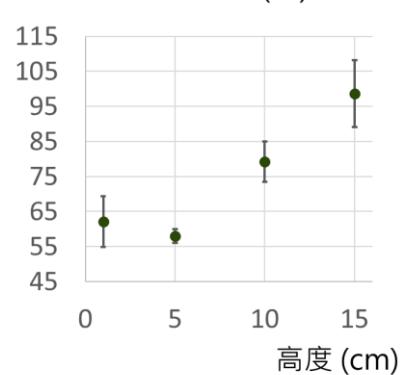
不同初始液滴滴落高度的分裂完成時液滴面積平均為：1.0 cm 為 $0.23 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ ；5.0 cm 為 $0.36 \pm 0.03 \text{ mm}^2$ ；10.0 cm 為 $0.33 \pm 0.03 \text{ mm}^2$ ；15.0 cm 為 $0.23 \pm 0.03 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：整體呈現波動但無單調明顯趨勢，如圖二十四。

另外，我們還觀察到文獻當中沒有提到的現象，在液滴分裂完成後（取樣為分裂完 2 分鐘後），最終會以一個圓環的形狀聚集，部分分裂後的小液滴會聚合變成一個較大的液滴。圖二十五到圖三十分別為該圓環的直徑、圓環上液滴的數量與面積。

最終圓環平均直徑 (mm)



最終圓環上液滴數量 (個)

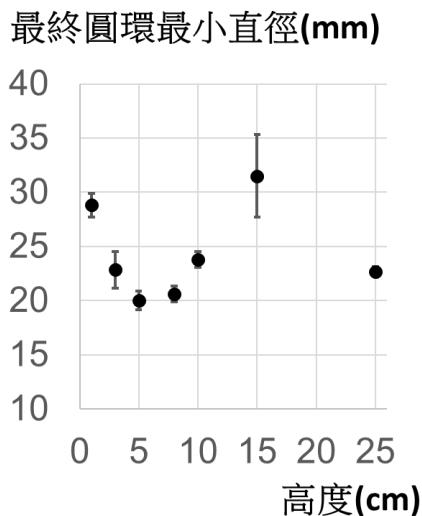


圖二十五、不同初始液滴滴落高度的
最終圓環平均直徑

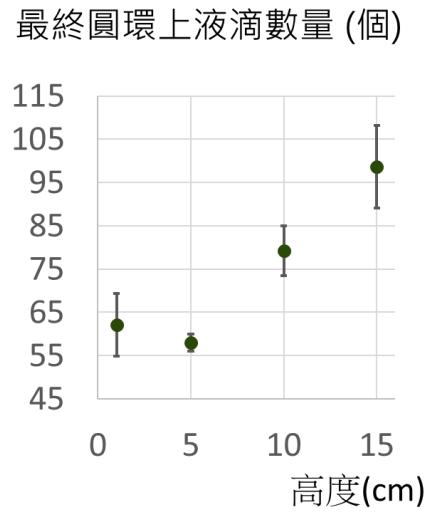
圖二十六、不同初始液滴滴落高度的
最終圓環最大直徑

不同初始液滴滴落高度的最終圓環平均直徑為：1.0 cm 為 28.72 ± 1.65 mm；3.0 cm 為 25.22 ± 1.79 mm；5.0 cm 為 25.22 ± 0.86 mm；8.0 cm 為 22.04 ± 1.05 mm；10.0 cm 為 25.93 ± 0.75 mm；15.0 cm 為 33.31 ± 3.52 mm；25.0 cm 為 23.72 ± 0.17 mm，如圖二十五。

不同初始液滴滴落高度的最終圓環最大直徑為：1.0cm 為 28.64 ± 2.60 mm；3.0 cm 為 24.89 ± 1.93 mm；5.0 cm 為 27.57 ± 0.89 mm；8.0 cm 為 22.35 ± 0.79 mm；10.0 cm 為 28.05 ± 0.79 mm；15.0 cm 為 25.86 ± 3.21 mm；25.0 cm 為 24.40 ± 0.08 mm。我們可以發現：液滴滴落高度與最終圓環最大直徑較無關，如圖二十六。



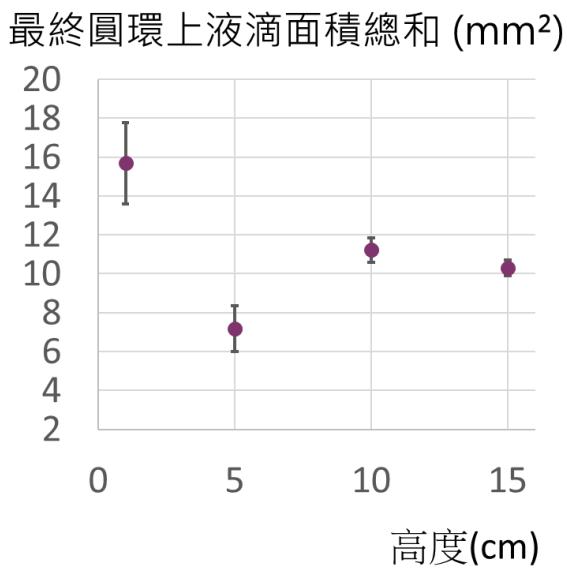
圖二十七、不同初始液滴滴落高度的最終
圓環最小直徑



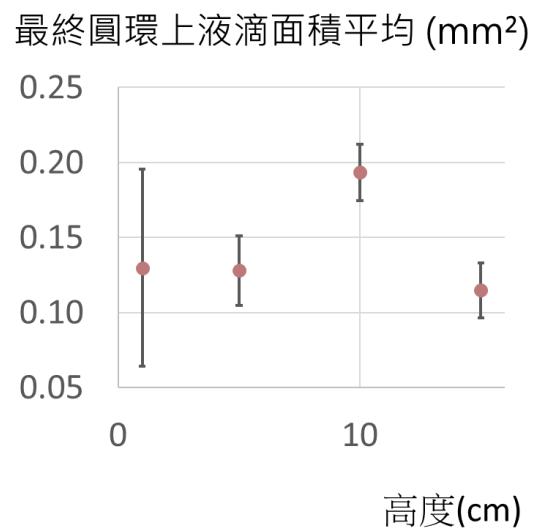
圖二十八、不同液滴滴落高度的最終圓環
上液滴數量

不同初始液滴滴落高度的最終圓環最小直徑：1.0cm 為 28.80 ± 1.10 mm；3.0 cm 為 22.87 ± 1.69 mm；5.0 cm 為 20.02 ± 0.89 mm；8.0 cm 為 20.62 ± 0.79 mm；10.0 cm 為 23.81 ± 0.79 mm；15.0 cm 為 31.51 ± 3.83 mm；25.0 cm 為 22.69 ± 0.42 mm。我們可以發現：液滴滴落高度與最終圓環最小直徑較無關，如圖二十七。

不同液滴滴落高度的最終圓環上液滴數量：1.0cm 為 62.17 ± 7.27 個；5.0 cm 為 58.00 ± 1.97 個；10.0 cm 為 79.20 ± 5.80 個；15.0 cm 為 98.67 ± 9.58 個。我們可以發現：數據在 5.0 cm 時降至相對低點，隨後逐漸上升，整體大致呈現液滴滴落高度越高，最終圓環上液滴數量越多，如圖二十八。



圖二十九、不同液滴滴落高度的最終圓環上液滴面積總和

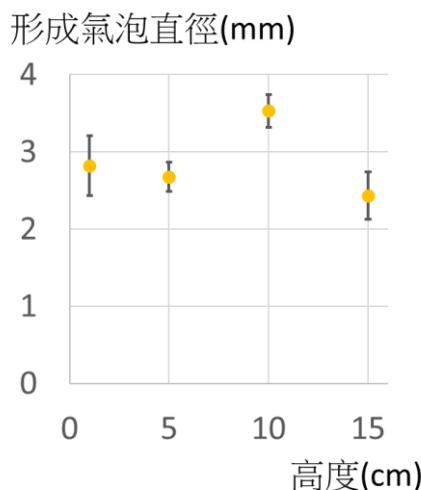


圖三十、不同液滴滴落高度的最終圓環上液滴面積平均

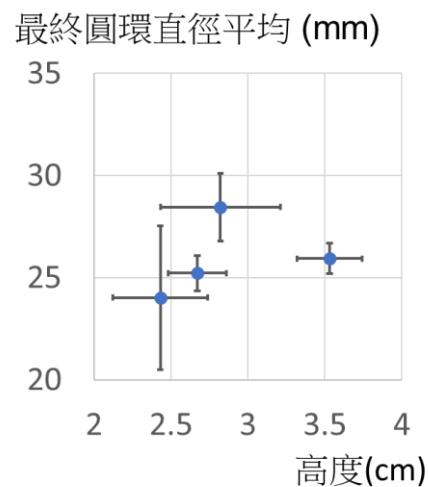
不同液滴滴落高度的最終圓環上液滴面積總和為：1.0 cm 為 $15.69 \pm 2.10 \text{ mm}^2$ ；5.0 cm 為 $7.17 \pm 1.20 \text{ mm}^2$ ；10.0 cm 為 $11.22 \pm 0.62 \text{ mm}^2$ ；15.0 cm 為 $10.30 \pm 0.40 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：整體呈現波動但無單調明顯趨勢，如圖二十九。

不同液滴滴落高度的最終圓環上液滴面積平均為：1.0 cm 為 $0.13 \pm 0.07 \text{ mm}^2$ ；5.0 cm 為 $0.13 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ ；10.0 cm 為 $0.19 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ ；15.0 cm 為 $0.11 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：整體呈現波動但無單調明顯趨勢，如圖三十。

從實驗紀錄影像中，我們發現液滴滴落時都有形成氣泡，推測氣泡直徑與液滴滴落高度無關，但可能會與其他實驗結果相關，因此也做了數據分析，如圖三十一與圖三十二。



圖三十一、不同初始液滴滴落高度形成的氣泡直徑



圖三十二、最終圓環直徑平均與形成氣泡直徑之關係

1.0cm 最終圓環直徑平均為 28.45 ± 1.65 mm、形成氣泡直徑為 2.82 ± 0.39 mm；5.0cm 最終圓環直徑平均為 25.22 ± 0.86 mm、形成氣泡直徑為 2.67 ± 0.19 mm；10.0cm 最終圓環直徑平均為 25.93 ± 0.75 mm、形成氣泡直徑為 3.53 ± 0.21 mm；15.0cm 最終圓環直徑平均為 24.02 ± 3.52 mm、形成氣泡直徑為 2.43 ± 0.31 mm。我們可以發現：數據在氣泡直徑為 2.9 cm 時升至相對高點，隨後逐漸下降，最終圓環直徑平均與氣泡直徑整體呈倒 U 型趨勢。

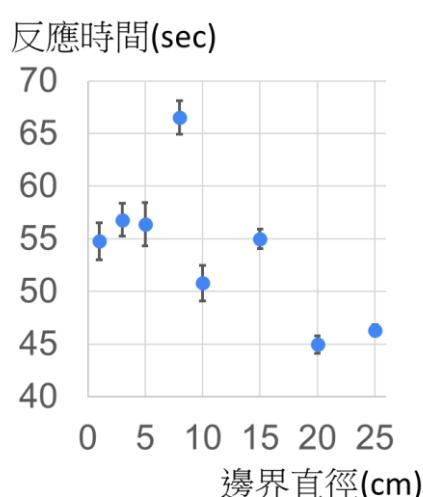
二、不同容器邊界大小，有限邊界下液滴分裂現象（本段落數據圖皆由作者自繪）

有限邊界下液滴分裂現象有別於無限邊界時的情形，如下表二所示，我們將於後文詳盡討論細節。

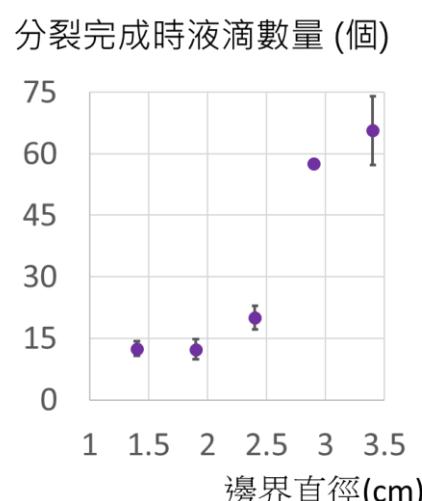
表二、有限邊界下，不同時刻液滴分裂現象

現象				
時刻 (s)	0	15	40	80
現象				
時刻 (s)	90	180	210	> 300

圖三十三到圖三十六分別為不同容器邊界大小，形成液滴分裂現象的反應時間以及分裂完成時液滴數量與面積，依據實驗結果所得的數據繪製的圖表。



圖三十三、不同容器邊界大小
的反應時間

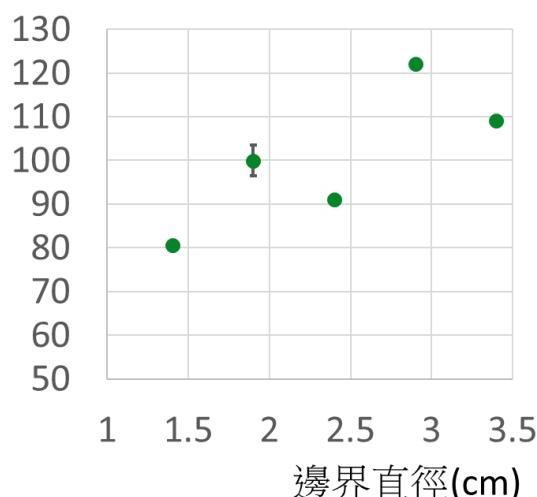


圖三十四、不同容器邊界大小
的分裂完成時液滴數量

反應時間在邊界為 1.4 cm 時最長，為 401.39 ± 21.83 秒。1.9 cm 時降至 227.58 ± 1.88 秒，2.4 cm 為 280.92 ± 13.93 秒，2.9 cm 為 223.72 ± 25.50 秒，3.4 cm 為 232.05 ± 25.59 秒。我們可以發現：在小邊界限制展開，邊緣環破裂延遲，反應時間長；邊界增加使展開與破裂加速，反應時間下降後趨穩，如圖三十三。

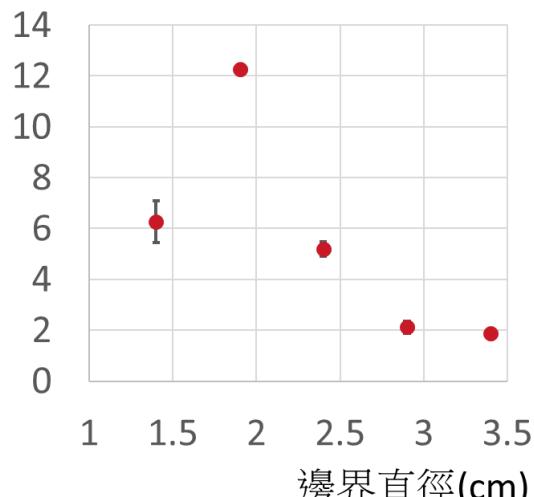
分裂完成時液滴數量隨容器邊界直徑增加而呈現明顯上升趨勢。當邊界為 1.4 cm 時，液滴數量為 12.5 ± 1.8 個；1.9 cm 時為 12.33 ± 2.5 個；至 2.4 cm 增為 20.0 ± 2.9 個；2.9 cm 時大幅上升至 57.67 ± 0.6 個；在 3.4 cm 時達到最高值 65.67 ± 8.3 個。我們可以發現：在邊界越大，液滴展開越完全，分裂點越多，因此液滴數量增加，如圖三十四。

分裂完成時液滴面積總和 (mm^2)



圖三十五、不同容器邊界大小的
分裂完成時液滴面積總和

分裂完成時液滴面積平均(mm^2)

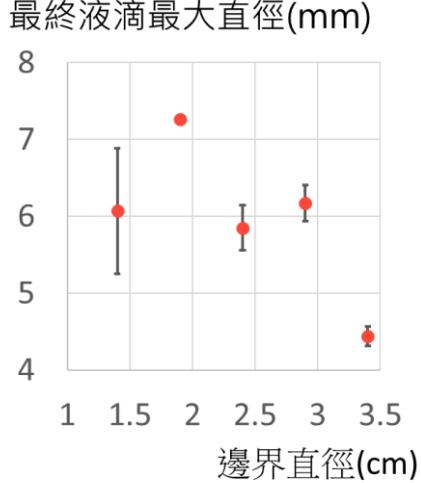


圖三十六、不同容器邊界大小的
分裂完成時液滴面積平均

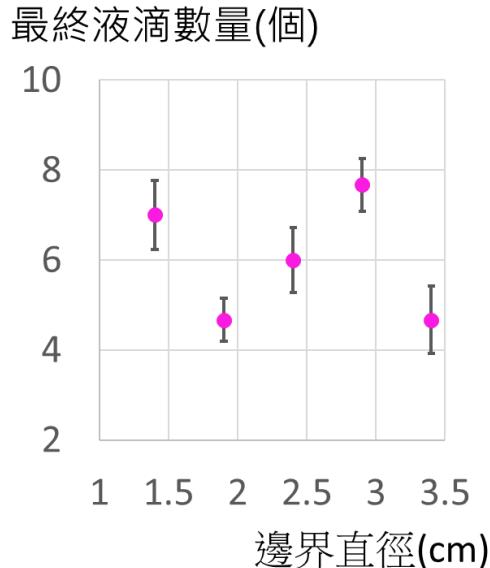
分裂液滴總面積在不同邊界下變化明顯。1.4 cm 時為 $80.51 \pm 0.58 \text{ mm}^2$ ，1.9 cm 為 $99.91 \pm 3.51 \text{ mm}^2$ ，2.4 cm 為 $91.06 \pm 0.84 \text{ mm}^2$ ，2.9 cm 為 $122.17 \pm 0.09 \text{ mm}^2$ ，3.4 cm 時為 $109.02 \pm 0.30 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現其大致趨勢：當邊界越大，總面積越大，因為大邊界有較多的空間，可以容納較大或較多的液滴，如圖三十五。

在邊界為 1.4 cm 時，分裂完成時液滴的平均面積為 $6.28 \pm 0.81 \text{ mm}^2$ 。1.9 cm 時顯著下降為 $12.26 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ ，2.4 cm 為 $5.19 \pm 0.29 \text{ mm}^2$ ，2.9 cm 為 $2.12 \pm 0.24 \text{ mm}^2$ ，3.4 cm 時則為 $1.89 \pm 0.13 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：在較小邊界 (1.4 cm、1.9 cm、2.4 cm) 分裂液滴平均面積較大，在較大邊界 (2.9 cm、3.4 cm) 分裂液滴平均面積較小，邊界為 1.9 cm 時則為最大值，如圖三十六。

我們額外發現分裂完成後，過一陣子（取樣為 2 分鐘後），液滴會內縮形成「最終液滴」，圖三十七到圖四十為不同容器邊界大小形成之最大最終液滴的直徑以及最終液滴的數量與面積。



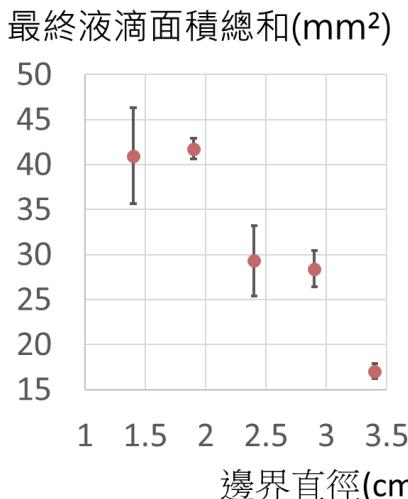
圖三十七、不同容器邊界大小的最終液滴最大直徑



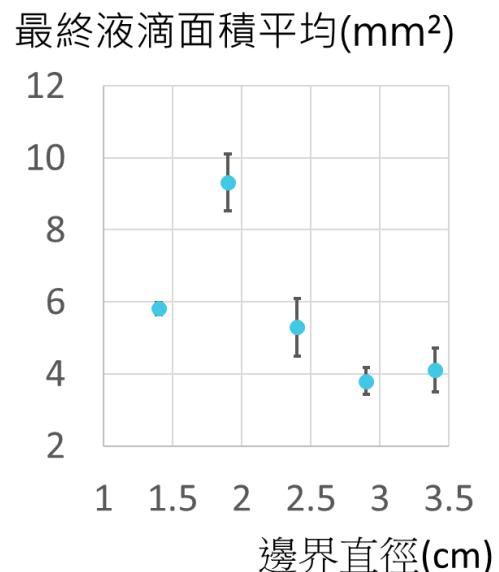
圖三十八、不同容器邊界大小的最終液滴數量

最大液滴直徑在不同邊界下的變化如下：1.4 cm 時為 6.07 ± 0.81 mm，1.9 cm 時為 7.26 ± 0.02 mm，2.4 cm 為 5.85 ± 0.29 mm，2.9 cm 為 6.17 ± 0.24 mm，3.4 cm 為 4.44 ± 0.13 mm。我們可以發現：在較小邊界（1.4 cm、1.9 cm、2.4 cm、2.9 cm）呈現小幅變動，在較大邊界（3.4 cm）液滴直徑顯著下降，因為當邊界較大存在兩個以上較大液滴的機率較高，因此最大液滴直徑較小，如圖三十七。

觀察分裂完成兩分鐘後所保留之液滴數量，1.4 cm 時為 7.0 ± 0.8 個，1.9 cm 時減少為 4.7 ± 0.5 個，2.4 cm 回升至 6.0 ± 0.7 個，2.9 cm 為 7.7 ± 0.6 個，3.4 cm 時再次下降至 4.7 ± 0.8 個。我們可以發現：邊界大小與最終液滴數量似乎無直接關係，因為最終液滴會經過內縮的過程，部分液滴會合為一個液滴，如圖三十八。



圖三十九、不同容器邊界大小的最終液滴面積總和

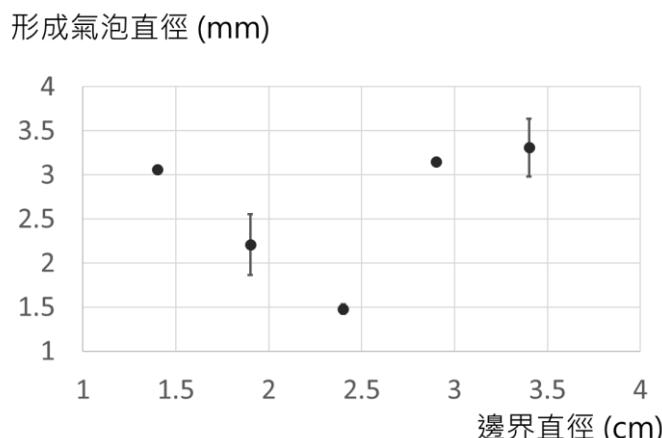


圖四十、不同容器邊界大小的最終液滴面積平均

當邊界為 1.4 cm 時，總面積為 $40.97 \pm 5.31 \text{ mm}^2$ ；在 1.9 cm 時為 $41.75 \pm 1.13 \text{ mm}^2$ ；2.4 cm 時下降至 $29.30 \pm 3.90 \text{ mm}^2$ ，接著於 2.9 cm 為 $28.40 \pm 2.02 \text{ mm}^2$ ；在最大邊界 3.4 cm 時再度下降至 $17.04 \pm 0.82 \text{ mm}^2$ 。整體而言，最終液滴總面積大致隨邊界增大而減少，因為最終液滴取樣時間固定（分裂完後 2 分鐘），當邊界越大，液滴與空氣接觸面越大，乙醇蒸發速度就越快，因此總面積下降的幅度（分裂完到最終之間）越大，如圖三十九。

最終液滴的平均面積在 1.4 cm 時為 $5.82 \pm 0.17 \text{ mm}^2$ ，1.9 cm 上升至最高值 $9.31 \pm 0.79 \text{ mm}^2$ ，2.4 cm 為 $5.29 \pm 0.81 \text{ mm}^2$ ，2.9 cm 降為 $3.80 \pm 0.37 \text{ mm}^2$ ，3.4 cm 時則為 $4.12 \pm 0.61 \text{ mm}^2$ 。我們可以發現：其趨勢與分裂完成時液滴平均面積相近，如圖四十。

同樣推測初始液滴滴落時形成的氣泡可能會與其他實驗結果相關，因此也做了數據分析，如圖四十一。



圖四十一、不同容器邊界大小形成的氣泡直徑

陸、討論

本研究以操控液滴滴落高度與容器邊界直徑為變因，探討乙醇水溶液液滴在沙拉油中所呈現的擴展、分裂與聚集與穩定狀態變化。兩大變因的影響邏輯截然不同：

高度變因主要改變液滴初速與衝擊條件，間接影響初始展開、邊緣環形成與氣泡生成；邊界變因則直接限制展開範圍，進而影響邊緣環完整性、分裂液滴數量與回縮行為。

一、液滴分散形成最終圓環並內縮的原因

(一) 液滴分裂擴展與內縮現象

在參考文獻與初步實驗中，皆未見液滴分裂後會聚集形成圓環的現象，而本研究創新發現：當操作變因為液滴滴落高度時，液滴分裂後容易形成穩定的圓環。一開始我們推測此現象可能與液滴滴落時產生的氣泡有關，但後續實驗顯示，即使液滴滴落過程中未產生氣泡，最終仍會形成圓環，因此氣泡並非造成圓環形成的主要因素。

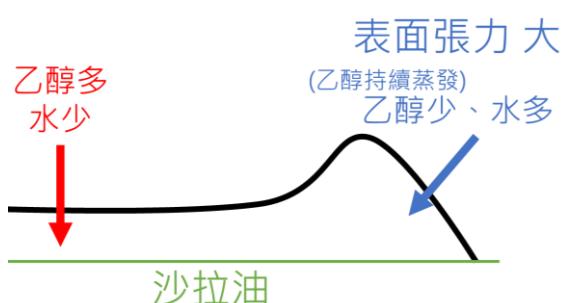
在本研究中觀察到的液滴內縮現象，包含圓環的形成與隨後的內縮行為，我們認為主要受到液滴中不同成分（乙醇和水）揮發速率不同所造成的拉力差影響。

實驗初期，乙醇揮發速度較快，且本身表面張力較低，因此液滴邊緣乙醇迅速蒸發，邊緣乙醇濃度降低，使該處表面張力上升，進而推動液體自中心向外擴散，如圖四十二。

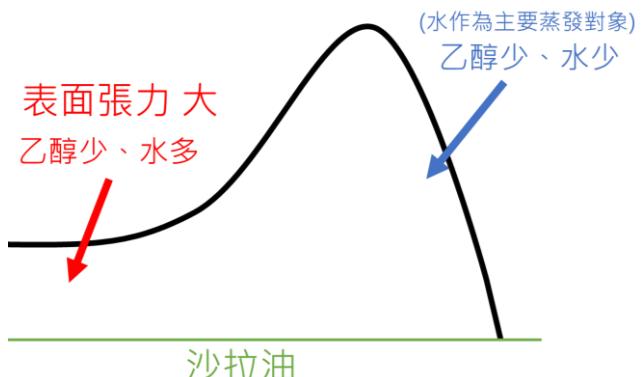
隨著時間推進，邊緣乙醇幾乎蒸發殆盡，此時水分成為主要揮發成分。雖然水的揮發速度較慢，但表面張力較高，且水分在邊緣蒸發速度快於中心，導致邊緣水濃度下降，表面張力降低，進一步產生由邊緣向中心的拉力差，推動液體內縮，出現現象向圓心收縮的現象，如圖四十三。

(二) Type II 現象與內縮的關聯性

具體來說，這種內縮過程會使原本擴散形成的圓環逐漸向中心收縮。由於水分揮發較慢，內縮階段通常持續時間較長，且變化較緩慢。在本研究觀察到的 Type II 現象



圖四十二、擴散階段（作者自繪）



圖四十三、內縮階段（作者自繪）

中，內縮行為甚至在液滴尚未完全分裂時就已開始，邊緣區域出現明顯的向內收縮趨勢，顯示液滴內部的拉力變化十分複雜。

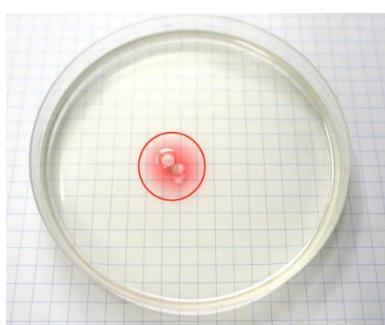
當液滴開始分裂一段時間後，邊緣的小液滴會逐漸向中心收縮，並與尚在分裂或擴散中的液滴融合，最終形成一圈由顏色較深液滴構成的穩定圓環。本文將此結構定義為「圓環」。其形成過程可歸因於以下兩點：

1. 分裂液滴初期受到拉力差推動，液體向外擴散；
2. 外擴過程中，由於速度差與液體堆積效應，在外圍形成液滴聚集的圓環結構，隨後在內縮過程中該圓環逐步收縮，變得更加明顯。

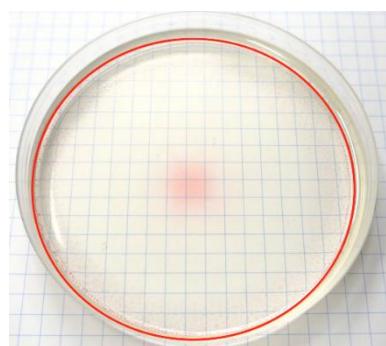
在本研究中，圓環的完整性與破裂行為被認為是影響液滴分裂效率、液滴大小分布及整體動態結構的重要因素。

(三) 與文獻結果的差異與邊界條件影響

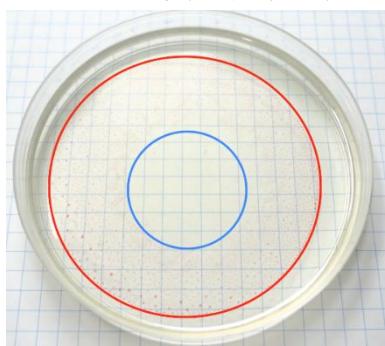
進一步比對影像後發現，本研究中的液滴行為與文獻所述有所不同：文獻中液滴通常在擴散達最大範圍後，才由外向內逐步分裂；但在本實驗中，**液滴尚未擴散至最大時，邊界的液滴已開始分裂（分裂通常在擴散達最大並開始內縮後才完成）**。擴散最大後，外圍已分裂的小液滴會隨內縮流動逐步向中心收縮，並與新分裂的液滴融合成較大的液滴，最終僅留下穩定的圓環結構。即使在有限邊界條件下，雖然受容器邊界影響較大，液滴仍會出現內縮行為，但是否形成穩定圓環則與邊界條件密切相關。



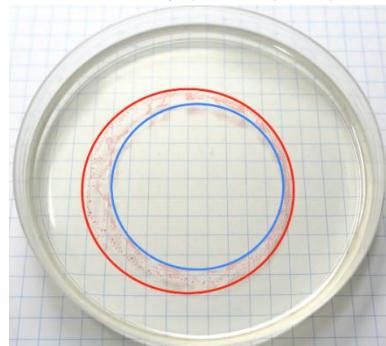
圖四十二、實驗情形階段一



圖四十三、實驗情形階段二



圖四十四、實驗情形階段三



圖四十五、實驗情形階段四
(照片皆由作者自製)

二、初始液滴滴落高度對液滴分裂現象的影響

在液滴滴落高度由 1 至 15 公分變化的實驗中，我們觀察到下列行為趨勢，並推測其背後原因：

- (一) 我們認為改變液滴高度會對液滴分裂現象造成影響主要是因為增加液滴滴落至油面時的速度，我們在文獻中的理論公式加入液滴滴落速度，如式三表達：

$$\tau = \frac{R^*}{\frac{\Delta \gamma H}{\eta_0 R^*} + V_{effect}} \quad \text{式三}$$

根據我們的實驗結果，帶入最大擴展直徑與環境物理參數後，我們可得 V_{effect} 約為 $606.33 \sim 4944.04 \text{ mm/s}$ 。

- (二) **反應時間**未明顯隨高度單調變化，但在中間高度（如 10 cm）時出現局部最小值，結果顯示液滴滴落高度與反應時間無關。但於實驗前推測當液滴滴落高度越高，由於重力影響，動能越大，造成系統越混亂，反應時間越長。
- (三) 最大**擴展直徑**呈現 U 型變化。推測低高度時動能較低，造成的擾動較少，液滴擴散完整；當液滴滴落高度大於一定值時，會造成較多的擾動，液滴滴落高度越高則擴散直徑越大，因為液滴滴落高度越高時，受重力影響，剛接觸油面時擴散便會越大，因而在擴散相同的情況下，最大擴展直徑較大。
- (四) 當液滴滴落高度為 1 cm 時，**分裂完成時液滴數量與總面積**數據極大，推測同樣與低高度較不造成擾動有關；其餘部分（液滴滴落高度為 5 cm 、 10 cm 、 15 cm 者）呈現液滴滴落高度越高，則分裂完成時液滴數量越多，分裂完成時液滴總面積越大，此與最大擴散直徑呈正相關，因為分裂液滴面積受表面能影響，大小有一定限制，差異不大，而最大擴散直徑又與液滴滴落高度呈正相關（除高度 1cm 外），因此當液滴滴落高度大於一定值時，高度越高，分裂完成時液滴數量越多、總面積越大。
- (五) 不論液滴滴落高度為何，液滴都會經過擴散、分裂與內縮現象，且液滴分裂受表面能影響，使分裂液滴大小受限，**分裂液滴平均面積**差異縮小。
- (六) **最終圓環直徑**與液滴滴落高度無關，推測因為當液滴整體內縮到一定程度時，內縮速度會減緩，而我們對「最終」的取樣時間為分裂後 2 分鐘，可能已經超過內縮開始減緩的時候，因此最終圓環直徑較不受液滴滴落高度影響。

- (七) 最終液滴數量大致隨液滴滴落高度增高而增多，雖然最終圓環直徑不受液滴滴落高度影響，但當液滴滴落高度越高時，由於因重力造成的擾動越大，因此最終液滴較不易聚合，數量較多。
- (八) 液滴滴落高度與最終液滴總面積和平均面積無關，推測最終液滴總面積的部分無關的原因同樣因為取樣時間可能已經超過內縮開始減緩的時候，因此與液滴滴落高度無直接關係；最終液滴平均面積受原先表面能的影響，加上乙醇蒸發速率相近，因此最終液滴平均面積差異不大。

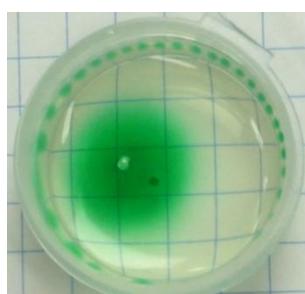
三、容器之有限邊界對液滴分裂現象的影響

先前推論實驗最後圓環的形成應與最初液滴滴落時形成的氣泡有關，但在以邊界大小當作操縱變因進行實驗時，發現即使有氣泡也不會形成圓環，且分裂完成時情形與文獻中提及的現象較相似。

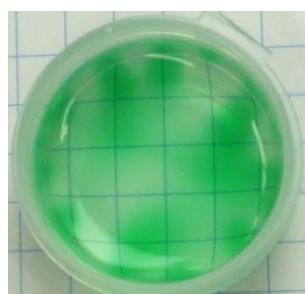
(一) 擴散、分裂與聚合現象

透過實驗紀錄影像，我們將乙醇水溶液在有限邊界的情況下，所形成的擴散、分裂與聚合現象分為四個階段：

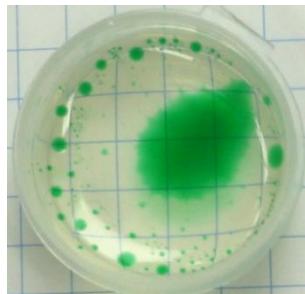
1. 初步分裂：剛滴落的初始液滴由於邊界較小因此很快便擴散至碰觸到邊界，而使碰觸到邊界的液滴提早開始分裂，且因初始液滴仍在持續擴散，已分裂的液滴會與新碰到邊界的溶液融合，因而越來越大，如圖四十六。
2. 大融合：初步分裂到一定程度後，由於邊界液滴越來越大，最後會沿著邊界與其他液滴融合在一起，同時初始液滴也會往邊界靠並與其他液滴融合。接著會進入較混亂的狀況，所有液滴會合而為一並占滿整個反應範圍，其中會出現一些較具液滴形狀但未能分裂成功的部分，如圖四十七。



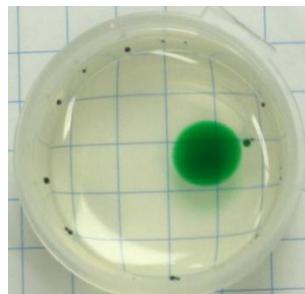
圖四十六、初步分裂



圖四十七、大融合



圖四十八、完全（二次）分裂



圖四十九、逐漸縮小
(作者皆由拍攝)

3. 完全（二次）分裂：經過數個「嘗試」分裂但未成功的狀況後，當乙醇蒸發掉一定量，液滴會開始正式分裂，分裂成 1~2 個明顯較大的液滴，以及數個相對較小的液滴，如圖四十八。

4. 逐漸縮小：由於乙醇仍會持續蒸發，因此液滴會逐漸縮小，且往中心靠近，並合併成個數較少的液滴，如圖四十九。

(二) 當有限邊界為 1.4 cm 時，反應時間明顯較長，其餘部分 (1.9 cm 、 2.4 cm 、 2.9 cm 、 3.4 cm) 則呈現小幅波動。推測當邊界過小時，液滴需要花更多時間蒸發掉較多乙醇才能使液滴容納在範圍內並開始分裂，因此當有限邊界過小時，反應時間時間會較長，而當有限邊界大於一定值時，較不影響反應時間。

(三) 分裂液滴數量與總面積大致隨有限邊界增大而增加，因為當有限邊界越大，分裂空間越充裕，且液滴融合得越少，因此呈現此結果。

(四) 分裂液滴平均面積在較小有限邊界 (1.4 cm 、 1.9 cm 、 2.4 cm) 較大，在較大有限邊界則較小 (2.9 cm 、 3.4 cm) 。推測因為當有限邊界較小時較易出現單個明顯較大的液滴（分裂不完整），因而使平均面積增加，而當有限邊界較大時分裂較完整，液滴平均面積較小。

(五) 最大最終液滴直徑在較小邊界 (1.4cm 、 1.9 cm 、 2.4 cm 、 2.9 cm) 相差不大，在較大邊界 (3.4 cm) 則較小。推測同樣因為有限邊界較小較易出現單個明顯較大的液滴（分裂不完整），而有限邊界較大分裂較完整，較不易出現單個特別大的液滴。

(六) 有限邊界大小與最終液滴數量無關，推測液滴因為都經過內縮，過程中會有部分液滴融合，因此剩下的液滴數量相差不大。

(七) 最終液滴總面積隨有限邊界增大而減少，推測因為當有限邊界越大，液滴展開、分裂得越完全，總空氣接觸面越大，因此乙醇蒸發越快，液滴總面積減少得越多（與分裂完成時相比）；而當有限邊界較小時，因為分裂不完全而有單個較大液滴的存在，因此液滴的總空氣接觸面較小，蒸發較慢，液滴面積減少較少。

(八) 最終液滴平均面積與分裂液滴平均面積趨勢高度相似，在較小有限邊界 (1.4 cm 、 1.9 cm 、 2.4 cm) 較大，在較大有限邊界則較小 (2.9 cm 、 3.4 cm) 。推測主要受分裂完成時的液滴面積情形影響，因為在較小有限邊界最終液滴平均面積受單個較大液滴影響，因而較大，在較大有限邊界則分裂完全，各個最終液滴面積都較小，因次最終液滴平均面積較小。

四、綜合統整與「最終狀態」

本研究將液滴行為分為擴散最大、分裂完成時與分裂後兩分鐘的最終狀態，分別在液滴滴落高度與有限邊界大小兩條件下，呈現以下邏輯鏈條：

- (一) 液滴滴落高度主要造成系統擾動、影響液滴初速、最初展開大小及融合與否；
- (二) 有限邊界大小控制液滴展開範圍、大融合（混亂）的時長與分裂的完整性；
- (三) 將「最終」定義為兩分鐘後的液滴狀態，未必是最好的做法，或許可將某個實質發生的現象判定液滴進入「最終狀態」，再計算反應時間，以另一個角度來討論。

五、未來研究展望

- (一) 進行液滴滴落高度更高的實驗，觀察並探討現象形成更大範圍的趨勢。
- (二) 增加不同有限邊界大小實驗的樣本數，以減少實驗及測量誤差造成的實驗結果偏差，進而形成更正確的結論。

柒、結論

本研究針對先前文獻未探討之液滴滴落高度與有限邊界大小兩項變因，分析液滴分裂現象中液滴擴散、分裂、內縮與穩定狀態之變化，並提出液滴內縮形成圓環之機制，具以下幾項主要結論：

- 一、本研究將液滴滴落高度納入原有理論公式，補充了滴落初速對液滴擴散與反應時間的影響，使模型更貼近實際實驗行為。
- 二、本研究首次提出液滴分裂後出現內縮現象的成因，推測因乙醇與水揮發速率差異，造成液滴內部由中心向外、再由邊緣向內的拉力差變化，形成內縮流動，最終穩定形成圓環（Type II 現象）。
- 三、內縮行為於液滴擴散尚未達最大時即開始出現，與液滴分裂過程同步進行，為本研究觀察到穩定且可重現之特徵現象。
- 四、容器邊界大小明顯影響內縮行為與圓環穩定性，邊界較大時有利於穩定圓環形成，邊界過小時則易導致液滴融合或圓環破裂。
- 五、液滴滴落高度影響液滴分裂規模，高度越高時，液滴數量與分裂總面積增加，擴散範圍亦隨之增大。
- 六、有限邊界影響分裂完整性及液滴分布，邊界越大分裂越完整，液滴平均面積較小，邊界較小時易出現單一較大液滴。
- 七、本研究所觀察之內縮與穩定圓環形成現象，以及將液滴滴落高度納入物理建模之方式，可作為未來液滴分裂與內縮相關研究之參考，具補充文獻之價值。

捌、參考資料及其他

- 1 伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛（2022），液滴爆炸。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會。
- 2 伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛(2023)，液滴爆炸。2023 年臺灣國際科學展覽會。
- 3 維基百科「馬倫哥尼效應」。
- 4 維基百科「Plateau Rayleigh Instability」。
- 5 Keiser, L., Bense, H., Colinet, P., Bico, J., & Reyssat, E. (2017). Marangoni bursting: Evaporation-induced emulsification of binary mixtures on a liquid layer. *Physical Review Letters*, 118(7), 074504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.074504>
- 6 Baumgartner, D. A., Shiri, S., Sinha, S., Karpitschka, S., & Cira, N. J. (2022). *Marangoni spreading and contracting three-component droplets on completely wetting surfaces*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(19)

【評語】030102

本研究主作者們細心觀察乙醇溶液在沙拉油表面因馬倫哥尼效應所產生的三種不同液滴分散行為，並成功歸納出其對應的溫度與液滴條件，展現出良好的實驗觀察力與分析能力。整體實驗設計清楚，操作細心，報告內容具結構性，說明亦條理分明。若能在說明書中進一步標註引用資料的出處，將使整份作品更符合標準科學報告的格式。從研究動機到結論的推導，皆呈現出紮實的探究精神與良好的科學素養，是一件值得肯定的優秀作品。期待未來能持續發展更多應用與延伸研究！

作品海報

對馬倫哥尼效應的影響

探討特定因素

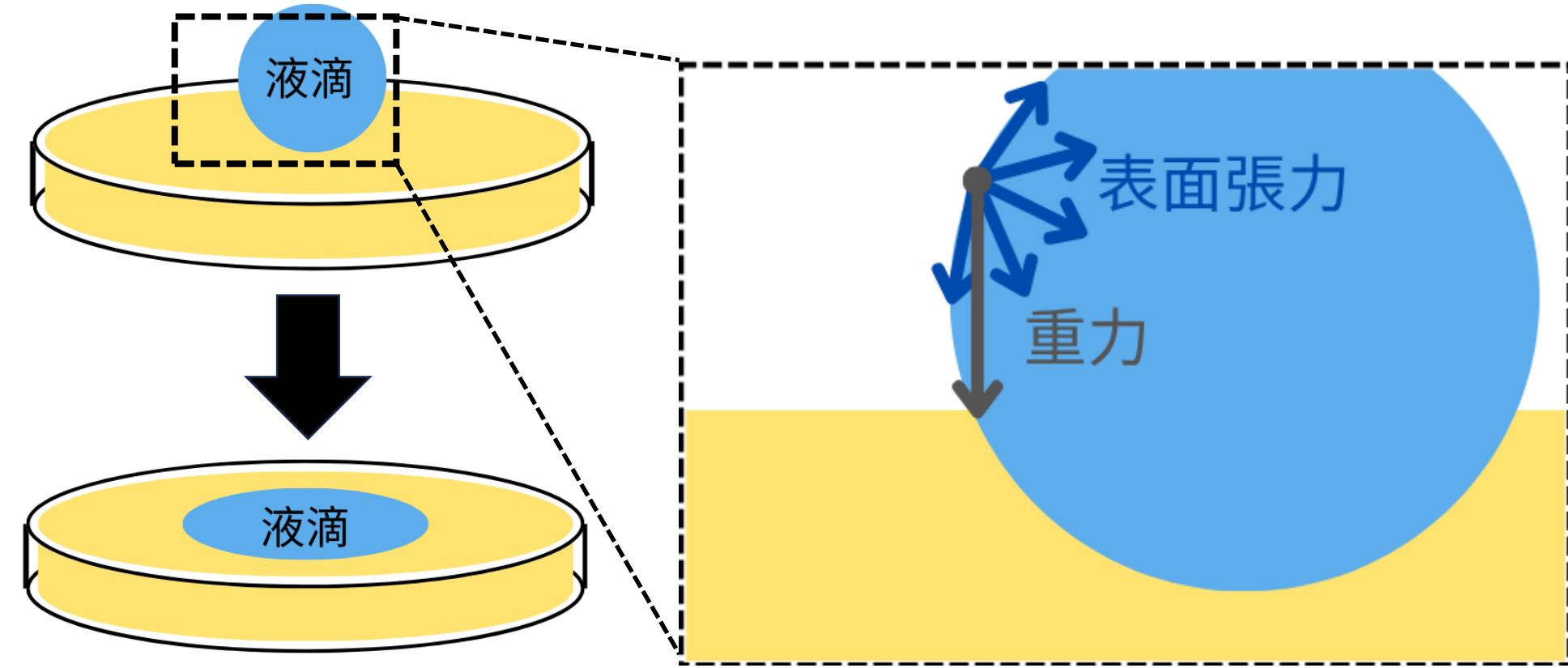
現象種類

類別	剛滴落	擴散最大	分裂完成	最終	內縮速度
文獻 Type 1 分裂後不改變					最慢
New! Type 2 分裂形成圓環					最快
New! Type 3 分裂後縮成圓環					次快
New! Type 4 分裂後內縮					次慢

文獻回顧

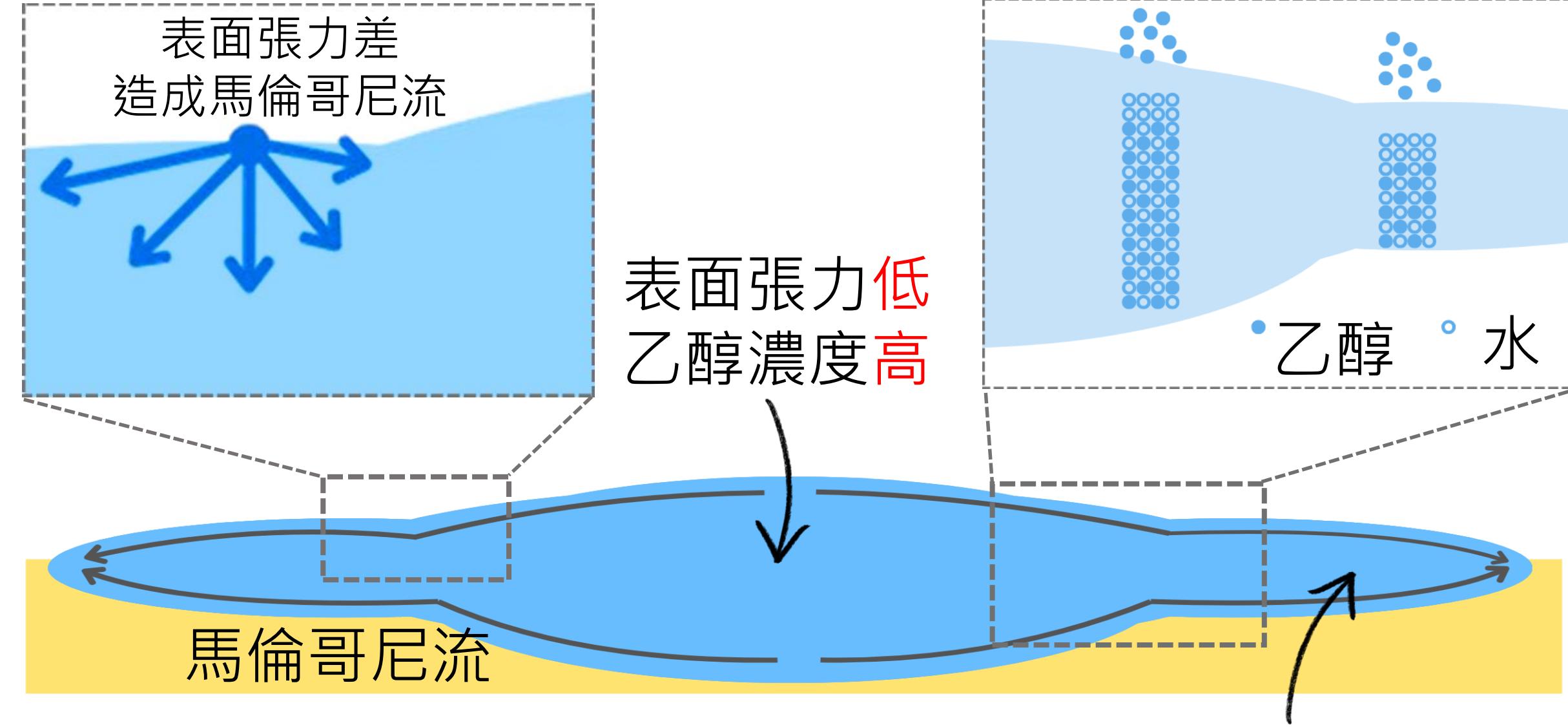
伍瀚煦等 (2023) 曾指出將乙醇水溶液滴在疏水性介面，液滴會先擴張然後分裂：

1 重力影響液滴塌縮



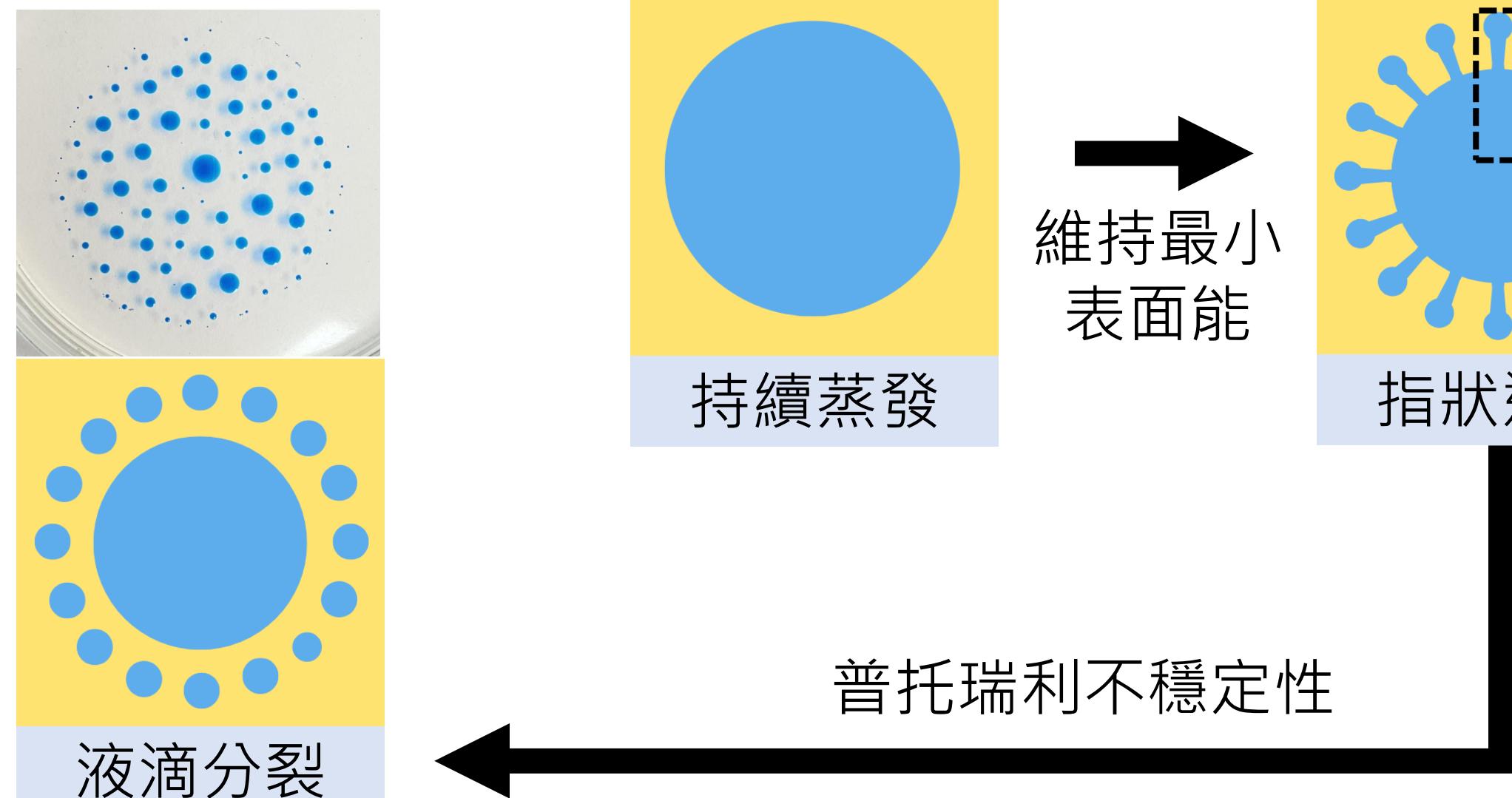
重力使液滴變扁平示意圖
(重繪自文獻[1])

2 濃度梯度與馬倫哥尼流形成向外擴張



馬倫哥尼流成因示意圖
(重繪自文獻[1]) 表面張力高
乙醇濃度低

3 液滴分裂定性分析



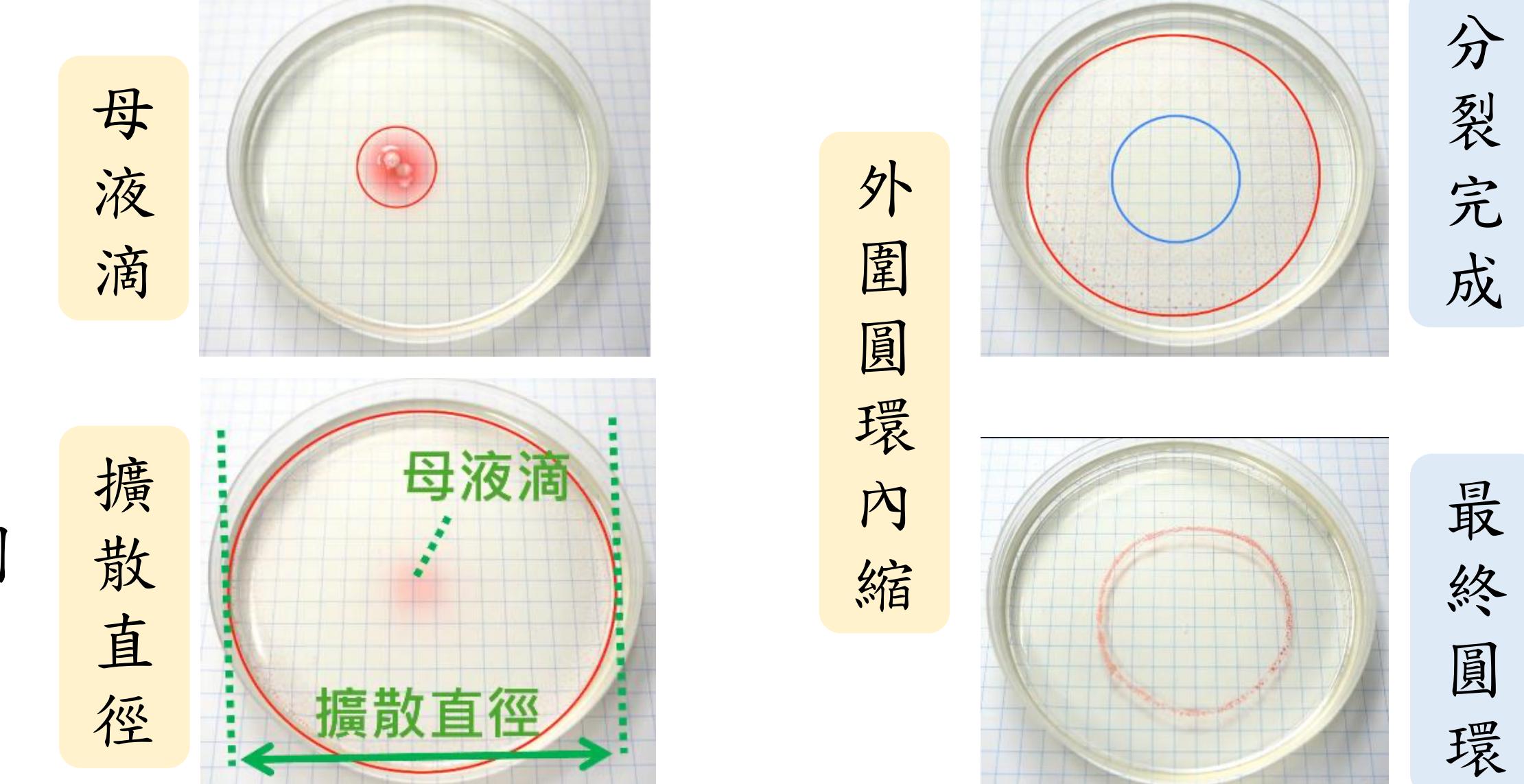
液滴分裂示意圖 (重繪自文獻[1])

名詞定義

- 母液滴：乙醇液滴滴入油面聚集處裂。
- 擴散直徑：外圍圓環（紅色圓環）最大直徑。
- 分裂完成：當母液滴消失，此時稱為分裂完成。
- 內縮：邊緣液滴往中心聚集，稱之為內縮。
- 最終狀態：分裂完成後兩分鐘，若是以圓環的形狀聚集則稱之為最終圓環。

研究目的

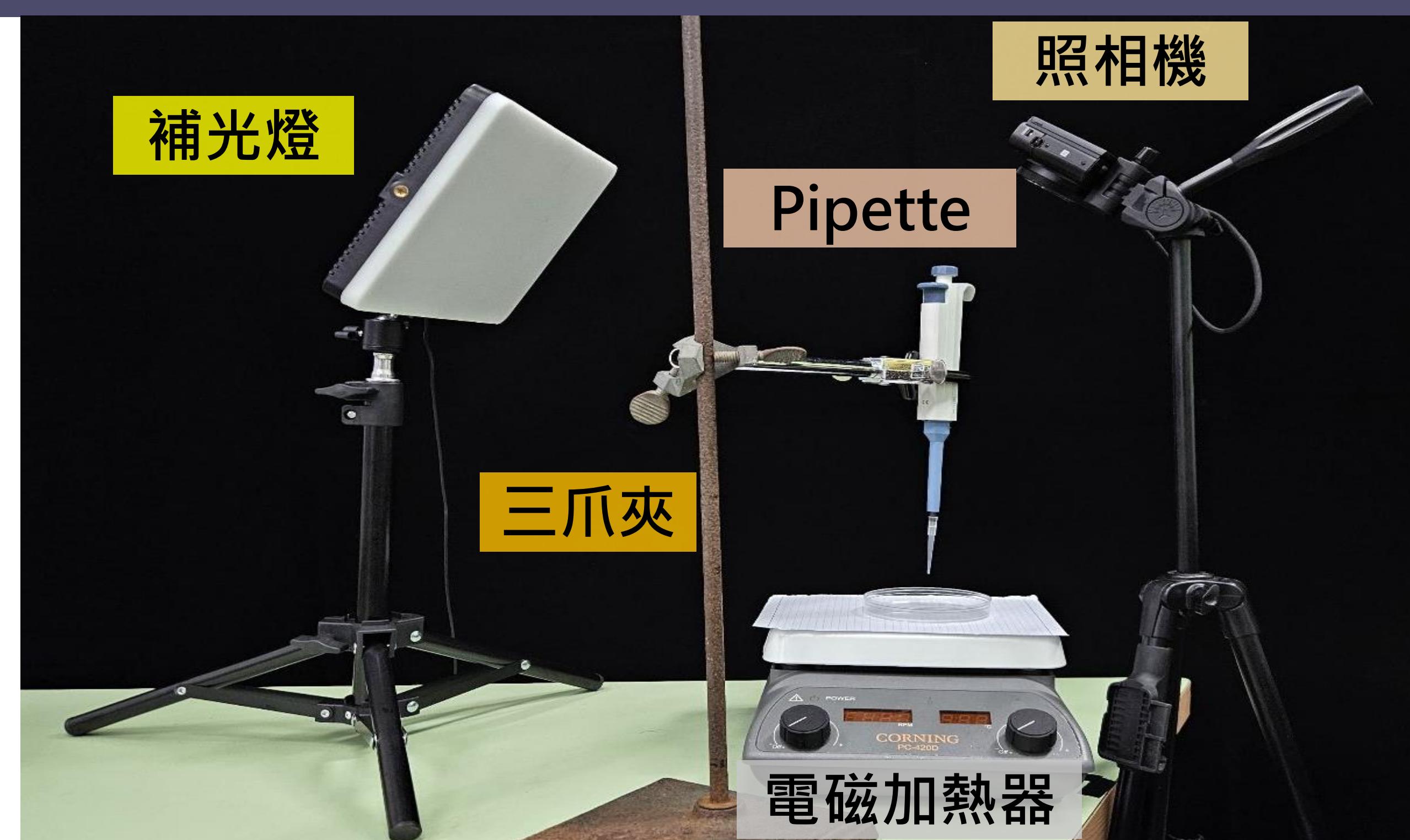
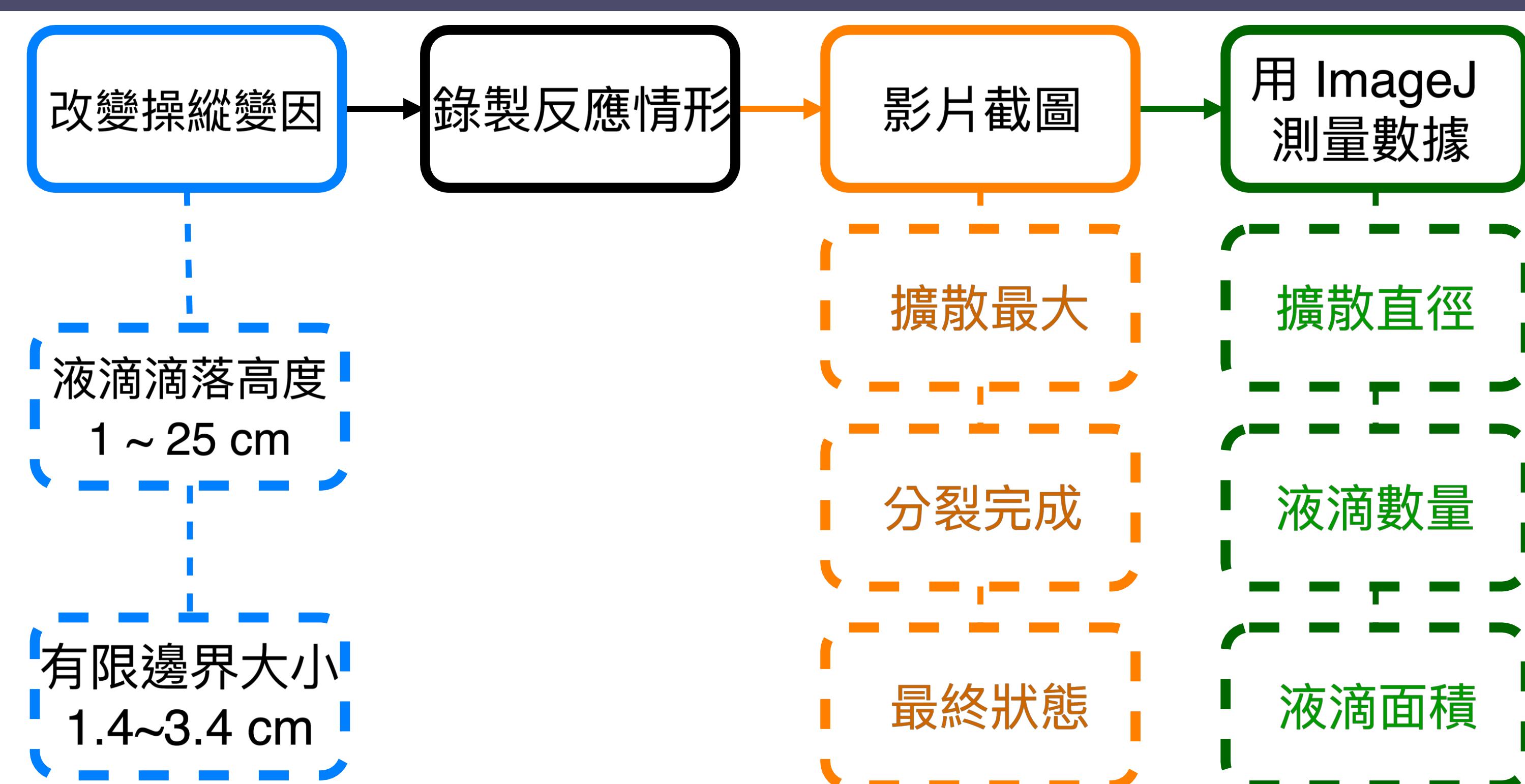
- 探討不同滴落高度對乙醇液滴於沙拉油中擴散與分裂行為之影響。
- 探討有限邊界條件下（改變容器大小）乙醇液滴之擴散與分裂現象。
- 探究乙醇液滴分裂後出現內縮現象的成因。



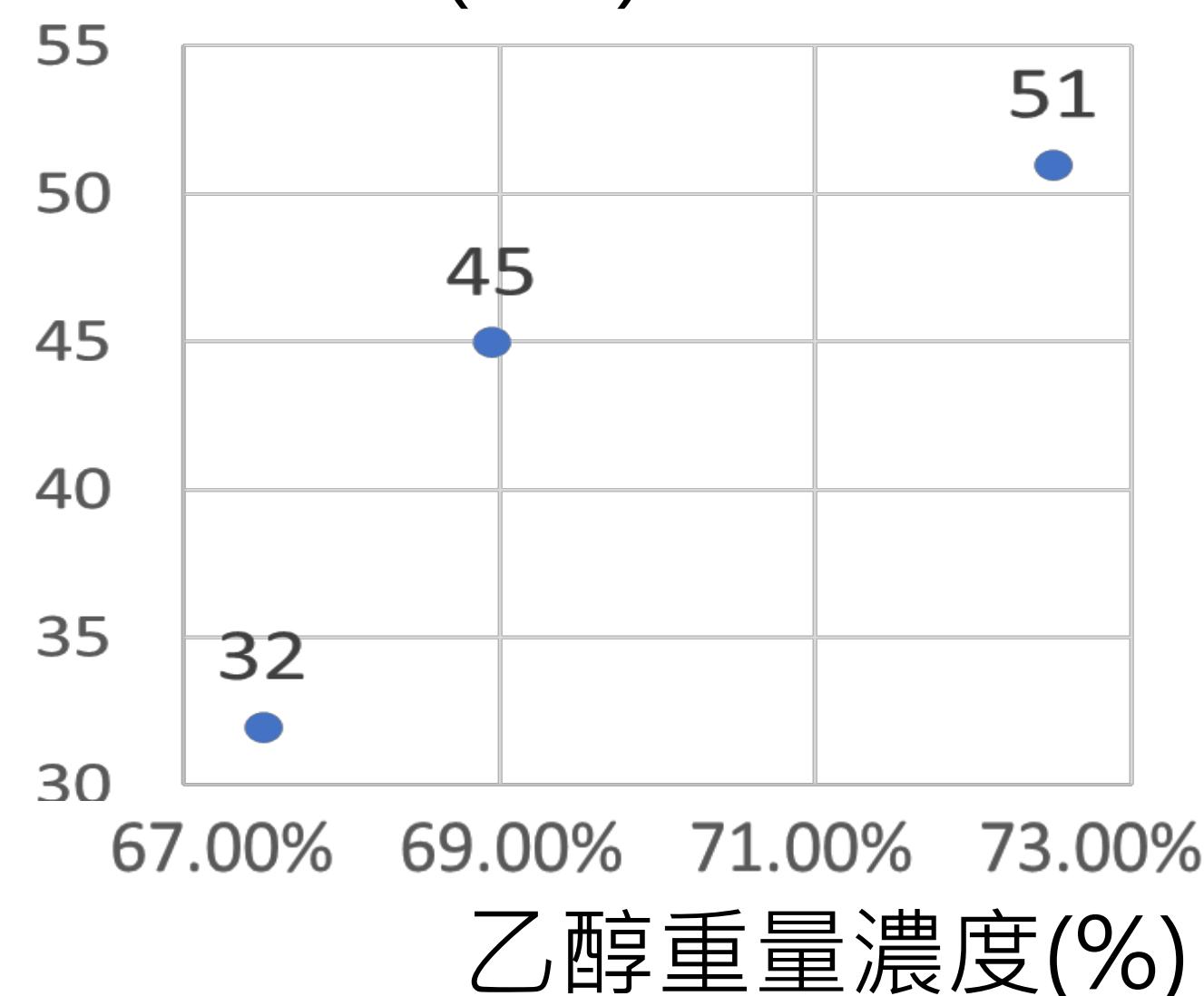
分裂完成

最終圓環

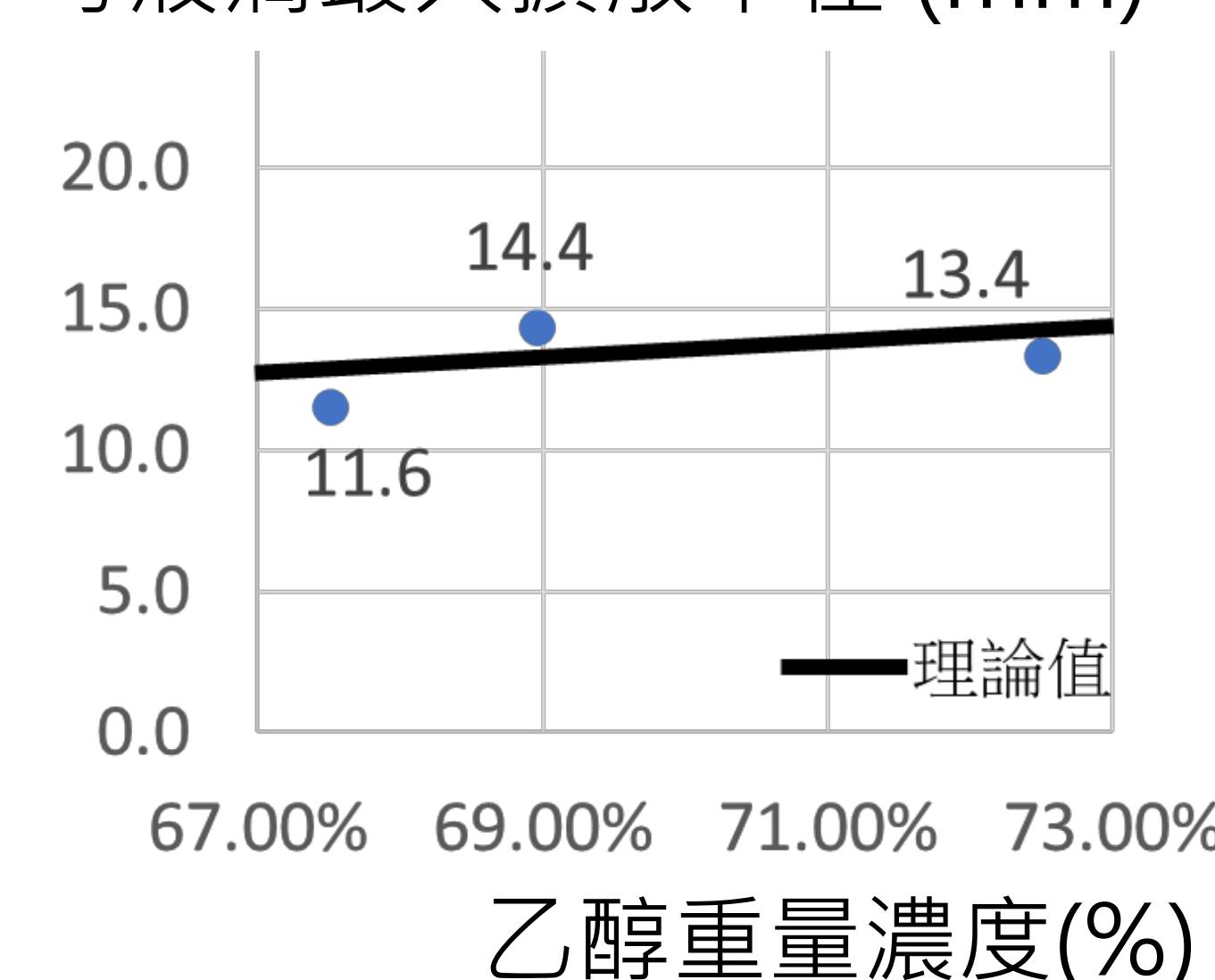
研究過程與設計



反應時間 (sec)



母液滴最大擴散半徑 (mm)



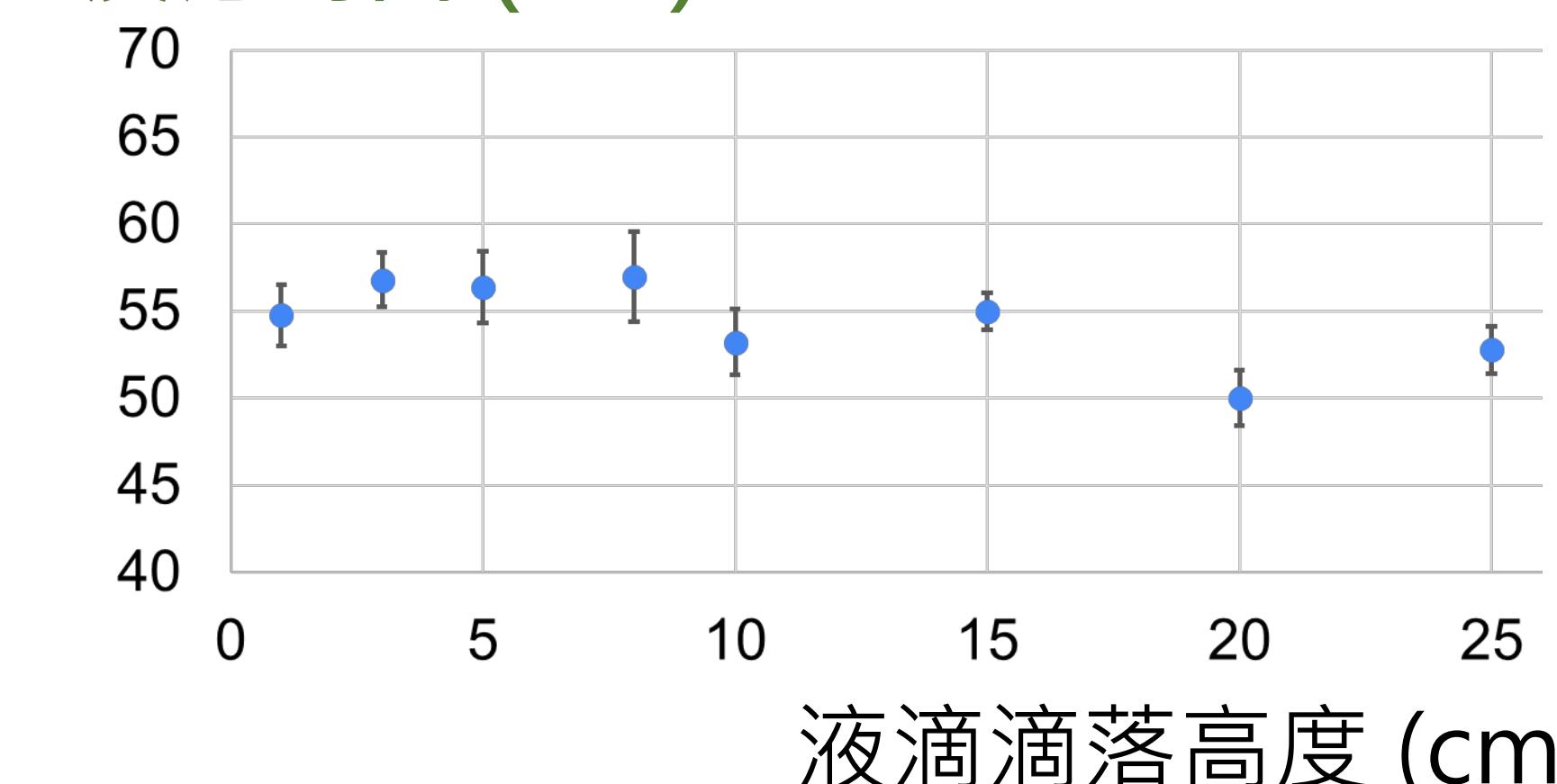
$$\tau = \frac{R^*}{V} = \left[\frac{(\phi_0 - \phi_c) \eta_0 \Omega_0}{(1 - \phi_c) \Delta \gamma H j_v} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R^* = \left[\frac{(\phi_0 - \phi_c) \Delta \gamma H \Omega_0}{(1 - \phi_c) \eta_0 j_v} \right]^{\frac{1}{4}}$$

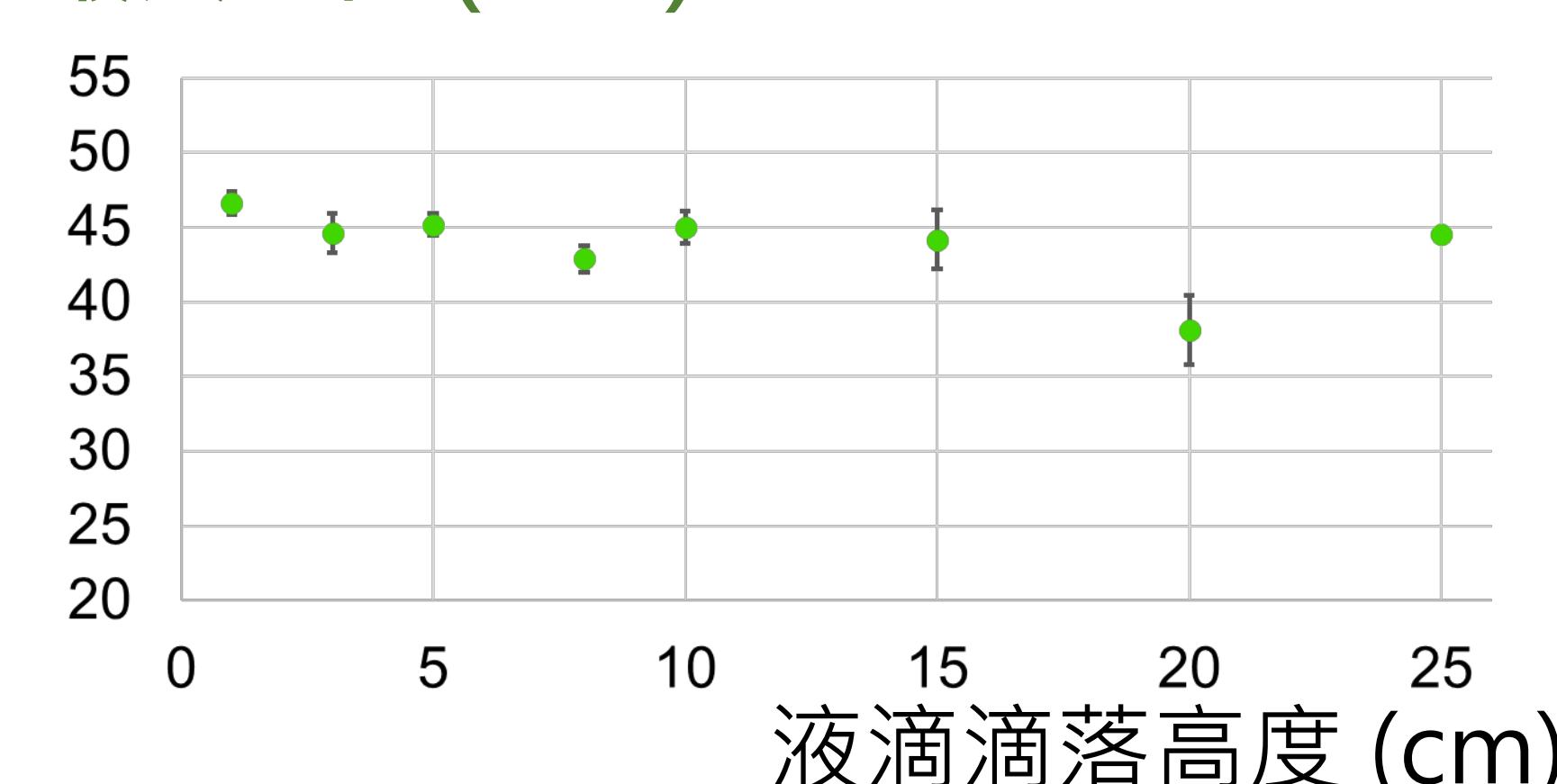
實驗結果

不同液滴滴落高度對液滴分裂現象的影響

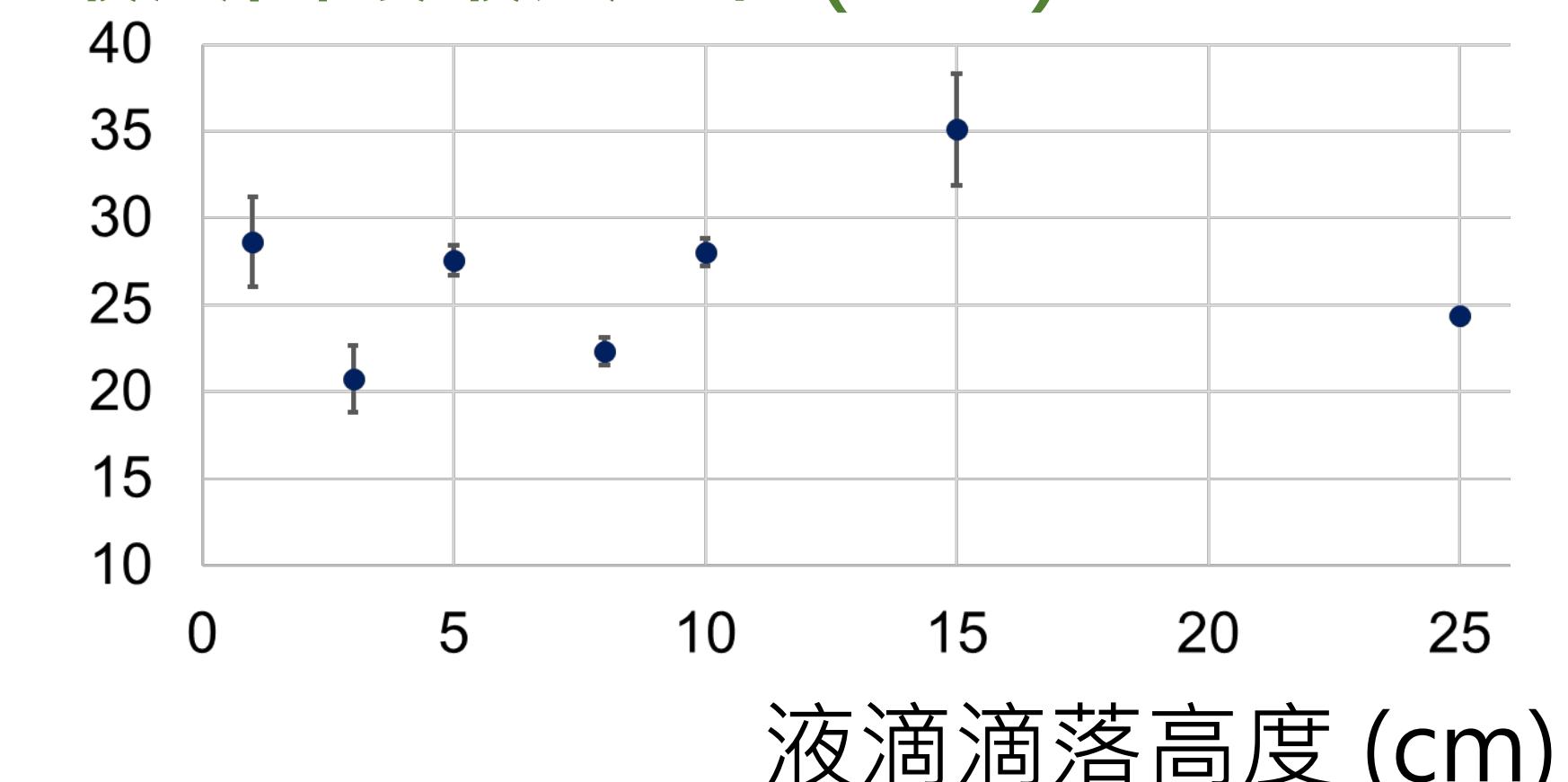
反應時間 (sec)



最大直徑 (mm)

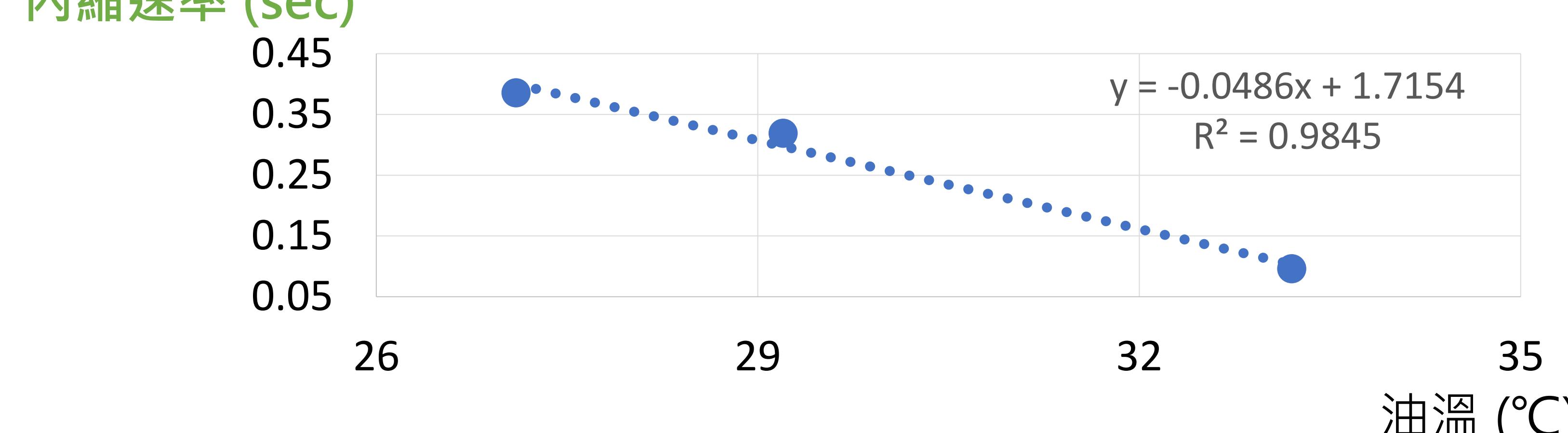


最終圓環最大直徑 (mm)



內縮速率與油溫高度的關係

內縮速率 (sec)

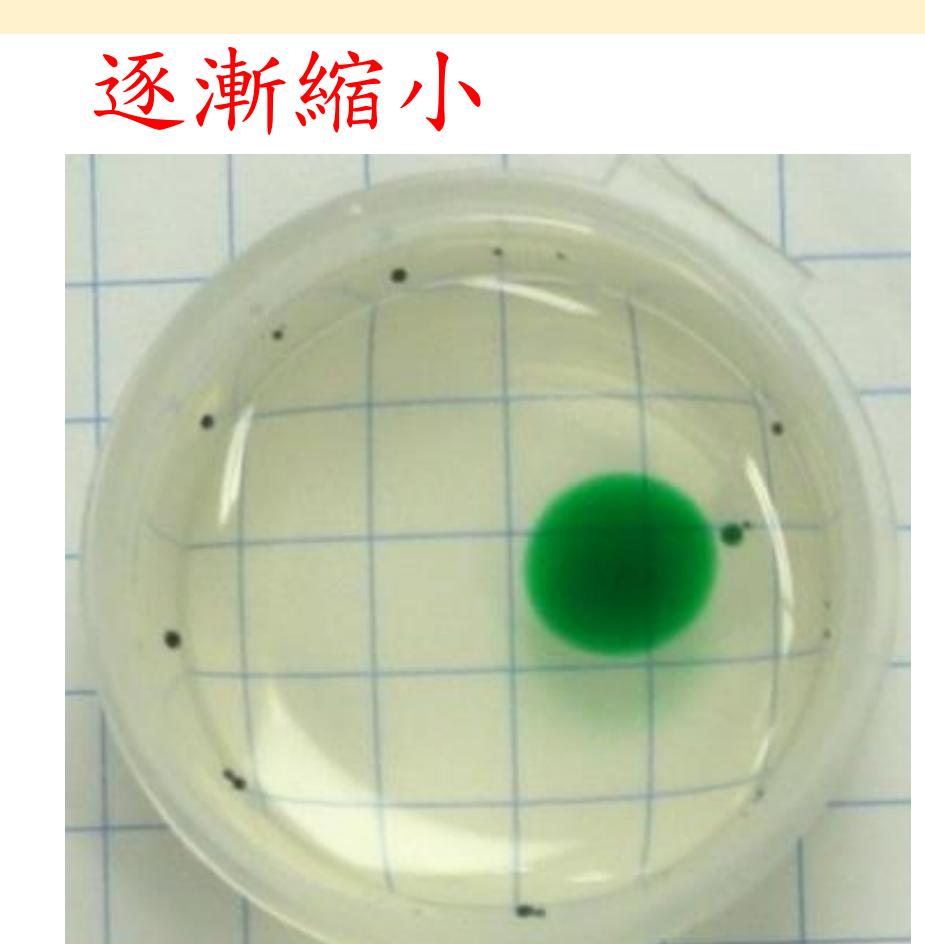
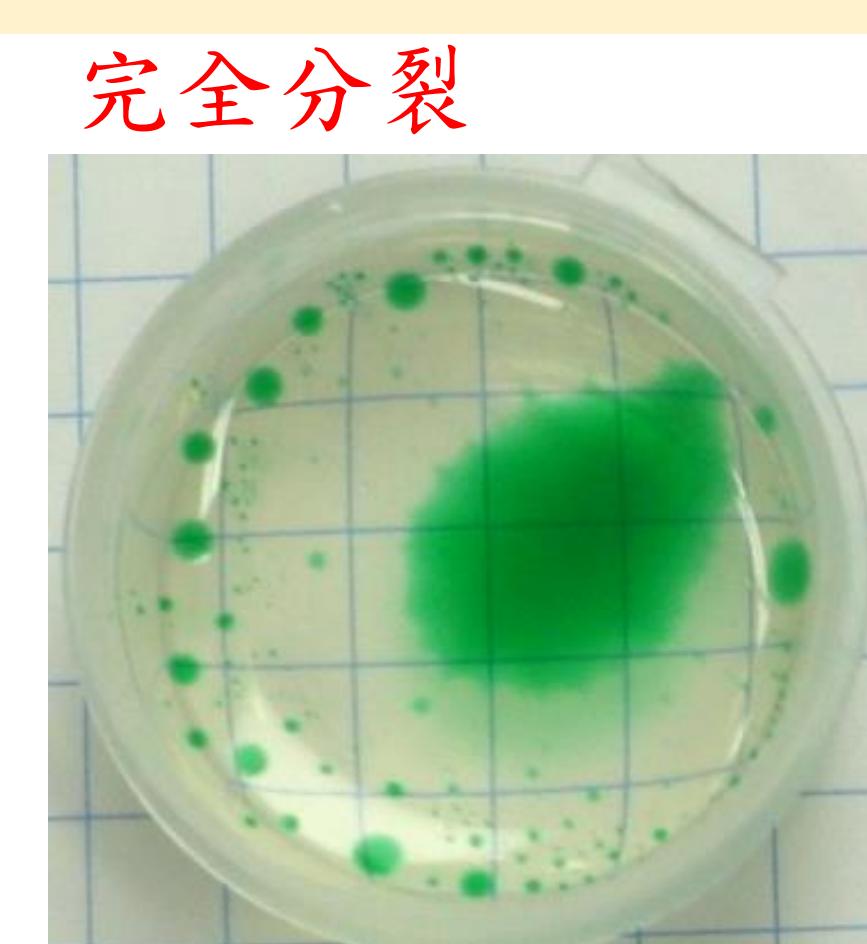
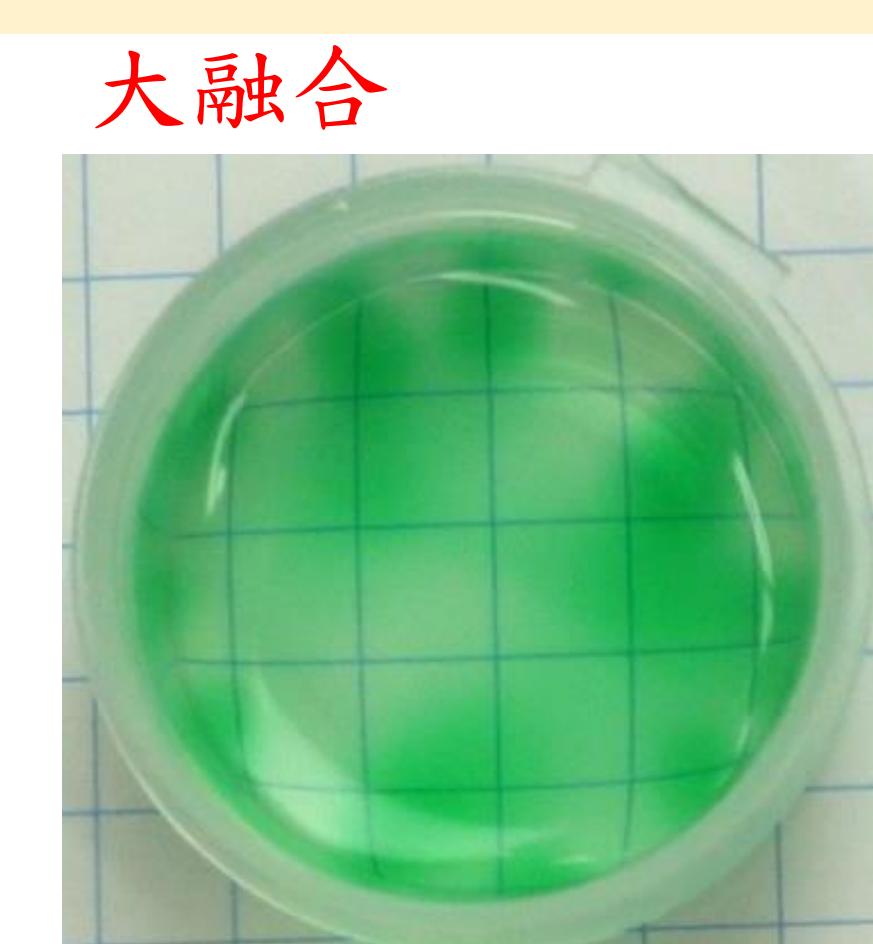
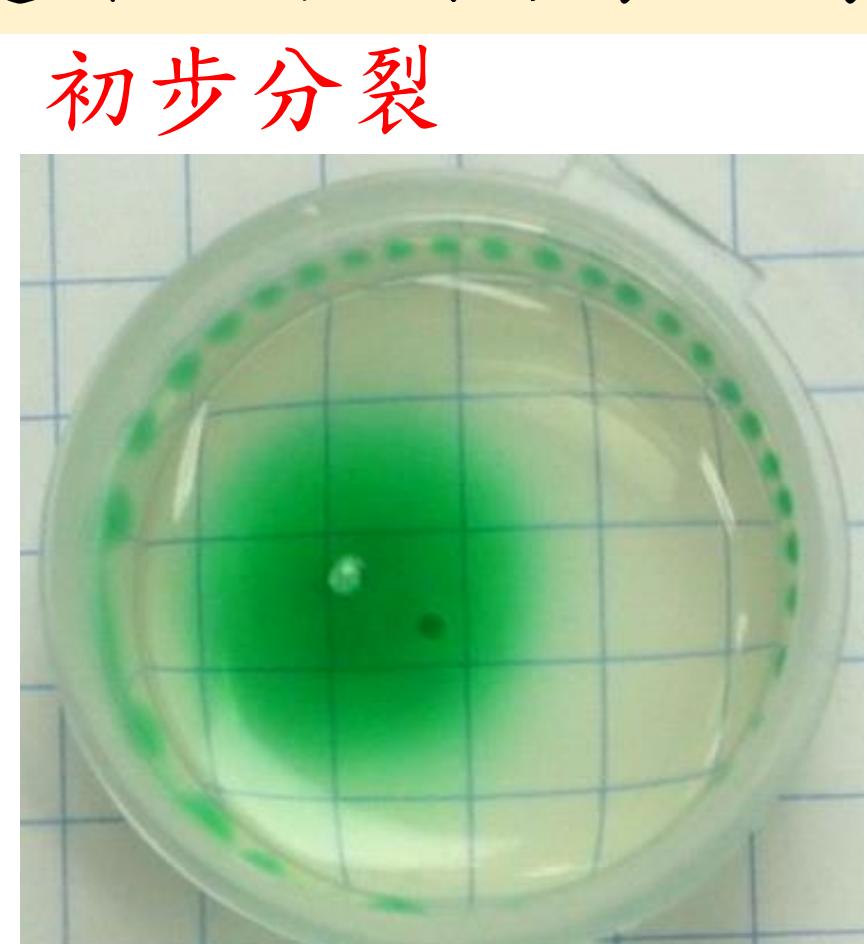


表面張力大
乙醇濃度下降快

表面張力小
液滴外擴堆積形成厚邊緣
乙醇濃度下降慢

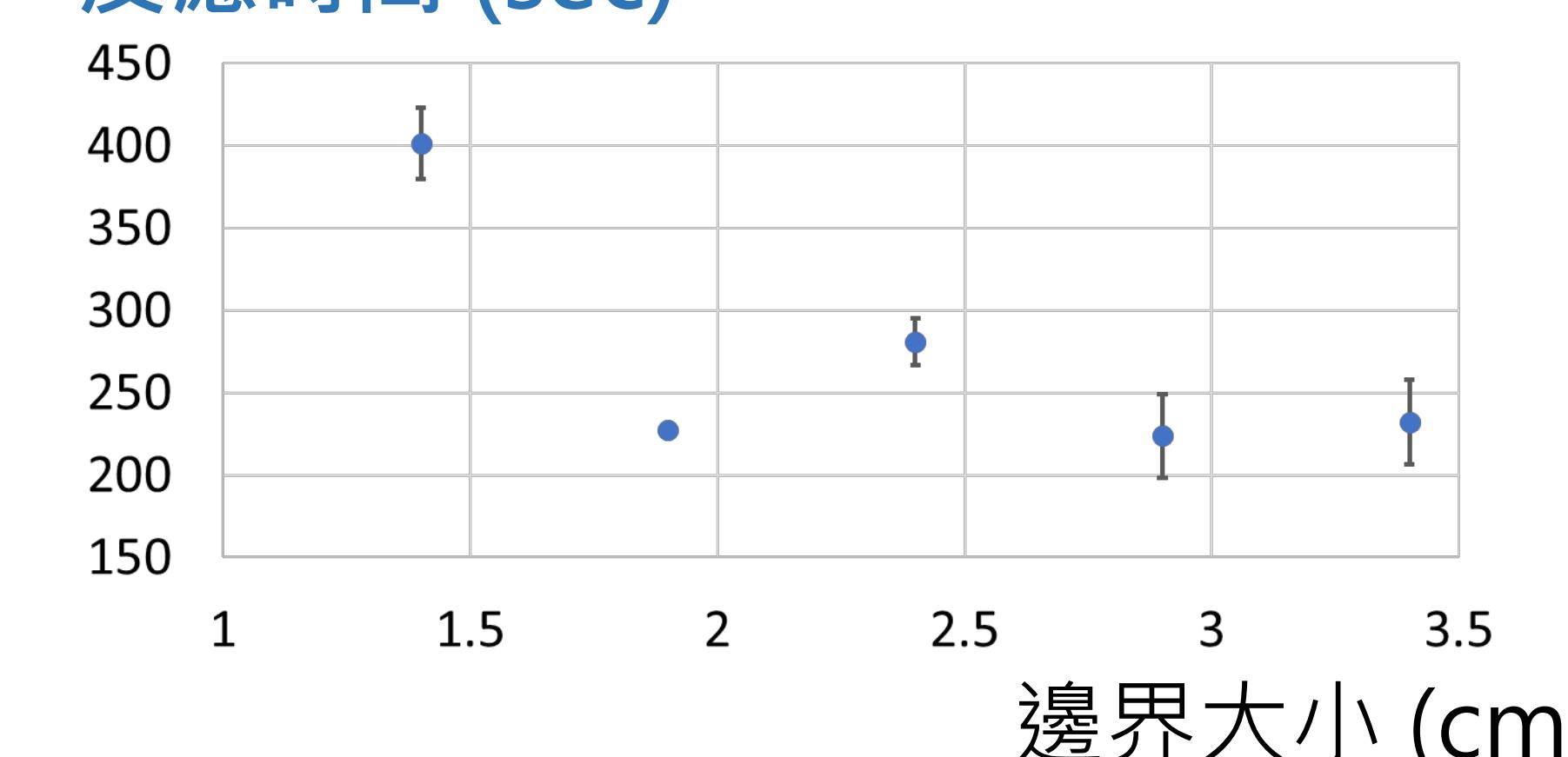
內縮原因示意圖

有限邊界內液滴分裂現象階段圖片

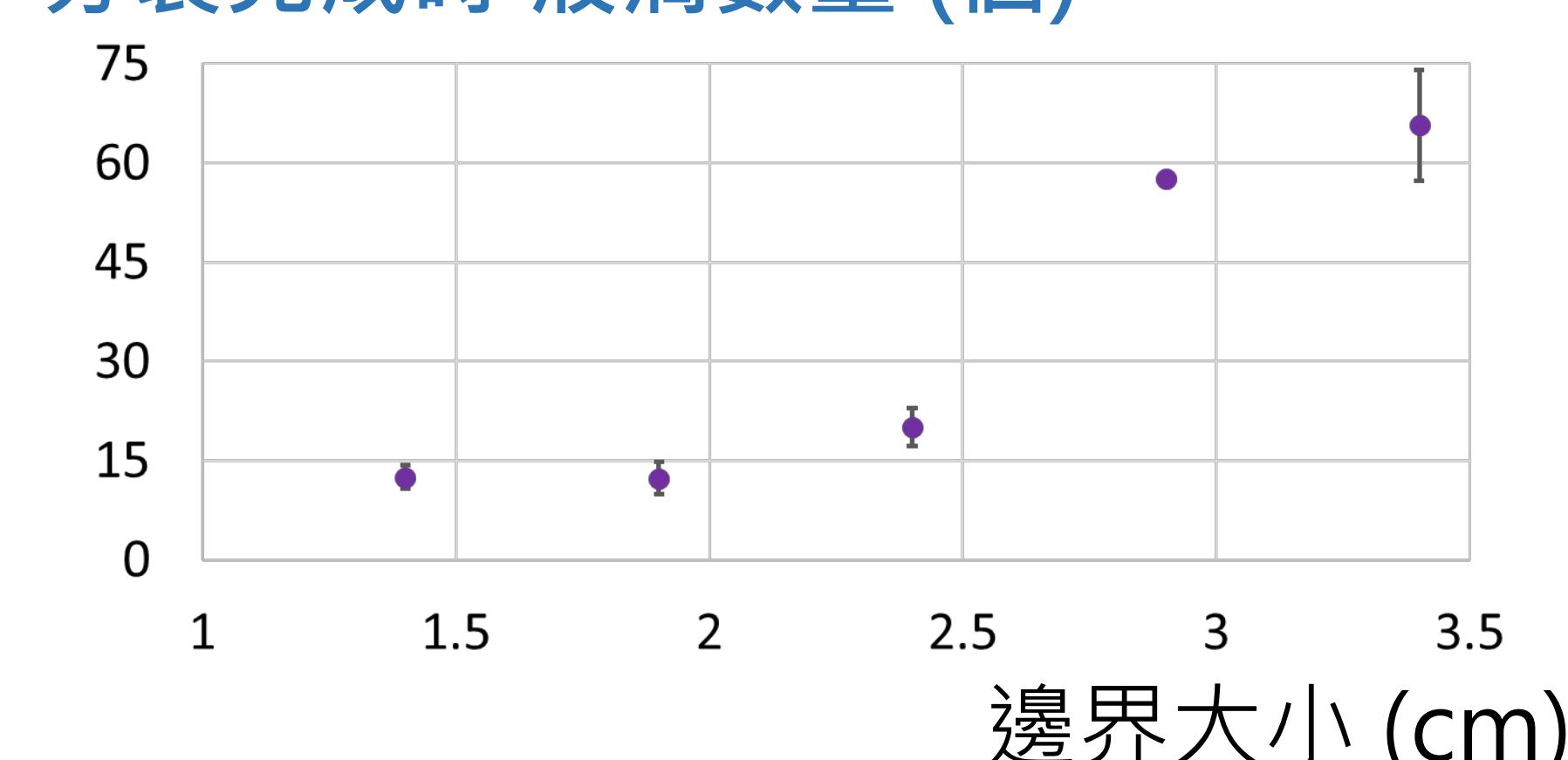


不同有限邊界大小對液滴分裂現象的影響

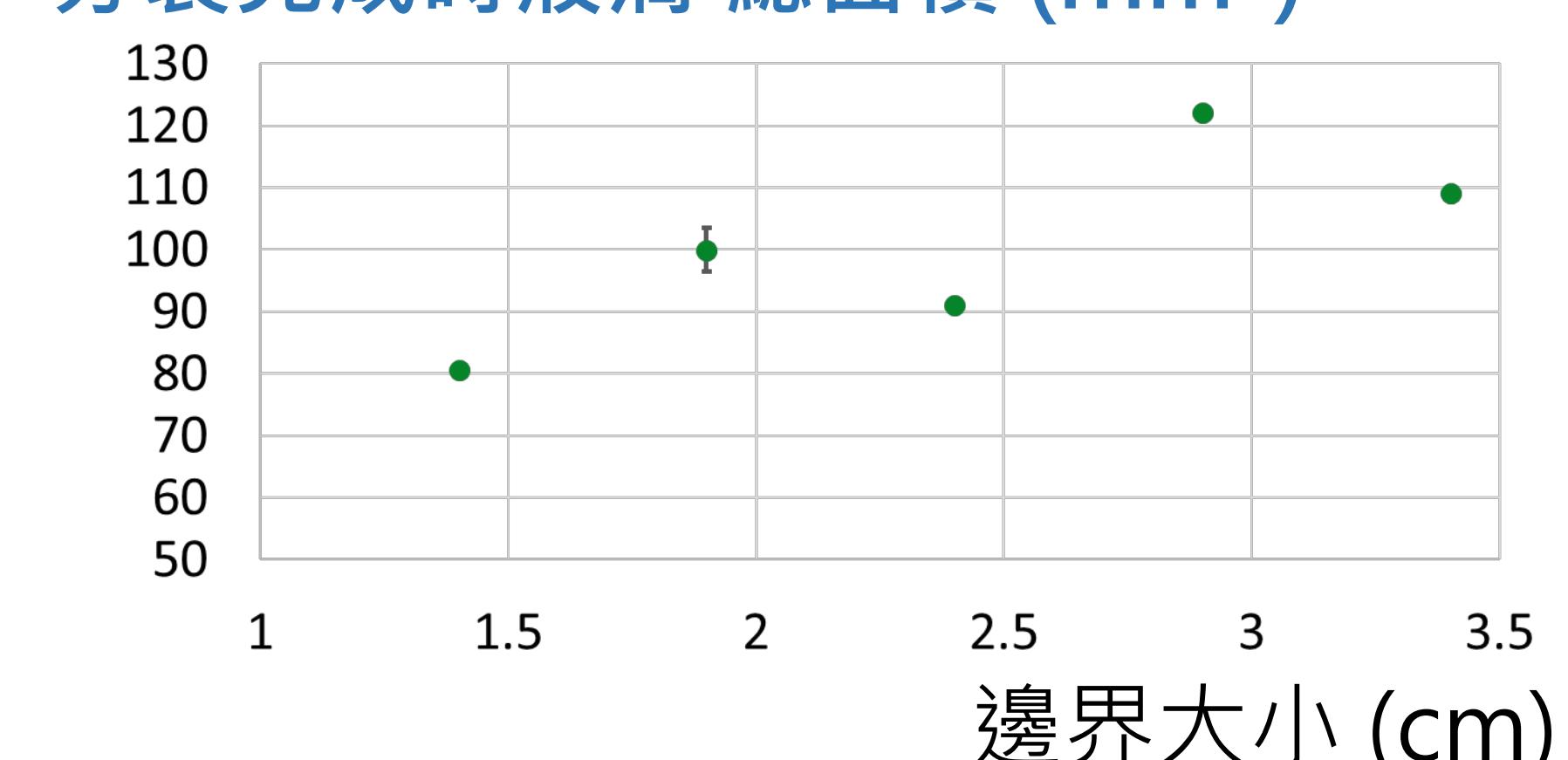
反應時間 (sec)



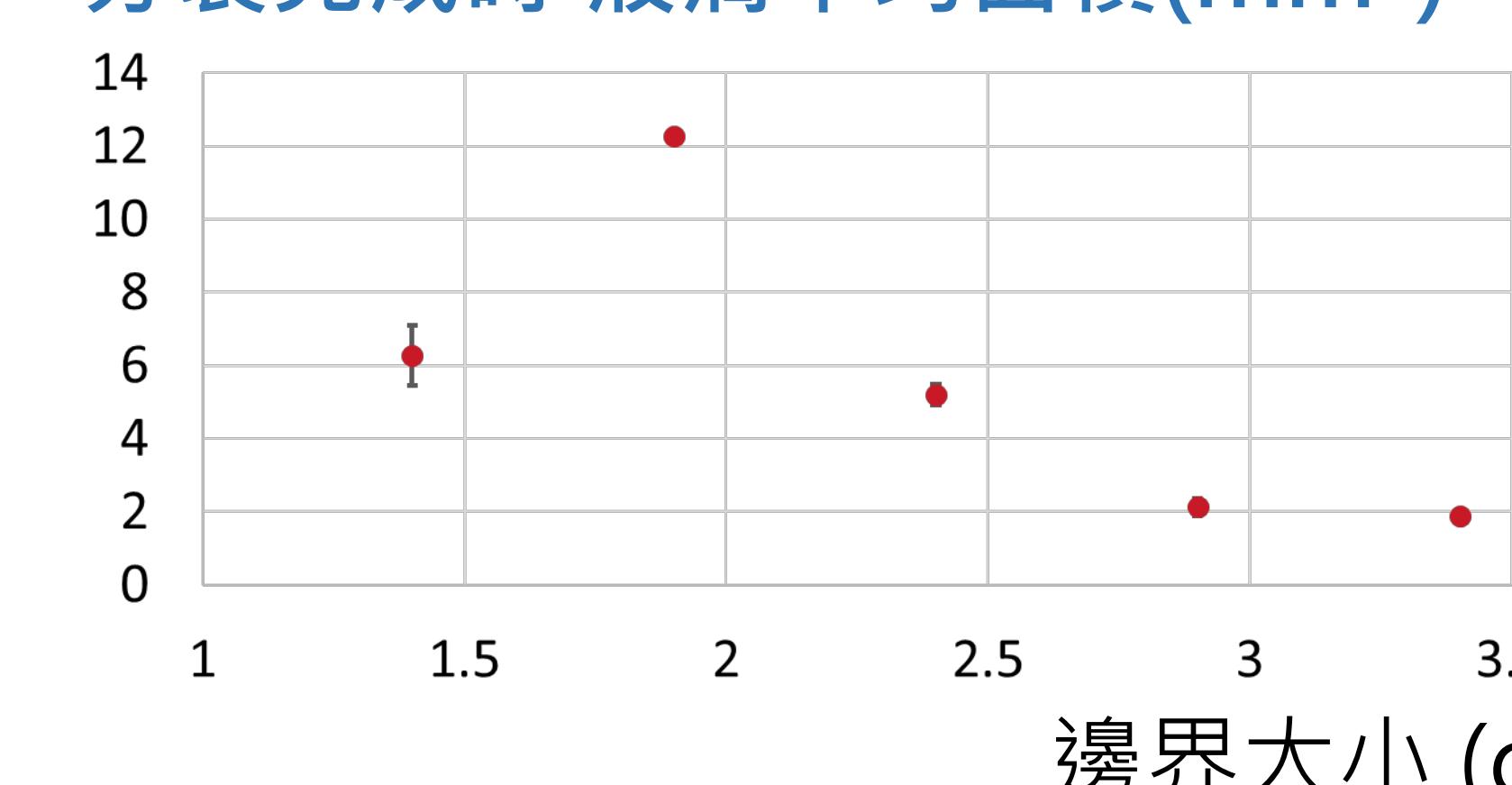
分裂完成時 液滴數量 (個)



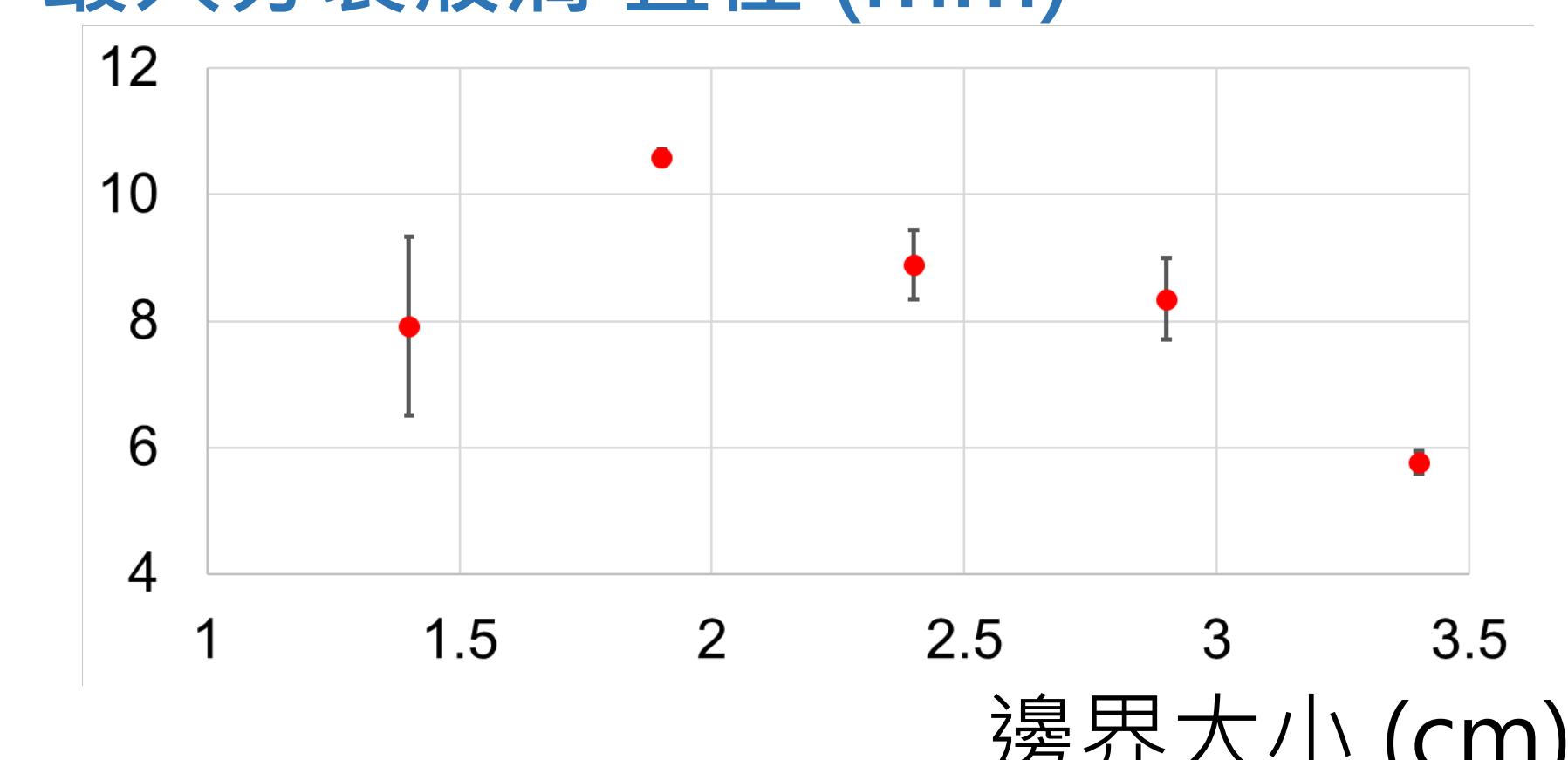
分裂完成時 液滴 總面積 (mm²)



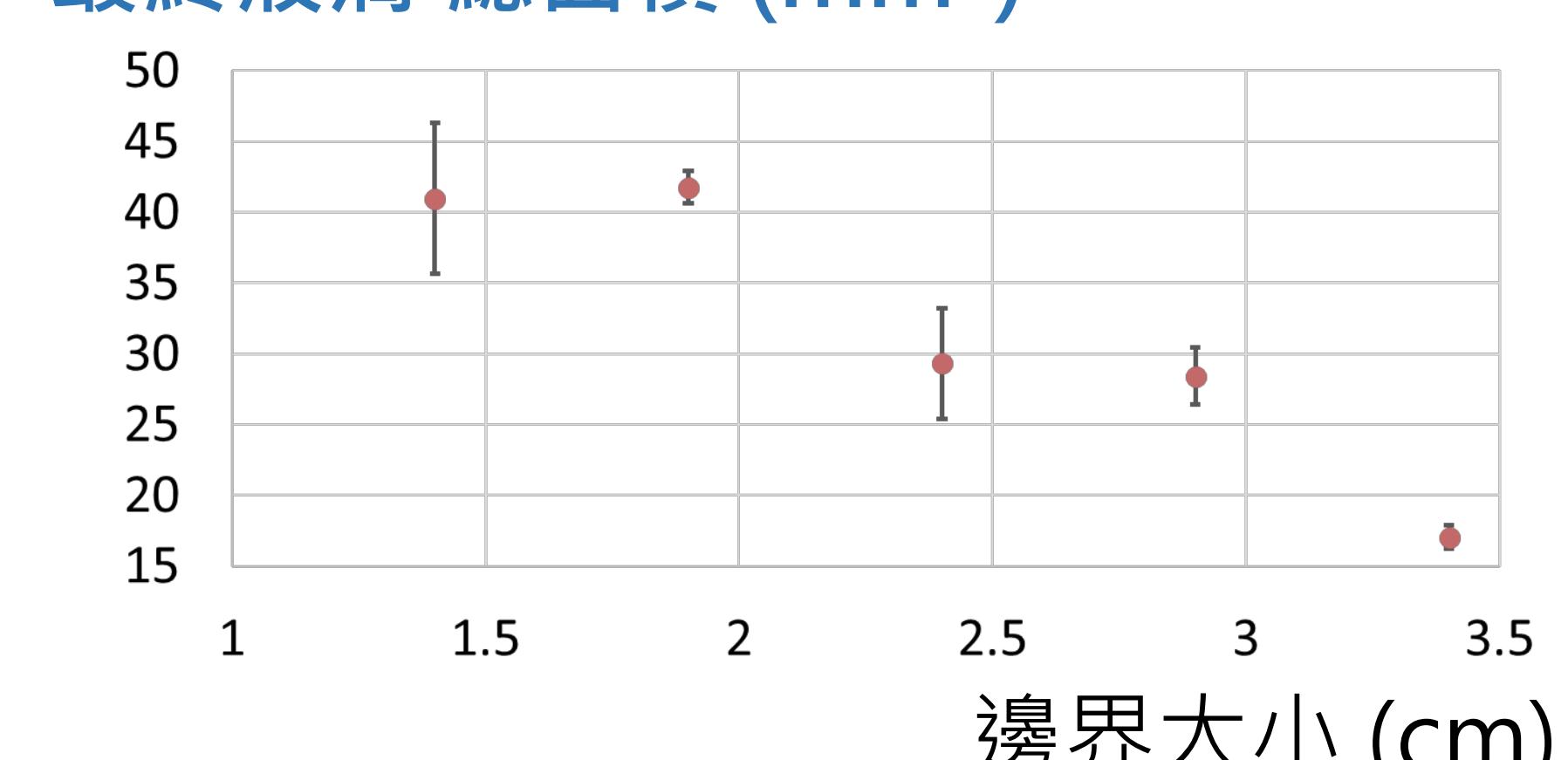
分裂完成時 液滴平均面積 (mm²)



最大分裂液滴直徑 (mm)



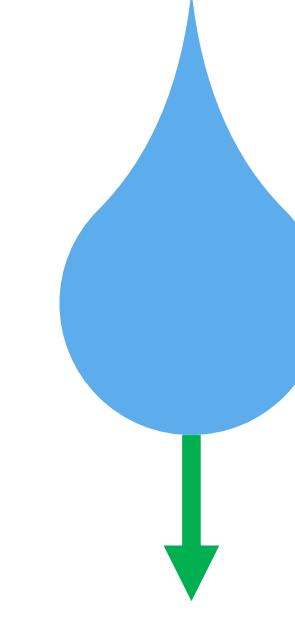
最終液滴 總面積 (mm²)



一、圓環的形成與分裂後內縮之原因

1. 內縮速度由快到慢為：Type 2、Type 3、Type 4、Type 1。
2. Type 3 與 Type 4 中，造成內縮速度差異的原因為分裂液滴大小。
3. 油溫越高乙醇蒸發速率越快，因此液滴越快達臨界濃度停止擴散，擴散直徑越小。而內縮時乙醇蒸發速率越快，越快形成表面張力差，也越快達到平衡，因此內縮速率越慢。

油溫(°C)	27.1	29.2	33.2
整體最大擴散直徑(mm)	41.932	39.823	35.661
擴散最大後十秒直徑(mm)	38.078	36.633	34.702
變化量(mm)	-3.854	-3.19	-0.959



滴落時

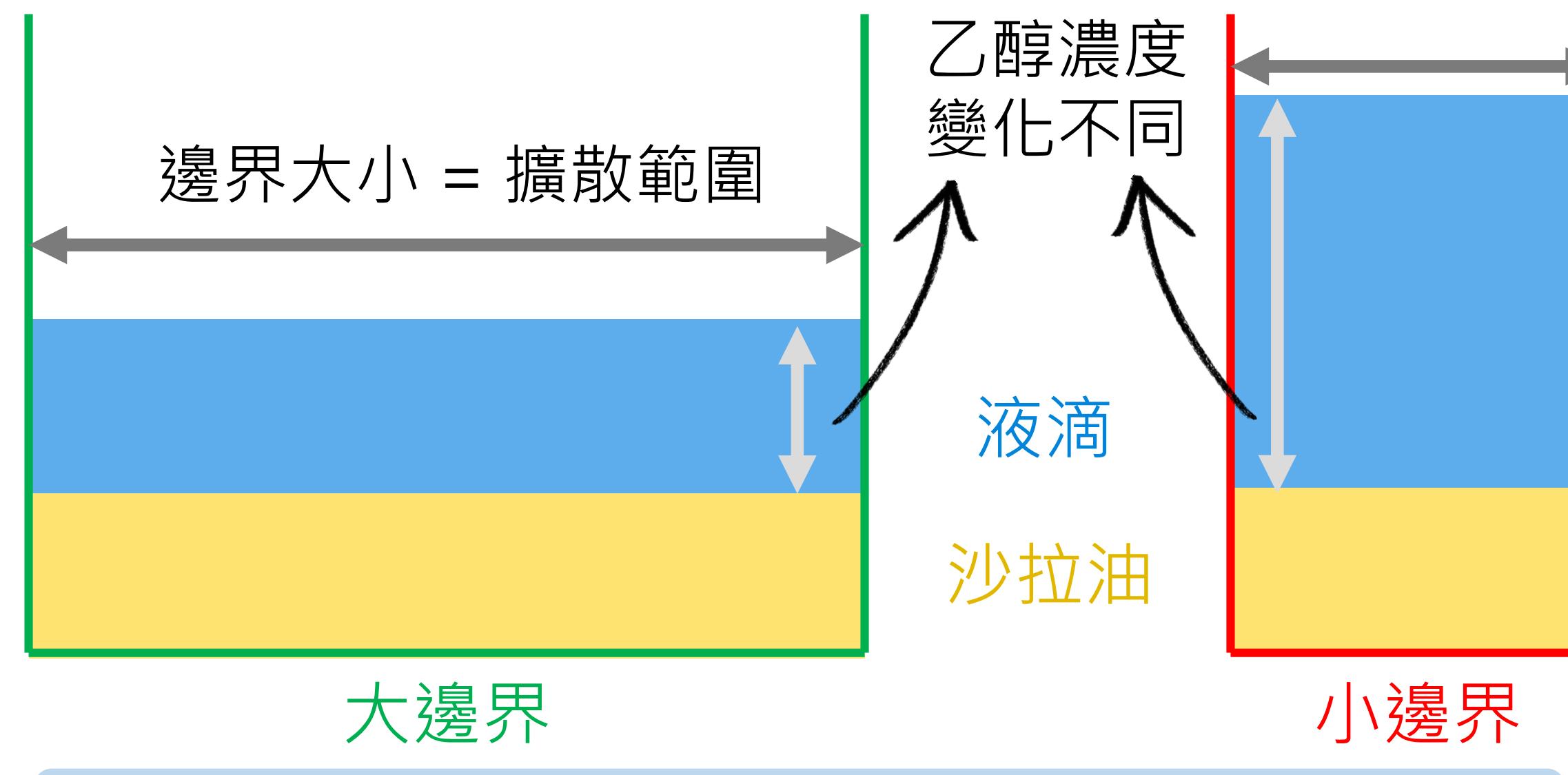
液滴滴落高度影響示意圖



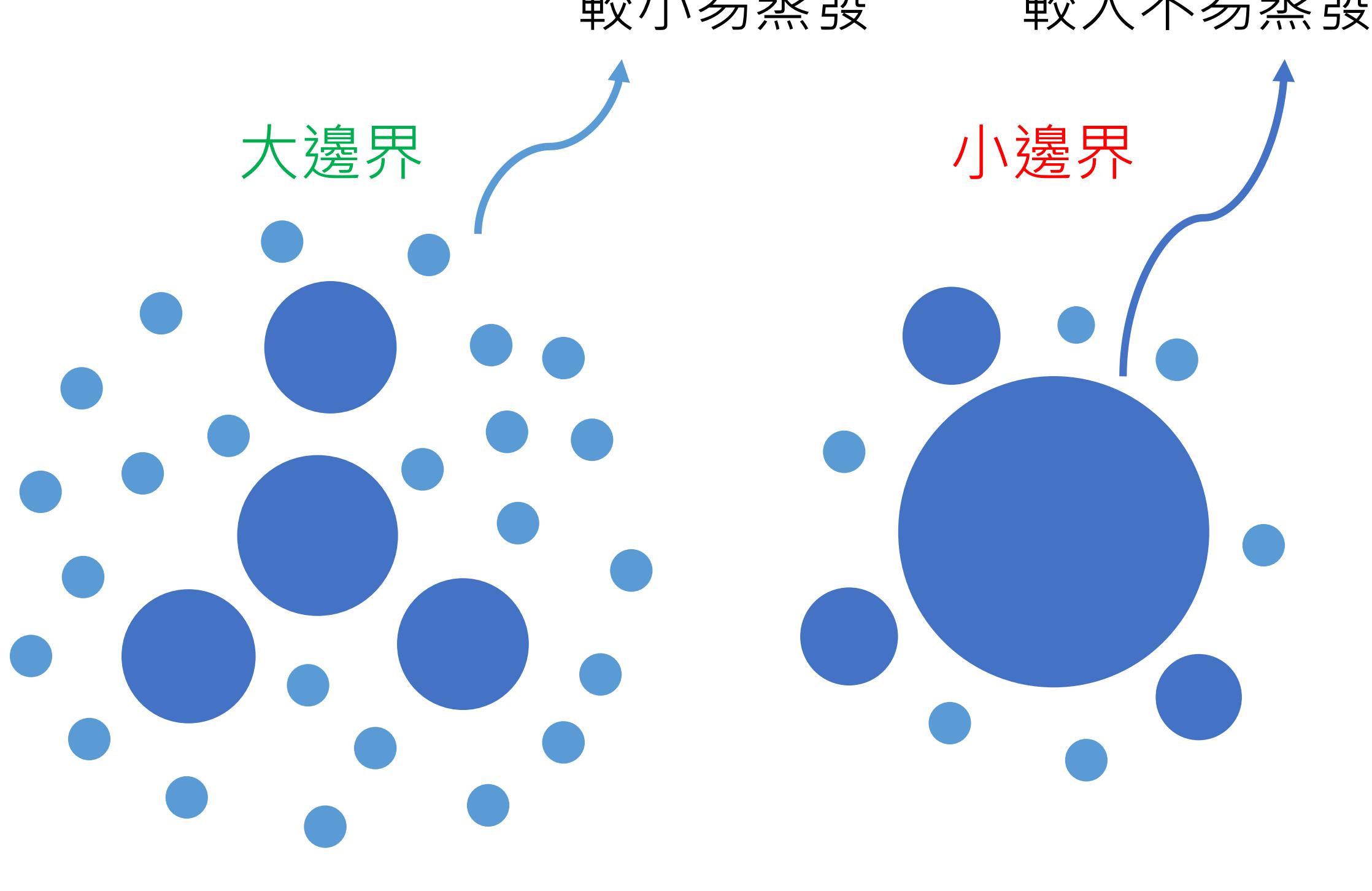
擴散時

二、液滴滴落高度對液滴分裂現象的影響

1. 推測因為液滴滴落與擴散的力方向垂直，兩者不會互相影響，因此推測高度不會影響擴散的速度，則反應時間也不受影響。
2. 推測液滴滴落高度不影響最大直徑，因為高度不影響液滴的擴散速度，且擴散直徑主要受濃度影響。



不同邊界大小之液滴擴散示意圖



不同邊界大小之液滴分裂示意圖

結論與未來展望

結論

1. 探討液滴滴落高度對液滴分裂現象的影響，發現液滴滴落高度不影響反應時間與擴散直徑。
2. 本研究首次提出液滴分裂後出現內縮現象的成因，推測為油厚較小，使液滴外擴受限並堆積形成厚邊緣，接著因為乙醇蒸發後濃度差異，形成向內馬倫哥尼流。
3. 內縮行為於液滴擴散尚未達最大時即開始出現，與液滴分裂過程同步進行，為本研究觀察到穩定且可重現之特徵現象。
4. 本研究針對有限邊界內的現象進行探討，並發現其現象與邊界未受限時不同。
5. 有限邊界大小極小時，反應時間顯著較長。
6. 有限邊界大小影響分裂液滴分布，邊界越大，分裂液滴總面積越大；且液滴分布會影響分裂後的蒸發，邊界越大，最終液滴總面積越小。
7. 有限邊界大小影響分裂完整性，邊界越小分裂越不完整，單一較大液滴越大。
8. 分裂與內縮相關研究之參考，具補充文獻之價值。

參考資料及其他

圖片來源聲明：本研究圖片除另有說明外，皆由研究團隊自行製作、繪製或拍攝。

1. 伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛（2023），液滴爆炸。2023年臺灣國際科學展覽會。
2. Keiser, L., Bense, H., Colinet, P., Bico, J., & Reyssat, E. (2017). Marangoni bursting: Evaporation-induced demulsification of binary mixtures on a liquid layer. Physical Review Letters, 118(7), 074504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.074504>