

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第一名

051818

液滴爆炸

學校名稱：嘉義縣私立協同高級中學

作者：	指導老師：
高一 伍瀚煦	何世明
高二 陳羿宏	蕭嘉偉
高一 莊毓飛	

關鍵詞：表面張力、表面能、馬倫哥尼效應

得獎感言

首先，感激我們的世明和嘉偉老師，在不斷討論和溝通中，陪我們一起走過這段辛苦日子，相信這已經在我們人生中留下精彩的一頁。也特別感謝評審給我們的建議和引導，讓我們有機會能夠更深入的學習。其實當初參加校內科展初選時，完全沒有想過還有機會繼續參展，因為我們並沒有很認真準備，直到校內初選前才忙到累死，也對自己的作品沒什麼信心。但當我們站上全國科展領獎的舞台時，一瞬間深深地感覺到，這半年的科展研究終於完美地落幕了，獲得第一名的榮耀，有了豐碩的成果，內心裡除了感動，更交織著許多的感謝。在科展競賽這個教科書以外的世界，我們付出了極大的心力，一路上真的是種種難關，不是隻字片語可形容，有些情緒，也不是字裡行間可表達，但是拿到第一名，這一切都值得了。整個研究過程，有很多的資源並不是單憑我們的能力可以輕易取得的，真心感謝實驗室提供給我們使用與學習的機會，讓我們因為有更完備的器材而實驗操作的更順遂；此外，世明和嘉偉老師，用陪伴與我們一步一步向前，沒有過多的干預，而是讓我們主動去探索。讓我們印象最深刻的，是分析實驗數據時，曾發現有些預期與實際相差很大，萌生直接當之為特例排除掉或是改數據的衝動；可是，這完全違背了做科學的精神。於是我們繼續努力，查找許多論文和翻閱那本很厚的流體力學，多做了好幾組實驗驗證我們的假設。為了在有限的時間內，讓評審感受到我們最好的默契，可以把實驗內容做出最生動的詮釋，競賽前我們不停演練，團隊合作下終於有了好成果。我們也認為科展不是資優生的專利，成績好壞，並非是研究成功的主因，能夠抱持著熱忱的心與堅毅的態度才是關鍵，像我們同組有個校排只有前40%的同學，他就能有這樣的熱忱因而奪冠。



上台北科教館領獎合照



與兩位指導老師前往總統府接見

摘要

本研究探討乙醇水溶液液滴於疏水流體表面之分裂現象。此現象可利用揮發造成乙醇之濃度梯度所驅動的表面張力梯度來解釋，又稱為馬倫哥尼現象 (Marangoni Effect)。液體為達到最低表面能而改變表面積的普托瑞立不穩定現象 (Plateau Rayleigh Instability)也可以做為液滴分裂的解釋之一。

在研究中，研究團隊發現溶液在油面上會隨時間分裂出子液滴，並對於最終子液滴的半徑與分裂現象分別進行定量與定性之探討。本研究於先遣實驗中發現乙醇水溶液濃度之臨界下限為 65%~67%重量百分濃度，並以大於(含)此濃度之溶液進行關於乙醇濃度、溶液體積與油層厚度三項參數對於最終子液滴半徑、分裂時間、液滴最大擴散半徑與擴散半徑演變之影響。

壹、前言

一、研究動機

我們在網路上看到有人把染色的酒精水溶液滴到油上，發現他會分裂成許多的小液滴。好奇為何會有此現象發生，我們決定研究這個現象。在研究過程中，我們發現一些關於表面能和表面張力的概念，這是現在的國中課程所學習不到的，所以我們決定進一步去探討表面能和表面張力如何影響？甚至是酒精濃度、油高和液滴體積如何影響實驗？

二、研究目的

- (一) 研究初始液滴產生分裂的原因
- (二) 測量臨界條件(臨界濃度、體積、油高)
- (三) 改變酒精濃度探討液滴的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴半徑之間的關係
- (四) 改變酒精水溶液液滴的體積，探討它的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴大小之間的關係
- (五) 改變油的厚度，探討它的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴大小之間的關係

(六) 將實驗數據做成圖表並分析比對，並將圖表疊合，探討不同變因的實驗結果之間的關係。

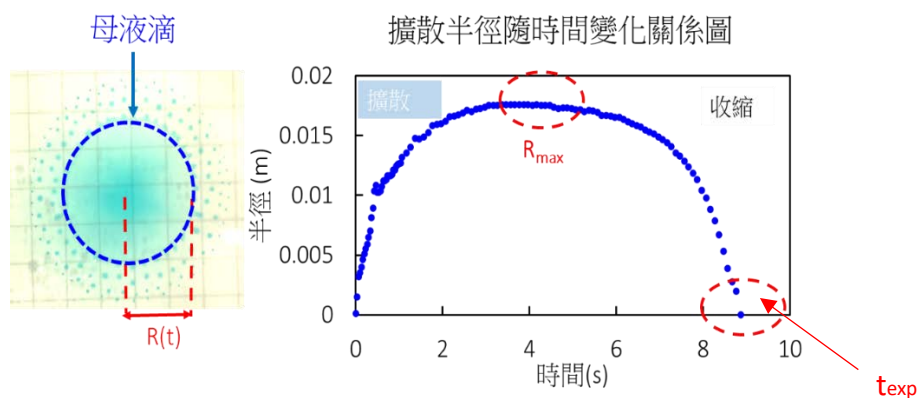
三、現象解釋與定義

1. 名詞解釋和定義

初始液滴：初始滴下的液滴，並觀察他的分裂情形

最大半徑(R_{max})：初始液滴擴散到開始收縮時的最大半徑

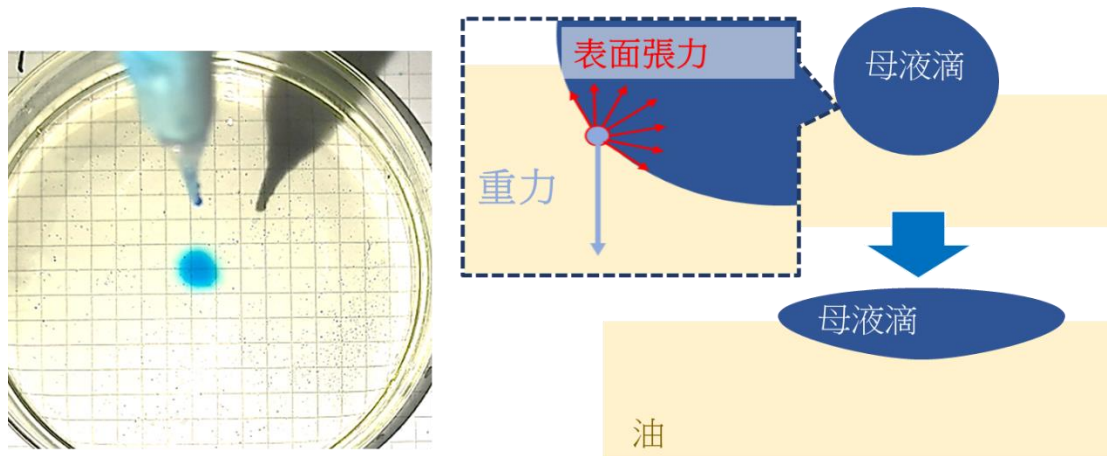
反應時間(t_{exp})：初始液滴從擴散到收縮回一點的所需時間，下圖為示意圖



2. 我們將此反應分為四個階段

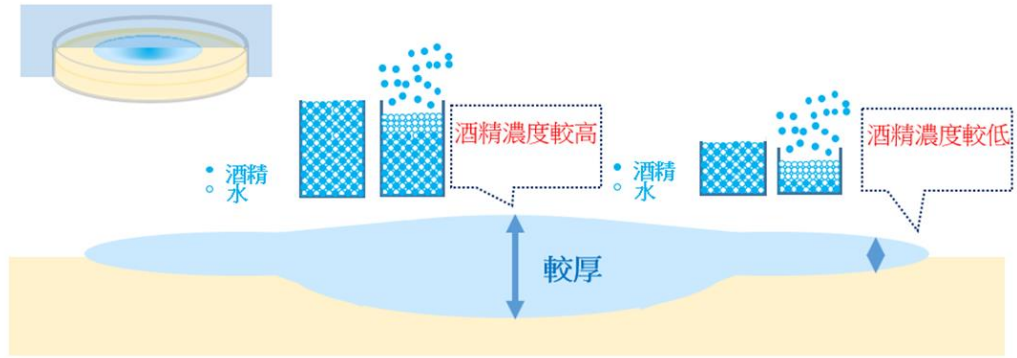
第一階段：重力影響

1. 因為重力造成影響，重力會將初始液滴往下拉，而液滴所擁有的表面張力不足以將液滴維持為球形，所以初始液滴形狀變扁平。下圖為示意圖

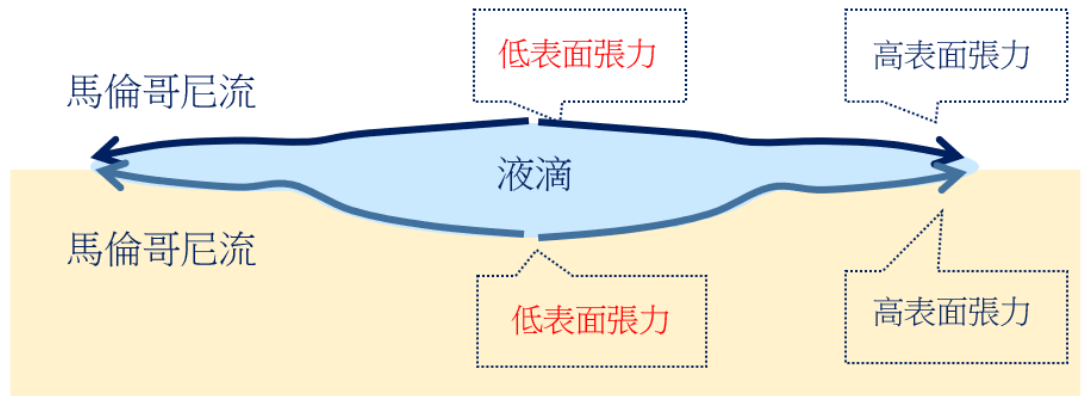


第二階段：濃度梯度 ---- 馬倫哥尼流

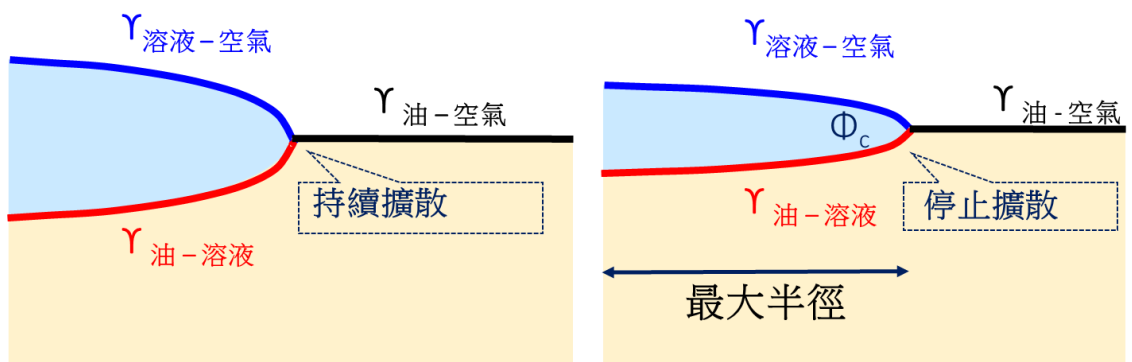
1. 如圖所示，液滴的邊界比中心薄，且酒精蒸發的比水快，因此，經過一樣的時間後，邊界的濃度會比中心來的低，從而產生表面張力的差異。



2. 表面張力梯度會使淨力從表面張力較低處往表面張力較高處，造成馬倫哥尼流。下圖為示意圖

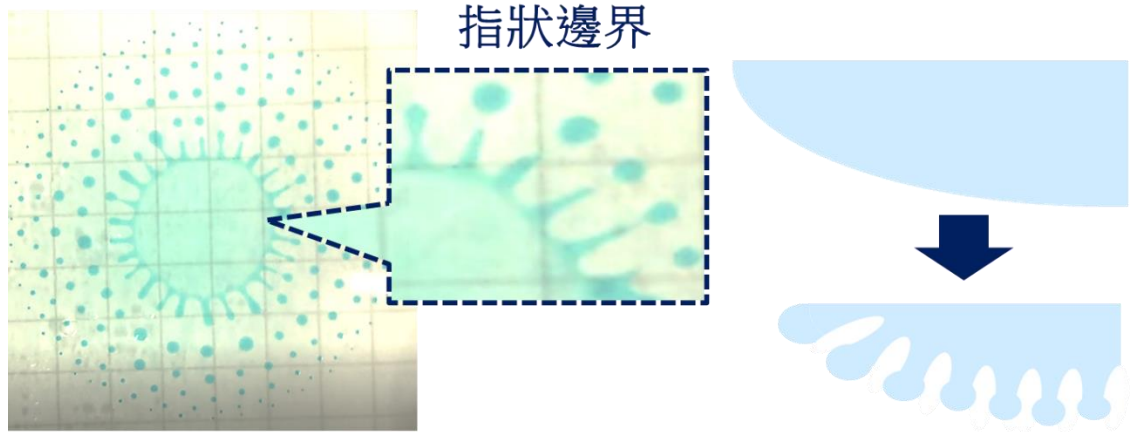


3. 整個系統會嘗試維持最小表面能，所以當 $\gamma_{\text{油-溶液}} + \gamma_{\text{溶液-空氣}} > \gamma_{\text{油-空氣}}$ 時，液滴會以增加溶液表面積方式來減少表面能(γ : 表面張力)。但是，當前兩項表面張力和等於油和空氣介面的表面張力的話，液滴將會停止擴散。而當邊界濃度為 Φ_c 時，液滴會停止擴散，所以 Φ_c 會被定義為邊界濃度。下圖為示意圖



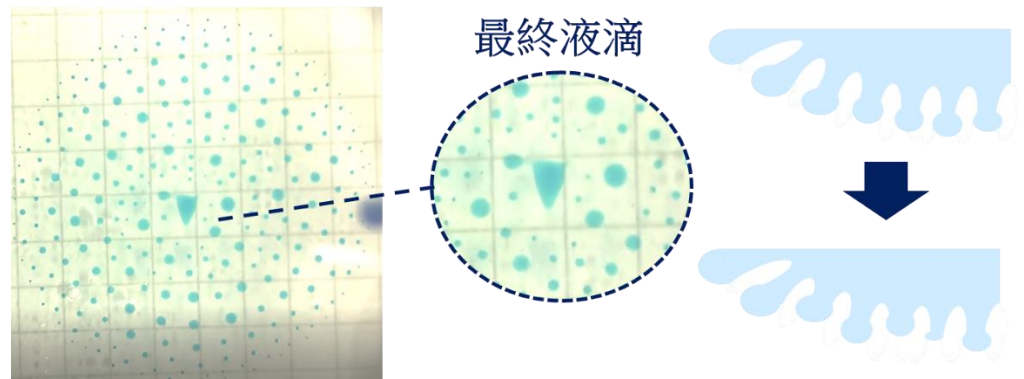
第三階段: 不同形狀之間的不同的表面能

1. 為了維持最小表面能，液滴會減少其表面積，因此會造成液滴的邊界油平滑邊界變為指狀邊界。下圖為示意圖

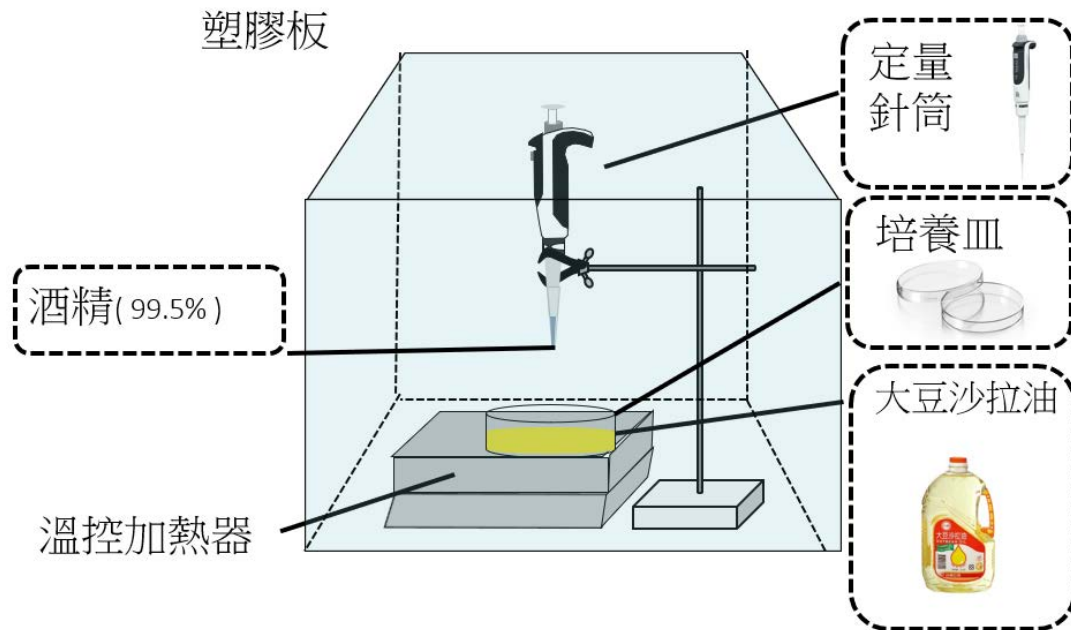


第四階段: 液滴最終的分裂 ----- 普托瑞力不穩定性

1. 因為液滴仍然需要維持最小表面能，所以只撞邊界會開始分裂，而此現象被稱為普托瑞利不穩定性。
2. 最終液滴：初始液滴最後分裂出的小液滴。下圖為示意圖



貳、 研究器材與架設



參、 研究方法與測量

一、 研究方式 ----- 先遣測量 (蒸發速率)

1. 將酒精倒入培養皿內，並放置在磅秤上
2. 以影片記錄觀察在一定時間內重量變化
3. 利用 Excel 計算準確數值

二、 研究方式 ----- 改變濃度

1. 架設 pipet 滴管及鐵架並用水平儀確認滴管與桌面垂直。
2. 架設攝影機調整視野到可以拍到水噴出清晰影像的適當位置，並確保其與桌面平行。
3. 利用溫控加熱器控制油溫並用溫度計測量油溫，分別將大豆沙拉油加熱至所需溫度 25°C。
4. 計算並調配各濃度酒精溶液 (75%、80%、85%.....等)
5. 利用攝影機拍攝液滴分裂的情形重複以上步驟三次以上，每次需確認操作成功。
6. 利用 Tracker 進行分析並取得各種條件下酒精液滴的擴散半徑、最終液滴大小，反應時間，再利用 EXCEL 加以分析。

三、 研究方式 ----- 改變初始液滴體積

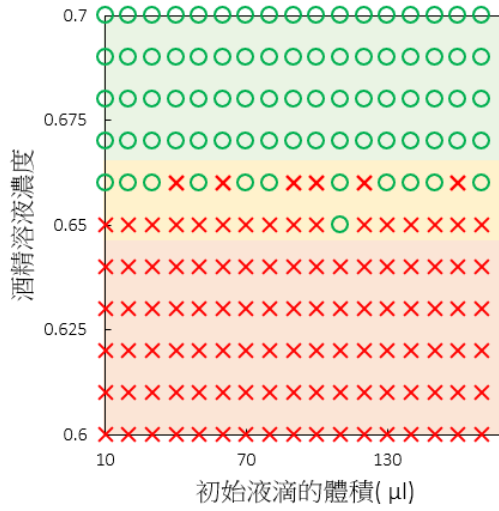
1. 架設 pipet 滴管及鐵架並用水平儀確認滴管與桌面垂直。
2. 架設攝影機調整視野到可以拍到水噴出清晰影像的適當位置，並確保其與桌面平行。
3. 利用溫控加熱器控制油溫並用溫度計測量油溫，分別將大豆沙拉油加熱至所需溫度 25°C。
4. 利用定量滴管的功能進行調整出示液滴的體積
5. 利用攝影機拍攝液滴分裂的情形重複以上步驟三次以上，每次需確認操作成功。
6. 利用 **Tracker** 進行分析並取得各種條件下酒精液滴的擴散半徑、最終液滴大小，反應時間，再利用 **EXCEL** 加以分析。

四、研究方式 ----- 改變油高

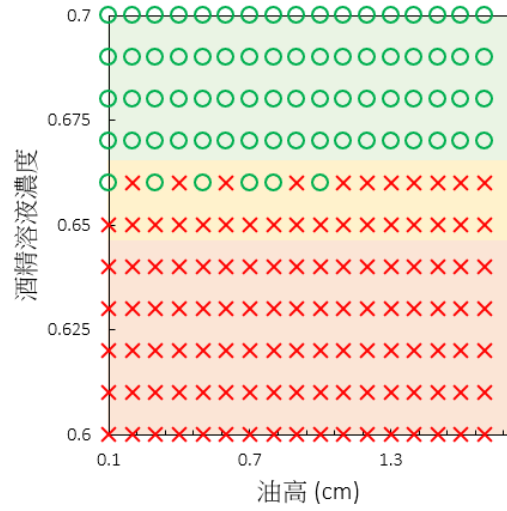
1. 架設 pipet 滴管及鐵架並用水平儀確認滴管與桌面垂直。
2. 架設攝影機調整視野到可以拍到水噴出清晰影像的適當位置，並確保其與桌面平行。
3. 倒入不同高度的油
4. 利用溫控加熱器控制油溫並用溫度計測量油溫，分別將大豆沙拉油加熱至所需溫度 25°C。
5. 利用攝影機拍攝液滴分裂的情形重複以上步驟三次以上，每次需確認操作成功。
6. 利用 **Tracker** 進行分析並取得各種條件下酒精液滴的擴散半徑、最終液滴大小，反應時間，再利用 **EXCEL** 加以分析。

二、測量邊界條件

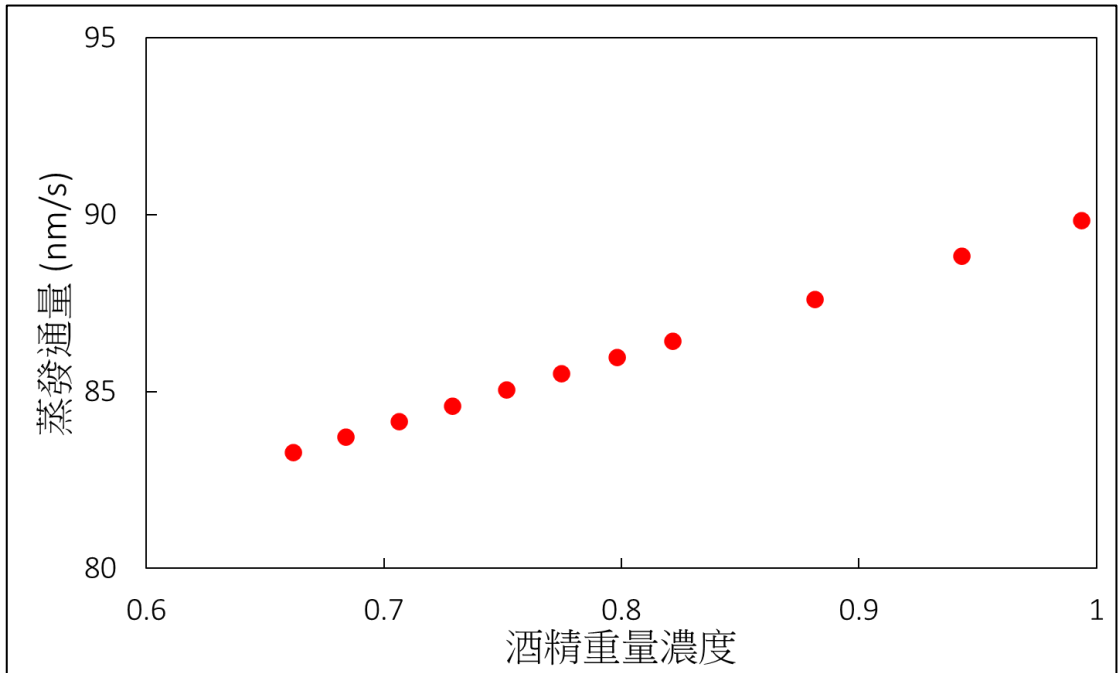
當變因為體積時的邊界濃度



當變因為油高時的邊界濃度



三、 測量酒精蒸發速率



四、 理論探討:經驗式

特徵半徑 :

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

特徵時間:

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

τ : 反應時間

ϕ_0 : 實驗溶液濃度

ϕ_c : 邊界濃度

Ω_0 : 實驗液滴體積

γ_c : 當濃度為邊界濃度時的表面張力

γ_0 : 液滴中心的表面張力

η_o : 油的黏度

j_v : 溶液蒸發速率

7

H : 油高

表面張力差：

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_0$$

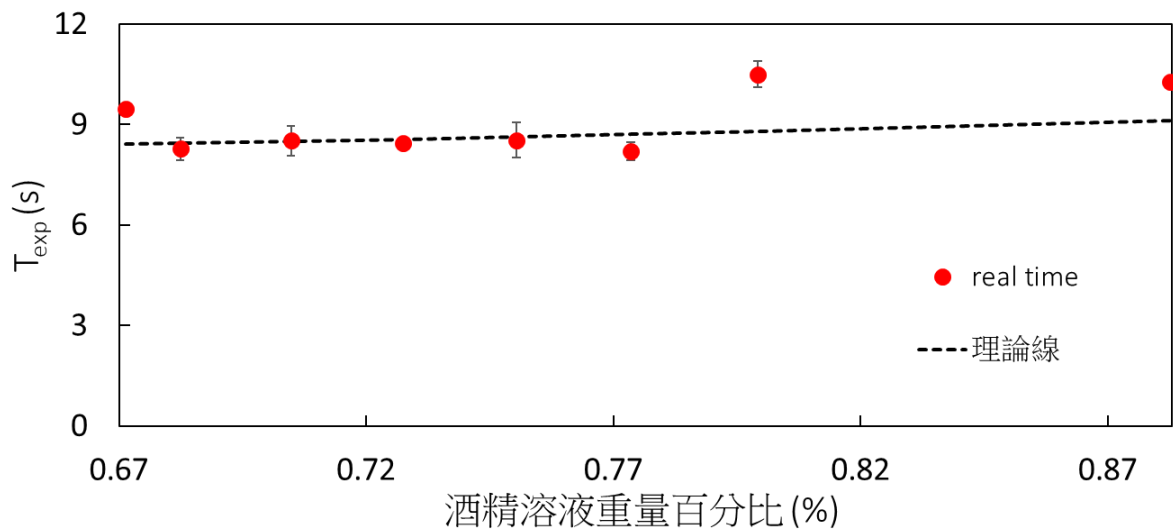
從上面的式子得知 $R^* \propto R_{max}$ 且 τ 和 t_{exp} 有線性關係

肆、研究結果

一、 改變酒精溶液濃度

1. 時間變化

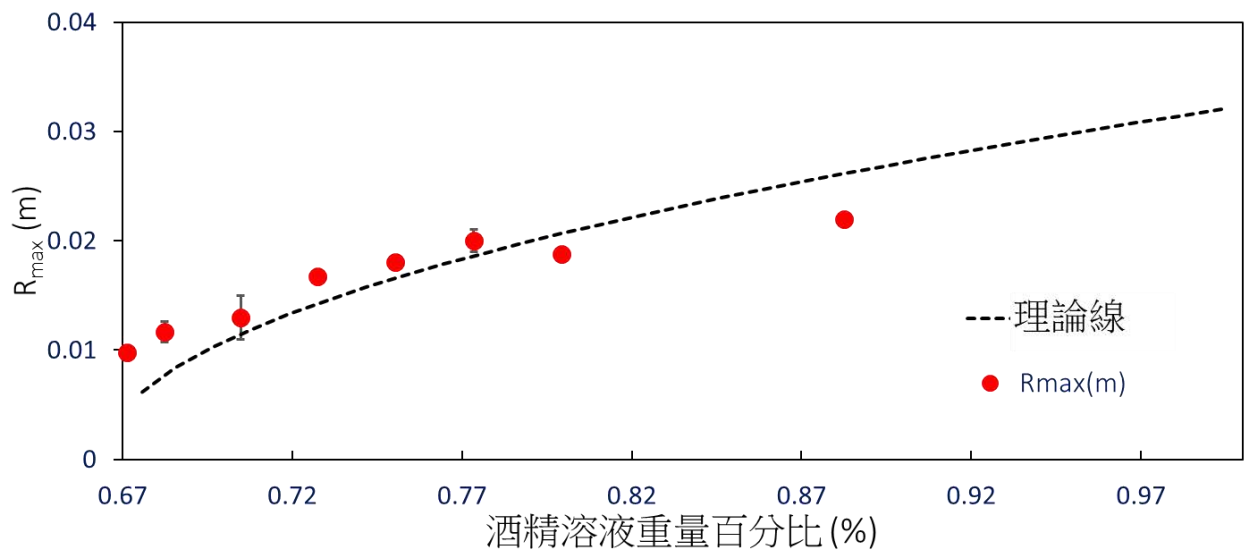
T_{exp} - 酒精溶液重量百分比



因為較高濃度所需達到臨界濃度的時間較長 (90%到 70%會比 80%到 70%久)，所以時間會變長。

2. 最大半徑變化

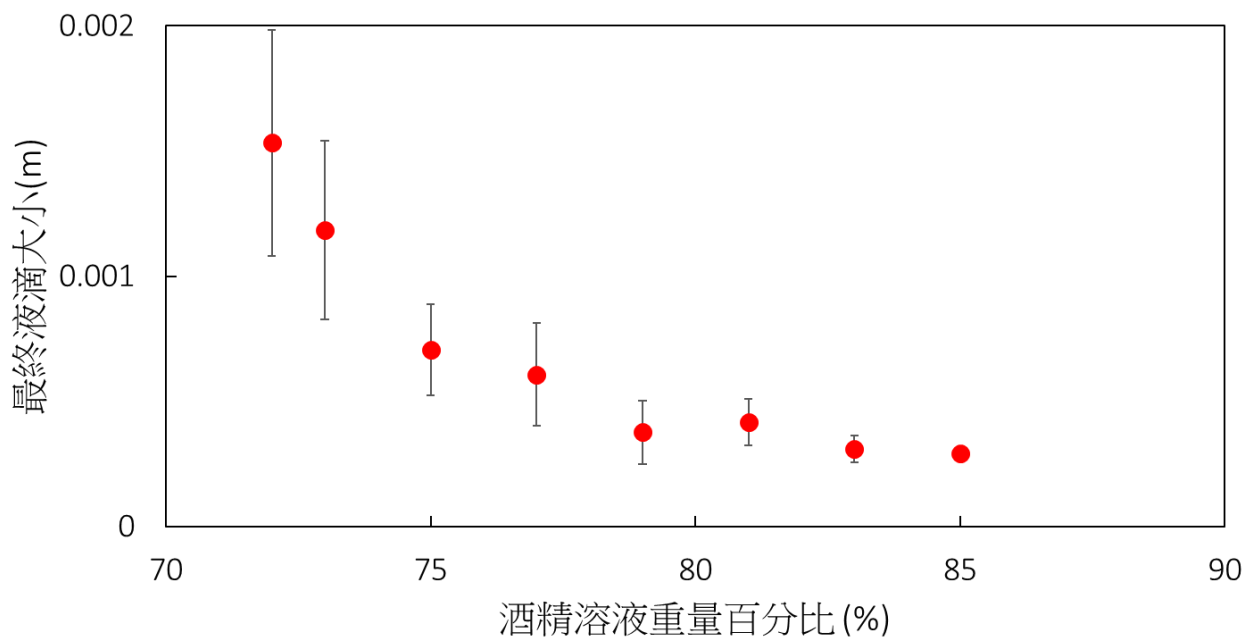
R_{max} - 酒精溶液重量百分比



因為時間變長的關係，出示液滴備有更多時間去擴張和分裂，所以最大半徑也會跟著提升。

3. 最終液滴半徑變化

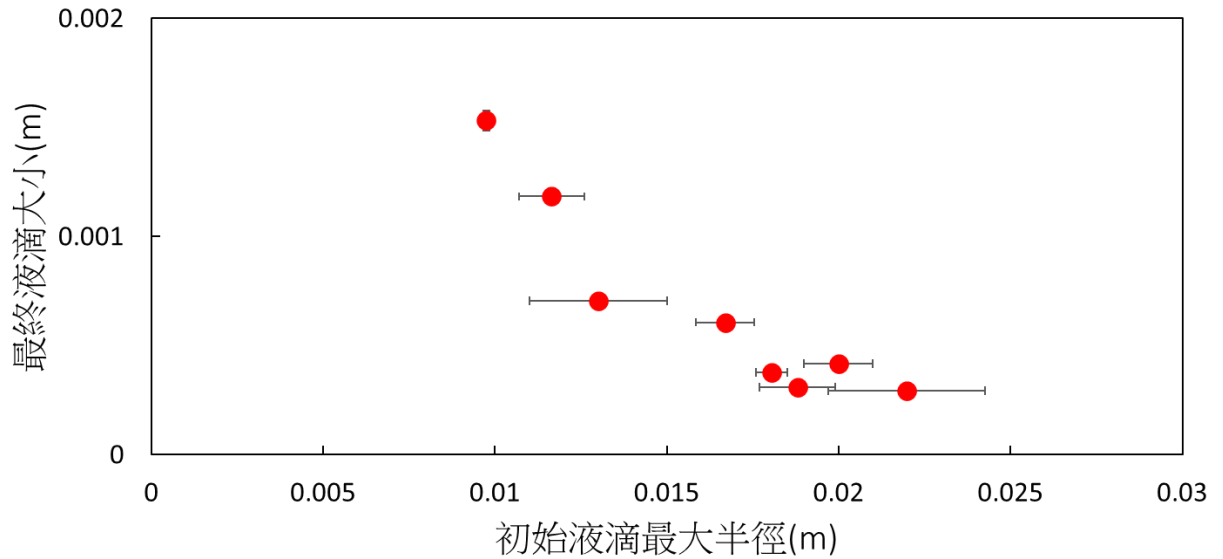
最終液滴半徑 - 酒精溶液重量百分比



最終液滴的大小會隨著濃度增高而減少。

4. 最終液滴與最大半徑的關係

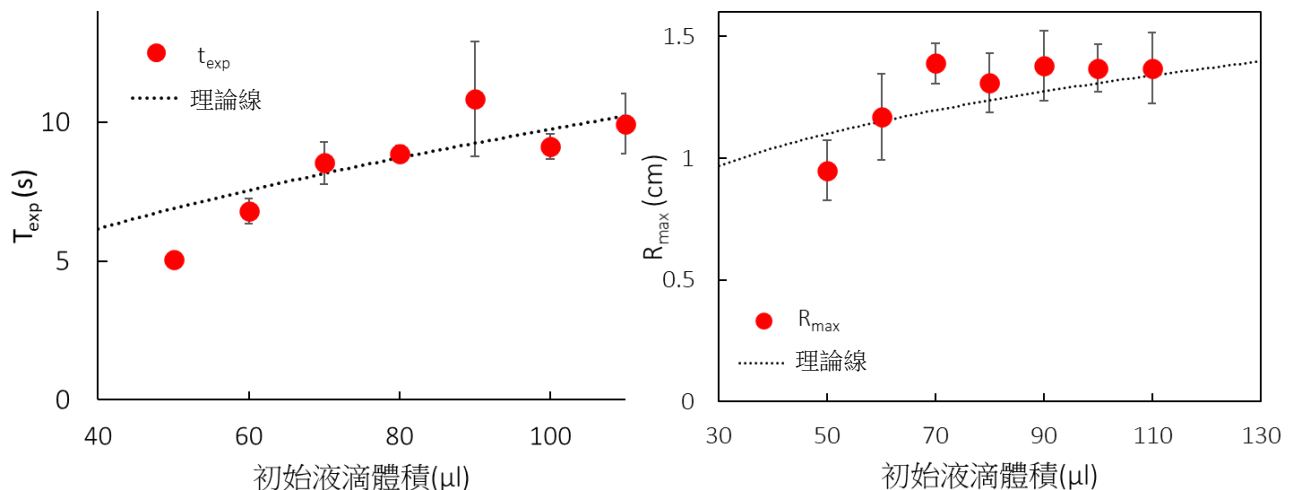
最終液滴大小 - 最大半徑



這是因為當濃度增加時，最大半徑會增加。而當最大半徑增加時，液滴的邊界的厚度就會變薄，所以最終液滴的大小會變小。

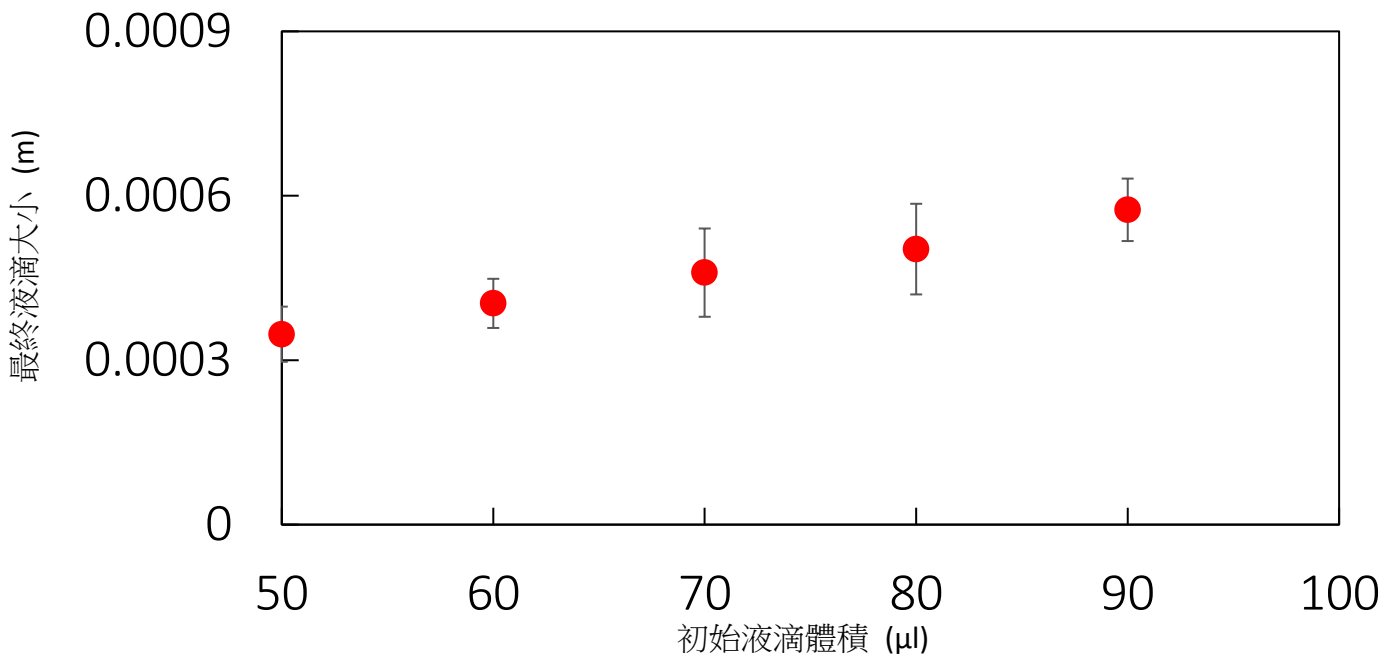
二、 改變初始液滴體積

1. 對時間及最大半徑影響



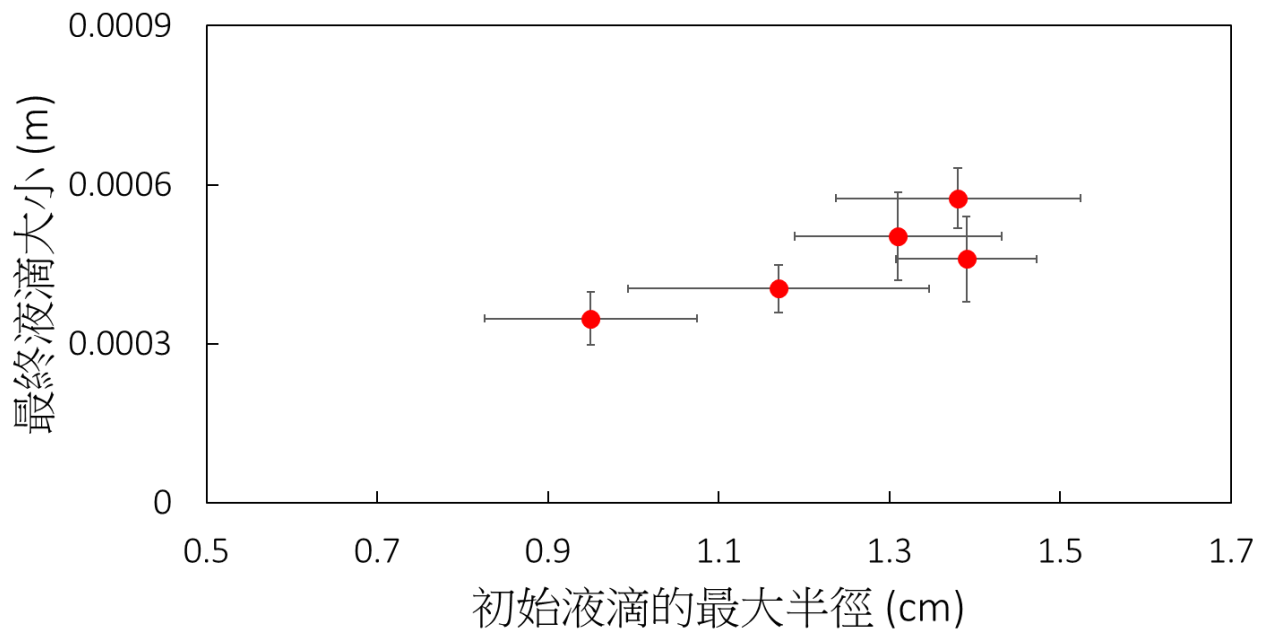
當初始液滴的體積增加時，耶低會需要更多時間去達到臨界濃度，所以時間會增加。當時間增加時，最大半徑也會增加。但是當液滴體積到達一定值的時候，上升趨勢會被限制，這是因為達到一定體積後，液滴的重量會太重從而促使表面張力梯度造成的馬倫哥尼流帶不動它。

2. 對最終液滴大小影響



而最終液滴大小會跟初始液滴體積有正向關係

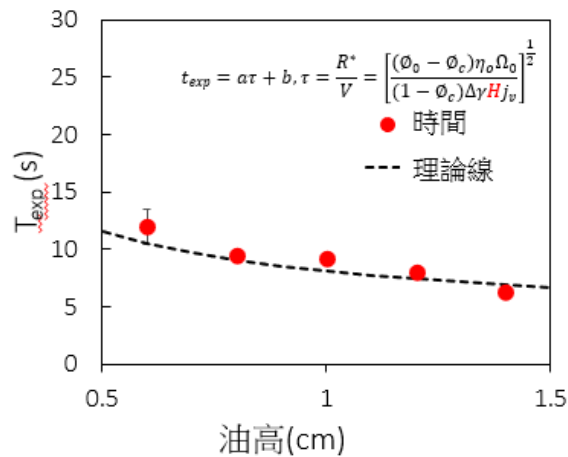
3. 最終液滴大小和最大半徑的關係



這是因為當最大半徑被限制的時候，多餘的體積將會被附加到最終液滴上。所以初始液滴體積、最大半徑和最終液滴大小會有正向關係。

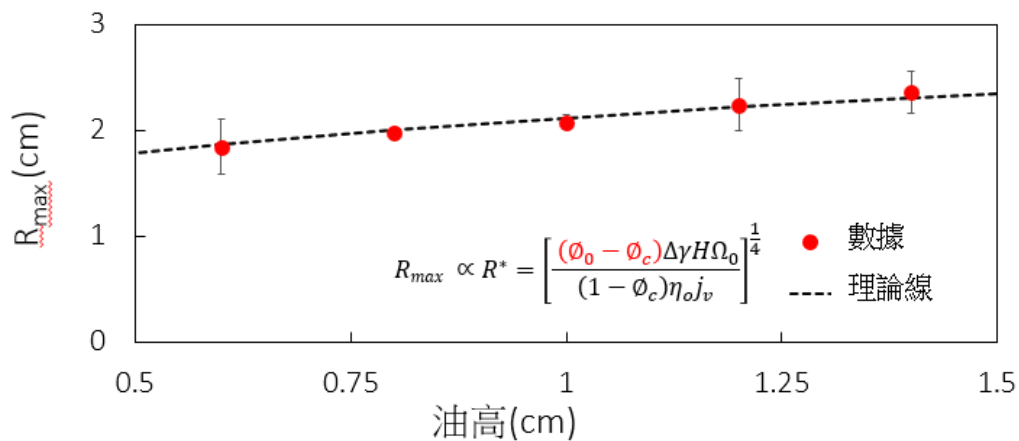
三、改變油高

1. 對時間影響



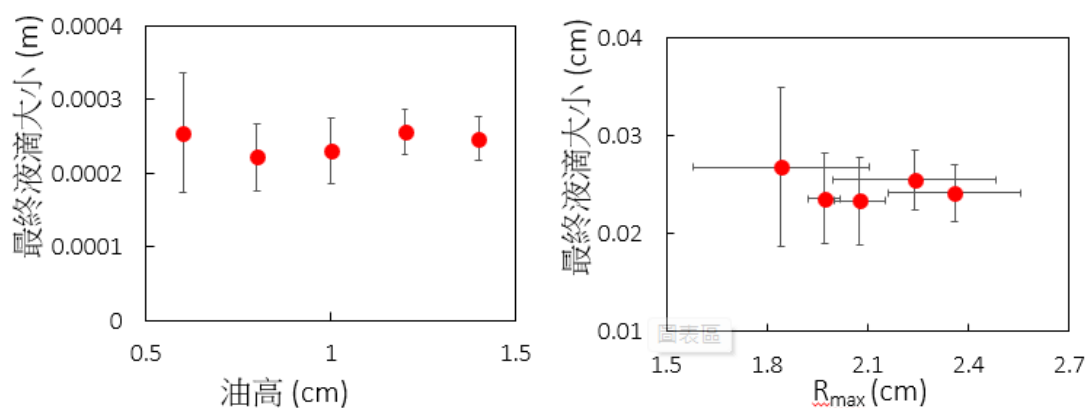
在溶液和油之間的馬倫哥尼流會帶動下面的油流動。而因為黏度效應的關係，油內部會產生強度逐漸減弱的介面層流。因為油要補償介面層流所造成的缺少的部分，所以在介面層下方會產生補償介面層流的管流。因為介面層流的高度是固定的，所以當油高減少時，管流的高度也會減少。因為管流的高度變小，關流會需要較高的速度去補償介面層流，但因為系統的能量是有限的，所以整個系統會同時降低介面層流的強度和管流的強度去達成平衡。當此兩種流動的強度降低時，油的流速就會減少，所以時間會增加。

2. 對最大半徑影響



當油高減少、時間增加時，初始液滴在擴散到更外圍前就會蒸發達到臨界濃度，所以最大半徑會隨著油高降低而降低。

3. 對最終液滴大小影響及與最大半徑之間的關係



最終液滴大小與最大半徑和油高的關係呈現負相關，但趨勢並不明顯，將會在之後的數據疊圖分析詳細說明。

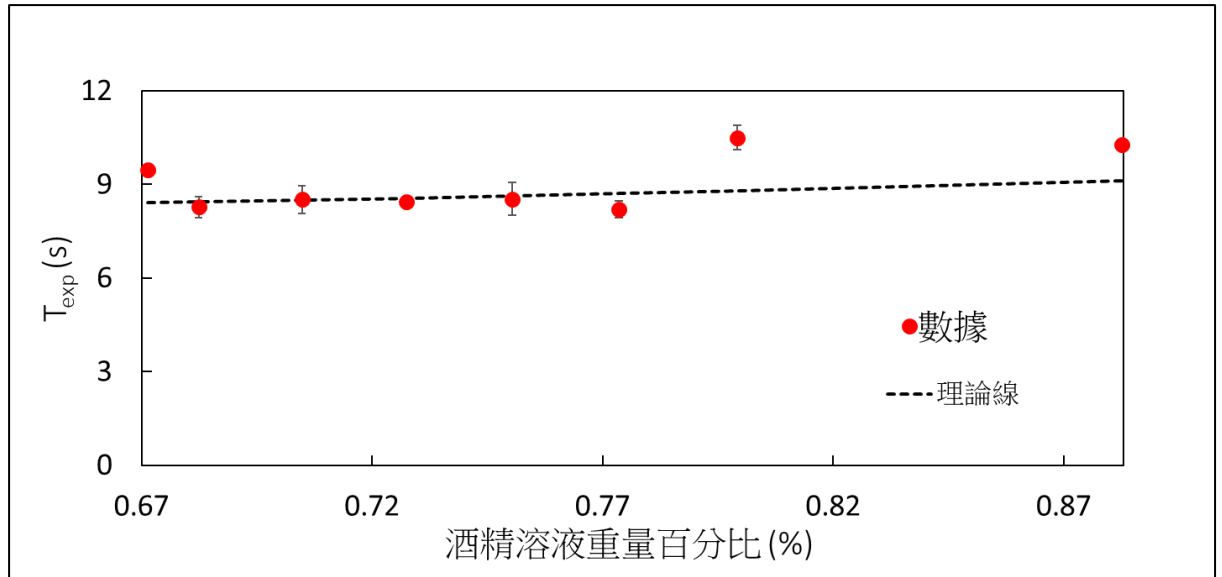
伍、討論

1. 研究結果與理論比對和解釋：

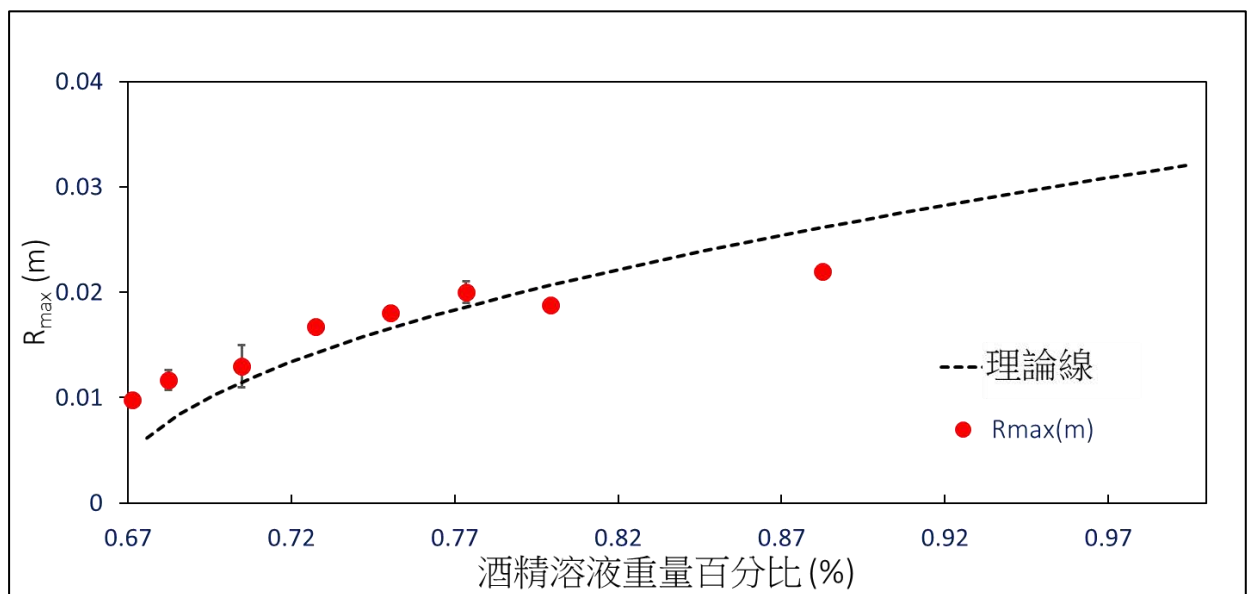
實驗一中，改變酒精濃度，探討改變酒精濃度對液滴的擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。此實驗改變的是下列公式中的 $(\phi_0 - \phi_c)$ ，並且畫出時間的理論線。

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

$$t_{exp} = a\tau + b$$

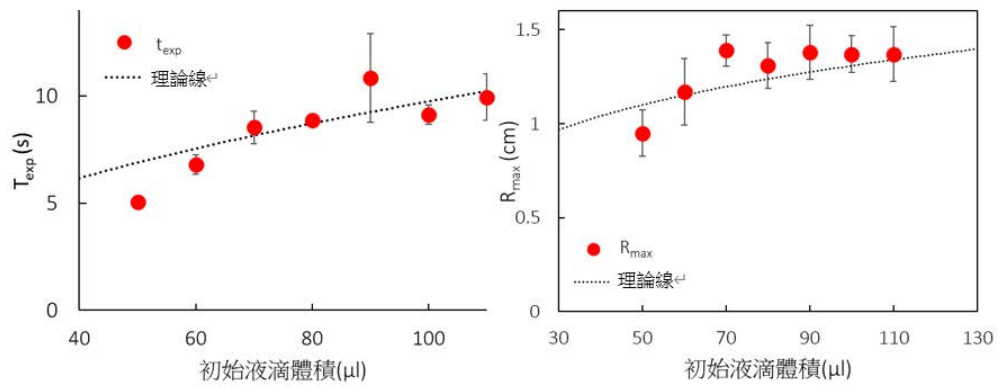


濃度越大，反應時間越長是因為酒精要達到邊界濃度，濃度愈高所需時間多。我們改變下面公式中的 $(\phi_0 - \phi_c)$ ，並畫出最大半徑的理論值

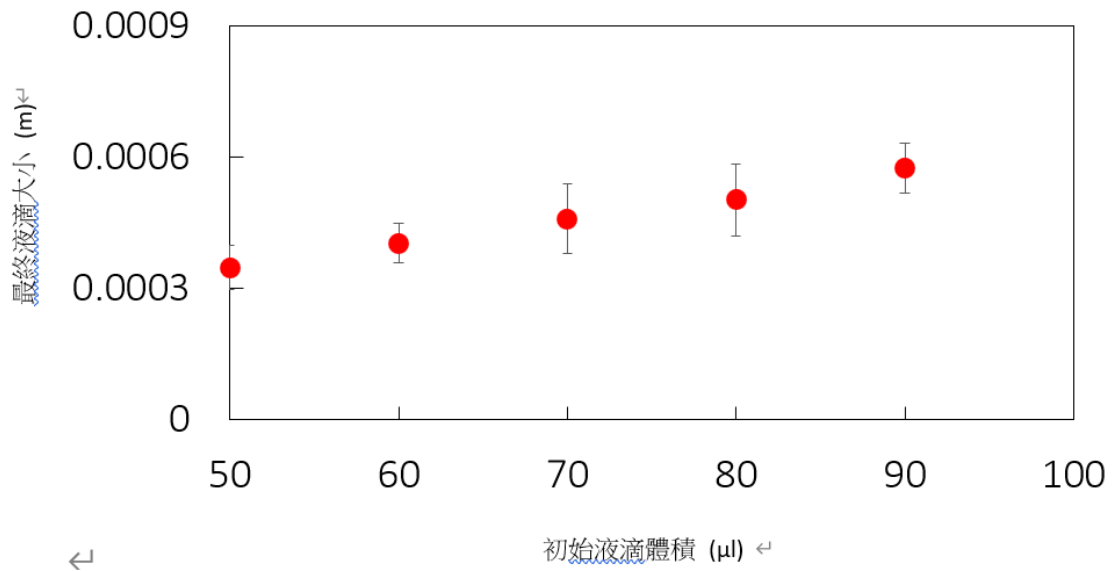


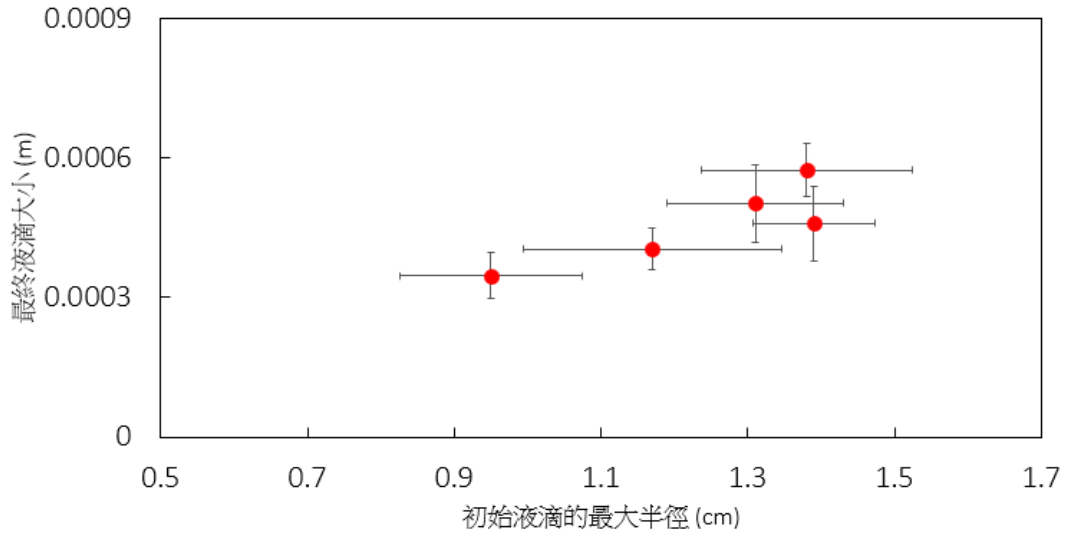
最大半徑會和酒精濃度呈正相關，因為當時間增加，液滴會有更多時間外擴。最終液滴大小主要與初始液滴最大半徑有關，而且是正相關，酒精濃度變大時最大半徑也會跟著變大，因此酒精濃度增加，最終液滴大小便會降低。

2. 實驗二中，改變酒精液滴(特徵半徑與時間公式中的 Ω)，探討改變酒精體積對液滴的擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。體積不同時，較大的體積需要更多時間蒸發，造成反應時間變長，但因為受到重力影響，最大半徑的增加趨勢將受到限制。

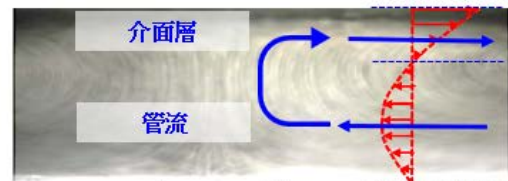
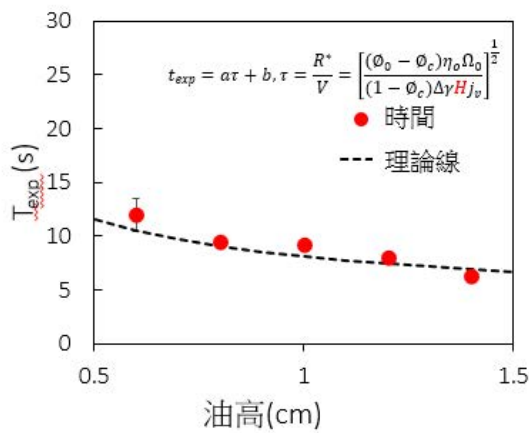


因為最大半徑的增加趨勢受到限制，多餘的體積講會被附加在最終液滴上。所以最終液滴大小和最大半徑有正向關係。下面兩張圖為實驗結果。

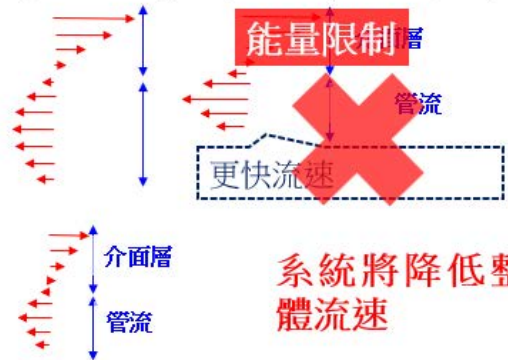


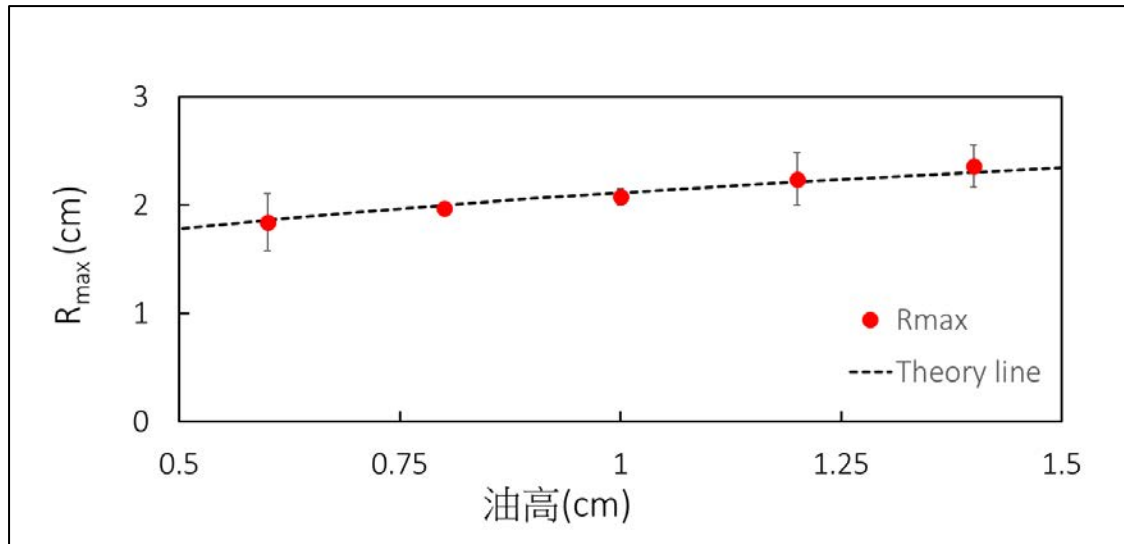


3. 實驗三中，改變油的厚度，探討油的厚度對擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。當油高變高時，管流強度增強。因為能量被限制，所以整個系統的流程將被降低，造成總反應時間增加。下圖為實驗結果與示意圖。

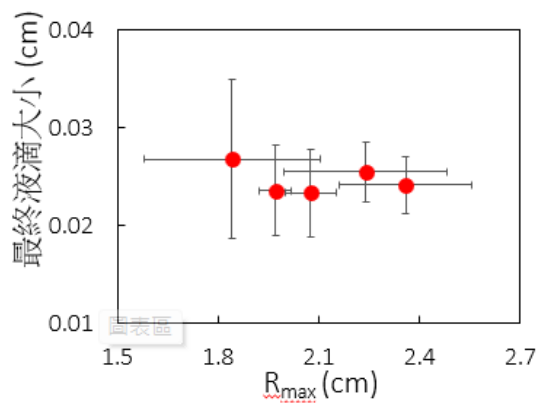
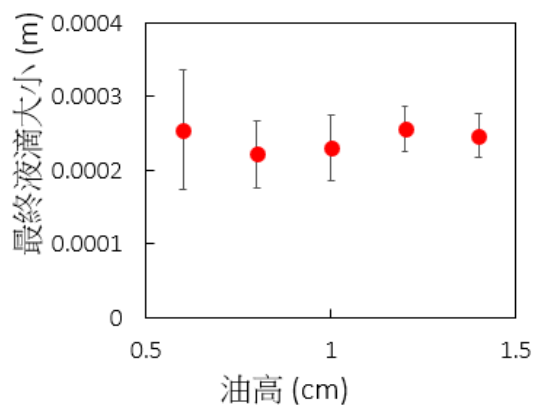


Superposition of pictures of the cross section of the layer of oil during an experiment. (Ref: Keiser, 2017)



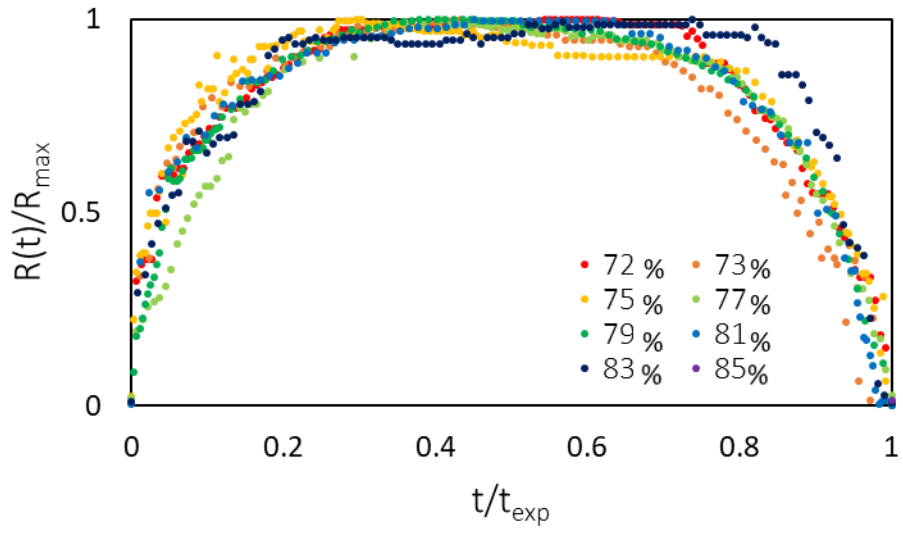


因為最大半徑會在油高增加時增加，初始液滴的邊界的厚度將會減少，所以最終液滴大小下降。

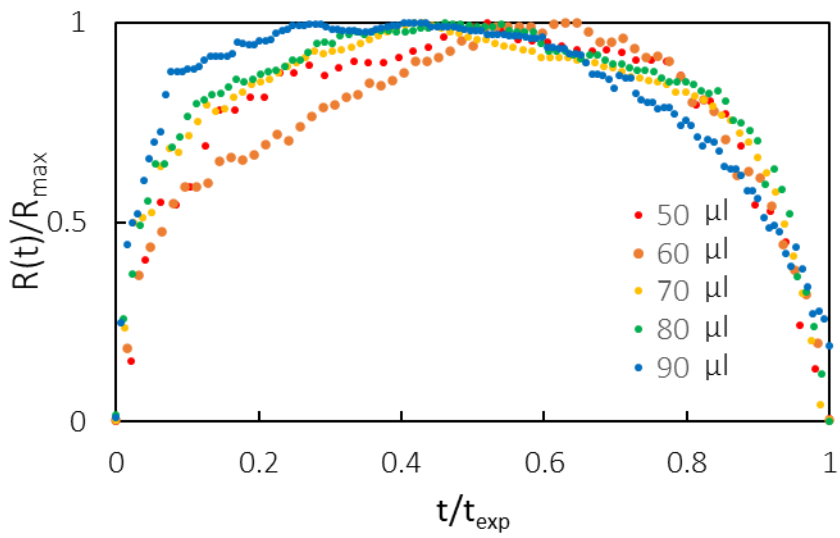


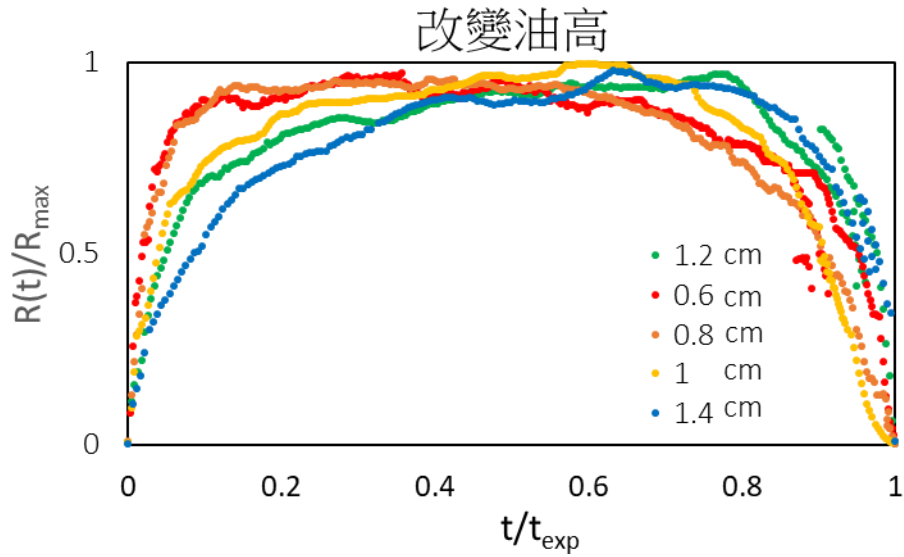
4. 重疊數據分析

改變酒精濃度



改變液滴體積

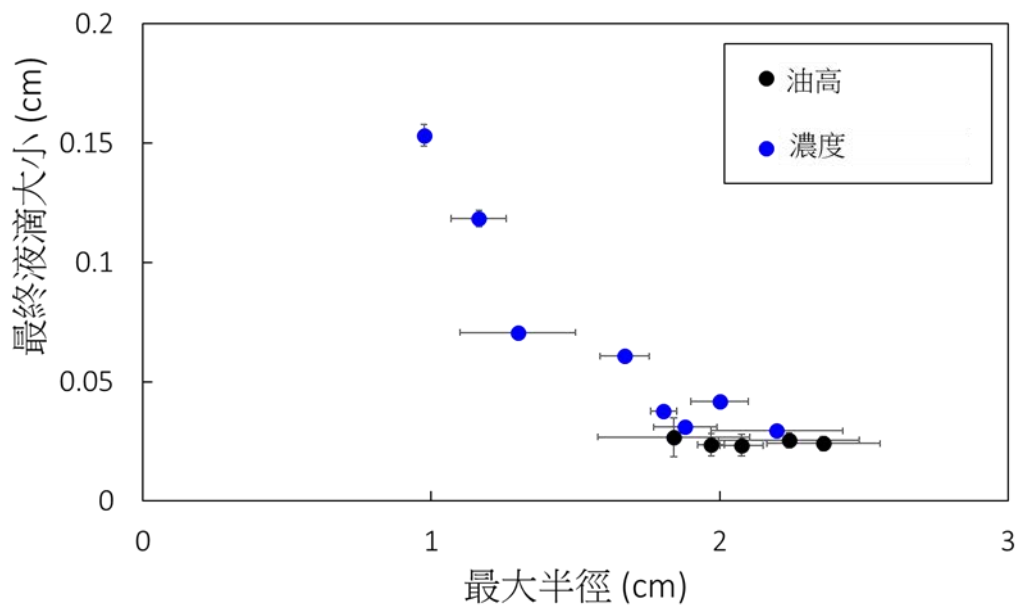




透過標準化各個變因的數據，我們發現即使變因不同，半徑與時間的趨勢也會相同。

愈大體積的液滴所表現出來的趨勢會愈偏差是因為它會較早達到最大半徑，所以經過標準化會有偏差的情形。

而愈低油高所需的分裂時間愈長，經過標準化後，趨勢會往左偏，油高愈高則相反。



在油高的實驗中，我們所繪製出來的關於最終液滴大小和最大半徑的關係途中，可以看到負相關的趨勢是不明顯的。不過，如果與改變濃度的圖表進行疊圖分析，就能發現其實趨勢是一樣的。

陸、結論

- 一、酒精滴到油上的現象可以分成四個階段：
 1. 重力會使初始液滴變扁平。
 2. 因為液滴各部分濃度不同造成的表面張力梯度的關係，會造成馬倫哥尼流。
 3. 液滴為了維持最小表面能，會減少其表面積，讓他由平滑邊界變成指狀邊界。之後為了繼續縮減表面積和無法抵抗表面張力，分裂成許多小液滴。
- 二、改變酒精濃度因為蒸發時間差異造成的最大半徑和反應時間的關係圖呈正相關，卻因邊界體積減少造成與最終液滴大小關係圖呈負相關。
- 三、酒精體積因為較大體積需較多時間蒸發，邊界也有較多體積的關係，與最大半徑、反應時間和最終液滴大小的關係圖呈正相關。
- 四、油高因管流與介面層的關係，與最大半徑呈正相關，但與反應時間和最終液滴大小呈附相關
- 五、其反應時間與半徑的變化可以使用比例定律解釋，但仍可能因為變因的不同造成趨勢有些微的落差。
- 六、當變因為油高或溶液濃度時，最大半徑與最終液滴大小呈負相關

柒、參考資料

1. 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.. doi:10.1103/physrevlett.118.074504
2. See Supplemental Material at <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevLett.118.074504> for additional data with different systems, interferometry analysis of the thickness of the spreading film, measurements of the evaporation rates, estimates of the velocity fields and local observations of the unstable rim, which includes Refs. [16,36].
3. 高中選修化學 ----- 蒸氣壓
4. 高中物理老師自編講義 ----- 表面張力與表面能
5. Fundamentals of Fluid Mechanics_ch6

【評語】 051818

本研究探討揮發性之乙醇水溶液液滴於疏水流體表面之分裂現象，其揮發性所造成的乙醇濃度梯度驅動了由表面張力梯度所引起的馬倫哥尼現象，當半徑達到臨界值時發生普托瑞立不穩定性 (Plateau Rayleigh Instability) 以致液滴分裂。本作品在實驗數據的量測分析、理論探討，以及理論和實驗結果的比對等，皆屬完整詳細，是一件完整的作品，雖然其實驗方法、主要結論皆與知名文獻結果一致，但其選取溶液並不同，且出現一些與文獻結果有差異的數據，因此值得針對這些差異處再作深入探索。

作品簡報



液滴爆炸

物理與天文學科

前言 – 研究介紹&目的

研究介紹:

本研究探討乙醇水溶液液滴於疏水流體表面之分裂現象。此現象可利用揮發造成乙醇之濃度梯度所驅動的表面張力梯度來解釋，又稱為馬倫哥尼現象(Marangoni Effect)。液體為達到最低表面能而改變表面積的普托瑞立不穩定現象(Plateau Rayleigh Instability)也可以做為液滴分裂的解釋之一。

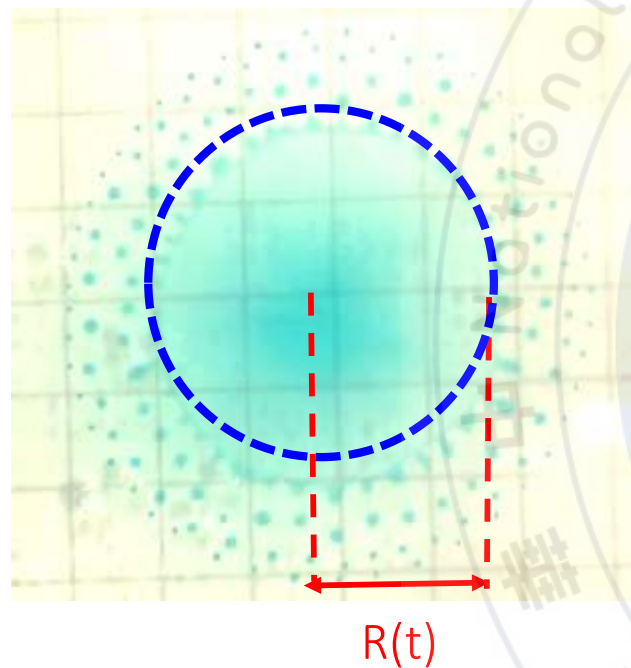
在研究中，研究團隊發現溶液在油面上會隨時間分裂出子液滴，並對於最終子液滴的半徑與分裂現象分別進行定量與定性之探討。

研究目的:

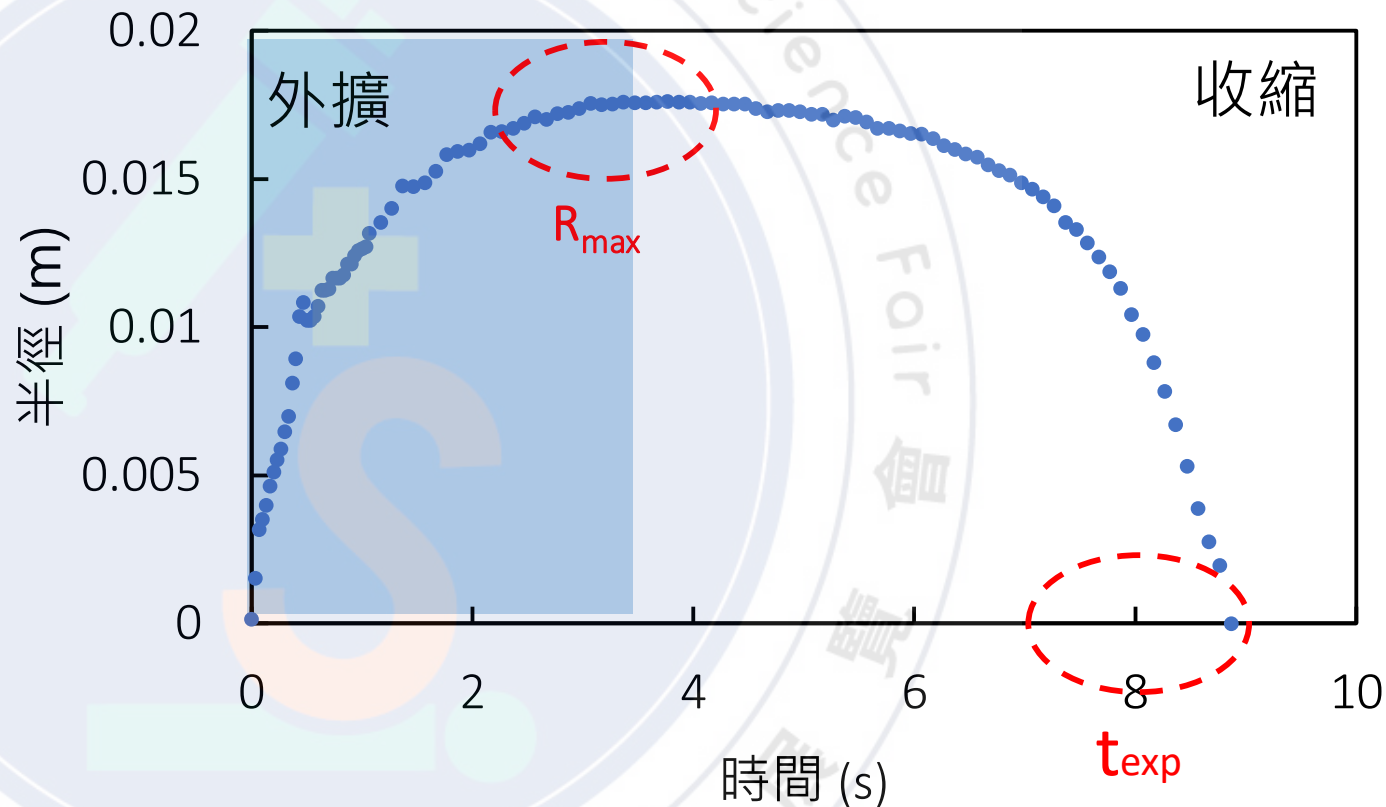
- 研究母液滴產生分裂的原因
- 研究產生分裂現象的臨界條件
- 研究大於臨界濃度之溶液進行關於乙醇濃度、溶液體積與油層厚度三項參數對於最終子液滴半徑、分裂時間、液滴最大擴散半徑與擴散半徑演變之影響

名詞解釋&定義

初始液滴



初始液滴的半徑－時間變化

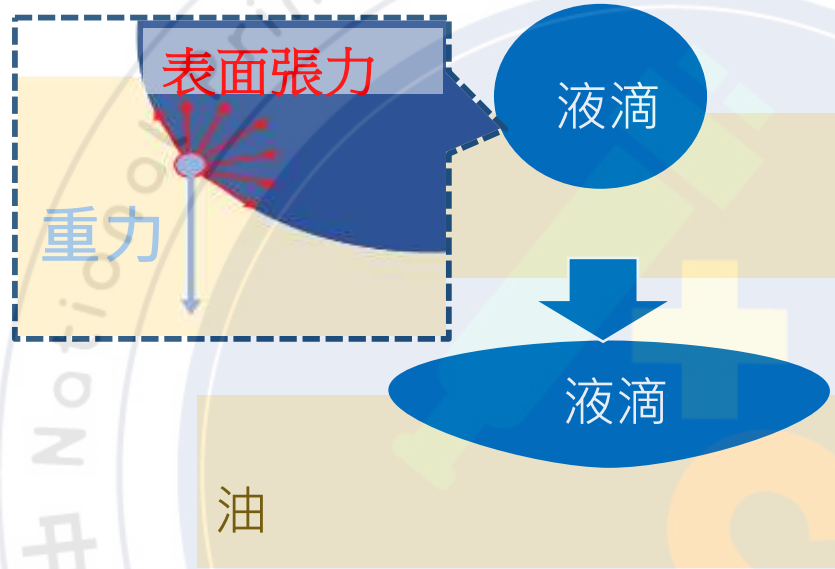
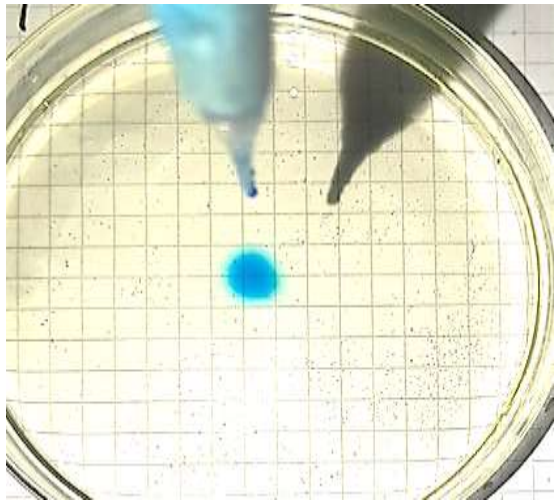


初始液滴：在中心分裂的液滴

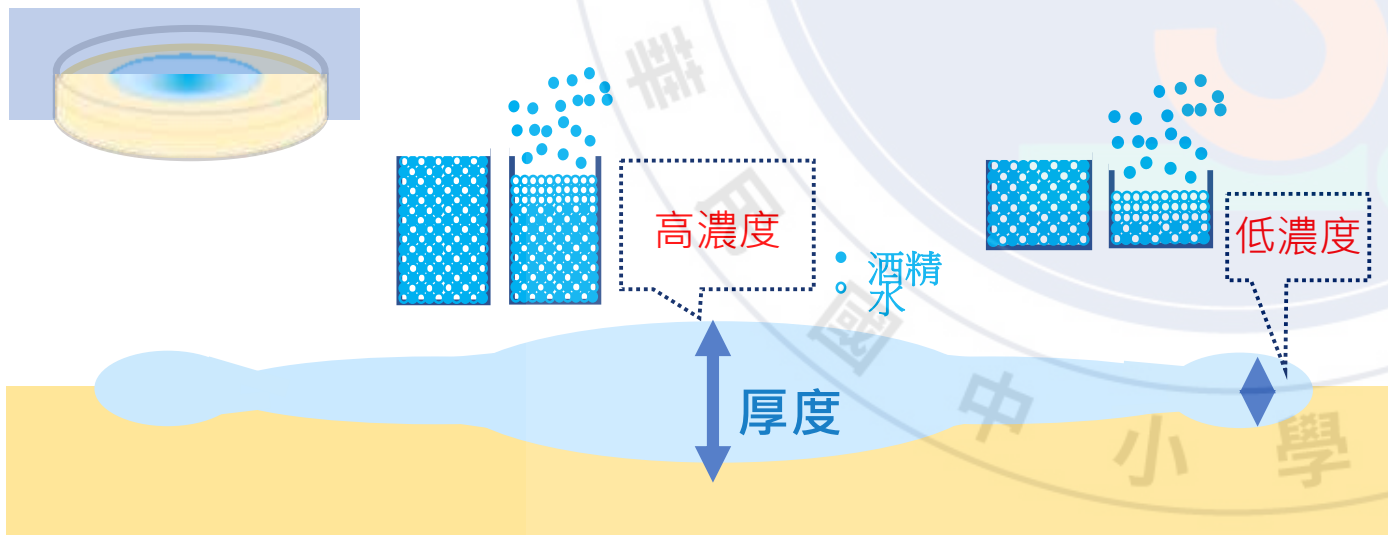
最大半徑 (R_{max})：當初始液滴停止分裂並開始收縮時的半徑

反應時間 (t_{exp})：初始液滴完成反應所需時間

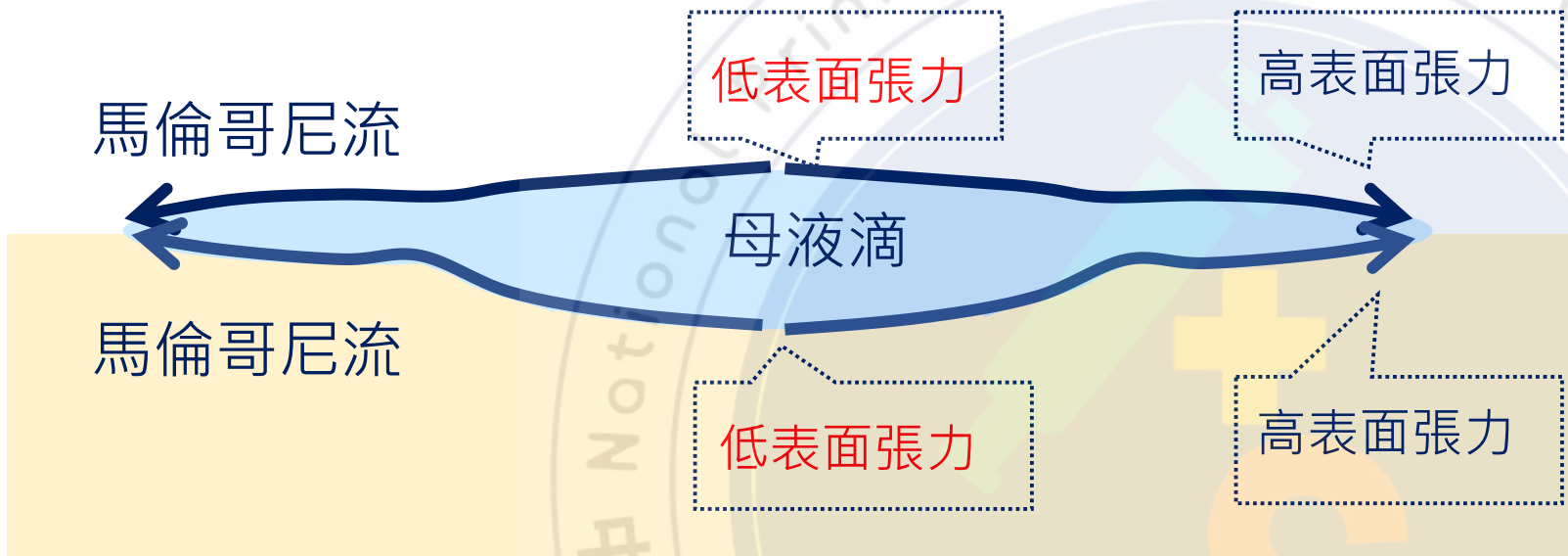
定性解釋 – 重力影響



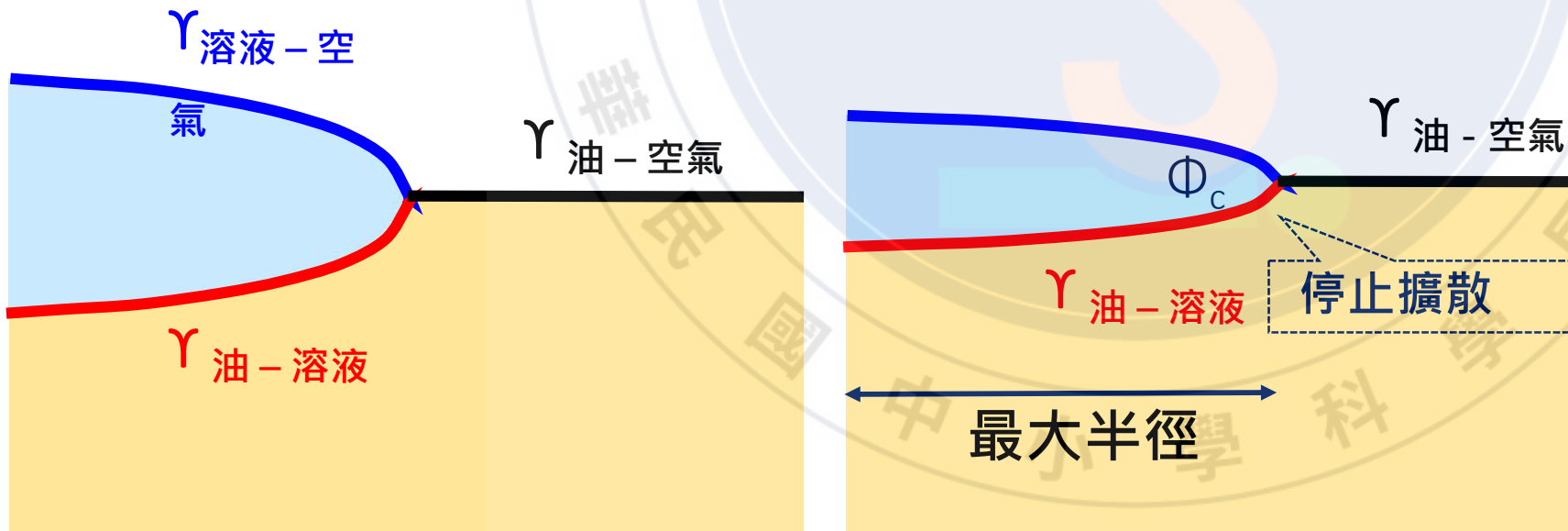
重力會使液滴中心的厚度與邊界不同，又因為水和酒精的蒸發速率不同，造成濃度梯度。



定性解釋 – 馬倫哥尼流

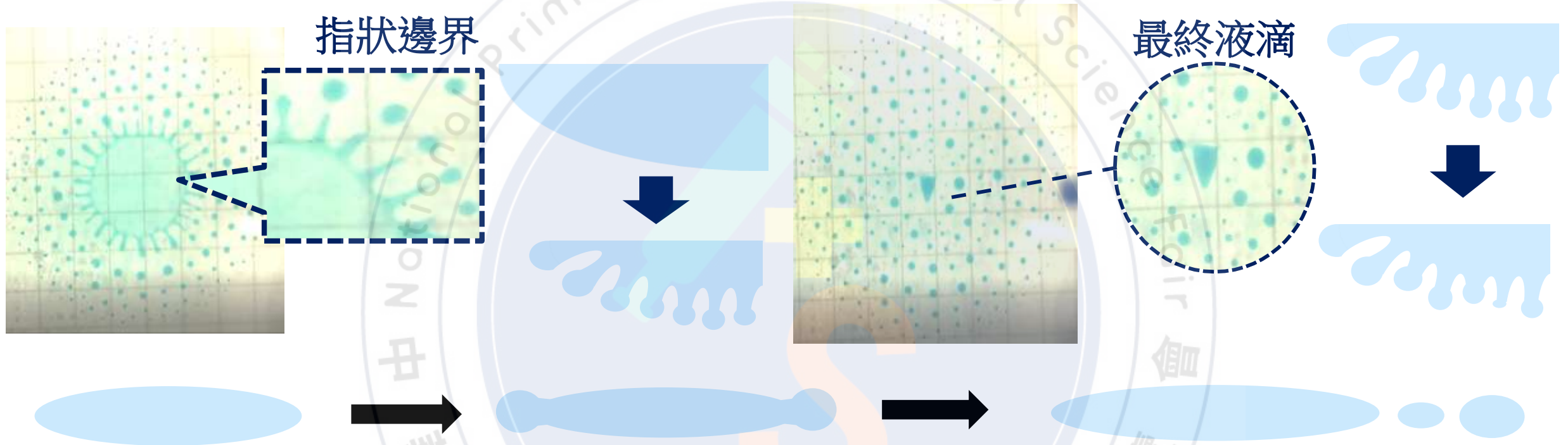


- 濃度梯度會觸發馬倫哥尼流，從低表面張力處流往高表面張力處。
- 當酒精蒸發至臨界濃度時，液滴會停止擴散。



γ : 表面張力
 Φ : 濃度

定性解釋 – 液滴的分裂



- 為了維持最小表面能，液滴會減少其表面積
- 水螺旋不穩定性：液滴形成指狀邊界時，邊界會變得脆弱
- 普托瑞利不穩定性：流體受到的擾動不斷增加，將使液滴分裂成很多小液滴
- 平滑邊界 → 指狀邊界 → 分裂成小液滴

經驗式&實驗架設

特徵半徑

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

特徵時間

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

表面張力差：

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_o$$

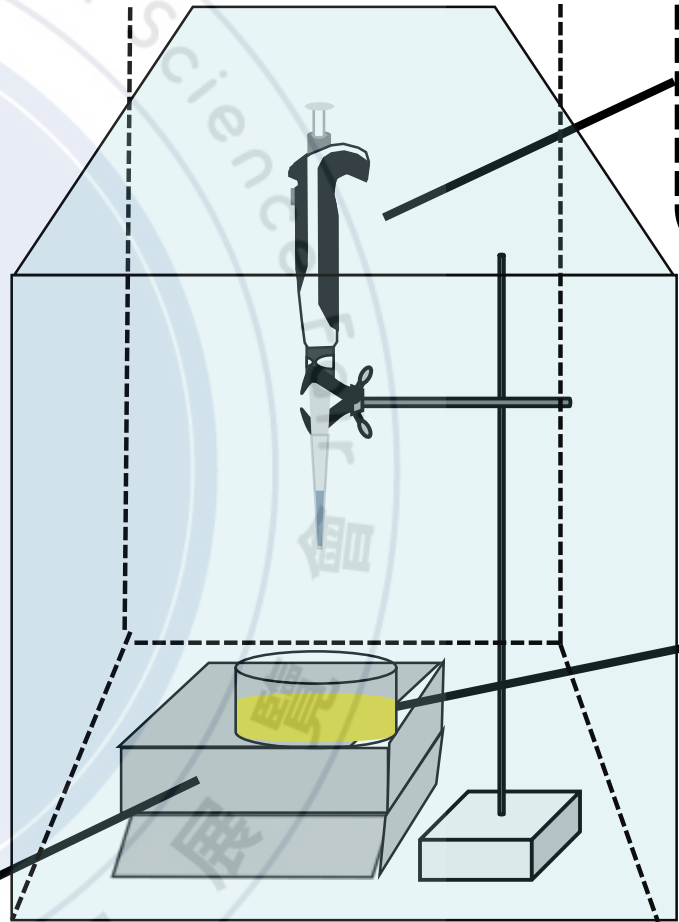
- $R^* \propto R_{max}$
- τ 和 t_{exp} 有線性關係

τ : 反應時間
 ϕ_0 : 實驗溶液濃度
 ϕ_c : 邊界濃度
 Ω_0 : 實驗液滴體積
 γ_c :
 當濃度為邊界濃度時的表面張力
 γ_o : 液滴中心的表面張力
 η_o : 油的黏度
 j_v : 溶液蒸發速率
 H : 油高

酒精(99.5%)

溫控加熱器

塑膠板



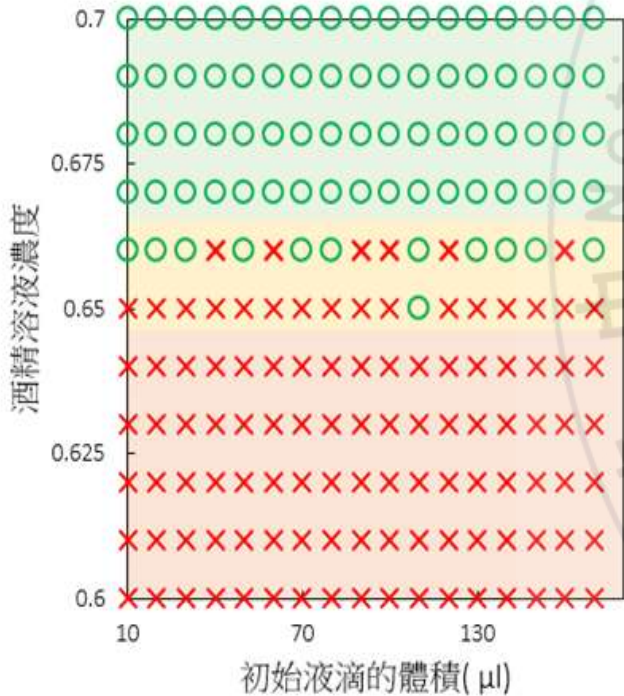
Phys. Rev. Lett. 118, 074504 (2017) - Marangoni Bursting: Evaporation-Induced Emulsification of Binary Mixtures on a Liquid Layer (aps.org)

測量

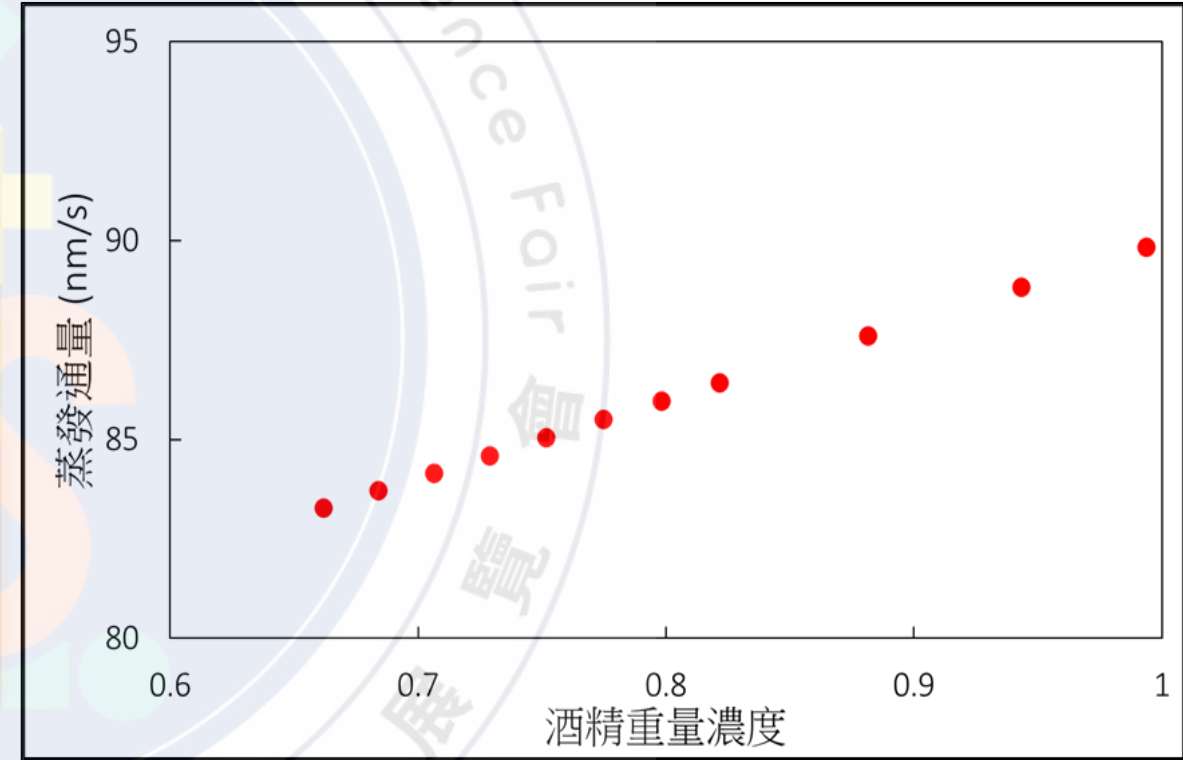
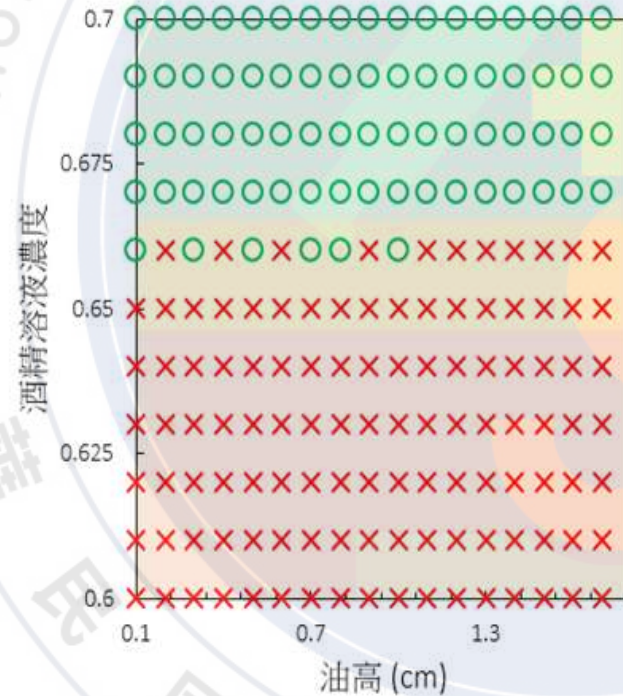
初始液滴分裂的邊界條件

不同濃度的體積蒸發速率(j_v)

當變因為體積時的邊界濃度



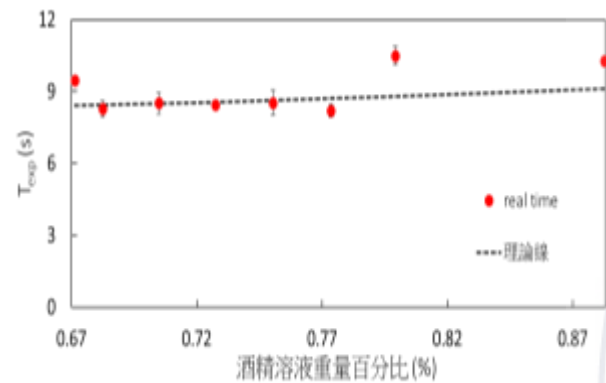
當變因為油高時的邊界濃度



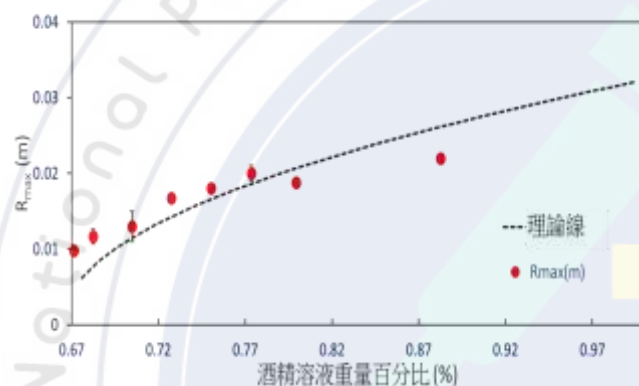
- 只有酒精溶液濃度會在此實驗的邊界條件

實驗結果及解釋 — 濃度&體積

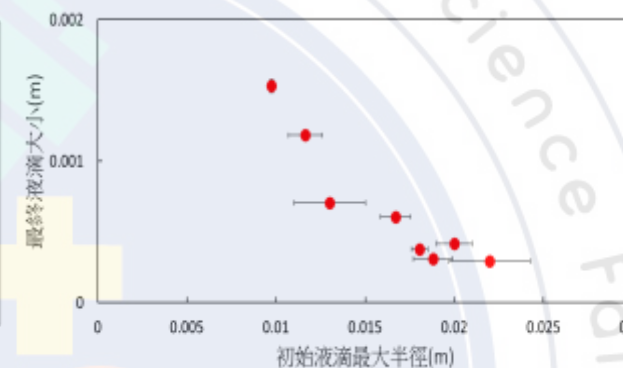
濃度對時間影響



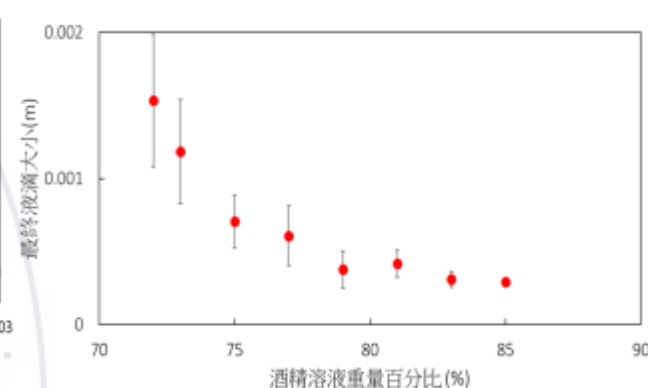
濃度對最大半徑影響



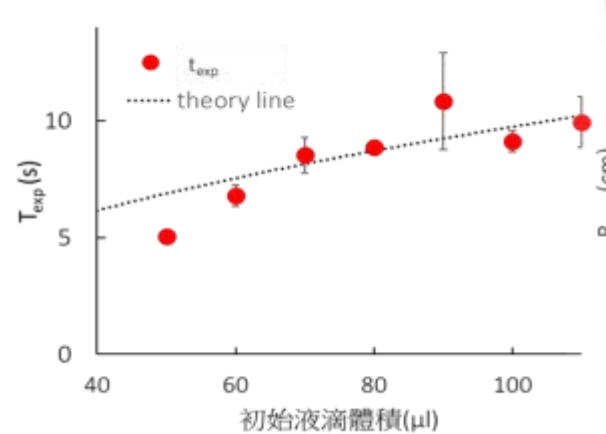
濃度對最終液滴大小影響



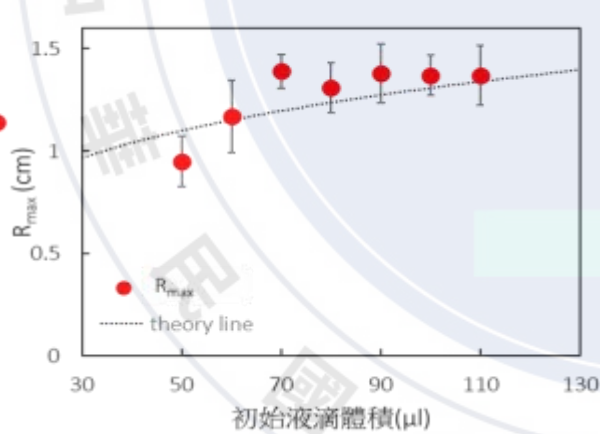
最終液滴半徑和最大擴散半徑關係



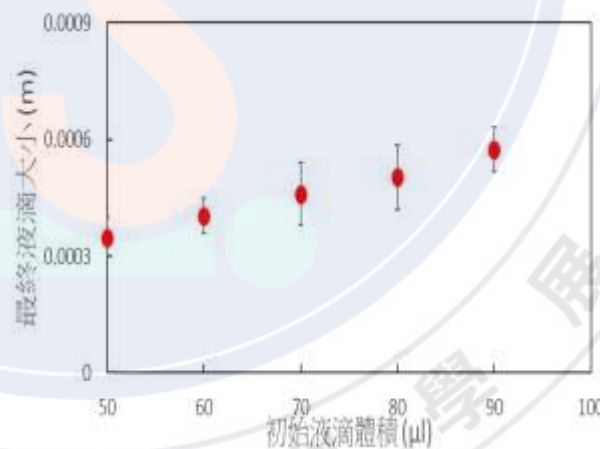
體積對時間影響



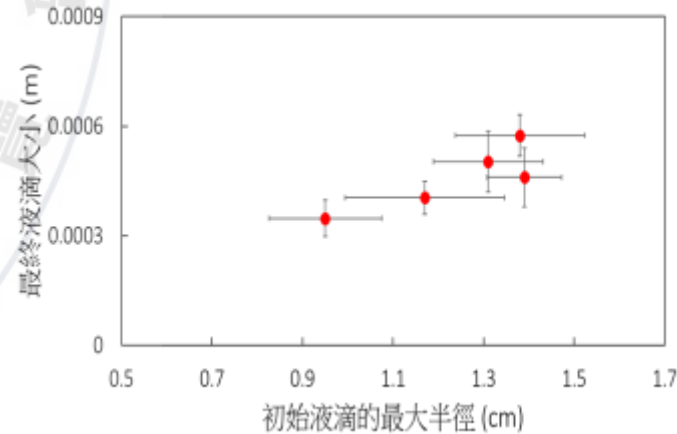
體積對最大半徑影響



體積對最終液滴大小影響

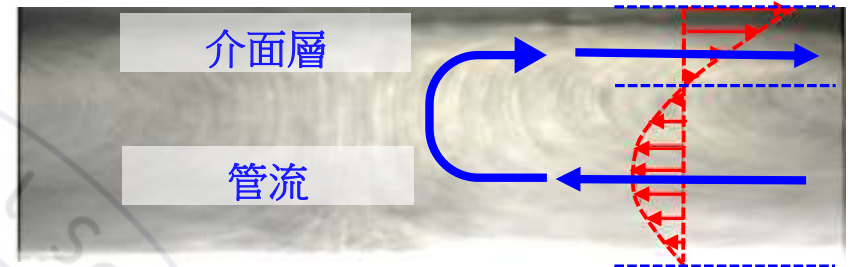


最終液滴半徑和最大擴散半徑關係



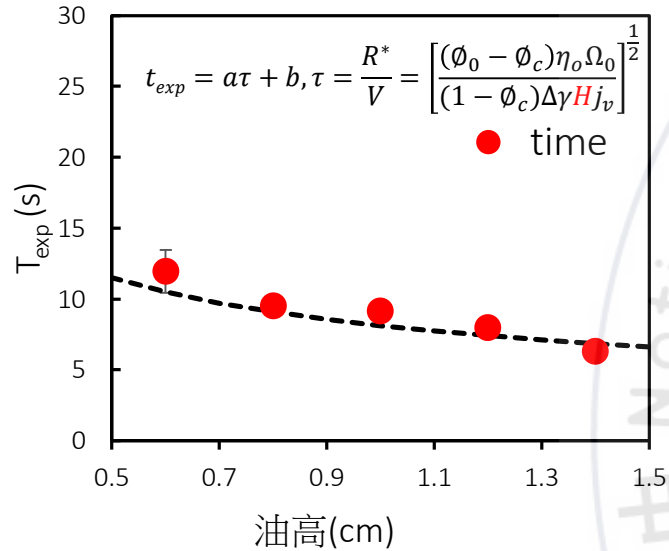
- 時間與蒸發速率呈正相關；擴散時間越多，液滴最大半徑就會增加；最終液滴半徑則與液滴邊界厚度有關

實驗結果及解釋 - 油高

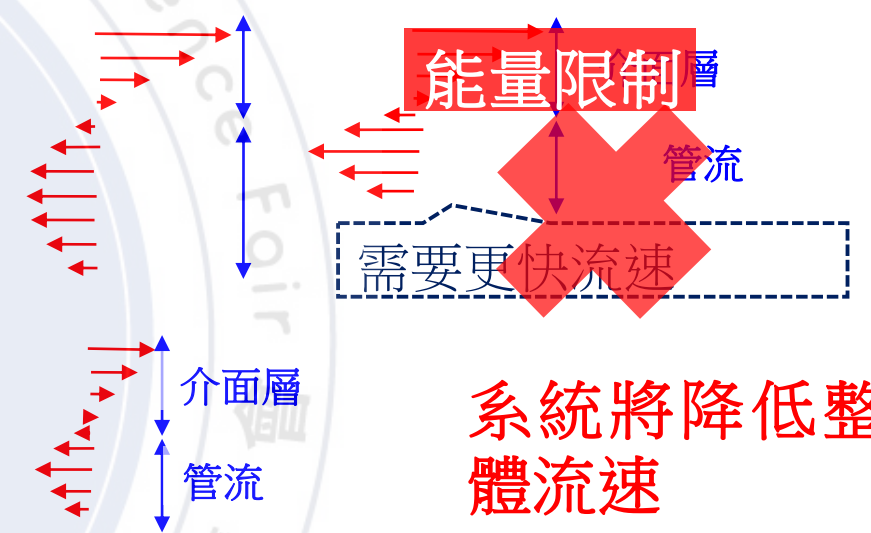
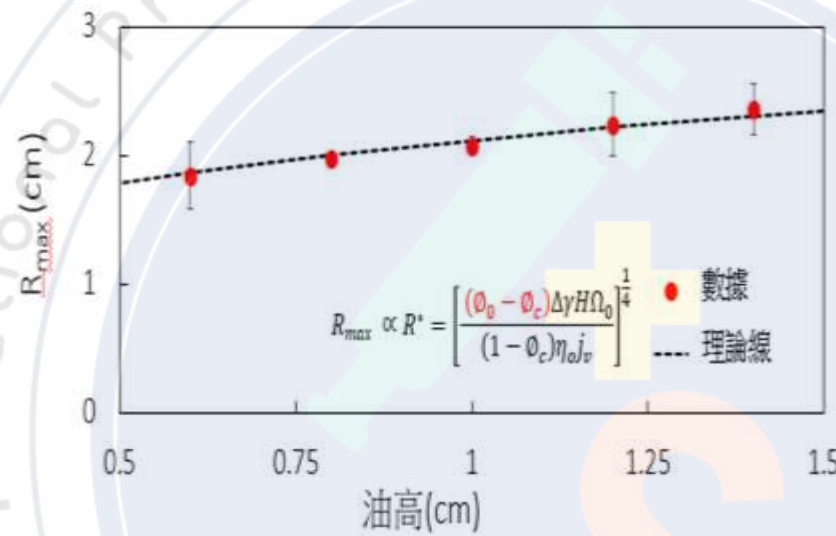


Superposition of pictures of the cross section of the layer of oil during an experiment. (Ref: Keiser, 2017)

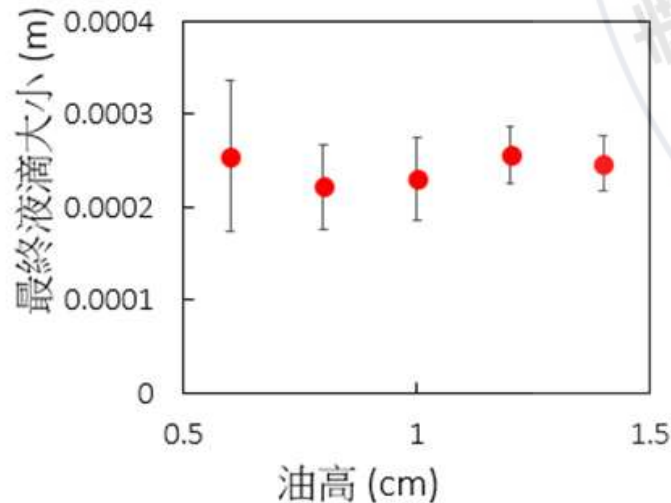
油高對時間影響



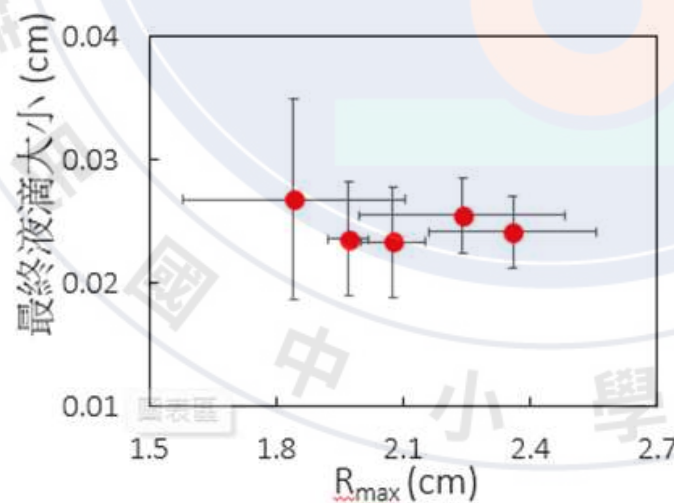
油高對最大半徑影響



油高對最終液滴大小影響



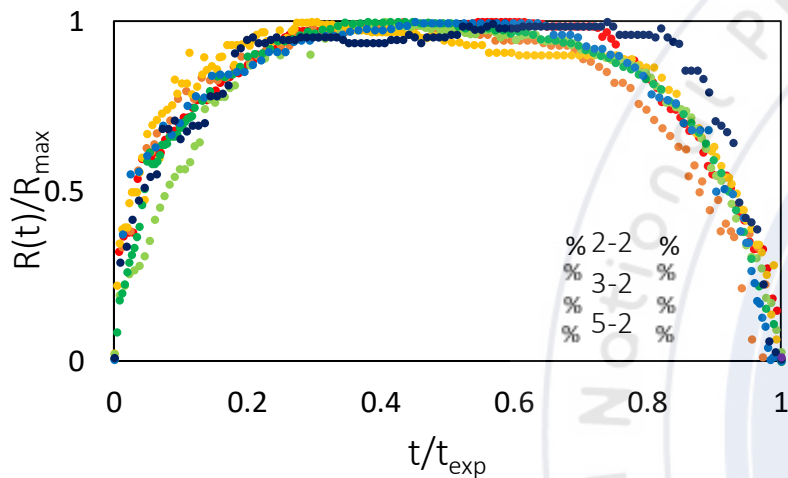
最終液滴半徑和最大擴散半徑關係



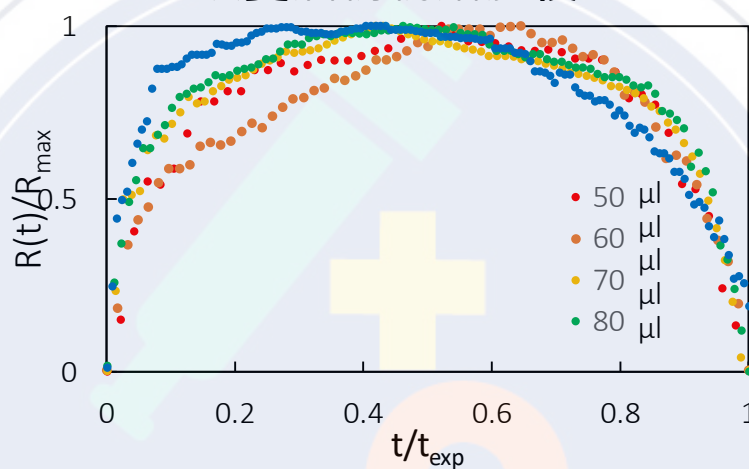
- 當油高降低時，管流強度下降。
- 因為能量被限制，所以整個系統的流速將被降低 → 時間增加 → 最大半徑在油高較低時會較小
- 最大半徑會在油高增加時增加，初始液滴的邊界的厚度將會減少 → 最終液滴大小下降

數據重疊分析

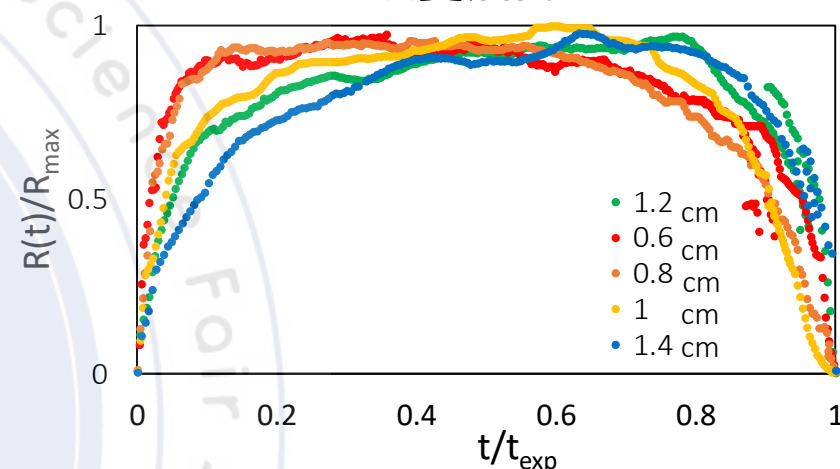
改變酒精初始濃度



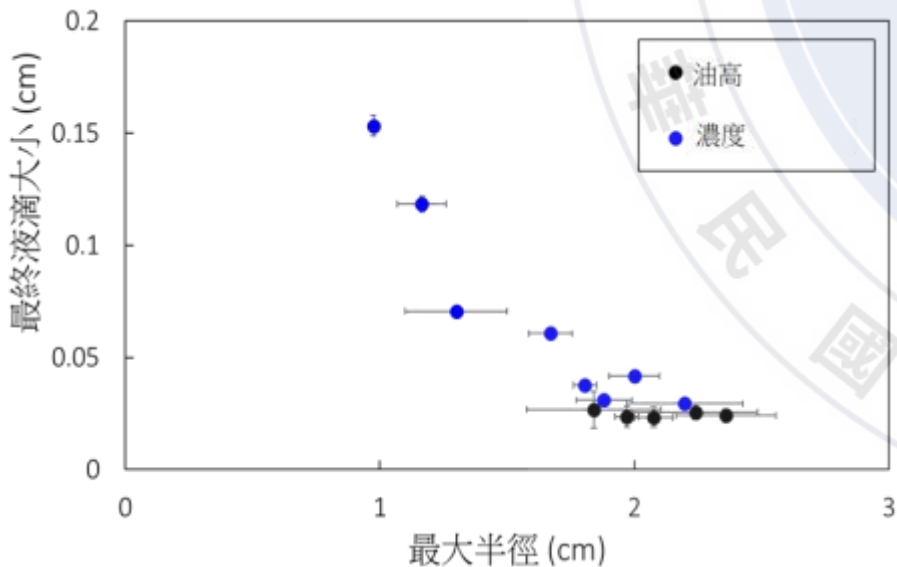
改變酒精初始體積



改變油高



最終液滴大小和最大半徑之間的關係



- 母液滴擴散半徑和時間的變化可以使用比例定律解釋
- 改變濃度的實驗中，半徑與時間的趨勢是大致相同的
- 改變體積的實驗中，越大體積高點偏左是因為越大的體積會較早達到最大半徑
- 改變油高的實驗中，越低油高所需的分裂時間愈長，因此由高越低趨勢會往左偏

結論

- 液滴會擴散是**表面張力梯度**觸發的**馬倫哥尼流**
- 液滴會以**降低表面積**的方式**維持最小表面能**，因此產生**指狀邊界**，之後為了**繼續縮減表面積**和**無法抵抗表面張力**加上**邊界變脆弱**，分裂成許多小液滴
- 酒精**濃度**因為**蒸發時間差異**造成的最大半徑和反應時間的關係呈正相關，卻因**邊界體積減少**造成與最終液滴半徑關係呈負相關
- 酒精**體積**因為較大體積需**較多時間蒸發**，**邊界**也有**較多體積**的關係，與最大半徑、反應時間和最終液滴半徑的關係呈正相關
- 油高因**管流**與**介面層**的關係，與最大半徑呈正相關，但與反應時間和最終液滴大小呈附相關
- 其反應時間與半徑的變化可以使用**比例定律**解釋，但仍可能因為變因的不同造成趨勢有些微的落差
- 液滴**初始體積相同**時，最大半徑與最終液滴大小呈負相關

參考資料

1. 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.. doi:10.1103/physrevlett.118.074504
2. See Supplemental Material at <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevLett.118.074504> for additional data with different systems, interferometry analysis of the thickness of the spreading film, measurements of the evaporation rates, estimates of the velocity fields and local observations of the unstable rim, which includes Refs. [16,36].
3. 高中選修化學 ----- 蒸氣壓
4. 高中選修物理 ----- 表面張力與表面能
5. 高中選修物理 ----- 黏度與物體流速之影響