

第十九屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA19-145

作品名稱：走啊！研究鐵磁流體！

姓名：李蘭正

關鍵字：鐵磁流體、似泰勒錐、磁場

目錄

摘要.....	1
壹、 研究動機.....	1
貳、 研究目的及研究問題.....	1
參、 研究設計與實驗結果	
一、研究設備與器材.....	2
二、研究過程和方法.....	2-6
三、實驗結果	
(一) 研磨法實驗步驟.....	6-7
(二) 化學共沉法實驗步驟.....	7-8
(三) 化學共沉法實驗變因探討與pH值對製備條件之影響.....	8-11
(四) 磁鐵磁力研究.....	11-16
(五) 似泰勒錐研究.....	16-26
四、結論.....	26-27
五、討論及應用.....	27
肆、 參考資料及其他.....	27-28

摘要

鐵磁流體是一種新型的功能材料，同時具有液體的流動性和固體磁性材料的磁性。由微米懸浮磁性顆粒、界面活性劑以及載液混合形成的膠狀液體。本報告探討製作鐵磁流體的方法及過程，研究化學製法和物理製法，包括了化學共沉法、研磨法等，比較各種不同鐵磁流體製作方法的優缺點。並在化學共沉法改變滴定氨水的稀釋 pH 值與其速率，觀察對生成四氧化三鐵之影響，當滴定稀釋氨水 pH 值低於一定數值會造成磁性粒子生成失敗，致使鐵磁流體無法有效生成。因此建立一套標準稀釋氨水 pH 值量表，並探討其對產率的影響。

外加磁場也為操縱鐵磁流體的重要因素之一，本研究使用自製磁力測量裝置測量不同磁鐵及不同角度、位置的磁力大小，並用其測量數值繪製多張圖表進行分析，圖表包含磁場三維圖、折線圖、數值表等。從對磁場研究的過程也發現，鐵磁流體在受磁鐵吸引時會產生類似泰勒錐之錐體，發現其特殊形狀後，進而研究透過操縱鐵磁流體製作變因對錐體性質之影響，變因有四氧化三鐵濃度、載液種類、界面活性劑種類、磁場強度等，觀察不同實驗結果下也隨之帶來新奇發現。此點乃為本研究提出創新科學設計。

壹、 研究動機

鐵磁流體因其發展應用潛力，成為了科學家們爭相研究的新寵兒。但在高度研究的背後，人們也漸漸地對鐵磁流體的製成方法越發陌生，鮮少會有人關心這樣新興材料的製作方式，於是我希望藉由文獻蒐集及實驗，比對出一種兼顧可行性又安全的鐵磁流體製成方法。隨後再繼續深入鐵磁流體奧妙的領域，並且嘗試自製高精度低成本的儀器來進行研究。

貳、 研究目的及研究問題

- 一、研究多種鐵磁流體的製備方法及過程，透過探討製作鐵磁流體的材料與製程，進行統整分析
- 二、探討氨水滴定速率對鐵磁流體中的四氧化三鐵生成之影響
- 三、研究不同 pH 值稀釋氨水滴定所生成四氧化三鐵影響
- 四、透過自製 Arduino 設備，研究磁鐵產生磁場數值大小及分布空間，並以三維圖型使其視覺化
- 五、探討鐵磁流體受磁鐵吸引所產生錐體在不同變因下之性質影響
- 六、藉由比對各種性質鐵磁流體產生錐體後，找出一種適宜觀察之合成條件

參、 研究設計與實驗結果

一、研究設備及器材

(一) 藥品

氯化鐵 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	硫酸亞鐵 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	28.0%-30% 氨水 (NH_4OH)	油酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$)
檸檬酸 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	Triton X-100 分子量 646.85 ($(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}$) ,	乙酸乙酯 ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)	100% 純橄欖油
95 度酒精 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	去離子水 (DI water)	暖暖包內鐵粉 (【日本小林製藥】 小白兔貼式暖暖包 14hr)	-

(二) 設備及器材

吸量管	滴管	加熱攪拌器	攪拌磁石	滴定管夾
滴定管	玻璃棒	表玻璃	電子秤	電腦
研杵	研鉢	塑膠培養皿	玻璃培養皿	燒杯
pH 計	磁鐵	手機	樂高	攝影腳架
刮勺	壓克力板	方格紙	Arduino 可調線性霍爾磁 力感測模組	Arduino Uno R3 開發板

(三) 軟體

1. LosslessCut v3.23.8
2. Excel 2016
3. Free Video to JPG Converter v.5.0.101 build 201
4. Arduino 1.8.13

二、研究過程和方法

(一) 文獻探討：

本研究整理多種鐵磁流體之製備方法，並簡述整理如下：

1. 化學共沉法 (沉澱法)

- (1) 將氯化鐵 (FeCl_3) 和硫酸亞鐵 (FeSO_4) 混合加入氨水 (NH_4OH) 使其沉澱。用油酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) 做界面活性劑形成磁性粒子，再進行加入載液的程序。
- (2) 磁性顆粒組成方式除了鐵 (Fe) 的氧化物外也可以為其他磁性金屬，如鈷 (Co)、鎳 (Ni) 等。
- (3) 將硫酸鐵 ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) 溶液和氯化鐵 (FeCl_3) 溶液融合，加入氫氧化鈉 (NaOH) 至 pH 值達 12 時停止。待溶液沉澱後，倒去漂浮在溶液上方的透明液體。加入氯化氫 (HCl) 去除水中的離子，再加入油酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) 和煤油使其沉澱。
- (4) 先將己二酸 ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4$) 和乙二醇 ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) 進行醚化反應，再加入磁鐵礦粒子。將上述材料溶於甲苯 (C_7H_8) 中。

2. 解膠法

四氧化三鐵 (Fe_3O_4) 和三氧化二鐵 (Fe_2O_3) 在化學反應下產出的 Fe_3O_4 或 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，然後加入分散劑和載體，並加以攪拌使其磁性粒子吸附於其中，最後加熱後將膠體和溶液分開，得到鐵磁流體。這種方法可得到較小顆粒的鐵磁流體，且成本低，但只適用於非水系載體的鐵磁流體的製作。常見的分散劑有：六偏磷酸鈉 (NaPO_3)₆、焦磷酸鈉 ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) 等。

3. 機械粉碎法

機械粉碎法是將膠塊利用粉碎機碾碎成為直徑 1mm 以下的粉末狀物，再進行過篩。將磁性材料 (Fe_3O_4) 與界面活性劑、載液混合後放進粉碎機磨碎，磨成極微細小的顆粒。

4. 水熱合成法

使用高壓鍋釜中的的高壓、高溫的反應環境中，採用水作為反應介質，此方法可使難溶甚至無法溶解的物質進行反應，而得到理想的產物。在高溫高壓的環境下反應磁性粒子，冷卻、乾燥後加入沉澱劑，待磁性粒子沉澱。常見的沉澱劑有丁二酮肟 ($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$)、四苯硼酸鈉 ($\text{NaB}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$) 等。

5. 火花侵蝕法

將電極金屬加入含有界面活性劑的電解液載液，電極放電後使該液體中的金屬離子達成平衡電極，使得電極金屬以膠體粒子型態溶於液體。製備方法如下：先電解硫酸亞鐵 (FeSO_4)，使氫氧化亞鐵 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) 沉澱於陰極附近，暴露於空氣中形成磁鐵礦固體粒子，泡入油酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) 使其均勻分散。也可使用二氧化鉬 (MoO_2) 代替油酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$)。

6. 電著法

其原理與火花侵蝕法相似，是在裝滿載液的容器中將磁性材料粗大顆粒放在兩個電極之間，然後加上脈衝電壓進行電火花放電腐蝕，將載液中的磁性材料分解成微小的顆粒，把剩餘的大顆粒過濾後加入分散劑即可得到鐵磁流體。製作步驟如下：先將錫 (Sn) 溶於汞 (Hg)。再以汞 (Hg) 為負極，電解硫酸亞鐵 (FeSO_4) 溶液，待鐵 (Fe) 析出後，再將錫 (Sn) 吸附於鐵粒子表面。

7. 研磨法

把磁性材料和界面活性劑、載液一起碾磨成極細的顆粒，然後用離心法或磁分離法將大顆粒分離出來，得到所需的鐵磁流體。這種方法是最直接又簡單的方法，但很難得到 300nm 以下直徑的鐵磁流體顆粒。

8. 熱分解法

是將磁性材料的原料溶入有機溶劑，然後加熱分解出遊離金屬，再在溶液中加入分散劑後分離，溶入載液後就得到鐵磁流體。製備流程如下所列：

- (1) 將五羰基鐵 ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) 連同界面活性劑溶入甲苯 (C_7H_8)，在充滿氮氣 (N_2) 的環境中加熱。五羰基鐵 ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) 受界面活性劑包覆住，均勻分散成鐵磁流體。
- (2) 將八羰基二鈷 ($\text{Co}_2(\text{CO})_8$) 溶於含有受乙烯基 (Vinyl group) 加熱分解的聚甲基丙烯酸甲酯 ($(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$) 的甲苯 (C_7H_8) 中加熱。八羰基二鈷 ($\text{Co}_2(\text{CO})_8$) 受加熱分解後以鈷 (Co) 單超微粒子型態析出，分散在甲苯 (C_7H_8) 中成鐵磁流體。

9. 蒸著法

在無氧真空狀態下把高純度的磁性材料高溫加熱，蒸發出來的微粒接觸到由分散劑和載液混合而成的膜後凝固，混合均勻後便得到鐵磁流體。此方法所製成的鐵磁流體粉粒很細小，直徑約在 2 到 10 奈米。

10. 碳粉法

雷射印表機的 MICR 碳粉，這種碳粉裡面含有氧化鐵。碳粉中含四氧化三鐵 (Fe_3O_4) 細粉，由於磁性材料已成細末，加入界面活性劑便能製出鐵磁流體。製作方法如下：四氧化鐵 (Fe_3O_4) 加入植物油，將其均勻混合。

11. 陰離子交換法

離子交換技術是利用物質的 pH 值、帶的正負離子不同。物質的電量不同，對於離子轉換劑的親和力也會不同。改變沖洗液的離子強度和酸鹼度，就能將物質依序分離出來。利用此法可製造出穩定的磁性。製備方法如下：將鐵粉與亞鐵鹽混合，使用陰離子交換樹脂法處理，可製出磁性穩定的氧化鐵水溶膠。在進行離子交換時將 pH 值控制在 7.5 到 9.5，後將 pH 值迅速降低至 1 到 3。常見的陰離子交換劑：油酸銨 ($\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{NH}_2$)。

12. 紫外線分解法

以高能量的光取代熱分解法分解有機金屬，將其製成超微粒子，形成鐵磁流體。製備方法如下：將四羰基鎳 ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) 在氮氣 (N_2) 的環境下移置到充滿二氧化矽 (SiO_2) 的密閉反應空間中，加入甲苯 (C_7H_8) 溶液，放入攪拌裝置和凝結器。經輻射使羰基完全分解，利用氮氣 (N_2) 將一氧化碳 (CO) 帶走。放入真空環境和加快攪拌速度，避免甲苯 (C_7H_8) 產生和使表面產生流體。

13. 真空蒸發法

在抽真空的環境中，把金屬材料高溫加熱蒸發形成超微粒子，後再抽真空急速冷凍，冷凍時透過容器的旋轉將底部的界面活性劑載液形成膜上升，和蒸發而凝結的超微金屬粒子結合，形成鐵磁流體。

14. 氫還原法

氫還原法是產生金屬粉末的古老而傳統的方法，通常都用於煉金術，但大多都是氣固反應。製備過程如下：將雙(環戊二烯)鎳 ($\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{Ni}$) 漂浮在甲苯 (C_7H_8) 溶液中，將反應環境維持在充滿氮氣 (N_2) 的系統中，使氫氣 (H_2) 氣泡通過混合物，使用油浴加熱，使甲苯 (C_7H_8) 回流。等待溶液表面生成鐵磁流體。常見油浴介質有：豆油、棉籽油。

(二)製備方法整理比較

1. 將過本研究收集資料後，我們彙整以上各種方法之優缺點，並整理於下表格：

表一、鐵磁流體各種製備方式優缺點比較 (研究者自製)

製作方式	優點	缺點
化學共沉法	製作方式簡易又多樣，增加實驗彈性。	部分製作材料毒性較高。
膠解法	實驗步驟簡易。	只適用於非水系載體的鐵磁流體製作。
機械粉碎法	交給機器製作，減少人力支出。	機械粉碎機取得難度高。
水熱合成法	使難溶、不溶的物質進行反應。	器材高壓鍋釜取得難度高。
火花侵蝕法	可製作出安定的鐵磁流體。	使用電增加實驗危險性。
電著法		
研磨法	直接又簡單的方法。	無法製作出奈米級的超細微粒。
熱分解法	實驗步驟簡單。	超高溫加熱設備取得難度高。
蒸著法	生成出的鐵粉顆粒細小。	營造無氧真空的空間難度高。
碳粉法	製作方式簡易。	實驗變化性較低，只需要含有氧化鐵的碳粉。
陰離子交換樹脂法	可製出穩定磁性的鐵磁流體。	樹脂會有有機物溶出的情形。
紫外線分解法	高能量的光可製出超微粒子。	強光發射器不易取得。
真空蒸發法	改變鐵磁流體溫度狀態。	營造無氧真空的空間難度高。
氫還原法	實驗成功率高。	限於氣固反應。

將多種鐵磁流體製備方式進行表格整理及分析後，考量各項方法在現階段實作之實際可行性與發展性，本研究主要選定研磨法和化學共沉法進行研究。其中研磨法實驗步驟簡易，化學共沉法實驗變因多，實驗彈性高。

三、實驗結果

經以上文獻探討後，以下探討實驗步驟簡易的研磨法和變因多樣的化學共沉法。

(一) 研磨法步驟：

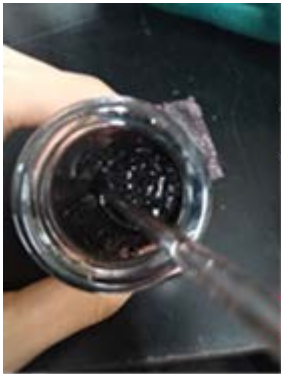


1. 將暖暖包剪破後取出定量鐵粉倒入研鉢。
2. 用研杵將鐵粉磨碎。
3. 再分別加入齒輪油或橄欖油，均勻攪拌。
4. 鐵磁流體製作完成。

上述製備方法簡單且便於日常生活中操作，但以研磨法製備之磁性粒子磁力效果不佳。推測因使用研杵磨製所得的微粒尺度不夠細小，導致磁性顆粒在油中沒有完全均勻分布所致。

在首次嘗試乾磨五分鐘後，用磁鐵靠近吸引發現磁力不佳、磁性維持時間短、鐵磁流體背後開花情形不明顯。所以接著嘗試在研磨過程中加入少許橄欖油，希望能將磁性顆粒磨製更細小。

分別實驗了濕磨十分鐘和濕磨二十分鐘後，再用磁鐵靠近吸引，發現兩者的磁性維持時間、磁性強弱和背後開花幅度、顆粒數量差不多，所以我們推測以人力操控研磨法在濕磨十分鐘內就能將磁性顆粒磨製最細小極限。

表二、研磨法製得實驗成品 (研究者自製)

乾磨五分鐘	濕磨十分鐘	濕磨二十分鐘
		

(二) 化學共沉法實驗步驟：

1. 將 0.556g 的硫酸亞鐵粉末倒入燒杯加水至 8mL，配成 0.25M 8mL 的水溶液，溶液為淡黃色，攪拌約 10 秒溶解。
2. 將 1.08g 的氯化鐵粉末倒入燒杯加水至 16mL，配成 0.25M 16mL 的水溶液，溶液為橘黃色，攪拌約 40 秒溶解。

- 將 3.24mL 30% 的氨水倒進容量瓶加水至 50mL 均勻混合，配成 0.5M 50mL。
- 將兩杯金屬鹽類溶液均勻混合，溶液顏色呈橘紅色。滴入氨水攪拌（6 分 50 秒將氨水滴光）溶液慢慢轉為暗紅色一邊生成黑色粉末直到充滿整瓶液體。
- 用去離子水清洗產物後靜置倒出雜質溶液（淡淡的黃色加一些未完全過濾掉的黑色顆粒）4 次（每次靜置沉澱約 20 秒）。
- 先加入 1.4mL 乙酸乙酯，發現杯中還有雜質溶液導致磁性膠體成稀狀，用磁鐵過濾雜質。
- 再加 2.6mL 乙酸乙酯攪拌，觀察無法和膠體結合，倒掉多餘乙酸乙酯。
- 又慢慢加入少許乙酸乙酯攪拌直到成飽和狀。鐵磁流體製作完成。



圖一、化學共沉法實驗成品 (研究者自行拍攝)




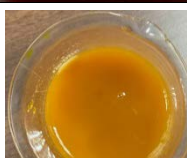
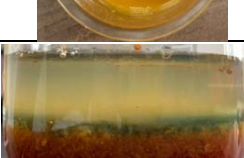



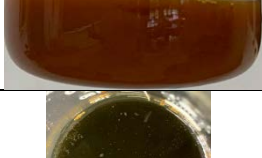
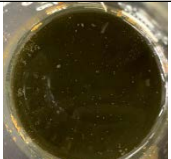
(三) 化學共沉法實驗變因探討與 pH 值對製備條件之影響：

接下來的實驗探討氨水滴定速率、濃度及其 pH 值對四氧化三鐵生成之影響。以下實驗照片均記錄至氨水滴定後現象。調配滴定氨水方式為將兩種不同 pH 值氨水取量後加水稀釋至 54mL。

- 將 pH11 氨水稀釋，觀察不同濃度、滴定時間，對生成四氧化三鐵之影響。

表三、pH11 氨水濃度、滴定時間變因之整理 (研究者自製)


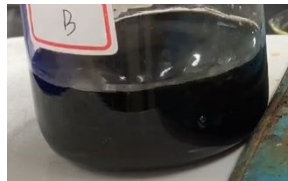




混合液中氨水 體積莫耳濃度 (M)	滴定時間 (分：秒)	實驗成果照片	氨水用量 (mL)

0.654	1 : 40		8
	4 : 30		
	6 : 58		
	23 : 06		
	23 : 10		
0.818	5 : 30		10
1.145	直接倒入		14
1.145	6 : 30		14
	7 : 00		
2.371	6 : 25		29

由以上整理表格觀察到 pH 11 的氨水在嘗試的不同濃度與滴定時間範圍之下，雖溶液有不同顏色的改變，但均無法生成出具有磁性的四氧化三鐵。

2. 將 pH14 氨水稀釋，觀察不同濃度、稀釋 pH 值，對生成四氧化三鐵之影響。

表四、pH14 氨水濃度、稀釋 pH 值變因之整理 (研究者自製)

混合液體積莫耳濃度 (M)	滴定稀釋氨水 pH 值	實驗成果照片	氨水用量 (mL)
0.654	12.22		(pH14) 8 mL
0.572	12.08		7
0.491	11.77		6
0.409	11.65		5
0.327	11.52		4
0.164	11.35		2
0.082	11.13	-	1
0.041	11.02	-	0.5
0.020	10.87	-	0.25
-	10.55	-	(pH11) 8 mL

由以上表格整理觀察出，將 pH14 氨水稀釋至 11.52 以上皆有辦法生成出四氧化三鐵，pH 值 11.35 以下皆會生成出褐色氧化鐵。由實驗結果得知氨水稀釋 pH 值低於 11.35 會造成四氧化三鐵生成失敗。滴定 pH 11 氨水的組別嘗試改變氨水滴定速率，隨著滴定速率的改變，所產生的溶液顏色也隨之有顏色深淺、透明度的不同，但皆無法順利產生四氧化三鐵。滴定 pH14 氨水組對於滴定速率較

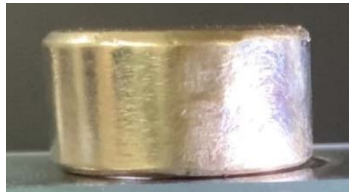
無限制，只要稀釋過後的氨水高於 pH11.52 和金屬混合液均勻混合，皆能順利產生四氧化三鐵。因此本研究認為氨水 pH 值為製備磁流體時的關鍵因素。

(四) 磁鐵磁力研究

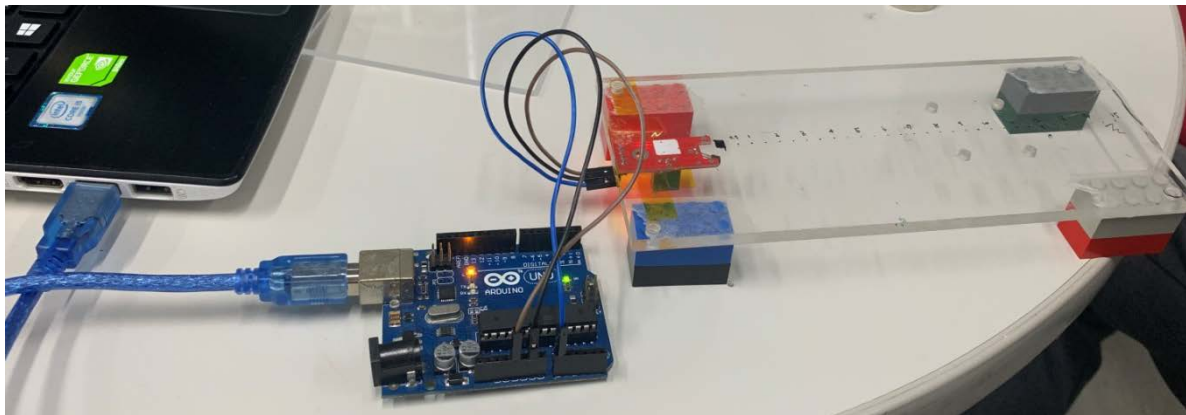
操作磁鐵是製作鐵磁流體中的關鍵之一，本研究利用 Arduino 類比霍爾磁力感測模組，製作一個磁力測量尺，使感測模組固定位置，觀察磁鐵每調整 0.5 公分的磁力變化並記錄。以下分為水平測量及垂直測量。

1. 水平測量磁鐵磁力

將長方形壓克力板四腳黏貼上樂高，用來墊高壓克力板使磁力感測器遠離桌面，避免磁力感測器讀數受到其他因素干擾。磁鐵的任一面上貼上標籤，將磁鐵正反放，使磁力線通過感測器的方向改變，同時也將感測器正反位置改變，並觀察磁力強度讀數結果。



圖二、水平測量用磁鐵 (研究者自行拍攝)

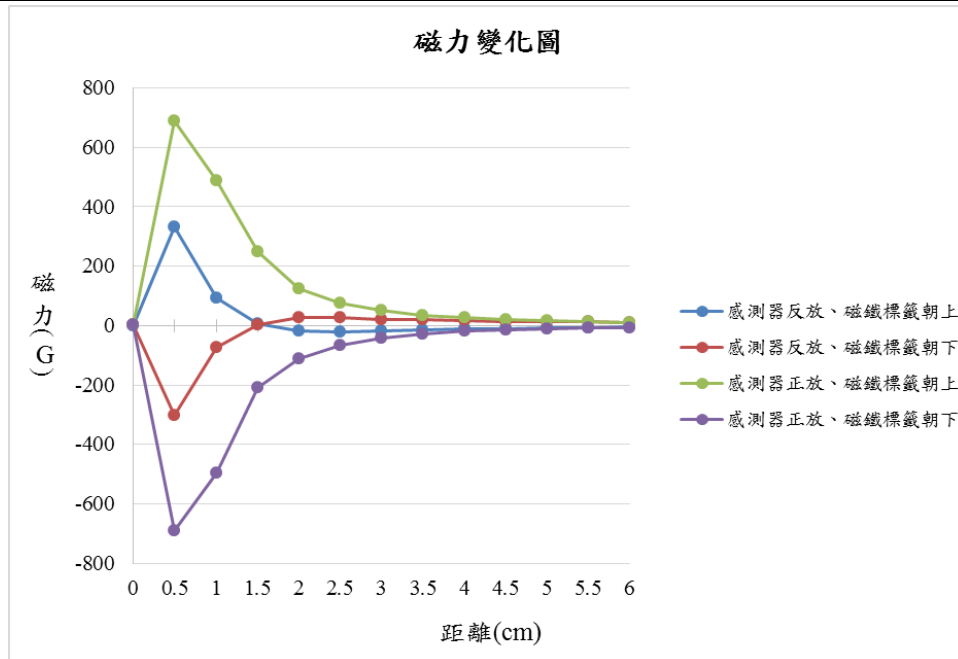


圖三、磁力感測裝置 (圖左) 及自製磁力測量尺 (圖右) (研究者自行拍攝)

表五、磁力刻度測量表整理 (G) (研究者自製)

擺放狀態 磁鐵距離 (cm)	感測器反放之磁力刻度(G)		感測器正放之磁力刻度(G)	
	磁鐵標籤朝上	磁鐵標籤朝下	磁鐵標籤朝上	磁鐵標籤朝下
0	331.24	-301.84	687.96	-691.88
0.5	94.08	-74.48	488.04	-497.84
1	5.88	3.92	248.92	-207.76
1.5	-19.60	25.48	125.44	-111.72
2	-21.56	27.44	76.44	-66.64

2.5	-17.64	21.56	50.96	-41.16
3	-15.68	19.60	33.32	-29.40
3.5	-11.76	15.68	25.48	-19.60
4	-9.80	13.72	19.60	-13.72
4.5	-7.84	11.76	15.68	-11.76
5	-5.88	11.76	11.76	-7.84
5.5	-3.92	9.80	9.80	-5.88
6	-3.92	7.84	7.84	-3.92
6.5 (~15)	0 (雜訊)	5.88	5.88	-3.92
7 (~15)	-	1.96 (雜訊)	5.88	-3.92
7.5 (~15)	-	-	1.96 (雜訊)	-1.96 (雜訊)

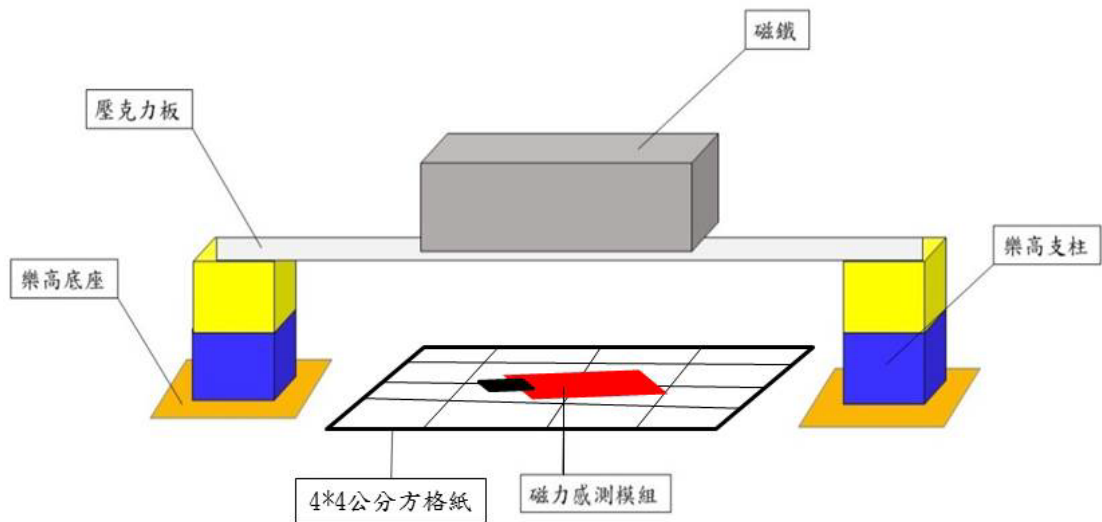


圖四、磁力變化圖 (研究者自製)

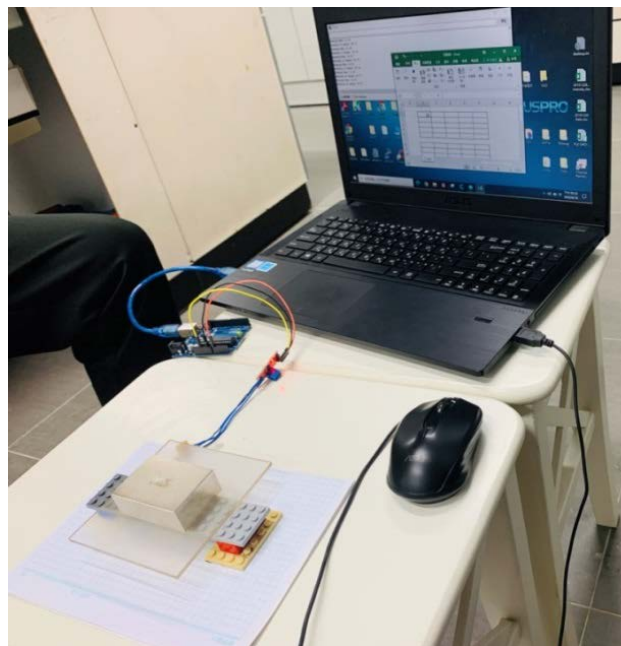
由上述圖表紀錄，將感測器黏於壓克力板上並反放，發現磁鐵距離感測器漸遠，所檢測出的磁力會有變號的現象發生，推測其原因為感測器和磁鐵中間隔了一塊壓克力板有高度差，造成磁力線通過感測器方向改變所致。透過磁力變化圖也可觀察到正負號的兩條磁力變化線大致呈上下對稱，且距離越遠，各組的磁力變化線也慢慢趨近於 0。

2. 垂直測量磁鐵磁力

本次垂直測量磁鐵磁力使用強力磁鐵。將磁鐵放置於壓克力板上方，壓克力板的兩端用樂高墊高，壓克力板與桌面中放上方格紙，方格紙上繪製公分乘四公分的正方形 (共 25 個點)，利用磁力感測模組測量每個點的磁力大小，再將樂高一層一層架高 (共疊五層)，記錄下每個測量數值後，繪出磁場三維圖。



圖五、垂直測量磁力裝置製示意图 (研究者自行拍攝)

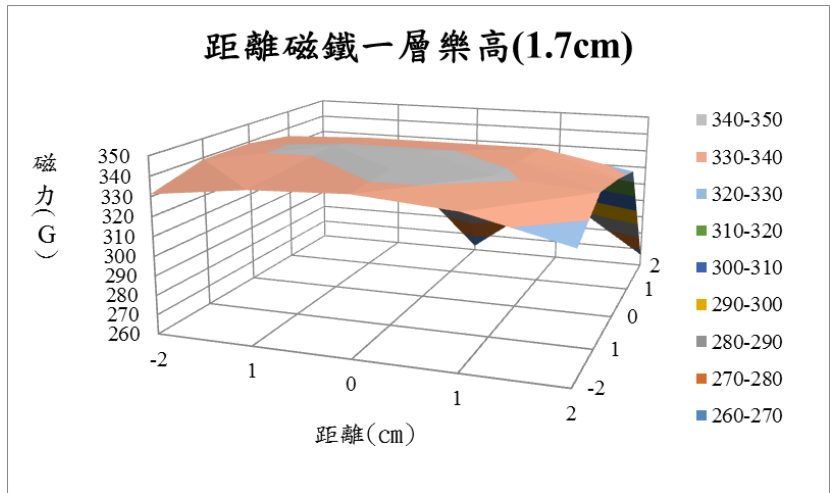


圖六、垂直測量磁力裝置俯視圖 (研究者自行拍攝)

堆疊樂高的初始第一層為 1.7cm 高，再以每 0.95cm 高的樂高一層一層向上加高並測量磁力數值。以下為繪製磁場三維圖，每格線段長度皆為一公分，並附上磁力數值紀錄表。磁鐵位於 (0,0) 正上方。

表六、距離磁鐵一層高磁力數值紀錄表 (G) (研究者自製)

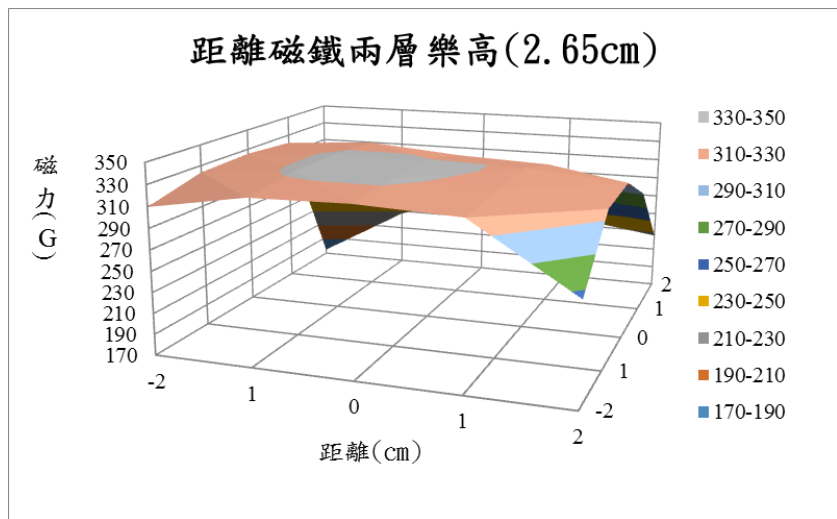
	-2	1	0	1	2
-2	331.24	337.12	339.08	335.16	323.4
1	339.08	339.08	341.04	341.04	337.12
0	339.08	341.04	341.04	339.08	333.2
1	335.16	337.12	337.12	337.12	327.32
2	299.88	309.68	262.64	299.88	266.56



圖七、距離磁鐵一層樂高磁場分布三維圖 (研究者自製)

表七、距離磁鐵兩層樂高磁力數值紀錄 (G)(研究者自製)

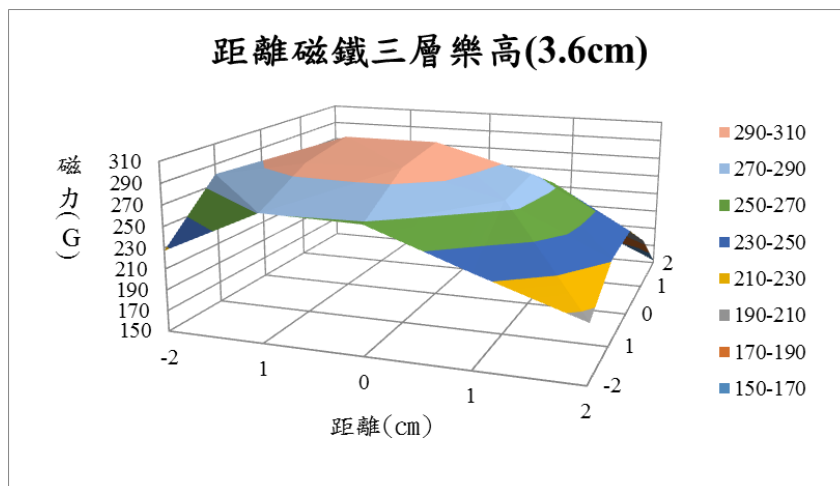
	-2	1	0	1	2
-2	309.68	325.36	327.32	323.4	264.6
1	323.4	331.24	331.24	327.32	317.52
0	325.36	331.24	331.24	329.28	321.44
1	321.44	327.32	319.48	315.56	292.04
2	174.44	227.36	254.8	239.12	225.4



圖八、距離磁鐵兩層樂高磁場分布三維圖 (研究者自製)

表八、距離磁鐵三層樂高磁力數值紀錄 (G)(研究者自製)

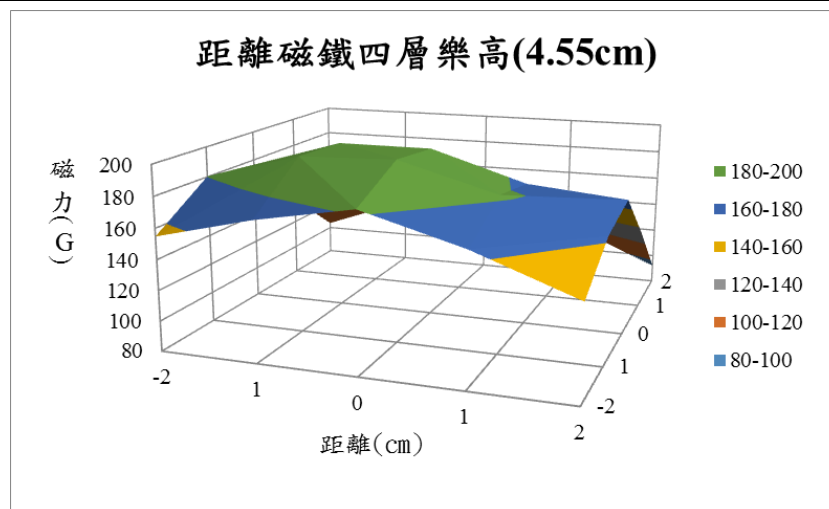
	-2	1	0	1	2
-2	227.36	270.48	268.52	235.2	203.84
1	280.28	297.92	299.88	276.36	231.28
0	276.36	307.72	307.72	282.24	233.24
1	258.72	274.4	280.28	254.8	199.92
2	205.8	233.24	225.4	196	152.88



圖九、距離磁鐵三層樂高磁場分布三維圖 (研究者自製)

表九、距離磁鐵四層樂高磁力數值紀錄 (G)(研究者自製)

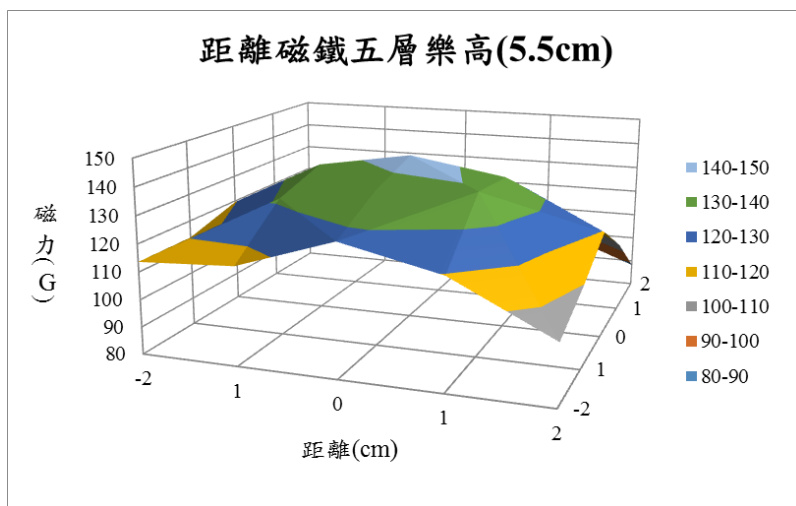
	-2	1	0	1	2
-2	154.84	170.52	182.28	164.64	141.12
1	180.32	197.96	199.92	182.28	162.68
0	176.4	196	196	176.4	170.52
1	137.2	172.48	164.64	152.88	133.28
2	103.88	127.4	131.32	119.56	92.12



圖十、距離磁鐵四層樂高磁場分布三維圖 (研究者自製)

表十、距離磁鐵五層樂高磁力數值紀錄 (G)(研究者自製)

	-2	1	0	1	2
-2	113.68	115.64	127.4	119.56	101.92
1	113.68	131.32	137.2	139.16	109.76
0	119.56	137.2	143.08	137.2	119.56
1	107.8	131.32	131.32	125.44	105.84
2	99.96	111.72	115.64	101.92	88.2



圖十一、距離磁鐵五層樂高磁場分布三維圖 (研究者自製)

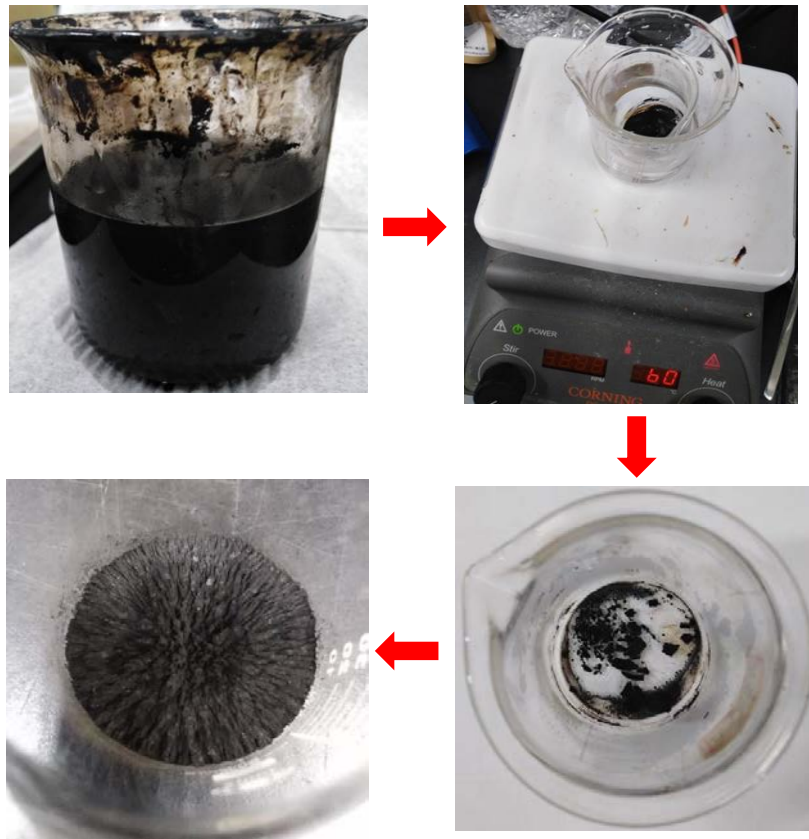
根據以上圖表數值紀錄及磁力三維空間繪圖，發現磁鐵距離感測模組越遠磁鐵中心與外圍磁場強度差異較大，越靠近磁鐵磁場分布越均勻。藉此本實驗已用一簡單方法自行建立一套可作為下階段磁力研究之基礎的磁力線尺規以供定量分析之基礎，可取代目前市售 FE-2100R 表面磁場分佈測量裝置磁分佈測量儀。

(五) 似泰勒錐研究

1. 四氧化三鐵乾燥

似泰勒錐研究在定量四氧化三鐵的過程必須精準的測量出四氧化三鐵的質量，所以在這個步驟需將合成好的四氧化三鐵乾燥，以下為乾燥步驟。

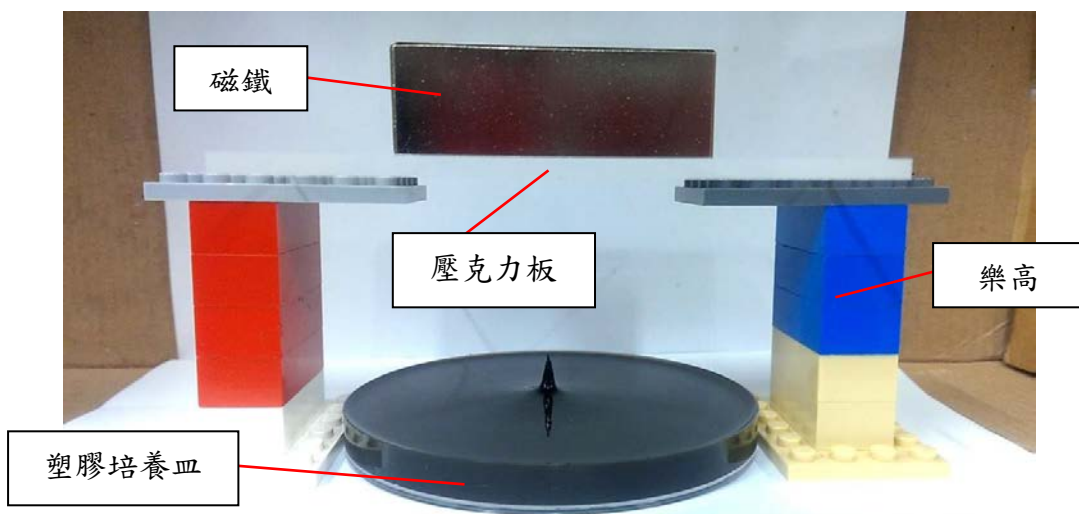
- (1) 合成步驟同化學共沉法第 1 點到第 5 點，最後一次純化步驟使用酒精純化四氧化三鐵。
- (2) 將燒杯放上加熱攪拌器 70°C 至 80°C 隔水加熱一到兩個小時。
- (3) 將烤乾的四氧化三鐵塊用研杵磨成細粉。



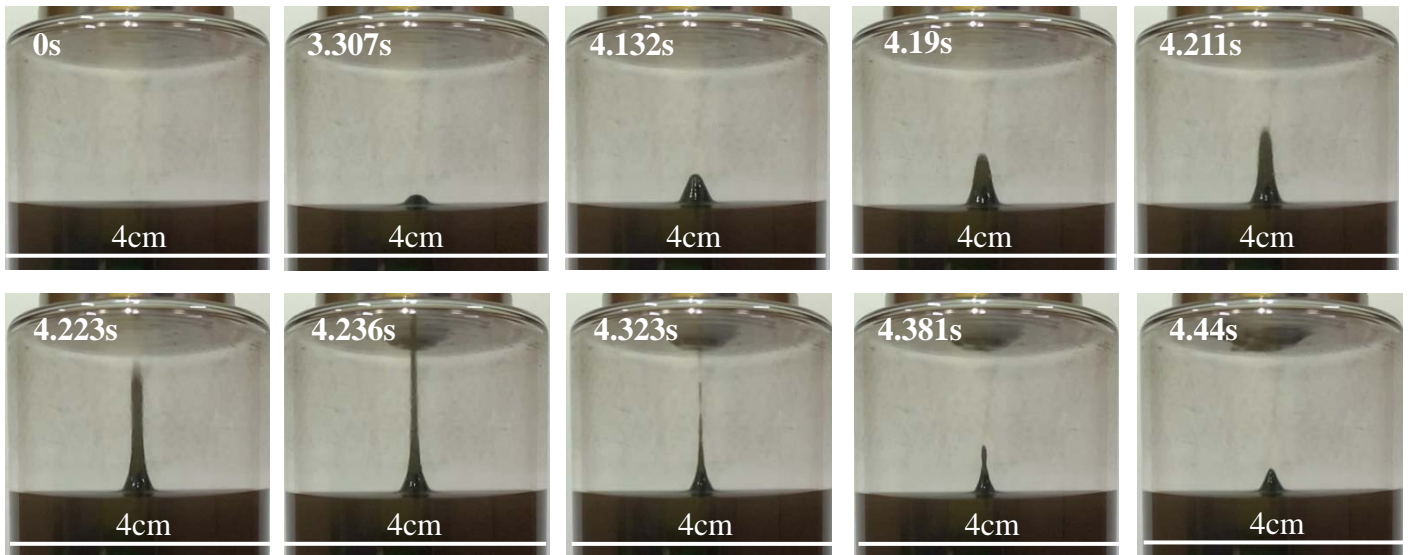
圖十二、四氧化三鐵乾燥過程 (研究者自製)

2. 似泰勒錐介紹

用磁鐵隔空吸鐵磁流體時，鐵磁流體會被吸起一個類似泰勒錐之錐體，觀察到此有趣現象後，我進而深入研究。為了了解各種不同變因對椎體形成之影響，以下改變各種不同變因，包含四氧化三鐵濃度、磁力強度、界面活性劑及載液。以下實驗照片及比較圖皆使用軟體 LosslessCut 按照幀數使用每 0.033 秒進行實驗截圖及數據紀錄。



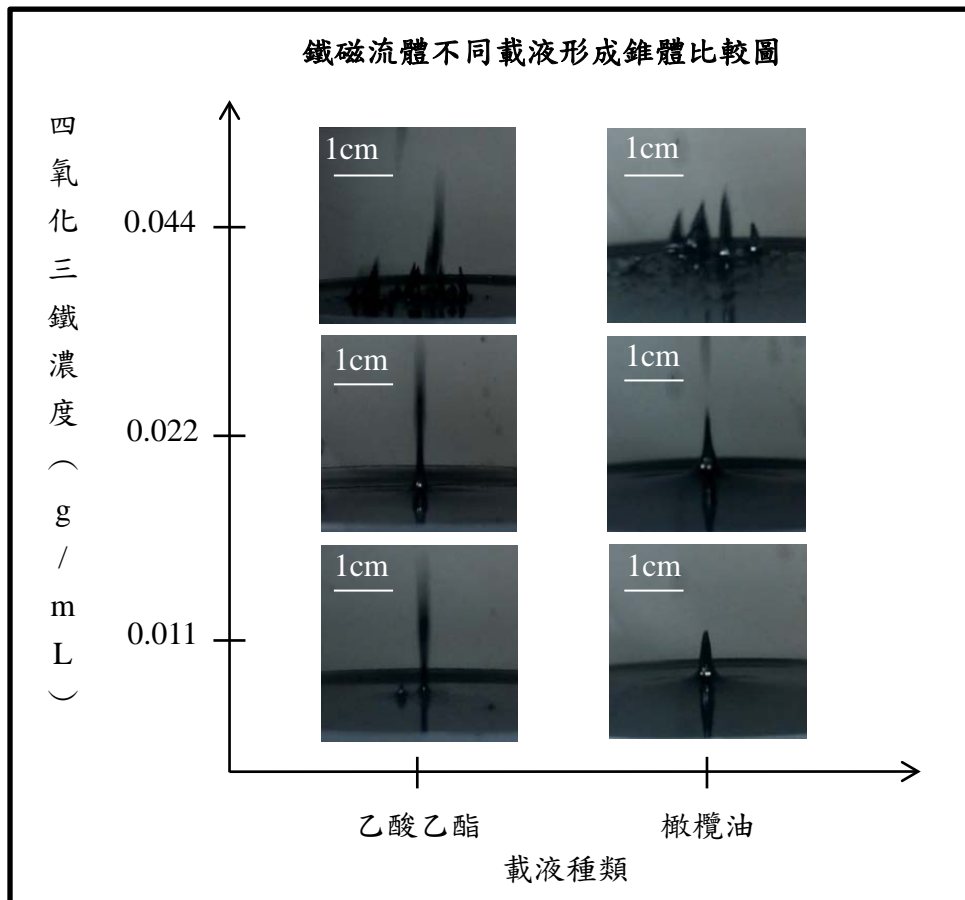
圖十三、觀察鐵磁流體似泰勒錐產生裝置圖 (研究者自行拍攝)



圖十四、鐵磁流體似泰勒錐產生過程 (研究者自製)

3. 載液對鐵磁流體似泰勒錐形成之比較

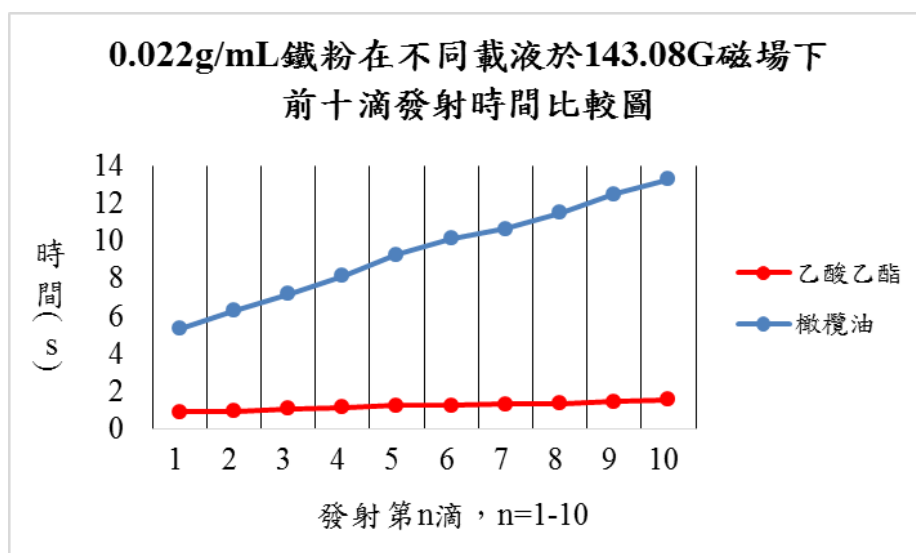
以下比較鐵磁流體載液乙酸乙酯和橄欖油所產生錐體，使用了不同濃度的四氧化三鐵分別為 0.011g/mL、0.022g/mL、0.044g/mL 測試，實際拍攝照片如下圖十五。本研究並將其量化，比較鐵磁流體被上吸至磁鐵前十滴的時間，並製作為下表十一與圖十六。



圖十五、鐵磁流體不同載液形成錐體比較圖 (研究者自製)

表十一、0.022g/mL 鐵粉在不同載液於 143.08G 磁場下前十滴發射時間表(s) (研究者自製)

第 n 滴，n=1-10	乙酸乙酯	橄欖油
1	0.90	5.33
2	0.93	6.30
3	1.06	7.20
4	1.16	8.16
5	1.23	9.30
6	1.26	10.16
7	1.33	10.66
8	1.36	11.53
9	1.46	12.53
10	1.56	13.33

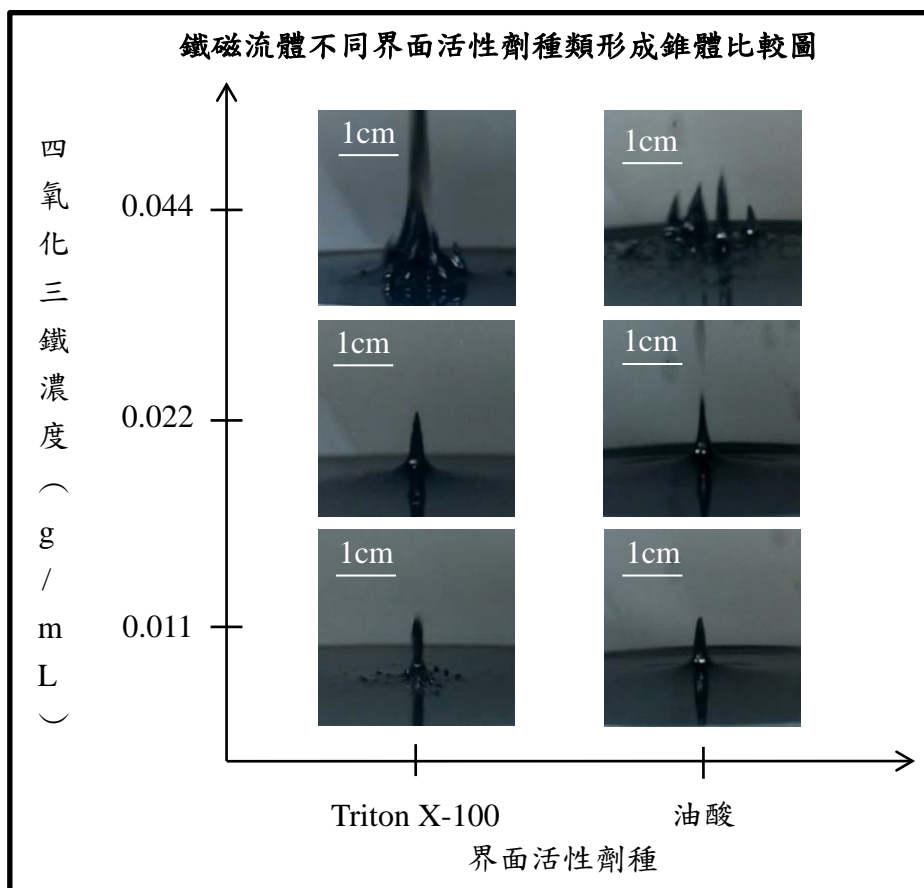


圖十六 0.022g/mL 鐵粉在不同載液於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

根據本實驗可觀察到在觀察錐體的部分，使用載液上選擇橄欖油較能觀察到錐體形成過程，形成時間較慢、實驗再現性較高，因此以下實驗接選橄欖油作為載液。

4. 界面活性劑對鐵磁流體似泰勒錐形成之比較

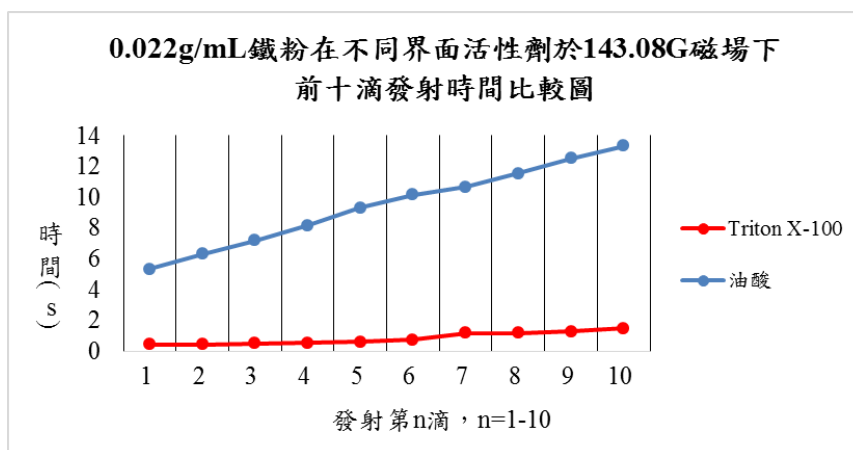
接著比較兩種界面活性劑，分別是 Triton X-100 與油酸形成錐體比較，比較的濃度一樣有 0.011g/mL、0.022g/mL、0.044g/mL 的四氧化三鐵。載液皆為橄欖油。實際拍攝照片如下圖十七。本研究並將其量化，比較鐵磁流體被上吸至磁鐵前十滴的時間，並製作為下表十二與圖十八。



圖十七、鐵磁流體不同界面活性劑種類形成錐體比較圖 (研究者自製)

表十二、0.022g/mL 鐵粉在不同界面活性劑於 143.08G 磁場下前十滴發射時間表(s)
(研究者自製)

第 n 滴, n=1-10	Triton X-100	橄欖油
1	0.43	5.33
2	0.46	6.30
3	0.50	7.20
4	0.53	8.16
5	0.60	9.30
6	0.76	10.16
7	1.20	10.66
8	1.20	11.53
9	1.30	12.53
10	1.50	13.33

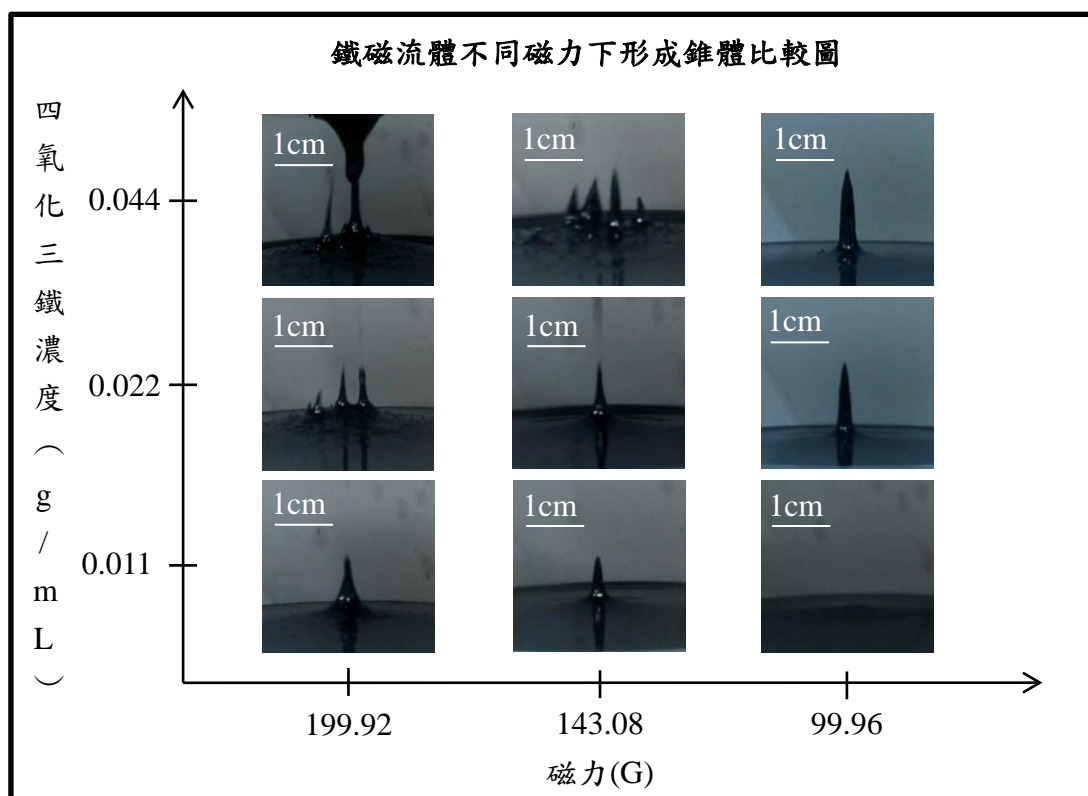


圖十八、0.022g/mL 鐵粉在不同界面活性劑於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

根據以上實驗觀察到油酸作為界面活性劑較能讓四氧化三鐵與橄欖油均勻混合，Triton X-100 造成四氧化三鐵與橄欖油有些呈現分離，上吸速度過快。

5. 磁場強度對鐵磁流體似泰勒錐形成之比較

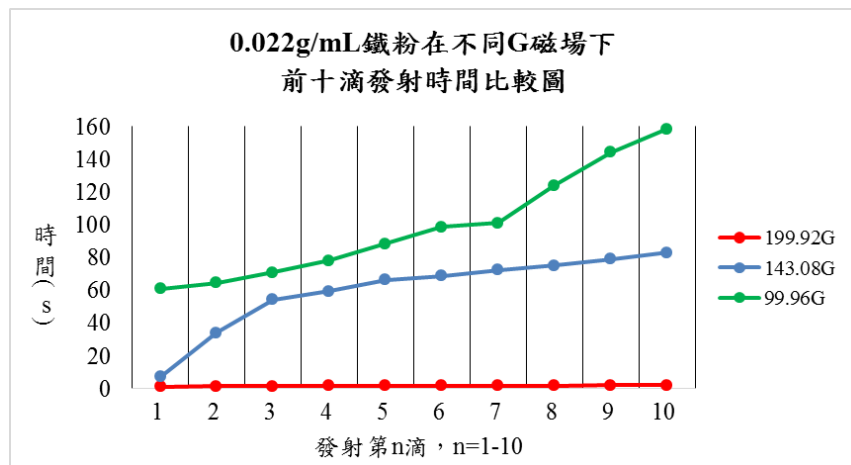
為觀察磁場大小對於錐體形成外型的影響，本實驗將樂高分別加設四層(最高磁力 199.92G)、五層(最高磁力 143.08G)、六層(最高磁力 99.96G)，想透過此實驗觀察能清楚觀察鐵磁流體似泰勒錐體外型。實際拍攝照片如下圖十九。本研究並將其量化，比較鐵磁流體被上吸至磁鐵前十滴的時間，並製作為下表十三與圖二十。



圖十九、鐵磁流體不同磁力下形成錐體比較圖 (研究者自製)

表十三、0.022g/mL 鐵粉在不同磁場強度下前十滴發射時間表(s) (研究者自製)

第 n 滴, n=1-10	199.92G	143.08G	99.96G
1	1.23	7.16	60.86
2	1.36	34.07	64.73
3	1.56	54.20	70.96
4	1.66	59.44	78.16
5	1.70	66.27	88.33
6	1.73	68.8	98.60
7	1.80	72.57	101.23
8	1.86	75.24	124.2
9	2.00	79.17	144.26
10	2.06	82.91	158.67



圖二十、0.022g/mL 鐵粉在不同 G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

199.92G 磁場下錐體形成快速、上吸速度極快。99.96G 磁場下流體明顯上吸速度較慢，由於磁場強度較弱，錐體產生至脫離液面間形狀較細長。143.08G 無論時間及形狀皆適中。

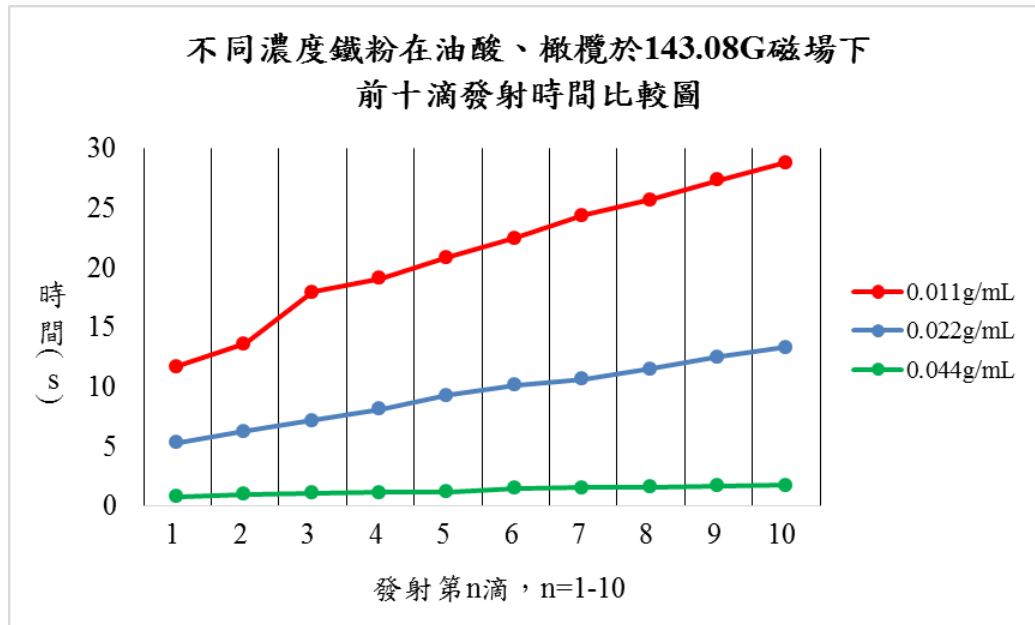
6. 其他綜合比較

以下嘗試了各種不同變因下，鐵磁流體形成似泰勒錐的前十滴上吸時間，以觀察各種不同磁場強度、界面活性劑、載液及不同四氧化三鐵濃度之影響。並繪製成多張圖表。

表十四、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖於 143.08G 磁場下前十滴發射時間(s) (研究者自製)

第 n 滴, n=1-10	0.011g/mL	0.022g/mL	0.044g/mL
1	11.73	5.33	0.83
2	13.66	6.30	1.03
3	18.00	7.20	1.10

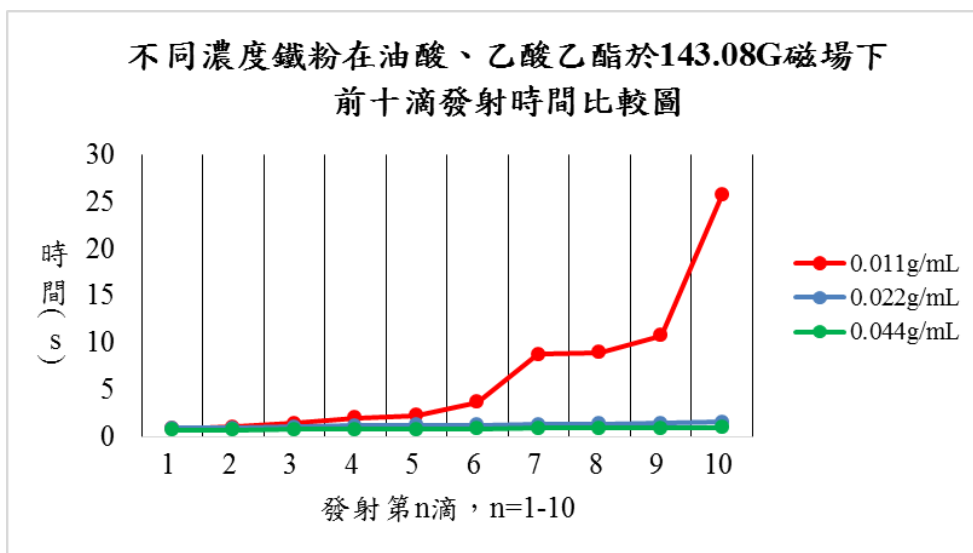
4	19.13	8.16	1.16
5	20.90	9.30	1.23
6	22.50	10.16	1.50
7	24.43	10.66	1.56
8	25.73	11.53	1.63
9	27.40	12.53	1.73
10	28.86	13.33	1.76



圖二十一、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖(研究者自製)

表十五、不同濃度鐵粉在油酸、乙酸乙酯於 143.08G 磁場下前十滴發射時間表(s)
(研究者自製)

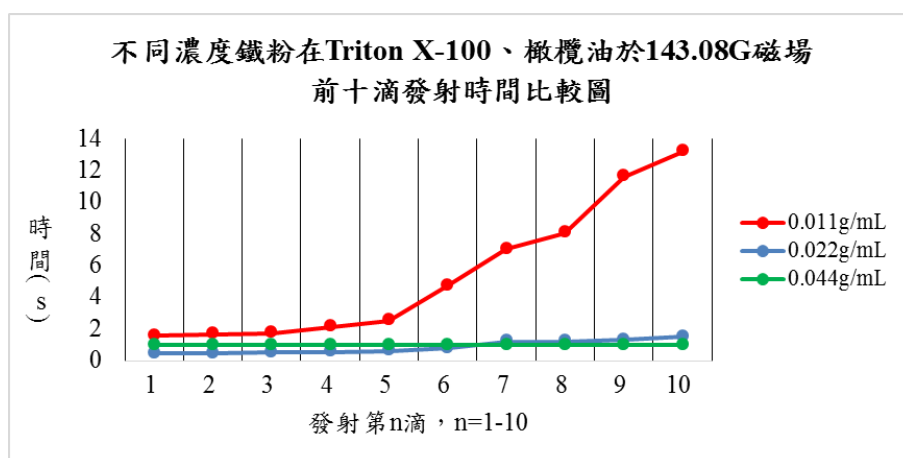
第 n 滴, n=1-10	0.011g/mL	0.022g/mL	0.044g/mL
1	0.86	0.90	0.70
2	1.06	0.93	0.73
3	1.46	1.06	0.76
4	1.99	1.16	0.80
5	2.26	1.23	0.80
6	3.66	1.26	0.86
7	8.76	1.33	0.90
8	8.99	1.36	0.93
9	10.79	1.46	0.93
10	25.76	1.56	0.96



圖二十二、不同濃度鐵粉在油酸、乙酸乙酯於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖
(研究者自製)

表十六、不同濃度鐵粉在 Triton X-100、橄欖油於 143.08G 磁場前十滴發射時間表(s)
(研究者自製)

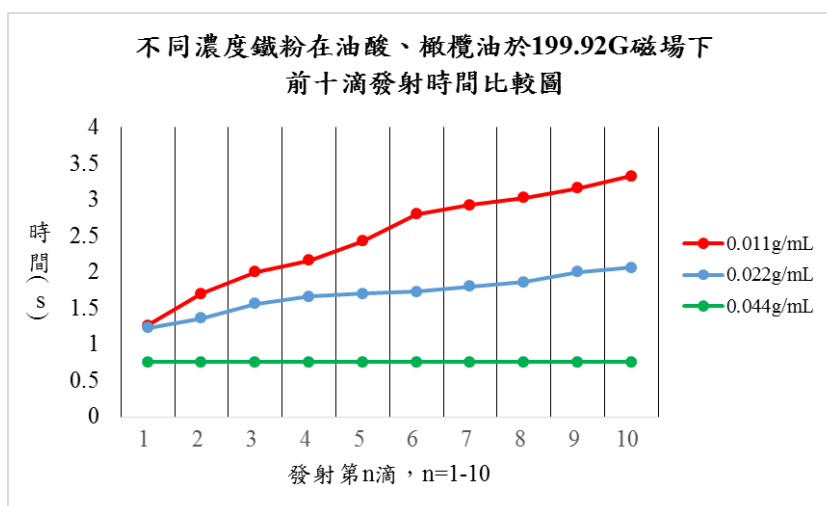
第 n 滴, n=1-10	0.011g/mL	0.022g/mL	0.044g/mL
1	1.56	0.43	0.96
2	1.66	0.46	0.96
3	1.73	0.50	0.96
4	2.13	0.53	0.96
5	2.53	0.60	0.96
6	4.73	0.76	0.96
7	7.03	1.20	0.96
8	8.06	1.20	0.96
9	11.63	1.30	0.96
10	13.23	1.50	0.96



圖二十三、不同濃度鐵粉在 Triton X-100、橄欖油於 143.08G 磁場前十滴發射時間比較圖
(研究者自製)

表十七、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖油於 199.92G 磁場下前十滴發射時間表(s)(研究者自製)

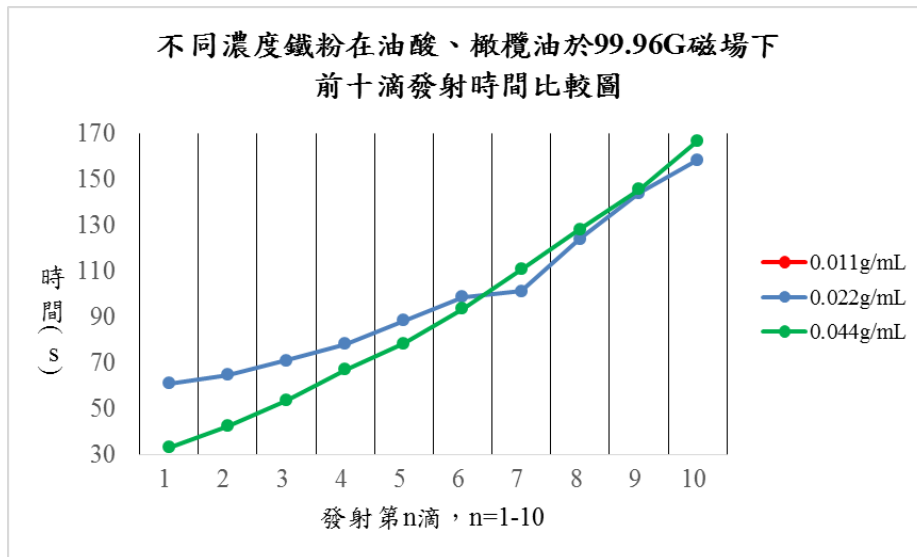
第 n 滴，n=1-10	0.011g/mL	0.022g/mL	0.044g/mL
1	1.26	1.23	0.76
2	1.70	1.36	0.76
3	2.00	1.56	0.76
4	2.16	1.66	0.76
5	2.43	1.70	0.76
6	2.80	1.73	0.76
7	2.93	1.80	0.76
8	3.03	1.86	0.76
9	3.16	2.00	0.76
10	3.33	2.06	0.76



圖二十四、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖油於 199.92G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

表十八、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖油於 99.96 高斯磁場下前十滴發射時間表(s)(研究者自製)

第 n 滴，n=1-10	0.011g/mL	0.022g/mL	0.044g/mL
1	-	60.86	33.03
2	-	64.73	42.23
3	-	70.96	53.53
4	-	78.16	66.97
5	-	88.33	78.37
6	-	98.60	93.53
7	-	101.23	110.93
8	-	124.20	128.30
9	-	144.26	145.80
10	-	158.67	167.07



圖二十五、不同濃度鐵粉在油酸、橄欖油於 99.96G 磁場下前十滴發射時間比較圖
(研究者自製)

根據以上多組實驗多組實驗發現，四氧化三鐵濃度為 0.022g/mL、界面活性劑採用油酸、載液使用橄欖油，是最符合本實驗目標觀察錐體的。在垂直磁力測量所繪製的三維磁場圖可以觀察到在磁鐵中心的磁場強度較強，同時也反映在鐵磁流體似泰勒錐錐體外型上，受到較強磁力的地方突起尖錐後上吸至磁鐵上。

四、結論

- (一)本研究完整整理文獻中討論製備磁流體各種方法，評估後選擇以研魔法與化學共沉法作為初步嘗試之製備方法：實作研磨法時，由於是使用人力將磁性材料磨碎，所以還未形成超微粒子，磁性顆粒在載體分布不均勻，磁性效果微弱。
- (二)經由實作經驗加上查閱多種參考資料，推測化學共沉法是最適合實驗探討的製作方式，其原因除了實驗器材要求度低外，還有多種可改變的變因，大大增加了此項計畫的可實驗性，值得我們嘗試。
- (三)本研究指出認為氨水 pH 值乃為製備鐵磁流體時的關鍵因素，pH 值低於 11.35 會導致四氧化三鐵無法順利合成，製備之產物無磁性，因此控制反應系統之 pH 值為合成關鍵因素。
- (四)在進行磁力刻度尺定量時，由於感測器和磁鐵中間隔了一塊壓克力板造成高度差磁鐵距離感測器漸遠，所檢測出的磁力會有變號的現象發生。磁力變化線的正負位置相互對稱，磁鐵慢慢遠離後，數值也會漸漸趨近 0。本研究利用簡單且低成本方式製備一磁力刻度尺，並且能以此做為後續研究定量之用途。
- (五)根據磁場三維圖的繪製，距離磁鐵越遠，磁鐵的中心與四周的磁力數值相差越大，

越靠近，數值則越平均。可見已能在磁鐵中心附近完成一接近穩定之磁場，以作為後續研究使用。

- (六)透過磁場三維圖的繪製比對鐵磁流體似泰勒錐的形狀，可以觀察到似泰勒錐是由磁力最強的一個點向上吸引後形成一錐體。
- (七)經過多組實驗後，鐵磁流體四氧化三鐵鐵粉濃度 0.022g/mL、油酸 10mL、橄欖油 35mL、磁鐵距五層樂高 (磁場強度 143.08G) 時，產生的似泰勒錐為最佳觀察、分析現象。
- (八)載液乙酸乙酯、界面活性劑 Triton X-100、四氧化三鐵鐵粉濃度 0.044g/mL、磁場強度 199.92G，皆會造成似泰勒錐產生現象過快。
- (九)四氧化三鐵鐵粉濃度 0.011g/mL、界面活性劑為油酸、載液為橄欖油、在磁場強度 99.96G 下，產生了本次研究首次錐體無法被吸引的狀態。以目前實驗進度推斷 99.96G 磁場對本實驗配方為最小極限磁場強度。
- (十)未來展望部分，本研究期望以磁鐵粒徑之量測作為下階段研究目標，希望能量測出合成鐵磁流體之粒徑，並探討各步驟合成中所製備的鐵磁流體粒徑，並找出其與各項性質間的關係。

五、討論及應用

本研究除健全的文獻蒐集外，還透過調製各種不同 pH 值的氨水滴定，發現能成功使化學共沉法生成四氧化三鐵的條件並整理成表格，以上資料成功解決了在製作鐵磁流體中可能會出現問題，成功克服文獻中未提及的再現性條件，未來會將 pH 值更加細分，使表格更加精準。

本研究使用樂高、Arduino 組件等製作出便宜又易取得的磁場檢測裝置，雖然功能未能完全達標，但繪製出磁場三維圖的功能已經能和市售機器相仿。未來希望能在測量磁場部分增添其他功能，發展一套能取代市售機器且價格便宜的裝置。

此外本研究提出了鐵磁流體似泰勒錐的創新理論，研究報告中為未來計算鐵磁流體似泰勒錐模擬方程式、臨界位置、臨界時間等用途的前置作業。未來將透過程式軟體計算出以上數據，並整理成更加完整之研究報告。

肆、參考資料及其他

一、化源網。2020 年 3 月 1 日，取自 <https://www.chemsrc.com/>

二、王思雅、王暄荏、盧淑君(2015)。跳舞的黑色精靈—論磁性流體的製作與在磁場中的表現。取自中學生網站。

三、李德才(2010)。磁性液體密封理論及應用。北京：科學出版社。

四、每日頭條。2020年2月29日，取自 <https://kknews.cc/zh-tw/news/ql4xbqy.html>

五、帝一化工購物網。2020年3月5日，取自 <https://shop.dechemical.com.tw/>

六、賴以珊、吳沛熏(2017)。江流「磁」不轉—鐵磁流體之研究。取自中學生網站。