

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160013

參展科別 物理與天文學

作品名稱 Study of Ferrofluid and Magnetic Fields

得獎獎項 四等獎

就讀學校 臺北市立永春高級中學

指導教師 陳玠霖、徐振哲

作者姓名 李蘭正、李宜鎧

關鍵詞 鐵磁流體、磁場、似泰勒錐

作者簡介



我們是永春高中的李蘭正和李宜鎧，喜歡研究一些與科學有關的事情。在專題研究過程中抱持著好奇心，在研究中運用上物理及化學知識，因緣際會下踏上了國際科展的旅途。在教授、指導老師、夥伴的協助下，一步步往上爬，相信一切都是值得的。

摘要

鐵磁流體同時具有液體的流動性和固體磁性材料的磁性，由磁性微粒、界面活性劑以及載液混合形成的膠體液體。本報告探討鐵磁流體的製備過程，在化學共沉法中改變滴入氨水的濃度 (pH 值)，建立一套標準稀釋氨水 pH 值量表。為了研究產物之間的差異，將產物進行 SEM 拍攝與 XRD 分析。

本研究使用低成本自製磁力測量裝置，測量磁力數值繪製多張圖表進行分析。從對磁場研究的過程發現鐵磁流體在受磁鐵吸引時會產生類似泰勒錐之錐體，架設自製觀測設備，觀察多種變因對錐體行為之影響，同時對錐體進行數值分析。此點乃為本研究提出創新科學設計。

未來將探討粒徑對製成鐵磁流體性質的影響，並以更精確的方式探討鐵磁流體在磁場下的受力分析圖。探討鐵磁流體之導電性，分析應用於現有電漿裝置之可能性，期望改良目前的電漿產生裝置中高污染且不可撓曲的缺點。

Abstract

Ferrofluid has the fluidity of a liquid and the magnetism of solid magnetic material at the same time. It is a colloidal liquid formed by mixing magnetic particles, surfactants, and a carrier liquid. This report discusses the preparation process of ferrofluid, changing the concentration (pH value) of dripping ammonia in the chemical coprecipitation method, and establishing a set of standard diluted ammonia water pH values scales. To study the difference between the products, the products were analyzed by SEM and XRD.

In this study, a low-cost self-made magnetic measuring device was used to measure the magnetic value and draw multiple charts for analysis. From the process of magnetic field research, it is found that ferrofluid will produce cones similar to Taylor cones when attracted by magnets. Self-made observation equipment is set up to observe the influence of various variables on the behavior of cones. In this research, the cones are numerically analyzed.

In the future, the influence of particle size on the properties of ferrofluid will be discussed, and the force analysis diagram of ferrofluid under a magnetic field will be discussed more accurately. Discuss the conductivity of the ferrofluid, analyze the possibility of applying it to existing plasma devices, and hope to improve the high pollution and inflexible shortcomings of the current plasma generating devices.

壹、前言

一、研究動機

現代科技日益發達，追求未來便利生活的同時，環保能源與降低污染為科學研究的首要項目。使用鐵磁流體發電技術的效率有驚人的 60%，相較於火力及核能發電對環境與人體危害的疑慮較小，鐵磁流體也可應用於醫療，利用奈米顆粒磁感應熱療技術治療癌症。此多功能材料在未來會被廣泛應用，但如何能更有效的使用鐵磁流體，檢測材料將為重要課題。本研究希望能使用符合綠色化學原則的實驗方式探討此項材料，減少實驗廢棄物產生，降低對環境的污染。

二、研究目的

- (一)、 研究多種鐵磁流體的製備方法及過程 (化學共沉法、研磨法、機械粉碎法等)，進行統整分析。
- (二)、 探討化學共沉法製備時 pH 值對鐵磁流體中磁粒四氧化三鐵生成影響。
- (三)、 研究不同濃度氨水對生成產物之影響，並利用 SEM 拍攝與 XRD 分析。
- (四)、 透過 Arduino 元件製作磁力感測裝置設備，研究磁鐵產生磁場數值大小及分布空間，並以三維圖形使其視覺化。
- (五)、 探討不同製作變因 (鐵粉濃度、界面活性劑與載液種類、磁場強度) 的鐵磁流體受磁鐵磁場作用所產生錐體之外型及上吸反應時間。
- (六)、 將鐵磁流體生成錐體影片進行運動數值分析，尋找軌跡方程式等。

貳、研究方法或過程

一、研究設備與器材

(一)、實驗器材

加熱攪拌器	磁鐵	電子秤	滴定管	吸量管
塑膠培養皿	瓦楞板	樂高	溫度計 pH 儀	電腦

亥姆霍茲線圈	Arduino 可調線性霍爾磁力感測模組	Arduino Uno R3 開發板
		

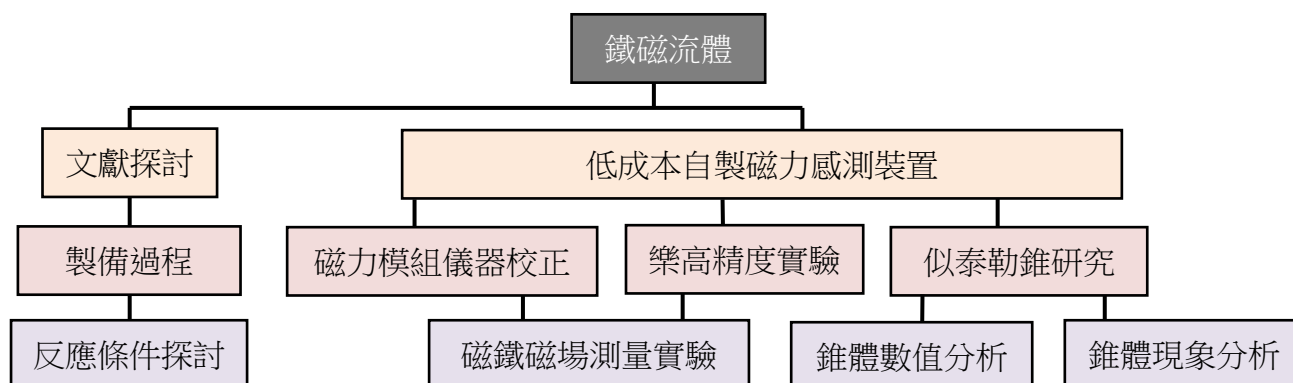
(二)、實驗藥品

氯化鐵 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	硫酸亞鐵 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	25% 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 ($\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$)	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)

(三)、研究軟體

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
5. Tracker 5.1.4

二、研究方法



圖一、研究架構圖 (研究者自製)

三、文獻探討

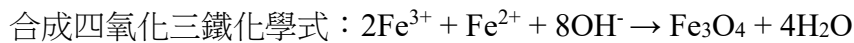
將多種鐵磁流體製備方式進行分析後，考量各項方法在現階段實作之實際可行性與發展性，本研究主要選定化學共沉法進行研究。化學共沉法實驗變因多，實驗藥品毒性低、實驗儀器取得難度低且耗能低，實驗反應在常溫常壓下即可進行。

四、鐵磁流體製備方法 (化學共沉法)

(一)、化學共沉法製備步驟

1. 將氨水與去氧離子水配製成稀釋氨水水溶液。

2. 調配適量硫酸亞鐵水溶液及氯化鐵水溶液並均勻混合。
3. 滴入氨水攪拌溶液，逐漸生成鐵氧化物並用去氧離子水多次純化產物。
4. 加入界面活性劑及載液並分別均勻攪拌即合成四氧化三鐵



五、探討化學共沉法製作條件對成品之影響

研究化學共沉法時發現無法順利製成鐵磁流體，檢查各項實驗步驟後，發現滴加的稀釋氨水為製成重要關鍵。〈微/奈米加工之化工技術應用於癌症治療與檢測〉文獻提到滴入不同 pH 值的氨水會影響鐵磁粒子的粒徑大小，本研究探討產物的顏色與相關變化。本實驗固定氨水滴加速率、室溫，將 25% 氨水分裝為 0.5/1/2/4/8/16/32mL 稀釋至 50mL 滴入鐵水溶液觀察四氧化三鐵的生成狀態，藉此探討 pH 值對生成鐵磁流體中鐵磁微粒(四氧化三鐵)之影響。

六、鐵氧化物粒徑、相組成

將氨水滴定產物進行去水純化處理後進行 SEM 及 XRD 儀器分析。

(一)、儀器分析

1. 多功能環境場發掃描式電子顯微鏡 EFE-SEM (HITACHI SU-5000)

本儀器原理為電子槍透過熱游離或是場發射原理產生高能電子束，經過電磁透鏡組後，可以將電子束聚焦至試片上，利用掃描線圈偏折電子束，在試片表面上做二度空間的掃描。

詳細可參考

<https://ctrmost.web2.ncku.edu.tw/p/405-1054-7291,c2083.php?Lang=zh-tw>

2. 高強度多功能 X 光薄膜微區繞射儀 XRD(Bruker)

本儀器利用 X 射線在晶體中的繞射現象來獲得繞射後 X 射線信號特徵，經過處理得到繞射圖譜。

詳細可參考

<https://ctrmost.web2.ncku.edu.tw/p/405-1054-7307,c2083.php?Lang=zh-tw>

七、Arduino 類比霍爾磁力感測模組程式碼

以下為磁場觀測實驗中的 Arduino 磁力檢測程式，利用此程式驅動 Arduino 磁力感測模組測量空間中磁場數值大小。

```
/*
Analog Hall Effect module test

Basic code for reading the analog output of the hall effect module.
*/

const int AnalogPin = A0;
const float GAUSS PER STEP = 1.96; // Sensor outputs 2.5mV / Gauss.
// ADC step is about 4.89mV / Step

float rawValue = 0.0;
float gaussValue = 0.0;
float zeroLevel = 532.0; // Adjust as needed to get zero output with no magnetic
field present.

//=====
// Initialization
//=====
void setup()
{
  pinMode(AnalogPin, INPUT);
  Serial.begin(9600); // Set COM speed for debug window messages
}

//=====
// Main
//=====
void loop()
{
  rawValue = analogRead(AnalogPin) - zeroLevel; // Output normalized to '0' with
no field present
  Serial.print("Reading Raw: ");
  Serial.println(rawValue);
  // Reading positive relative to the South Pole, the North Pole negative
  gaussValue = rawValue * GAUSS PER STEP;
  Serial.print("Reading in Gauss: ");
  Serial.println(gaussValue);
  delay(300);
}
```

圖二、Arduino 磁力檢測程式碼 (研究者自行截圖)

使用模組測量磁場之前，為了避免地磁及其他磁場干擾測量結果，於是透過調整「zeroLevel」使磁場初始值為 0 後再進行後續實驗。

八、自製儀器校正方法

(一)、Arduino 類比霍爾磁力感測模組校正

本研究使用 Arduino 類比霍爾磁力感測模組取代成本較高的高斯計測量磁力數值，在進行實驗之前要先對感測模組進行校正，以此確認測量數據無誤。設計以下實驗校正 Arduino 類比霍爾磁力感測模組。

1. 將亥姆霍茲線圈通入兩安培電流。
2. 將 Arduino 磁力感測模組黏在尺的前端 (避免手抖誤差)，從線圈圓心處緩慢進入到底部再抽出。
3. 將測得線圈中心最高磁場數值與代入亥姆霍茲線圈公式 ($B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$) 進行比對，計算誤差值。

表一、Arduino 磁力模組放入亥茲亥姆霍茲線圈測量結果 (研究者自製)

測量次數	第一次	第二次	第三次	平均
中心磁場數值(G)	19.6	19.6	19.6	19.6

理論值計算 (B：磁場數值、 μ_0 ：磁常數、R：線圈半徑、z：兩線圈距離)：

$$\text{亥姆霍茲線圈公式： } B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2 \times 0.1^2}{2(0.1^2 + 0.14^2)^{3/2}} = 19.3\text{G}$$

$$\text{誤差} = \left| \frac{19.6 - 19.3458801}{19.3458801} \right| \times 100\% = 1.3\%$$

(二)、樂高精度實驗

本研究使用樂高取代一般實驗使用的光學平台架設磁力感測裝置，雖樂高易取得且成本低，但組合結構的精度令人懷疑。設計以下實驗以評估樂高精度。

1. 使用游標卡尺測量樂高高度，分別測量含頂部凸起與不含凸起部分（各測量三次）。
2. 隨機取樂高搭建裝置結構（似泰勒錐實驗裝置腳架之一）。
3. 比對裝置結構高度計算值與測量值之差異。

參、研究結果與討論

一、鐵磁流體製備方法（化學共沉法）

(一)、化學共沉法實驗

多次使用化學共沉法製備鐵磁流體後觀察到，並不是每次製成的成品都有辦法呈現漂亮的磁力線尖刺狀，但有無尖刺狀對本報告之研究內容並不會造成影響。

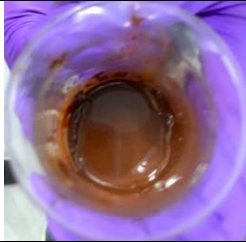


圖三、化學共沉法實驗成品（研究者自行拍攝）

二、探討化學共沉法製作條件對成品之影響

透過表二得知由 Fe_2O_3 所製成的鐵磁流體不具有磁性效果。


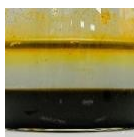
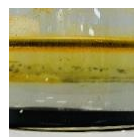


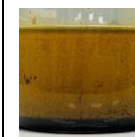






表二、不同氧化鐵製成鐵磁流體比較 (研究者自製)

由 Fe_3O_4 製成之鐵磁流體	由 Fe_2O_3 製成之鐵磁流體
	

(一)、滴定產物觀察

將不同濃度稀釋氨水滴入鐵水溶液生成產物使用磁鐵純化並隔水加熱 100°C ，實驗結果整理於下表。

表三、滴入不同稀釋濃度氨水生成產物整理 (研究者自製)

氨水 (mL)	0.5	1	2	4	8	16	32
pH	11.20	11.46	11.71	12.09	12.47	12.83	13.12
滴入氨水後 產物							
純化去水後 產物	-	-					
四氧化三鐵 質量 (g)	-	-	0.452	0.449	0.503	0.476	0.453

由實驗結果可以觀察到當滴入稀釋氨水 pH 值低於 11.46 無法生成具磁性四

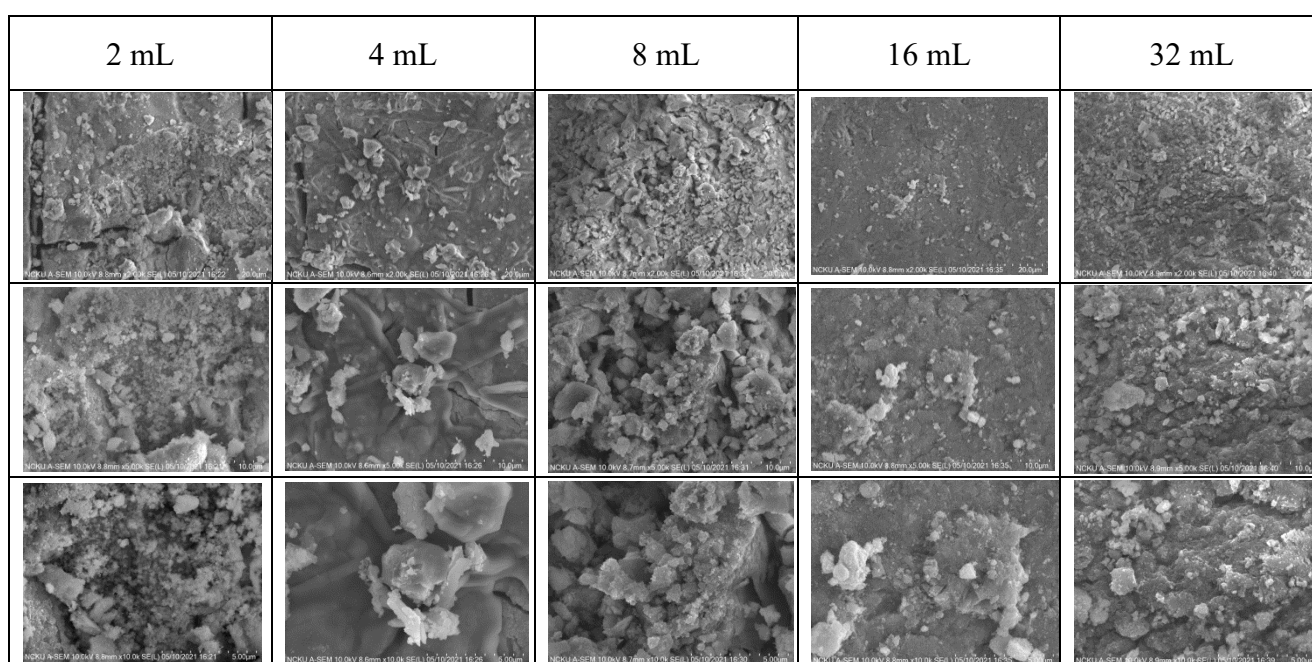
氧化三鐵，氨水 pH 值達 13.12 時生成產物經純化去水後類似三氧化二鐵的褐色。本研究認為導致在不同 pH 值生成不同狀態的氧化鐵原因為，在同一 pH 值中不同狀態的氧化鐵生成速度不一。

(二)、產物儀器分析

為了解本研究生成產物與文獻差異，以及不同濃度氨水所生成之產物在以下實驗中表現的關聯，將產物進行 SEM 拍攝與 XRD 分析。

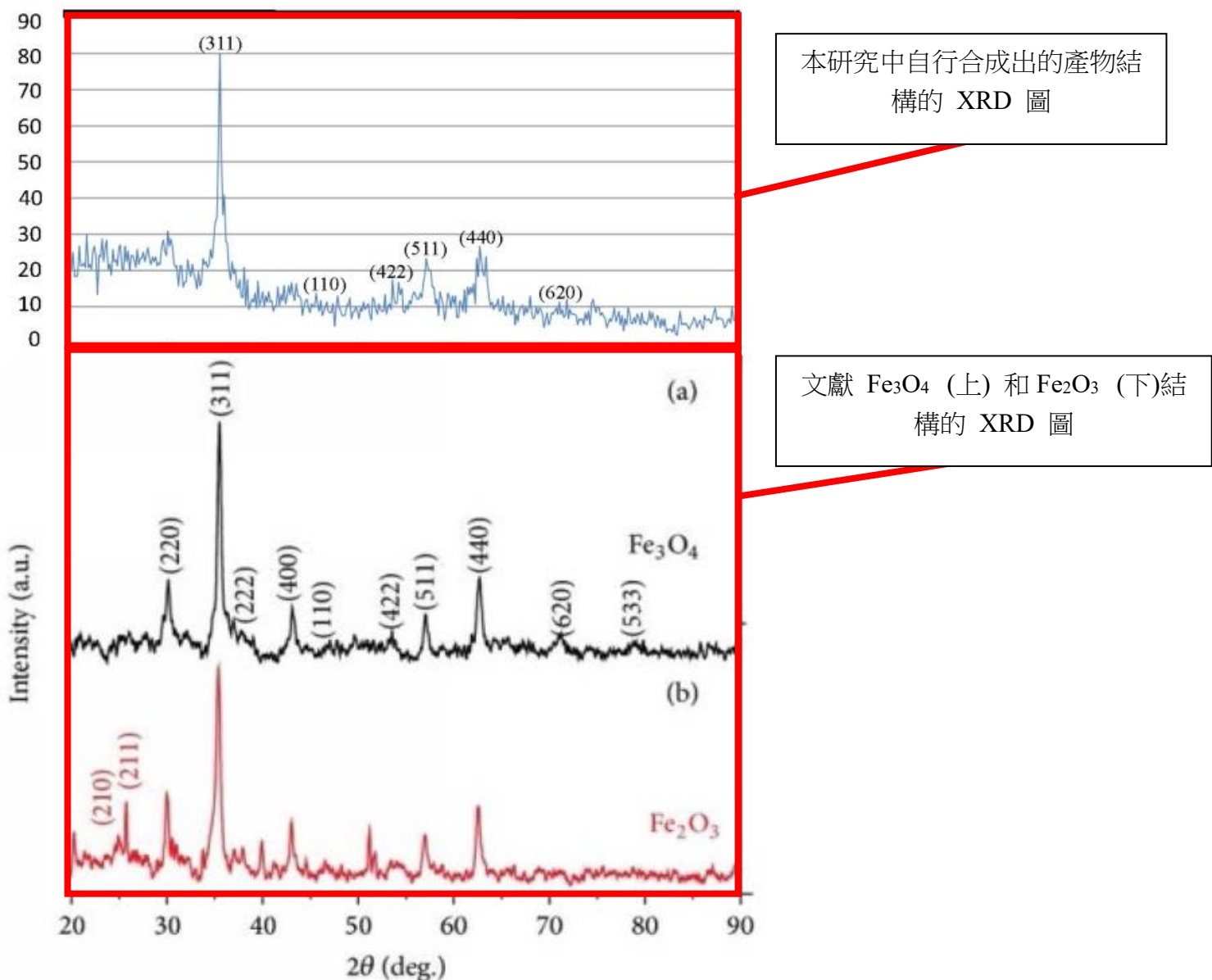
將 2 / 4 / 8 / 16 / 32mL 氨水生成產物去水後拍攝 SEM 照並整理於下表，下表由上至下倍率依序為 2K、5K、10K。

表四、倍率 2K、5K、10K 產物 SEM 照 (成功大學貴儀中心 AFE-SEM)



由 SEM 結果我們可以觀察到，2mL 產物的顆粒較小、較分散，4mL 產物表面較平滑、粒子較為團聚，此產物在後續實驗中於磁場下的表現較好。8 / 16 / 32mL 產物表面凹凸不平。

在表三中，我們發現氨水 32mL 去水產物中觀察到褐色產物，為了確實瞭解本實驗產生之產物是否為純的四氧化三鐵，因此本研究利用 XRD 對產物進行分析，下圖為產物透過 XRD 分析數據 (上半部) 與文獻 (下半部) 比較，透過晶面峰值區分可以觀察到 (311)、(110)、(422)、(511)、(440)、(620) 這些數值吻合四氧化三鐵的特徵，另由下圖可知本研究之產物沒有 (210) 和 (211) 的晶面，從而可推斷本研究中自行合成出的產物成分中應屬於四氧化三鐵，而無三氧化二鐵的生成。



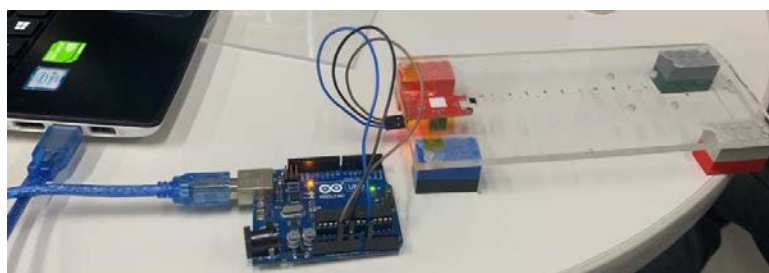
圖四、本研究中自行合成出的產物與文獻 XRD 比較圖 (成功大學貴儀中心 XRD)

三、磁場觀測研究

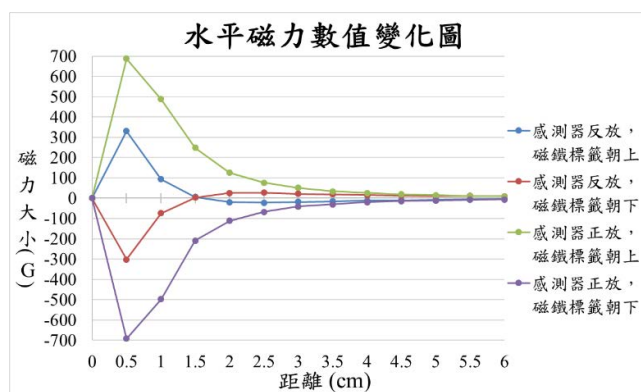
為了觀察鐵磁流體在不同磁場強度下的行為，製作了簡易的磁力感測裝置使空間中的磁場分布視覺化。分別嘗試了水平測量及垂直測量磁場。用於測量磁力數值的儀器高斯計成本較高且耗能較大，根據綠色化學中節能原則，本研究使用 Arduino 可調線性霍爾磁力感測模組取代之，且經由理論值計算出的誤差值極小。此外本研究也利用其他易取得的器材更簡易地完成實驗。

(一)、水平測量磁鐵磁力

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 公分的磁力數值變化並記錄。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以辨別正反，將磁鐵正反放，使磁力線通過感測器的方向改變，同時也將感測器整體正反位置改變，並觀察磁場讀數結果。



圖五、Arduino 磁力感測模組 (圖左) 及自製磁力測量尺 (圖右) (研究者自行拍攝)

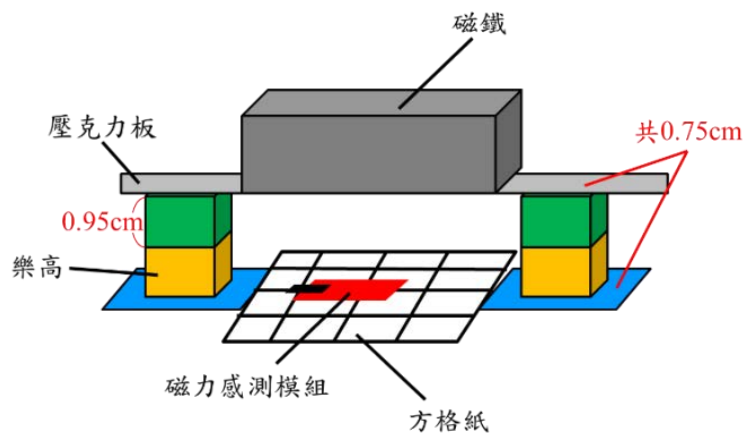


圖六、磁力數值變化圖 (研究者自製)

由上述圖表紀錄感測器黏於壓克力板上並反放，發現磁鐵距離感測器漸遠，所檢測出的磁力數值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導致。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。

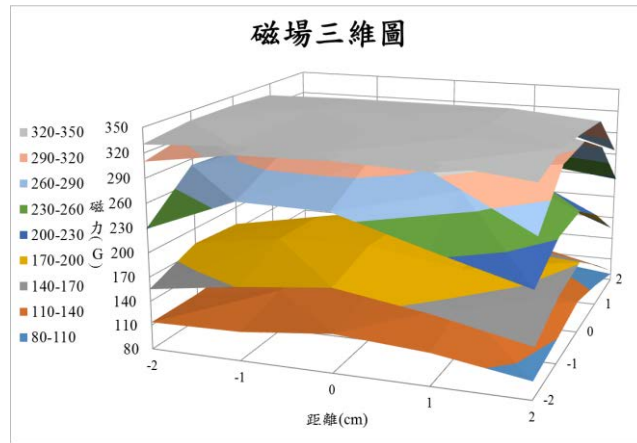
(二)、垂直測量磁鐵磁力

搭建自製磁力感測裝置，使用 Arduino 類比霍爾磁力感測模組 (替代高斯計) 測量四乘四公分 (共二十五個點) 的方格紙，測量方格紙的交點取代難度較高的平面無死角磁場測量，平面測量完畢後，再以每 0.95 公分高的樂高加高裝置，初始高度為 0.75 公分，重新測量加高後的平面。最後使用測量完每個平面的磁力數據繪製磁場三維圖。



圖七、自製磁力感測裝置示意圖 (研究者自製)

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，方格紙每格線段長度皆為一公分，並附上磁力數值紀錄表。磁鐵位於座標 (0,0) 正上方。

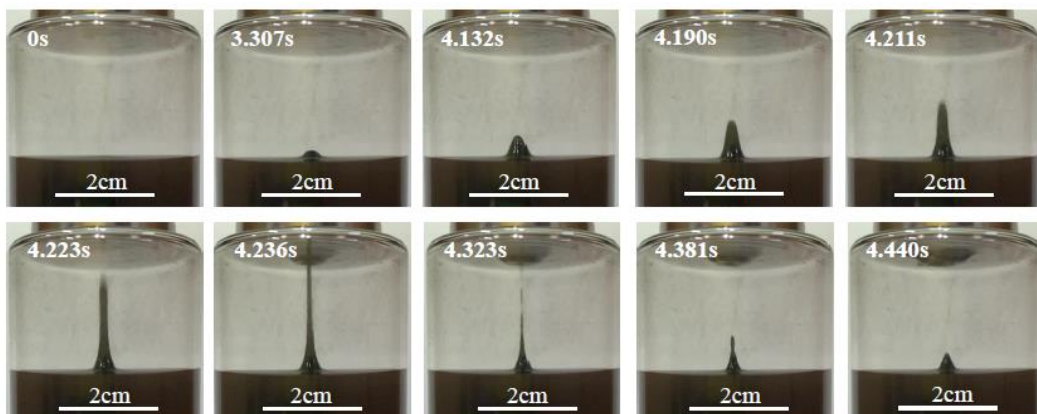


圖八、磁場三維圖 (研究者自製)

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，磁力強度數值下降幅度越大。方格紙的中心 (0,0) 是放置磁鐵的正下方位置，同時也為空間中磁場數值最強位置。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。

四、似泰勒錐研究

以往在操縱鐵磁流體時，都習慣使用磁鐵置於流體下方滑動操縱，本研究將磁鐵至於流體上方吸引。當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，待錐體形成到臨界高度後會脫離液面吸附至磁鐵。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。



圖九、鐵磁流體似泰勒錐形成流程圖 (研究者自製)

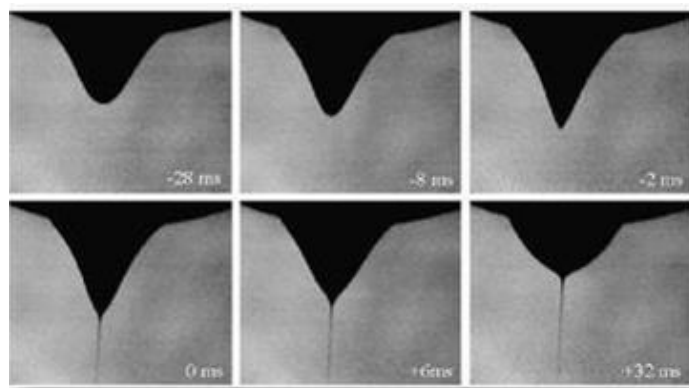
似泰勒錐形成影片：

https://drive.google.com/file/d/1DF4PmnfE-5QnRvkvd_Igzqcg3KYGgbRd/view?usp=sharing

本研究認為當磁鐵於鐵磁流體液面上方吸引時，液面的中心位置受到的磁吸力最強，因表面張力、液體內聚力等因素致使鐵磁流體液面上方形成一類似泰勒錐之錐體。

(一)、 泰勒錐介紹

在製造表面細度達到奈米級的材料時，需要利用靜電紡絲技術達成。靜電紡絲，對液體施加電壓使其產生靜電，拉長液體，待電壓超過臨界值，液滴會突破液面產生「泰勒錐」。

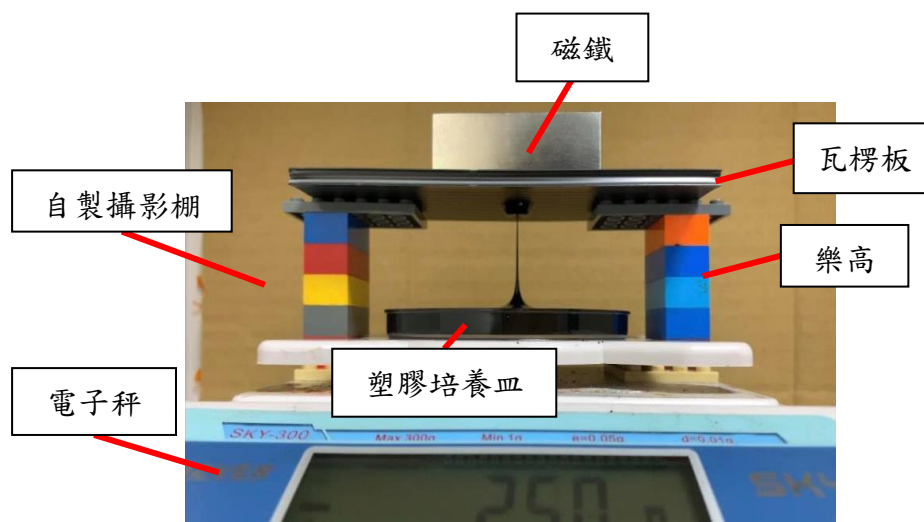


圖十、泰勒錐形狀變化圖

(取自 <https://www.wendangwang.com/doc/085c5499376c183543cfe829/7>)

(二)、 觀測似泰勒錐裝置

以下為觀測鐵磁流體受磁鐵吸引產生似泰勒錐的裝置。使用瓦楞板避免磁性流體直接吸附到磁鐵上方，且不會干擾到磁場強度。放置電子秤可以明確觀察到每一錐體形成並脫離液面的個別質量。



圖十一、觀測鐵磁流體似泰勒錐裝置圖 (研究者自行拍攝)

(三)、鐵磁流體製作條件對形成錐體之影響

探討改變鐵磁流體的製作變因對生成似泰勒錐的錐體外型、形成並突破液面發射至上方磁鐵前十滴個別時間。探討製作變因的實驗步驟根據化學共沉法改良，接續上點乾燥四氧化三鐵後，改變四氧化三鐵鐵粉質量 (濃度)、界面活性劑種類、載液種類、磁場強度 (樂高結構高度)。

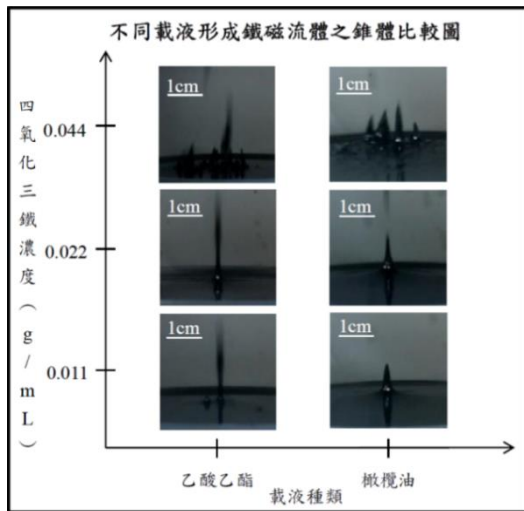
表五、鐵磁流體製備條件整理 (研究者自製)

四氧化三鐵質量	0.5g (0.011g/mL)	1g (0.022g/mL)	2g (0.044g/mL)
界面活性劑 (10mL)	油酸		Triton X-100
載液 (35mL)	橄欖油		乙酸乙酯
磁場強度 (樂高層數)	99.96G (四層)	143.08G (五層)	199.92G (六層)

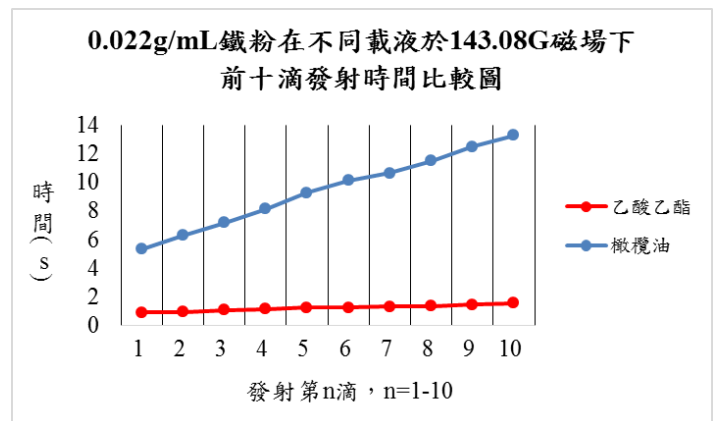
以上各藥品用量根據製作時攪拌的分散均勻程度。界面活性劑油酸及載液橄欖油和乙酸乙酯是參考文獻建議藥品。Triton X-100 則是生物實驗常用界面活性劑。

1. 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，使用不同濃度四氧化三鐵分別為 0.011g/mL (0.5g)、0.022g/mL (1g)、0.044g/mL (2g) 測試，實際拍攝照片如下圖十二。本研究將其量化比較鐵磁流體被上吸至磁鐵前十滴的時間，並製作圖十三。



圖十二、不同載液形成鐵磁流體之錐體比較圖 (研究者自製)

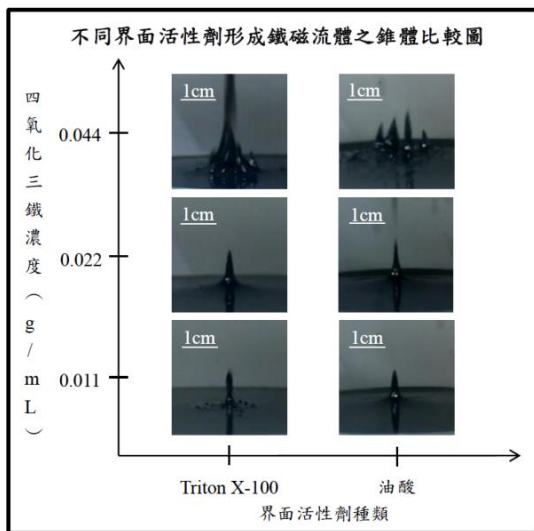


圖十三、0.022g/mL 鐵粉在不同載液於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

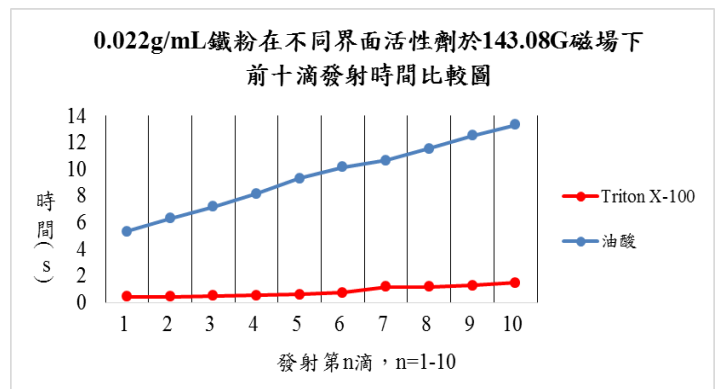
根據本實驗得知在觀察錐體時，使用載液上選擇橄欖油較能觀察到錐體形成過程，形成時間較慢、實驗再現性較高，因此以下實驗皆選橄欖油作為載液。

2. 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十四。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，並製作圖十五。



圖十四、不同界面活性劑形成鐵磁流體之錐體比較圖 (研究者自製)

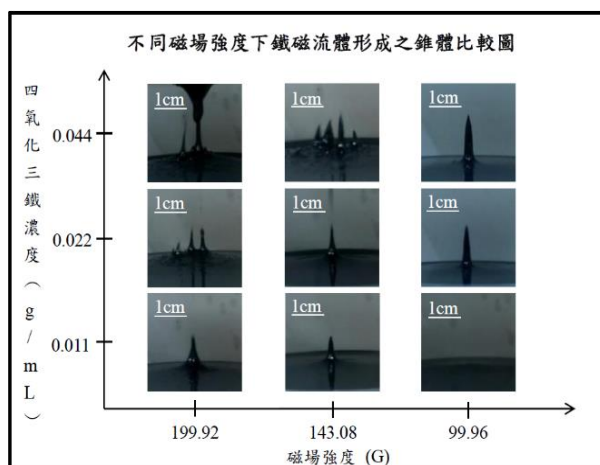


圖十五、0.022g/mL 鐵粉在不同界面活性劑於 143.08G 磁場下前十滴發射時間比較圖 (研究者自製)

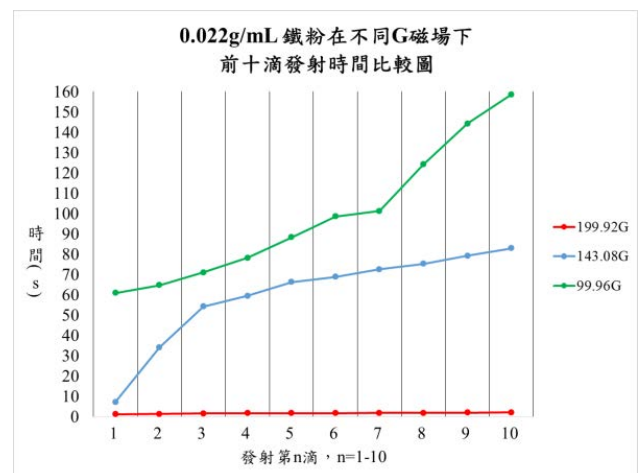
根據以上實驗觀察到油酸作為界面活性劑較能讓四氧化三鐵與橄欖油均勻混合，Triton X-100 造成四氧化三鐵與橄欖油呈現部分分離，上吸速度過快。

3. 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十六。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，並製作圖十七。



圖十六、不同磁場強度下鐵磁流體形成之錐體比較圖 (研究者自製)



圖十七、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)

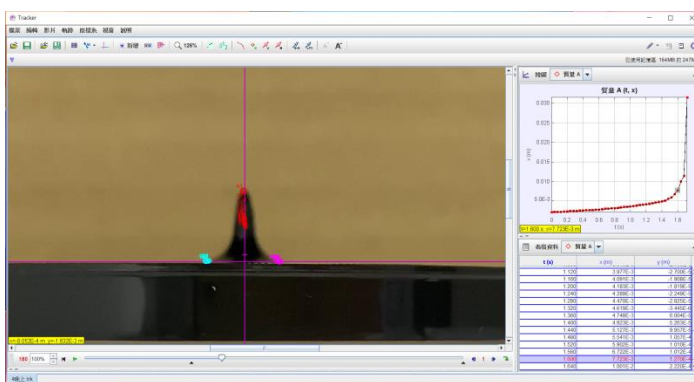
199.92G 磁場下錐體形成快速、上吸速度極快。99.96G 磁場下流體明顯上吸速度較慢，由於磁場強度較弱，錐體產生至脫離液面間形狀較細長。143.08G 無論時間及形狀皆適中。

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，最符合本實驗觀察錐體的目標。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。

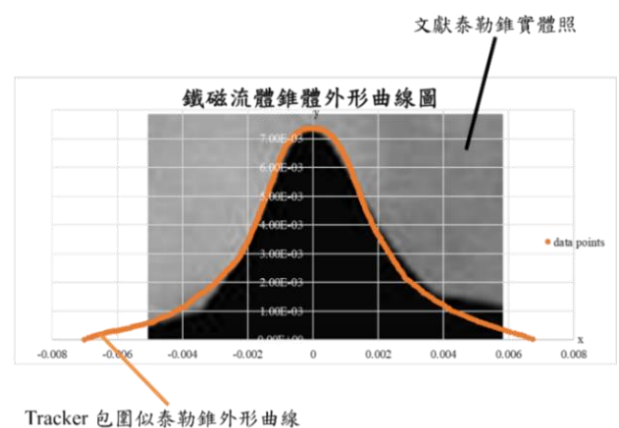
(四)、似泰勒錐數據分析

1. 錐體吻合性

利用觀測鐵磁流體似泰勒錐裝置圖拍攝似泰勒錐形成影片，並將拍攝完成的影片匯入 Tracker 軟體進行分析，設質點包圍錐體繪製出外型曲線，疊加於文獻泰勒錐錐體圖，觀測似泰勒錐與泰勒錐外形吻合性。

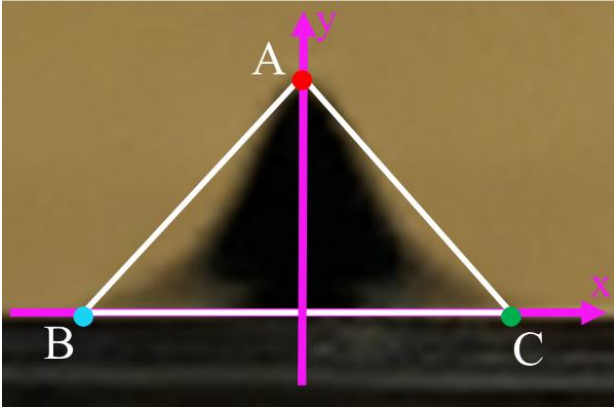


圖十八、匯入 Tracker 分析程式畫面
(研究者自行截圖)

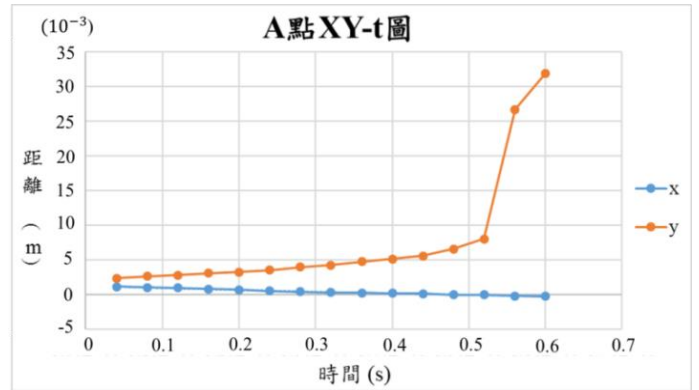


圖十九、似泰勒錐外形圖疊加文獻泰勒錐圖
(研究者自行截圖)

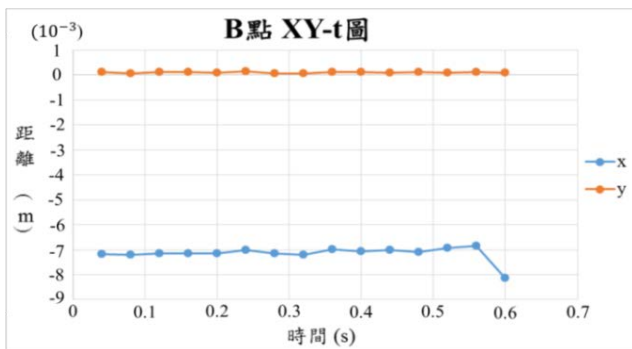
2. 錐體運動分析



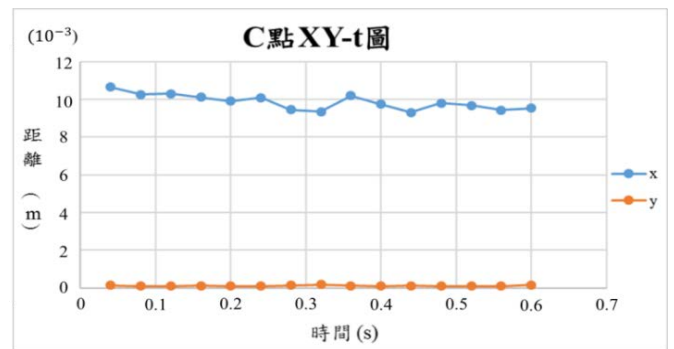
圖二十、Tracker 設質點示意圖 (研究者自製)



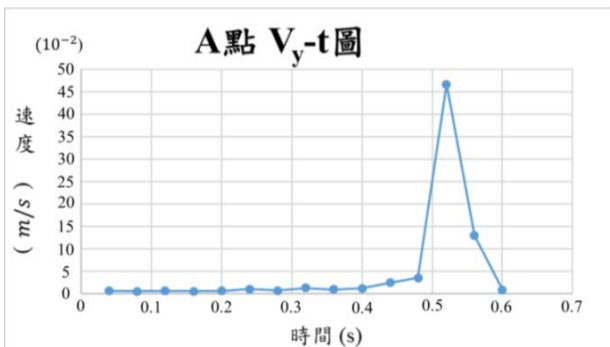
圖二十一、錐體 A 點 XY-t 圖 (研究者自製)



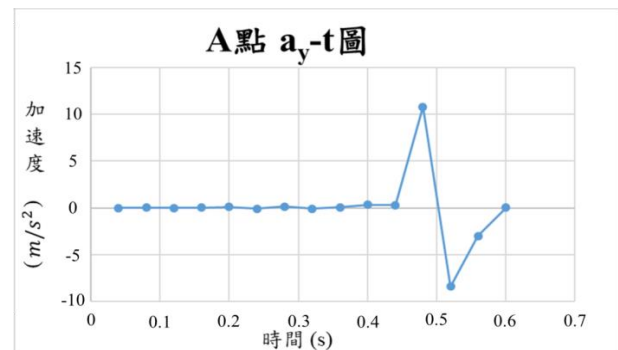
圖二十二、錐體 B 點 XY-t 圖 (研究者自製)



圖二十三、錐體 C 點 XY-t 圖 (研究者自製)



圖二十四、錐體 A 點 Vy-t 圖 (研究者自製)



圖二十五、錐體 A 點 ay-t 圖 (研究者自製)

追蹤 A、B、C 三點運動軌跡，使用 Tracker 求出位置數據後計算出水平、垂直速度與水平、垂直加速度，製作出 XY-t 圖、V-t 圖、a-t 圖觀察錐體運動軌跡。

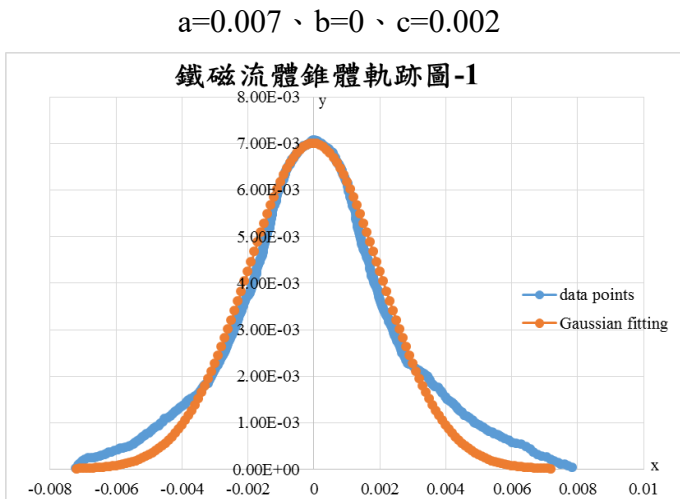
本研究根據 B、C 點與 A 點水平方向 XY-t 圖發現由於兩點為連接液體交點所以幾乎為靜止，其速度與加速度趨近於零。根據 A 點 V-t、a-t 圖皆可

以觀察到當錐體脫離液面時 A 點會急遽加速。

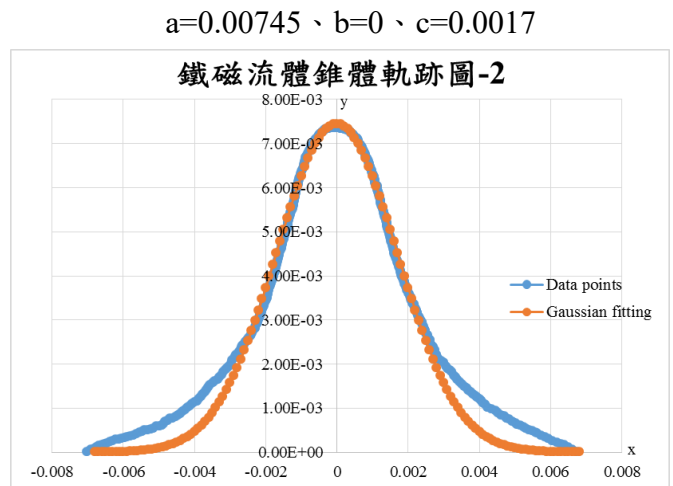
3. 似泰勒錐擬合方程式

我們嘗試去分析此錐體外型，並發現與電磁學領域之高斯函數關係圖非常類似，嘗試將高斯函數作為擬合公式，不斷調整公式中之參數 (a,b,c)調整至耦合實驗值，使調整完之高斯圖形近似於本研究做出的似泰勒錐圖形，本研究認為其耦合程度高，代表可能兩者間有類似的電磁學性質，會在未來加以討論。

$$\text{擬合公式： } f(x) = a \times \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$$



圖二十六、鐵磁流體錐體軌跡圖-1 (研究者自製)



圖二十七、鐵磁流體錐體軌跡圖-2 (研究者自製)

五、討論

透過本研究已具有實驗結果，可以計算鐵磁流體似泰勒錐的速度、加速度，未來希望透過改變電磁鐵電流控制磁場固定住錐體形狀，並通電產生電漿，改善電漿產生裝置後，利用此來克服電漿顯示螢幕面板的限制，並取代汞蒸氣的使用，製作更環保的裝置。

未來將比較文獻中電漿裝置與似泰勒錐的導電度，探討應用可行性。因現有電漿裝

置中放電尖端使用的是形狀固定的銅膠帶，侷限裝置形狀。未來將探討鐵磁流體之導電性，並評估是否可能嘗試透過操縱電磁場控制錐體外形，而利用鐵磁流體取代此放電尖端，以達低汙染可撓曲之特性。

肆、結論與應用

- 一、經由實作經驗加上查閱多種參考資料，認為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，增加了此項計畫的可實驗性。
- 二、本研究指出氨水 pH 值乃為製備鐵磁流體時的關鍵因素，並推測較有效生成出黑色並具有磁性之四氧化三鐵的滴入氨水 pH 值區間位在 11.71 至 12.83 之間。使用上述實驗結果製作出了滴入氨水 pH 值量表。
- 三、為了了解本研究生成產物與文獻差異，以及不同濃度氨水所生成之產物關聯性，對產物使用 SEM 拍攝及 XRD 分析，利用晶面峰值推斷本研究中自行合成出的產物成分中應屬於四氧化三鐵而無三氧化二鐵的生成。由 SEM 結果我們可以觀察到，4mL 產物表面較平滑、粒子較為團聚，此產物在後續實驗中於磁場下的表現較好。
- 四、為了觀察鐵磁流體在磁場下的行為，本研究自製了低成本的磁力感測裝置，以 Arduino 類比霍爾磁力感測模組取代高斯計，樂高取代光學平台架設裝置，且以上器材皆以標準數值進行校正。
- 五、本研究跳脫傳統將磁鐵貼近鐵磁流體底部觀測其樣貌變化，而是將磁鐵放置於鐵磁流體上方，鐵磁流體液面中受到磁場作用最強的一個點會被吸成一錐體，待錐體受磁力吸引至一定高度後，錐體會脫離液面吸附至磁鐵上。由於上述行為產生的錐體類似於靜電紡絲中的泰勒錐，於是將其取名為似泰勒錐。

六、為了觀察改變鐵磁流體製作變因對似泰勒錐上吸反應的影響，進行了多組實驗，並對形成錐體外型及前十滴發射至磁鐵表面之時間進行圖表整理，最終認為在本研究的實驗條件中，鐵磁流體四氧化三鐵粉濃度 0.022g/mL、油酸 10mL、橄欖油 35mL、磁鐵距五層樂高 (磁場強度 143.08G) 時，產生的似泰勒錐為較佳觀察、分析現象。

七、利用 Tracker 軟體設質點包圍似泰勒錐外圍形成曲線與文獻中泰勒錐比對，發現外形吻合。並追蹤錐體運動軌跡，本研究已繪出 XY-t、V-t、a-t 圖分析運動過程。將高斯函數作為擬合公式，調整數值並繪製出近似於本研究之似泰勒錐圖形，擬合方程式為

$$f(x) = 0.007 \times \exp\left(-\frac{(x-0)^2}{2 \times (0.002)^2}\right)。$$

八、基於目前初步實驗結果，本研究提供未來之研究方向如下：可對系統進行更高階的儀器分析，了解製備鐵磁流體之粒徑、粒徑對鐵磁流體性質的影響、產物的含量組成分析等。並可完善似泰勒錐的相關計算，設計出一套簡易計算鐵磁流體相關數據的系統。最後將討論似泰勒錐之導電度，評估是否能將似泰勒錐可塑形的特性應用在電漿上。

伍、參考文獻

一、中國科學技術大學 (無日期)。靜電紡絲——Electrospinning [圖片]。文檔網。

<https://www.wendangwang.com/doc/085c5499376c183543cfe829/7>

二、李德才 (2010)。磁性液體密封理論及應用。科學出版社。

三、杜景順 (2007)。療劑磁性奈米載體之合成-子計畫一。載於行政院國家科學委員會補助專題研究計畫：微/奈米加工之化工技術應用於癌症治療與檢測 (7-24)。國立成功大學化學工程系 (所)。

四、邱姿蓉、黃蕙君 (2014 年 12 月 13 日)。趣味化學玩具：神奇鐵磁流體的玩法與合成。

<http://chemed.chemistry.org.tw/?p=4118>

五、陳立宇 (2019)。磁流體粒子濃度於振動能量收集器發電效率之研究。中原大學機械工程研究所：碩士論文。

六、Alfonso M. Gañán-Calvo & José M. Montanero (2009, June 15). Revision of capillary cone-jet physics: Electrospray and flow focusing. *PHYSICAL REVIEW E* 79, 79(6).

<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.79.066305>

七、Alvaro Ruíz-Baltazar, Gerardo Rosas, Ramiro Pérez and Rodrigo Esparza. (2015, July 09).

Effect of the Surfactant on the Growth and Oxidation of Iron Nanoparticles. *Journal of*

Nanomaterials. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2015/240948/>

八、Protosupplies (無日期)。Linear Hall Effect Sensor Module。

<https://protosupplies.com/product/linear-hall-effect-sensor-module/?fbclid=IwAR1JCfnpRPYk>

WZYNB9vjdgXb3_rHaV4bbGB_4d12a4un2QE3yJvOSqvfZPM

【評語】 160013

此研究以共沉澱法製作氧化鐵顆粒，自製磁力測量裝置，測量磁力，研究計畫設計周全，研究方法有可取之處。數據分析和製圖方式很標準，控因及變因清楚、適當。能有系統地收集數據。理論、實驗及模擬俱全，內容堪稱完整、豐富，分析合宜。與理論模型配合討論，具有物理內涵。說明清晰，表達良好。

自製磁力感測裝置而能測出三維磁力的分佈是一亮點，可再變換參數延伸實驗。對錐體之研究為此工作創新之處，若能再仔細分析，深入探討，例如什麼是發射需要的最小磁力？在將近要發射時或發射中泰勒錐的形狀有何變化？錐角是多少？角度有無最大值等等，將更具應用價值。