

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

佳作

030110

不同轉動座標系統效應對流體中不同質量顆粒
分布狀態研究

學校名稱：新北市立深坑國民中學

作者： 國二 張丞萱	指導老師： 梅期光
---------------	--------------

關鍵詞：轉動坐標系、流體運動、顆粒分布

摘要

本實驗以單轉動系統設計，探討轉動座標系對流體中顆粒大小分布狀態的相對關係。不同質量顆粒與流體分子摩擦碰撞而產生的顆粒分布狀態，以及加上不同旋轉系統對顆粒的相互碰撞而造成分布狀態改變的相互關係與作用。

在一個持續且穩定轉速的旋轉座標系統中，流體中的顆粒會因向心力而沿著圓形曲線軌道形成圓周運動，而若將旋轉系統停止，流體的運動將逐漸趨於靜止，而流體中的顆粒則會產生螺旋軌跡運動慢慢向中心聚攏。

本研究應用旋轉系統的不同與液體性質的差異，發現當我們將液體停止旋轉時，其中的顆粒會產生螺旋軌跡運動慢慢向中心聚攏，進而在圓心形成一個圓，而不同的變因對它從旋轉到聚攏所花費的時間與其軌跡和分布面積都不盡相同。

壹、前言

一、研究動機

在我們的日常生活中，泡茶時常發現杯底有一些茶渣的細碎殘渣，這些茶渣的顆粒大小不一，當我們用湯匙去攪拌杯底有茶渣的茶湯時，會發現杯底的茶渣都會以規律的運動方式朝杯底中心位置集中，最終聚集在杯底中央區域。這其中的原因為何？

經觀察推論原因是否是因為吸水的茶渣比較重、會沉到杯底。當用湯匙攪拌茶湯使茶湯轉動時，杯底轉動的茶湯在往中心軸流過去的時候會帶動茶渣，而茶渣最後都往杯底的中心處集中。

因此才思考到若考量到杯子與茶湯間產生相對轉動情形時，轉動茶杯杯底的茶渣是否與單純靜止茶杯底茶渣所呈現的現象相似？即在旋轉座標系中接近杯底的茶渣會往中心聚集？不同轉速與液體性質對顆粒分布會造成什麼影響？以及液體擺放的位置與轉動坐標系中心的距離不同會對顆粒分布造成什麼影響？

二、研究目的

- (一) 探討顆粒大小（質量、體積）對分布狀態影響
- (二) 探討轉盤轉速（輸入電壓）對顆粒分布影響
- (三) 探討流體的黏滯性大小對顆粒分布影響
- (四) 探討觀測觀測容器位置對顆粒分布影響
- (五) 探討流體深度對顆粒分布影響

三、研究流程

- (一) 環境因素分析、排除：光源（環境、照明）
- (二) 實驗設備校正：
 - 1、Gopro 電池、記憶卡
 - 2、顆粒平均分布
 - 3、轉速穩定
- (三) 不同條件下與顆粒分布的相對關係
 - 1、流體膠水濃度（黏滯性）
 - 2、觀測觀測容器位置
 - 3、流體深度
- (四) 建立模型
- (五) 現象統整
- (六) 規律分析

四、文獻回顧

(一) 圓周運動

在物理學中，**圓周運動**（Circular motion）是指運動軌跡為圓或圓的一部分的一種運動。

圓周運動的例子有：一個軌道為圓的人造衛星的運動、一個電子垂直地進入一個均勻的磁場時所做的運動…等等。

一個質點的圓周運動可以按軌道的切線和垂直軌道的法線這兩個方向來分解。

質點的加速度在切向的分量稱為切線加速度。切線加速度改變質點沿軌道運動的線速度的大小，不改變方向。加速度在法線的分量成為法線加速度。由於在圓周運動中，法線加速度始終指向圓心，所以此加速度又稱向心加速度。向心加速度改變質點速度的方向，不改變大小。

切線加速度大小為零的運動稱為**等速率圓周運動**。

(二) 向心力

向心力是當物體沿着圓周或者曲線軌道運動時，指向圓心（曲率中心）的合外力作用力。「向心力」一詞是從這種合外力作用所產生的效果而命名的。這種效果可以由彈力、重力、摩擦力等任何一力而產生，也可以由幾個力的合力或其分力提供。

因為圓周運動屬於曲線運動，在做圓周運動中的物體也同時會受到與其速度方向不同的合外力作用。對於在做圓周運動的物體，向心力是一種拉力，其方向隨著物體在圓周軌道上的運動而不停改變。此拉力沿着圓周半徑指向圓周的中心，所以得名「向心力」。向心力指向圓周中心，且被向心力所控制的物體是沿着切線的方向運動，所以向心力必與受控物體的運動方向垂直，僅產生速度法線方向上的加速度。因此向心力只改變所控物體的運動方向，而不改變運動的速率，即使在非勻速圓周運動中也是如此。非勻速圓周運動中，改變運動速率的切向加速度並非由向心力產生。

(三) 二次流

流體力學中，二次流的概念如下定義：假如沿一邊界的流動因受到橫向壓力的作用，產生了平行於邊界的偏移，則靠近邊界的流體層由於速度較小，就比離邊界較遠的流體層偏移得厲害，這就導致了疊加於主流之上的二次流。

二次流指產生了平行於邊界的偏移，是疊加於主流之上的水流。一種流動(主流)引起的另一種性質不同的流動。例如管流中與主流軸線方向垂直的截面中的流動就是二次流；其他流動如分離流、旋渦等，也會引起相應的二次流。

二次流現象舉例：

在天然河道中，在彎道處，由於二次流而使河底處水流所攜帶的沙子、礫石等從彎段的外側移走，而在彎段的內側堆積起來，結果造成河道的外側被掏深而內側則變淺。這種情形與外側更大流速水流的沖刷相結合，就使彎段的彎曲程度越來越顯著。所以，只要可能，河道總是彎彎曲曲的（蜿蜒曲折）。

另一個二次流的例子發生在旋轉圓筒底部的流動中。靠近底部的流體層因其流速小，離心力較圓筒中心處的小，因而引起底部流向向內。日常觀察到的小顆粒向觀測容器底部中心區集中並堆積的現象，就可以用這裡談到的底部流動予以解釋。

此外，溫差產生的自然對流在水平管內形成徑向流動，也是二次流的一個例子。

（四）黏度

黏度（Viscosity），是黏性的程度，是材料的首要功能，也稱動力黏度、黏（滯）性係數、內摩擦係數。

黏度的國際單位制是帕斯卡·秒〔Pa·s〕，mPa·s 是指 mini-Pa·s，也就是 1/1000Pa·s 的意思。

不同物質的黏度不同，例如在室溫（25°C）及常壓（1 巴，巴符號為：bar）下，空氣的黏度為 18.5 μ Pa·s，大約比在相同溫度下的水黏度小 50 倍。在常溫（20°C）常壓下，汽油的黏度為 0.65mPa·s，水為 1mPa·s，血液（37°C）為 4~15mPa·s，橄欖油為 10²mPa·s，蓖麻油為 10³mPa·s，蜂蜜為 10⁴mPa·s，焦油為 10⁶mPa·s，瀝青為 10⁸mPa·s，等等。最普通的液體黏度大致在 1~1000mPa·s，氣體的黏度大致在 1~10 μ Pa·s。一些像黃油或人造黃油的脂肪很黏，更像軟的固體，而不是流動液體。黏度較高的物質，比較不容易流動；而黏度較低的物質，比較容易流動。例如油的黏度較高，因此不容易流動；而水黏度較低，不但容易流動，倒水時還會出現水花，倒油時就不會出現類似的現象。

（五）黏滯力

黏滯力是流體受到剪應力變形或拉伸應力時所產生的阻力。在日常生活方面，黏滯像是「黏稠度」或「流體內的摩擦力」。因此，水是「稀薄」的，具有較低的黏滯力，而蜂蜜是「濃稠」的，具有較高的黏滯力。

簡單地說，黏滯力越低（黏滯係數低）的流體，流動性越佳。

黏滯力是黏性液體內部的一種流動阻力，並可能被認為是流體自身的摩擦。黏滯力主要來自分子間相互的吸引力。例如，高黏度酸性熔岩產生的火山通常為高而陡峭的錐狀火山，因為其熔岩濃稠，在其冷卻之前無法流至遠距離因而不斷向上累加；而黏滯力低的鎂鐵質熔岩將建立一個大規模、淺傾的盾狀火山。所有真正的流體（除超流體）有一定的抗壓力，因此有黏性。沒有阻力對抗剪切應力的流體被稱為理想流體或無黏流體。

（六）科氏力

在旋轉座標系（rotating reference frame）中，科氏力是使得物體偏移其運動方向的力，它使得在旋轉座標系上的觀察者，看到路徑呈弧線彎曲。如同離心力（centrifugal force），科氏力是假想力的一種，但作用方向與離心力不同。離心力作用方向沿著圓周運動的半徑向外，科氏力是垂直於運動方向跟轉動軸方向（兩者外積之負方向）。

（七）等加速運動

等加速運動為物理學上的運動型態之一，等加速運動有兩個特性：運動軌跡為直線、加速度為定值。我們知道加速度為一向量，向量相等的條件為方向及大小都相同，所以等加速度運動亦即加速度之方向與大小皆不隨時間改變之運動。

貳、研究設備及器材

一、研究設備擺

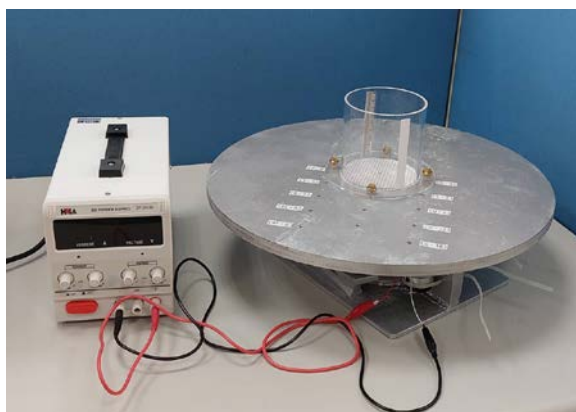


圖 1、設備器材配置

二、研究器材

設備裝置名稱	相關器材名稱	用途與功能
實驗觀察設備配置	1.直徑 43cm 木質旋轉盤	安裝觀測壓克力觀測容器
	2.馬達	轉動木質旋轉盤
	3.DP-6005S (6V) 直流電源供應器	提供電源
	4.HERO 9 GoPro	錄影紀錄
	5.手機	錄影紀錄與資料傳輸
觀測容器配置	1.壓克力杯	盛裝觀測液體樣本
	2.固定螺絲/固定起子	固定壓克力杯觀測觀測容器
風選裝置	1.自製風選裝置	實驗茶渣顆粒選樣
	2.風扇	產生穩定氣流壓力
	3.鹽罐	均勻播撒茶渣顆粒
	4.隙縫刷	收集茶渣
黏滯性測試裝置	1.量筒	盛裝水與膠水溶液觀測 BB 彈運動
	2.BB 彈	均圓球體觀測樣本
	3.鑷子	夾住 BB 彈
	4.膠水	黏滯性檢測樣本
	5.水	黏滯性檢測樣本
	6.鐵尺	距離測量
	7.碼表	測離時間
茶渣樣本製作裝置	1.茶渣	觀測樣本
	2.研磨鉢	研磨茶渣取得差渣
	3.雙頭藥匙	取用固定量茶渣
	4.塑膠杯 x4	盛裝水與不同黏滯性膠水
	5.自製攪拌棒	調整壓克力觀測觀測容器底部茶渣均勻分布

參、研究過程或方法

一、實驗器材製備

(一) 旋轉系統製作

1. 旋轉盤

- (1) 將旋轉盤底座裝上固定基座。
- (2) 將馬達安裝於基座上。
- (3) 在旋轉盤上鑽孔，與圓心的距離分別為(0.0)、(0.4)、(0.8)、(0.12)、(0.16)，互相間距 4cm。



圖 2、馬達安裝

2. 轉速控制

- (1) 直流電源供應器，本次所有實驗轉速方面統一調整為電源供應器提供電壓為 6V。
- (2) 固定旋轉 20 秒後關閉電源供應器。

3. 觀測紀錄裝置

- (1) 將訂製觀測容器底部加裝灰階方格紙，下方再安裝白紙護背，避免影響觀測。
- (2) 將白紙底部依照觀測容器邊緣的四個孔分別穿孔。
- (3) 利用螺絲將觀測容器依實驗條件固定於旋轉盤上對應的孔。
- (4) 在觀測容器上方裝上 GoPro 固定器，將 GoPro 鏡頭安裝於開孔上。

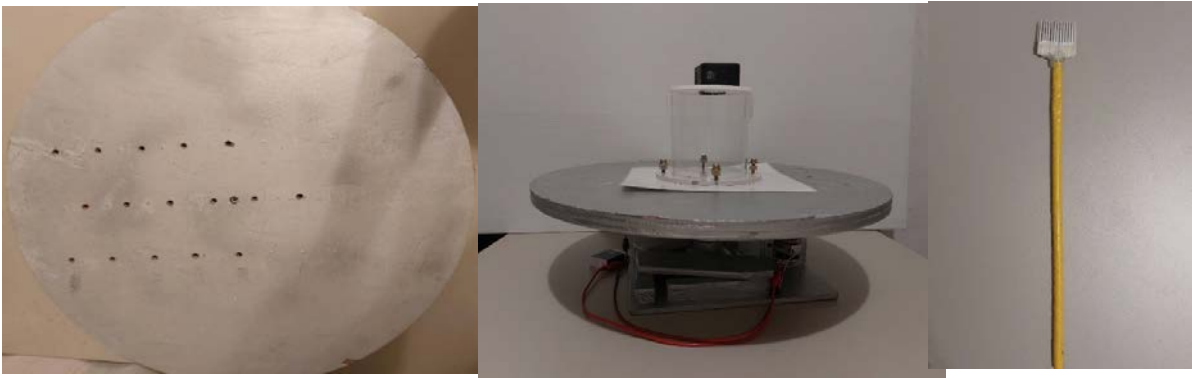


圖 3、轉盤鑽孔圖 4、整體安裝圖 5、攪拌棒

(二) 樣本顆粒大小取樣方式：

1. 利用風選（又稱氣流分選），如圖 5。基於固體顆粒在空氣氣流作用下，密度大的沉降末速度大，運動距離比較近；密度小的沉降末速度小，運動距離比較遠的原理來篩選茶渣。
2. 準備足量的茶渣，用研磨鉢磨成碎渣並裝入鹽罐。

- 3.利用塑膠瓦楞紙製作顆粒大小取樣裝置，總共分為六格。
- 4.安置電風扇於裝置旁，開啟後將鹽罐中的茶渣撒下。
- 5.取最後三格，由近到遠顆粒分為大、中、小，將最後三格選取混合均勻。
- 6.利用雙頭藥匙上較小的一方選取一平匙的茶渣調配溶液。
- 7.用自製攪拌棒將溶液中的茶渣顆粒分布均勻。
- 8.先將茶渣泡於水中析出顏色，在換水時依條件不同加入水量即可。



圖 6、顆粒大小取樣裝置



圖 7、茶葉顆粒分布圖（由左至右顆粒分別為大到小，取最後三格為實驗測定茶葉）

（三）觀測流體配置：

1. 溶液依膠水濃度分為四組分別為純水、20%、40%、60%。
2. 水量則依流體在溶液中的液面高度分為 6cm(430ml)、4cm(280ml)、2cm (140ml)。
3. 在調配溶液實則四組各調配 430ml：
 - (1) 膠水濃度 20%：86ml 膠水、344ml 水

- (2) 膠水濃度 40%：172ml 膠水、258ml 水
- (3) 膠水濃度 60%：258ml 膠水、172ml 水
- 4. 依水面高度調整溶液量即可。

二、實驗流程

(一) 實驗設備校正

1. 將 GoPro 設定為慢速攝影，連接至手機應用程式 GoPro Quik 上，即可遠程操控 GoPro。
2. 確認環境沒有會影響錄影，或者會造成水面反光的物體或者光源。
3. 確認 GoPro 電量以及電池狀態。
4. 調整電源供應器電壓為 6V，並確認是否能穩定運轉。
5. 備妥 4 杯調配完成的溶液。

(二) 流體黏滯性測定

1. 依據等加速度運動關係：

利用等加速度運動公式進行液體黏滯性的測定與比較。實驗測定觀測容器全長為 18cm，18cm 也就是位移量 S ，我們利用「 $S = v_0 \cdot t + 1/2 \cdot a \cdot t^2$ 」的等加速度公式推導出流體黏滯性測定的實際數據。

設 $v_0 = 0$ ，即可得出「 $S = 1/2 \cdot a \cdot t^2$ 」的公式。

我們需要將液體配置為待測定溶液的濃度（濃度為純水、膠水 20%、40%、60%）。

將觀測容器裝滿待測定液體後用鑷子夾取一顆 BB 彈放入水平面之下，按下計時器紀錄 BB 彈由水面製觀測容器底部所花費的時間。

根據等加速度運動公式在 $v_0 = 0$ 後得的出的公式「 $S = 1/2 \cdot a \cdot t^2$ 」可得知「 $a = 2S/t^2$ 」，現在我們只需得知位移量及時間即可算出不同濃度的溶液加速度之間的關係。

2. 實驗結果：

1. 水： $S = 18\text{cm}$ ， $t = 0.82\text{ s}$ ，帶入公式 $a = 2S/t^2 \rightarrow a \doteq 53.5\text{cm/s}^2$
2. 膠水濃度 20%： $S = 18\text{cm}$ ， $t = 6.36\text{ s}$ ，帶入公式 $a = 2S/t^2 \rightarrow a \doteq 0.89\text{cm/s}^2$



圖 8、量筒

3. 膠水濃度 40% : $S = 18\text{cm}$, $t = 11.76\text{ s}$, 帶入公式 $a = 2 S / t^2$ $a = 0.26\text{cm/s}^2$

4. 膠水濃度 60% : $S = 18\text{cm}$, $t = 18.11\text{ s}$, 帶入公式 $a = 2 S / t^2$ $a = 0.11\text{cm/s}^2$

根據實驗結果可知流體黏滯性越大，加速度越小；流體黏滯性越小，加速度越大。

(三) 實驗流程

1. 將觀測容器內倒入實驗溶液，並用攪拌棒將其平均分布。
2. 將觀測容器外側四個孔鎖上螺絲於轉盤上實驗所需的孔上。
3. 將觀測容器上方安裝固定器，並在固定器上安裝 GoPro。
4. 將 GoPro 連接手機，並調整為慢速錄影。
5. 將電源供應器確實連接，並將電壓調整為 6 V。
6. 用手機操控 GoPro 開始錄影，並開啟電源供應器使轉盤開始旋轉。
7. 旋轉 20 秒關閉電源供應器，在 1 分鐘時結束錄影（顆粒大至停止）。

(四) 實驗分析

1. 利用 ImageJ 圖像分析軟體分析最後靜止狀態的顆粒分布面積進行比較。
2. 在影片中擷取 5 張圖利用 ImageJ 形成灰階值的圖像，顆粒對比鮮明，進行各時刻顆粒分布位置比較，在以原始圖像作為輔助。

三、實驗分類:

(一) 【實驗一】：流體黏滯性對顆粒分布影響

流體中膠水濃度：0%、10%、20%、30%

(二) 【實驗二】：觀測觀測容器位置對顆粒分布影響

觀測容器位置座標：

1. 原點：(0.0)
2. 4cm 間距：(0.4), (0.8), (0.12), (0.16)

(三) 【實驗三】：流體深度對顆粒分布影響

流體深度：2cm、4cm、6cm

四、實驗次序

實驗次序	膠水濃度	觀測觀測容器位置	流體深度	實驗結果： 實驗影片檔 60組
1.	0 %純水	(0.0) , (0.4) , (0.8) , (0.12) , (0.16)	2 cm 、 4 cm 、 6 cm	15
2.	20 %膠水	(0.0) , (0.4) , (0.8) , (0.12) , (0.16)	2 cm 、 4 cm 、 6 cm	15
3.	40 %膠水	(0.0) , (0.4) , (0.8) , (0.12) , (0.16)	2 cm 、 4 cm 、 6 cm	15
4	60 %膠水	(0.0) , (0.4) , (0.8) , (0.12) , (0.16)	2 cm 、 4 cm 、 6 cm	15

肆、實驗結果與討論

一、【實驗一】：流體黏滯性對顆粒分布所造成的影響

(一) 變因

操縱變因	控制變因	應變變因
膠水濃度	電壓 6 V 觀測容器位置 流體深度(水量) 顆粒大小	1. 顆粒分布所占面積 2. 開始、過程、結束，顆粒運動軌跡

(二) 不同黏滯性對顆粒分布狀態比較

1. 控制變因：觀測觀測容器位置 (0.0) 、流體深度 6 cm
2. 操縱變因：膠水濃度 0 % 、 20 % 、 40 % 、 60 %

(1) 分布狀態比較（灰階圖）：

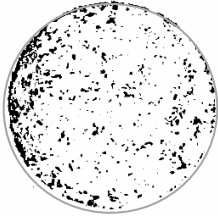


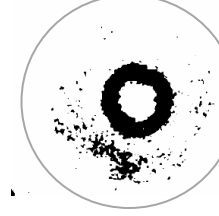
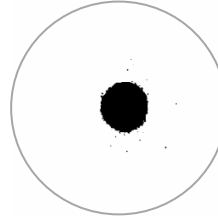

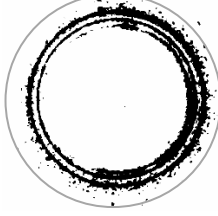

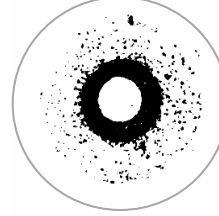
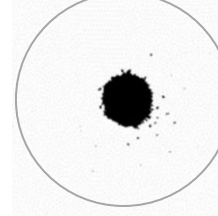
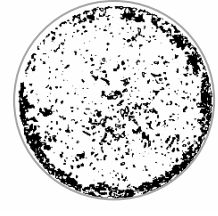
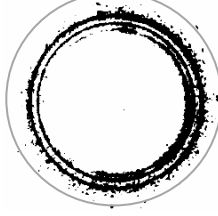

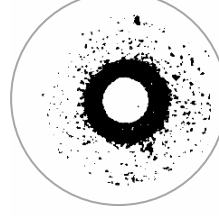
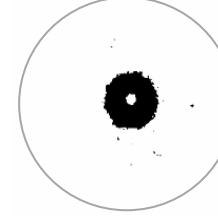




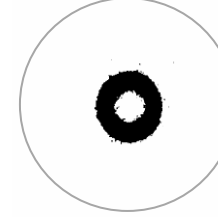

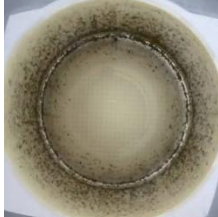
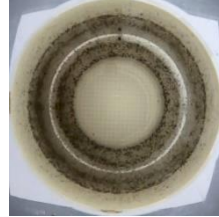

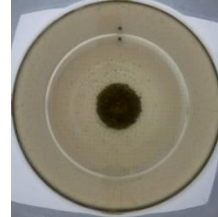





膠水 濃度	初始狀態	旋轉過程中	斷 電	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態
0 %						
20 %						
40 %						
60 %						
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖9(a)、不同濃度的茶葉分布圖（灰階值）

(2) 分布狀態比較（實際圖檔）：

膠水 濃度	初始狀態	旋轉過程中	斷 電	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態
0 %						
20 %						

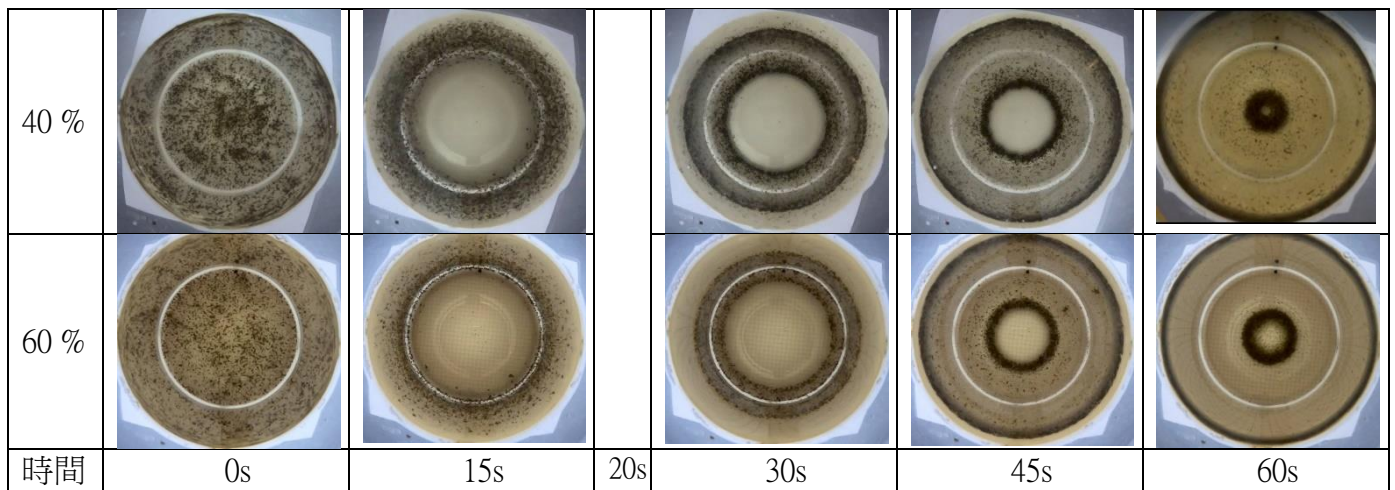


圖9(b)、不同濃度的茶葉分布圖（實際圖檔）

由上述圖表可知，因為在45 s時，純水向中心聚攏的趨勢，相較於其他膠水濃度較大者的狀態，純水中的茶渣正在聚攏時的分布較靠近圓心，因此即可得知在黏滯性越低的情況下，因為流體的流暢度較佳，在旋轉時聚攏於圓心所花費的時常較短，較容易快速的聚集於圓心。

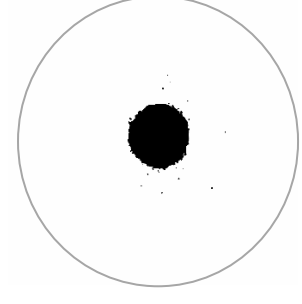
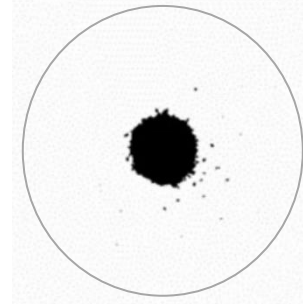
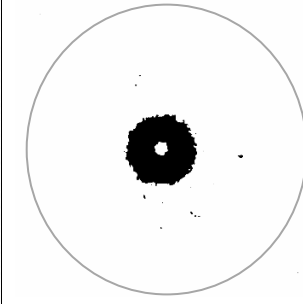
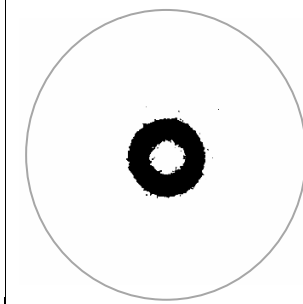
比較最後幾張圖可得知膠水濃度越低，越容易帶動顆粒聚攏於圓心，排列結構也越緊密；膠水濃度越高，在帶動的過程受到較大的阻力，容易在聚集於圓心的過程中半途停止，不足已將顆粒帶動於圓心，導致最後呈現出空心圓的狀態。

(3) 顆粒分布面積

表 1、不同濃度時的顆粒面積與圓度：

膠水濃度	總面積 Total Area 單位：ImageJ (pexil)	所占面積百分比 %Area	圓度 Circ.
0 %	33653	3.749	0.919
20 %	35679	4.056	0.906
40 %	37096	4.537	0.895
60 %	70881	5.798	0.841

表 2、不同濃度時的顆粒面積與圓度（灰階值分析圖檔）：

			
水	膠水濃度 20 %	膠水濃度 40 %	膠水濃度 60 %

由上述圖表可得知，茶渣殘渣在不同濃度的膠水流體中，最後靜止的分布狀態。在流體中膠水濃度越低，所占總面積就越小，在顆粒數量相同時可得知，顆粒聚集及堆疊狀態越密集；膠水濃度越高，所占總面積就越大，在顆粒數量相同時可得知，顆粒聚集及堆疊狀態結構上並不緊密，較為分散，且因為流體的性質濃度不同，最後帶動顆粒聚攏於圓心所形成的圖像也不盡相同。

因為密集程度的不同，也造成了所占面積百分比之間的差異。膠水濃度越高，所占面積的百分比就越大；膠水濃度越小，則所占面積百分比越小。

圓度則會因為流體帶動顆粒聚攏於圓心的效果，最後形成的分布狀態是否接近理論圓而形成的差異。由上述圖表可得知最終顆粒分布狀態的圓度會受到流體黏滯性影響，流體黏滯性越低、流動越流暢，在其餘條件相同的情況之下，會越接近理論圓，圓度會越大；反之，黏滯性越高，則越不接近理論圓，圓度越小。

二、【實驗二】：觀測觀測容器位置對顆粒分布影響

（一）變因

操縱變因	控制變因	應變變因
觀測觀測容器位置	電壓 6 V 膠水濃度 流體深度(水量) 顆粒大小	1. 顆粒分布所占面積 2. 開始、過程、結束，顆粒運動軌跡

(二) 不同觀測觀測容器位置對顆粒分布狀態比較

1. 控制變因：膠水濃度 0%，流體深度 6 cm，

2. 操縱變因：觀測容器位置座標

原點：(0,0)

4 cm 間距：(0.4), (0.8), (0.12), (0.16)

(1) 分布狀態比較 (灰階值)：

觀測 容器 位置	初始狀態	旋轉過程中	斷電	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態
(0,0)			斷電			
(0,4)						
(0,8)						
(0,12)						
(0,16)						
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖10(a)、不同觀測容器位置的茶葉分布圖 (灰階值)

(2) 分布狀態比較（實際圖檔）：

觀測 容器 位置	初始狀態	旋轉過程中	斷電 後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態	
(0,0)						
(0,4)						
(0,8)						
(0,12)						
(0,16)						
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖10(b)、不同觀測容器位置的茶葉分布圖（實際圖檔）

由上述圖表可得知，在旋轉盤斷電後10秒後，觀測容器擺放在不同位置的顆粒分布各個大相逕庭，尤其是觀測容器位置位於(0,0)座標的實驗與其餘者相差最大，在圓心上的觀測容器會在觀測容器中心的中心軸固定旋轉，較不容易受到旋轉盤旋轉時離心力的影響，而在靠近旋轉盤外圍者則會形成2~3個顆粒聚集點，最後在旋轉盤慢慢靜止轉動後匯集成一個點，聚攏於圓心。

而其餘觀測容器不在圓心者的顆粒則會因為流體在杯中隨著旋轉盤旋轉，旋轉時的離心力造成水面形成一個傾斜的角度，以及流體本身跟著旋轉盤旋轉，因此流體在旋轉盤趨於靜止時隨著旋轉盤轉動以及慢慢停止的狀態造成了上述圖表內顆粒在30s所形成的狀態。

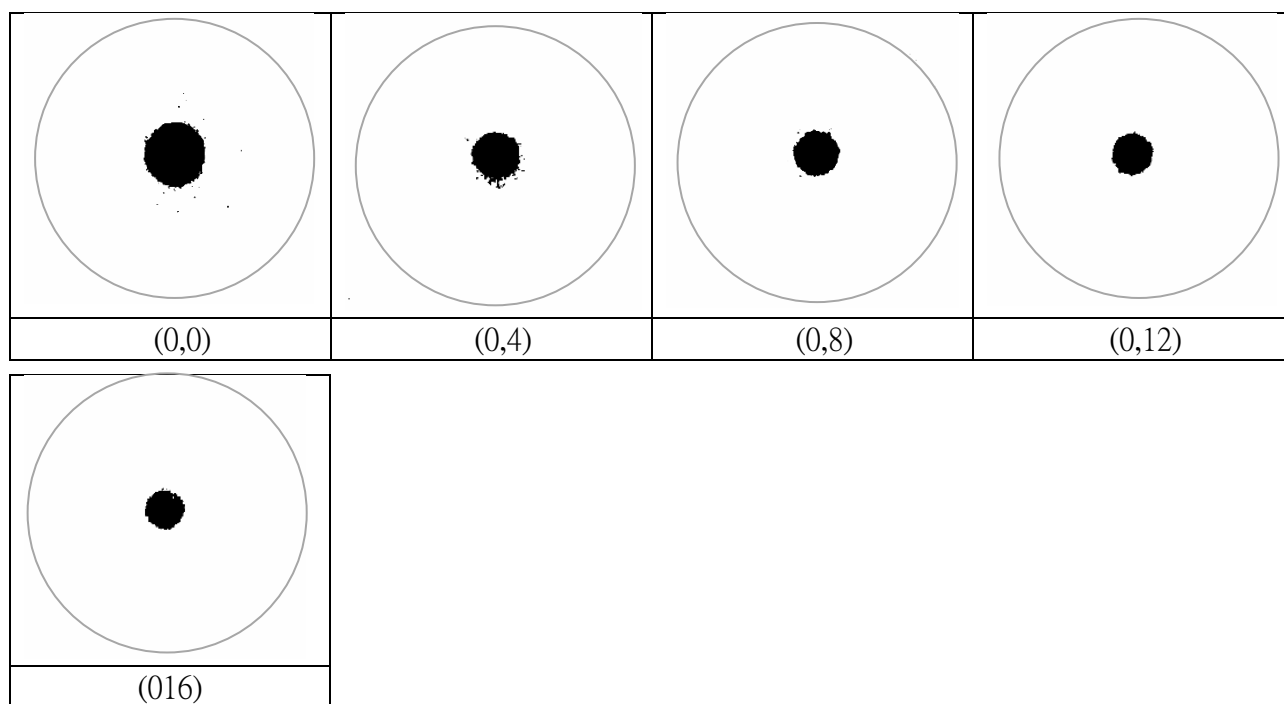
並且利用最後一張圖做比較，能夠發現越靠近旋轉盤外圍者顆粒聚集狀態越密集。

(3) 顆粒分布面積

表 3、不同觀測容器位置時的顆粒面積與圓度：

觀測容器位置	總面積 Total Area 單位：ImageJ (pexil)	所占面積百分比 %Area	圓度 Circ.
(0,0)	33653	3.749	0.919
(0,4)	25014	2.149	0.898
(0,8)	21843	1.876	0.879
(0,12)	18383	1.579	0.831
(0,16)	17170	1.475	0.722

表 4、不同觀測容器位置時的顆粒面積與圓度（灰階值分析圖檔）：



由上述圖表可得知，在數量欄位上，越靠近旋轉盤外圍者，顆粒聚集狀態越密集，較少分散在外的顆粒，總面積也越少。

顆粒所占百分比的面積則同顆粒所占總面積，因位置不同，所以受力不同，觀測容器位置越靠外圍，所占面積百分比則越小，越靠近圓心則反之。

顆粒最後所形成的靜止狀態分布的圓度則會因觀測容器位置越靠近旋轉盤邊緣而圓度越小。

三、【實驗三】：流體深度對顆粒分布影響

(一) 變因

操縱變因	控制變因	應變變因
流體深度（水量）	電壓 6 V 膠水濃度 觀測觀測容器位置 顆粒大小	1. 顆粒分布所占面積 2. 開始、過程、結束，顆粒運動軌跡

(二) 不同流體深度對顆粒分布狀態比較

1. 控制變因：膠水濃度0%、觀測觀測容器位置（0,0）

2. 操縱變因：流體深度（水量）6 cm（430 ml）、4 cm（280 ml）、2 cm（140 ml）

(1) 分布狀態比較（灰階值）：

流體深度	初始狀態	旋轉過程中	斷電	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態
6 cm						
4 cm						

2 cm						
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖11(a)、不同流體深度的茶葉分布圖（灰階值）

(2)分布狀態比較（實際圖檔）：

流體深度	初始狀態	旋轉過程中	斷電	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中 顆粒逐漸停止	靜止狀態
6 cm			斷電			
4 cm						
2 cm						
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖11(b)、不同流體深度的茶葉分布圖（實際圖檔）

由上述圖表可得知，在相同轉動座標系統中，因為受力相同，力所需要帶動的水量不同，水量越多，在同樣秒數時進行觀察，水深越淺顆粒聚集於圓心所花費的時間就會越短，小於水量較多所花費的時間，且最後靜止狀態的面積就會越小；水深較深則聚集於圓心的時間較長，最後的圓面積也較大。

例如：在膠水濃度同為 20 %時，在同樣秒數為 27 s時聚集於圓心過程的狀態即可看出：水量越少，圓的涵蓋範圍面積就越小；水量越多圓所涵蓋的範圍就越大。

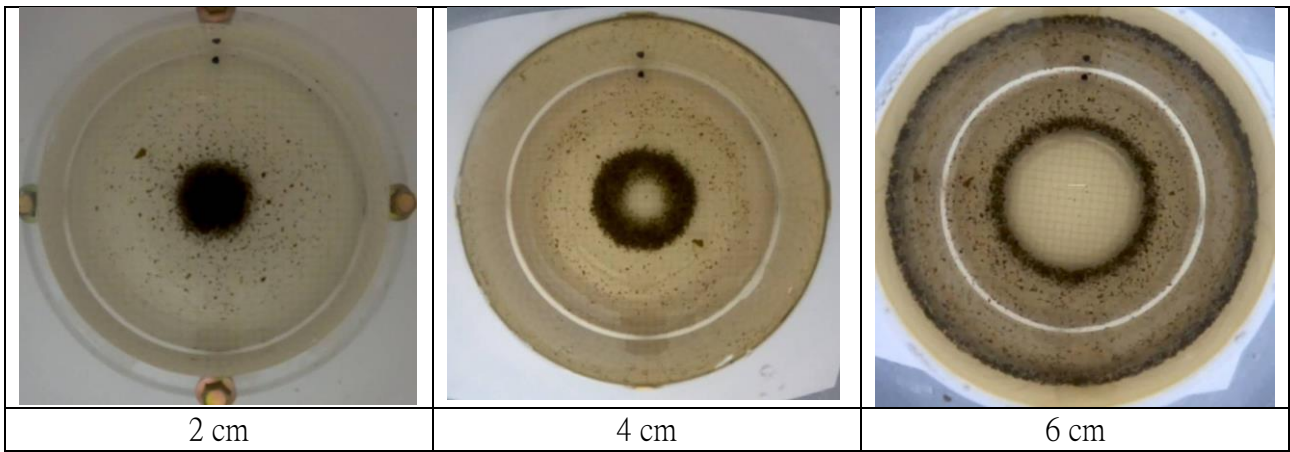


圖12、在膠水濃度為20 %時，同為27 s所呈現的影像，可以得知水深越深圓的涵蓋面積就越大。

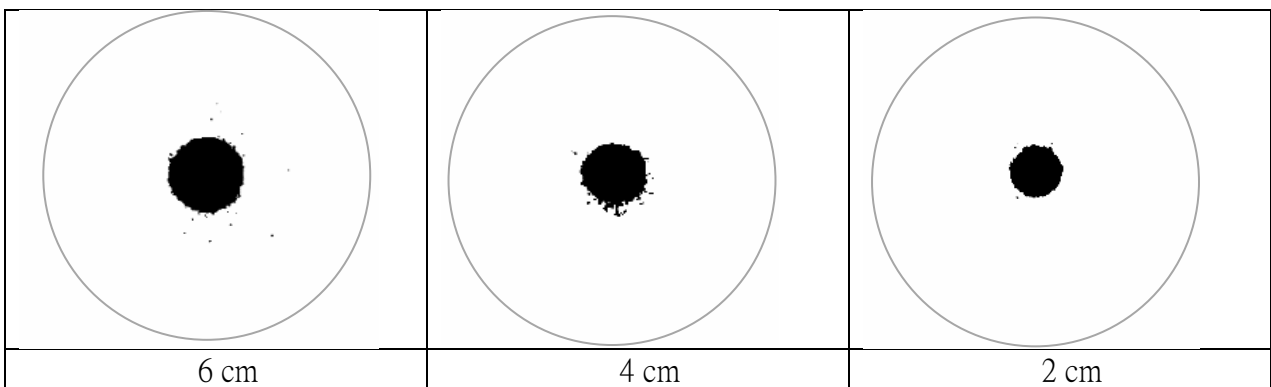
在 30 s時圖片所呈現的狀態同樣可得知，顆粒聚集是隨著流體深度的減少而越靠近圓心，在 2 cm時顆粒茶渣顆粒分布範圍小於其餘兩者，也更靠近圓心，則在相同轉動坐標系中，水量越多，花費時間就會較短，聚集於圓心的面積就會較大；水量較少，聚集於圓心的面積就會較小。

(3) 顆粒分布面積

表 5、不同流體深度時的顆粒面積與圓度：

觀測容器位置	總面積 Total Area 單位：ImageJ (pixel)	所占面積百分比 %Area	圓度 Circ.
6 cm	33653	3.749	0.919
4 cm	25014	2.649	0.923
2 cm	24773	2.163	0.929

表 6、不同流體深度時的顆粒面積與圓度（灰階值分析圖檔）：



由上述圖表可得知，流體深度較淺，水量較少，力就越容易帶動顆粒進行集中，最終分散在外的顆粒就會越少，總面積也同樣會越小。

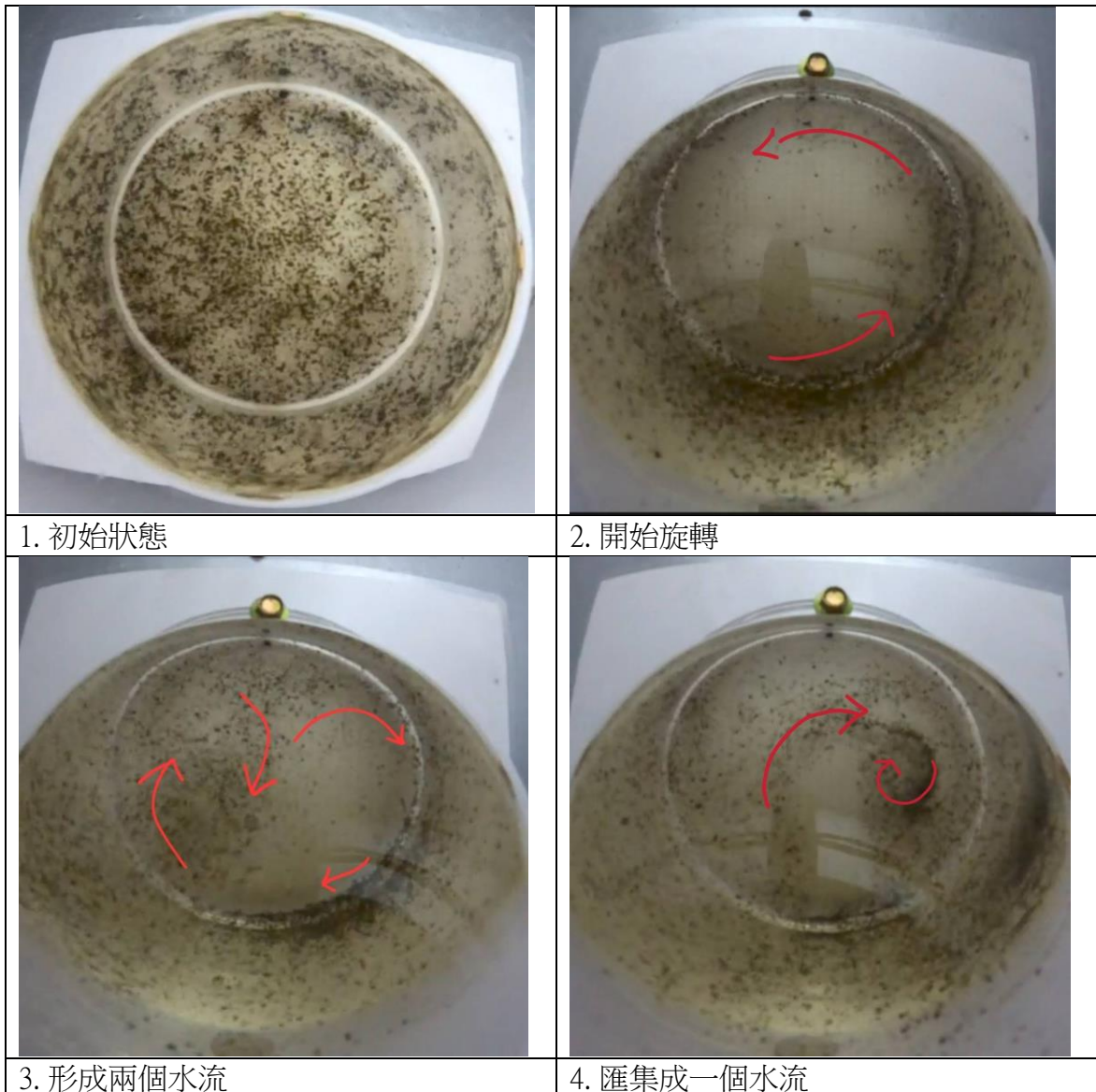
在所佔面積百分比中我們可以發現，水深度越深，所佔百分比面積就越大；水深越淺，所佔面積百分比就越小。

圓度則代表流體帶動顆粒聚攏於圓心的效果，最後形成的分布狀態是否接近理論圓而形成的差異，由圖表中可發現，深度越深，圓度越圓。

四、分析流體轉動過程

每3秒截一張圖記錄顆粒旋轉過程，觀察在觀測容器位置不在圓心時的轉動狀態，以及轉動時的過程。

1. 流體放置位置為 (0,16) 6 cm 水 分解影格：





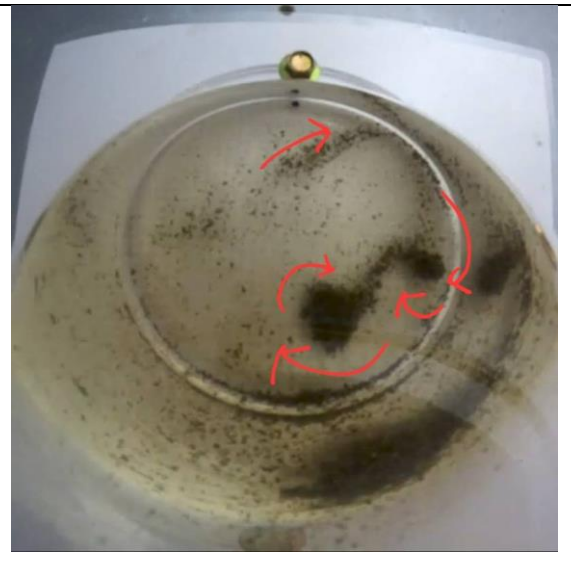
5. 水流顆粒集中



6. 水流隨著轉動逐漸形成兩個顆粒集中區



7. 形成兩個顆粒集中區



8. 兩個顆粒集中區有即將融合的趨勢



9. 隨著斷電後轉盤逐漸停止顆粒也聚集在了一起，在中心轉動



10. 顆粒聚集到了中心旋轉

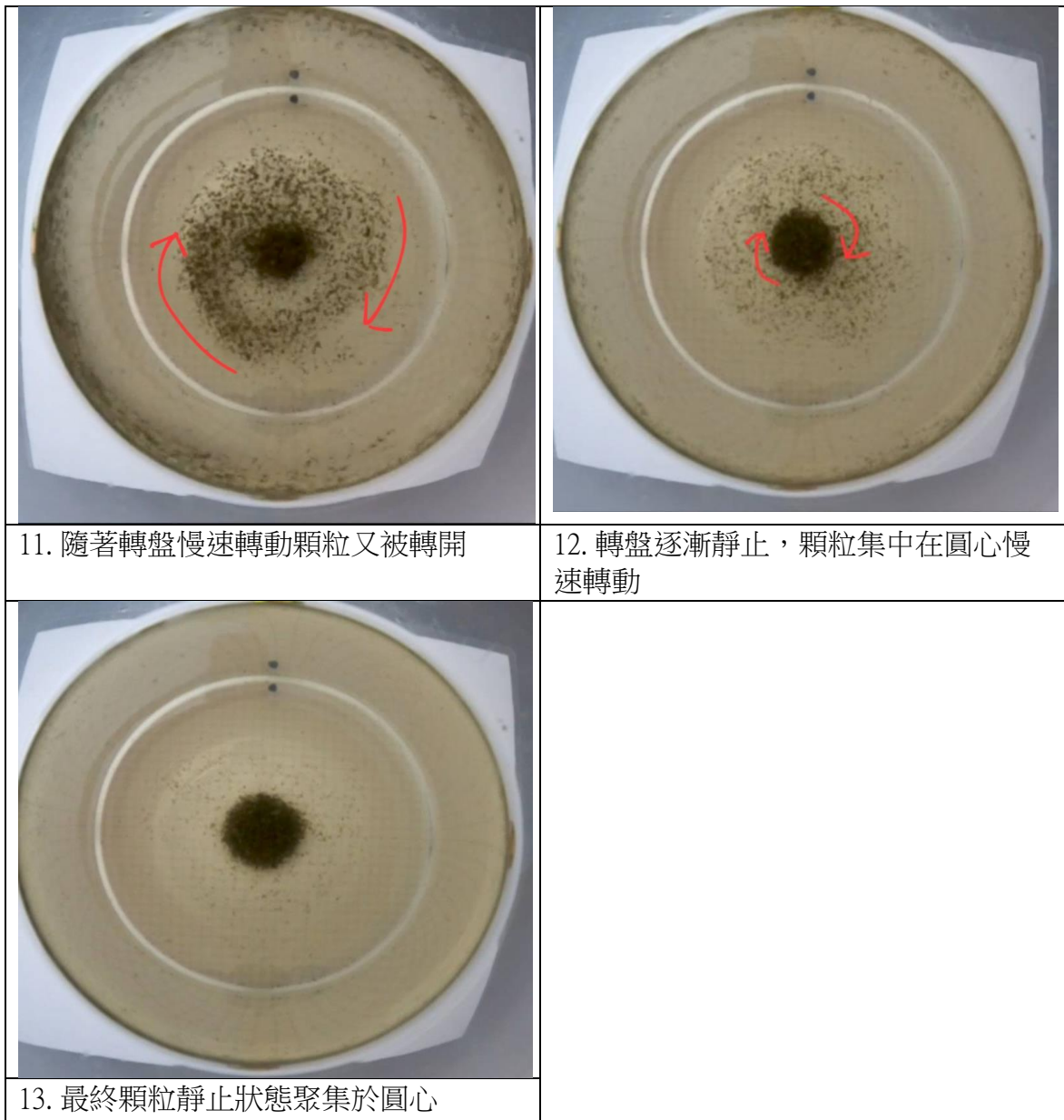


圖13、流體放置位置為 (0,16) 6 cm 水的分解影格

綜上述圖表中顆粒旋轉時的狀態軌跡可得知，流體隨著轉盤快速轉動時向外甩出所造成狀態導致最初開始旋轉的狀態為顆粒大部分分布在靠轉盤外側的杯底邊緣，與放置在圓心的觀測容器不同，它並非均勻分布在杯底邊緣。

接著流體就開始產生較為混亂的流動，流體隨著轉盤旋轉，從第一種兩個水流相互擠壓融合形成一個水流，再隨著轉盤轉動、向外甩出，形成兩個顆粒集中區。

將轉盤斷電後，轉盤開始進入慢速轉動、逐漸停止的狀態，在轉盤轉動沒有那麼劇烈的狀態下，兩個顆粒集中區隨著轉動逐漸聚合在一起，分布在外圍的細小顆粒又隨著轉盤的慢速轉動被甩出，形成一個橢圓形的狀態。

最後轉盤不再轉動，顆粒圍繞在杯底中心作中心軸轉動，最後聚集在圓心，最後的結果因為轉盤停止轉動，在這個外力消失後，結果仍然是聚集在圓心。

由此可知，觀測觀測容器放置位置無論放在哪裡，最終都會聚集在圓心，不受其位置改並影響，會受到影響的是分布面積與其形狀。

伍、結論

一、【實驗一】：流體黏滯性對顆粒分布所造成的影響

（一）水與黏滯性液體比較：

1. 純水的流動軌跡較為順暢且快速，而膠水濃度較高的流體流動軌跡較為緩慢且穩定。
2. 因膠水濃度較高的流體流動阻力而造成最終聚集於圓心的面積較大，而純水因流動性較佳則更為容易使顆粒聚集到圓心，且更為密集。
3. 黏滯性越大使液體更為濃稠且流動性降低，流體內的摩擦力增大，這種流動阻力使液體流速漸慢，因此使膠水濃度較高的流體流動性較純水差。
4. 因流動性上的差異，造成流速的不同，使膠水濃度較高的流體從旋轉到趨於靜止的時長較短；黏滯性越低，因為流體的流暢度較佳，在旋轉時聚攏於圓心所花費的時常較短，較容易快速的聚集於圓心。

（二）不同黏滯性液體比較：

1. 膠水濃度越低，越容易帶動顆粒聚攏於圓心，排列結構也越緊密；膠水濃度越高，在帶動的過程受到較大的阻力，容易較早在聚集於圓心的過程中停止，不足已將顆粒帶動於圓心，導致最後呈現出空心圓的狀態。
2. 在流體中膠水濃度越低：所占總面積就越小；在顆粒數量相同時可得知，顆粒聚集及堆疊狀態越密集。因為密集程度的不同，也造成了所占面積百分比之間的差異，膠水濃度越小，則所占面積百分比越小。
3. 膠水濃度越高，所占總面積就越大；在顆粒數量相同時可得知，顆粒聚集及堆疊狀態結構上並不緊密，較為分散，且因為流體的膠水濃度不同，最後帶動顆粒聚攏於圓心所形成的圖像也不盡相同。因為密集程度的不同，也造成了所占面積百分比之間的差異，膠水濃度越高，所占面積的百分比就越大。

（三）總體現象比較：

圓度則會因為流體帶動顆粒聚攏於圓心的效果，最後形成的分布狀態是否接近理論圓而形成的差異。由上述圖表可得知最終顆粒分布狀態的圓度會受到流體黏滯性影響，**流體黏滯性越低、流動越流暢，越接近理論圓，則圓度會越大**；反之，**黏滯性越高，則越不接近理論圓，圓度越小**。

二、【實驗二】：觀測觀測容器位置對顆粒分布影響

（一）各觀測位置現象比較：

1. 觀測容器放置位置越靠近圓心，旋轉時的軌跡則越是繞著旋轉盤與觀測容器的**中心軸**轉；而放置位置越偏離圓心，則顆粒旋轉軌跡繞著的**中心軸越偏離杯中圓心**、甚至在轉盤轉動時和斷電後逐漸靜止時的狀態之下造成**2~3個顆粒集中區**。
2. 觀測容器位置位於(0,0)座標的實驗與其餘者相差最大，在圓心上的觀測容器會在觀測容器中心的中心軸固定旋轉，較不容易受到旋轉盤旋轉時離心力的影響使水面的傾斜程度增加，造成相較於原本的穩定流動更加混亂的流動。而在靠近旋轉盤外圍者則會形成2~3個顆粒集中區，最後在旋轉盤慢慢靜止轉動後匯集成一個點，聚攏於圓心。
3. 放置位置越偏離圓心，則離心力越大，受力大小不同，使得顆粒旋轉道趨於靜止時所花費的時間越長。
4. 因偏離旋轉盤圓心所造成的向外甩出的離心力增加，旋轉速度也比放置於圓心時稍快，最終趨於靜止時的花費時間長，聚集於圓心的面積也較為集中。

（二）總體現象比較：

1. **越靠近旋轉盤外圍者，顆粒聚集狀態越密集，較少分散在外的顆粒，總面積也越少**。
2. 顆粒所占百分比的面積則同顆粒所占總面積，因位置不同，所以受力不同，觀測容器位置**越靠外圍，所占面積百分比則越小；越靠近圓心所占面積百分比就越大**。
3. 顆粒最後所形成的靜止狀態分布的圓度則會因**觀測容器位置越靠近旋轉盤邊緣**，顆粒在單位面積聚集較密集，**而圓度越小**；**越靠近旋轉盤中心則圓度越大**。

三、【實驗三】不同流體深度對顆粒分布所造成的影響

(一) 各深度現象比較

1. 水深越淺顆粒聚集於圓心所花費的時間就會越短，小於水量較多所花費的時間，且最後靜止狀態的面積就會越小；水深較深則聚集於圓心的時間較長，最後的圓面積所涵蓋的範圍也較大。
2. 在所占面積百分比中我們可以發現，水深度越深，所占百分比面積就越大；水深越淺，所占面積百分比就越小。

(二) 總體現象比較：

圓度則代表流體帶動顆粒聚攏於圓心的效果，最後形成的分布狀態是否接近理論圓而形成的差異，由圖表中可發現，深度越深，圓度越大；深度越淺，圓度越小。

四、彙總各變因影響現象總結：

(一) 在轉動座標系統中，液體與顆粒運動與分布的狀態：

顆粒隨著水流流動，但觀測容器卻以反方向旋轉，靠近表面的液體幾乎不會動，底部的液體隨著杯底轉動，呈圓周運動的速度。則科氏力隨著速度指向觀測容器中央，顆粒則隨水流集中於杯底中央。

(二) 轉動坐標系中，接近上方水流幾乎不動的原因：

因內外壓力差剛好與隨時都會受到的離心力抗衡，兩例相平衡之狀態，因此水流不動。

(三) 轉動時表面會呈中心凹陷的拋物面狀之原因：

水受到離心力的作用，向外拋去，則外緣累積了較高的水量。

(四) 轉動中水壓在徑向上呈現內低外高的現象之原因的：

水壓的來源為上方所有的水之重量累積疊加後壓了下來所致，因此只要其正上方之水面越高，則水壓就越大。有了拋物面狀的水面，則在同一個高度處沿著徑向往外走出去時，其正上方水的深度一定是越來越大，所以水壓的分布一定是越往外就越大。

(五) 用湯匙去攪拌茶湯後會發現茶渣最後都往杯底的中心處集中之原因：

- 1.因液體與固體接觸時會附著於固體表面，而觀測容器靜止不動、杯底也是，原本杯底的水只能慢慢轉動，無需太大的向心力，可水面所造成的徑向內外壓力差距極大，才有辦法提供上方快速轉動的水面足夠的向心力，因此在力量不平衡的狀態之下，接近底部的水遵守牛頓的運動定律，往軸心的方向集中流去。而最後水流帶動杯底茶渣，使茶渣最後都往杯底的中心處集中。
- 2.水較難壓縮，當底部的水往中心流去時，湧進中心處的水，沿著中心軸的上方被頂上去，稱為「二次流」。

(六) 水最後逐漸趨於靜止之原因：

接近杯壁的水因也持有附著於固體表面之特性，因此此慢速水層藉由黏滯力拖累中央水流，使所有水流轉速逐漸變慢、趨於靜止。

陸、未來展望

- 一、本次實驗設計是單一式轉動系統探討液體與顆粒流動性質與轉動坐標系之間的關係。
- 二、利用慣性坐標系與非慣性坐標系作為變因，探討液體流動性質上的改變以及其所受的力的差異和其中的定律。
- 三、未來擬規劃雙重式轉動系統實驗設計，並將實驗中液體的種類多樣化，取得更多實驗數據加以探討液體與顆粒流動性質與轉動坐標系之間的關係。

柒、參考文獻資料

- 一、蔡尚芳（民 111）。自然科學第四冊。新北市：康軒。
- 二、圓周運動。Wikipedia. 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/圓周運動>
- 三、向心力。Wikipedia. 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/向心力>
- 四、離心力。Wikipedia. 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/離心力>
- 五、黏度。Wikipedia. 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/黏度>
- 六、二次流。取自：<https://baike.baidu.hk/item/二次流/2461165>
- 七、假想力。取自：<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=46390>
- 八、科氏力。Wikipedia. 取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/科里奧利力>
- 九、杯中茶渣何去何從？取自：<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=49896>

【評語】 030110

本作品嘗試研究茶杯茶渣為何在攪拌後，會集中在茶杯中心的現象。實驗設計與分析相當精細。不過在測定溶液加速度時，未考慮浮力與終端速度的問題。同時有些流體力學的解釋，可以加入做為改進實驗的方案。

作品海報

不同轉動座標系統效應對流體 中不同質量顆粒分布狀態研究

壹、研究動機

在日常生活中，泡茶時杯底總會留有茶葉殘渣，當我們用湯匙攪拌時，由於水面呈外高內低狀態，流動造成徑向內外的壓力差異，最終造成茶渣集中於杯底中心處。但是，改成杯子旋轉的**轉動坐標系**觀察，會看到一開始杯中的水大多是不動的，隨著轉動時間該便，杯中的水也開始快速旋轉，本次研究就是觀察在不同條件的運動狀態，杯中**流體對顆粒造成的運動與分佈狀態**之差異有何種**變化規律**，並探究其中的**物理原理**。

貳、研究目的

- (一) 探討**顆粒大小**(質量、體積)對茶渣顆粒分佈影響
- (二) 探討**轉速**(輸入電壓)對茶渣顆粒分佈影響
- (三) 探討流體**黏滯性**大小對茶渣顆粒分佈影響
- (四) 探討容器在**轉動坐標不同的位置**造成茶渣顆粒分佈差異
- (五) 探討**流體深度**對茶渣顆粒分佈影響

參、研究器材與設備

- 一、主要設備安裝：直徑43 cm木質旋轉盤、直流電源供應器、GoPro及固定器、觀測容器。
- 二、茶渣顆粒風選裝置。
- 三、電腦軟體：ImageJ、Excel。

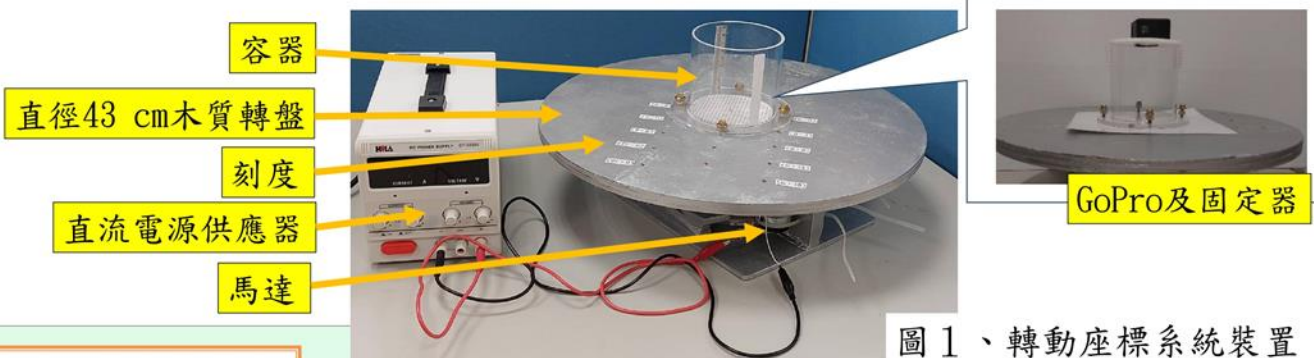


圖1、轉動座標系統裝置

肆、研究架構與方法

轉動座標系統中，流體造成顆粒分佈之變化與原理

- 變因設計與分類
1. 顆粒大小(質量與體積)
 2. 轉盤轉速(輸入電壓)
 3. 流體黏滯性(膠水濃度)
 4. 流體深度
 5. 容器位置(與轉盤圓心距離)

- 實驗裝置設計及材料測試
1. 茶渣顆粒風選裝置
 2. 轉盤座標系統裝置
 3. 液體黏滯性測定裝置
 4. 顆粒轉動演示裝置

- 實驗數據測量與現象分析
1. GoPro錄影裝置
 2. ImageJ圖像軟體

測試實驗：材料參數

一、茶渣風選裝置

取**最後三格**茶渣顆粒，混合均勻，一次實驗用量為一平匙。



圖2、(a)茶渣風選裝置, (b)取樣結果

二、液體黏滯性測定：

BB彈在溶液中下墜所需時間 t 不同，以等加速度運動公式得出其加速度（在本實驗中加速距離內未達到終端速度）。實驗結果如下

表1、黏滯性測定結果

濃度	0%	20%	40%	60%
下落時間(s)	0.82	6.36	11.76	18.11
平均加速度(cm/s^2)	53.5	0.89	0.26	0.11

黏滯性小、加速度大

黏滯性大、加速度小

實驗一、流體黏滯性對顆粒分佈所造成的影響

1. 操縱變因：**純水、膠水濃度20%、40%、60%**。
2. 控制變因：容器位置(0, 0)，深度6 cm，轉動20秒。

3. 記錄：從上方紀錄轉動時軌跡分佈，利用ImageJ將圖片灰階轉黑白，取得顆粒所占總面積與百分比及圓度(外圍輪廓與理想圓的偏差，越接近1越圓)，記錄顆粒停止時所花費時間。
4. 分析：以Excel分析，製作所占面積%與時間的關係圖。

實驗二、觀測容器位置對顆粒分佈影響

1. 操縱變因：**容器位置座標(0.0), (0.4), (0.8), (0.12), (0.16)**。
2. 控制變因：膠水濃度0%，深度6 cm，轉動20秒。
3. 記錄：同實驗一，增加側面錄影記錄水面高低差。
4. 分析：同實驗一計算各時間的顆粒分佈面積比例，討論離心力與容器偏心的關係。

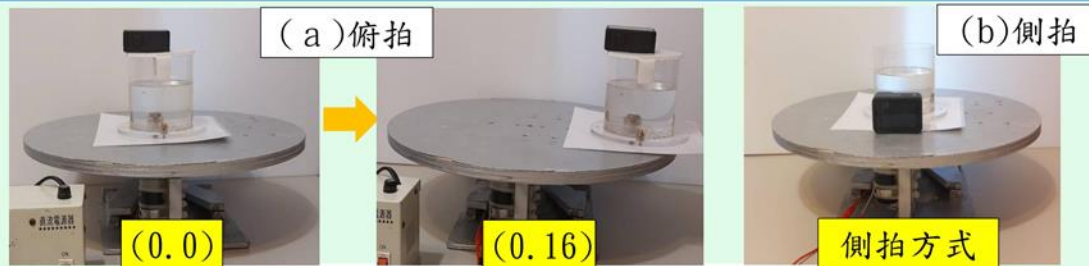


圖3、GoPro拍攝記錄方式/(a)俯拍, (b)側拍

實驗三、流體之離心作用

1. 操縱變因：**(1)流體黏滯性0%, 60%; (2)偏心(0.0), (0.16)**
2. 對照組：**(0.0), 純水, 6 cm**

說明：實驗三分為兩種操縱變因，第一種為上方懸掛BB彈(圖4a)，第二種(圖4b)為下方用棉線拉住保麗龍球，分別測量液體黏滯性差異，以及容器偏心差異。

3. 記錄：用GoPro拍攝法線及切線方向影片。
4. 分析：分析偏心及黏滯性對球體偏移量之影響。

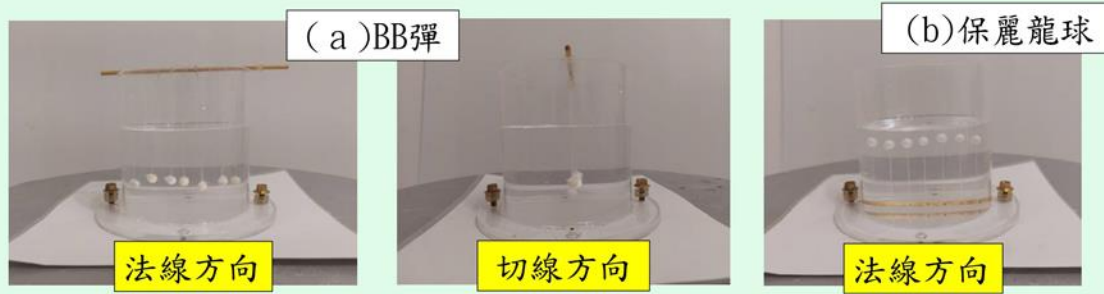


圖4、溶液中不同球體安裝方式及拍攝方向

實驗四、流體深度對顆粒分佈影響

1. 操縱變因：**流體深度6 cm、4 cm、2 cm**，轉動20秒。
2. 控制變因：**膠水濃度0%、容器位置(0, 0)**。
3. 記錄、分析：同實驗一。

伍、研究結果

【實驗一】：流體黏滯性對顆粒分佈所造成的影響

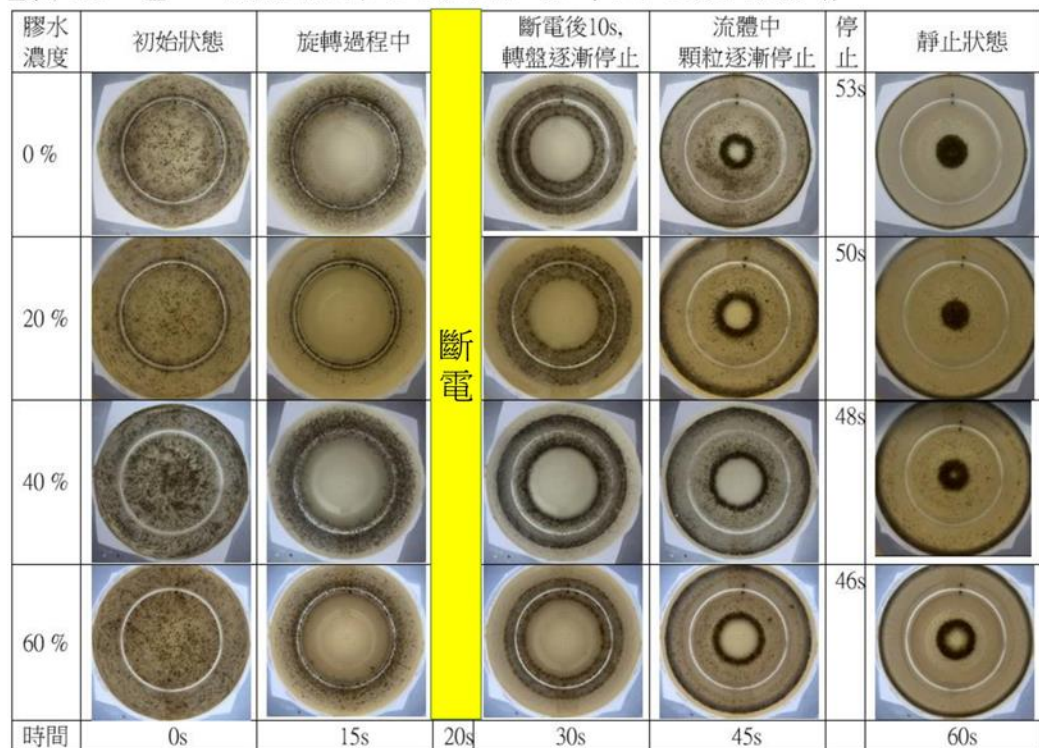


圖5、不同濃度的茶葉分佈圖(原始圖像)

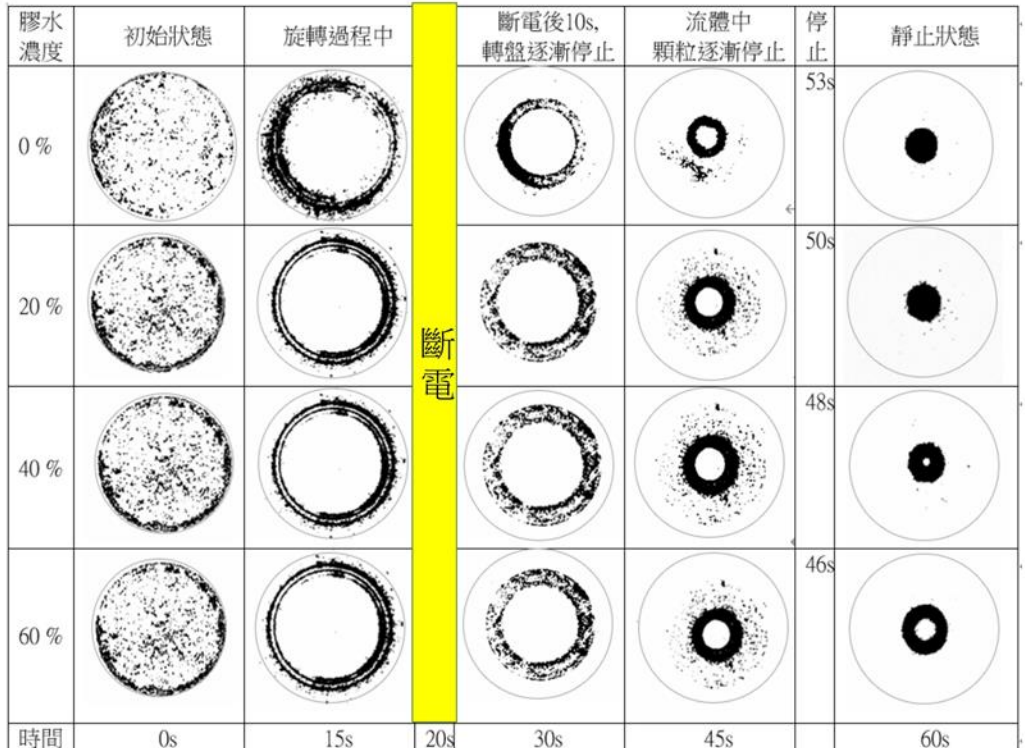


圖6、不同濃度的茶葉分佈圖(ImageJ轉黑白)

表2、不同濃度時的顆粒面積與圓度

膠水濃度	總面積(pixel)	所占面積百分比	圓度
0%	33653	3.749%	0.919
20%	35679	4.056%	0.906
40%	37096	4.537%	0.895
60%	70881	5.798%	0.841

1. 啟動後，在旋轉過程中顆粒會被**甩到容器邊緣**。
2. 斷電後，**黏滯性越低**，流動性佳，顆粒聚攏於圓心，靜止花費**時間越短**，速度越快。
3. 流體**黏滯性越低**，顆粒集中於圓心**越密集**。

R外接圓半徑、r內接圓半徑

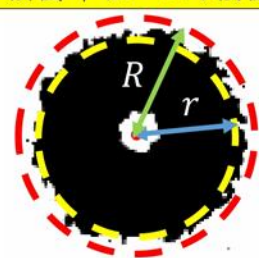


圖7、ImageJ圓度定義(長度比例R=1)

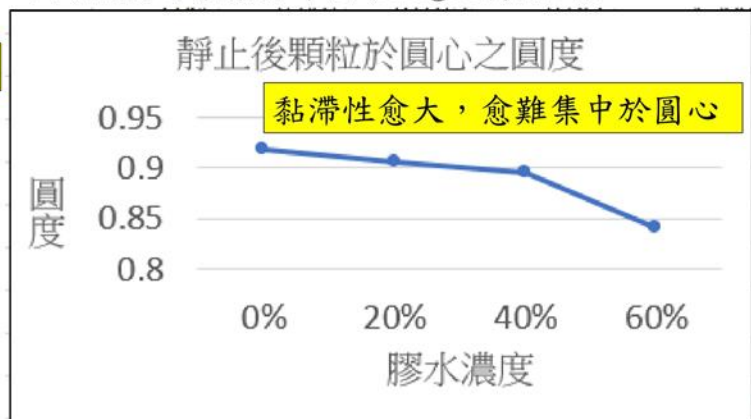
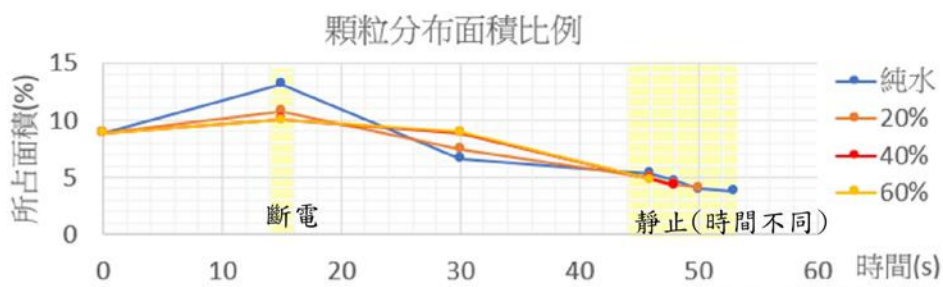


圖8、不同濃度時的顆粒集中於圓心的圓度



- 1、圖9中可知，在斷電前(20秒)，可知黏滯性愈小所占面積愈大。
- 2、斷電後至30秒，根據曲線斜率可知黏滯性愈小愈快集中。
- 3、由最終停止時間，可知黏滯性愈大，愈快停止，而且停止時所占面積愈大。

圖9、不同黏滯性旋轉過程對顆粒分布所占面積百分比影響

【實驗二】：觀測容器位置對顆粒分布影響

(一) 觀測容器於不同位置對顆粒分布影響

觀測容器位置	初始狀態	旋轉過程中	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中顆粒逐漸停止	停止	靜止狀態
(0,0)					53s	
(0,4)					54s	
(0,8)					56s	
(0,12)					57s	
(0,16)					59s	
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖10、不同黏滯性旋轉過程對顆粒分布所占面積百分比影響(ImageJ轉黑白)

不同觀測容器位置對顆粒分布面積百分比影響

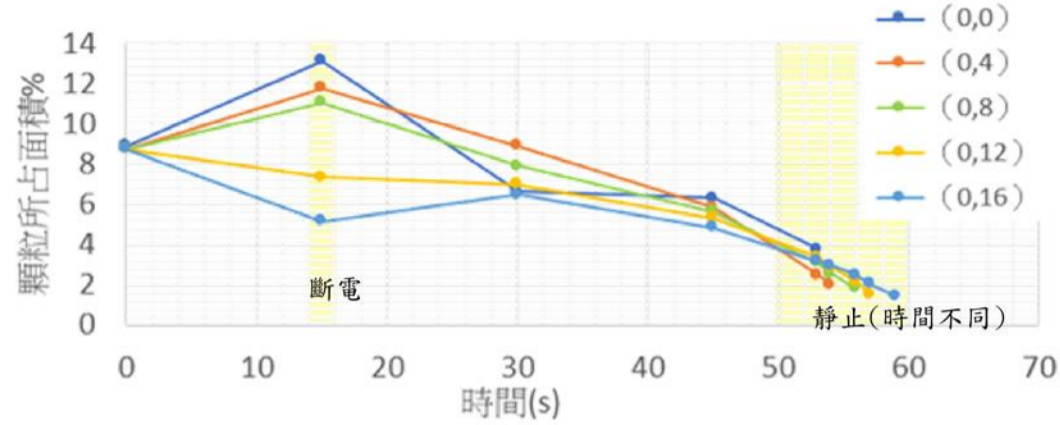


圖11、容器偏離圓心對顆粒分布所占面積百分比影響

取120度區域顆粒分布面積比

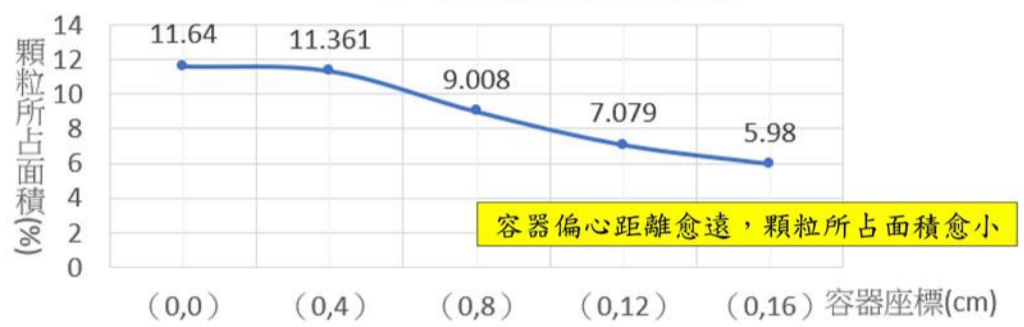


圖12、容器偏心距離對轉動中120°角顆粒分布面積百分比(取圖10, 45秒藍框處)

(二) 容器偏心距離對水面高低差影響

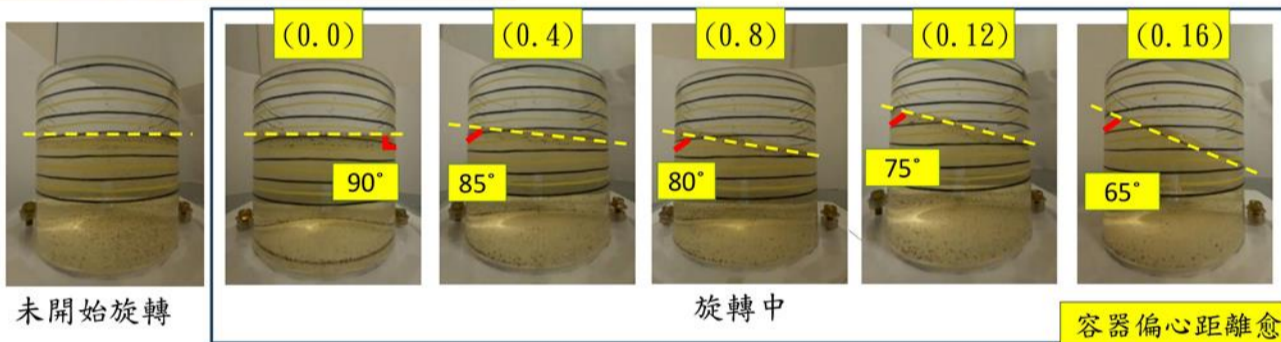


圖13、旋轉過程中容器位置與轉盤圓心距離不同的水面高低差(取15秒)

容器偏心距離對水面高低差影響

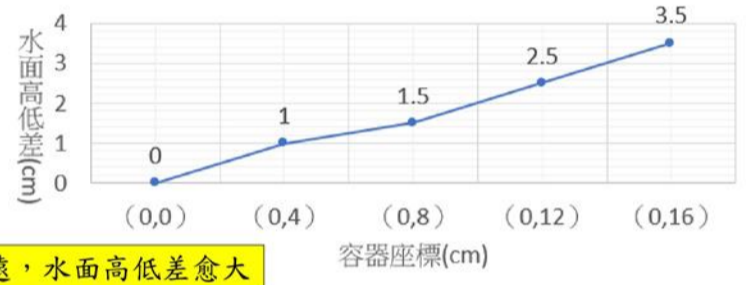


圖14、旋轉過程中不同容器位置水面高低差(取15秒)

分析水面傾斜變化因素

1. 物體作穩定轉速圓周運動時，向心力大小為 $F_c = m\omega^2 r$ ，其中 ω 角為角速度，根據 $F = ma_c$ ，可知向心加速度為 $a_c = \omega^2 r$ 。
2. 由於假想力(離心力)方向與向心力相反，量值相等，已知 m 、 ω 固定，可知 F_c 與 r (圓周半徑=容器偏心距離)成正比， a 與 r 成正比。
3. 水面的傾斜來自於假想力與重力的作用，其角度變化趨勢符合容器位置變化。

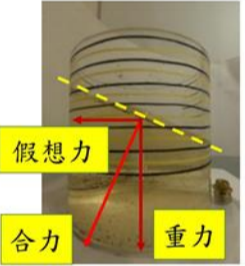


圖15、旋轉過程中流體液面傾斜之力圖

靜止後顆粒於圓心之圓度

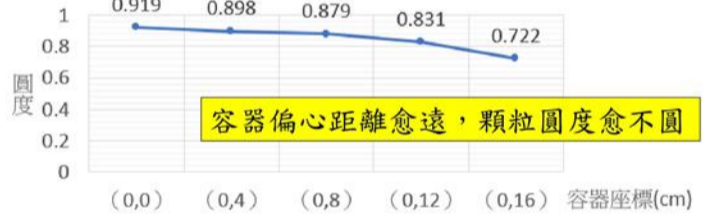


圖16、容器偏心距離造成水面高低差對靜止後顆粒圓度關係

1. 啟動後，容器偏離圓心愈遠，顆粒分布面積愈小(愈不均勻)，推測可能是離心力(假想力)作用所導致。
2. 位置於圓心者，顆粒軌跡則穩定圍繞著中心軸旋轉；愈偏離圓心，在過程中造成的亂流愈明顯，形成2-3個顆粒集中區(圖10紅框處，15秒、30秒)；推測可能是容器在偏心受離心力(假想力)造成水面高低差所導致。
3. 因離心力與向心力量值相等，所以容器位置愈偏離圓心，受到指向圓心的向心力就會更大，同時沿轉動半徑向外推出(或拉出)的假想力(離心加速度)作用就會更大，因此水面高低差愈大，且角度差愈大。
4. 而且，轉動時愈偏離中心的容器整體的轉動動能較大，當斷電後可造成杯中液體會愈慢停止，故靜止後顆粒所占面積愈小(愈集中)、圓度愈小。

【實驗三】：流體之離心作用

(一) 種類一、上方懸掛BB彈

條件	偏離圓心			
	(0.0)正面	(0.16)正面	(0.0)側面	(0.16)側面
初始狀態				
穩定狀態				
	1 cm	1 cm	1.8 cm	2.7 cm
			20°	30°
			最外側球	最外側球
			1.7 cm	0.8 cm

圖17、容器偏心距離對球體偏移差異法線與切線方向比較(BB彈)

條件	濃度改變	
	純水	60%
初始狀態		
穩定狀態		
	1.7 cm	1.2 cm

圖18、黏滯性改變對球體偏移差異法線方向比較(BB彈)

1. 由圖17可知，在穩定狀態時，放置圓心之容器，球體穩定向外散開，且側面左右側的球轉向不同，可代表杯溶液之自身旋轉的流速與離心作用。
2. 在偏離圓心的容器，可發現所有球體都沿徑向甩出去(同一方向的偏移)，表示容器在偏心位置，整體會受到座標偏離軸心的明顯離心作用，且側面觀察各球體的角度差異，可知杯中的溶液亦保持自身旋轉造成的作用。
3. 由圖18可知，濃度愈高的情況下，球體被黏滯力拖住，在穩定狀態下偏移量相對純水來說較小，因此可知溶液黏力作用會降低離心的旋轉效果。

(二)種類二、下方用拉繩拉住固定保麗龍球

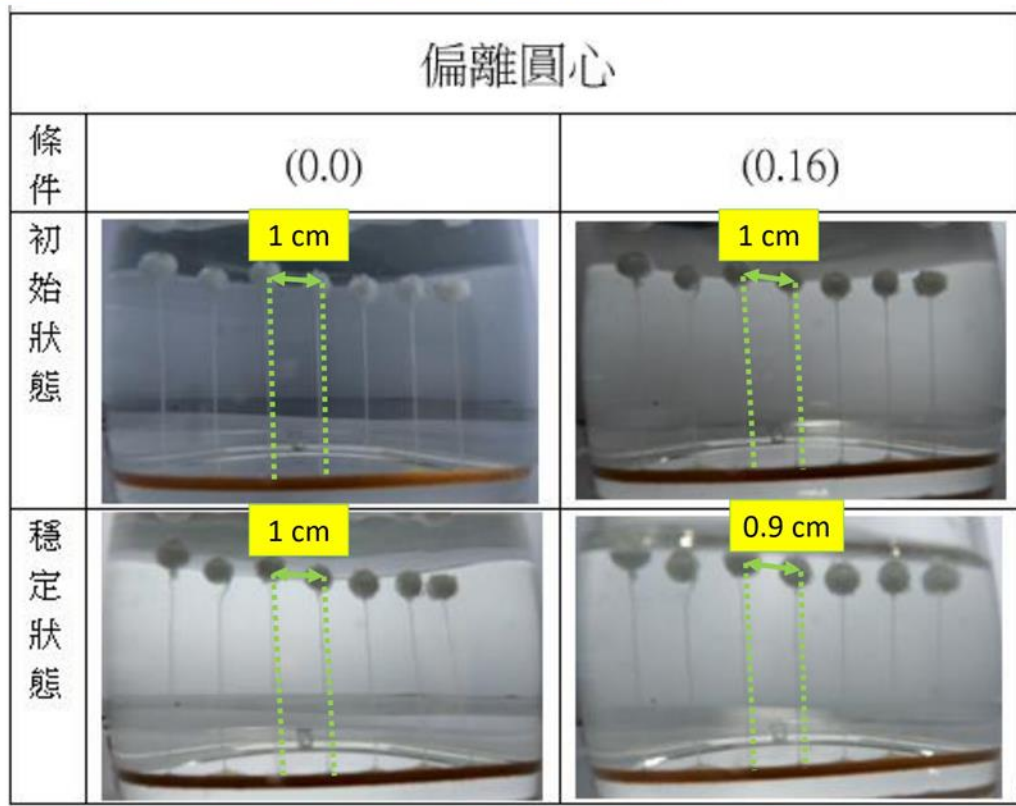


圖19、容器偏心距離對球體偏移差異法線方向比較(保麗龍球)

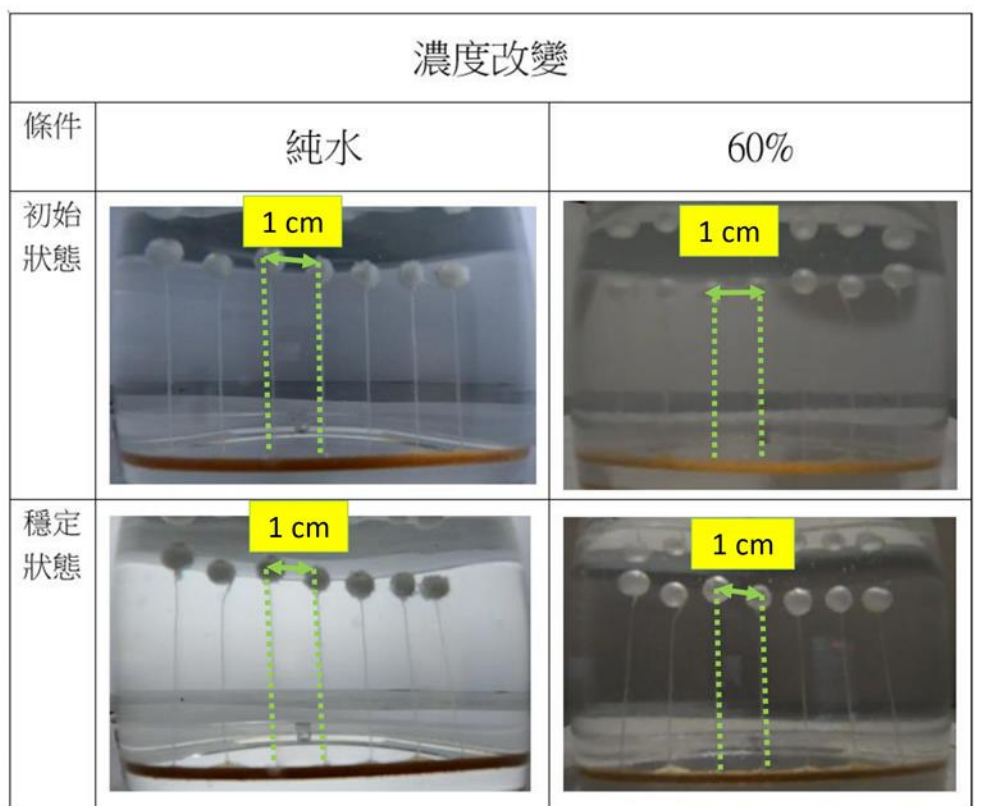
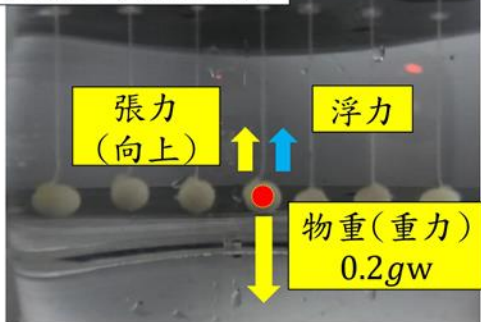


圖20、黏滯性改變對球體偏移差異法線方向比較(保麗龍球)

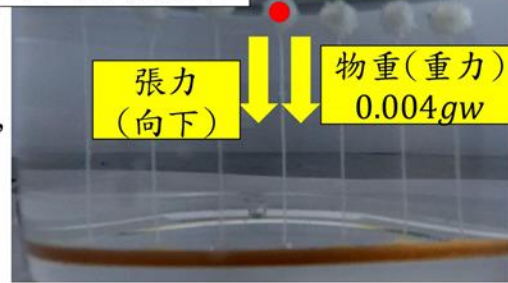
(三)BB彈與保麗龍球之力學分析

(a)上方懸掛BB彈



BB彈重量=0.2gw，體積=0.1cm³
 水密度=1g/cm³，
 BB彈浮力為0.1gw，
 拉繩張力=0.1gw。
 膠水濃度60%溶液密度=1.2g/cm³，
 BB彈浮力為0.12gw，
 拉繩張力=0.08gw。

(b)下方用拉繩固定保麗龍球



保麗龍球重量=0.004gw，體積=0.1cm³，
 在水中
 保麗龍球浮力為0.1gw，
 張力=0.096gw。
 在密度60%膠水溶液中，
 保麗龍球浮力為0.12gw，
 張力=0.116gw。

圖21、不同球體及安裝方式力圖(靜止狀態)/(a)上方懸掛BB彈 (b)下方用拉繩固定保麗龍球

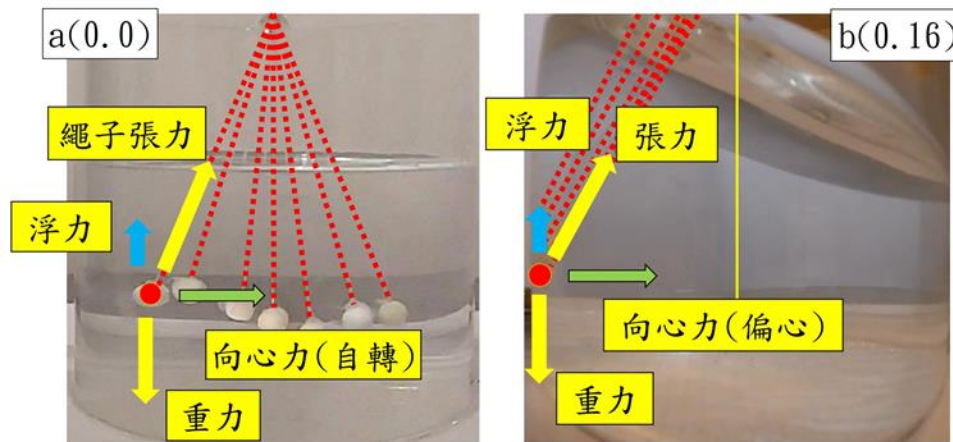


圖22、水中BB彈在不同偏心距離之力圖(穩定狀態)，a(0.0)、b(0.16)

【實驗四】：流體深度對顆粒分布影響

流體深度	初始狀態	旋轉過程中	斷電後10s, 轉盤逐漸停止	流體中顆粒逐漸停止	停止	靜止狀態
6 cm					53s	
4 cm					51s	
2 cm					49s	
時間	0s	15s	20s	30s	45s	60s

圖23、流體不同深度茶葉分布比較

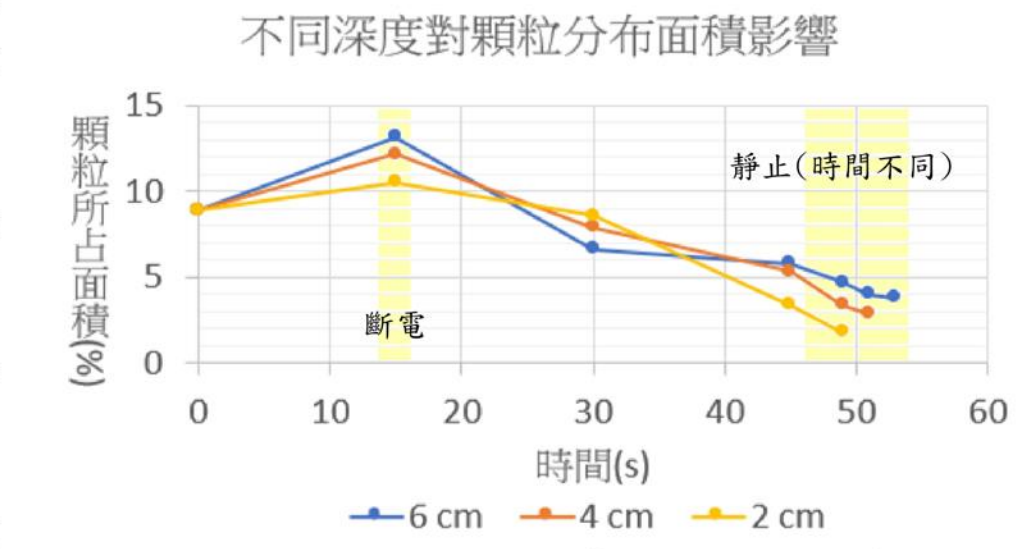


圖24、流體深度與顆粒分布面積百分比之關係

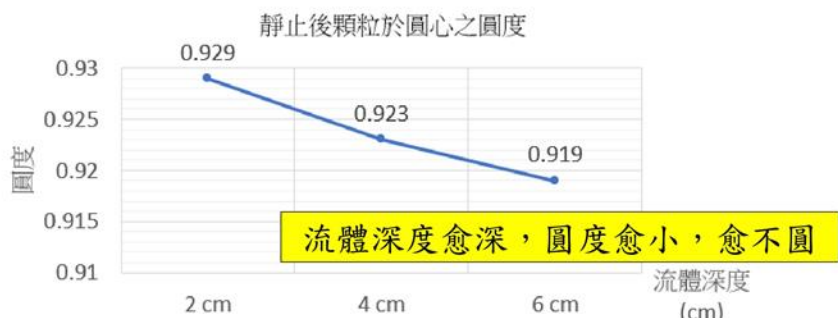


圖25、流體深度與靜止後顆粒集中於圓心之圓度關係

1. 在斷電前的旋轉，水深愈淺顆粒分布愈密集(如圖23、24)，推測可能是因為淺水受力(杯子的摩擦力)後造成表面的水轉動較快，故顆粒受到的離心作用較強，造成顆粒形成有序排列。
2. 斷電後，愈淺的水愈快停止(摩擦力作用)，推測可能是轉速較快的淺水在減速過程，愈快靜止轉動，顆粒也較早靜止於圓心，故占面積較小。
3. 流體深度愈深，最後靜止於圓心之顆粒圓度愈小，愈不圓。

陸、結論

1. 本次實驗設計是單一式轉動系統探討液體與顆粒流動性質與轉動坐標系之間的關係，利用慣性坐標系與非慣性坐標系作為變因，探討液體流動性質上的改變以及其所受的力的差異和其中的定律。
2. 在上方懸掛BB彈在偏心旋轉部分，每一條線都受到同一方向的偏移；以及茶渣顆粒在旋轉時會集中於容器邊緣或者距離圓心最遠處，可說明物體在偏心下，整杯水會多一個沿徑向作用的假想力，形成明顯的離心作用。
3. 在容器偏離圓心時，水面的高低差變化，以及上方懸掛BB彈時球體與拉繩的擺動方向、角度及偏移量都會隨著偏心距離增加而變大，可知向心力的反作用力(離心力)在物體偏離圓心愈遠，作用愈強。
4. 由實驗三，發現接近水面的保麗龍球基本沒有偏移，彈接近水底的BB彈確有明顯的偏移，可顯示出旋轉溶液的離心作用愈接近底部愈明顯，表示溶液的加速是由底部開始進而帶動上方溶液，而此這一點與實驗四淺水的運動亦相符。
5. 顆粒集中於圓心的過程，當流體黏滯性愈小、偏離圓心愈遠以及水深愈淺，容易讓顆粒集中的面積愈小。這是因為在流動性較佳的液體中，減速作用愈強，愈容易讓顆粒有效的集中於杯子的圓心。
6. 圓度則會因黏滯性愈大、偏離圓心愈遠以及水深愈淺而愈小、愈不圓，因為黏滯性大有助於穩定顆粒分布的外形邊緣。

柒、未來研究發展

- 一、未來擬規劃雙重式轉動系統實驗設計，並將實驗中液體的種類多樣化，取得更多實驗數據加以探討液體與顆粒流動性質與轉動坐標系之間的關係。
- 二、可在實驗中增加不同懸吊長度時BB彈的偏轉角度改變，進一步了解垂直結構的流體運動。
- 三、顆粒分布軌跡從均勻分布的靜止狀態到集中於圓心與現在觀察的星系運動模式雷同，推測或許在運動模式上有些微關聯。

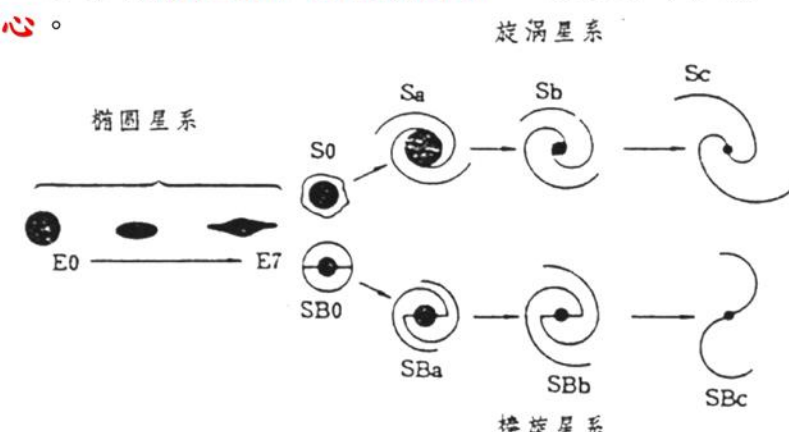


圖26、星系的哈勃分類