

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

國中組 物理科

(鄉土)教材獎

030110

咖啡渣田拔蘿蔔-非牛頓顆粒流體的力學

學校名稱： 新北市立錦和高級中學

作者：	指導老師：
國二 楊之佾	鄭璋駿
國二 彭曼唯	廖崇源
國二 湛心遠	

關鍵詞： 非牛頓流體、流沙、咖啡渣

## 摘要

在電影場景中的流沙是可以吞沒人體的自然現象，但實際上流沙能覆蓋人體的深度並不深。從文獻報告顯示，流沙是非牛頓流體的一種，但表現出來與太白粉所製的非牛頓流體不同。利用咖啡渣來建立流沙的受力模型，發現不論在阻力的表現、表面出水的現象與物體沉入的狀況與流沙都極其相似，以咖啡渣作為流沙的模型，可以減少使用玉米粉或麵粉所造成的浪費，同時可控制粒徑大小，測量受困者與流沙間的受力關係，立新的研究模型。在定力的實驗中，對物體施以垂直拉力，瞬間拉力約為物重的80%即可拉起；若沒有瞬間拉力，則需物重的120%以上。在動態的實驗中，物體所受的阻力會因著受力擠壓、含水量多寡、接觸面積、力量作用時間的不同而有差異。

**關鍵字：** 非牛頓流體、流沙、咖啡渣

# 壹、前言

## 一、研究動機

在認識鄉土課程中，我們到了彰和濕地參觀，有一項活動是穿上青蛙裝下水清除大浮萍。當我們踩在爛泥的瞬間，覺得自己被「吸住」，而且有下沉的現象，但僅下沉到一定程度，就不再下沉。導覽員教我們晃動腳後跟，就能慢慢拔起繼續向前走。這個現象真的很有趣，於是回學校後，我們就開始收集相關的資料，和燃發下一個關鍵字—流沙。



對於流沙的認識，主要來自電影。在看很多電影中，都會出現演員陷入流沙的場景，但形成流沙的地方，多為森林或沼澤地，並非想像中的沙漠地帶。在我們蒐集流沙的相關資料時，看到這則報導：『1960年代時，曾有獵人至森林中打獵，不慎闖入流沙區，雙腿隨即遭吞沒、動彈不得，難以自救。當救援人員趕達現場後，先將繩子綁住獵人，試圖將他拉出流沙卻徒勞無功，最後只得動用直升機。沒想到，最後獵人雖被成功拉出流沙，但上半身和下半身卻分了家，慘死當場。』

我們覺得很奇怪：流沙不是會把人吞沒嗎？怎麼會卡住下半身難以逃脫呢？於是我們去找老師討論這個問題，老師提到流沙也是『非牛頓流體』的一種，非牛頓流體

的特色，就是受壓後會變得堅硬，所以才會卡住下半身。聽完後我們更是疑惑：甚麼是『非牛頓流體』？電影不是都這麼演：人一旦陷入流沙中，就會迅速下陷，越劇烈掙扎，下陷速度越快，最後活不見人死不見屍，所以要靠朋友拋繩或藤蔓解救。或者流沙吞沒主角後，會掉到地洞中，再展開一段冒險旅程。如果流沙跟戲劇呈現的不同，那到底什麼是『流沙』？我們應該從那些角度來了解流沙呢？

## 二、研究目的

1. 咖啡渣和水的比例對於物質的下沉速率是否有影響。
2. 咖啡渣粒徑大小對於流沙模型建立的影響
3. 咖啡渣和水比例相同的情況下，物體脫困所需要的拉力值。
4. 建立流沙受力的測量方式。
5. 建立流沙的觀測模型。

## 三、文獻回顧

### 1. 關於『流沙』：

流沙(**Quicksand**)可分成兩大類：乾流沙(dry quicksand) 與一般流沙(normal quicksand)。乾流沙是指在沒有水的情況下行為類似液體的鬆散沙子，主要出現在沙漠中，是我們一般在影片中看到的情景。普通流沙是沙子、水和其他細小物質(淤泥、黏土)的混合物，其中水懸浮著沙粒，使它們表現得像液體一樣，在震動力或水流動力作用下發生液化、流動的現象。而一般流沙又可以分成兩大類：

真流沙：砂土中含有親水性的膠體物質，含水不易排出，其流動性不易消除。

假流沙：砂土中不含親水性的膠體物質，容易排水，經過排水後流動性即消失。

不管是真流沙還是假流沙，厚度大概都只有幾公分厚，與電影中會把人完全吞沒的景象是截然不同的。

過去關於流沙的研究，主要是在現象的觀測(如新北市 102 學年度國中組地球科學科『炙熱沙漠的陷阱-流沙』)，或者是利用流動的水建立流沙的模型(如第 38 屆全國科展高中組地球科學科『死亡陷阱~流沙』；第 59 屆全國科展國小組物理科『沙瀑我愛羅的流沙忍術』)，這些研究雖然直接使用沙子來建立模型，但水流的速率並沒有很好的控制，同時也受限於容器的大小，因此我們想研究在水與咖啡渣的比例固定時，是不是也能有流沙的現象產生。

## 2. 關於『非牛頓流體』：

非牛頓流體是一種流體力學的概念，與牛頓流體相對，它的應力與速度梯度的關係不服從牛頓粘性定律，也就是說其剪應力與剪應變呈非線性關係。其主要特徵是：流體的黏度會因為受到的壓力或速度而變化，壓力越大，黏度會增加，甚至成為暫時性的固體。

非牛頓流體可以分成兩大類：**水多粉少**與**水少粉多**。常見非牛頓流體的研究非常多，但所使用的材質主要是玉米粉或麵粉，屬於水少粉多類型，與流沙是否相同類型？可以深入研究。另外，玉米粉類的非牛頓流體如果要『固化』，需要使用大力拍打才能成型。但對流沙而言，即使人不動，也會被下層的泥沙牢牢抓住，這是不是屬於非牛頓流體的固化現象？如果是，到底要造成明顯的固化，需要多大的力量，是我們想要知道的。同時，利用可以吃的東西來進行科學的研究，實在有些浪費，是不是可以有其他的選擇來進行非牛頓流體的研究？尚待釐清。

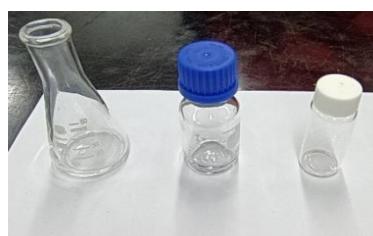
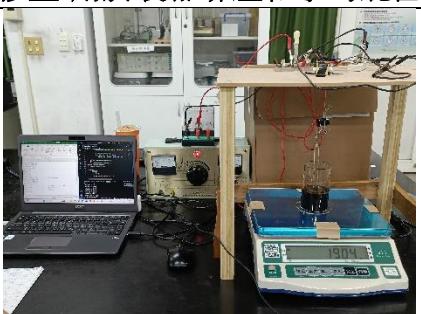
## 3. 使用咖啡渣的好處

- (1) 環保不浪費食物
- (2) 粒徑大小可以控制，便於模型的建立
- (3) 可重複使用，減少實驗材料本身所造成的不準確性

## 貳、研究設備及材料

### 一、材料：

1. 咖啡渣：來自一般咖啡店及全家便利商店製作拿鐵或美式咖啡的咖啡渣，經市售麵粉篩網過篩，並以60°C烘箱烘乾後備用。
2. 太白粉：購自家樂福。
3. 其他器材：(※本文中所有圖片均為自行拍攝之照片，與他人之著作權無關)

	
砝碼:用於提供拉重物的拉力	錐形瓶、血清瓶、試樣瓶：裝載物質，進行測試
	
定滑輪:用於拉起重物以使重物落下	燈架:用於固定掉落高度
	
電子秤:用於測量咖啡渣與蒸餾水的重量	塑膠盒:用於裝咖啡渣和水的混合液
	
地震儀：提供穩定的搖晃力	拉力實驗組：從咖啡渣拉起壓克力柱
 直徑： 30 20 10 (mm)	
壓克力圓柱體：做為拉起物體	壓克力容器：填裝咖啡渣

## 參、研究過程與方法

### 第一部分：流沙模型的建立

#### 一、利用咖啡渣與水混合後模擬流沙

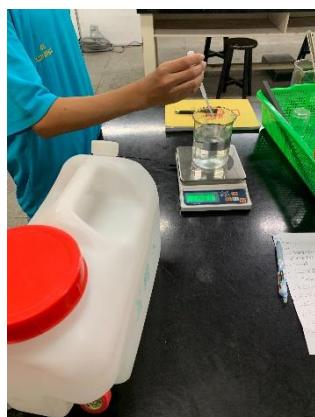
1. 實驗目的：使用咖啡渣，將咖啡渣和蒸餾水混合在一起模擬流沙，觀察砝碼沉下的速度(計時，等砝碼完全淹沒即可)。根據實驗結果，找出最佳比例。

#### 2. 實驗步驟

- (1) 先以電子秤測量咖啡渣重量(圖 1)
- (2) 再以電子秤測量水的重量(圖 2)
- (3) 加三分之二的水在咖啡渣裡，進行攪拌(圖 3)
- (4) 再把剩下的水沿著器材加下去，把咖啡渣沖乾淨(圖 4)
- (5) 把 100g 的砝碼放下去，並觀察它的下沉，並記錄下沉時間(圖 5)



圖(1)



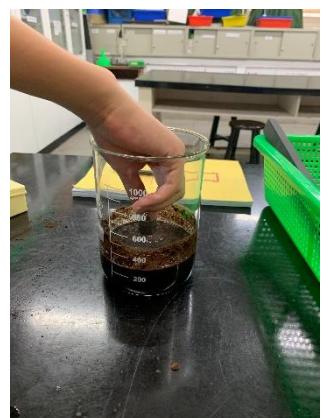
圖(2)



圖(3)



圖(4)



圖(5)

## 二、咖啡渣粒徑大小的篩選與分析

1. 將咖啡渣放入60°C烘箱烘乾。
2. 以地震儀作為震動工具 (加速度為 $5.07 \text{ m/s}^2$ )，利用16目篩網及24目篩網，將咖啡渣分成三群：  
細粒：粒徑  $< 1.00 \text{ mm}$ ；中粒： $1.00 \text{ mm} < \text{粒徑} < 2.00 \text{ mm}$ ；  
粗粒：粒徑  $> 2.00 \text{ mm}$



地震儀與篩網 (俯視圖)



地震儀與篩網 (正視圖)

3. 分別取樣，將咖啡渣撒在白紙上，並以一元銅板直徑為標準，拍照如圖(6)~(8)：



圖(6) 細粒徑咖啡渣



圖(7) 中粒徑咖啡渣



圖(8) 粗粒徑咖啡渣

4. 將照片經過『Coffee Particle Size Distribution by Jonathan Gagne』軟體分析後，即可得到三群粒徑的分布圖。未來即以此作為咖啡渣模型的粒徑標準。

## 三、利用模擬流沙觀察物體陷入與拉出的狀況及力量大小

1. 實驗目的：將物體從特定高度墜落，看看瞬間掉落的沉入深度，與靜置一段時間後的沉入深度有何差別？接著以不同的拉力拉物體，看看拉力與物重之間的差異。
2. 實驗步驟：

- (1) 將燈架、定滑輪及放咖啡渣的塑膠盒裝置如圖(9)：
- (2) 把要實驗之容器(試樣瓶、錐形瓶或血清瓶)上的線掛在架子上的定滑輪，然後把該容器拉到距咖啡渣表面 120cm 處後，將容器上的線放開，盡量讓瓶身

保持直立・並靜待三分鐘，看看是否繼續下沉(如圖(10)~(12))。

- (3) 3分鐘到時，將已掛在定滑輪上且安裝相對應的法碼的線快速放開，讓容器承受線放開時的瞬間拉力，放開時的一瞬間就開始計時 6 分鐘，若拉了 6 分鐘還是無法拉起，就記錄 6 分鐘到時流體表面在瓶身的位置；反之，若 6 分鐘內容器有被拉起，就記錄是在幾分幾秒拉起的。
- (4) 若 3 次同樣的拉力都無法把容器拉起，則增大拉力，直到容器可以被拉起為止。
- (5) 一直重複 3.4.5.步驟，直到所有容器都已蒐集到足夠且正確的結果為止
- (6) 另外一組，則是慢慢放開砝碼，讓瞬間拉力消失，比對這兩個數據，看看有沒有明顯的差異。



圖(9)



圖(10)



圖(11)



圖(12)

#### 四、物體在不同粒徑的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

1. 依咖啡渣：水= 1：2.25 的比例，分別配置中粒徑群與粗粒群的模擬流沙。

2. 依照實驗(三)的步驟進行實驗，以討論不同粒徑群對陷入流沙物體的影響。
3. 調整中粒徑群的水量，找出最適當的渣水比例。

## 五、物體在太白粉的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

1. 依太白粉：水= 5 : 3.5 的比例，分別配置中粒徑群與粗粒群的模擬流沙。
2. 依照實驗(三)的步驟進行實驗，以討論太白粉流體對陷入物體的影響。
3. 比對太白粉流體與咖啡渣流體，看看何者比較接近流沙。

## 第二部分：咖啡渣顆粒體的力學分析

### 一、咖啡渣粒徑再分類：

利用28 目篩網，將原細粒徑咖啡渣再分成細粒 (1.0mm 到 0.6mm) 與極細粒 (0.6mm 以下)

### 二、咖啡渣流體的拉力實驗

將咖啡渣流體依照粒徑、乾濕、加壓與否等不同變因，分別放入壓克力容器中，再放入不同直徑的圓柱體，以**拉力實驗組**測量拉力及重力的差異，用以推測咖啡渣流體的相關力學性質。我們討論的分組如下：

1. 不同高度對拉力的影響
2. 乾粒與濕粒對拉力的影響
3. 加壓與否對拉力的影響
4. 不同液體(溶劑)對拉力的影響

同時分析粒徑對上述變因的影響。

## 肆、研究結果

### 一、利用咖啡渣與水混合後模擬流沙

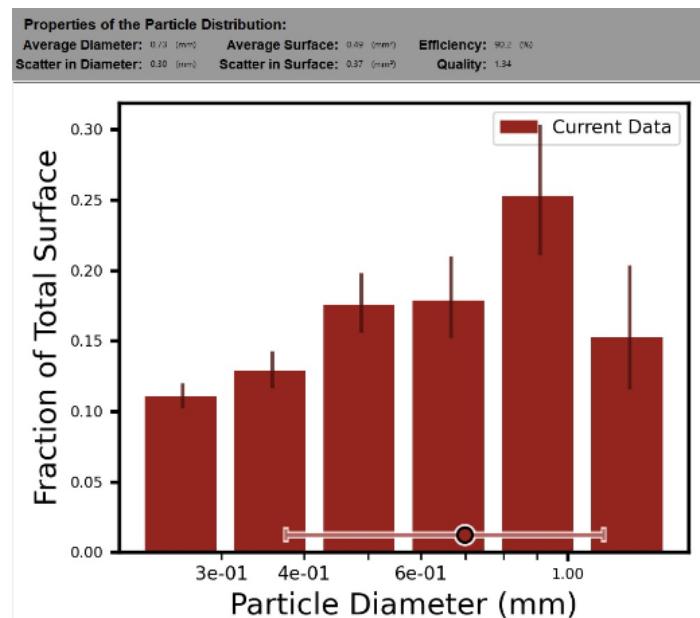
結果如表1所示，根據實驗結果，後續的將以咖啡渣與水的比例為 1:2.25 作為配方進行實驗

表 1 砝碼在不同比例的咖啡渣溶液中，沉入時間的比較

咖啡渣:水	耗時	是否沉下去	備註
5:3.5	20 分鐘以上	X	太白粉非牛頓流體的比例
2:1	20 分鐘以上	X	
1:1	20 分鐘以上	X	
1:1.5	20 分鐘以上	X	
1:2	20 分鐘以上	X	
1:2.25	約 5 分鐘	O	最終比例
1:2.5	直接沉下去	O	
1:3	直接沉下去	O	

### 二、咖啡渣粒徑大小的篩選與分析

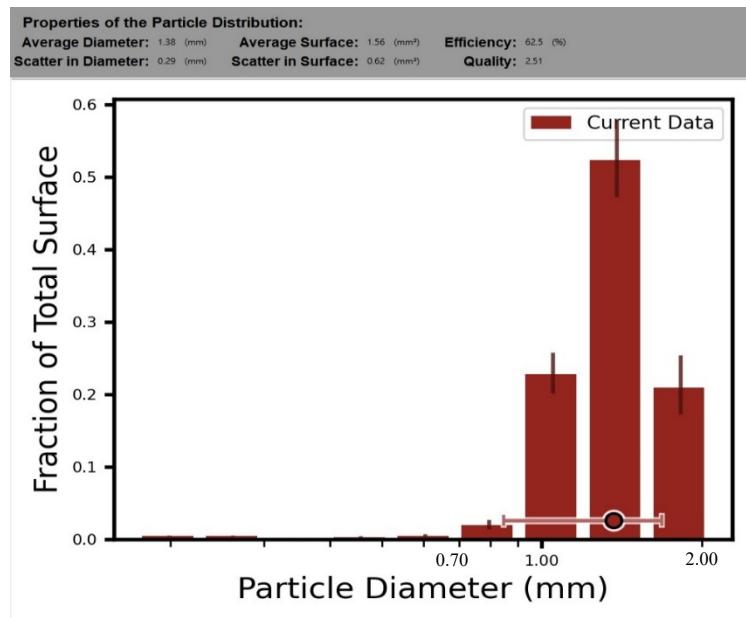
經過『Coffee Particle Size Distribution by Jonathan Gagne』軟體分析後，即可得到三群粒徑的分布圖如圖(15-1)~圖(15-3)。



圖(15-1)細粒徑群的粒徑分布圖

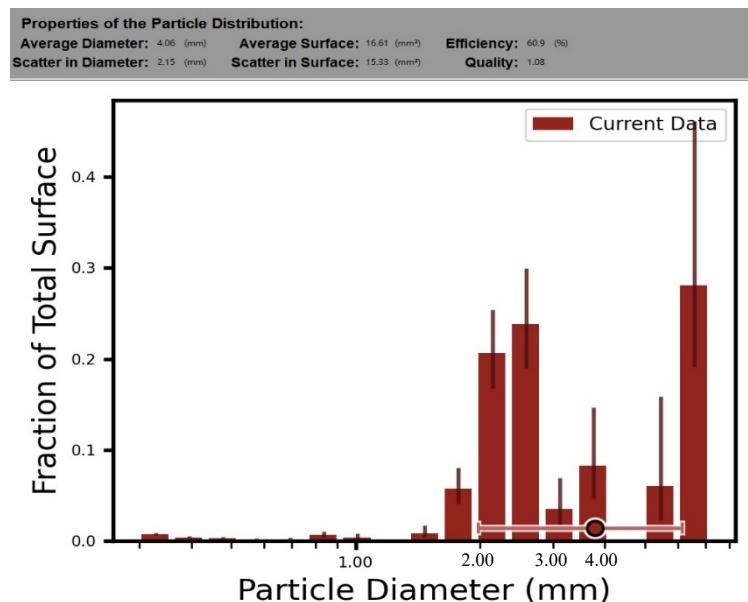
細粒徑群：粒徑主要分布在 1mm 以下，平均的粒徑長為 0.73 mm。

顆粒分布比較平均，最高約佔25%



圖(15-2)中粒徑群的粒徑分布圖

中粒徑群：粒徑主要分布在 0.7 mm 到 2.00 mm 之間，平均的粒徑長為 1.38 mm。  
其中，粒徑長在 1.38 mm 左右的顆粒，佔了約 55%



圖(15-2)粗粒徑群的粒徑分布圖

粗粒徑群：粒徑主要分布在 2.00 mm 以上，平均的粒徑長為 4.06 mm。  
從分析結果可知，利用 16 目的篩網與 24 目的篩網，確實可以將咖啡渣分成明顯的三群，其形成流沙的效果可能不同，需要再進一步分析比對。

### 三、利用模擬流沙觀察物體陷入與拉出的狀況及力量大小

#### 1. 空試樣瓶實驗

表 2 空試樣瓶的拉力測試

質量	掉落高度	拉力(gw)	是否為瞬間拉力	是否拉起
17.5g	61cm	15	否	X
17.5g	61cm	20	否	X
17.5g	61cm	25	否	X
17.5g	61cm	30	否	X
17.5g	61cm	35	否	O
17.5g	61cm	35	否	O
17.5g	61cm	40	否	O

表 3 試樣瓶+鐵釘的拉力測試

質量	掉落高度	拉力(gw)	是否為瞬間拉力	是否拉起
85.5g	61cm	100	否	X
85.5g	61cm	120	否	X
85.5g	61cm	135	否	O
85.5g	61cm	140	否	O
85.5g	61cm	150	否	O

表 4 試樣瓶+鐵粉的拉力測試

質量	掉落高度	拉力(gw)	是否為瞬間拉力	是否拉起
87.5g	61cm	90	X	X
87.5g	61cm	95	X	X
87.5g	61cm	100	X	X
87.5g	61cm	135	X	X
87.5g	61cm	140	X	O
87.5g	61cm	150	X	O
87.5g	61cm	160	X	O

綜合三個表的數據中我們可以發現：只用與物種相同大小的力，就要把樣本拉出流沙，是無法做到的，顯示流沙必定施加阻力在試樣瓶上。

在進行試樣瓶實驗時，我們同時發現：物品掉落高度控制不易，所以我們找尋童軍課程所使用的燈架，來做為固定高度及穩定拉力測試的工具。

## 2. 錐形瓶實驗

表5 錐形瓶1號垂直拉(細粒)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
212g	120cm	180 gw	是	X		
212g	120cm	190 gw	是	X		
212g	120cm	195 gw	是	X		
212g	120cm	200 gw	是	O	94.3%	
212g	120cm	210 gw	是	O		

表6 錐形瓶2號垂直拉(細粒)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
116g	120cm	90gw	是	X		
116g	120cm	95gw	是	X		
116g	120cm	100gw	是	O	86.2%	
116g	120cm	105gw	是	O		
116g	120cm	110gw	否	X		
116g	120cm	125gw	否	X		差一點
116g	120cm	130gw	否	O	112.0%	
116g	120cm	135gw	否	O		

從上述表格顯示，如有瞬間拉力，拉力約為物重的90%；

沒有瞬間拉力，則需約物重的110%才可拉起。



圖 錐形瓶一號掉落後



圖 血清瓶一號掉落後

### 3. 血清瓶實驗

表7 血清瓶1號垂直拉(細粒)						
質量	掉落高度	拉力	是否為瞬間拉力	是否拉起	比例	備註
164.6g	120cm					
164.6g	120cm					
164.6g	120cm	160gw	是	O		
164.6g	120cm	170gw	否	X		
164.6g	120cm	180gw	否	X		
164.6g	120cm	185gw	否	O	112.8%	
164.6g	120cm	190gw	否	O		

表8 血清瓶2號垂直拉(細粒)						
質量	掉落高度	拉力	是否為瞬間拉力	是否拉起	比例	備註
109.9g	120cm	75gw	是	X		
109.9g	120cm	80gw	是	O	72.8%	
109.9g	120cm	85gw	是	O		
109.9g	120cm	100gw	否	X		
109.9g	120cm	110gw	否	X		
109.9g	120cm	120gw	否	O	109.2%	
109.9g	120cm	125gw	否	O		

表9 血清瓶3號垂直拉(細粒)						
質量	掉落高度	拉力	是否為瞬間拉力	是否拉起	比例	備註
82.5g	120cm	60gw	是	X		
82.5g	120cm	65gw	是	X		
82.5g	120cm	75gw	是	O	84.8%	
82.5g	120cm	80gw	是	O		
82.5g	120cm	85gw	否	X		
82.5g	120cm	90gw	否	X		差一點
82.5g	120cm	100gw	否	O	121.2%	
82.5g	120cm	105gw	否	O		

從上述表格顯示，如有瞬間拉力，拉力約為物重的80%；

沒有瞬間拉力，則需約物重的110%才可拉起。與錐形瓶相比，瞬間拉力值較小，是否跟容器的外型有關，仍有待進一步的分析比對。

#### 四、物體在不同粒徑的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

##### 1. 血清瓶實驗

血清瓶 1 號垂直拉(1:2.25)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
165g	120cm	50gw	是	X		
165g	120cm	55gw	是	X		
165g	120cm	60gw	是	O	36.7%	
165g	120cm	70gw	是	O		
165g	120cm	165g	是	O		
165g	120cm	170g	是	O		

在配製好咖啡渣：水= 1：2.25的中粒流沙模型後，我們發現咖啡渣的表面很乾，水幾乎都滲到底部，與細粒咖啡渣觀察到的情況差異甚大，在有瞬間拉力的情況下，僅需不到物重一半的拉力，就可拉起，這結果與細粒差異太大。所以我們決定重新找尋中粒咖啡渣與水的最適當比例。結果如下表

表 血清瓶1號垂直拉(中粒比例測試)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	施力／物重	備註
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.25
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.3
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.35
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.4
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.45
165g	120cm	165gw	否	X	100.0%	1:2.55
165g	120cm	165gw	否	O	100.0%	1:2.6 馬上拉起
165g	120cm	165gw	否	O	100.0%	1:2.7 馬上拉起

讓1號血清瓶掉落在不同比例的中粒咖啡渣模型上，我們會發現：如果咖啡渣表面太乾，血清瓶陷入深度不足，但仍有阻力，因此沒辦法用與物重相同的拉力拉起；如果濕度太高，則血清瓶會立刻沉入到盆子底部，無法停住。這時候如果以與物重相同的拉力拉血清瓶時，可能在浮力的幫助下，血清瓶會立刻拉起，這又不符合流沙的特性。所以我們取比例 1：2.55(介於太乾與太濕之間)的咖啡渣，進行後續的實驗。



圖 中粒徑咖啡渣模型(1:2.25)



圖 血清瓶掉落在咖啡渣模型上(1:2.25)



圖 血清瓶拉走後的咖啡渣表面(1:2.25)



圖 血清瓶拉走後的咖啡渣表面(1:2.55)

表 血清瓶 1 號垂直拉(中粒 1:2.55)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
165g	120cm	80 gw	是	X		
165g	120cm	85 gw	是	X		
165g	120cm	90 gw	是	O	54.5%	

## 2. 錐形瓶實驗

表 錐形瓶1號垂直拉(中粒 1:2.55)						
質量	掉落 高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
212g	120cm	120gw	是	X		
212g	120cm	125gw	是	X		
212g	120cm	130gw	是	O	61.3%	
212g	120cm	140gw	是	O		
212g	120cm	210gw	否	X		
212g	120cm	240gw	否	X		
212g	120cm	245gw	否	O	115.6%	馬上
212g	120cm	250gw	否	O		馬上

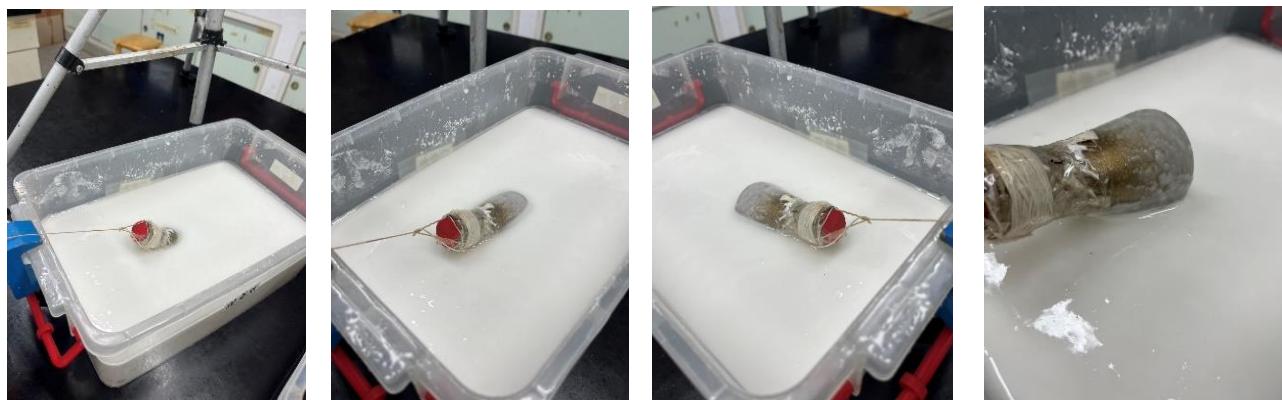
從上述數據可知，中粒的瞬間拉力較小，垂直拉力與細粒徑差不多。

## 五、物體在太白粉的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

### 1. 錐形瓶實驗

表 錐形瓶 1 號垂直拉(太白粉)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
212g	120cm	210 gw	否	X		
212g	120cm	240 gw	否	X		
212g	120cm	245 gw	否	O	115.6%	
212g	120cm	250 gw	否	O		
212g	120cm	200 gw	是	X		目前只做到 200gw

錐形瓶 1 號水平拉(太白粉)				
質量	拉力	是否拉起	比例	備註
212g	160gw	X		
212g	165gw	X		
212g	170gw	O	80.1%	
212g	180gw	O		

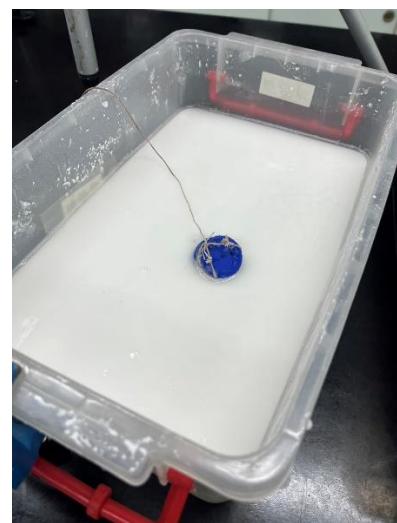


## 2. 血清瓶實驗

血清瓶1號垂直拉(太白粉)						
質量	掉落高度	拉力	是否為 瞬間拉力	是否 拉起	比例	備註
165g	120cm	150gw	是	X		
165g	120cm	160gw	是	X		
165g	120cm	170gw	是	X		
165g	120cm	175gw	是	O	106.0%	
165g	120cm	180gw	是	O		
165g	120cm	160 gw	否	X		
165g	120cm	165 gw	否	X		
165g	120cm	170 gw	否	O	103.0%	
165g	120cm	170 gw	否	O		



血清瓶1號垂直拉(太白粉)



## 六、將壓克力圓柱由咖啡渣流沙模型中拔出之現象與力量量測

### 1. 利用磅秤測量壓克力柱所受咖啡渣之摩擦力

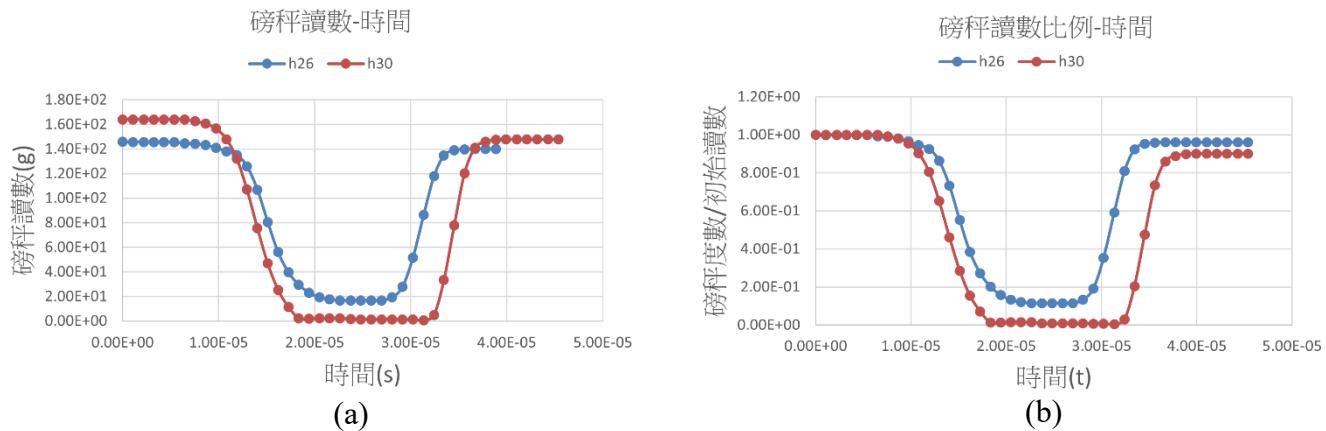


圖 (a)磅秤實際讀數與時間的關係圖 (b)將 y 軸改為磅秤讀數/磅秤初始讀數，以與原重比例的方式呈現樣本受力的變化。

當馬達啟動拉起壓克力柱時，樣本底下的磅秤所測得之數據如圖。所使用的咖啡渣流沙模型之初始粉水比為1:2.25，經加壓後，藍色線樣本的有效高度為26mm，紅色線樣本為30mm，壓克力柱直徑10mm。由實驗模型可推論，當磅秤讀數最低時，咖啡渣流沙作用於壓克力棒的阻力達最大值。圖(a)為原始的讀值，但由於兩種樣本的咖啡渣總重不同，為方便比較，將每時刻的磅秤讀數除以磅秤的初始讀數，以此做為新的 y 軸數值，可將(a)圖轉畫成(b)圖。

藍色曲線之最低讀數不為零，可推論壓克力柱時無法將整罐樣本抬起，壓克力棒所受的最大阻力應為最後重量減去最低重量。而紅色曲線因其有一段時間讀數為零，對照影片，發現壓克力柱可將整罐樣本抬起，推論壓克力棒所受的最大阻力應大於咖啡渣樣本與壓克力容器的總重，故無法得知咖啡渣樣本所造成的大阻力；而當樣本被拉起一段時間後，可看到樣本重新落回秤上，秤也開始有讀數，由這段力學作用與時間的關係，可推論水粉比1:2.25的咖啡渣流體，應可視為一種非牛頓流體。



圖 壓克力柱將整杯樣品抬起

## 2. 咖啡渣有效高度與等粗壓克力棒的受力

### (a) 咖啡渣流體樣本加壓

初始高度 (mm)	加壓後高度(mm)	最大阻力 $f(gw)$	$f/f$ 樣本重
30	24	123.9	0.91
40	31	149.0	0.99
50	37	168.9	1.00
60	50	完全拉起	
70	61	完全拉起	

使用初始粉水比為1:2.25之咖啡渣流體，壓克力柱直徑10mm，填充後加壓。經實驗發現，咖啡渣流體之初始高度高於50mm 經加壓後即可完全拉起樣本，初始高度等於50mm的時候，磅秤讀數可短暫達到零，可完全拉起樣本，故之後的實驗中使用50mm 高的咖啡渣流體作為比較的主要對象。

### (b) 咖啡渣流體樣本未加壓

高度(mm)	最大阻力 $f(gw)$	$f/f$ 樣本重	壓克力柱單位阻力(Pa)
30	3.4	0.02	36.08
40	7.0	0.04	55.70
50	9.2	0.05	58.57
60	9.0	0.04	47.75
70	9.0	0.04	40.93
80	13.2	0.05	52.52

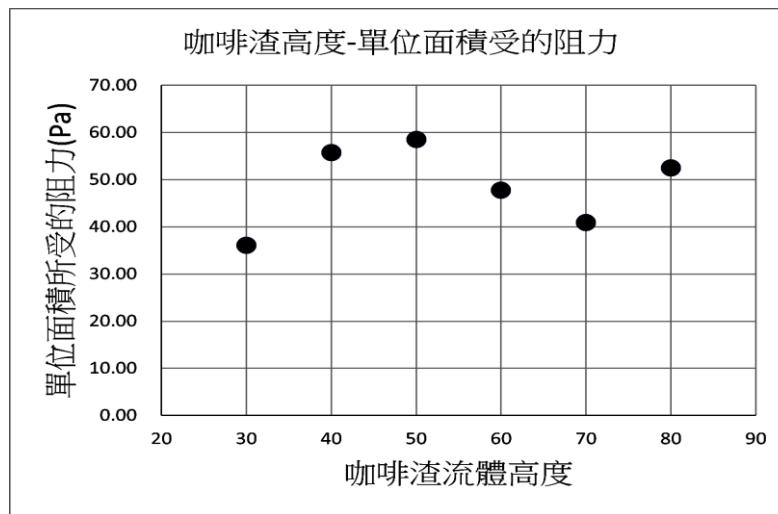


表  
圖 壓克力柱所  
受的單位阻力與  
咖啡渣流體高度

使用初始粉水比為1:2.25之咖啡渣流體，壓克力柱直徑10mm，填充後未加壓直接靜置。實驗後發現，樣本所能造成最大阻力與高度呈正相關，若將最大阻力除以樣本總重，除高度30mm的樣本外，其餘差異不大。若將阻力除以與壓克力柱的接觸面積，以壓克力柱單位面積所受的力來進行比較，發現除高度30mm的樣本外，其餘數值皆相似。

### 3. 不同粗細之壓克力棒單位面積所受的阻力

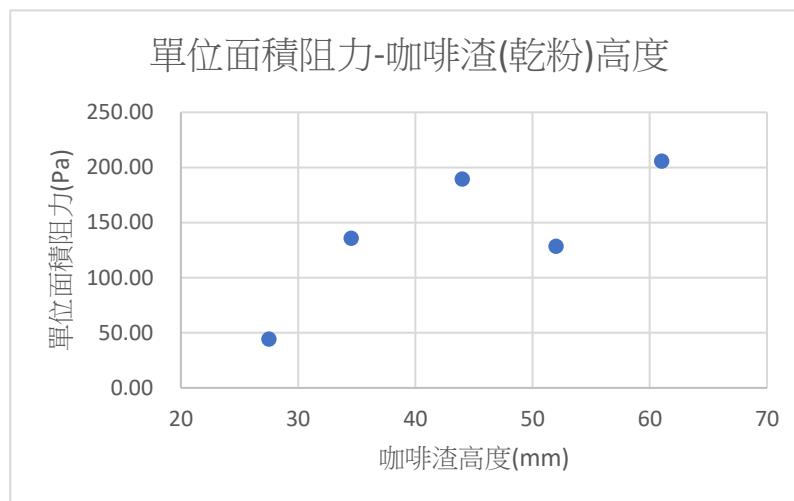
壓克力柱直徑(mm)	初始高度 (mm)	加壓後高度(mm)	最大阻力 $f(gw)$	$f/f$ 樣本重
10	50	37	165.9	1.00
20	50	36		完全拉起
30	50	44		完全拉起

使用初始粉水比為1:2.25之咖啡渣流體，壓克力柱直徑10mm、20mm、30mm，填充至50mm高後加壓靜置，由實驗結果發現，均可將樣本拉起

壓克力柱直徑(mm)	初始高度 (mm)	最大阻力 $f(gw)$	$f/f$ 樣本重	壓克力柱單位阻力(Pa)
10	50	9.2	0.045	58.57
20	50	125.9	0.65	400.75
30	50	>163.8		完全拉起

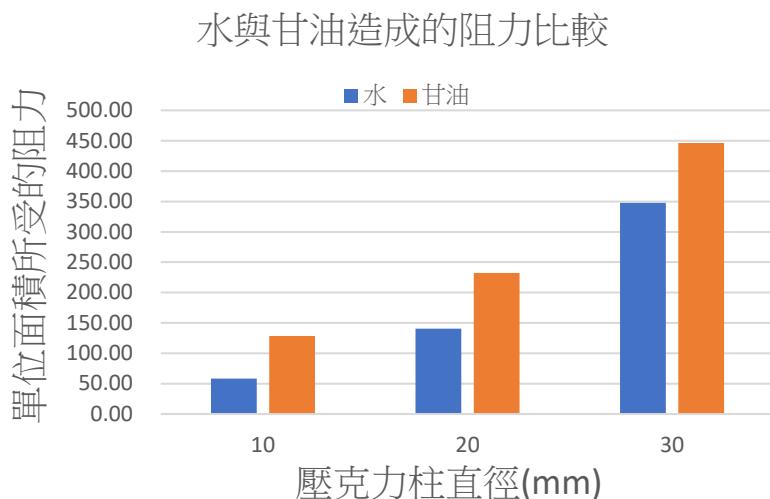
使用初始粉水比為1:2.25之咖啡渣流體，壓克力柱直徑10mm、20mm、30mm，填充至50mm高後未加壓直接靜置，由實驗結果發現，壓克力柱所受的最大阻力與壓克力柱直徑成正相關，且數值差異很大，30mm之壓克力柱所受的阻力，能將樣本直接抬起。

### 4. 乾咖啡渣所造成的阻力



使用極細粒的咖啡渣，直徑10mm的壓克力柱進行實驗，樣本裝填完成後加壓靜置。從結果得知，乾粉所能造成的單位面積的阻力，大致上與高度呈正相關，但數值趨於穩定。若與咖啡渣流體進行比較，則可發現乾咖啡渣造成的阻力小於咖啡渣流體所能造成的阻力。

## 5. 不同溶液造成之最大阻力



以相調質量的甘油替代水進行實驗，可以發現壓克力柱所受的阻力明顯增加，可推論液體在本實驗中應扮演相當重要的角色。

## 伍、討論

流沙是一種粉少水多型的非牛頓流體，在強大的壓力下很快就失去黏性。在流沙中快速移動的物體，會使它快速液化，沙逐漸往下部沉積，水分流出，流沙上層的流動性逐漸提升。沉積至下方的沙逐漸變得堅硬且密度變大，人體密度僅約  $1.02\text{g/cm}^3$ ，是很難被完全淹沒。過去陷入流沙的人，大都是因為無法動彈而脫水致死，所以電影上所演的完全沉入流沙中，是不符合現實狀況的。

正因為流沙受到壓力後，水會從泥沙中流出，所以在我們實驗的過程，並無法讓沉入物保持直立，造成了測量上的困難，也讓我們花了較多的時間在修改實驗的操作步驟，這是此次實驗較大的困難點。

咖啡渣的粗細會影響顆粒包覆水的能力。當顆粒的粒徑較大時，因為顆粒間的空隙較大，包覆水的能力相對較差。在相同的渣、水比例下，中粒徑的流沙模擬體表面較為乾燥，受到物體擠壓後的出水狀況也不明顯，這應該就是相對於細粒徑而言，中粒徑的覆水能力較差，水流到塑膠盆的底部靜置，無法在表面給予陷入物體浮力，所以出現圖中的景象。或許，我們可以調整咖啡渣與水的比例，看看能不能也有流沙的效果。

從實驗結果顯示：如果用瞬間拉力拉扯沉入物，是可以用較小的拉力拉起沉入物，甚至可以小於物重。這是因為砝碼在瞬間掉落的時候，藉由速度的改變，產生

了高衝量，進而幫助繩子拉起物體；如果慢慢放開砝碼，則因沒有向下的衝量幫助拉動物體，就需要比較大的力量，才能達到目的。然而，高衝量表面看起來的拉力比較小，但實際對物體(尤其是人體)的損害如何，目前無法測量推算。

由第二階段的實驗中，可推論陷入咖啡渣流體中物體的受力與深度、是否受壓有關，其中受壓造成影響應是來自於咖啡渣在整個空間中所佔的體積比，當咖啡渣流體受壓時，咖啡渣體積密度增加、兼具變小，彼此間的影響力加強，也因此能對陷入其中的壓克力柱造成較大的阻力。對應到流沙的情境，通常陷入流沙中的生物，第一個反應就是掙扎，掙扎可能就造成對周圍流體的施壓，使周圍流體形成更穩固的結構，變得更難以掙脫。

而藉由壓克力柱拔出的實驗，由力學分析解果可推論，咖啡渣流體可視為一種的非牛頓流體，對其施力確實可造成結構的改變，但由實驗中發現，阻力的變化似乎需要一些時間，推論是因壓克力棒要從咖啡渣流體中拔出時，其底部的空腔會先由水填充，水再帶動咖啡渣流入，短暫的時間後，由於咖啡渣的流動，導致原本的結構改變、平衡崩塌，因而造成壓克力棒受到阻力的變化。

## 陸、結論

1. 將磨豆機磨出來的咖啡渣進行粒徑分群後，發現細粒徑群(粒徑在 1mm 以下) 是比較理想的原料，來模擬流沙。
2. 以細粒徑群做為模擬流沙的原料時，咖啡渣與水的最佳比例為 1:2.25
3. 緩慢的垂直拉力須超過物體的重量，才能拉起沉入物；瞬間拉力確實能以較少的力拉起沉入物，但是否會造成物體的損傷，尚待研究。
4. 咖啡渣流體會因受力壓縮而使阻力顯著增加；物體沉入的接觸面積越大，所受阻力越大。
5. 物體受外力拉拔時，其所受的阻力大小與外力作用的時間有關，可說明咖啡渣流體應為一種非牛頓流體。
6. 混合液體的黏性會顯著咖啡渣流體所造成的阻力。

## 柒、未來工作

1. 收集更多不同物體的拉力資料，分析壓力、樣品形狀及瞬間拉力對陷入流沙物體的影響。。
2. 分析不同粒徑大小咖啡渣的各項數據，找出粒徑與阻力間的關係。
3. 分析不同形狀的插入體之各項數據，找出形狀或接觸面性質對阻力的影響。
4. 對比不同材質的細顆粒流體，找出細顆粒流體對阻力的影響。
5. 建立更好的咖啡渣一流沙模型，以探討顆粒流體的物理特性。

## 參、參考文獻

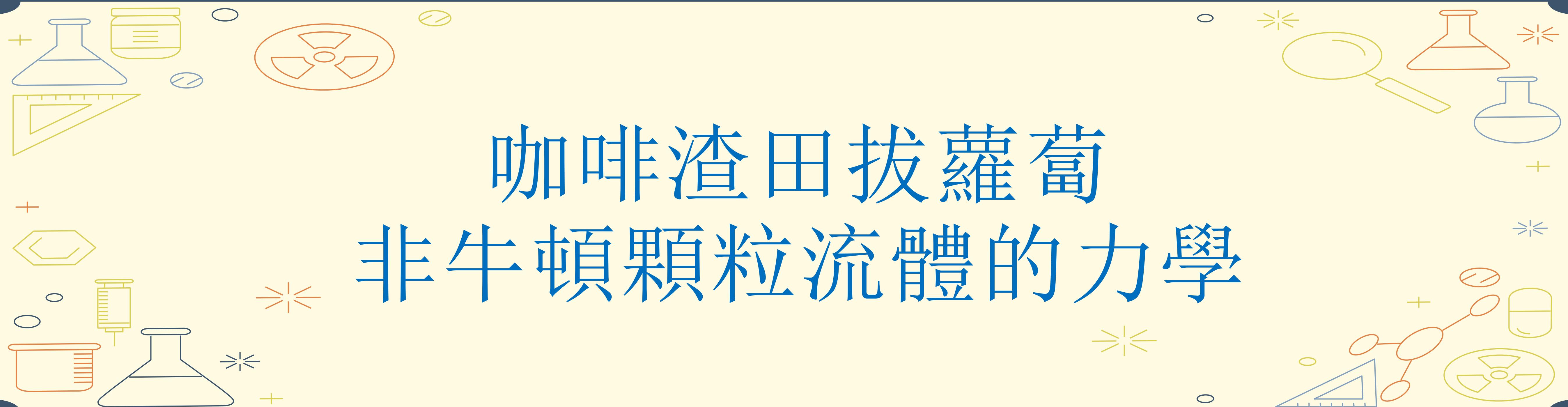
1. 『死亡陷阱?流沙』，許暉琳、謝佩含、邱靖巧(1998) ，第38屆全國中小學科展作品
2. 『水中沙畫家』，林芊妤(2017) ，第57屆全國中小學科展作品
3. 『沙瀑我愛羅的流沙忍術』，林庭妤、楊晴煊、洪邦碩、郭哲聿、陳品嫣、張瑜晏(2019) ，第59屆全國中小學科展作品
4. Quicksand!, Khaldoun, A., Wegdam, G., Eiser, E., & Bonn, D. (2006).. *Europhysics News*, 37(4), 18-1

## 【評語】030110

本作品以咖啡渣加水模擬流沙的行為，探討不同粒徑與混合比例對物體埋入與拔起所需力量的影響，主題富有創意且貼近生活，展現出作者從日常經驗出發進行科學探究的能力與巧思。建議作者可進一步思考或設計方法驗證咖啡渣混合系統是否具備非牛頓流體的特性，並嘗試與其他已知的非牛頓流體或實際沙子模擬系統進行比較，將有助於提升模型的合理性與說服力。

作品海報

# 咖啡渣田拔蘿蔔 非牛頓顆粒流體的力學



# 摘要

在電影場景中的流沙是可以吞沒人體的自然現象，但實際上流沙能覆蓋人體的深度並不深。從文獻報告顯示，流沙是非牛頓流體的一種，但表現出來與太白粉所製的非牛頓流體不同。利用咖啡渣來建立流沙的受力模型，發現不論在阻力的表現、表面出水的現象與物體沉入的狀況與流沙都極其相似，以咖啡渣作為流沙的模型，可以減少使用玉米粉或麵粉所造成的浪費，同時可控制粒徑大小，測量受困者與流沙間的受力關係，立新的研究模型。在定力的實驗中，對物體施以垂直拉力，瞬間拉力約為物重的80%即可拉起；若沒有瞬間拉力，則需物重的120%以上。在動態的實驗中，物體所受的阻力會因著受力擠壓、含水量多寡、接觸面積、力量作用時間的不同而有差異。

## 前言

- 彰和濕地導覽，踩在爛泥的瞬間，覺得自己被「吸住」，而且有下沉的現象，但僅下沉到一定程度，就不再下沉。
- 1960年代時，獵人陷入流沙區，出動直升機救援，卻上、下半身分家，慘死當場。
- 非牛頓流體的特色，就是受壓後會變得堅硬，所以才會卡住下半身。
- 甚麼是『非牛頓流體』，什麼是『流沙』？我們應該從那些角度來了解流沙呢？



圖1 參觀彰和濕地

## 文獻回顧

### \* 關於「流沙」：

流沙(Quicksand)可分成兩大類：

- 乾流沙(dry quicksand)是指在沒有水的情況下行為類似液體的鬆散沙子，主要出現在沙漠中，是我們一般在影片中看到的情景。
- 一般流沙(normal quicksand)是沙子、水和其他細小物質(淤泥、黏土)的混合物，其中水懸浮著沙粒，使它們表現得像液體一樣，在震動力或水流動力作用下發生液化、流動的現象。而一般流沙又可以分成兩大類：
  - 真流沙：砂土中含親水性的膠體物質，含水不易排出，其流動性不易消除。
  - 假流沙：砂土中不含親水性的膠體物質，容易排水，經過排水後流動性即消失。。

不管是真流沙還是假流沙，厚度大概都只有幾公分厚，與電影中會把人完全吞沒的景象是截然不同的。

表1. 過去的科展研究與本實驗的比較

	如何判斷流沙	如何流化	器材大小	結論
咖啡渣	觀察重物是否會下沉，再看流體是否出水	將水加入咖啡渣使咖啡渣呈現懸浮狀態	31*19.5*15(cm <sup>3</sup> )	1. 細粒徑群(粒徑在1mm以下)是模擬流沙較理想的原料 2. 以細粒徑群做為模擬流沙的原料時，咖啡渣與水的最佳比例為1:2.25
死亡陷阱(38屆)	放置小人並觀察是否下沉	用水與沙子混合	28.4*18.4*16(cm <sup>3</sup> )	1. 只有在水流上方才會有流沙的現象產生 2. 水位差越大，沙面擾動越大，流沙是水在沙體中流動所產生的現象，因為無法承受物體的重量而導致，物體下陷
水中沙畫家(57屆)	觀察是否有一部分沙子浮到較上面，一部分沉到較下面	先形成一個環，再形成一個圓	透明魚缸	1. 濕沙在水中形成一個中空圓環內還存在一個圓才算成功 2. 濕沙可以形成一個中空圓環乾沙則不行 3. 濕沙由於壓力的關係會形成渦環運動，以至於在水中形成一個中空圓環特殊形狀
沙瀑(59屆)	當流體由固體粒子的床體下方通入時，粒子互相分開，呈懸浮狀	以電動送風機注入空氣，使沙子呈懸浮狀	10*10*?(cm <sup>3</sup> )	1. 原本沒有氣流時，固體平均分布，當氣流由氣孔往上噴發時，固體顆粒被氣流帶往上移動，氣流穿梭在顆粒之間，導致顆粒間的距離變大，當氣流由氣孔噴出時風速快且壓力小，故上層的沙子會往下，而下層的沙子就會往上 2. 最佳的流沙是泡泡型和翻滾型

### \* 關於「非牛頓流體」：

- 非牛頓流體是一種流體力學的概念，其主要特徵是：流體的黏度會因為受到的剪應力或速度而變化，剪應力越大，黏度會增加，甚至成為暫時性的固體。
- 非牛頓流體如果要『固化』，需要使用大力拍打才能成型。但對流沙而言，即使人不動，也會被下層的泥沙牢牢抓住，這是不是屬於非牛頓流體的固化現象？如果是，到底要造成明顯的固化，需要多大的力量，是我們想要知道的

### \* 使用咖啡渣的好處

- 環保不浪費食物
- 粒徑大小可以控制，便於模型的建立
- 可重複使用，減少實驗材料本身所造成的不準確性

## 研究目的

- 咖啡渣和水的比例對於物質的下沉速率是否有影響。
- 咖啡渣粒徑大小對於流沙模型建立的影響
- 咖啡渣和水比例相同的情況下，物體脫困所需要的拉力值。
- 建立流沙受力的測量方式。
- 建立流沙的觀測模型

## 設備與器材

材料：

- 咖啡渣：來自咖啡店及便利商店製作拿鐵或美式咖啡的咖啡渣，經市售麵粉篩網過篩，並以60°C烘箱烘乾後備用。
- 太白粉：購自家樂福。

- 其他器材：

砝碼： 用於提供拉物體的拉力	錐形瓶、血清瓶、試樣瓶： 裝載物質，進行測試	定滑輪： 用於拉起物體和使物體落下	燈架： 用於固定掉落高度	電子秤： 用於測量咖啡渣與蒸餾水的重量
塑膠盒： 用於裝咖啡渣和水的混合液	地震儀： 提供穩定的搖晃力	拉力實驗組： 從咖啡渣中拉起壓克力柱	壓克力圓柱體： 做為拉起的物體	壓克力容器： 填裝咖啡渣

## 步驟及結果

### 第一部分：咖啡渣流沙模型體的建立

#### 實驗(一) 利用咖啡渣與蒸餾水混合後模擬流沙

##### 實驗步驟

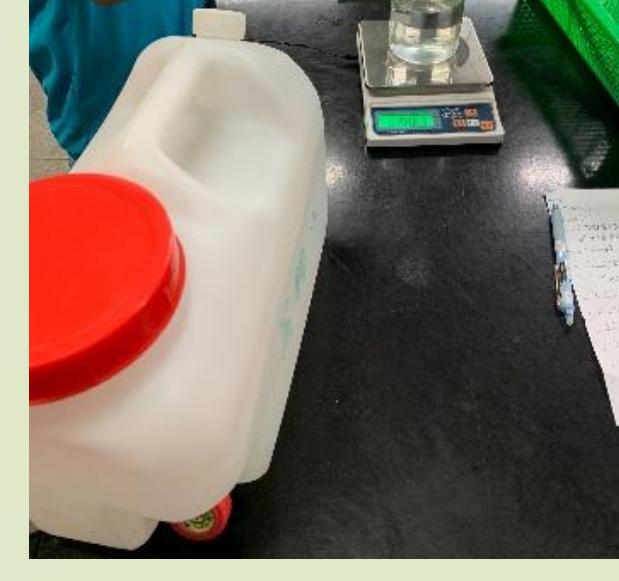


圖2a 測量咖啡渣重量

圖2b 測量水的重量

圖2c 加水進咖啡渣

圖2d 攪拌

圖2e 放100g的砝碼

# 步驟及結果

## 實驗(一) 利用咖啡渣與水混合後模擬流沙

實驗結果: 將以咖啡渣與水的比例為 **1:2.25** 作為配方進行實驗

表2. 咖啡渣與水的比例實驗

咖啡渣:水	耗時/是否沉下去	備註
5:3.5	20分鐘以上仍未沉下去	太白粉非牛頓流體的比例
2:1	20分鐘以上仍未沉下去	
1:1	20分鐘以上仍未沉下去	
1:1.5	20分鐘以上仍未沉下去	
1:2	20分鐘以上仍未沉下去	
1:2.25	約5分鐘後沉下去	最終比例
1:2.5	直接沉下去	
1:3	直接沉下去	

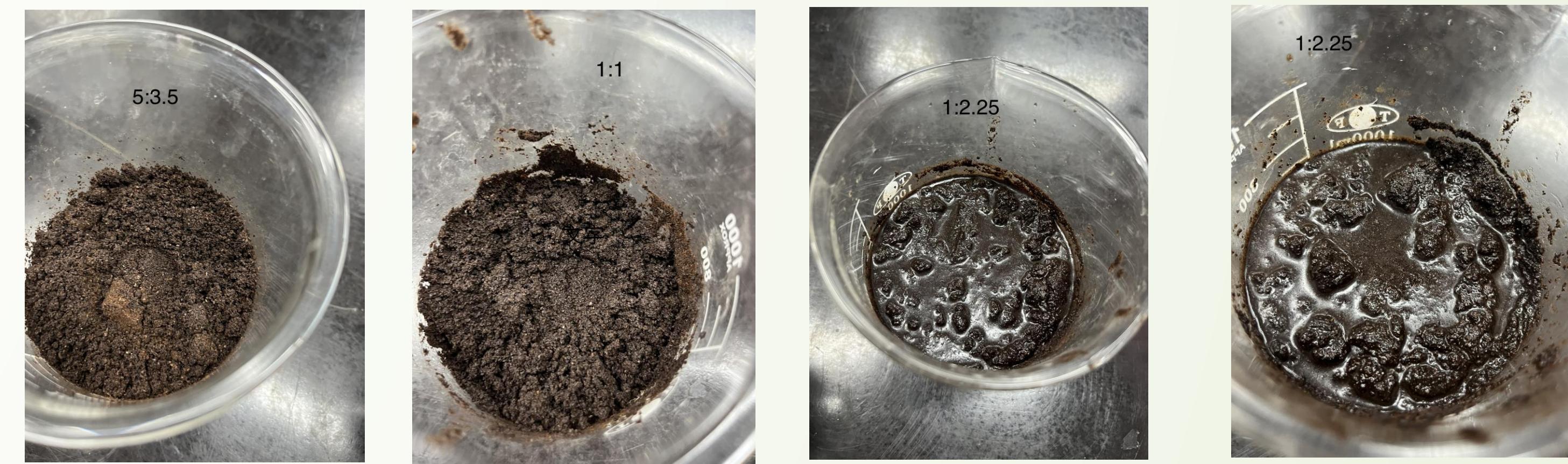


圖3a 粉水比5:3.5

圖3b 粉水比1:1

圖3c 粉水比1:2.25(剛配好)

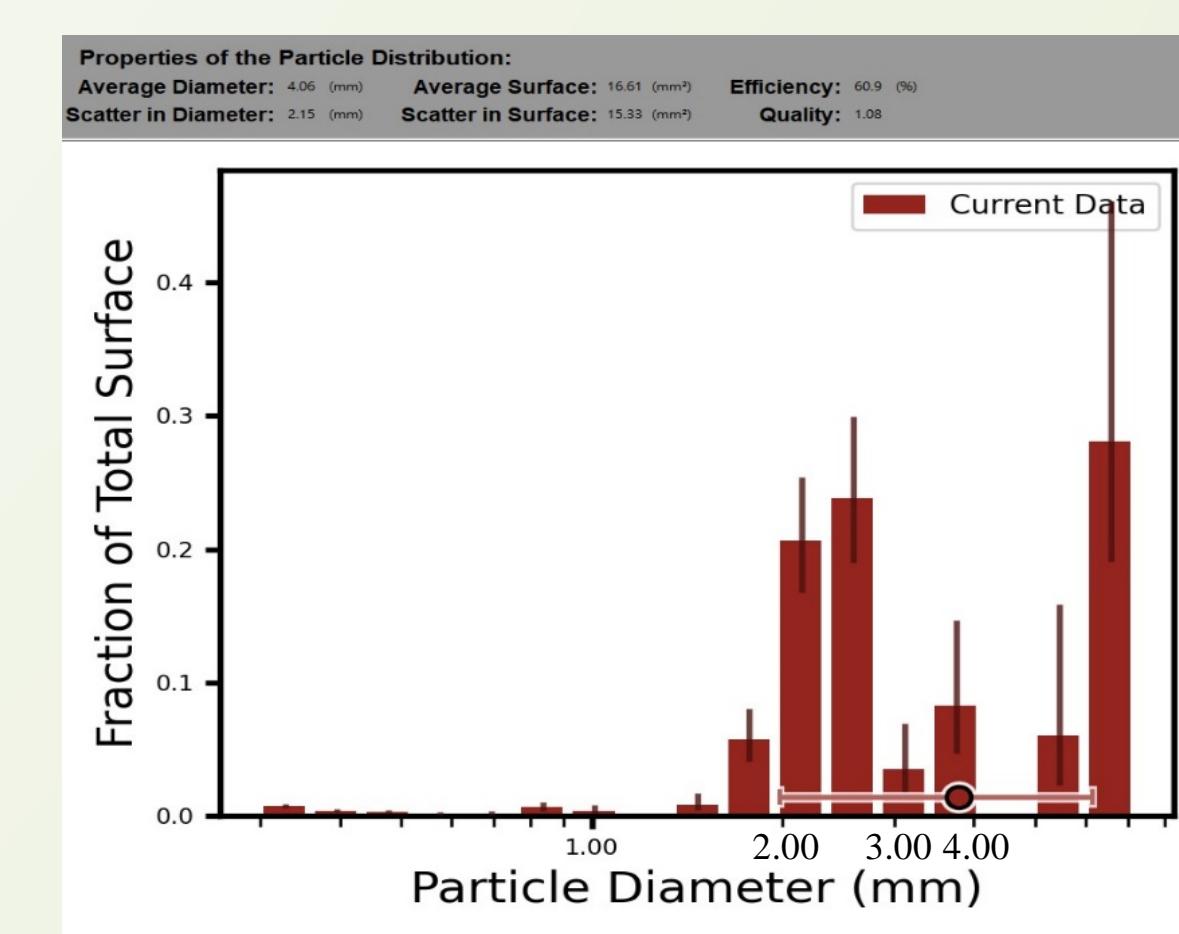
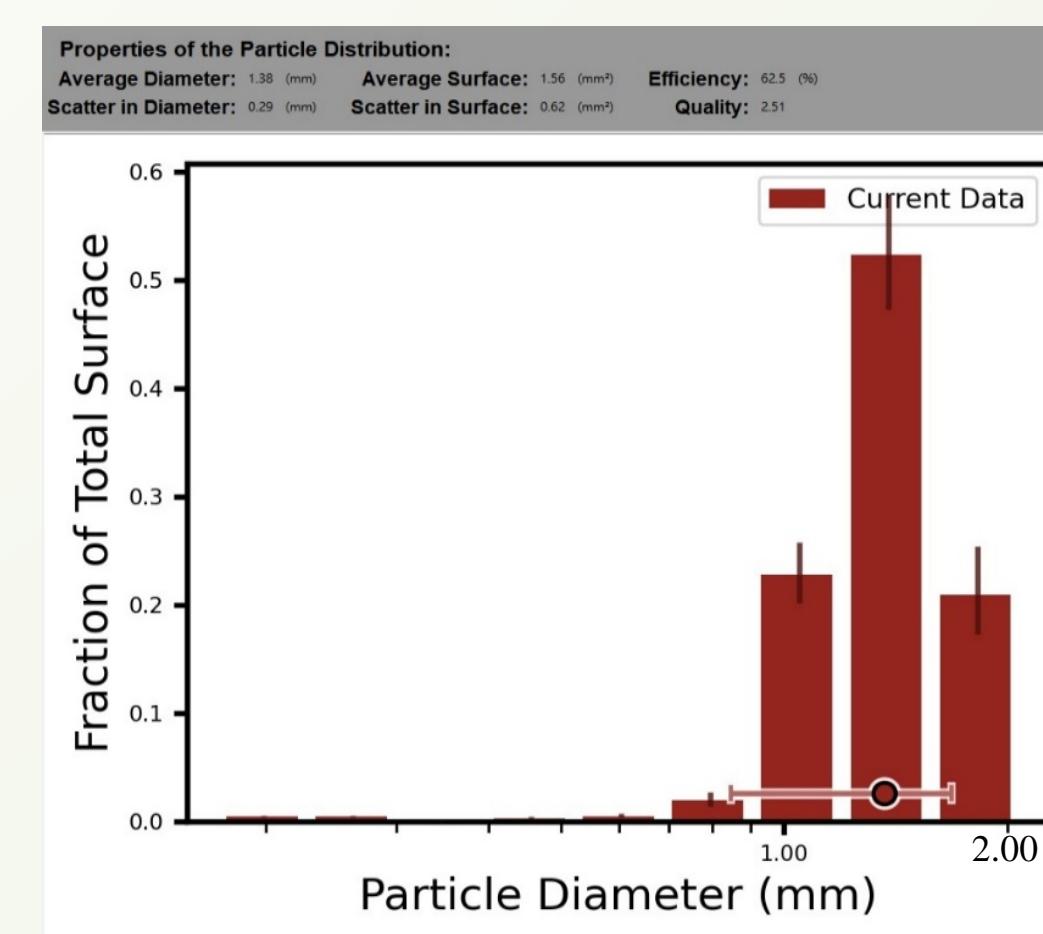
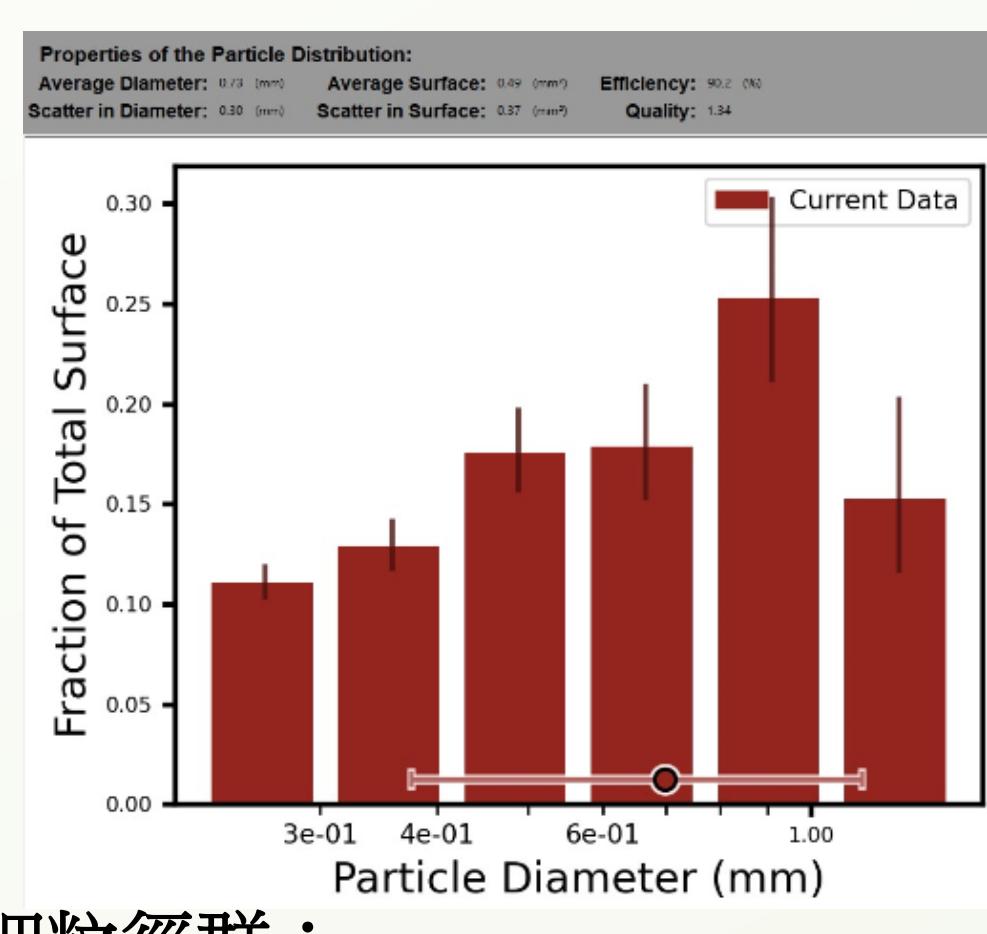
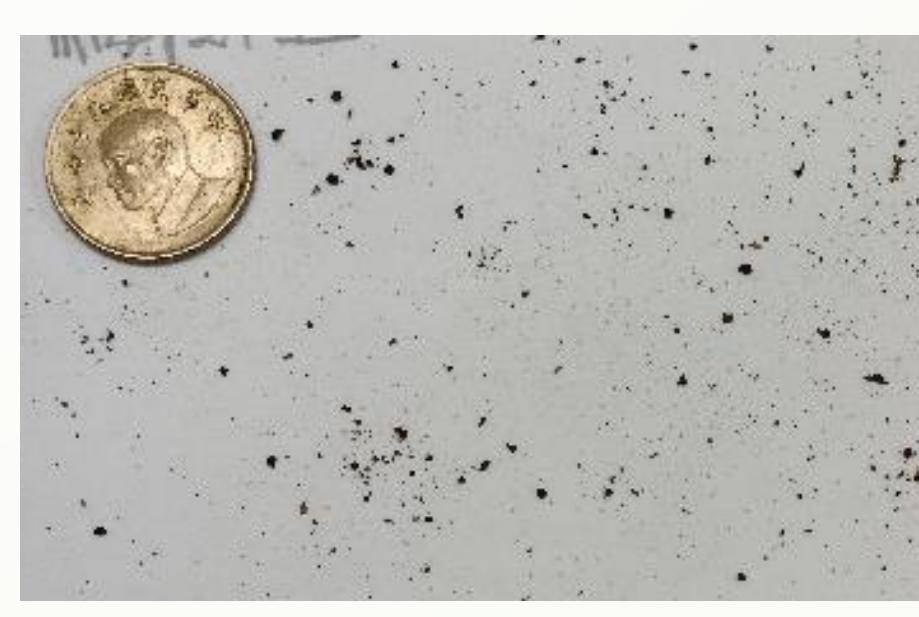


圖3d 粉水比1:2.25的出水狀況

## 實驗(二) 粒徑大小的篩選與分析

實驗步驟：將照片經過 *Coffee Particle Size Distribution by Jonathan Gagne* 軟體分析粒徑

實驗結果：



細粒徑群：

粒徑主要分布在 **1mm** 以下，

平均的粒徑長為 **0.73 mm**。

顆粒分布比較平均，最高約佔 **25%**。

中粒徑群：

粒徑主要分布在 **0.7 到 2.00 mm** 之間，

平均的粒徑長為 **1.38 mm**。

其中，粒徑長在 **1.38mm** 左右的顆粒，佔了約 **55%**。

粗粒徑群：

粒徑主要分布在 **2.00mm** 以上，

平均的粒徑長為 **4.06 mm**。

## 實驗(三) 利用模擬流沙觀察物體陷入與拉出的狀況及力量大小

實驗步驟：



圖 4a. 以鐵架測試式樣瓶掉落及沉入狀況



圖 4b. 將容器拉到120cm



圖 4c 將容器拉到120cm

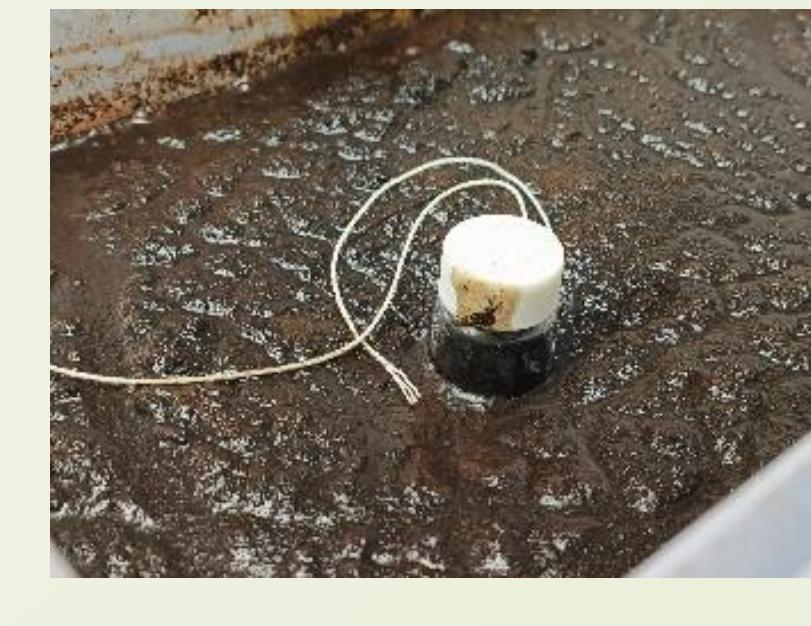
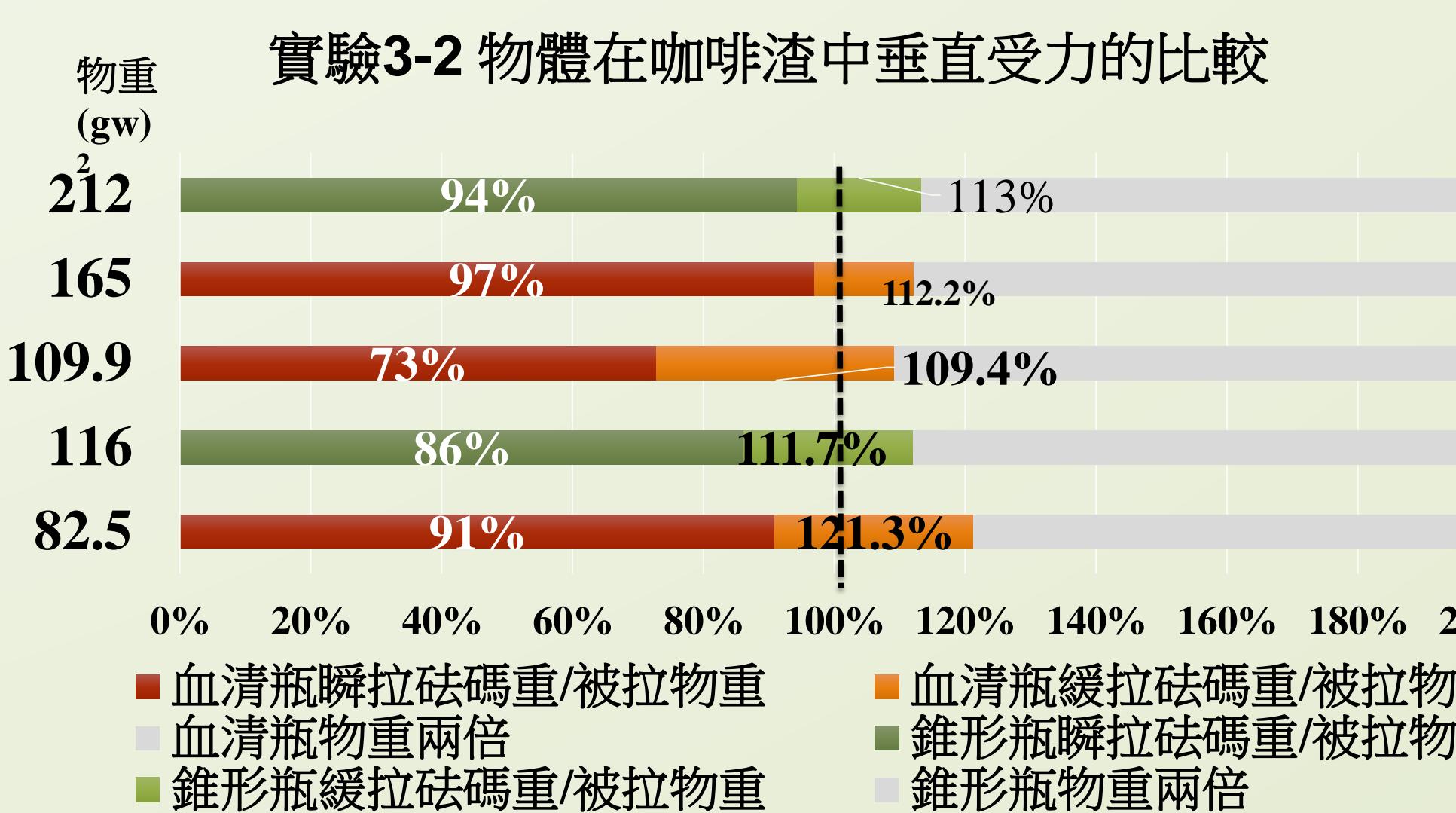
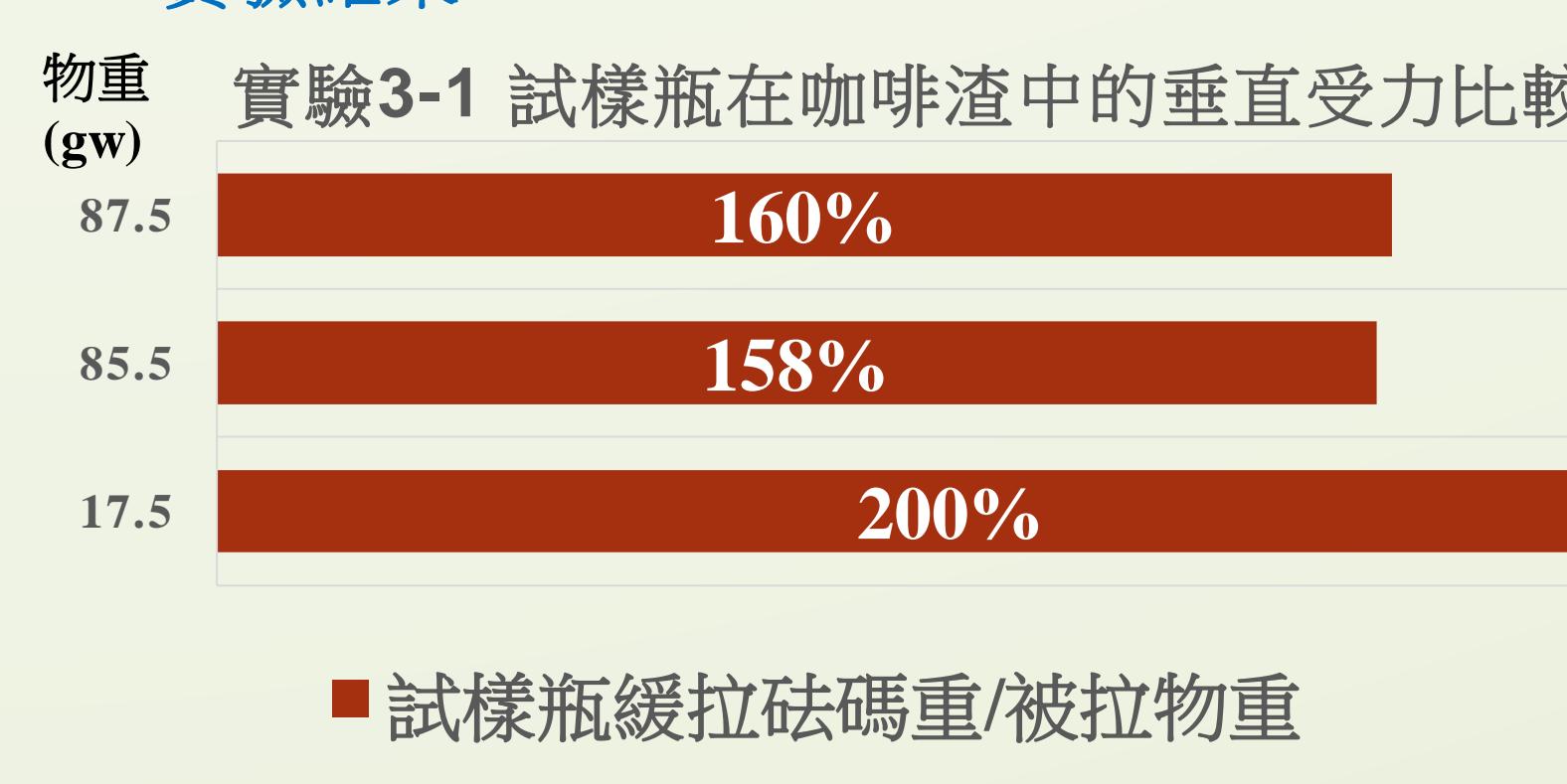


圖 4d 容器掉入流體時的狀況



圖 4e 拉起後的流體狀況

### 實驗結果



\* 從左圖顯示：  
錐形瓶如有瞬間拉力，  
拉力約為物重的 **90%**；  
沒有瞬間拉力，則需約物重的 **110%** 才可拉起。  
血清瓶如有瞬間拉力，拉力約為物重的 **80%**；  
沒有瞬間拉力，則需約物重的 **110%** 才可拉起。

## 實驗(四) 物體在不同粒徑的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

實驗步驟

1. 依 **咖啡渣:水 = 1: 2.25** 的比例，配置 **中粒徑群** 的模擬流沙。

2. 依照實驗(三)的步驟進行實驗，討論不同粒徑群對陷入流沙物體的影響。圖 5a 細粒咖啡渣表面情況圖 5b 中粒咖啡渣表面情況

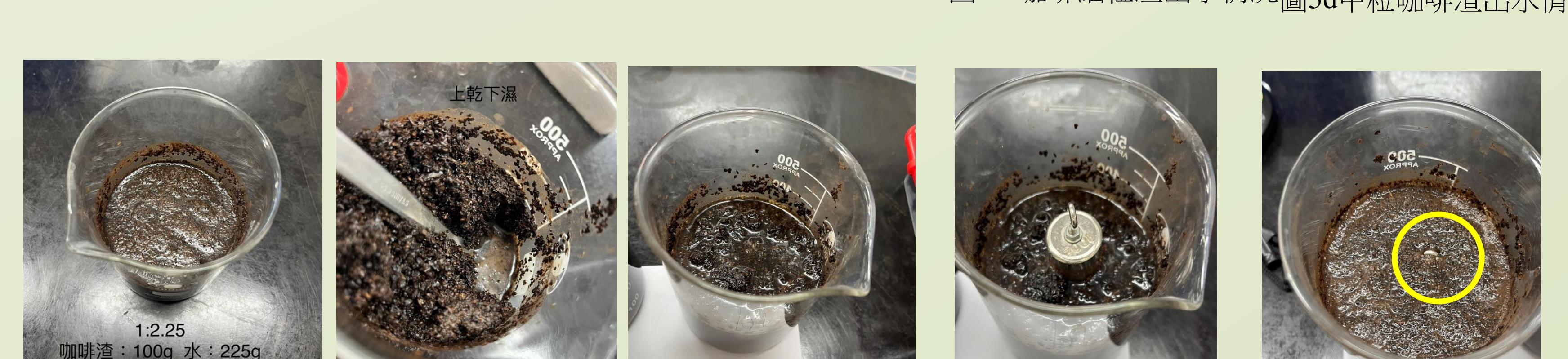
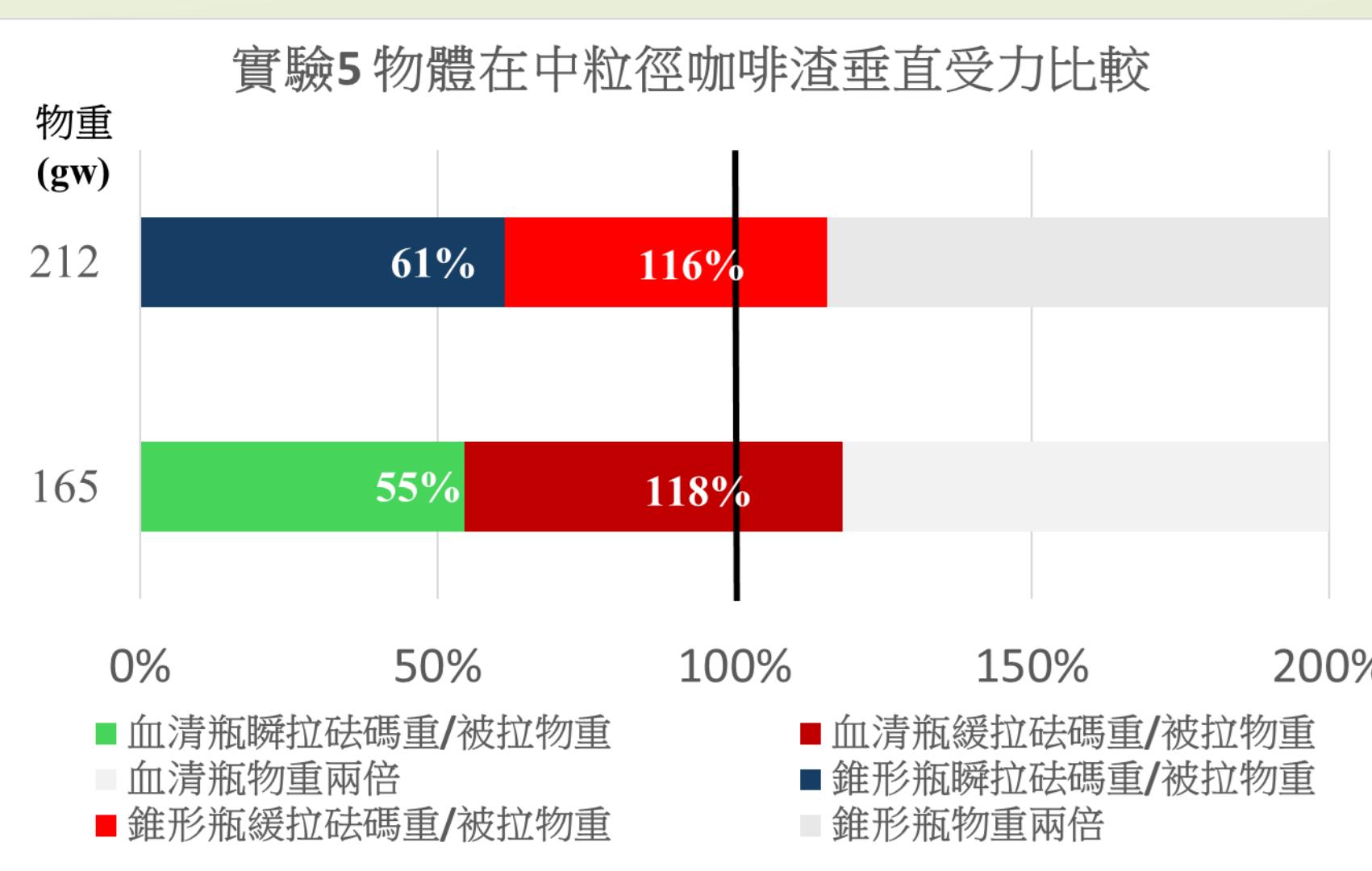


圖6a 粉水比1:2.25

圖6b 水粉分離

圖6c 粉水比1:2.5

圖6d 粉水比1:2.5砝碼測試

圖6e 粉水比1:3.0砝碼測試

## 實驗(五) 物體在太白粉的流沙模型中陷入與拉出的狀況及力量大小

實驗結果

實驗5 太白粉非牛頓流體中血清瓶、錐形瓶垂直拉力實驗

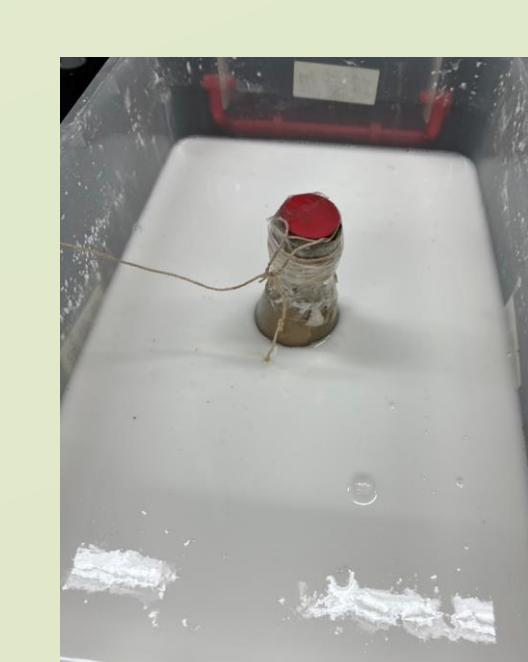
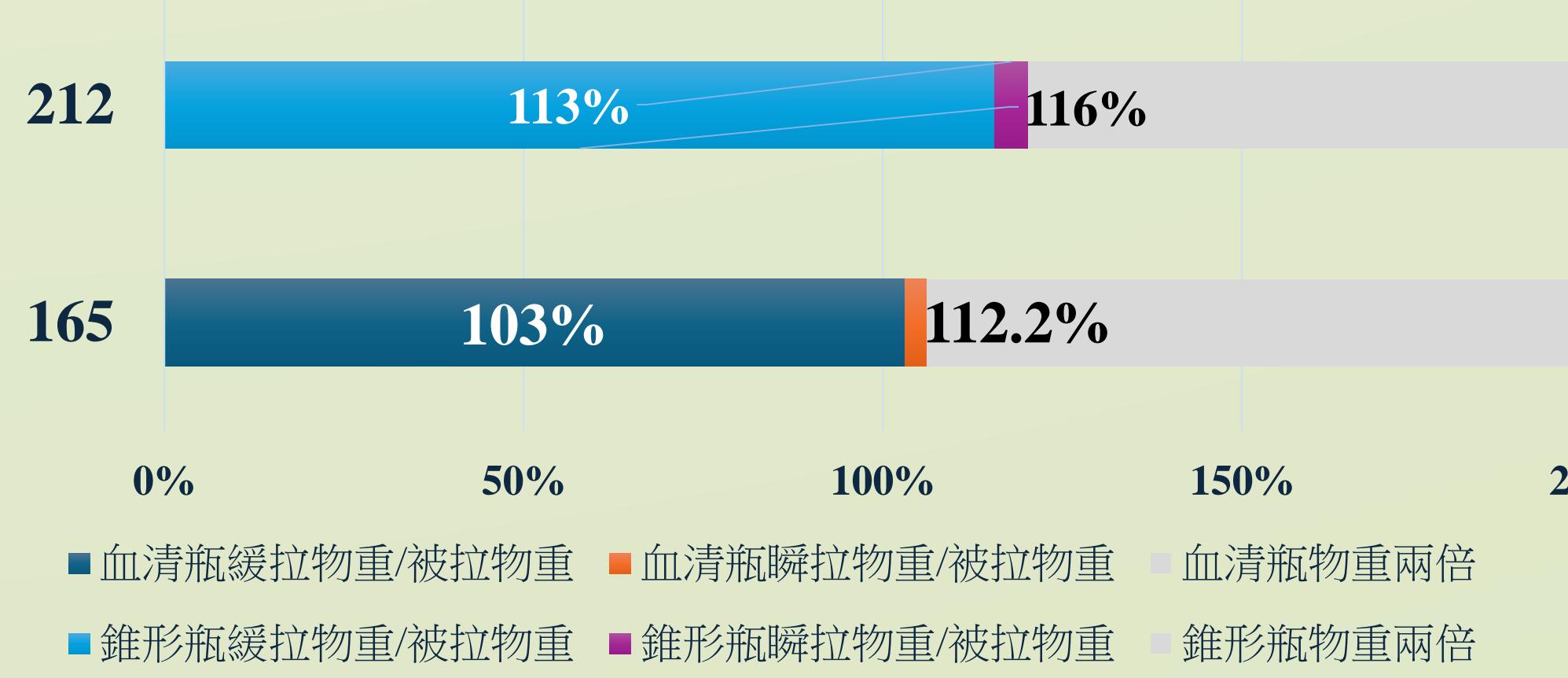


圖7a 垂直施力



圖7b 垂直施力拉起瞬間

# 步驟及結果

## 第二部分：咖啡渣顆粒體的力學分析

### 一、咖啡渣粒徑再分類：

利用28目篩網，將原細粒徑咖啡渣再分成細粒(1.0mm到0.6mm)與極細粒(0.6mm以下)

### 二、咖啡渣流體的拉力實驗

將咖啡渣流體依照粒徑、乾濕、加壓與否等不同變因，分別放入壓克力容器中，再放入不同直徑的圓柱體，以拉力實驗組測量拉力及重力的差異，用以推測咖啡渣流體的相關力學性質。

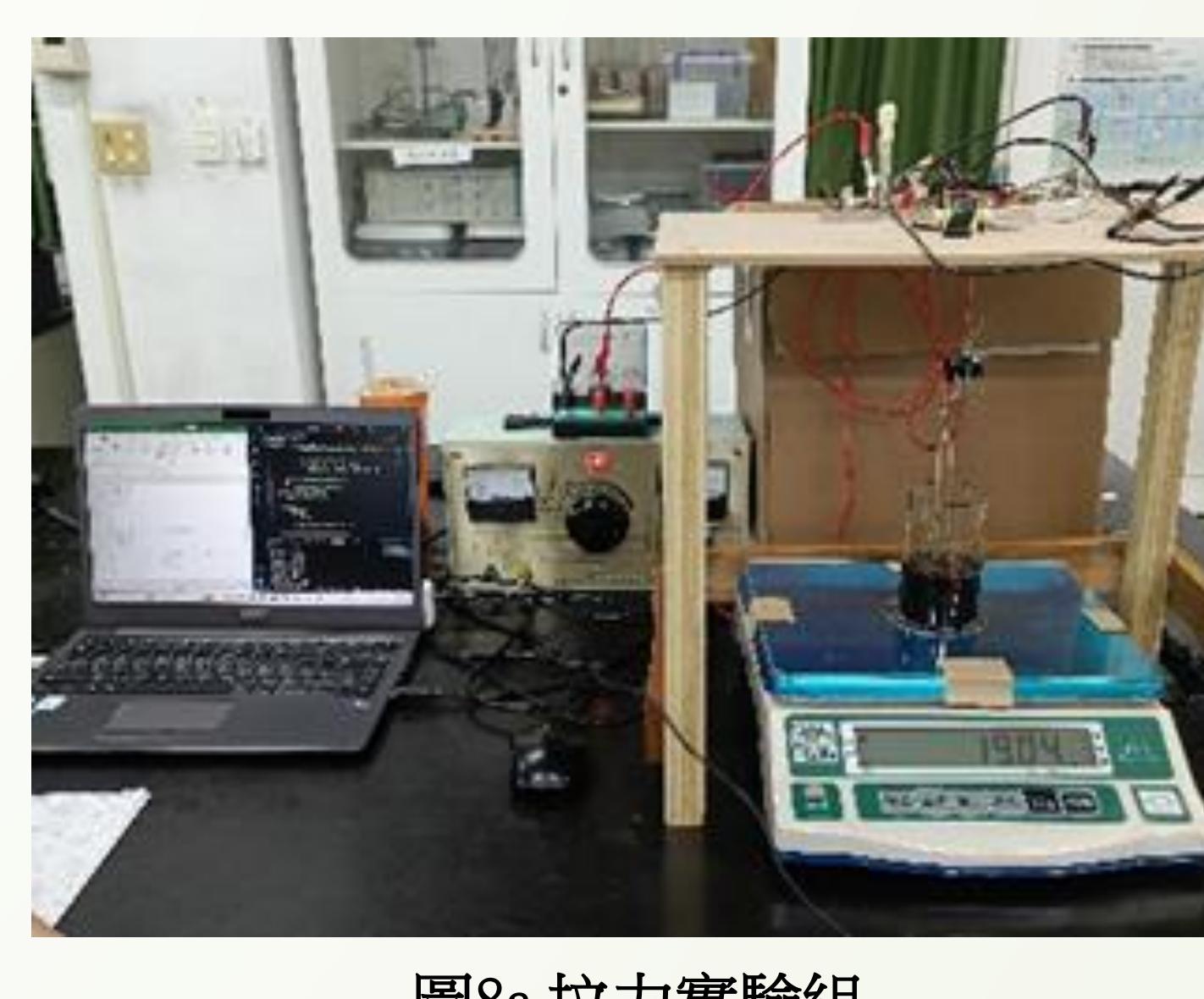
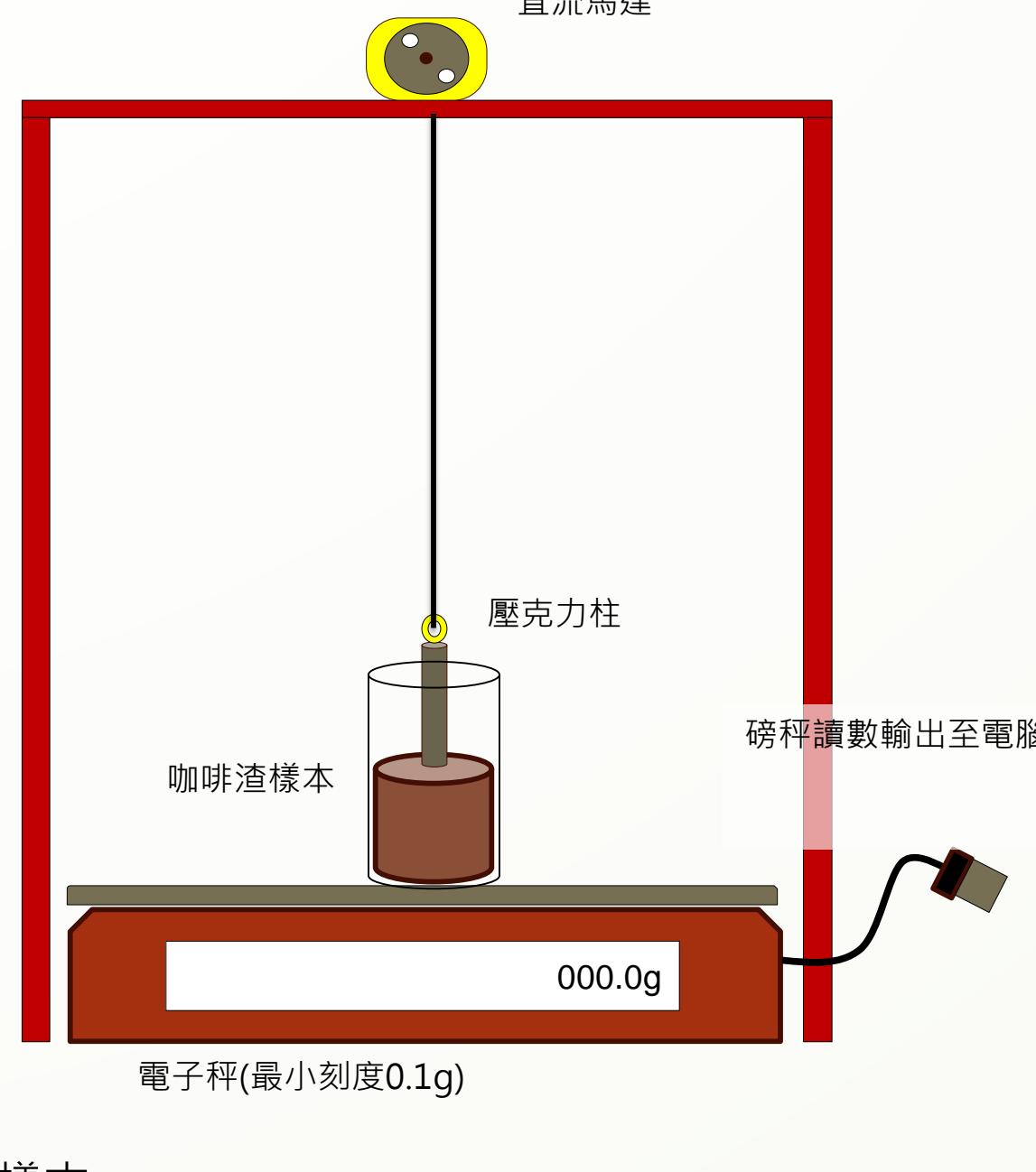


圖8a 拉力實驗組

製作樣本

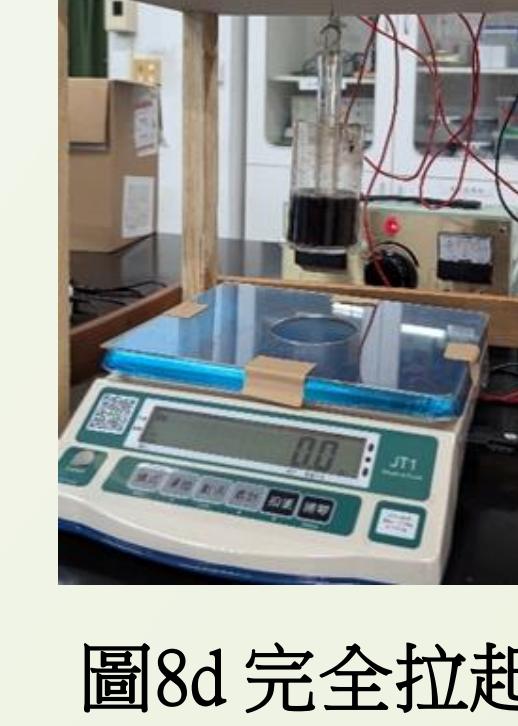
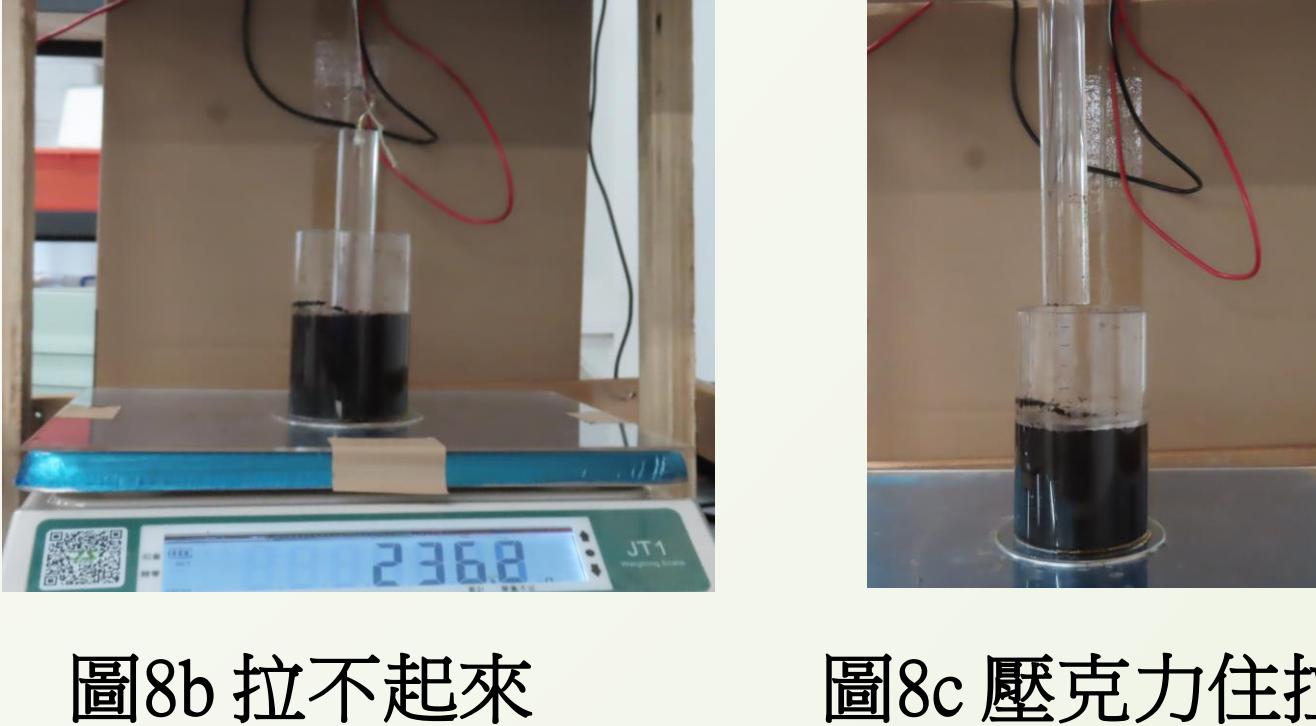
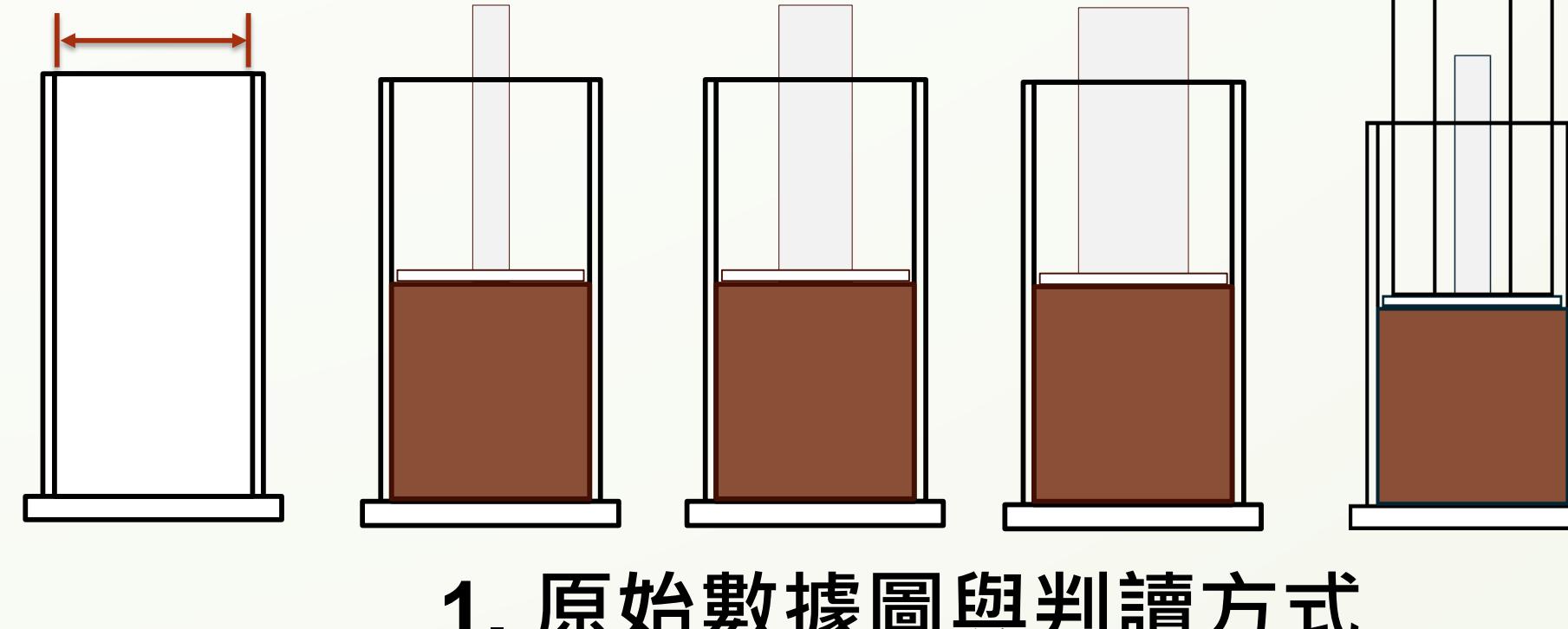
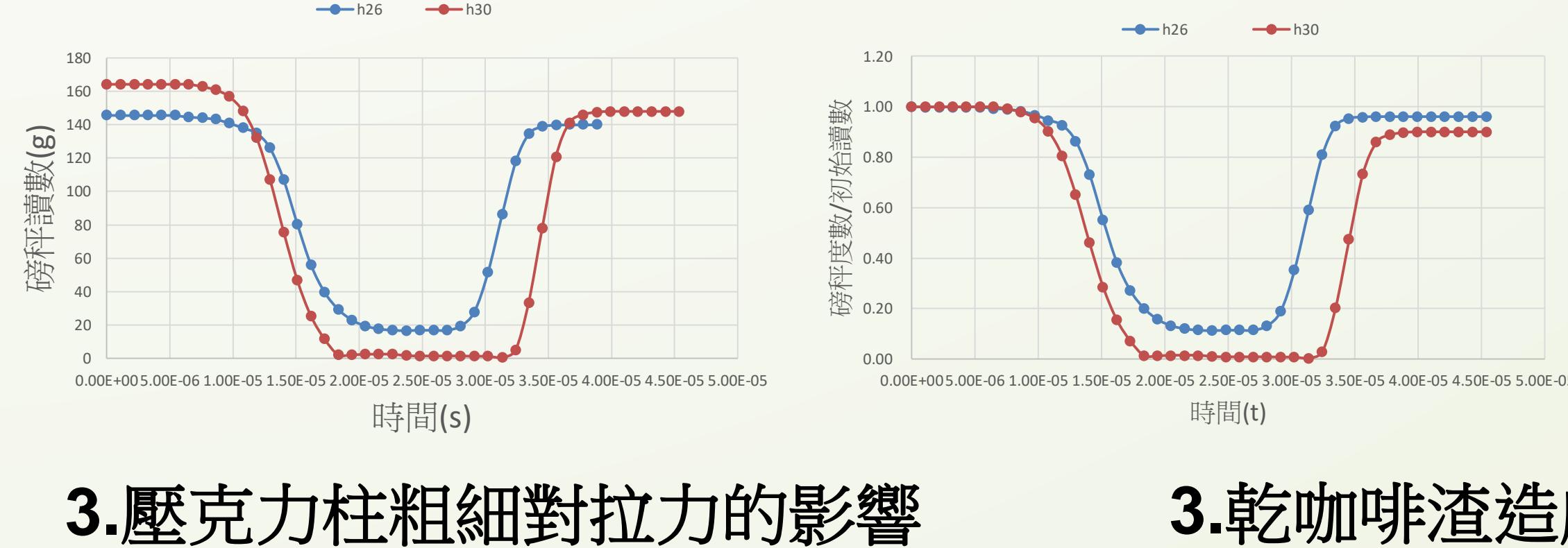


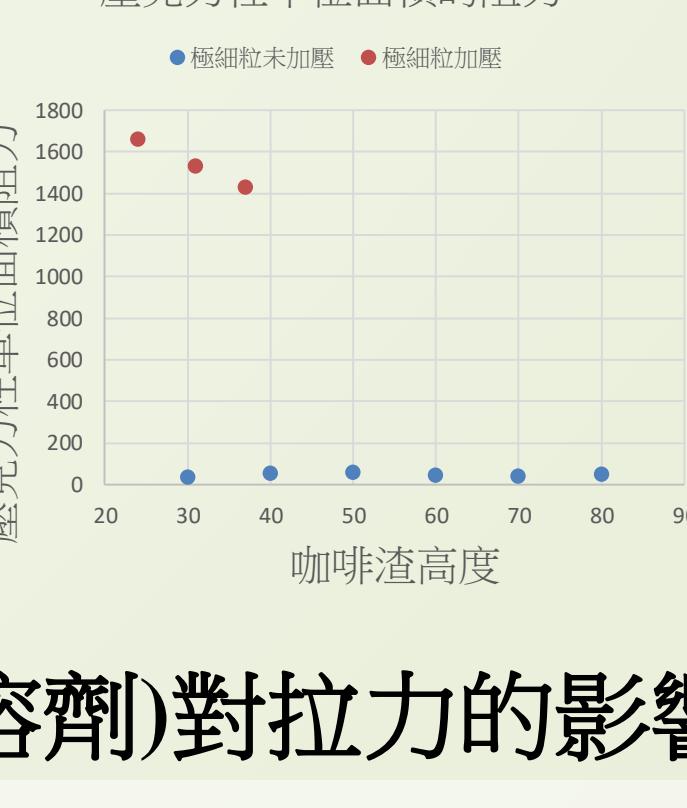
圖8b 拉不起來 圖8c 壓克力住拉起 圖8d 完全拉起

### 1. 原始數據圖與判讀方式



### 2. 不同高度咖啡渣對拉力的影響

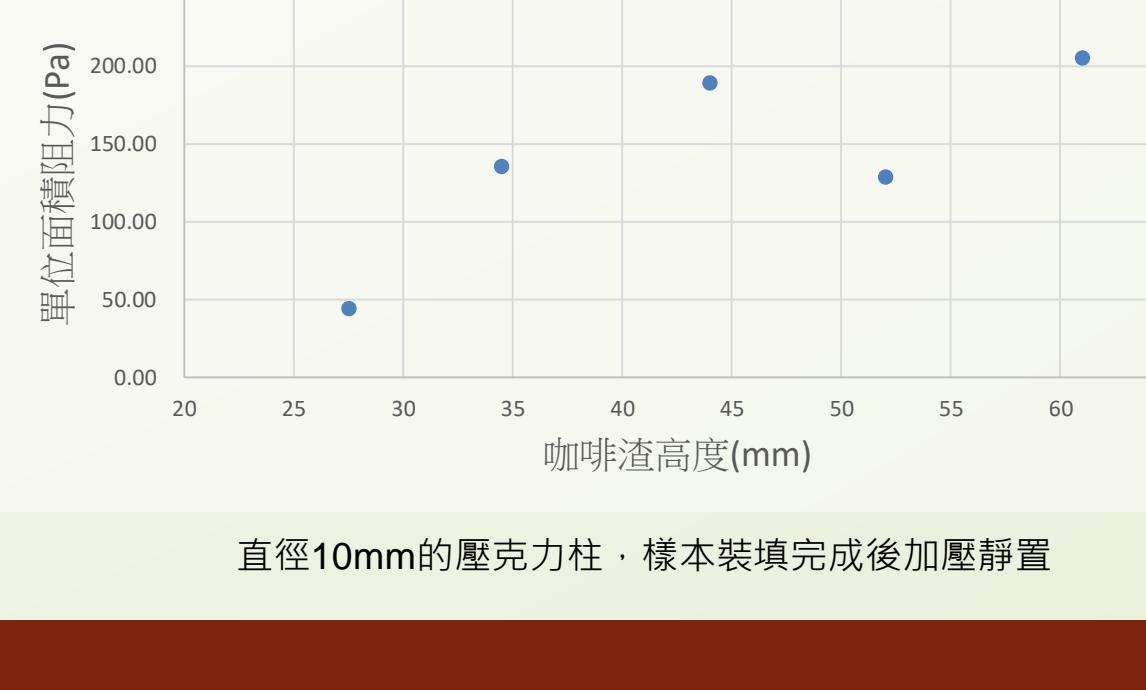
初始高度 (mm)	加壓後高度 (mm)	最大阻力 f/gw	f/樣本重	壓克力柱單位面積阻力 (Pa)
極細粒加壓				
30	24	123.9	0.91	1660
40	31	149	0.99	1530
50	37	168.9	1	1430
60	50	完全拉起		
70	61	完全拉起		
極細粒未加壓				
30		3.4	0.02	36.08
40		7	0.04	55.7
50		9.2	0.05	58.57
60		9	0.04	47.75
70		9	0.04	40.93
80		13.2	0.05	52.52



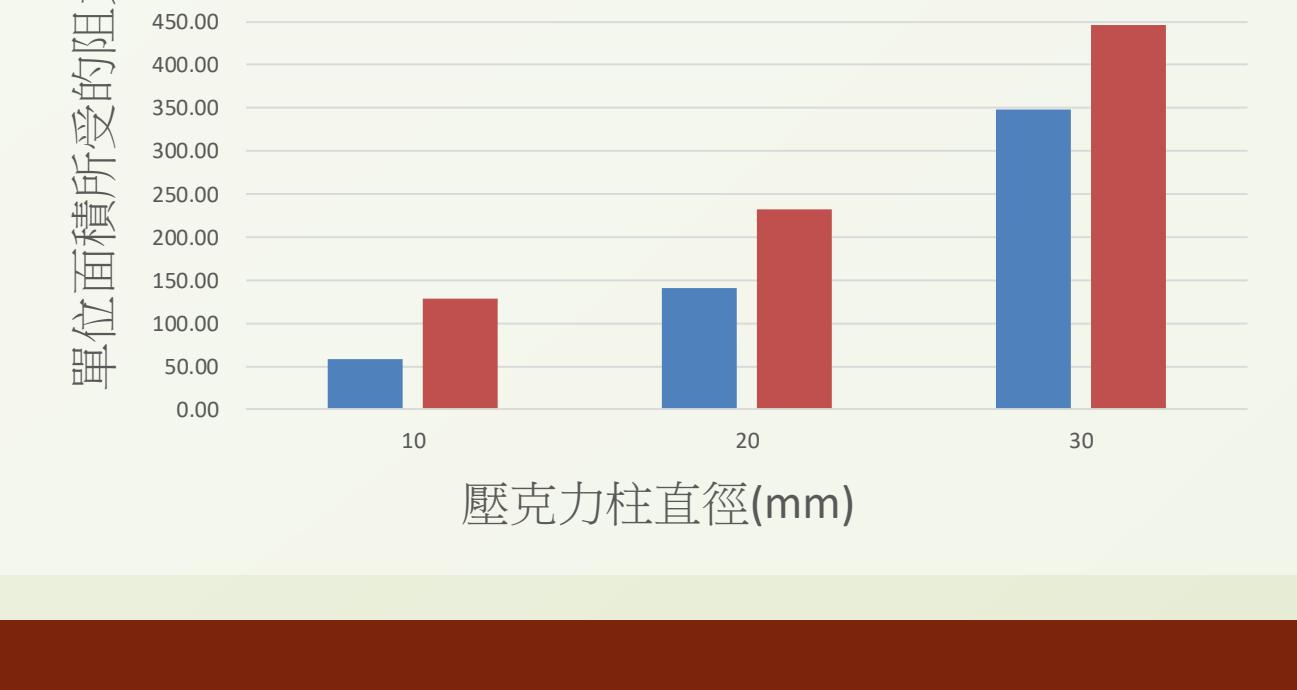
### 3. 壓克力柱粗細對拉力的影響

壓克力柱直徑 (mm)	初始高度 (mm)	加壓後高度 (mm)	最大阻力 f/gw	f/樣本重	壓克力柱單位阻力 (Pa)
極細粒加壓					
10	50	37	165.9	1	1438.42
20	50	36	完全拉起		
30	50	44	完全拉起		
極細粒未加壓					
10	50		9.2	0.045	58.57
20	50		125.9	0.65	400.75
30	50		>163.8	完全拉起(會滑落)	

### 3. 乾咖啡渣造成阻力



### 4. 不同液體(溶劑)對拉力的影響



## 討 論

流沙是一種粉少水多型的非牛頓流體，在強大的壓力下很快就失去黏性。在流沙中快速移動的物體，會使它快速液化，沙逐漸往下部沉積，水分流出，流沙上層的流動性逐漸提升。沉積至下方的沙逐漸變得堅硬且密度變大，人體密度僅約 $1.02\text{g}/\text{cm}^3$ ，是很難被完全淹沒。過去陷入流沙的人，大都是因為無法動彈而脫水致死，所以電影上所演的完全沉入流沙中，是不符合現實狀況的。

正因為流沙受到壓力後，水會從泥沙中流出，所以在我們實驗的過程，並無法讓沉入物保持直立，造成了測量上的困難，也讓我們花了較多的時間在修改實驗的操作步驟，這是此次實驗較大的困難點。

咖啡渣的粗細會影響顆粒包覆水的能力。當顆粒的粒徑較大時，因為顆粒間的空隙較大，包覆水的能力相對較差。在相同的渣、水比例下，中粒徑的流沙模擬體表面較為乾燥，受到物體擠壓後的出水狀況也不明顯，這應該就是相對於細粒徑而言，中粒徑的覆水能力較差，水流到塑膠盆的底部靜置，無法在表面給予陷入物體浮力，所以出現圖中的景象。或許，我們可以調整咖啡渣與水的比例，看看能不能也有流沙的效果。

從實驗結果顯示：如果用瞬間拉力拉扯沉入物，是可以用較小的拉力拉起沉入物，甚至可以小於物重。這是因為砝碼在瞬間掉落的時候，藉由速度的改變，產生了高衝量，進而幫助繩子拉起物體；如果慢慢放開砝碼，則因沒有向下的衝量幫助拉動物體，就需要比較大的力量，才能達到目的。然而，高衝量表面看起來的拉力比較小，但實際對物體(尤其是人體)的損害如何，目前無法測量推算。

由第二階段的實驗中，可推論陷入咖啡渣流體中物體的受力與深度、是否受壓有關，其中受壓造成的影響應是來自於咖啡渣在整個空間中所佔的體積比，當咖啡渣流體受壓時，咖啡渣體積密度增加、兼具變小，彼此間的影響力加強，也因此能對陷入其中的壓克力柱造成較大的阻力。對應到流沙的情境，通常陷入流沙中的生物，第一個反應就是掙扎，掙扎可能就造成對周圍流體的施壓，使周圍流體形成更穩固的結構，變得更難以掙脫。

而藉由壓克力柱拔出的實驗，由力學分析解果可推論，咖啡渣流體可視為一種的非牛頓流體，對其施力確實可造成結構的改變，但由實驗中發現，阻力的變化似乎需要一些時間，推論是因壓克力棒要從咖啡渣流體中拔出時，其底部的空腔會先由水填充，水再帶動咖啡渣流入，短暫的時間後，由於咖啡渣的流動，導致原本的結構改變、平衡崩塌，因而造成壓克力棒受到阻力的變化。

## 結 論

1. 將磨豆機磨出來的咖啡渣進行粒徑分群後，發現細粒徑群(粒徑在1mm以下)是比較理想的原料，來模擬流沙。
2. 以細粒徑群做為模擬流沙的原料時，咖啡渣與水的最佳比例為1:2.25
3. 緩慢的垂直拉力須超過物體的重量，才能拉起沉入物；瞬間拉力確實能以較少的力拉起沉入物，但是否會造成物體的損傷，尚待研究。
4. 咖啡渣流體會因受力壓縮而使阻力顯著增加；物體沉入的接觸面積越大，所受阻力越大。
5. 物體受外力拉拔時，其所受的阻力大小與外力作用的時間有關，可說明咖啡渣流體應為一種非牛頓流體。
6. 混合液體的黏性會顯著咖啡渣流體所造成的阻力。

## 未來工作

1. 收集更多不同物體的拉力資料，分析壓力、樣品形狀及瞬間拉力對陷入流沙物體的影響。
2. 分析不同粒徑大小咖啡渣的各項數據，找出粒徑與阻力間的關係。
3. 分析不同形狀的插入體之各項數據，找出形狀或接觸面性質對阻力的影響。
4. 對比不同材質的細顆粒流體，找出細顆粒流體對阻力的影響。
5. 建立更好的咖啡渣—流沙模型，以探討顆粒流體的物理特性。

## 參考文獻

1. 『死亡陷阱?流沙』，許蘋琳、謝佩含、邱靖巧(1998)，第38屆全國中小學科展作品
2. 『水中沙畫家』，林芊妤(2017)，第57屆全國中小學科展作品
3. 『沙灘我愛羅的流沙忍術』，林庭妤、楊晴煊、洪邦碩、郭哲聿、陳品嫣、張瑜晏(2019)，第59屆全國中小學科展作品
4. Quicksand!, Khaldoun, A., Wegdam, G., Eiser, E., & Bonn, D. (2006).. *Europhysics News*, 37(4), 18-1