

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030110

從固體對流探討顆粒體的混合與分離

學校名稱：高雄市立五福國民中學

作者： 國二 朱嫵融 國二 吳奕恬 國二 莊曜隆	指導老師： 許芳雪 黃慧龍
---	-----------------------------

關鍵詞：顆粒體、固體對流

從固體對流探討顆粒體的混合與分離

摘要

我們以振篩器和垂直震動器進行實驗，來探討顆粒體的密度、形狀、表面的光滑程度、顆粒間的粒徑比、顆粒表面覆上的液體黏滯性及振動方式等因素對顆粒體對流的影響。

實驗結果發現：主顆粒表面光滑、背景顆粒表面粗糙且顆粒細長時，主顆粒較易被推擠上升。當主顆粒及背景顆粒表面覆上液體時，當液體的黏滯力愈大，對流速率減慢。振動方式會影響背景顆粒的流動效果。以桌球為主顆粒，改變背景顆粒粒徑時，當粒徑比($\frac{r_{\text{桌球}}}{r_{\text{背景}}}$)小於 3.29 時，因垂直推擠主顆粒向上的分力較小，主顆粒便不易再被推擠上升。當小顆粒在上層、大顆粒在下層時，顆粒間會有對流現象，且粒徑比($r_{\text{大}}/r_{\text{小}}$)愈大，對流速率愈快；粒徑比($r_{\text{大}}/r_{\text{小}}<1.66$)時，下層的大顆粒不易向上流動。

壹、研究動機

當我們在理化課中學到液體與氣體的對流現象時，好奇固體是否也會產生對流？在老師的鼓勵之下，我們查閱了一些相關的文獻，發現固體顆粒在一些條件之下，也是會產生對流，在土木、食品、化工或開礦工程更有極重要的應用。為了解這其中的奧秘，我們決定對固體的對流進行深入的探討和研究，希望透過這次的研究瞭解影響固體顆粒對流的基本因素。

貳、研究目的

研究一、觀察不同主顆粒在不同的背景顆粒中是否能產生對流

研究二、研究主顆粒在振篩器的弱振動時的對流情形

探討1. 探討同粒徑的主顆粒在背景顆粒為 6mmBB 彈、綠豆、決明子中的對流情形

探討2. 探討主顆粒及背景顆粒表面覆上液體時的對流情形

探討3. 探討不同粒徑的保麗龍球在背景顆粒為 6mmBB 彈、綠豆、決明子中的對流情形

研究三、研究主顆粒為桌球在不同振動器中的對流情形

研究四、顆粒體在振篩器及垂直震動器的振動中的混合與分離

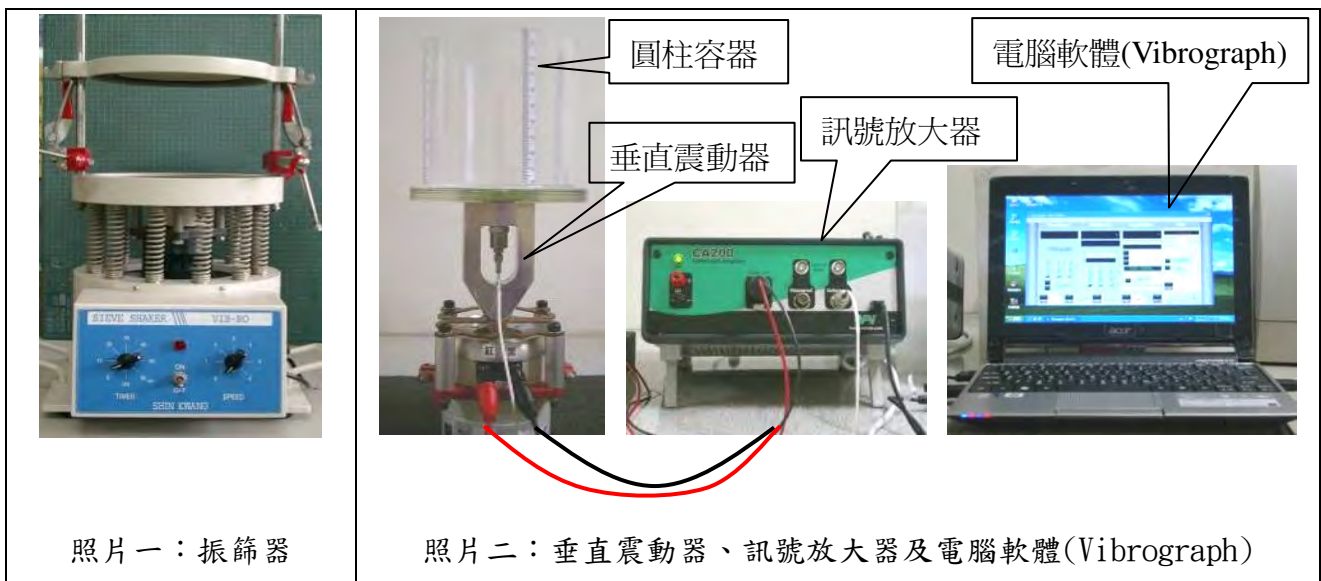
探討1. 不同密度顆粒間的對流情形

探討2. 不同粒徑顆粒間的對流情形

探討3. 三合一咖啡的分離

參、研究設備及器材

振篩器 (SIEVE SHAKER VIB-R0) (照片一)、垂直震動器、訊號放大器及電腦軟體(Vibrograph) (照片二)、壓克力圓柱筒、游標尺、燒杯、碼表、電子天秤(最小刻度 0.1 克)、量筒、背景顆粒[決明子、綠豆、BB 彈 (直徑 0.6 公分)、各式塑膠珠]、主顆粒[塑膠黑珠 (直徑 1.2 公分)、大小玻璃珠 (大直徑 2.5 公分、小直徑 1.6 公分)、桌球 (直徑 4 公分)、木球 (直徑 4 公分)、鐵球 (直徑 2.5 公分)、鋁球 (直徑 2.5 公分)、保麗龍球 (直徑 1、2、2.5、3、4、5、6、7 公分)]、相機、DV、三合一咖啡粉。



肆、研究過程、結果及討論

研究一、觀察不同主顆粒在不同的背景顆粒中是否能產生對流

(一) 以排水法測顆粒體積、電子天平測顆粒質量，求得平均密度如表(一A)及表(一B)：

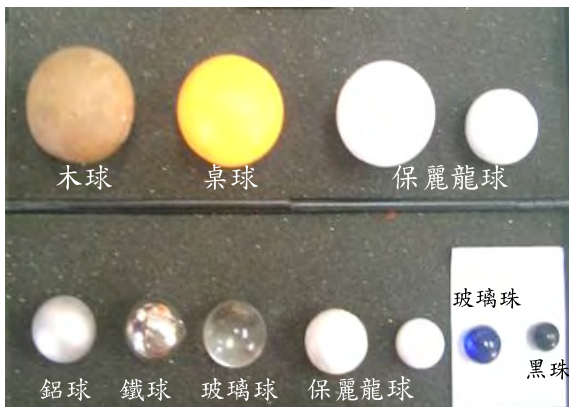
1. 照片三：背景顆粒



2. 表(一A)：各種實驗所用背景顆粒的平均密度(單位：克/立方公分)

背景顆粒	BB彈	綠豆	決明子
密度平均值	1.62	1.3	1.27

3. 照片四：主顆粒









4. 表(一B)：各種實驗所用主顆粒的平均密度(單位：克/立方公分)

主顆粒	木球	桌球	保麗龍球	
密度平均值	0.45	0.08	0.03	
主顆粒	鋁球	鐵球	玻璃珠	塑膠黑珠
密度平均值	2.73	8.06	2.55	1.4

(二) 實驗結果：

表(二)：以手拍擊容器底部，觀察各種主顆粒在背景顆粒(綠豆、決明子及BB彈)中是否能上升

主顆粒 \ 背景顆粒	背景顆粒			○：完全浮出		
	綠豆	BB彈	決明子			
4cm 木球	○	○	○	木球	桌球	保麗龍球
4cm 桌球	○	○	○			
4cm 保麗龍球	○	○	○			
3cm 保麗龍球	○	○	○	△：不完全浮出		
2.5cm 保麗龍球	○	○	○			
2cm 保麗龍球	○	○	○			
2.5cm 鋁球	△	△	△			
2.5cm 鐵球	×	×	×			
2.5cm 玻璃球	△	△	△			
1.6cm 玻璃球	△	△	△			
1.2cm 塑膠黑珠	△	△	△	×：不浮出		

(三) 討論：

1. 由實驗結果觀察出，密度較背景顆粒小的保麗龍球、桌球、木球，在拍擊容器底部後皆可輕易浮出至背景顆粒表面，與液體及氣體會上下對流的現象及原因相同。
2. 然而，其他密度較背景顆粒稍大的塑膠珠、玻璃珠、鋁球，在拍打容器底部後，也會有上升的現象，但須拍打較多次，主顆粒只上升至露出背景顆粒表面便不易再上升，甚至在繼續拍打後，又再沒入背景顆粒中，如此浮浮沉沉。
3. 密度最大的鐵球，則不浮出。
4. 由以上現象可得知，主顆粒在背景顆粒中會上升的原因並不只有密度大小的影響，在拍擊容器底部，使得顆粒跳動，背景顆粒推擠主顆粒，逐漸填塞主顆粒下方空隙，因此主顆粒被推擠上升。
5. 在拍動的過程當中，大的顆粒會逐漸被推動到表面，而較小的顆粒會沉到底部，這樣的分離現象稱為「巴西豆效應」。(參考資料5)

研究二、研究主顆粒在振篩器的弱振動時的對流情形

※實驗步驟：

1. 先將主顆粒置於圓柱容器底部中央，再倒入背景顆粒至圓柱容器中，且高於主顆粒直徑 1 公分。(照片五)
2. 打開振篩器開關，震動強度調到 3。
3. 將圓柱容器放上振篩器，振動至主顆粒露出表面為止，記錄主顆粒上升 1 公分所需的時間。(照片六)
4. 重複上述步驟 10 次，取平均值。



照片五



照片六

探討1. 觀察同粒徑的主顆粒在背景顆粒為 6mmBB 彈、綠豆、決明子中的對流情形

(一) 實驗結果：(測量主顆粒上升 1 公分至背景顆粒表面時所需時間。單位：秒)

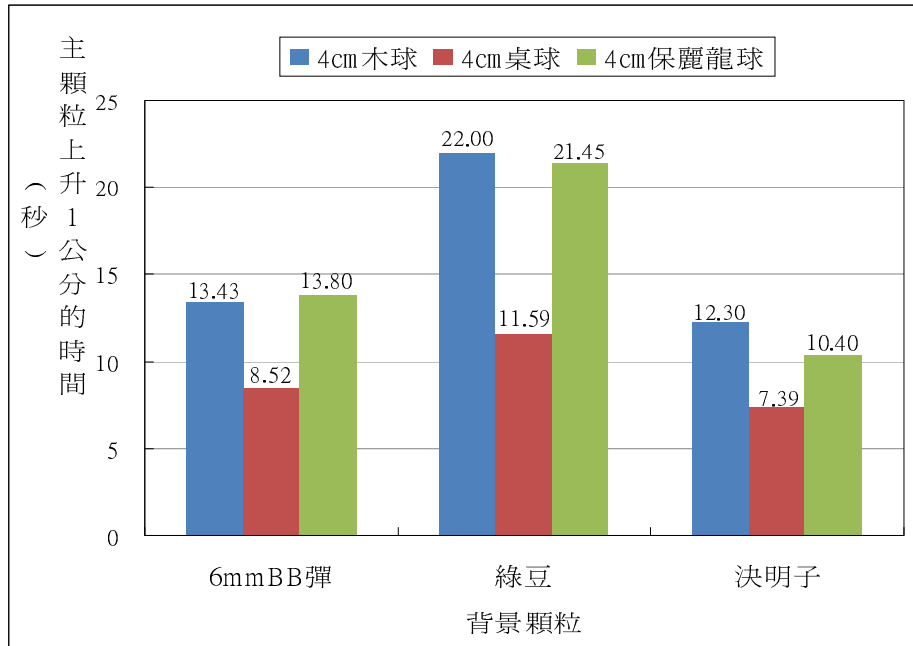
1. 表(三 A)：主顆粒密度小於背景顆粒的實驗結果

主顆粒 背景顆粒		4 cm木球	4 cm桌球	4 cm保麗龍球
		6mmBB 彈	上升時間 13.43	8.52
	標準差	2.57	2.17	3.00
綠豆	上升時間	22.00	11.59	21.45
	標準差	4.01	1.70	4.52
決明子	上升時間	12.30	7.39	10.40
	標準差	2.53	0.62	2.17

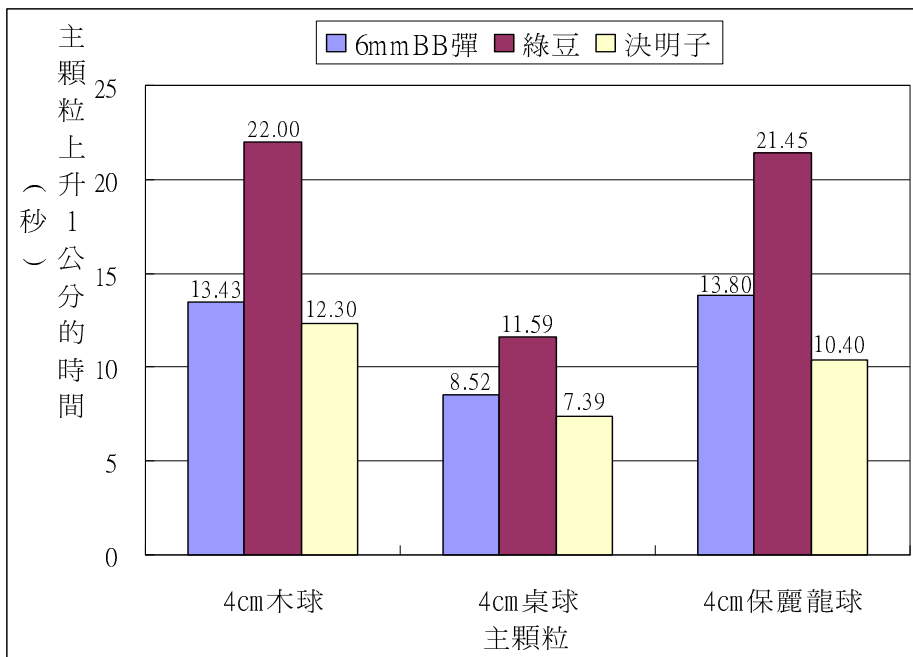
2. 表(三 B)：主顆粒為密度大於背景顆粒的鋁球、玻璃球及鐵球，及同粒徑的保麗龍球的實驗結果

主顆粒 背景顆粒		2.5 cm保麗龍球	2.5 cm鋁球	2.5 cm玻璃球	2.5 cm鐵球
		6mmBB 彈	上升時間 11.06	43.25	83.66
	標準差	1.43	7.89	3.55	—
綠豆	上升時間	21.46	未浮出	未浮出	未浮出
	標準差	2.61	—	—	—
決明子	上升時間	8.47	未浮出	未浮出	未浮出
	標準差	3.39	—	—	—

(二) 關係圖：



圖一：不同背景顆粒對主顆粒上升的影響



圖二：比較不同主顆粒的上升情形

(三) 討論：

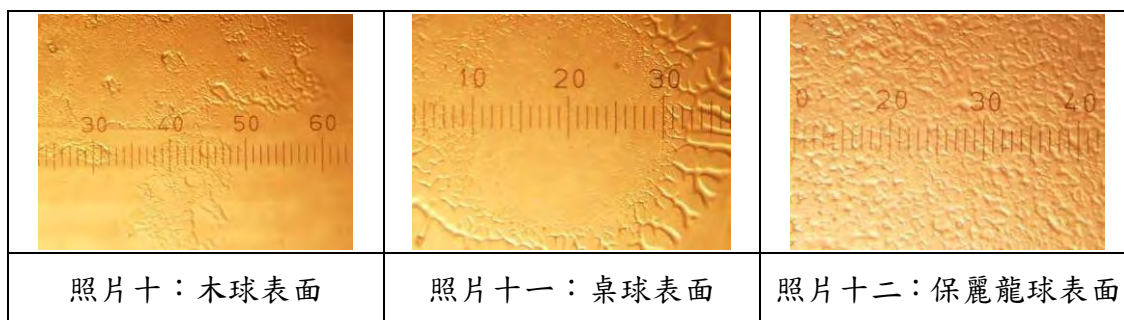
1. 在實驗過程中發現，當振篩器的振動加速度不夠大時，容器中的背景顆粒相對於容器不會有移動，也因此主顆粒不會有被推擠上升的現象；當將振篩器的震動強度調到刻度3時，背景顆粒開始有明顯的移動及轉動，主顆粒才有被推擠上升的現象，為了避免震動強度過大造成壓克力容器的破裂，因此實驗採取弱震動的模式進行，即振篩器的震動強度皆固定在刻度3；我們進一步利用振動分析器測量出此時的振動

頻率為 31Hz(其振動頻譜請參閱附錄 1)。

- 為了能比較背景顆粒的表面性質，我們以解剖顯微鏡放大觀察，並以數位相機拍得 BB 彈(照片七)、綠豆(照片八)、決明子(照片九)三種顆粒表面。



- 由關係圖一可知，比較同一主顆粒在背景顆粒為 BB 彈及綠豆時，因兩種背景顆粒形狀較近似圓球易轉動，但 BB 彈表面較綠豆粗糙(照片七、八)，與主顆粒接觸時因摩擦力的作用，較易推擠主顆粒上升，因此主顆粒在 BB 彈中比在綠豆中易上升。實驗過程中，我們也曾經以表面光滑的塑膠油珠(粒徑 6mm)作為背景顆粒進行實驗，但因表面光滑無法推擠主顆粒上升。
- 由關係圖一，比較同一主顆粒在背景顆粒為綠豆及決明子時，因兩種背景顆粒表面粗糙程度較相似(照片八、九)，且顆粒密度相近，但決明子顆粒較細長易填塞空隙，因此在決明子中可使主顆粒較易被推擠上升。由此可知背景顆粒的形狀及粗糙程度會影響主顆粒的上升效果。
- 由關係圖二可知，當主顆粒直徑約相等時，以桌球浮出所需的時間最短，因為桌球除了密度比木球小之外，表面又比保麗龍球光滑。為了能比較主顆粒的表面性質，我們以透明無色的指甲油拓印木球、桌球、保麗龍球的表面，以 300 倍解剖顯微鏡放大觀察，並以數位相機拍得木球(照片十)、桌球(照片十一)、保麗龍球(照片十二)的錶面紋路。由照片可看出，桌球表面紋路最少較為光滑。



- 由表(三 B)：當主顆粒為密度較背景顆粒稍大的鋁球、玻璃球時，則主顆粒更不易被推擠上升。主顆粒密度較背景顆粒大許多為鐵球，則完全未被推擠上升。顯示在巴西豆效應中，主顆粒的密度若比背景顆粒密度大太多，則主顆粒不會被推擠上升。

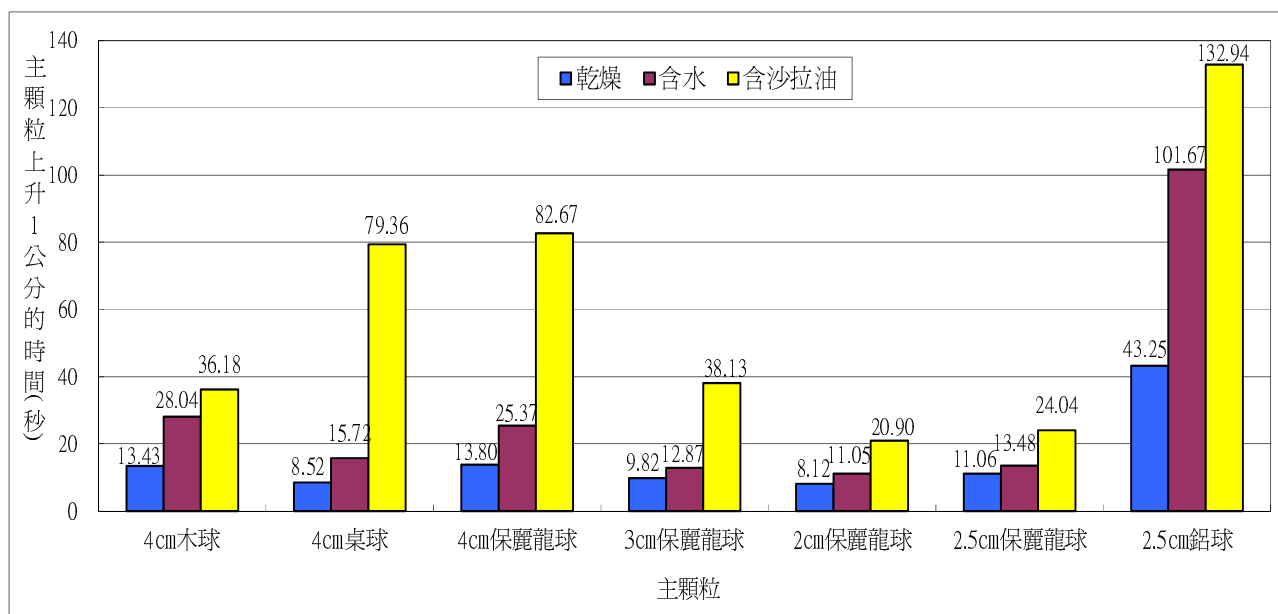
探討2. 探討主顆粒及背景顆粒表面覆上液體時的對流情形

分別將主顆粒及背景顆粒(BB彈)泡於水及沙拉油中，再撈出置於容器中進行實驗。

(一)實驗結果：(測量主顆粒上升1公分所需時間。單位：秒)

主顆粒		4 cm 木球	4 cm 桌球	4 cm 保麗龍球	3 cm 保麗龍球	2 cm 保麗龍球	2.5 cm 保麗龍球	2.5 cm 鋁球
乾燥	上升時間	13.43	8.52	13.80	9.82	8.12	11.06	43.25
	標準差	2.57	2.17	3.00	2.53	0.95	1.43	7.89
含水	上升時間	28.04	15.72	25.37	12.87	11.05	13.48	101.67
	標準差	3.77	2.77	6.69	0.91	0.75	1.76	15.28
含沙拉油	上升時間	36.18	79.36	82.67	38.13	20.90	24.04	132.94
	標準差	3.60	42.14	24.62	9.33	3.21	4.03	28.05

(二)關係圖：



圖三：液體黏滯力對主顆粒上升的影響

(三)討論：

1. 起初，我們的構想是將背景顆粒與主顆粒的空隙中填滿液體再進行實驗，觀察溶液的存在對主顆粒上升速率的影響。以填充水進行實驗時，發現主顆粒為保麗龍球、木球及桌球時，一放上振篩器，主顆粒立即浮出表面；而主顆粒為玻璃球、鋁球及鐵球時，在震動3分鐘後仍未浮出表面，將容器取下觀察，發現主顆粒仍在容器底部。振動過程中因為空隙填滿水，BB彈亦因震動及浮力影響而跳動，空隙加大而未對主顆粒造成擠壓作用，因此主顆粒浮出與否，主要是其密度相對於水的大小所造成浮體與沉體的

關係，而非巴西豆效應，因此改將空隙中的水倒出，僅以表面濕潤的顆粒體進行實驗。

2. 由關係圖三的結果顯示，將顆粒表面覆上液體時，會使主顆粒上升至背景顆粒表面的時間增加，也就是主顆粒更不易上升。
3. 由於添加了水後，因水本身的黏滯性(25°C時，黏滯係數=0.894cP)，背景顆粒(BB彈)對主顆粒的作用除了推擠排斥之外，我們推測還多了液體的黏滯力，使得向上的總力變小，為了進一步證明我們的推測，查閱相關資料後，我們再以黏滯係數更大的沙拉油(26.6°C時，黏滯係數=50cP，數值來源為參考資料7)進行實驗。
4. 由關係圖三，主顆粒在沙拉油中上升至表面的時間皆比在水中長，證明了我們的推論。

探討3. 觀察不同粒徑的保麗龍球在背景顆粒為6mmBB彈、綠豆、決明子中的對流情形

為了探討不同主顆粒粒徑的對流情形，我們以市面上易購得的不同大小的保麗龍球進行實驗

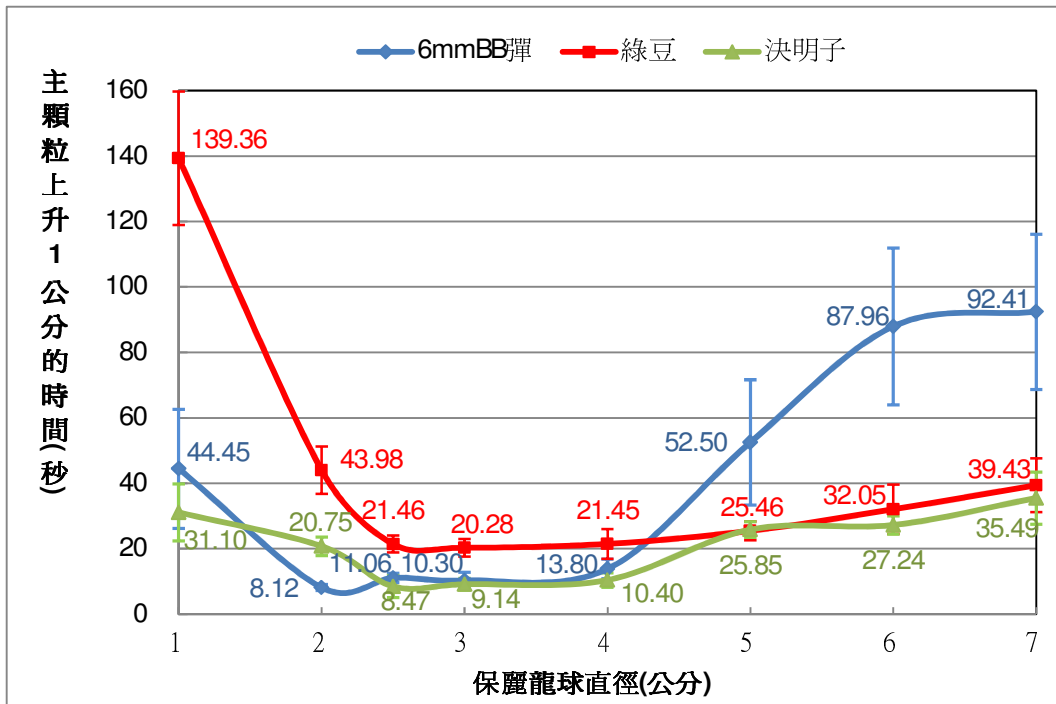


照片十三：不同大小的保麗龍球

(一)實驗結果：(測量主顆粒上升1公分所需時間。單位：秒)

保麗龍球粒徑 背景顆粒		保麗龍球粒徑							
		1公分	2公分	2.5公分	3公分	4公分	5公分	6公分	7公分
6mm BB彈	上升時間	44.45	8.12	11.06	10.30	13.80	52.50	87.96	92.41
	標準差	18.19	0.95	1.43	2.53	3.00	19.09	23.95	23.71
綠豆	上升時間	139.36	43.98	21.46	20.28	21.45	25.46	32.05	39.43
	標準差	20.39	7.24	2.61	2.66	4.52	2.91	7.54	8.26
決明子	上升時間	31.10	20.75	8.47	9.14	10.40	25.85	27.24	35.49
	標準差	8.68	2.84	3.39	1.81	2.17	2.40	2.83	8.00










(二)關係圖



圖四：保麗龍球的粒徑對其上升時間的影響

(三)討論：

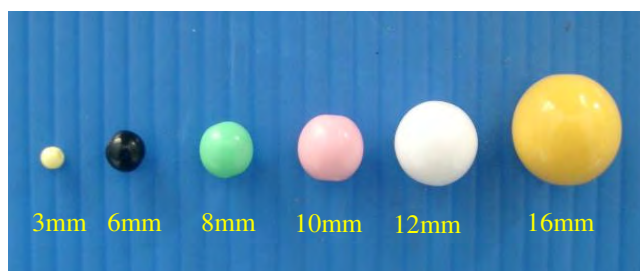
1. 由圖四可看出，當保麗龍球直徑為 2.5~4 公分時，主顆粒上升 1 公分至表面所需時間差異不大，且實驗結果的標準差較小、穩定度較高。其中以綠豆為背景顆粒時所需時間約 20 秒，而以 BB 彈、決明子為背景顆粒時所需時間約 10 秒。
2. 當保麗龍球直徑 > 4 公分時，上升至表面所需時間隨主顆粒直徑增加而變長、穩定度也較差，其原因為當主顆粒要上升時，除了周圍背景顆粒推擠下方空隙推擠主顆粒上升，也要將主顆粒上方的背景顆粒推開，而直徑愈大的主顆粒上方的背景顆粒也愈多、愈重，因此上升時間較長。
3. 當保麗龍球直徑 < 2.5 公分時，上升至表面所需時間隨主顆粒直徑減小而變長且穩定度也不佳。由於主顆粒較小，周圍空隙小、背景顆粒不易填塞推擠主顆粒上升。
4. 我們進一步將各尺寸保麗龍球在容器底部時與背景顆粒間的排列情形拍照如下表，隨著保麗龍球的直徑增加，最下層周圍的背景顆粒數增加得較為緩慢，而上方的背景顆粒數量約與球直徑平方成比例，因此主顆粒直徑愈大時，要克服的背景顆粒重量也愈大，因此上升時間也愈長。

保麗龍球直徑	1 cm	2 cm	2.5 cm	3 cm	4 cm
相片					
BB 彈個數	8	12	13	14	16
保麗龍球直徑	4.5 cm	5 cm	6 cm	7 cm	
相片					
BB 彈個數	17	18	19	21	

5. 整體而言，當背景顆粒為決明子時，實驗結果的標準差較小、穩定度較高，然而決明子顆粒大小、形狀不一，在倒入容器後的排列情形也難以控制，因此接下來的實驗，我們仍以圓球顆粒為背景顆粒。

研究三、研究主顆粒在不同振動器中的對流情形

以粒徑為 4 公分的桌球為主顆粒、不同粒徑塑膠圓珠為背景顆粒，分別在振篩器及垂直振動器中測量主顆粒上升 1 公分浮出至表面所需時間。



照片十四：背景顆粒為不同粒徑的塑膠圓珠

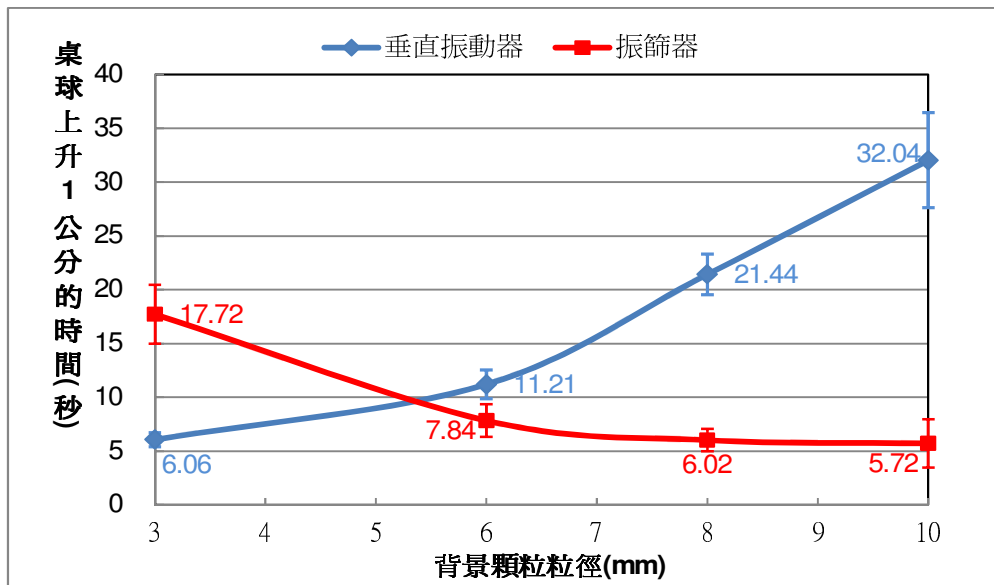
(一)實驗步驟：

1. 將桌球置於圓柱容器底部中央，倒入背景顆粒至圓柱容器中，且高於主顆粒直徑 1 公分。
2. 在振篩器中：將振動強度調到 3(振動頻率約 31Hz)；在垂直振動器中：由電腦軟體 Vibrograph 設定振動頻率為 30Hz 及振動加速度為 1.5g。
3. 測量桌球上升 1 公分至表面所需時間。重複 10 次，取平均值及標準差。

(二)實驗結果：

振動方式		背景顆粒粒徑					
		3 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	16 mm
振篩器	時間(秒)	17.72	7.84	6.02	5.72	未浮出	未浮出
	標準差	2.72	1.52	1.03	2.26	—	—
垂直振動器	時間(秒)	6.06	11.21	21.44	32.04	未浮出	未浮出
	標準差	0.64	1.34	1.89	4.43	—	—
粒徑比($\frac{r_{\text{桌球}}}{r_{\text{背景}}}$)		13.17	6.58	4.94	3.95	3.29	2.47

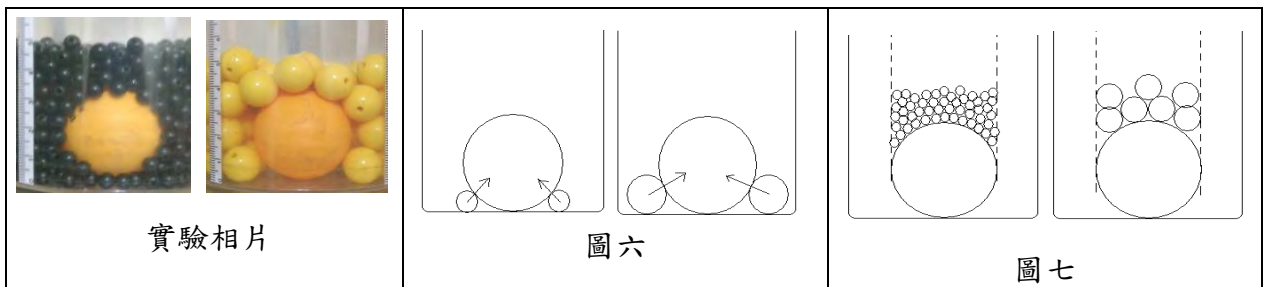
(三)關係圖：



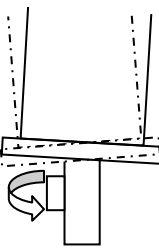
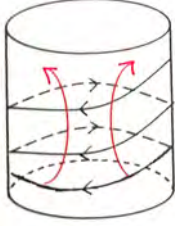
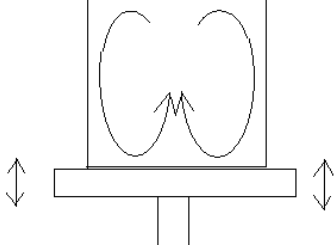
圖五：不同振動方式對桌球上升的影響

(四)討論：

- 實驗結果：當背景顆粒粒徑 $> 12\text{mm}$ 時，桌球便不再浮出。當背景顆粒更大時，桌球下方周圍背景顆粒的施力方向較為水平(如圖六所示)，因此推擠桌球上升的分力較小。由我們的實驗結果，在兩種震動器中，當粒徑比 $(\frac{r_{\text{桌球}}}{r_{\text{背景}}})$ 小於 3.29 時，主顆粒便不易再被推擠上升。



- 由關係圖五可看出，在振篩器中隨著背景顆粒粒徑愈大、桌球浮出表面的時間也愈短。而在垂直振動器中隨著背景顆粒愈大，桌球上升至表面所需時間也愈長。兩種震動器的結果不同，顯示相同的顆粒條件下，振動方式也會影響顆粒的對流情形。
- 在振篩器中，底座為離心轉的振動方式如圖八及背景顆粒流動方式示意圖如圖九，使得背景顆粒有較大的側向力推擠主顆粒，在相同的振動強度下，背景顆粒愈大、側向力愈大，因此桌球較易上升。

		
<p>圖八：振篩器的震動</p>	<p>圖九：振篩器中背景顆粒的流動方式</p>	<p>圖十：垂直震動器的震動及背景顆粒流動方式</p>

4. 在垂直震動器中，背景顆粒與桌球會隨震動台產生垂直上下的跳動如圖十，使得顆粒間的空隙增加，此時背景顆粒填塞桌球下方空隙，而將桌球推擠上升。實驗過程中，我們觀察到當背景顆粒愈大時，在垂直震動器中背景顆粒流動情形愈緩和，抬升桌球向上的速率也愈小，因此費時較長。

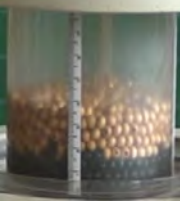







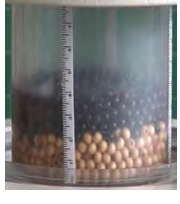



研究四、不同顆粒在振篩器及垂直震動器的振動下的混合與分離

探討1. 不同密度顆粒間的對流情形


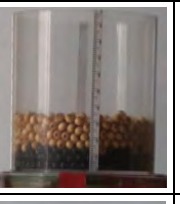


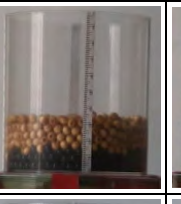


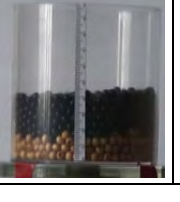


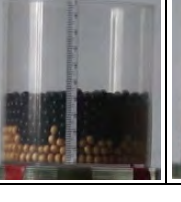

(一)實驗步驟：在圓柱容器中分別填充粒徑皆為 6mm 的塑膠圓珠及木頭珠各 2 公分高，觀察其是否產生對流

(二)實驗結果：

1. 振篩器震動

上/下	振動時間					
	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
木/圓						
圓/木						

2. 垂直震動

上/下	振動時間					
	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
木/圓						
圓/木						

(三)討論：

雖然上下層顆粒密度不同，但無論是密度小的顆粒在上層或下層，因顆粒粒徑相同，空隙不易被填塞，使得下層顆粒不易上升、無對流的現象。



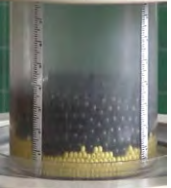

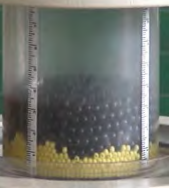
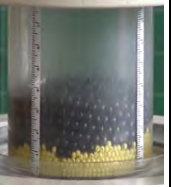

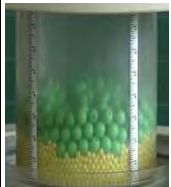
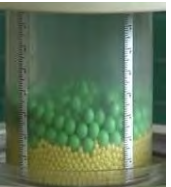
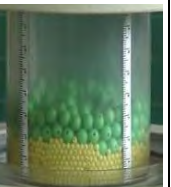

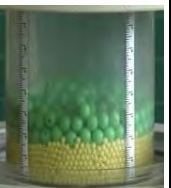

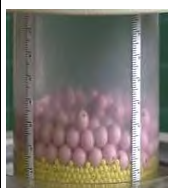

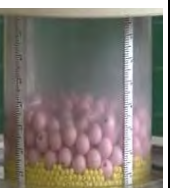



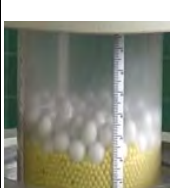

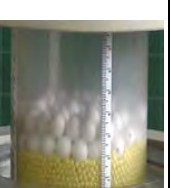

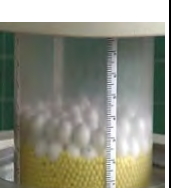






探討2. 不同粒徑顆粒間的對流情形

(一)實驗步驟：




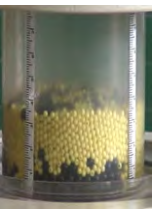

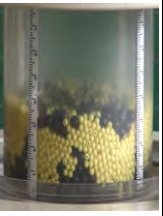






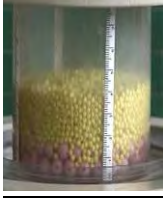
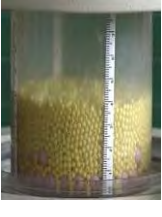





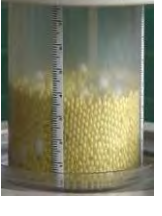

















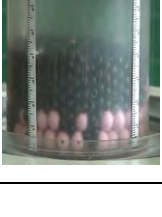


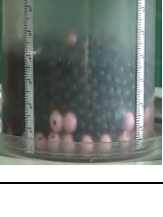

1. 取粒徑分別為 3、6、8、10、12、16mm 的塑膠圓珠，以上層為較大顆粒、下層為較小顆粒，各填充 2 公分高進行實驗，觀察是否產生對流。
2. 再以上層為較小顆粒、下層為較大顆粒進行實驗，觀察是否產生對流。
3. 將實驗過程以 DV 攝影，再以 ExtraCut3.0 軟體擷取影像加以分析。





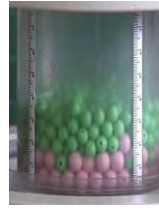















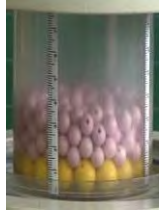



(二)實驗結果：

1. 在振篩器中，上層為較大顆粒、下層為較小顆粒的實驗結果


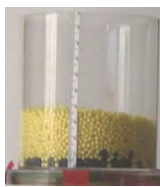


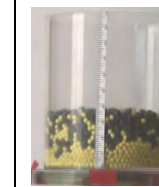
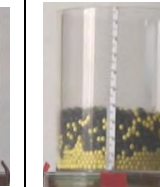











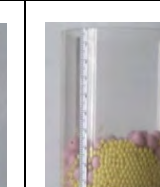



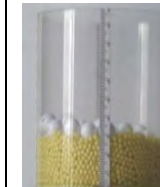

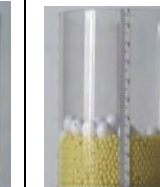





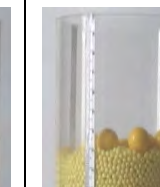

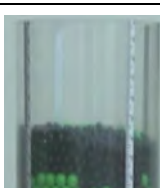
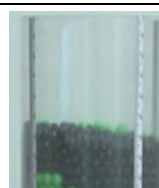

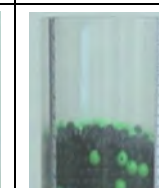
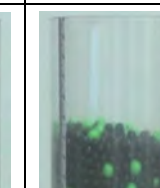
顆粒粒徑分 布(上/下)	振動時間					
	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
6 mm/3 mm						
8 mm/3 mm						
10 mm/3 mm						
12 mm/3 mm						
16 mm/3 mm						







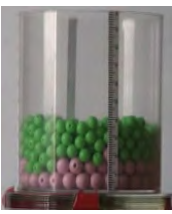





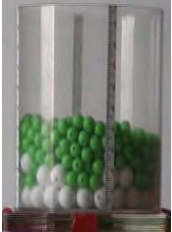




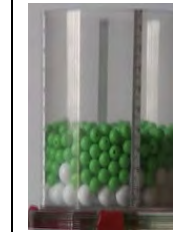

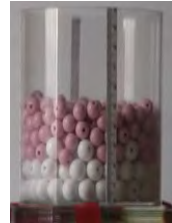










2. 在振篩器中，上層為較小顆粒、下層為較大顆粒的實驗結果

顆粒粒徑分 布(上/下)	振動時間					
	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
3 mm/6 mm						
3 mm/8 mm						
3 mm/10 mm						
3 mm/12 mm						
3 mm/16 mm						
6 mm/8 mm						
6 mm/10 mm						12 分鐘 

顆粒粒徑分布(上/下)	振動時間					
	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
8 mm/10 mm						
8 mm/12 mm						
10 mm/12 mm						
10 mm/16 mm						

3. 在垂直振動器中，上層為較小顆粒、下層為較大顆粒的實驗結果

顆粒粒徑 分布(上/ 下)	0 分鐘	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘
3mm/6mm						
3mm/8mm	0 分鐘	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘
						
3mm/10mm	0 分鐘	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘
						
3mm/12mm	0 分鐘	10 秒鐘	20 秒鐘	30 秒鐘	40 秒鐘	1 分鐘
						
3mm/16mm	0 分鐘	10 秒鐘	20 秒鐘	30 秒鐘	40 秒鐘	1 分鐘
						
6mm/8mm	0 分鐘	2 分鐘	4 分鐘	6 分鐘	7 分鐘	8 分鐘
						

6mm/10mm	0 分鐘	2 分鐘	4 分鐘	6 分鐘	7 分鐘	8 分鐘
						
8mm/10mm	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
						
8mm/12mm	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
						
10mm/12mm	0 分鐘	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘
						
10mm/16mm	0 分鐘	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘
						

4. 下層大顆粒對流至上層所需時間整理如下表：

上層/下層	3 mm/16 mm	3 mm/12 mm	3 mm/10 mm	3 mm/8 mm	3 mm/6 mm	
粒徑比 ($r_{大}/r_{小}$)	5.33	4	3.33	2.66	2	
振篩器	約 3min	約 4min	約 5min	>5min	>10min	
垂直振動器	約 0.5min	約 40 秒	約 2min	約 2.5min	約 3min	
上層/下層	6 mm/10 mm	10 mm/16 mm	8 mm/12 mm	6 mm/8 mm	8 mm/10 mm	10 mm/12 mm
粒徑比 ($r_{大}/r_{小}$)	1.66	1.6	1.5	1.33	1.25	1.2
振篩器	不對流	不對流	不對流	不對流	不對流	不對流
垂直振動器	>8min	不對流	不對流	>8min	不對流	不對流

(三)討論：

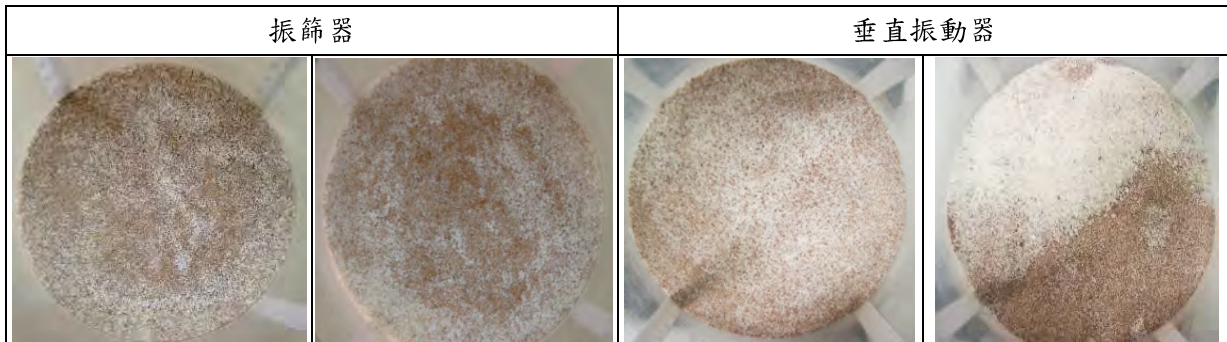
1. 由實驗結果看出，當大顆粒在上層、小顆粒在下層時，上下層顆粒間不會有對流現象；反之，當小顆粒在上層、大顆粒在下層時，上下層顆粒間會有對流現象，且粒徑比($r_{大}/r_{小}$)愈大，對流速率愈快。在相同粒徑比時，垂直振動的對流速率較快。
2. 在振篩器的振動下，當粒徑比($r_{大}/r_{小}$)<1.66 時，下層的大顆粒不會向上流動。而在垂直振動器中，粒徑比($r_{大}/r_{小}$)<1.6 時則不易對流。
3. 實驗過程中，我們曾試著以人工方式將大小顆粒從混合狀態開始振動，但卻發現無法將大小顆粒混合均勻；在攪拌的過程中，大顆粒大部份分布在上層、小顆粒大部份在下層，反倒是對流發生的過程中，大小顆粒藉由振動器的振動較能達到均勻混合狀態，且粒徑比($r_{大}/r_{小}$)愈大，所需時間愈短。

探討 3、三合一咖啡的分離

(一)實驗步驟：

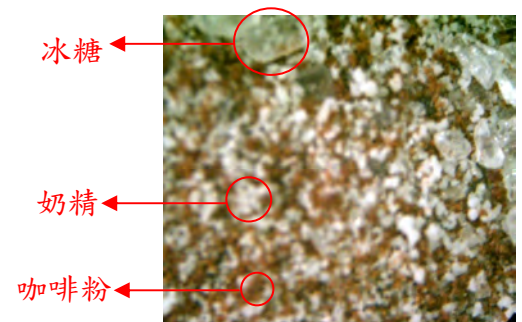
將三合一咖啡倒入圓柱容器中，分別置於振篩器及垂直震動器中觀察其對流情形。

(二)實驗結果：



(三)討論：

實驗結果如同之前的實驗：在振動後，顆粒稍大的冰糖逐漸對流到上層。



伍、結論

一、由研究一：

主顆粒在背景顆粒中會上升的原因並不只有密度大小的影響，在拍擊容器底部，使得顆粒跳動，背景顆粒推擠主顆粒，逐漸填塞主顆粒下方空隙，因此主顆粒被推擠上升。這樣的分離現象稱為「巴西豆效應」。

二、由研究二：

1. 實驗結果顯示：背景顆粒及主顆粒的表面性質、背景顆粒形狀會影響主顆粒的上升速率。當背景顆粒表面較粗糙且顆粒細長及主顆粒表面較光滑時，主顆粒易被推擠上升。
2. 當保麗龍球直徑為 2.5~4 公分時，主顆粒上升 1 公分至表面所需時間差異不大。
3. 保麗龍球直徑 > 4 公分時，上升至表面所需時間隨主顆粒直徑增加而變長、穩定度也較差，其原因為直徑愈大的主顆粒上方的背景顆粒也愈多、愈重，因此上升時間較長。

4. 當保麗龍球直徑 < 2.5 公分時，上升至表面所需時間隨主顆粒直徑減小而變長且穩定度也不佳。由於主顆粒較小，周圍空隙小、背景顆粒不易填塞推擠主顆粒上升。
5. 將顆粒表面覆上液體時，背景顆粒(BB 彈)對主顆粒的作用除了推擠排斥之外，還多了液體的黏滯力，使得向上的總力變小。因黏滯力：沙拉油 > 水，因此同一主顆粒在沙拉油中上升至表面的時間皆比在水中大。

三、由研究三：

1. 在振篩器的離心轉振動中(振動頻率 31Hz)，隨著背景顆粒粒徑愈大，其側向力較大使得主顆粒(桌球)易被推擠，所以主顆粒上升至表面的速率愈快。當背景顆粒粒徑 > 12mm 時，桌球下方周圍背景顆粒的施力方向較為水平，因此推擠桌球上升的分力較小。因此當粒徑比($\frac{r_{\text{桌球}}}{r_{\text{背景}}}$)小於 3.29 時，主顆粒便不再被推擠上升。
2. 在垂直振動(振動頻率為 30Hz、振動加速度約為 1.5g)的方式下，背景顆粒與桌球會隨振動台產生上下的跳動，使得顆粒間的空隙增加，此時背景顆粒填塞桌球下方空隙，而將桌球推擠上升。隨著背景顆粒愈大(即粒徑比愈小)，抬升桌球向上的速率也愈小，因此費時較長。
3. 以上實驗結果顯示相同的顆粒條件下，振動方式也會影響顆粒的對流情形。

四、由研究四：

1. 當大顆粒在上層、小顆粒在下層時，上下層顆粒間不會有對流現象；反之，當小顆粒在上層、大顆粒在下層時，上下層顆粒間會有對流現象，且粒徑比($r_{\text{大}}/r_{\text{小}}$)愈大，對流速率愈快。
2. 當粒徑比($r_{\text{大}}/r_{\text{小}}$) < 1.66 時，下層的大顆粒不易向上流動。
3. 以人工攪拌無法將大小顆粒混合均勻，在攪拌的過程中，大顆粒大部份分布在上層、小顆粒大部份在下層，反倒是對流發生的過程中，大小顆粒藉由振動器的振動較能達到均勻混合狀態，且粒徑比($r_{\text{大}}/r_{\text{小}}$)愈大，所需時間愈短。

五、綜合以上研究結果，顆粒體的密度、形狀、表面的光滑程度、顆粒間的粒徑比、顆粒表面覆上的液體黏滯性、振動方式及大小顆粒的起始分布狀態，皆會影響顆粒間的對流情形。整體而言，大顆粒傾向向上流動分布於上層。

陸、未來展望

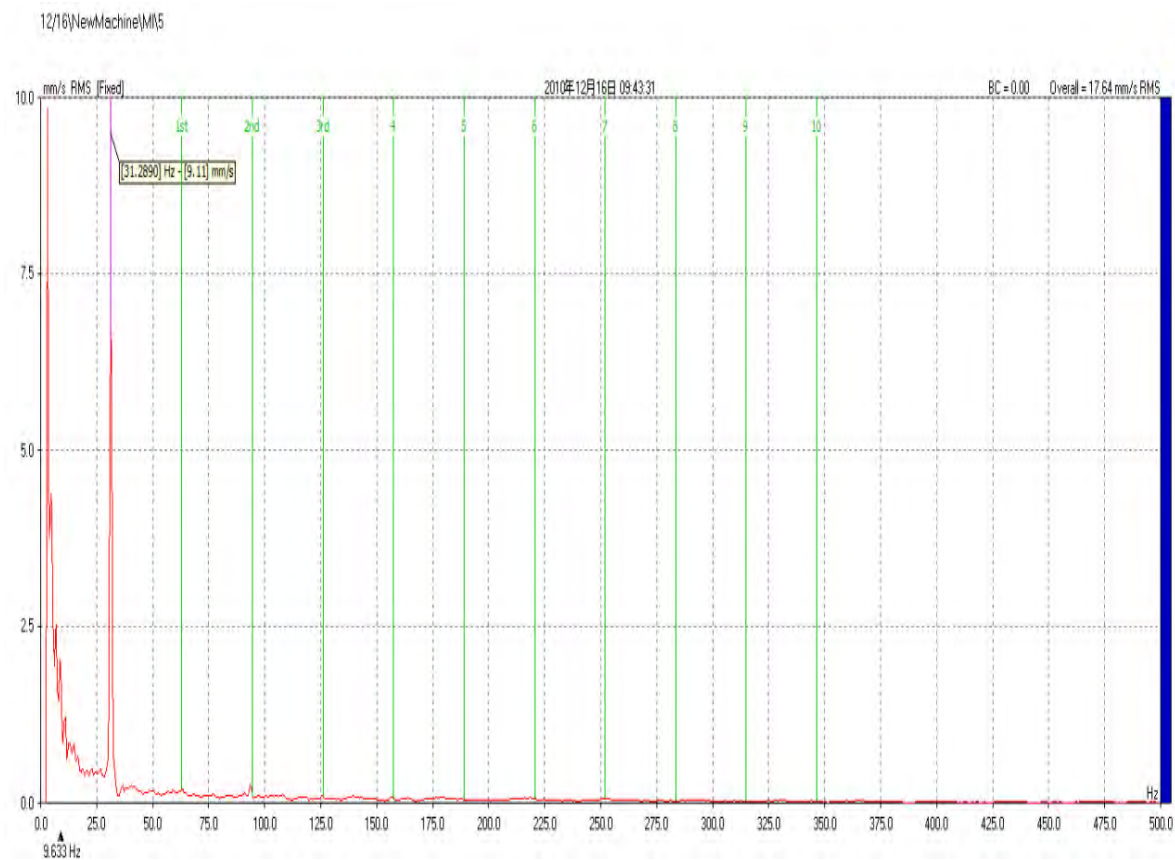
在本實驗中我們僅就振篩器及上下震動的震動模式探討顆粒體的流動，未來希望能探討不同的震動或轉動方式及振動頻率……等其他可能影響顆粒體對流的因素，來研究顆粒體的混合及分離條件，期望有助於查明"混合"或"篩選"的標準以應用在生活中。

柒、參考資料

1. 方啟守，2004年，振動床於弱振動下顆粒分離機制研究，國立中央大學機械工程研究所碩士論文。
2. 葉哲嘉、林中冠，2009年，顆粒體對流現象之探討，2009年臺灣國際科學展覽會優勝作品。
3. 蔡幸耕、蔡長蓉、唐明慈，扶搖直上—固態粒子的流體化現象，第四十五屆中小學科學展覽會高中組物理科作品。
4. 蔡宗翰，2008年，添加微量液體對振動床中顆粒體分離現象的影響，國立中央大學能源工程研究所碩士論文。
5. 賈魯強與黎壁賢，2001年8月，“漫談顆粒體物理”，物理雙月刊，廿三卷四期，503-510頁。
6. 黎壁賢，民國90年11月，“顆粒體物理研究之近年成果”，自然科學簡訊第十三卷第四期，130-132頁。
7. Faughn/Serway 著，褚德三審閱，黃淳權/王孟公合譯，Serway's College Physics，滄海圖書出版。

※ 附錄1：

1. 振篩器的振動頻譜：



【評語】 030110

1. 本件作品以震動器探討顆粒混合與分離的表現行為，實驗上能夠系統化從事粒徑等控制變因，分析並整理得到數項有趣結果。
2. 建議從事科展研究，應先研閱先前相關作品，並思考如何使探討獲得創新與進步性結果，鼓勵持續努力之。