

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

佳作

040110

扶搖直上——固態粒子的流體化現象

國立臺中女子高級中學

作者姓名：

高二 蔡幸耕 高二 蔡長蓉 高二 唐明慈

指導老師：

陳正昇

第四十五屆中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：高中組

作品名稱：扶搖直上~固態粒子的流體化現象

關鍵詞：振動、流體化、微粒篩選

編號：

目 錄

摘要.....	1
壹、 研究動機.....	1
貳、 研究目的.....	1
參、 研究設備及器材.....	1
肆、 研究過程與方法.....	3
伍、 研究結果.....	5
陸、 討論	11
柒、 結論	14
捌、 參考資料及其他.....	15

摘要

本實驗是探討振動方式、振動的頻率、大小顆粒的直徑比、不同材質大顆粒、不同直徑的背景顆粒等對大顆粒被推到表面的時間的影響。實驗結果顯示：垂直振動時，大顆粒與背景顆粒之直徑比愈大，大顆粒上升所需時間愈短；而水平振動時則與垂直振動之發現相反。垂直振動時，不論在固定頻率或變動頻率情況下，大小顆粒的直徑比愈大(ξ 愈大)，大顆粒露出表面的時間愈短。當 ξ 從3增至3.5時，大顆粒露出表面的時間變化最明顯。而大顆粒的密度愈大，露出表面所需的時間愈長。背景顆粒愈小，大顆粒上升至表面的時間愈短。

壹、研究動機

你在家中洗五穀米時，是否發現不同的穀物在不斷的搖動中逐漸分層呢？把不同大小的顆粒裝到一個容器中，然後搖動容器，大的顆粒浮上來，較小的顆粒留在容器底部，這種透過振動分離顆粒的現象稱作「巴西豆效應」(Brazil Nut Effect, BNE)。

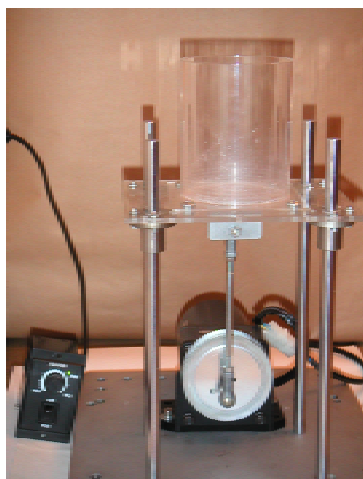
BNE 如何產生影響顆粒分層的效果呢？雖然相關實驗很多，卻極少討論水平或垂直振動、大小顆粒直徑比、不同材質大顆粒、不同直徑背景顆粒對於 BNE 效果的影響，所以我們想透過實驗來探討這些現象。

貳、研究目的

探討振動方式(水平振動與垂直振動)、振動頻率、大小顆粒直徑比、不同材質大顆粒、不同直徑背景顆粒對大顆粒被推到表面的時間的影響，找出其中的相關性，使工業上能更有效率的分離大小顆粒，以達節省能源的目的。

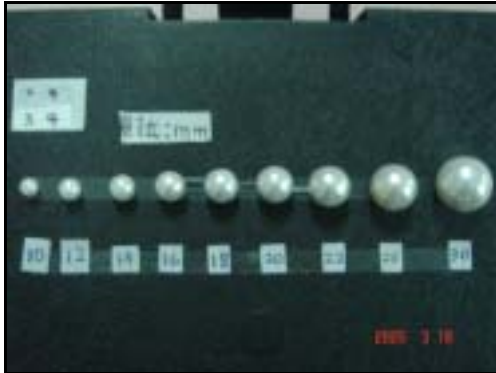
參、研究設備及器材

- 一、第一振動平台：垂直簡諧(SHM)振動，固定振幅 3cm，可調整頻率，上附壓克力振動平台及外徑 10cm，厚 3mm，高 12cm 的壓克力圓筒



二、球形顆粒

- (一) 塑膠材質，大小不同球型顆粒，直徑分別為 3、4、5、6、8、10、12、14、16、18、20、22、25 與 30mm
- (二) 不同材質，直徑 25mm 的球形顆粒（材質為保麗龍、木頭、塑膠、玻璃，購自德昌網路手藝行）



照片 (一): 大小不同之球型顆粒

照片 (二): 不同材質的球形顆粒

三、SONY D8 DCR-TRV410 數位攝影錄放影機一台

四、第二振動平台：產生垂直及水平之簡諧運動 (SHM)，振幅及頻率皆可調整，上附圓筒承座

五、盛裝顆粒圓筒，內徑 86mm

六、電源供應器一台，電線兩條

七、量尺一把，量測顆粒盛裝高度

八、碼錶一只，量測大顆粒上升時間

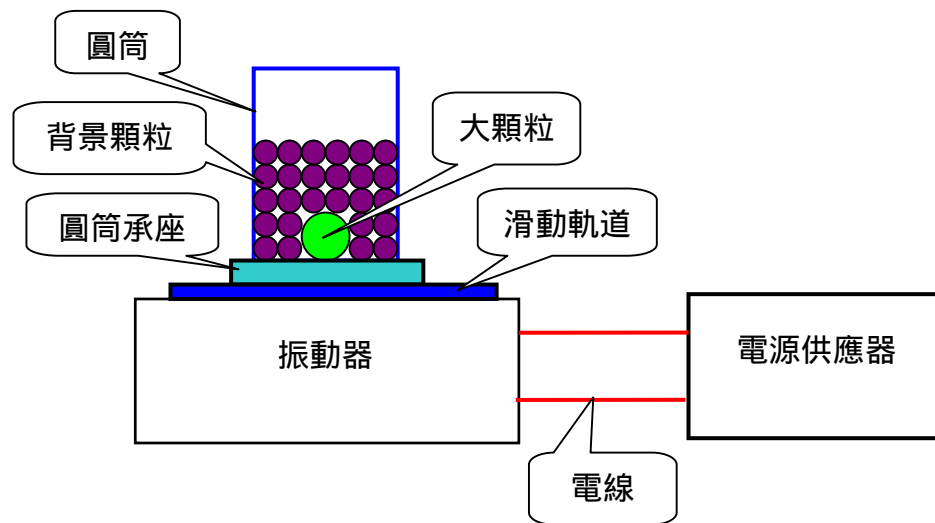


照片 (三): 垂直振動配置俯視圖

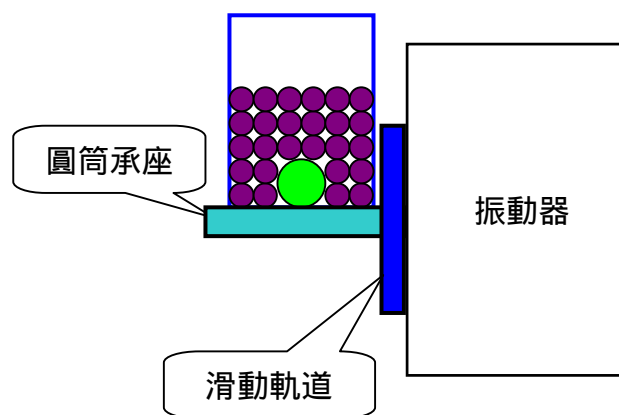
九、第二平台示意圖

本實驗設計一可產生簡諧運動振動器，振動器上置滑動軌道；上面鎖著裝載顆粒之圓筒筒承座，振動器運動時即可帶動圓筒運動。圖（一）為水平振動實驗之設備配置，振動器由可調整電流與電壓的電源供應器驅動，改變電源供應器的電壓可調整振動器的振動頻率。垂直振動實驗時如圖（二）所示，將振動器轉為垂直方向，並製作一夾具，將圓筒承座固定於滑動軌道，產生和水平振動實驗一致的運動，以

確保實驗的一致性。



圖（一）：水平振動實驗設備配置



圖（二）：垂直振動實驗平台裝置

肆、研究過程與方法

一、第一平台的實驗方法

（一）固定頻率 頻率 6Hz，振幅 3cm，深度為大顆粒直徑的二倍

1. 直徑 10mm 之大顆粒置於壓克力圓筒底部中央
2. 直徑 4mm 之背景顆粒填入圓筒至 10mm 大顆粒直徑的二倍，即 20mm 的深度
3. 頻率調整至 6Hz，振幅固定為 3cm
4. 打開振動器開關，垂直振動至 10mm 大顆粒露出表面為止
5. 重複上述步驟 15 次
6. 全程錄影
7. 判讀大顆粒露出表面所需時間的方法：
以定格畫面重複播放，計算出直徑 10mm 大顆粒露出表面 4mm × 4mm 的時間

8. 重複以上步驟，分別完成直徑 12、14、16、18、20、25、30mm 大顆粒固定頻率垂直振動實驗

(二) 變動頻率 頻率 2Hz~6Hz，振幅 3cm，深度為大顆粒直徑的二倍
實驗步驟同上，但將頻率在 4 秒內由 2Hz 調至 6Hz 再調回 2Hz 3 次

(三) 固定頻率 頻率 6Hz，振幅 3cm，深度為大顆粒直徑加 2cm
實驗步驟同上，但深度為大顆粒直徑加 2cm。由於背景顆粒的直徑為 4mm，填入的深度差異必須大於 4mm (大顆粒之直徑差異應大於 4mm)，故選擇直徑 12、16、20、25、30mm 的大顆粒進行固定頻率垂直振動實驗

(四) 改變密度 ρ 背景顆粒直徑 4mm，大顆粒直徑 25mm，密度分別為 0.026、0.661、1.013、2.387 g/cm³ 保麗龍、木頭、塑膠、玻璃大顆粒
實驗步驟同上 背景顆粒深度為大顆粒直徑的二倍，分別完成不同密度大顆粒的實驗。

(五) 改變背景顆粒 (3mm、5mm 及 6mm)
實驗步驟同上，大顆粒直徑為 25mm，背景顆粒換成 3mm、5mm 及 6mm，深度為大顆粒直徑的二倍，分別完成不同背景顆粒實驗。



照片 (四): 振動前裝置



照片 (五): 振動結果

二、第二平台的實驗方法

(一) 本實驗量測不同大顆粒與背景顆粒比例 (ξ) 之大顆粒上升至表面時間。本實驗以直徑 4mm 與 3mm 之顆粒為背景顆粒，每組皆進行水平和垂直振動實驗，記錄大顆粒上升到表面所需的時間。每組實驗重複 15 次，確認其重現性在可接受範圍

(二) 分別進行水平和垂直振動實驗，全程錄影

(三) 水平振動實驗 振幅 57.5mm

連接電源供應器和振動器，調整電源供應器的電流和電壓，確認振動器振動頻率，記錄其電壓與電流，做為後續實驗調整振動頻率參考

1. 背景顆粒直徑 4mm 顆粒實驗步驟

(1) 將直徑 Xmm 之大顆粒放置於圓筒底部中央，X 分別為 10、12、14、16、18、

20、22、25 與 30mm

(2) 把直徑 4mm 之小顆粒填入圓筒至 $X+20\text{mm}$ 的深度為止

(3) 啟動電源供應器，調整電壓以確認振動頻率為所設計的 2.13Hz 後關閉電源供應器

(4) 重複步驟(1)與(2)裝填顆粒後，重新啟動電源供應器使振動器產生水平振動至大顆粒露出表面為止，紀錄大顆粒由開始振動到露出表面的時間

(5) 同一直徑之大顆粒重複上述實驗步驟 15 次

(6) 計算大顆粒露出表面所需時間的平均值、標準差與二者比值

(7) 更換大顆粒尺寸，重複步驟(1)至(6)

2. 背景顆粒為直徑 3mm 之小顆粒實驗步驟與上述直徑 4mm 背景顆粒相同，但大顆粒直徑多了 $X=8\text{mm}$

(四) 垂直振動實驗 振幅 57.5mm

取下圓筒承座，將振動器轉為垂直，調整電源供應器的電流和電壓，確認振動器振動頻率為 2.37Hz，記錄其電壓與電流，作為後續實驗調整振動頻率之參考。並重複水平振動實驗步驟，以直徑 3、4mm 的背景顆粒進行實驗

伍、研究結果

一、第一平台實驗結果

(一) 固定頻率 頻率 6Hz 與變動頻率 頻率 2Hz~6Hz，深度為大顆粒直徑的兩倍時，大顆粒露出表面 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 所需的時間及比較（以 SPSS paired T-Test 統計）

直徑(mm)	固定頻率所需的時間 (s)	變動頻率所需的時間 (s)	P 值
10 ($\xi=2.50$)	59.01 $\pm$ 15.96	31.30 $\pm$ 7.73	< 0.001
12 ($\xi=3.00$)	59.90 $\pm$ 18.17	30.49 $\pm$ 5.21	< 0.001
14 ($\xi=3.50$)	29.93 $\pm$ 5.44	16.02 $\pm$ 1.95	< 0.001
16 ($\xi=4.00$)	22.65 $\pm$ 8.06	14.38 $\pm$ 1.50	< 0.001
18 ($\xi=4.50$)	19.41 $\pm$ 4.65	13.37 $\pm$ 1.54	< 0.001
20 ($\xi=5.00$)	19.88 $\pm$ 3.69	12.06 $\pm$ 1.60	< 0.001
25 ($\xi=6.25$)	09.81 $\pm$ 0.50	11.28 $\pm$ 0.64	< 0.001
30 ($\xi=7.50$)	07.36 $\pm$ 0.37	11.63 $\pm$ 1.38	< 0.001

表 (1-1)

註：P 值 < 0.05 表示統計學上有顯著意義

ξ 為 (大顆粒直徑) / (背景顆粒直徑) 的比值

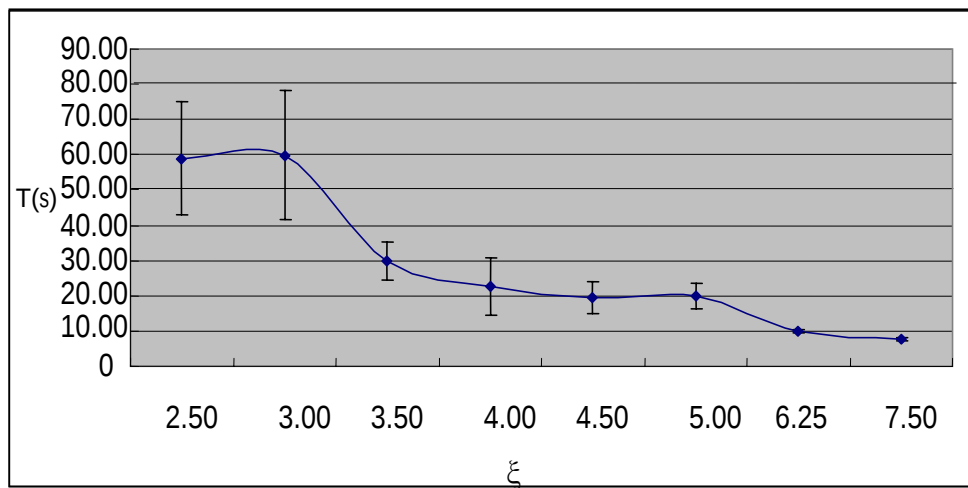


圖 (1-1) 固定頻率振動結果

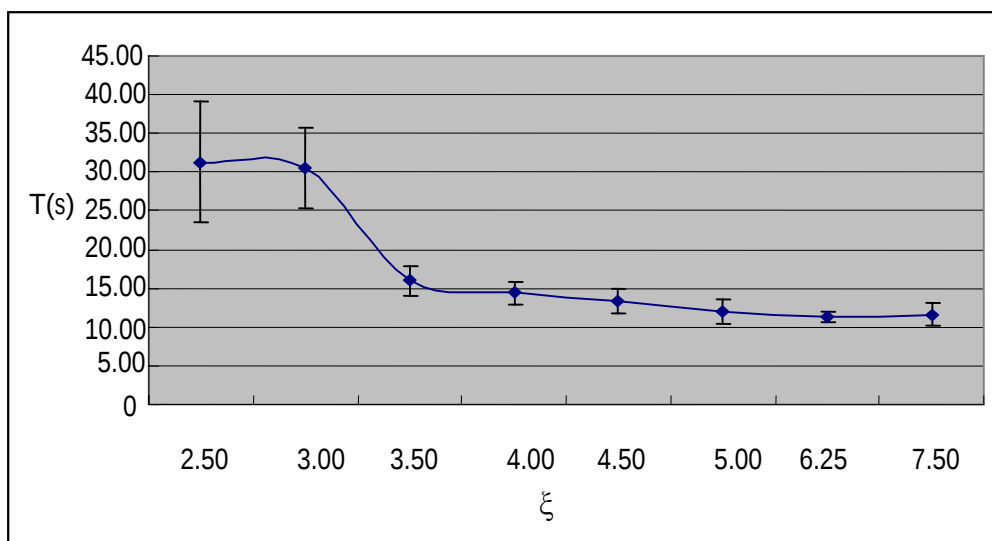


圖 (1-2) 變動頻率振動結果

(二) 固定頻率 頻率 6Hz，振幅 3cm，深度為大顆粒直徑加 2cm 時，大顆粒露出表面 4mm×4mm 所需的時間及比較

直徑(mm)	固定頻率所需的時間 (s)
12 ($\xi=3.00$)	54.43±13.14
16 ($\xi=4.00$)	22.95±2.88
20 ($\xi=5.00$)	19.88±3.69
25 ($\xi=6.25$)	09.25±0.96
30 ($\xi=7.50$)	05.94±0.28

表 (1-2)

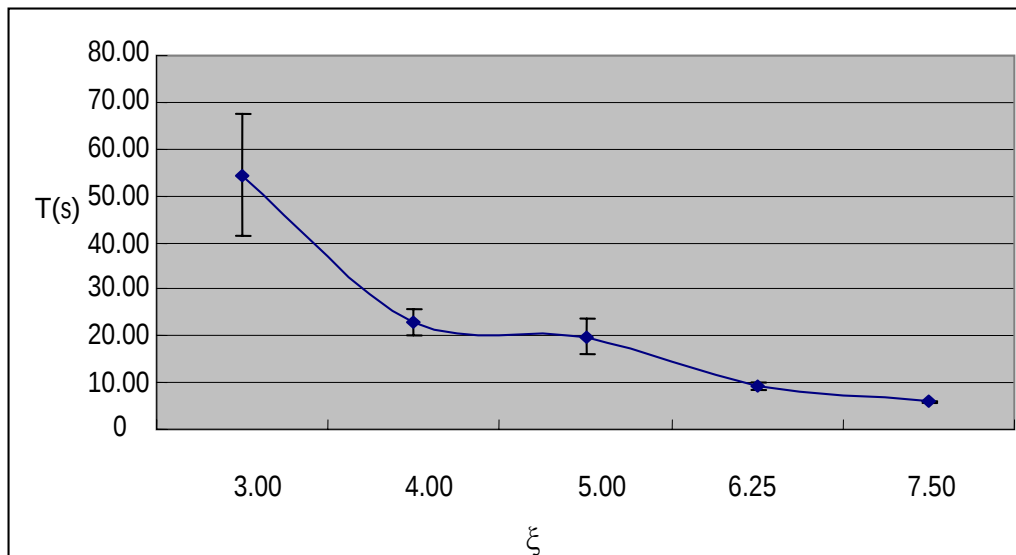


圖 (1-3) 固定頻率，深度為大顆粒直徑加 2cm 之振動結果

(三) 不同密度之比較 固定頻率 6Hz，大顆粒直徑 25mm，背景顆粒直徑 4mm，密度分別為 0.026、0.661、1.013、2.387 g/cm^3 保麗龍、木頭、塑膠、玻璃大顆粒

密度(g/cm^3) (材質)	所需時間 (s)
0.026 g/cm^3 (保麗龍大顆粒)	07.05± 0.36
0.661 g/cm^3 木頭大顆粒	09.13± 0.52
1.013 g/cm^3 塑膠大顆粒	09.81± 0.50
2.387 g/cm^3 玻璃大顆粒	13.34± 1.35

表 (1-3)

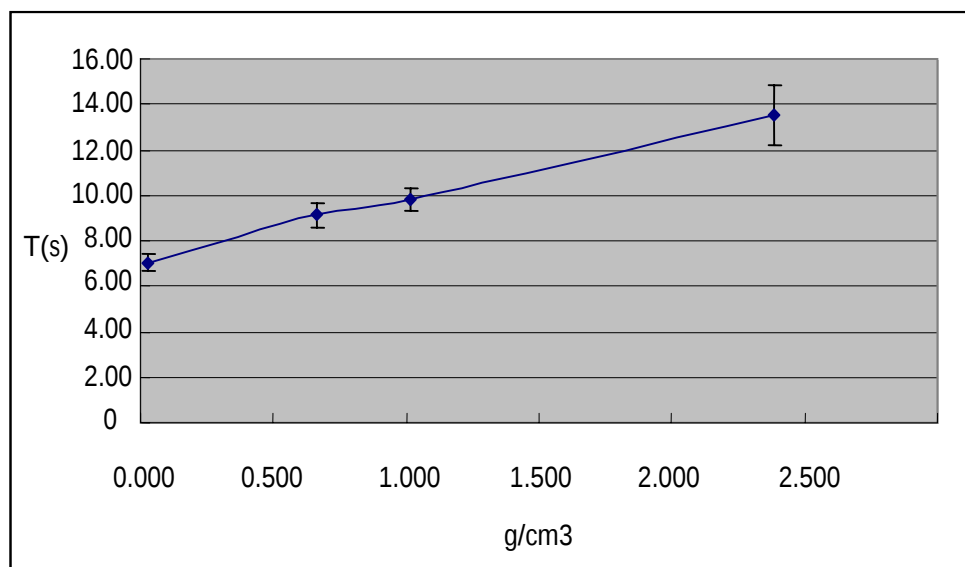


圖 (1-4) 不同密度大顆粒之振動結果

(四) 不同背景顆粒之比較 (固定頻率 6Hz , 大顆粒直徑 25mm , 背景顆粒直徑 3mm、5mm 及 6mm)

背景顆粒直徑 (mm)	大顆粒露出表面時間 (s)
3mm	6.19±0.42
4mm	9.81±0.50
5mm	>120
6mm	>120

表 (1-4)

二、第二平台實驗結果

(一) 水平振動

1. 背景為直徑 4mm 顆粒

實驗結果顯示大顆粒上升至表面所需時間 (T 值) 隨著 ξ 值的增加而延長 , 尤其在 ξ 值超過 5.0 以上 , T 值隨著 ξ 值的增加會快速增加。

大顆粒		大顆粒上升至表面所需時間(sec)		
直徑(mm)	直徑比 ξ	平均時間 T	標準差	標準差/平均值
30	7.50	23.67	5.68	0.24
25	6.25	13.13	3.56	0.27
22	5.50	8.07	2.19	0.27
20	5.00	5.00	0.93	0.19
18	4.50	4.33	0.82	0.19
16	4.00	4.60	0.99	0.21
14	3.50	4.60	1.35	0.29
12	3.00	4.40	0.74	0.17
10	2.50	4.53	0.92	0.20

表 (2-1) : 背景為直徑 4mm 顆粒之水平振動實驗數據

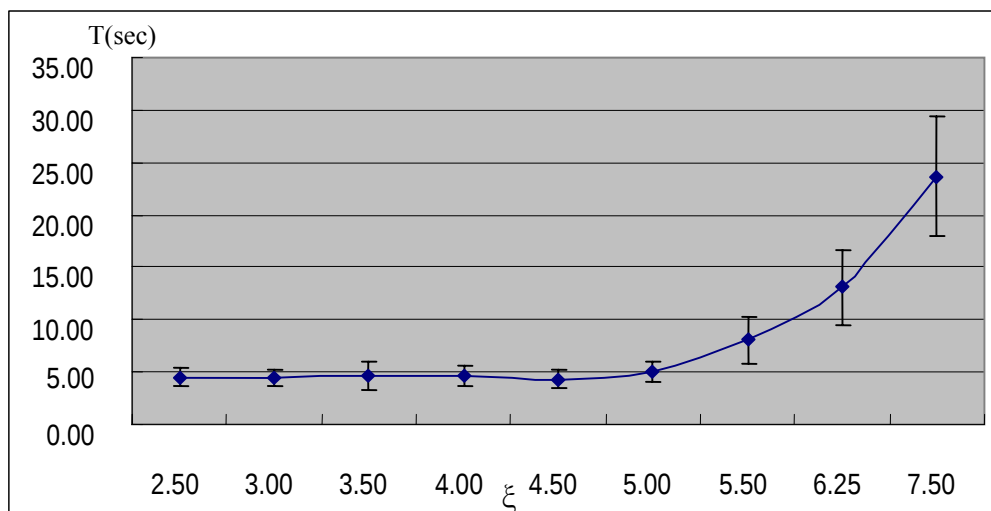


圖 (2-1) : 背景顆粒直徑 4mm 之水平振動實驗大顆粒上升時間與直徑比關係圖

2. 背景為直徑 3mm 顆粒

實驗結果顯示 T 值隨著 ξ 值的增加而提高，尤其在 ξ 值超過 5.33 以上， T 值隨著 ξ 值的增加會快速增加。

大顆粒		大顆粒上升至表面所需時間(sec)		
直徑(mm)	直徑比 ξ	平均時間 T	標準差	標準差/平均值
30	10.00	14.00	1.41	0.10
25	8.33	11.73	1.91	0.16
22	7.33	7.67	1.35	0.18
20	6.67	4.80	0.77	0.16
18	6.00	4.13	0.64	0.15
16	5.33	2.67	0.41	0.15
14	4.67	2.67	0.45	0.17
12	4.00	2.67	0.41	0.15
10	3.33	2.67	0.41	0.15
8	2.67	3.07	0.73	0.24

表 (2-2)：背景為直徑 3mm 顆粒之水平振動實驗數據

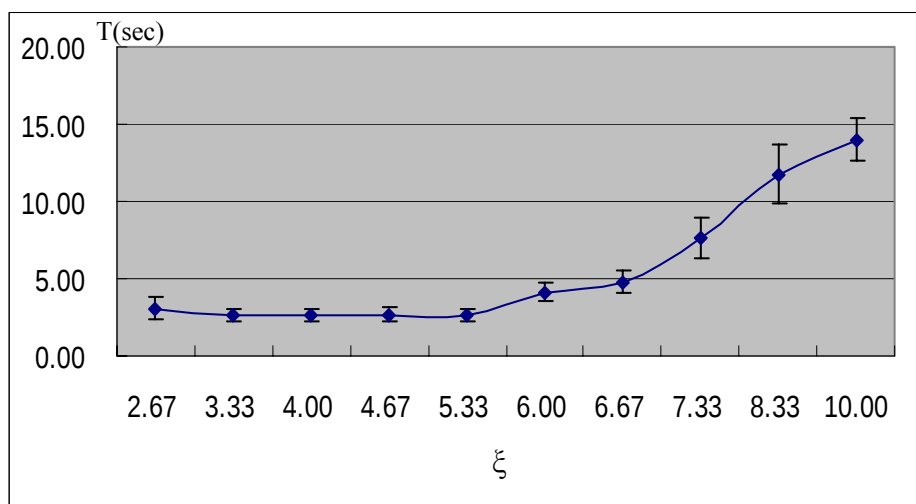


圖 (2-2)：背景為直徑 3mm 顆粒之水平振動實驗大顆粒上升時間與直徑比關係圖

(二) 垂直振動

1. 背景為直徑 4mm 顆粒

實驗結果顯示 T 值隨著 ξ 值的增加而降低，但在 $\xi > 4.5$ ， T 值隨著 ξ 值的降低趨勢並不明顯，甚至有起伏變化的狀況。

大顆粒		大顆粒上升至表面所需時間(sec)		
直徑(mm)	直徑比 ξ	平均時間 T	標準差	標準差/平均值
30	7.50	8.73	0.59	0.07
25	6.25	6.27	0.46	0.07
22	5.50	5.13	0.52	0.10
20	5.00	5.03	0.67	0.13
18	4.50	5.70	0.80	0.14
16	4.00	6.00	0.53	0.09
14	3.50	5.40	0.51	0.09
12	3.00	8.73	0.59	0.07
10	2.50	6.27	0.46	0.07

表 (2-3)：背景為直徑 4mm 顆粒之垂直振動實驗數據

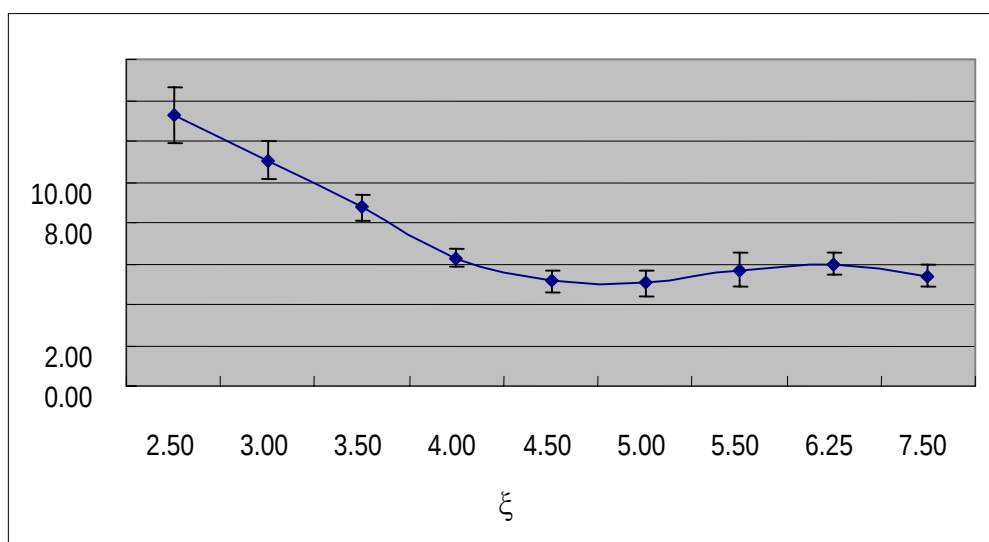


圖 (2-3)：背景為直徑 4mm 顆粒之垂直振動實驗大顆粒上升時間與直徑比關係圖

2. 背景為直徑 3mm 顆粒

實驗結果顯示 T 值隨著 ξ 值的增加而降低，但依本研究實驗數據顯示，在 ξ 值 > 5.33 ，T 值隨著 ξ 值的降低趨勢並不明顯。

大顆粒		大顆粒上升至表面所需時間(sec)		
直徑(mm)	直徑比 ξ	平均時間 T	標準差	標準差/平均值
30	10.00	15.80	1.32	0.08
25	8.33	13.07	1.16	0.09
22	7.33	11.20	1.01	0.09
20	6.67	8.87	0.92	0.10

18	6.00	8.67	0.62	0.07
16	5.33	6.90	0.43	0.06
14	4.67	6.47	0.48	0.07
12	4.00	6.43	0.53	0.08
10	3.33	6.67	0.59	0.09

表 (2-4)：背景為直徑 3mm 顆粒之垂直振動實驗數據

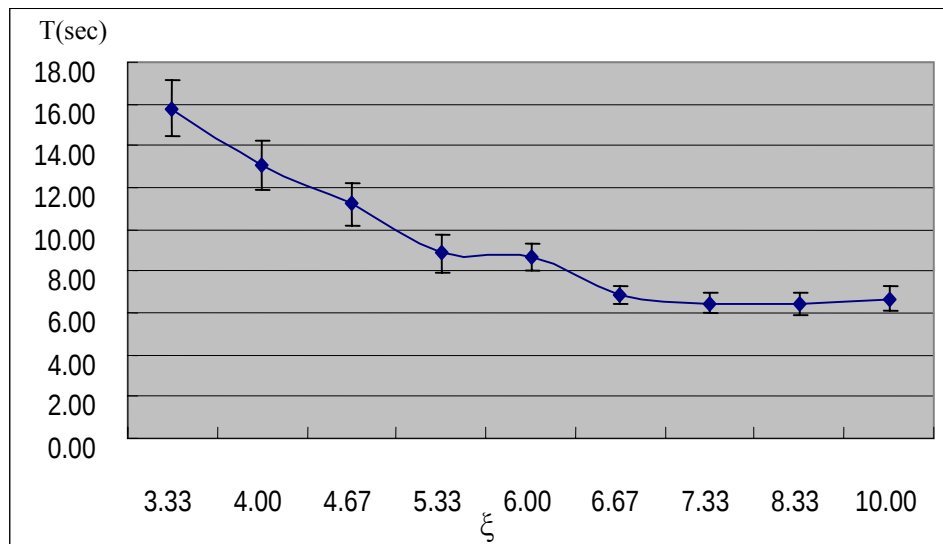


圖 (2-4)：背景為直徑 3mm 顆粒之垂直振動實驗大顆粒上升時間與直徑比關係圖

六、 討論

一、第一平台的討論

(一) 不同直徑的差異：

不論在固定頻率或變動頻率的情況下，大顆粒的直徑愈大 (ξ 愈大)，大顆粒露出表面的時間(T)愈短。

當顆粒體集中時，給予其振動，若振動加速度 g ，因顆粒體尚未克服本身重量，顆粒間不會有相對位移，因而不會產生流體化現象。若振動加速度 $> g$ 時，振動將導致表面顆粒能自由地運動，而產生飛躍 (Free Flight) 現象，同時顆粒和盒子的底層也會產生空隙，空隙的存在也使得顆粒間可以重新整理。由於重力的作用，飛躍的顆粒將會掉落而與底層產生碰撞，使顆粒間產生了對流作用[3]。

依據我們的觀察，較小的大顆粒（例如：直徑 10、12mm）在振動時，會陷入背景小顆粒之間所產生的孔隙中，而較大的大顆粒（例如：直徑 25、30mm）因體積大而不會陷入背景小顆粒之間所產生的孔隙中。

(二) 固定頻率與變動頻率大顆粒露出表面所需時間的差異：

在固定頻率與變動頻率狀態下，T 值皆有顯著的差異。在 $\xi = 5$ 時，變動頻率

振動之 T 值明顯比固定頻率振動之 T 值小。

依據我們的推論，這是因為大顆粒的體積較小時，上升後所造成的空隙有限。在固定頻率振動時，每個小顆粒振動的速率相同，小顆粒之間的相位差為 0，造成小顆粒之間的空隙較小，因此只有靜止時處於大顆粒周圍的小顆粒才有可能補進大顆粒上升後所造成的空隙，將大顆粒向上推升。而在變動頻率振動時，因為每個瞬間的頻率都不同，使小顆粒振動的速率不同，小顆粒之間的相位差不等於 0，導致小顆粒間的空隙增多，流體化效應增強，對流加速。所以此時變動頻率振動之 T 值明顯比固定頻率振動之 T 值小。

但如果 $\xi=6.25$ 及 $\xi=7.5$ 時，變動頻率振動之 T 值反而比固定頻率振動之 T 值大。此現象是因為大顆粒的體積較大，上升後所造成的空隙也較大。在固定頻率振動時，每個背景小顆粒振動的速率相同，位差為 0，相對碰撞較少，因此較能一致的補進大顆粒上升後所造成的空隙。而在變動頻率振動時，因為每個瞬間的頻率都不同，使背景小顆粒振動的速率不同，位差不等於 0，導致顆粒間產生相對碰撞，但因碰撞後每個背景小顆粒補進大顆粒上升後所造成的空隙的機率減小。所以此時變動頻率振動之 T 值比固定頻率振動之 T 值大。

(三) 由圖 (1-1) 及圖 (1-2) 得知，在 $\xi=3$ 增至 $\xi=3.5$ 時，大顆粒露出表面的時間變化最明顯。依據我們的推論，造成此現象的原因可能為振動時 $\xi < 3$ 的大顆粒因為體積小而易陷入小顆粒之間所產生的孔隙中，而 $\xi > 3.5$ 的大顆粒因為體積較大，不會陷入小顆粒之間所產生的孔隙而造成。

(四) 由圖 (1-3) 得知，固定頻率，深度為大顆粒直徑加 2cm 時，在 $\xi=3$ 增至 $\xi=3.5$ 時，大顆粒露出表面的時間變化最明顯。由表 (1-2) 及圖 (1-3) 可以應證表 (1-1) 及圖 (1-1) 之結果。

(五) 由圖 (1-4) 得知，在大顆粒直徑 25mm，小顆粒直徑 4mm，密度分別為 0.026、0.661、1.013、2.387 g/cm³ 保麗龍、木頭、塑膠、玻璃 之大顆粒垂直振動時，密度愈大，其露出表面的時間也愈長。而各組間除了木頭大顆粒與塑膠大顆粒外，皆有顯著的差異。

依據我們的推論，這是因為大顆粒的體積相同，密度大則重量重，大顆粒上升時需克服的重力也愈大，但小顆粒提供的向上推力 F 為定值，由 $F=ma$ 得知，大顆粒的質量愈大，所獲得的加速度就愈小，在所行距離相等的情況下，此密度較大的大顆粒 T 值也愈大。但因為木頭大顆粒與塑膠大顆粒的密度差異只有 0.352g/cm³，即此兩者所獲得的加速度差異不顯著，故木頭與塑膠大顆粒之 T 值並沒有顯著的差異。

(六) 由表 (1-4) 得知，背景顆粒愈小，大顆粒上升至表面的時間愈短。

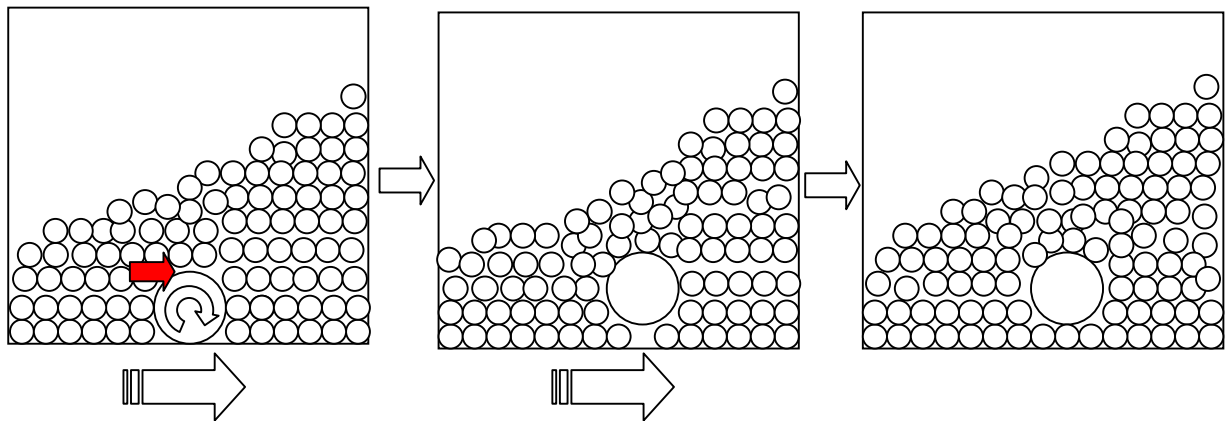
我們推測這是由於較小的背景顆粒間形成的空隙較小，使大顆粒較不會陷入

空隙中，且較小的背景顆粒較接近流體，介質流體化的程度較好，因此背景顆粒愈小，大顆粒上升至表面的時間愈短。

二、第二平台的討論

(一) 水平振動機制

我們推論：參考圖（三），當圓筒向右移動時，由於上方背景顆粒移動較下方劇烈，所以給大顆粒一個向右的力，因為大顆粒幾乎無法移動，故會以右下方背景顆粒為支點，形成一個力矩，以致大顆粒以右下方背景顆粒為支點旋轉，此時大顆粒下方出現空隙，又因為背景顆粒整體向右運動，所以會填補大顆粒下方空隙，此時大顆粒就向上移動了一層，但位置稍偏右方。同理，當圓筒向左移動時，大顆粒又會再爬升一層，不同的是大顆粒因為偏向左方，與前一次偏向右方抵銷，故大顆粒又回到中間位置，此結果與實際實驗所見到的一致。



圖（三）：水平振動機制示意圖

(二) 垂直振動機制

在振動過程中，大顆粒與小顆粒皆會產生飛躍現象，此時顆粒與圓筒底層間產生空隙，使顆粒間可重新整理，而後跳躍的顆粒因重力而掉落並與筒底產生碰撞，這個週期運動使顆粒間產生對流作用，流體化，然而下降的對流和器壁間的空隙太小，只能讓小顆粒繼續對流，因而大顆粒將留在表面。依照這個推論，大顆粒仍然保持在中間位置，此結果也與實際實驗所觀察一致。

(三) 顆粒上升所需時間之判斷標準

平台二之實驗所用的振動頻率較低，約介於 2~3Hz 之間，所以表面顆粒振動幅度不會太大，也比較不會影響觀察視線；且實驗所用大顆粒為白色，背景顆粒為深紫色，因此易於區別兩者之差異。當大顆粒露出白色部分約等於背景顆粒頂部面積時，立即記下秒數，即為 T 值。即使水平振動實驗時雖然表面背景顆粒會傾斜，但是由於大顆粒是由中間浮出，故並不會有太大的影響。

(四) 背景顆粒深度的選擇

本實驗量測的是大顆粒上升時間，故希望大顆粒上升之位移量相同，所以移動距離，也就是大顆粒埋入背景顆粒的深度都設定為大顆粒頂端再加上 20mm，

如此的比較有共同基準。

(五) 誤差分析

為了防止顆粒愈因振動而跳出圓筒，我們加高圓筒高度。此外，因為顆粒與圓筒材料皆為塑膠類材質，摩擦後易產生靜電，所以在每次實驗前，須將顆粒攪拌才繼續進行下次實驗。另外，振動平台為機械式裝置，零件間運動時易產生摩擦，需加潤滑油以減少摩擦；實驗過程中發現，開機後第一次實驗之頻率往往比所設定頻率較低，而開機經過暖機一陣子後，振動頻率即相當穩定。經由上述幾項因素的改進，實驗的精確度也隨之提高。

(六) 未來展望

BNE 的現象顯示透過顆粒的振動可以將較大的顆粒篩選出來，本研究已顯示 T 值隨著 ξ 值以及振動方式的不同而異，而且不同背景顆粒也產生不同的結果，這些數據可提供工業界對於顆粒分離更有效的方法。我們曾經在垂直振動實驗大顆粒到達表面之後讓機器繼續運轉，發現大顆粒會向兩旁移動，若大顆粒較小則會由圓筒邊緣再下沉，藉此證明流體化現象，因此探討讓大顆粒無法上升或是下沉的 ξ 臨界值為另一個後續可探討之方向。

柒、 結論

一、 垂直振動

- 一 固定背景顆粒，不論在固定頻率或變動頻率的情況下， ξ 值愈大， T 值愈小。
- 二 固定背景顆粒，當 ξ 值由小逐漸變大， T 值的變化量也逐漸變小。而當 ξ 值介於 5~6 之間時， T 值將會趨於穩定。
- 三 在 $\xi = 5$ 時，變動頻率振動時， T 值明顯比固定頻率振動時小。但如果 $\xi = 6.25$ 及 $\xi = 7.5$ ，變動頻率振動時， T 值反而比固定頻率振動時大。
- 四 在 $\xi = 3$ 增至 $\xi = 3.5$ 時， T 值變化最明顯。此結果並沒有因為背景顆粒深度定義不同而改變。
- 五 大顆粒密度愈大，其 T 值也愈大。

(六) 背景顆粒愈小，大顆粒上升至表面的時間愈短。

二、 水平振動

- 一 固定背景顆粒， ξ 值愈大， T 值愈大。
- 二 固定背景顆粒，當 ξ 值由大逐漸變小， T 值的變化量也逐漸變小。而當 ξ 值由大變小至趨近於 5 後，其對於 T 值的變化較無影響。

三、 比較

	影響因素	水平振動	垂直振動
固定背景顆粒	ξ 值愈大	上升所需時間愈長	上升所需時間愈短
	ξ 值愈小	上升所需時間愈短	上升所需時間愈長
	ξ 值由大變小	上升所需時間變化值愈小	上升所需時間變化值愈大

捌、 參考資料

- [1] *Brazil Nut Effect: The Settling of Packaged Materials*, Resource Area for Teachers, 2003.
[http://www.raft.net/resources/ideas/Brazil Nut Effect.pdf](http://www.raft.net/resources/ideas/Brazil%20Nut%20Effect.pdf)
- [2] *Experiment: The Brazil Nut Effect*, SEED, 2003.
<http://www.seed.slb.com/en/scictr/lab/brazilnut/>
- [3] 賈魯強與黎璧賢, “漫談顆粒體物理”, *物理雙月刊*, 廿三卷四期, 503-510 頁, 2001 年 8 月。
- [4] M. E. Mobius, B. E. Lauderdale, S. R. Nagel and H. M. Jaeger, “Size Separation of Granular Particles,” *Nature*, Vol. 414, Nov. 15, 2001, p.270.
- [5] X. Cheng, *Experimental Study of the Brazil Nut Effect in Pseudo-2D Systems*, Project Report, The James Franck Institute and Department of Physics, 2002, The University of Chicago, USA.
- [6] D. C. Hong and P. V. Quinn, “Reverse Brazil Nut Problem: Competition between Percolation and Condensation,” *Physical Review Letters*, Vol. 86, No. 15, April 2001.
- [7] A.P.J. Breu, H.-M. Ensner, C.A. Kruelle and I. Rehberg, “Reversing the Brazil-Net Effect: Competition between Percolation and Condensation,” *Physical Review Letters*, Vol. 90, No. 1, Jan. 2003.
- [8] T. Shinbrot, “The Brazil Net Effect – in Reverse,” *Nature*, Vol. 429, May 27 2004, pp.352-353.

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 物理科

佳作

040110

扶搖直上——固態粒子的流體化現象

國立臺中女子高級中學

評語：

本件以振動方式讓埋於較小顆粒堆裡的較大顆粒浮出，能以相對半徑為參數探討浮出所需時間，也能以簡單旋轉模型來定性解釋浮出的現象，但較缺乏創新之發現與見解，在定量討論方面尚有加強空間。