

屏東縣第六十五屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：風雲再起—探討表面結構的氣流現象

關 鍵 詞：氣流、風速變化比例

編號：B2014

風雲再起—探討表面結構的氣流現象

摘要

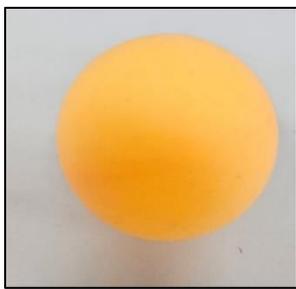
由於對空氣的流動非常好奇，今年我們繼續探討關於表面結構語氣流現象。我們設計風洞及氣流觀測筒，使用Logger pro進行風速分析，以及手機中的超慢速攝影觀察空氣的流動情形。研究結果顯示：凹下顆粒面較凸起顆粒面風速變化比例較小，讓風速更穩定，大小相間的凹下顆粒面對風速穩定效果更好。而當風速大及基本面曲度大時氣流通過凹下顆粒面甚至出現增加風速的情形。而觀察空氣在凸起顆粒面及凹下顆粒面的流動情形，我們發現空氣在凸起顆粒面間傳遞時，出現撞擊減速的現象，而在凹下顆粒面傳遞時，則看到空氣的流動的速度增加。

壹、前言

一、研究動機

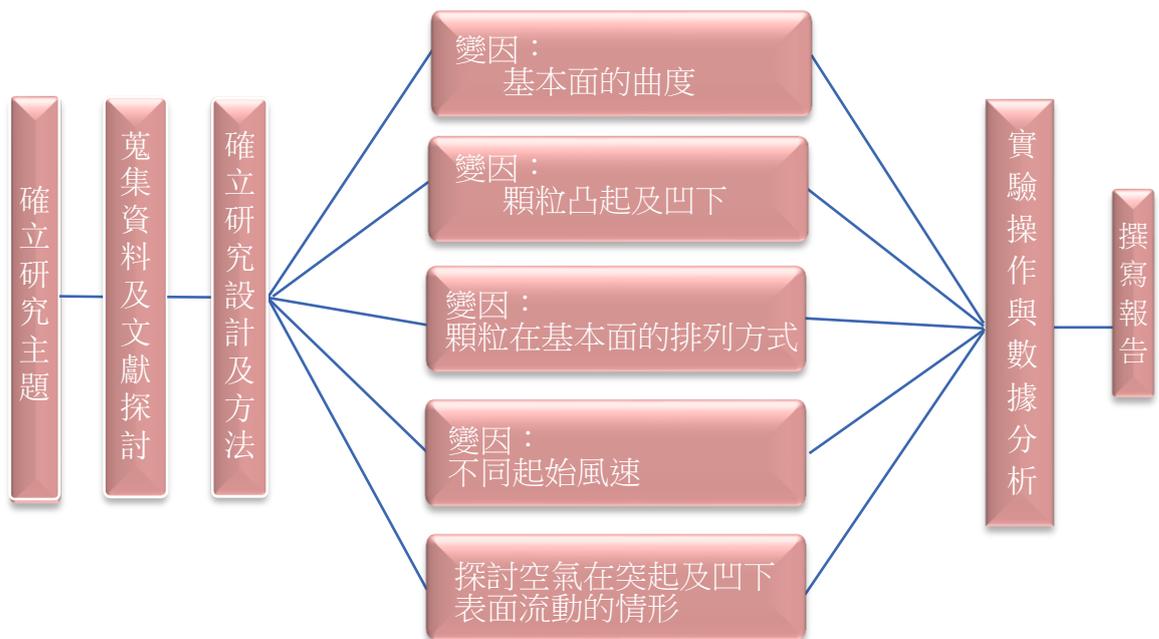
去年因為我們觀察到在日常生活中不同的球體表面有不同的紋路，像是乒乓球有平滑的表面、籃球的表面有細小的突起顆粒，但高爾夫球的表面卻由小凹洞組成，因此我們開啟了對空氣流動與表面風速的研究。但我們還有些問題未解，若風速不同，對曲面上不同位置的風速有何影響？若使用大小相間的方式排列彈珠，對風速又有何影響？同樣的凹洞情形，在不同取率時對風速有何影響？另外，我們也想知道，究竟在彈珠或凹洞表面空氣是如何流動，會使得風速有這些變化？因此我們今年再進行相關研究。

本研究探討空氣流動的速率，與國中自然第五冊第一單元運動學有關。



二、研究目的

(一)研究流程圖



(二)研究目的

根據研究流程，為了解各項變因對風速的影響，我們利用紙箱及吸管設計出風洞，並利用風速計量測實驗基本面上的五點風速，以及設計另外一個觀察筒觀察空氣在彈珠及凹洞上的流動情形，並設定以下的研究目的：

1. 探討不同曲度對凸起顆粒表面風速變化的關係。
2. 探討不同曲度對凹下顆粒表面風速變化的關係。
3. 探討排列規則對凸起顆粒面表面風速變化的關係
4. 探討排列規則對凹下顆粒面表面風速變化的關係。
5. 探討不同起始風速對凸起顆粒面表面風速變化的關係。
6. 探討不同起始風速對凹下顆粒面表面風速變化的關係。
7. 探討空氣在在凸起顆粒面及凹下顆粒面上的流動情形。

三、文獻回顧

(一)雷諾數(Reynolds number)

本研究旨在研究風速及其流動，須先了解空氣在風洞中的狀況。

雷諾數是用來衡量氣流為層流或紊流的方式，定義為

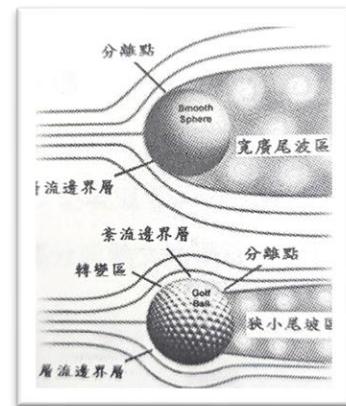
$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad \text{其中} L \text{ 為特徵長度，} V \text{ 為速度，} \nu \text{ 則為運動黏度}$$

本實驗中使用的風洞為正方形，特徵長度 L 為0.7公尺，透過查表得 ν 為 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，風速範圍為2.2~0.9，雷諾數介於96250~39375。

(二)表面風速理論：

刻意增加表面粗糙度有時甚至會降低阻力，因為紊流邊界層可能提早發生，增加之慣性力將分離點發生位置往後移（王曉剛，2020年）。如右圖。

高爾夫球表面有凹洞，會使邊界的誘發現象提前發生，將層流提早轉變成紊流，使球後端的尾波區變得比沒有凹洞的球的層流狹



窄，且壓力更大，僅略微增加摩擦阻力，因而阻力總和變得更小。

(三)關於表面凸起顆粒及凹下顆粒對表面風速變化的影響

1. 我們使用的電風扇風速有3檔，但經檢測電風扇風速分布約有0.3公尺/秒的誤差，因此若依原始數據直接比較容易失準，我們將表格數據轉換成風速變化比例來呈現，風速變化比例定義如下：

$$\text{風速變化比例} = \frac{\text{某位置風速} - \text{起始位置風速}}{\text{起始位置風速}}$$

2. 我們去年的科展作品中，我們的結論是：

(1) 當基本面是平滑曲面時，曲度越大，迎風面半高處與最高處風速增加比例越高。

(2) 當空氣流過有凸起顆粒的表面時，會使得風速驟降；若顆粒較小、間距較小，風速變化比例就越大，風速比例上降較多。

(3) 當空氣流過有凹下顆粒的表面時，顆粒較大、間距較小，風速變化比例較小。

(4) 有凹下顆粒的表面相較有平滑表面風速變化比例較為平緩。迎風面風速不會增加，背風面風速變化比例也降得較少。

由上面結論，若要使風速變化比例較小，應該選用較大的顆粒，也就是大彈珠，間距小風速較穩定。

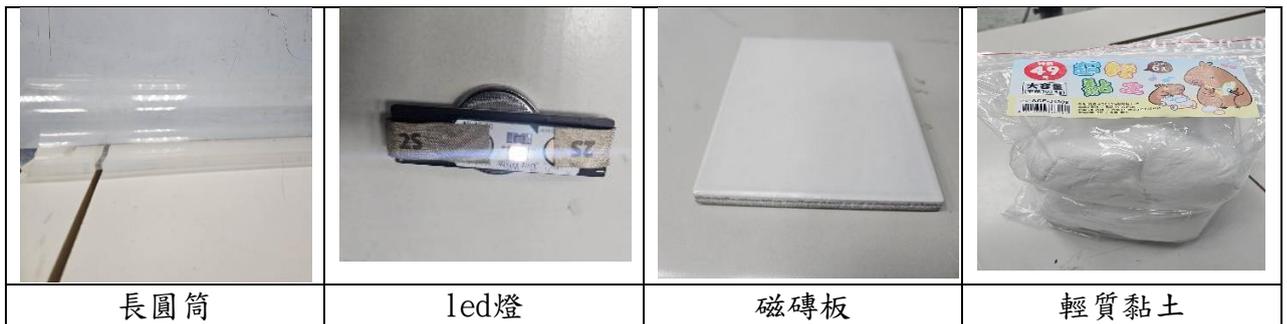
貳、研究設備及器材

一、研究設備及器材

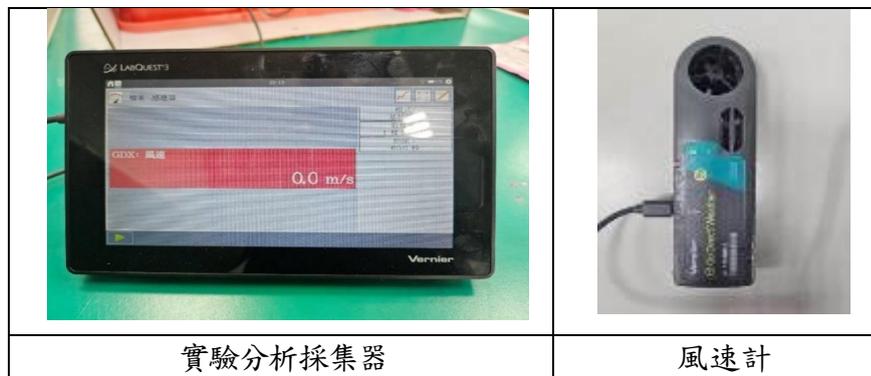
1. 風洞：電風扇、吸管、紙板
2. 氣流觀察筒：壓克力圓筒、led燈2個、煙餅。
3. 實驗基本面：

塑膠桌墊(長：45cm 寬：30cm)、輕質黏土

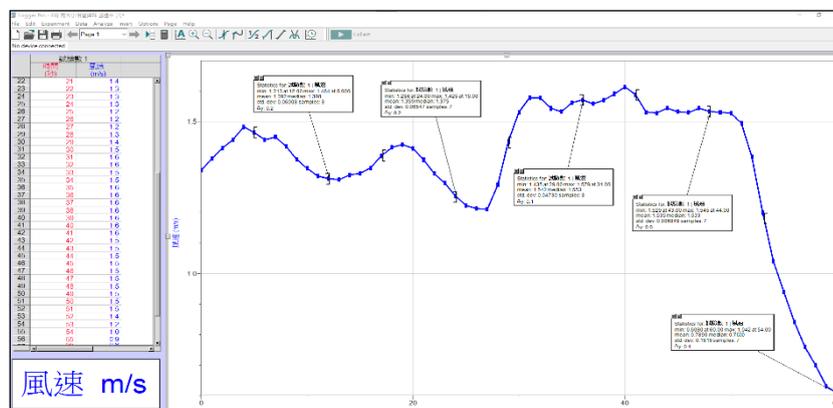
玻璃珠(直徑 1.2 公分，以下簡稱小彈珠)、玻璃珠(直徑 2.4 公分，以下簡稱大彈珠)、磁磚板(10cm*10cm，厚度 1cm)



4. 風速測定儀器：本實驗採用 LabQuest3 風速計及實驗分析採集器。



二、分析軟體：使用 Vernier 的 Logger pro3.16.2 進行圖形風速分析。



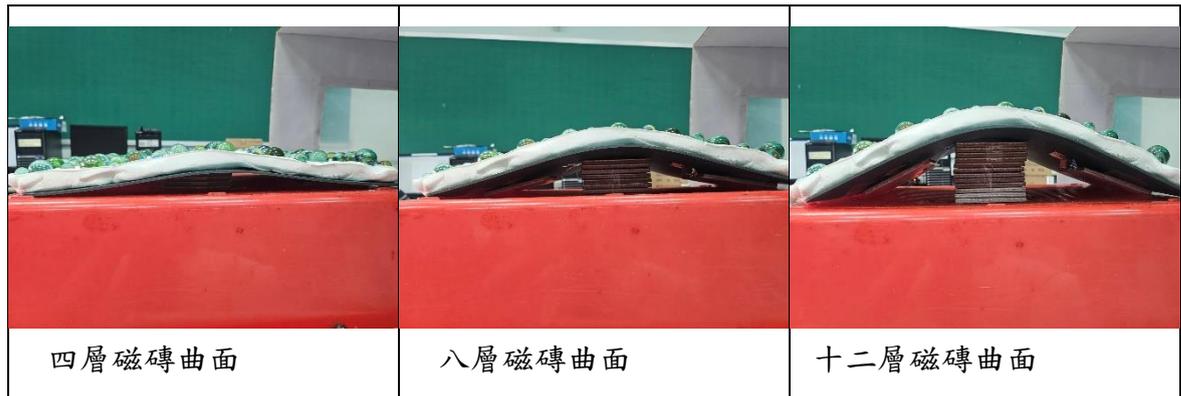
分析軟體實際操作圖

參、研究過程或方法

一、設計風洞、氣流觀察筒及實驗基本面的

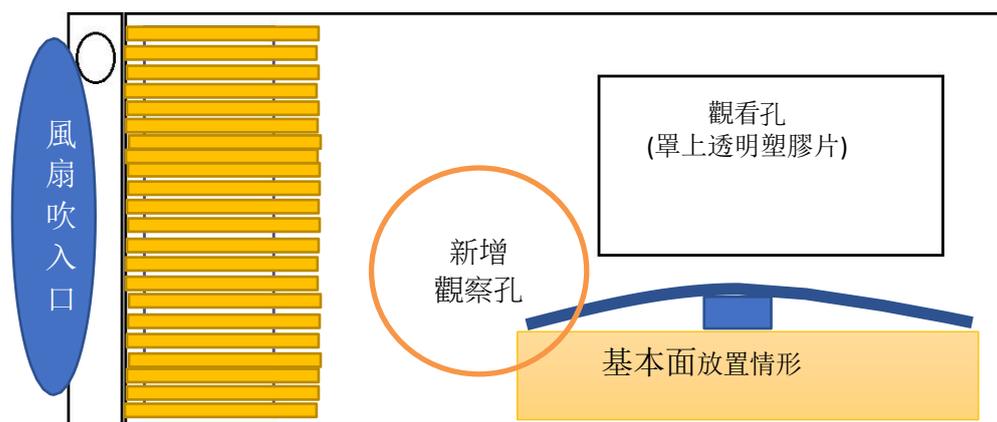
(一) 建立實驗基本面

我們沿用去年設計的基本面，以塑膠桌墊(稍可彎取曲)，表面在附上一層超輕黏土，並用玻璃珠製造突起及凹下構造。為了能夠方便改變實驗的表面曲率使用磚塊疊在桌墊下方來方便調整，。



(二) 設計風洞

我們沿用去年的風洞設計，用保麗龍膠黏住多根吸管，產生風向穩定的氣流，另外為了能清楚觀察氣流，我們在原來的觀看窗對面再另外開圓孔及黏上圓形壓克力板。設計圖如下：



風洞設計圖



實驗風洞側拍圖



實驗風洞正拍圖

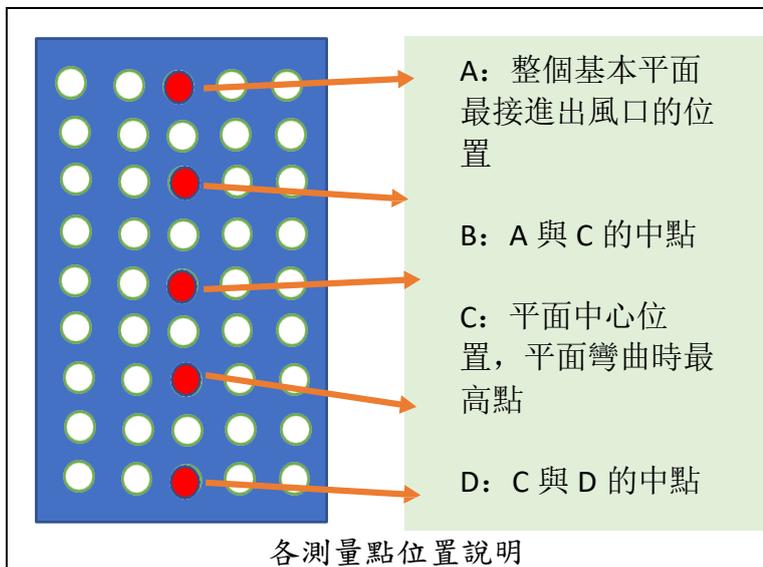
(三)設計氣流觀察筒

去年科展實驗的過程中，我們很好奇空氣在這些表面的流動情形為何？我們原來想透過風洞旁的觀察孔來觀看裡面空氣的流動，但無法觀察出，過程中我們還另外設計出一個較小的風洞，以及使用水務機來測試，但都不易觀察，最後我們使用完全透明的壓克力長筒當作觀察筒，再製作一個氣流觀測筒，並使用煙餅來觀察空氣流動。



氣流觀察筒

(四)測量風速位置說明及實際操作情形



各測量點位置說明



實際操作情形

(五)風速紀錄說明

由多次實驗，我們發現使用的風速探測器約有3秒鐘調整適應風速的時間，由於分析採集氣最多僅能設定60 秒時間，本實驗設計預計測試 5 個位置，每一位置的測試時間為 12 秒。

因此，在使用軟體分析時，每一位置的前 0~5 秒為移動風速探測器及調整適應風速的時間，因此各位置求風速平均的時間設定為五個區段。

A：5~12秒 B：17~24 C：29~36 D：41~48 E：53~60

二、探討不同曲度對凸起顆粒及凹下顆粒表面風速變化的關係

將實驗基本面平放桌上，中央下方以磁磚塊墊高，以調整實驗基本面的不同曲度，並分別使用大彈珠當凸起物。

(一)以凸起顆粒基本面中央下方分別放入磁磚板4塊、8塊及12塊，測量凸起顆粒面的風速。

(二)將凸起顆粒基本面，改成凹下顆粒基本面，重複步驟(一)。



三、探討排列規則對凸起顆粒及凹下顆粒表面風速變化的關係

若為兩種不同大小的凸起顆粒交錯排列，對表面風速又有何影響？我們用大小彈珠來操作本實驗，以寬度 1 公分當作間距。並且我們分成三種曲度來探討。

(一)將大小彈珠以右圖的形式整齊排列於基本面上。

(二)將此基本面平放於風洞觀察區內，中央下方分別疊加磁磚板4塊、8塊及12塊，測量凸起顆粒面的風速。並測量不同位置風速。

(三)分別再測全為大彈珠及全為小彈珠的情形，重複步驟(一)~(二)。

(四)將凸起顆粒基本面，改成凹下顆粒基本面，重複步驟(一)~(三)。



四、探討不同起始風速對凸起顆粒及凹下顆粒表面風速變化的關係

我們想知道不同風速是否會造成凸起顆粒及凹下顆粒表表面風速變化的影響，因電風扇可調整成三種不同風速，我們以這三種不同風速來比較對表面風速變化。

- (一)將大彈珠置於基本面上，使用最小風速中央下方疊加磁磚板4塊，測量凸起顆粒面的風速。並測量不同位置風速。
- (二)將風速調整成中速及最快速。
- (三)再將瓷磚板改成8塊及12塊，重複實驗(一)~(二)。
- (四)將凸起顆粒面改成凹下顆粒面，重複步驟。

五、探討空氣在凸起顆粒及凹下顆粒上的流動情形

為了方便觀察空氣的流動情形，我們使用煙餅，擺放在氣流觀察筒前端，在利用手機中的超慢速攝影，來觀察空氣在凸起顆粒及凹下顆粒表面的流動情形。

肆、研究結果

一、探討不同的表面曲度對凸起顆粒面及凹下顆粒面表面風速的影響

(一)研究結果

以大彈珠為凸起顆粒表面，來進行本實驗。我們將表格數據轉換成風速變化比例，以了解風速變化的情形。

凸起顆粒表面不同曲度的風速 m/s 使用大彈珠			
位置	中央 4 層磚	中央 8 層磚	中央 12 層磚
A	1.55	1.50	1.38
B	1.61	1.56	1.41
C	1.65	1.70	1.75
D	1.64	1.63	1.47
E	1.51	1.27	0.71

凸起顆粒表面不同曲度 風速變化比例 使用大彈珠			
位置	中央 4 層磚	中央 8 層磚	中央 12 層磚
B	0.035	0.044	0.017
C	0.062	0.132	0.266
D	0.058	0.087	0.063
E	-0.028	-0.150	-0.483

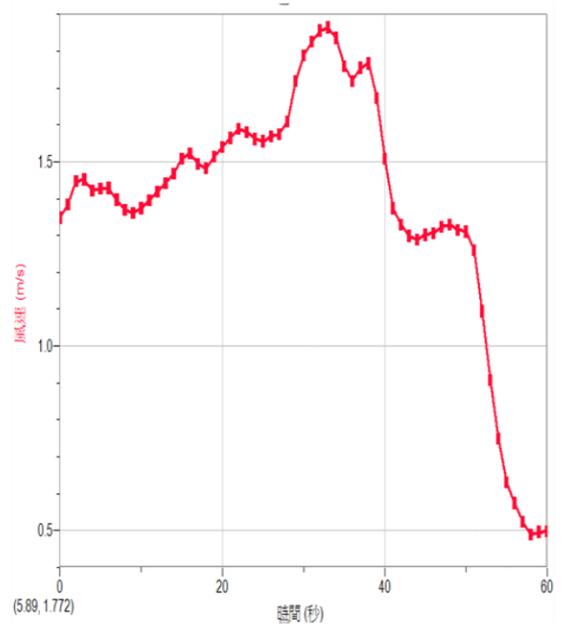
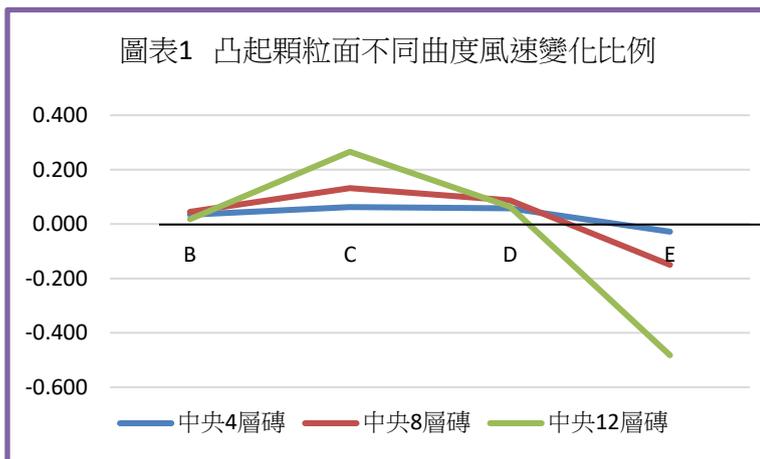


圖1 風速紀錄圖(凸起顆粒面中央12層磚)
圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

(二)分析

從〈圖表1. 凸起顆粒面不同曲度風速變化比例〉，看出表面曲度越大時風速變化比例較大，顯示風速減少較多。

二、探討不同的表面曲度對凹下顆粒面表面風速的影響

(一)研究結果

凹下顆粒面不同曲度各位置的風速 m/s 使用大彈珠			
位置	中央 4 層磚	中央 8 層磚	中央 12 層磚
A	1.43	1.34	1.34
B	1.56	1.56	1.50
C	1.60	1.62	1.63
D	1.57	1.63	1.55
E	1.40	1.29	1.09

凹下顆粒面不同曲度風速變化比例			
位置	中央 4 層磚	中央 8 層磚	中央 12 層磚
B	0.092	0.170	0.122
C	0.120	0.214	0.217
D	0.101	0.222	0.156
E	-0.019	-0.032	-0.182

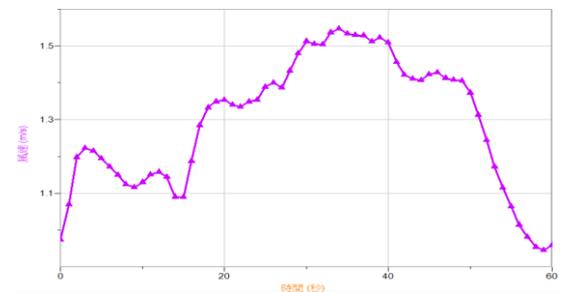
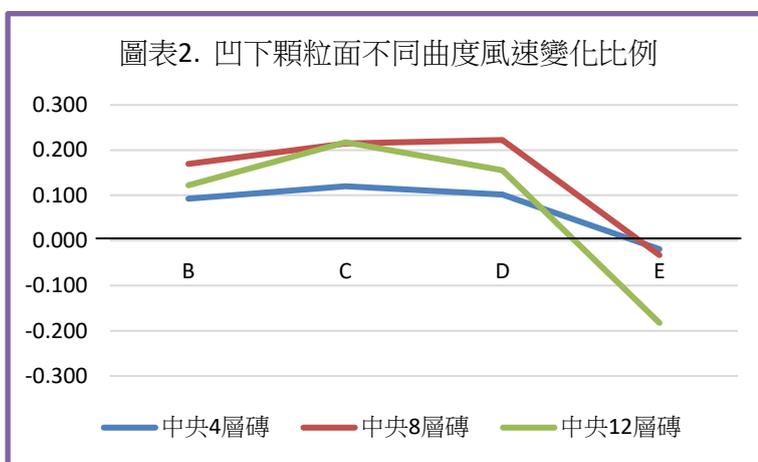


圖2 風速紀錄圖(凹下顆粒面中央12層磚)
圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

(二)分析

從〈圖表2凹下顆粒面不同曲度風速變化比例〉，看出表面曲度越大時，風速變化比例較大，也就是說風速減少比例較多，風速較不穩定。

三、探討不同排列規則對凸起顆粒面表面風速變化的關係

(一)研究結果

1. 基本面曲度-中央4層磚

位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
A	1.59	1.60	1.43
B	1.70	1.61	1.47
C	1.74	1.67	1.52
D	1.72	1.66	1.55
E	1.58	1.46	1.21

位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
B	0.073	0.005	0.031
C	0.100	0.040	0.060
D	0.083	0.037	0.081
E	-0.007	-0.087	-0.152

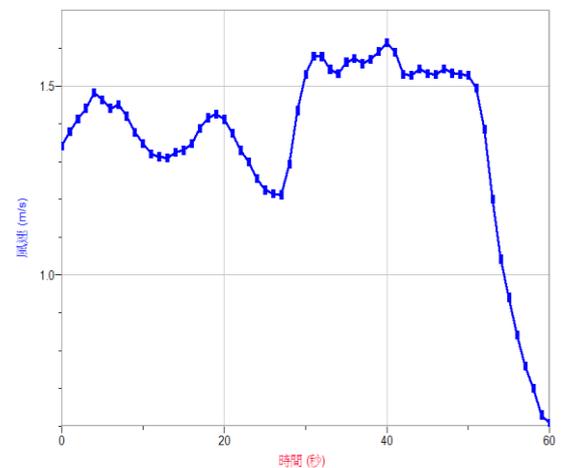
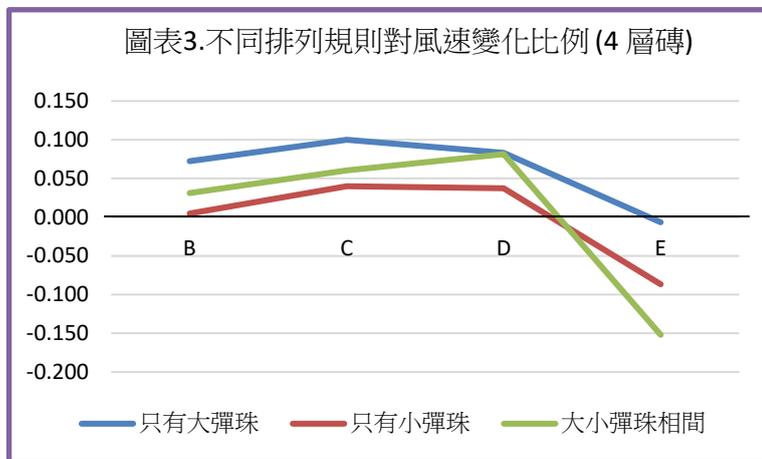


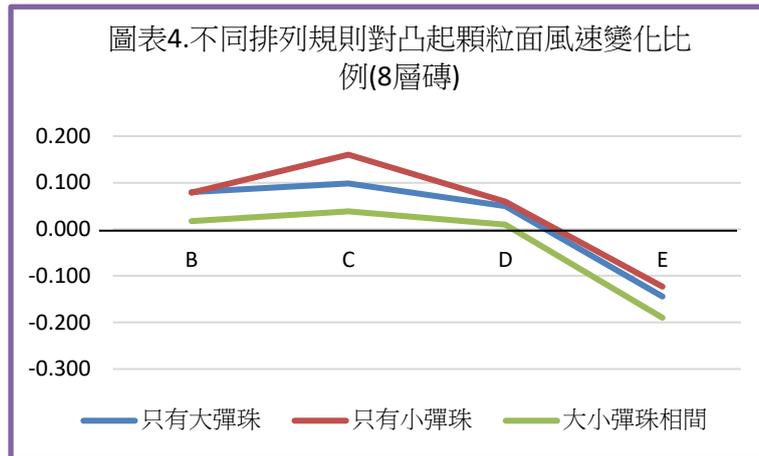
圖3 風速紀錄圖(凸起顆粒面大小彈珠相間中央4層磚)

圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

2. 基本面曲度-中央8層磚

位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
A	1.53	1.43	1.52
B	1.66	1.54	1.54
C	1.69	1.66	1.57
D	1.61	1.51	1.53
E	1.31	1.25	1.23

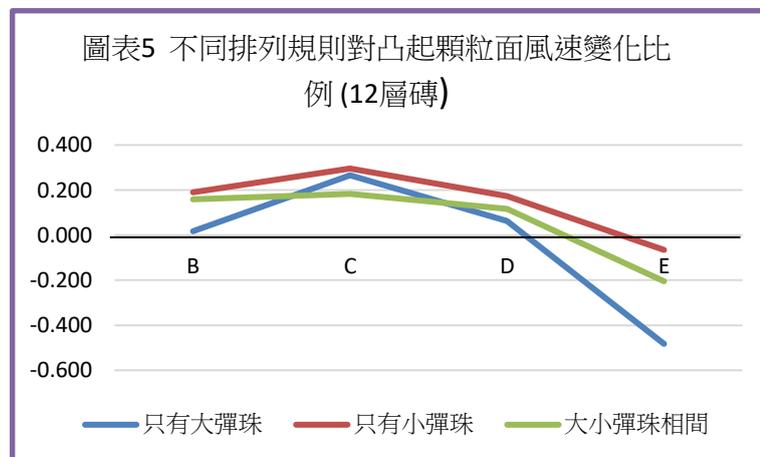
位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
B	0.080	0.078	0.017
C	0.098	0.160	0.038
D	0.050	0.059	0.010
E	-0.144	-0.123	-0.190



3. 基本面曲度-中央12層磚

位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
A	1.38	1.22	1.33
B	1.41	1.45	1.54
C	1.75	1.58	1.58
D	1.47	1.43	1.49
E	0.71	1.14	1.06

位置	只有大彈珠	只有小彈珠	大小彈珠相間
B	0.017	0.190	0.159
C	0.266	0.296	0.183
D	0.063	0.174	0.117
E	-0.483	-0.065	-0.205



(二)分析

1. 由〈圖表3. 不同排列規則對風速變化比例 (4 層磚)〉〈圖表4. 不同排列規則對凸起顆粒面風速變化比例(8層磚)〉，我們發現排列規則為”大小彈珠相間”時，表面風速變化較大，風速較只排大彈珠及小彈珠時不穩定。
2. 〈圖表5 不同排列規則對凸起顆粒面風速 (12層磚)〉中，風速較大，我們發現大彈珠對風速變化的影響較大。
3. 由〈圖3 風速圖(凸起顆粒面大小彈珠相間中央4層磚)〉，我們發現風速在E位置風速瞬間驟降非常多。

四、探討不同排列規則對凹下顆粒面表面風速變化的關係

(一)研究結果

1. 基本曲面度-中央4層磚

位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
A	1.43	1.67	1.48
B	1.56	1.84	1.59
C	1.60	1.78	1.60
D	1.57	1.72	1.56
E	1.40	1.56	1.43

位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
B	0.092	0.100	0.093
C	0.120	0.062	0.097
D	0.101	0.027	0.071
E	-0.019	-0.065	-0.020

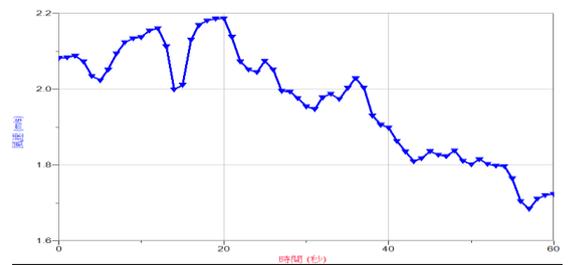
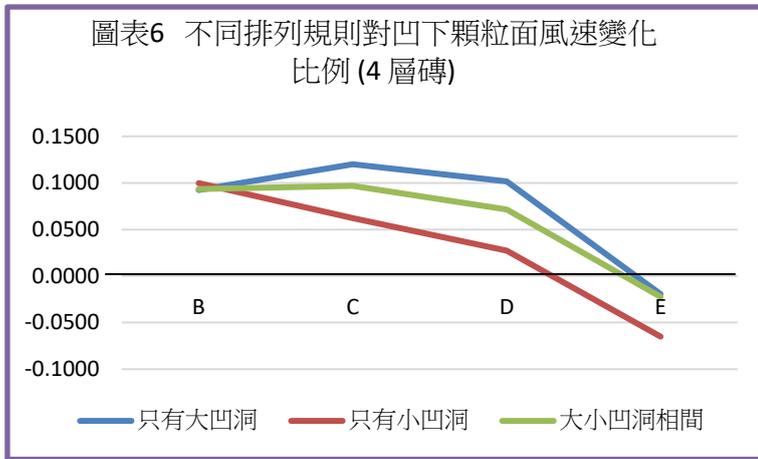


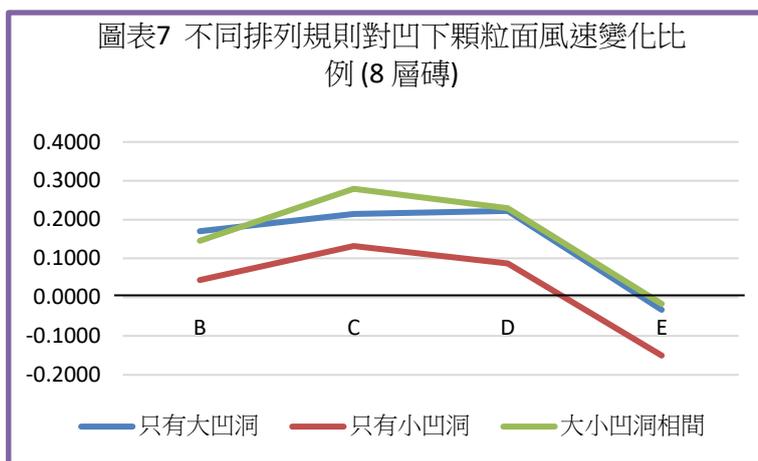
圖3 風速紀錄圖(凹下顆粒面大小凹洞相間中央4層磚)

圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

2. 基本曲面度-中央8層磚

位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
A	1.34	1.50	1.34
B	1.56	1.56	1.53
C	1.62	1.70	1.71
D	1.63	1.63	1.64
E	1.29	1.27	1.31

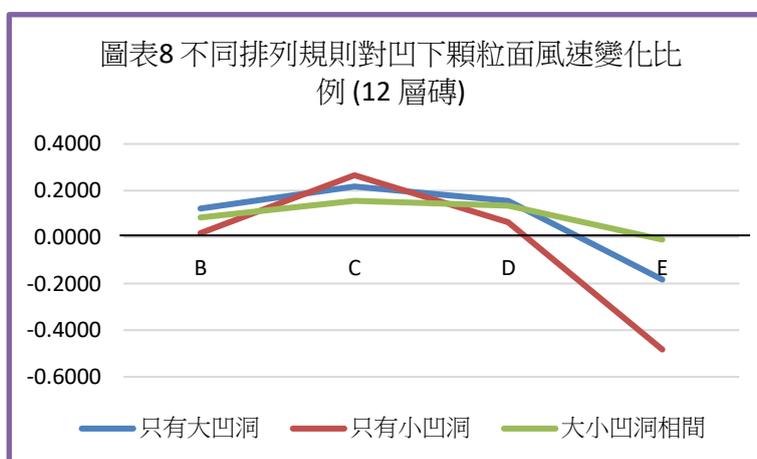
位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
B	0.170	0.044	0.145
C	0.214	0.132	0.279
D	0.222	0.087	0.229
E	-0.032	-0.150	-0.017



3. 基本曲面度-中央12層磚

位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
A	1.34	1.38	1.29
B	1.50	1.41	1.39
C	1.63	1.75	1.49
D	1.55	1.47	1.46
E	1.09	0.71	1.27

位置	只有大凹洞	只有小凹洞	大小凹洞相間
B	0.122	0.017	0.084
C	0.217	0.266	0.156
D	0.156	0.063	0.135
E	-0.111	-0.483	-0.011



(二)分析

由〈圖表6不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例 (4層磚)〉、〈圖表7不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例 (8層磚)〉、〈圖表8不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例 (12層磚)〉，我們可以看到無論曲度大小，只有小凹洞的情形，風速變化比例最大，而大小凹洞相間風速變化比例最小，風速較穩定。

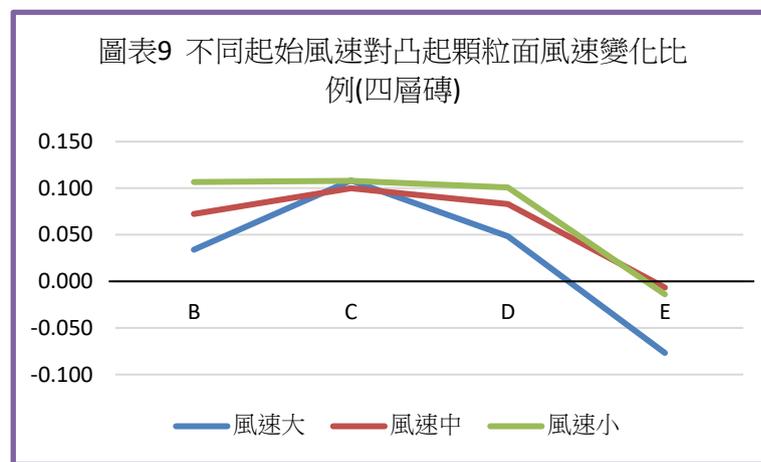
五、探討不同起始風速對凸起顆粒面表面風速變化的關係

(一)研究結果

1. 基本曲面度-中央4層磚

位置	風速大	風速中	風速小
A	2.04	1.59	1.20
B	2.11	1.70	1.33
C	2.26	1.74	1.33
D	2.14	1.72	1.32
E	1.88	1.58	1.18

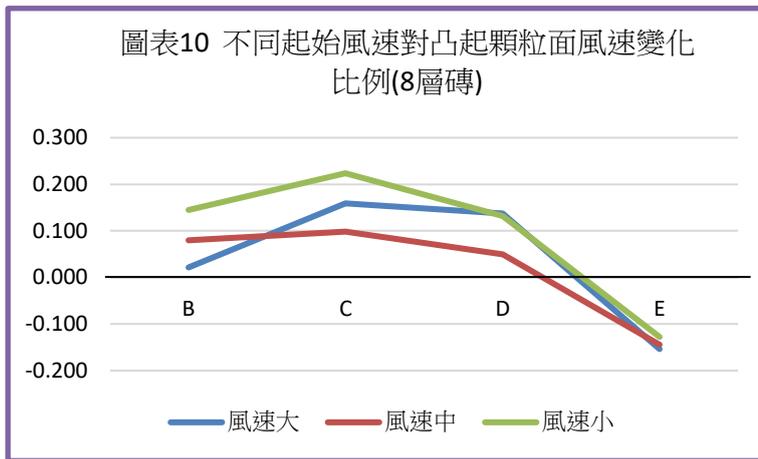
位置	風速大	風速中	風速小
B	0.034	0.073	0.107
C	0.108	0.100	0.108
D	0.049	0.083	0.101
E	-0.077	-0.007	-0.014



(2)基本曲面度-中央8層磚

位置	風速大	風速中	風速小
A	1.90	1.53	1.08
B	1.94	1.66	1.24
C	2.21	1.69	1.32
D	2.16	1.61	1.22
E	1.61	1.31	0.94

位置	風速大	風速中	風速小
B	0.022	0.080	0.145
C	0.159	0.098	0.224
D	0.137	0.050	0.132
E	-0.154	-0.144	-0.128



(3)基本面曲度-中央12層磚

不同起始風速對凸起顆粒面風速 (12 層磚) 使用大彈珠

位置	風速大	風速中	風速小
A	1.69	1.38	0.92
B	1.77	1.41	1.03
C	2.23	1.75	1.26
D	1.75	1.47	1.20
E	0.80	0.71	0.69

不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例 (12 層磚) 使用大彈珠

位置	風速大	風速中	風速小
B	0.046	0.017	0.120
C	0.320	0.266	0.369
D	0.037	0.063	0.299
E	-0.524	-0.483	-0.253

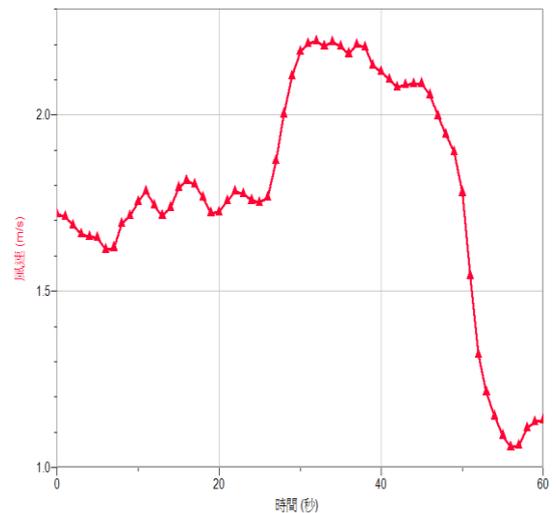
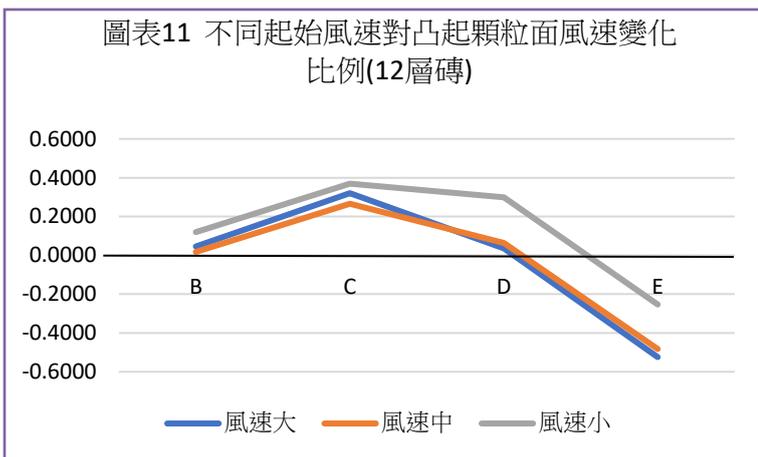


圖4 風速紀錄圖(凸起顆粒面風速大中央12層磚)

圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

(二)分析

1. 由〈圖表9不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(4層磚)〉、〈圖表10不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(9層磚)〉、〈圖表11不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(12層磚)〉，我們發現無論是何種基本面曲度，對凸起顆粒面，以起始風速小時風速變化比例較小，風速較為穩定。起始風速大時風速變化比例較大。
2. 由〈圖4 風速圖(凸起顆粒面風速大中央12層磚)〉看出風速大時，風速變化明顯。

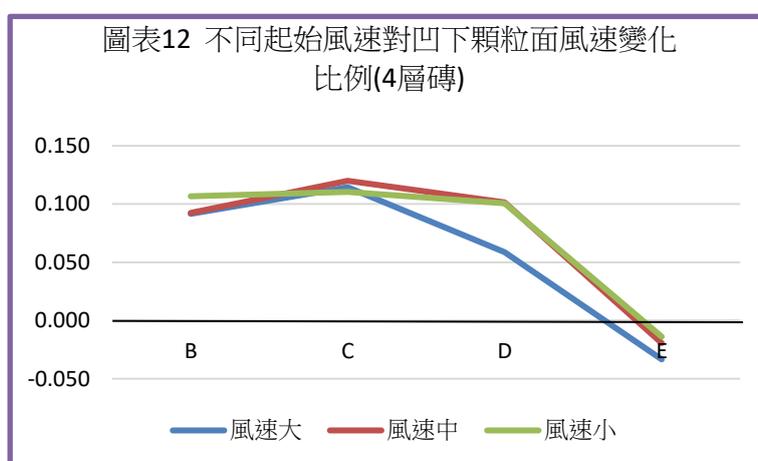
六、探討不同起始風速對凹下顆粒面表面風速變化的關係

(一)研究結果

1. 基本面曲度-中央4層磚

不同起始風速對凹下顆粒面風速 (4層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
A	2.07	1.43	1.20
B	2.26	1.56	1.33
C	2.30	1.60	1.33
D	2.19	1.57	1.32
E	2.00	1.40	1.18

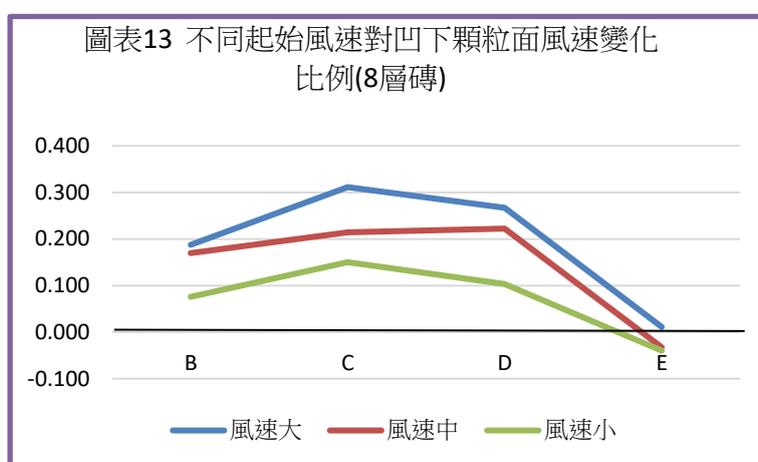
不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例 (4層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
B	0.092	0.092	0.107
C	0.114	0.120	0.110
D	0.059	0.101	0.101
E	-0.033	-0.019	-0.014



2. 基本面曲度-中央8層磚

不同起始風速對凹下顆粒面風速 (8層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
A	1.60	1.34	1.11
B	1.90	1.56	1.19
C	2.10	1.62	1.27
D	2.03	1.63	1.22
E	1.62	1.29	1.06

不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例 (8層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
B	0.188	0.170	0.076
C	0.311	0.214	0.150
D	0.267	0.222	0.103
E	0.011	-0.032	-0.040



3. 基本面曲度-中央12層磚

不同起始風速對凹下顆粒面風速 (12層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
A	1.48	1.34	0.99
B	1.86	1.50	1.16
C	2.01	1.63	1.20
D	1.92	1.55	1.21
E	1.52	1.19	0.87

不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例 (12層磚) 使用大彈珠			
位置	風速大	風速中	風速小
B	0.256	0.122	0.173
C	0.359	0.217	0.215
D	0.298	0.156	0.225
E	0.026	-0.111	-0.119

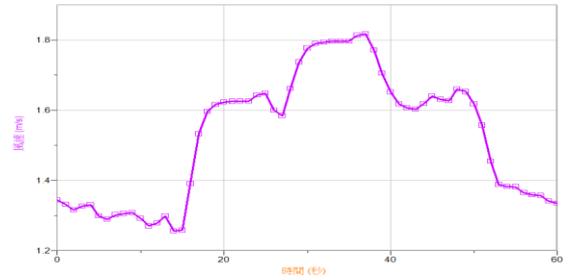
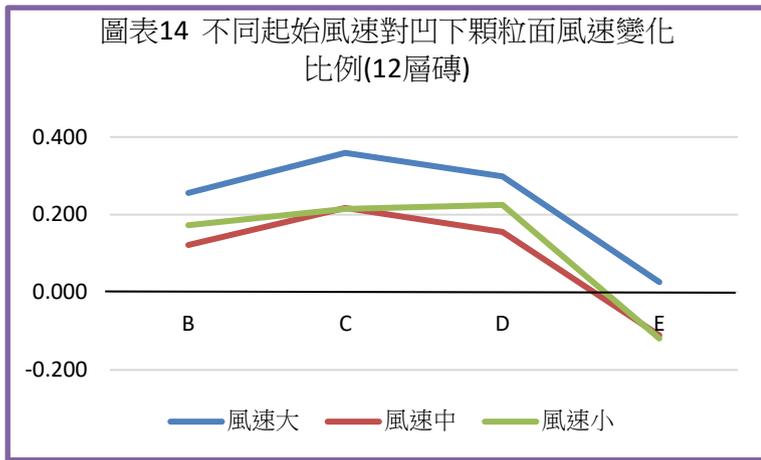


圖4 風速紀錄圖(凹下顆粒面風速大中央12層磚)

圖上縱坐標每1公分代表風速差0.2m/s

(二)分析

1. 觀察〈圖表12不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(4層磚)〉，當曲度只有四層磚時，無論風速快慢，風速變化比例幾乎相同。
2. 觀察〈圖表13不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(8層磚)〉及〈圖表14不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(12層磚)〉，我們發現，風速小及風速中，風速變化比例越大，但最特別的是，風速大居然在E點出現風速變化比例為正值，也就是風速增加的情形。

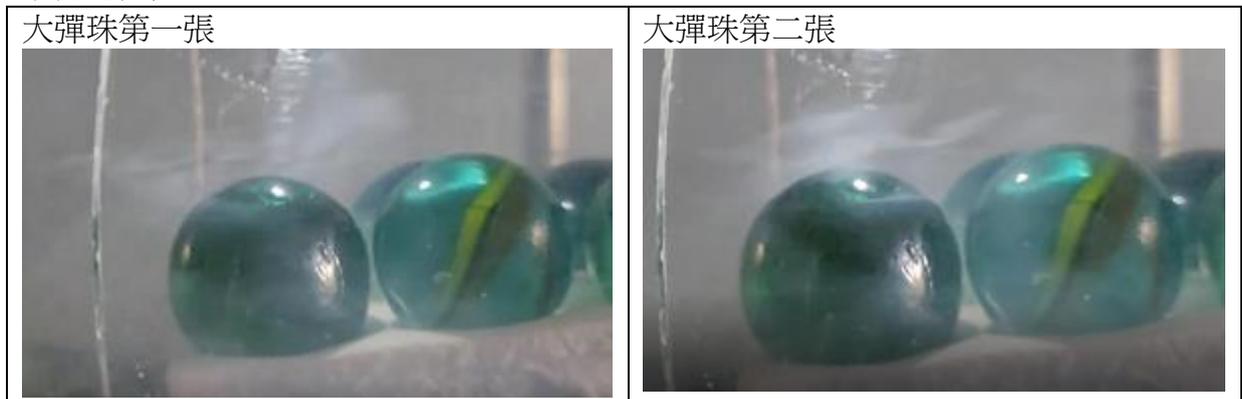
七、探討空氣在凸起顆粒面及凹下顆粒面的流動情形

(一)研究結果

利用手機相機功能中的超慢速攝影，我們紀錄下煙霧通過個表面時的移動情形，因無法用影片呈現，我們用使用影片截圖的形式，擷取空氣流過的過程。

1. 凸起顆粒面

(1)大彈珠



大彈珠第三張



大彈珠第四張



大彈珠第五張



大彈珠第六張



(2)小彈珠

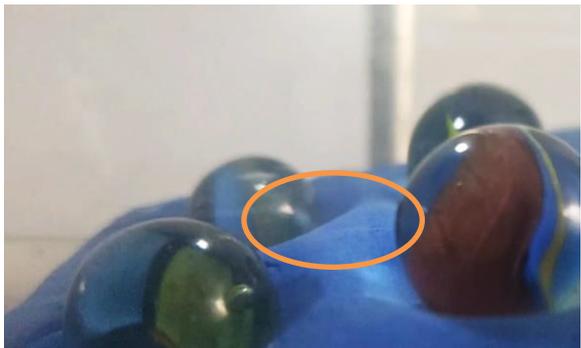
小彈珠第一張



小彈珠第二張

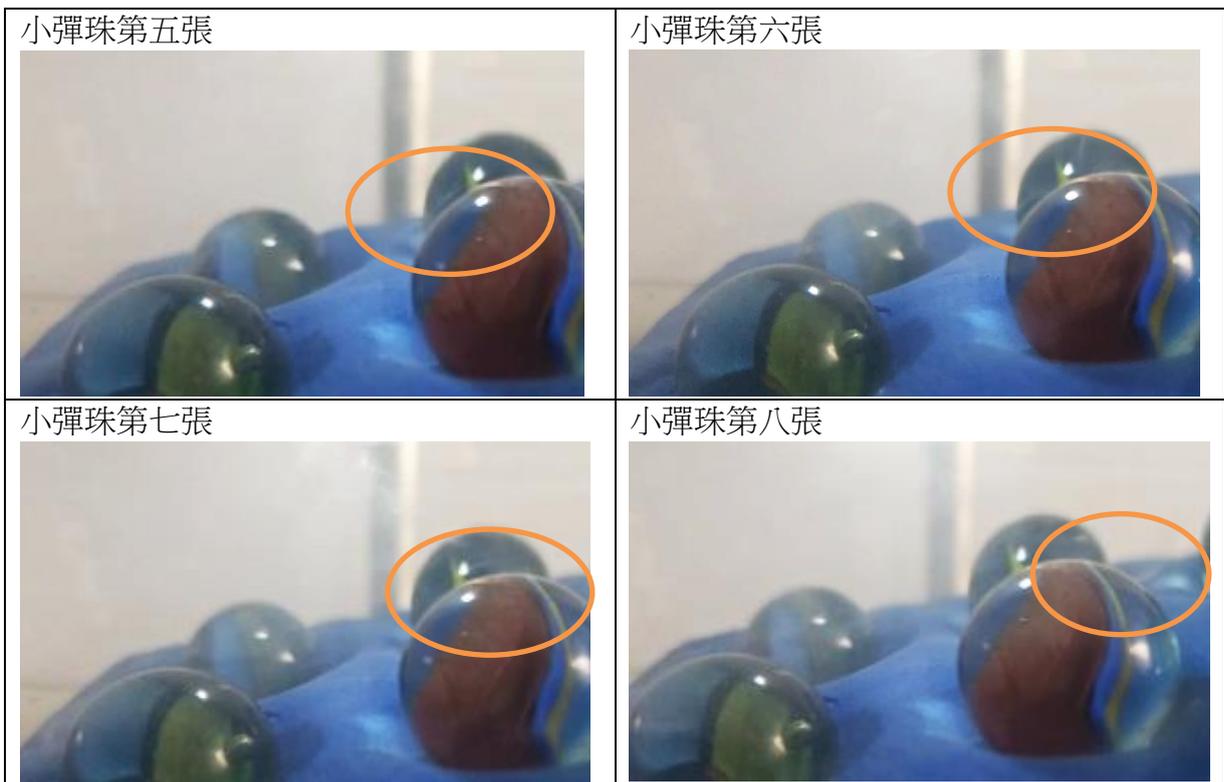


小彈珠第三張



小彈珠第四張

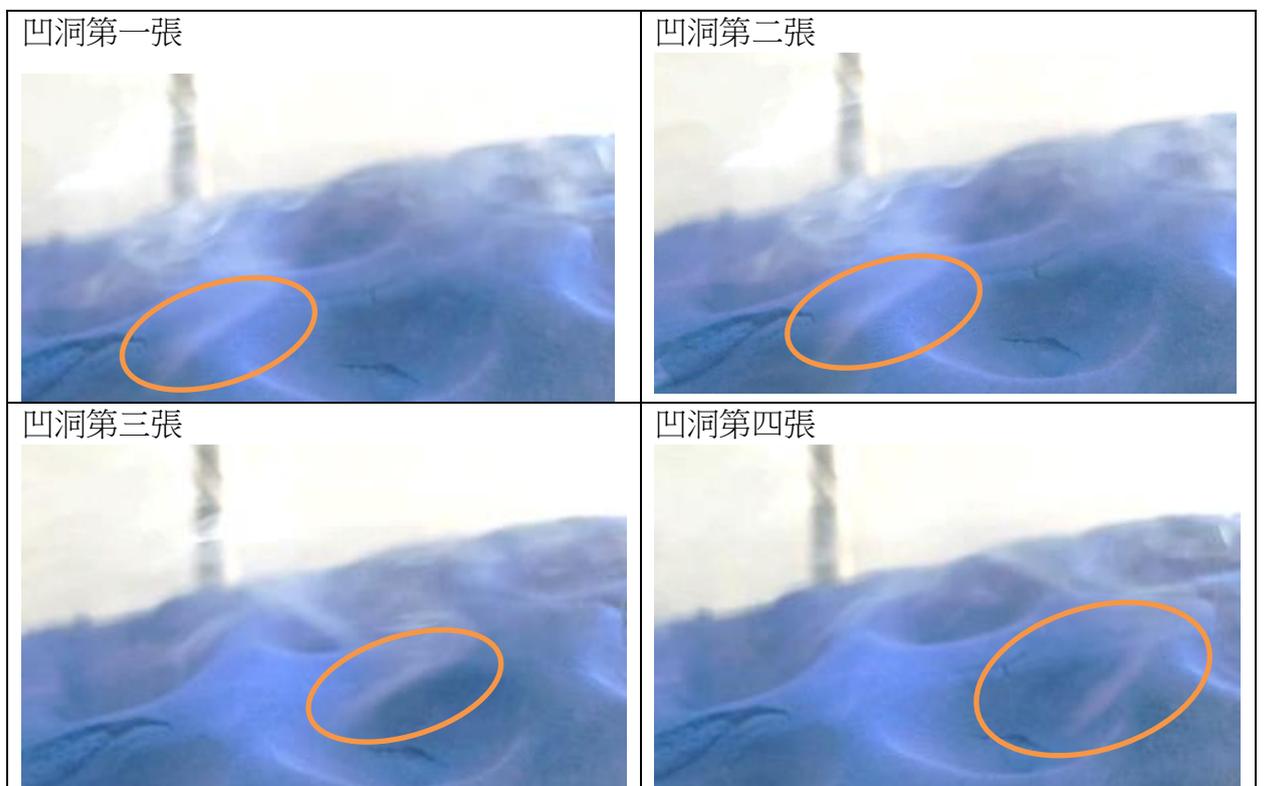


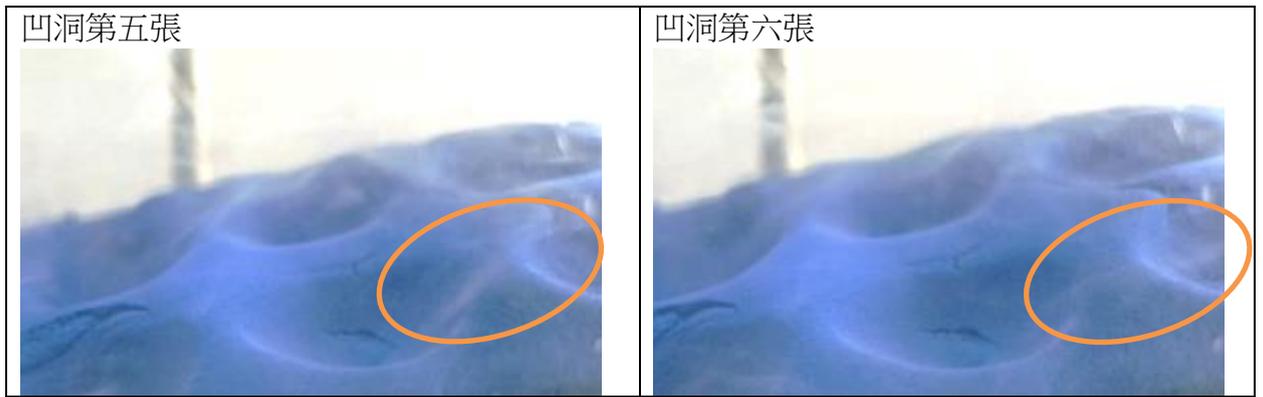


2. 凹下顆粒面

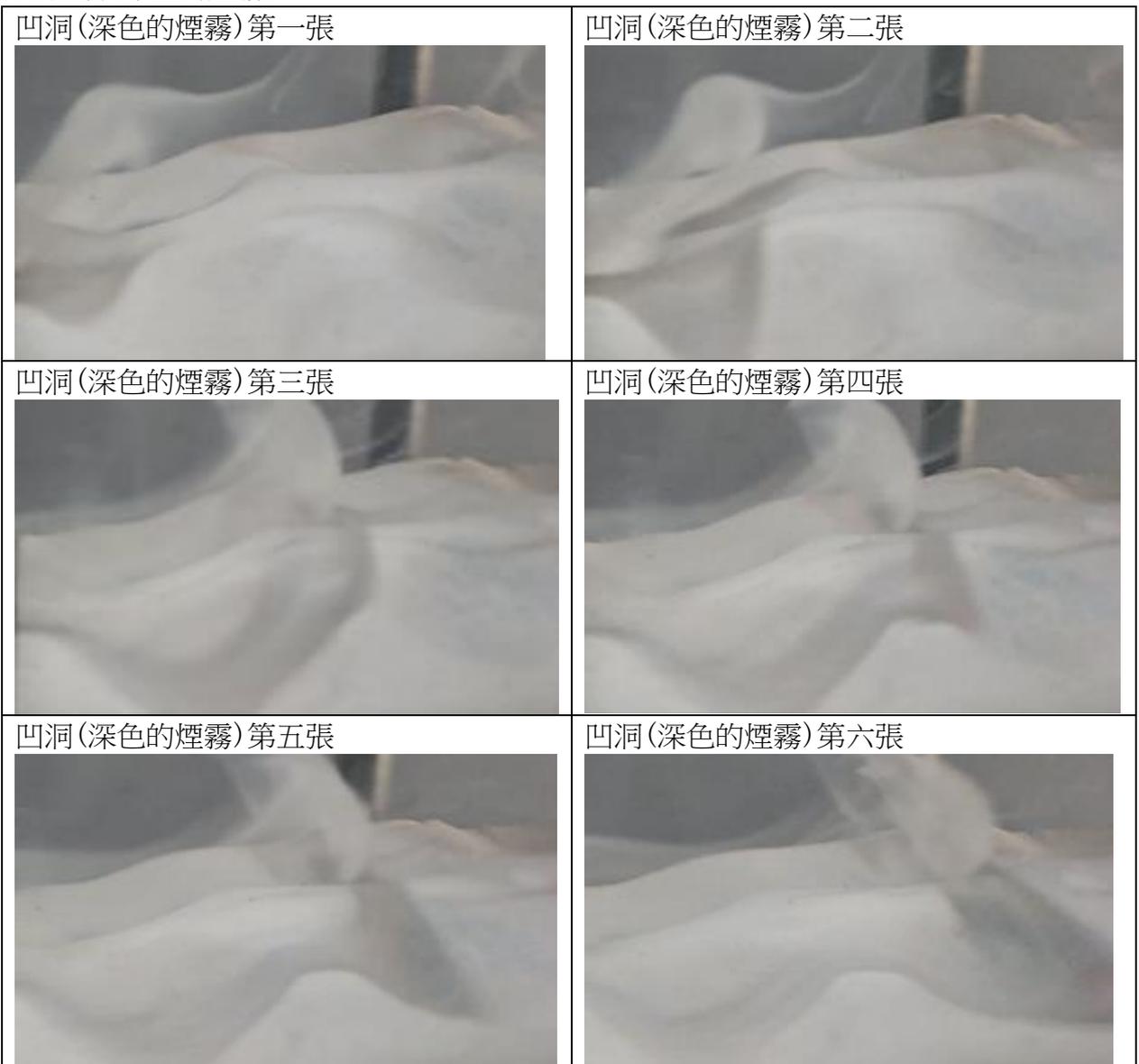
在這個研究中，我們意外發現還有一種煙霧，在實驗中較少出現，顏色較深，我們推測可能含有較多的碳微粒，應該會造成較大的空氣密度。

(1) 凹洞





(2) 凹洞(深色的煙霧)



(二)分析

1. 在凸起顆粒的影片中，我們可以看到大彈珠及小彈珠表面明顯出現邊界層，且氣流在彈珠之間飄移過去，再次沿著下一顆玻璃珠表面出現邊界層，因受到拉扯的關係，氣流的速度有減緩。

2. 在小彈珠的第八張照片中，可以看到邊界層的分離區，往上衝後影響到上方的氣流。
3. 凹洞的影片中，我們看到空氣流過凹洞時，不完全跟著凹洞的下凹曲線，遇到下一個凹洞邊緣時，似乎還有一些加速的效果，如第六張，氣流再往上衝，影響上方的氣流。
4. 凹洞(深色煙霧)影片中，我們觀察到，煙霧全都沉降到凹洞去，順著凹洞一起移動。

伍、討論

- 一、在探討曲度對表面風速的影響時，由〈圖表1. 凸起顆粒面不同曲度風速變化比例〉及〈圖表2. 凹下顆粒面不同曲度風速變化比例〉，我們發現曲度越大，風速變化比例皆越大，和原來的預期相同。但若細看比例值，凹下顆粒面風速變化比例都比凸起顆粒面小，顯示若表面設計有凹洞，能創造風速較為穩定的效果，與我們看過的文獻比較，在高爾夫球面設計凹洞，顯然能讓表面風速減少幅度較小，穩定風速。
- 二、在探討排列規則對表面風速的影響時，由〈圖表3. 不同排列規則對風速變化比例（4層磚）〉、〈圖表4. 不同排列規則對凸起顆粒面風速變化比例(8層磚)〉、〈圖表5. 不同排列規則對凸起顆粒面風速（12層磚）〉，我們發現大小彈珠相間的排列規則風速變化比例較大顯示風速較不穩。而在〈圖表6. 不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例（4層磚）〉、〈圖表7. 不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例（8層磚）〉、〈圖表8. 不同排列規則對凹下顆粒面風速變化比例（12層磚）〉可以看到大小凹洞相間的排列規則風速變化比例較小，風速較穩定。也就是凸起顆粒面和凹下顆粒面表面風速變化呈現不同的結果。
- 三、在探討不同的起始風速對表面風速的影響，由〈圖表9. 不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(4層磚)〉、〈圖表10. 不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(9層磚)〉、〈圖表11. 不同起始風速對凸起顆粒面風速變化比例(12層磚)〉，可以看到風速較小時風速變化比例較小，風速較穩定。由〈圖表12. 不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(4層磚)〉、〈圖表13. 不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(8層磚)〉及〈圖表14. 不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(12層磚)〉，風速較小時，風速變化比例較大；而在風速較大的情形，甚至出現風速變化比例為正值，風速到E點反而表面速度增加。
- 四、觀察凸起顆粒面空氣的流動情形，在大彈珠第四張及小彈珠第二張照片看到靠近彈珠表面產生邊界層，且與上方氣流分離，氣流到下一顆大彈珠時發生撞擊，若觀看動態影片，會看到氣流有稍微消散，這可能是前面實驗中為何在凸起顆粒面，風速會逐漸減緩的原因。
- 五、在凹下顆粒面空氣的流動，觀察凹洞第三張，可以看到氣流並沒有完全順著凹洞曲面向下，而只是部分向下流動，到下一個凹洞邊界時順著邊界向上移動，若觀看影片，看起來此時期流是往上加速的，若對照研究結果一~三，及我們去年的研究結果(凹下顆粒面較光滑平面風速變化比例較小)，這可能是為何凹下顆粒面較能穩定風速的原因。

六、在〈圖表13不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(8層磚)〉及〈圖表14不同起始風速對凹下顆粒面風速變化比例(12層磚)〉在風速大(大於1.5m/s以上)的情況下在背風面末E點出現風速比A點稍微增加的情形，可能與氣流通過凹洞時會加速有關。

陸、結論

- 一、基本曲面度越大，風速變化比例越大，但凹下顆粒面風速變化比例都比凸起顆粒面小，凹下顆粒面讓風速較穩定。
- 二、大小彈珠相間的排法在凸起顆粒面會讓風速變化比例較大，而在凹下顆粒面會讓風速變化比例較小。
- 三、在凸起顆粒面，風速較小時，風速變化比例較小，而在凹下顆粒面，風速大時，風速變化比例較小。
- 四、使用煙餅來看凸起顆粒表面及凹下顆粒表面空氣流動的情形，在凸起顆粒面上可看到氣流在表面減速的情形，而凹下顆粒面上可以看到氣流加速的現象。

柒、參考文獻

- 一、王曉剛(2020)。p. 357-358。流體力學究竟在說什麼?簡單讀懂流體力學的奧秘。樂果文化出版
- 二、Potter、Wiggert著，吳順治譯(1995)。流體力學。東華書局出版。
- 三、劉詠豐、蔡文翔、韓佳策(2019)。不離不棄的保麗龍箱—模擬高速行駛下小貨車後斗空氣流動的變化及應用。第 61 屆中小學科學展覽會。