

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 自然科

081564

愛唱歌的沙丘

學校名稱：國立屏東教育大學附設實驗國民小學

作者： 小五 黃榆真 小五 郭創元 小五 陳玉怡 小五 徐子耘	指導老師： 張淑惠
---	--------------

關鍵詞：唱歌沙丘 粒徑 音頻分析

摘要

台灣有沒有會唱歌的砂丘呢？砂子怎麼唱歌？唱什麼歌？這些引起了我們的興趣。先做石頭摩擦或撞擊實驗，再用旋轉盤模擬自然界的流砂現象，接著進行南台灣野外調查，發現只要是相同地點的聲音頻譜圖，不論用甚麼方法都類似，如同指紋可發展成鑑定砂子來源的工具。白沙灣聲音像小提琴而南灣像大提琴。白沙灣聲音頻率最高，推砂法有三、四百赫茲，追蹤原因是顆粒較大且集中(0.25~1mm)，表面圓潤、光滑。可能因沒有夠大的共鳴體，南台灣沒有自己會唱歌的沙丘。綜合刮砂、搓砂、落砂等方法驗證沙子發聲機制混合有顆粒越小頻率越高的振動、縫隙理論及顆粒越大頻率越高的摩擦共三種理論。也進一步探討影響砂子唱歌的因素。

研究動機

每當我走過砂坑，就會聽到砂子發出的聲音，如果是踩在石頭堆上，聲音就會變得更大。最近看見報紙上有砂丘唱歌的報導，在全世界有一百多個地方的砂子會唱歌，有的唱得像直升機的螺旋槳轟轟轟的，有的像在撥琴，還有的會像狗叫。自然課本說到聲音的振動，也談到音樂，及那一種介質可以讓聲音傳最快，「砂丘唱歌」的振動體是什麼？傳播介質又是什麼呢？這些使我產生了研究興趣，動手查資料，發現會唱歌的砂丘的砂子如果裹了一層叫矽膠的料，就會唱歌。台灣有沒有真正的沙漠，海邊的砂子會不會唱歌？怎樣可以使砂子發出聲音？怎樣可以讓他的聲音最大？又怎樣可以使聲音最美呢？所以我們以”愛唱歌的砂丘”為研究主題，我們發現摩擦、撞擊都是產生聲音的方法，不同地點的南台灣海砂會唱不一樣的曲調，白沙灣是女高音，南灣是男音。在台灣南海岸一帶可能因為沒有夠大的砂丘(共鳴體)所以聲音傳不出去，也就沒發現有特殊的哨山或轟鳴山。

貳、研究目的

- 一、 砂丘如何唱歌？怎麼可以讓砂子發出聲音？
- 二、 砂丘發聲方法的模擬，以旋轉盤進行發聲實驗。
(流砂滑動發聲法)
- 三、 台灣的砂丘唱什麼歌？南台灣海岸野外實驗。
- 四、 其他讓砂子唱歌的方法？比較不同粒徑對砂子發聲頻率的影響。
- 五、 探討影響沙子發聲的因素(唱歌的發聲機制探討)。



叁、文獻探討

全世界有一百多個會唱歌的砂丘。在 12 世紀馬可波羅的中國遊記中，提到經過沙漠中的轟鳴山時，好像有鼓聲、武器乒乒乓乓的。另外在其他國家如蘇格蘭的砂子能發出很尖銳像弦的聲音，夏威夷群島有一座長 800、高 18 公尺的沙漠可以發出像狗叫的聲音。中國大陸的仙台科學館也有唱歌砂的遊戲區，可以在上面走動聽砂子唱歌。國家地理雜誌也有學生坐在砂丘稜線，滑下來聽聲音的照片。讓人覺得很好奇。

唱歌的砂丘分兩種，在內陸發出低沉聲音叫轟鳴砂。在海邊的砂音頻較高，叫哨砂。那台灣有沒有唱歌砂丘呢？

砂丘為什麼會唱歌？在自然課本有提到聲音的振動，要發出聲音要有兩個條件，一個是振動的物體，一個是傳出去的介質。像小提琴用手撥弦就會有聲音。因為他們振動，振動會有聲音，聲音利用空氣傳到我們的耳朵裡。如果振動的很快就表示頻率很高，像撥細的弦；振動的很慢就頻率低，像撥粗的弦。砂丘為什麼會唱歌呢？實際的發聲機制到目前，仍是爭論不休。科學家們提出好幾種理論，我們分成振動、縫隙、摩擦理論三種。

振動理論強調發聲的原因是由於砂子本身的振動所引起，如同石英晶片的振動；縫隙理論則說明是因為空氣在砂子表面或內部或砂粒間縫隙進出，而造成空氣翁翁作響；摩擦理論則是砂子表面摩擦所造成。

科學家認為砂丘嗡嗡的低鳴聲，與一般樂器的發聲原理無關，是滑動的表層砂粒群的同步運動所形成。發聲的原因一直被認為是當風吹過砂丘，造成整體砂丘振動所形成。在相同沙漠地區，不同大小的砂丘卻可發出同樣的頻率。此與直笛共鳴腔大小不同，音高就不一樣的發音原理不同。

科學家認為砂丘低鳴的頻率與砂粒的粒徑大小有關，實驗結果還發現，若要砂丘低鳴的音量要夠大，需有足夠多的表層乾砂粒群作同步滑動。因此，即使用手撥砂或順著砂丘用雙腳推砂而下，都有可能讓砂丘發聲，只要達到當地砂丘低鳴的最低門檻的能量。也有報導說，地震也是造成砂丘低鳴的原因。

肆、研究設備及器材

一、研究一：使砂丘唱歌的方法實驗，摩擦及撞擊。



紙箱子



像畚箕的木板盒



沙子的過濾網



各種石頭



各種石頭及砂子



刮沙的工具塑膠湯匙

材 料：各種石頭及砂子

設 備：塑膠墊子、像畚箕的木板盒、紙箱子、直尺、塑膠湯匙、過濾用篩子、量角器。

分析工具：數位相機(sony cyber-shot DSC P8)、Eovideo 軟體(影片轉聲音檔)、Cool edit pro2.1 軟體(聲音分析軟體)。

二、研究二：使砂丘唱歌的方法實驗，以轉盤模擬流動砂丘。



大爐石



小爐石



購買來的美國砂砂



馬達旋直轉刮版



變頻器



刮板推動砂子



放砂子的圓盤



數位相機記錄



放砂子的塑膠盆

材料：收集燃燒廢棄物所做的爐石、寵物店購買的海砂、在水族館買美國砂砂。

設備：旋轉盤用來推動砂子造成流砂的狀況來聽砂丘的聲音，旋轉盤分為四個部份。

1. 馬達(台灣製造，直流 24V， 30rpm)
2. 以支架掛在旋轉馬達下方的刮版。
3. 變頻器，用來控制轉速。
4. 放砂子的塑膠盆或圓木盤。
5. 數位相機(記錄用)

三、研究三：南台灣海岸線野外實驗，海砂聲音觀察。



大型過濾篩網



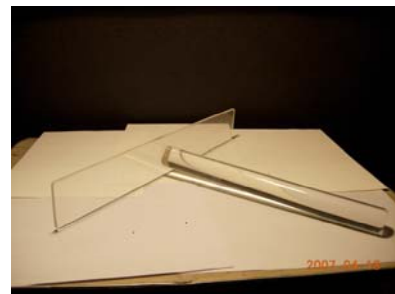
小型過濾篩網



倒立顯微鏡



立體顯微鏡



壓克力靶子

器材：公尺、圓錐、壓克力靶子、大型及小型過濾篩網、倒立顯微鏡(Nikon)、立體顯微鏡(Zeiss)。

記錄器：數位相機(Sony cyber-shot DSC P8)、錄音筆(Cenix)，需以 power voice 轉檔至電腦分析。

地點：南灣、白沙灣、貝殼砂島展示館、滿州港口沙漠。

四、研究四：其他讓砂子唱歌的方法(搓砂、敲沙、自由落沙法等)。



海邊帶回來的砂子



玻璃瓶裝砂子



大中小顆彩石



瓶裝自由落沙法

材料：海邊帶回來的砂子，有南灣、白沙灣、貝殼砂島及港口沙漠。五彩石。

器材：玻璃瓶、塑膠瓶、鐵筷、過濾篩

伍、實驗過程、結果及討論

一、研究一：使砂丘唱歌的方法實驗

~摩擦及撞擊

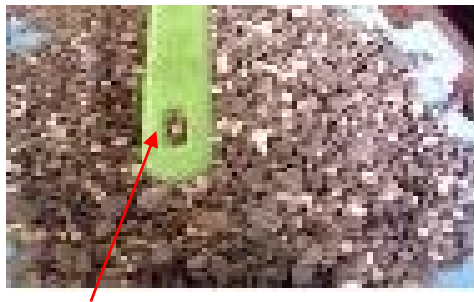
(一) 研究過程及方法：

1. 用塑膠湯匙刮各種砂子，聽聽看聲音有什麼不同。

- (1) 準備各種砂子，用過濾網過濾。
- (2) 把砂子放在塑膠墊上。
- (3) 用塑膠湯匙在砂子上輕輕滑過，不碰到塑膠墊子。
- (4) 刮得時候注意聽，紀錄聽到的音高。



各種不同材質、大小的砂子



塑膠匙刮沙使沙子發出聲音

2. 把箱子抬高讓石頭自然滑下，聽聲音有什麼不同。

- (1) 把石頭、紙箱編號後，擺在箱子上
- (2) 快速抽掉擋住的箱子，讓石頭滑落。
- (3) 數位相機記錄。
- (4) 數位相機記錄的影片檔(MPG)再以 eovideo 軟體轉成聲音檔(WAV)。
- (5) 用 cool edit pro2.1 進行頻率分析，找出音高。



放置大小不同的石頭，
讓它滑落聽聲音

3. 石頭撞擊的聲音實驗：

- (1) 把塑膠墊子拼成長方形盒。釘一個像畚箕的木板盒。
- (2) 把大石頭放在塑膠墊上，另一種大小石頭放在木板盒上，把木板盒拉到 17 或 28 公分高，使石頭滑下撞到塑膠墊上的石頭。
- (3) 以數位相機記錄過程分析。



像畚箕的木板盒
塑膠墊子拼成的長方盒

(二) 研究結果及討論：

1. 用塑膠湯匙刮各種的砂子，聽聽看聲音有什麼不同。

我們以塑膠湯匙在砂子上輕輕滑過，用耳朵聽各種砂子發出的聲音(表一)，聲音都在中音 ㄤ 、 ㄩ 、 ㄊ 的範圍，不論是工程用砂或較粗的貝殼砂砂子過濾的越細，發出的聲音頻率有越高的現象。因為用人耳分析，人的差異很大，加上湯匙刮砂力道不均勻，準確度不夠，而且砂子發出的聲音很小，因此我們改用石頭，以滑落的方法來聽聲音變化。分析的方法也改用聲音分析軟體。

表一 用塑膠湯匙刮各種不同大小、成分的砂子實驗結果

種類	顆粒大小	人耳分析 1	人耳分析 2	人耳分析 3
黑色石頭	無過濾	ㄊ	ㄊ	$\text{ㄤ} \sim \text{ㄊ}$
工程用砂	無過濾	ㄤ	$\text{ㄤ} \sim \text{ㄊ}$	無
	0.5mm 濾網	ㄩ	ㄤ	ㄤ
	0.104mm 濾網	ㄊ	ㄊ	ㄊ
	0.053mm 濾網	ㄊ	ㄊ	ㄊ
貝殼砂	2mm 濾網	ㄤ	ㄤ	$\text{ㄤ} \sim \text{ㄊ}$
	0.5mm 濾網	ㄤ	ㄤ	ㄤ
	0.104mm 濾網	ㄊ	ㄊ	ㄊ
混合所有砂	無過濾	ㄩ	ㄤ	ㄊ

*表比中央音高八度音

2. 把箱子抬高讓大、中、小石頭自然滑下，聽聲音有什麼不同。

接下來我們在紙箱上擺各種大小的石頭，讓他自然滑落，以數位相機錄影，將影像檔轉成聲音檔，用 cool edit 軟體分析，紀錄主要頻率，軟體分析可以很精確的知道頻率是多少，連是高八度幾度都很清楚。我們參考頻率對照音高表(表二)發現滑落的頻率在 150-500Hz 之間。同樣的，紙箱的由 17 拉高到 28cm 會使頻率升高兩倍之多，可能因為滑下來的速度比較快，聲音比較尖。在 28cm 高的時候，隨著粒徑由小變大頻率也變高，可能也是因為石頭越大顆，重量越大，從 28cm 斜面因為重力加速度的關係，滑下來的越快，所以摩擦的聲音頻率就越高。但是 17cm 的時候這種效應就不明顯了。我們想大自然砂丘是因為流砂唱歌，那一定也有砂子相撞的聲音；不只有摩擦的聲音，所以我們又用石頭滑下來以後撞石頭看聲音的變化。

表二 頻率對照音高表

音高位置	Do	Re	Mi	Fa	So	La	Si
	頻率						
低音	130	146	164	174	196	219	246
中央音	261	293	329	349	392	440	493
高音	523	587	659	698	784	880	988

表三 砂石由紙箱滑落的聲音

砂石種類	粒徑(cm)	紙箱斜面高度(cm)			
		17		28	
		頻率(HZ)	音高	頻率(HZ)	音高
貝殼砂	0.2	----	---	323	Mi-6
小石頭	2	172	Fa+2	393	So+1
中石頭	5	191	Fa+7	414	So#+1
大石頭	10	158	Re#+3	484	Si-9

備註：1. 音高表示法：有畫底線的表示低八度音如 Do；沒有做記號的是中央音。

2. ----表資料遺失

3. 石頭撞擊的聲音實驗：

我們再以大小石頭由塑膠滑板上落下撞擊石頭來觀察聲音的產生。

由表四我們發現石頭滑落及撞擊會有聲音，頻率在 400Hz 到 600Hz，撞擊的時候，小石頭比中石頭頻率高，滑落的時候中石頭頻率較高。由 17cm 拉高到 28cm 的高度，石頭撞擊的聲音頻率變高，和前面的結果一致，推測拉高以後滑下來的速度變快，頻率也變高！

表四 小石頭或中石頭撞擊大石頭發聲的實驗

高度 (cm)	撞擊				滑落			
	小石頭		中石頭		小石頭		中石頭	
	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高
17	594	Re * +7	410	So+8	465	La#+1	539	Do * +16
28	600	Re * +13	527	Do * +7	534	Do * +1	600	Re * +13

備註:1. 小石頭、中石頭及大石頭直徑平均分別為 2、5 及 10cm。

2. 音高表示法:有畫底線的表示低八度音如 Do: 沒有做記號的是中央音。
有 * 記號表示高八度音。

實驗做到這裡，我們發現不論是撞擊或摩擦都會使石頭或砂子發聲，但是，參考文獻上會唱歌的砂丘是因為砂粒的流動所造成的共鳴現象，因此厚度不會只是單層砂子，為了減少施力不均勻和易於觀察，我們改進實驗方法，製作機械式圓形轉盤裝一定厚度沙，進行實驗。

高度 (cm)	撞擊				滑落			
	小石頭		中石頭		小石頭		中石頭	
	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高	頻率 (HZ)	音高
17	594	Re * +7	410	So+8	465	La#+1	539	Do * +16
28	600	Re * +13	527	Do * +7	534	Do * +1	600	Re * +13

二、研究二：使砂丘唱歌的方法實驗，以轉盤模擬流動砂丘。

(一) 研究過程及方法：

1. 準備爐石及美國矽砂。放到塑膠盆或木製轉盤中。鋪平到所需高度。
2. 啟動轉盤馬達開關，調節電壓 5V，轉速 6rpm。
3. 讓刮板(綁鐵尺或用壓克力板)轉動 1 分鐘，數位相機紀錄分析。



放實驗砂石至轉盤



鋪平沙子



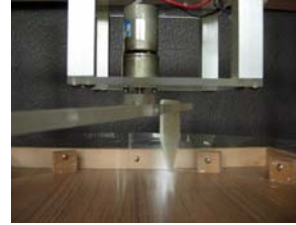
開啟馬達電源



木製轉盤



木製轉盤



壓克力刮板

(二) 研究結果及討論：

我們取爐石鋪在塑膠盆上，以馬達帶動刮板推動約 3-5 公分厚度的砂層，速度是每分鐘六圈，砂子推動的時候會堆到一個高度然後崩落下來，數位相機記錄一分鐘的景象，再轉檔後分析。我們發現爐石被推動時音量(分貝)差不多，在 20、30dB 之間，大爐石唱的是低音的ㄇㄨㄟ(表五)，小顆聲音頻率較高唱中音的ㄇㄨㄟ。但是文獻中提到的是矽膠材質沙子，而且顆粒小的、圓的、光滑的比較會唱歌。**爐石太大，表面粗糙不夠光滑**(見下圖)，因此到養魚店買了矽砂，發現矽砂較小又光滑，但是聲音頻率並沒有明顯改變，約唱低音的ㄇㄨㄟ，可能原因是材質與爐石不同不能比較，或者**因為矽沙還是不夠細**，因為矽砂大小約是 1 或 2 mm，而維京百科中說要會唱歌的砂丘粒徑要在 0.1-0.5mm 之間，雖然改進成有厚度的砂子，但是與大自然砂丘的狀況仍不同，而且轉盤的馬達聲音干擾很大，為了找到台灣唱歌的砂丘，我們就移到野外去進行實驗。

表五 推動不同顆粒爐石聲音分析結果

種類	粒徑大小 (mm)	推動工具	分貝(dB)	頻率值 (HZ)	音高
爐石	9	鐵尺	24-33	150	D3+38(ㄉㄨㄟ)
爐石	4	塑膠尺	29-34	299	D4+35(ㄉㄨㄟ)
矽砂	2	壓克力板		136	C#3-27(ㄉㄨㄟ)
矽砂	小於 2	壓克力板			C3+5(ㄉㄨㄟ)

備註：推動尺的轉速是每 10 秒一圈。



圖一、小爐石(4mm)及大爐石(9mm)表面粗糙、形狀不規則 矽石較小、較光滑

三、研究三：南台灣海岸線野外實驗，觀察砂丘的聲音。

(一) 研究過程及方法：

1. 推砂法：

- (1) 距離海邊 24、19 及 14 公尺的地方挖一個深 30cm 寬 80cm 的坑。
- (2) 把錄音筆的麥克風放坑洞的底部。
- (3) 以固定的力氣與速度用壓克力耙子把砂堆推到洞裡，實驗時用錄音與錄影。



南台灣的海邊



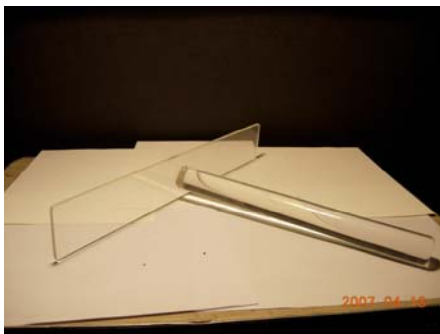
距離海邊數十公尺挖坑



挖一個深 30cm 寬 80cm 深的坑



把錄音筆的麥克風放在坑洞



以固定的力氣與速度用壓克力耙子把沙推到洞裡，直到蓋滿洞。



2. 搓砂

- (1) 把砂子放在手掌上。
- (2) 用相同的力氣搓砂子並記錄。



把一些砂子放在手掌上



使用相同的力氣搓揉砂子

3. 自由落沙

- (1) 把砂子堆成砂丘，用手擋住滑落的砂子
- (2) 把手移開，讓砂子自己掉落。



在海灘堆砂後讓它落下



貝殼砂島展示館內的貝殼砂展示台上
進行落砂實驗

4. 貝殼砂島旋轉盤實驗

在貝殼砂島因為不能進入海灘地區，所以我們請求管理人員讓我們在展示台上進行搓砂和自由落砂實驗，另外將砂子取出放在旋轉盤上進行推砂實驗，做完實驗再將砂子放回去，管理人員慷慨的答應我們，在此也要謝謝他。



貝殼砂島實驗



貝殼砂轉盤實驗



啟動轉盤

5. 風吹砂踢砂實驗



風吹砂踢砂

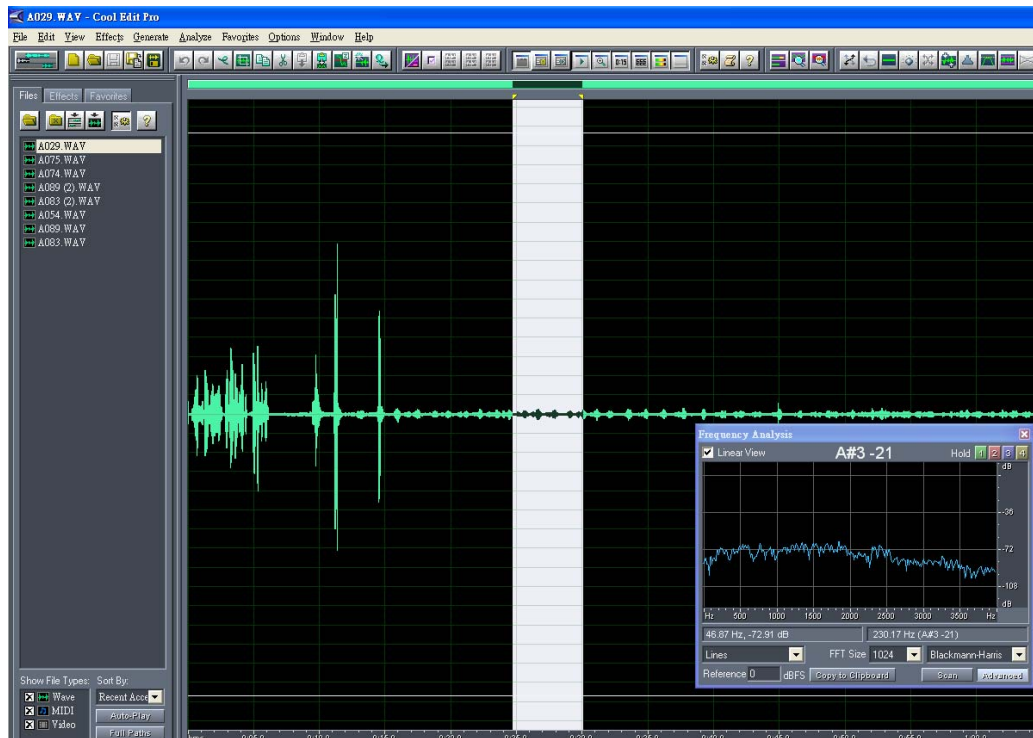
在墾丁落山風把海邊的砂子都吹到馬路上來，形成了像砂丘一樣的斜坡，大概有三四層樓這麼高，所以我們在砂丘的稜線的位置用腳用力的把砂子往下踢，模仿法國一位研究砂丘唱歌的專家在網路上放的影片，看看是不是有特殊的音。

(二) 研究結果及討論：

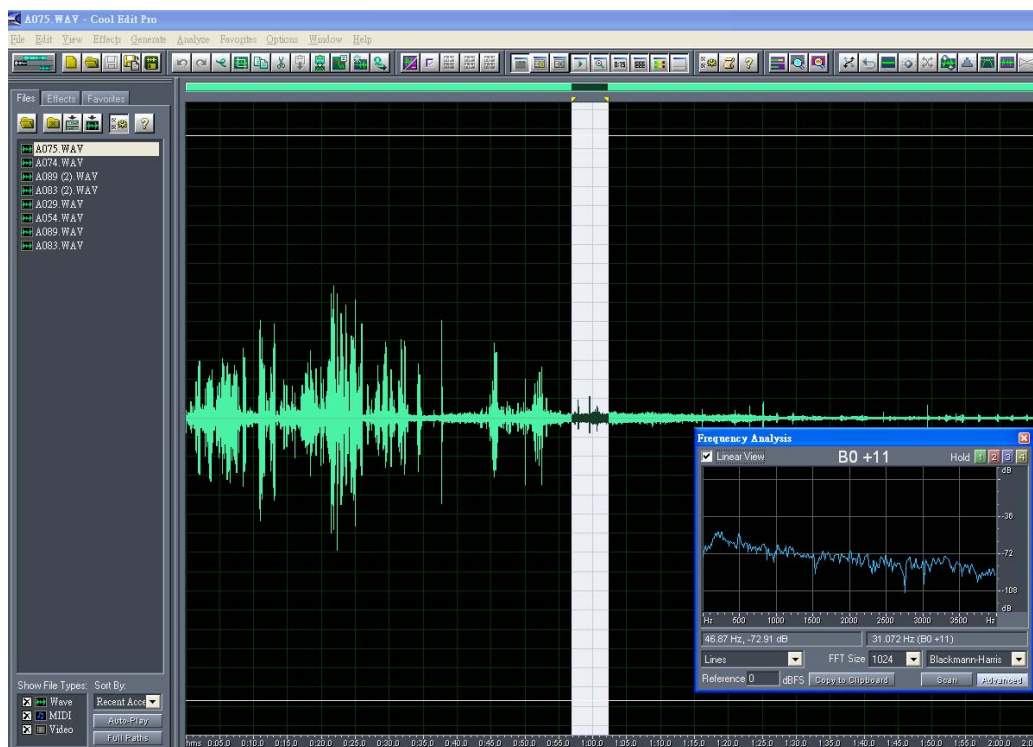
首先到貝殼砂成分很高的白沙灣做實驗，將錄音筆的紀錄轉檔後，以 cool edit 分析，選擇外界干擾(比如鳥叫、小販叫賣聲——等)比少的時間區域。在聲音分析軟體(cool edit)中會先得到一張時間對聲音強度的記錄圖，我們會選擇聲音有重複波形的穩定區域(如圖二白色區域)進行頻率分析，得到小張頻率分析圖，橫軸為頻率縱軸為分貝，可看成是聲音的指紋分析圖，也就是音質。白沙灣所得圖譜像一個饅頭、山丘，沒特殊的突起頻率。隔天到南灣做實驗，當天落山風強勁所以背景音較複雜，所得到頻率分析圖在低頻率有一個較明顯的突起(圖三)。

將各地點，各方法做頻率分析列於表六，以方法來比較的話，搓砂的方法因為用力搓，所以砂子摩擦的聲音頻率比較高，可以高到上千，大概在第6度音高。聽起來有點像牙齒相互摩擦的聲音；或者像牛吃草。推砂法是把錄音筆的麥克風放在洞下面，把砂子推去埋洞，錄音筆放出來的聲音有點像一波波的海浪，是我們以前沒聽過的另一種大自然的聲音，很好聽，聲音的頻率大概在第四度，就是中音範圍的聲音。自由落砂聲音比較不明顯，在三個方法當中頻率比較低。

我們發現不管用推的、用搓的、或用落下來的的方法，在同地點所得的頻率分析圖(聲紋分析圖)都會很相近，如表六南灣在低頻率(約 200~400Hz)的地方有高峰然後下降平穩，而白沙灣的圖譜則沒有這樣的高峰，他是慢慢的上升的曲線，好像一個小山丘或者小饅頭。這個圖譜分析表現出這兩個海灘的砂子發聲的音質特色，南灣比較像大提琴，白沙灣比較像小提琴。南灣的砂子像男生，比較低沉，白沙灣的像女生聲音比較尖。另外貝殼砂又呈現不一樣的聲紋圖。



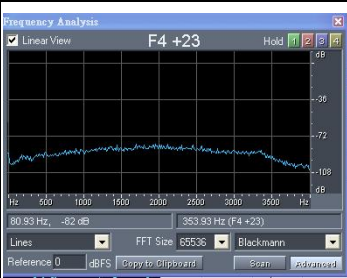


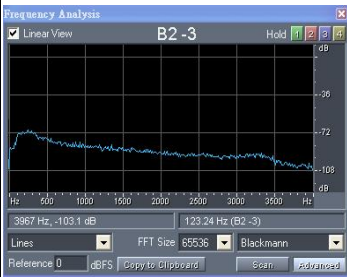
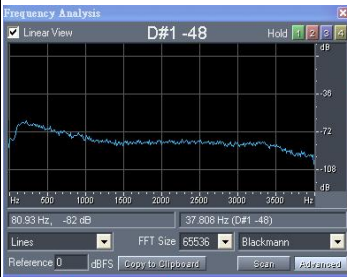



圖二、距離白沙灣 24 公尺聲音紀錄分析圖，大張圖橫軸為時間縱軸為強度，選取推砂後聲音呈現穩定的五秒做頻率分析，得到右下角小張圖。小張圖橫軸為頻率縱軸為分貝，可以看成是聲音的聲紋分析圖，也就是音質；呈現像小山丘。白沙灣的像女生聲音比較尖，比較像小提琴。



圖三、距離南灣 24 公尺聲音紀錄分析圖，比較於圖二大張圖背景聲音複雜，因為當天落山風很強勁，有很多上下的雜紋。小張圖橫軸為頻率縱軸為分貝，聲紋分析圖在低頻的地方有突起。南灣的砂子像男生，比較低沉比較像大提琴。

我們在距離海岸線不同遠處做推沙法，選取較有代表性的一段聲音頻率如表七，我們發現白沙灣的頻率都比南灣高出許多，相差有兩個八度左右，而距離海岸線越近，不論南灣或白沙灣，發出的聲音就越高，推測可能是因為越近海岸線，砂子越濕(我們在挖砂的時候就有感覺，尤其南灣 14 公尺時下層砂都泡在水裡了)，在推砂的時候砂子越重，所以滑落及撞擊的力道都比較強，就像研究一，石頭越大或斜面拉的越高，滑下的速度快或撞擊力大都會使的頻率升高。

表六、白沙灣、南灣海岸及貝殼砂島不同使砂子發聲方法頻率分析(聲紋分析圖)

	推砂	搓砂	自由落砂
白砂海岸 24 公尺	 <p>11 秒以後頻率維持在 250~600Hz 左右(A029)*</p>	 <p>4.5 秒到 17 秒 1100~2500hz 左右(A033)</p>	 <p>5.5 秒以後維持在 15~70 上下 (A038)</p>
距南灣海岸 24 公尺	 <p>5 秒以後 100~140(A074) 約在 133 上下</p>	 <p>6 秒以後 40~165 區間內 (A079)約在 95~117 上下</p>	 <p>2 秒以後 120~150 區間(A081) 約 136.9</p>
貝殼砂島展示館			

備註：(A074)為記錄的影片代號。

表七 與海岸線不同距離推砂法的頻率比較

與海岸線距離 (公尺)	白沙灣		南灣	
	頻率(Hz)	音高	頻率(Hz)	音高
24	221	A3+9	31	B0+11
19	330	E4+1	43	F1+0
14	467	A#4+2	65	C2+0

在所有的野外實驗中，白沙灣的頻率相對比較高，我們希望找到原因，首先做砂子的粒徑分析，取砂子約 10 克，放到一組小篩網中分篩，計算出的每部份比例(表八)，發現貝殼砂島砂最粗，90%大於 0.5mm，其次白沙灣 90%大於 0.25mm，接下來南灣、風吹砂以及港口砂大小都差不多，90%集中在 0.105mm~0.5mm 之間，是比較小的。由粒徑的分佈可以知道除了貝殼砂，白沙灣是顆粒最大的，有可能因為它粒徑大，接觸表面積較大，所以使得發聲頻率變高。因此我們推測在此的砂子發聲的主要機制是摩擦時的剪力，摩擦時的表面積大，使聲音大、頻率高，是我們野外實驗最會唱歌的砂子。

表八、各種砂石不同粒徑所佔百分比列表

種類 佔全部之比例	南灣 24M	白沙灣 24M	港口砂(1)	港口砂(2)	風吹砂	貝殼砂島
x>1.0mm	2.5%	8.21%	0.021%	0%	0.044%	50.98%
0.5mm<x<1.0mm	3.1%	73.62%	5.03%	2.57%	5.11%	43.80%
0.25mm<x<0.5mm	51.72%	18.12%	62.19%	69.90%	68.28%	5.108%
0.105mm<x<0.25mm	42.50%	0.034%	32.61%	27.44%	25.91%	0.063%
0.044mm<x<0.105mm	0.12%	0.010%	0.053%	0.030%	0.029%	0.013%
X<0.044mm	0.009%	0%	0.022%	0.008%	0.012%	0%

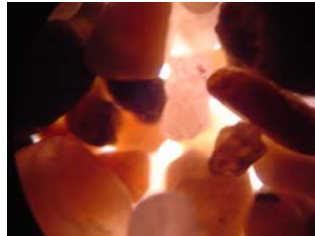
我們用學校的顯微鏡對砂子做觀察，以數位相機放接目鏡上拍照(圖四)，發現砂粒的大小、形狀以及表面的光滑度有些差，和我們肉眼看到的不一樣，所以再以立體顯微鏡對粒徑做觀察(表九)，在觀察的時候發現風吹砂、港口砂這些被吹到離海岸較遠的砂子都較小約在 0.2-0.4mm，其他海邊的砂如白沙灣比較大，在 0.5mm 以上，貝殼砂更大，約 1mm。這些砂子的大小比文獻上說會唱歌的砂丘的砂子都大了很多，像在摩洛哥唱歌的砂丘的粒徑只有 0.16mm，這可能是我們找不到會唱歌的砂丘原因之一。可能是台灣沒有高達長 800 公尺高 18 公尺的砂丘可以產生共鳴吧！在顯微鏡觀察的時候，我們發現白沙灣的顆粒大小比較平均而且圓潤光滑(表九)，南灣比較小而且很多稜角。因此白沙灣的沙比南灣

的沙有較大的接觸表面積，所以音頻較高。這和外國學者的研究越圓磨得越乾淨的砂子發出來的音頻率比較高有相近的結果。

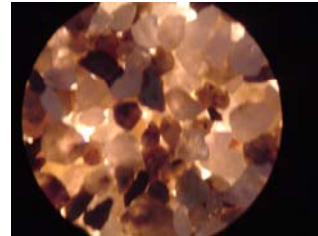
圖四、以倒立式體顯微鏡觀察各種砂粒(60倍放大)



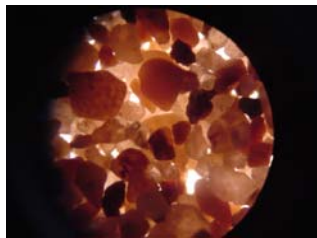
白沙灣



南灣



港口沙漠




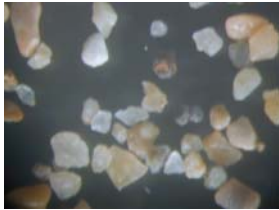




風吹砂



貝殼砂

表九、放大 160 倍後砂粒觀察

種類	平均粒徑大小 (mm)	顆粒形狀
貝殼砂	L : 1.19 W : 1.06	 不規則且有孔洞
白沙灣	L : 0.75 W : 0.56	 很圓且光澤很亮
南灣	L : 0.28 W : 0.25	 稍有稜角具光澤
風吹砂	L : 0.38 W : 0.25	 呈現不規則且稜角很多
港口沙	L : 0.41 W : 0.31	 無稜角稍圓且具光澤
矽砂	L : 1.78 W : 1.56	 具光澤但有稜角

*由原始拍照尺寸的照片得知，0.1 公分的尺規在照片裡面為 16 公分；
因此放大了 160 倍。以電腦螢幕 10 顆沙子，並計算平均。

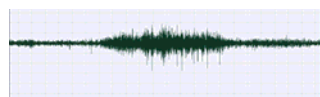
因為轉盤實驗馬達的聲音大影響聲音分析，所以以搓砂來對粒徑的影響做比較。我們把各種野外採集的砂子經陽光曬乾以後用篩網過篩，把每種大小拿來搓一搓聽聲音。結果如表十。除了有一個例外是南灣在小粒徑時數據並不正常，其他得到同樣的結論砂子粒徑越大，頻率會越高。發現是砂子越粗彼此摩擦的時候的剪力越大因此頻率越高。搓砂的方法用頻率分析去看的時候，有很可愛的波的形狀，像一個梭子一樣，有單、雙或三梭，也有一些不規則的。在所有採集回來的砂子中，沒有分篩的原樣品中，仍然以白沙灣搓砂的頻率最高，符合我們前面的推論，是因為白沙灣顆粒較大、較圓以及較光滑。另外發現風吹砂的搓砂頻率也很高，我們推測白沙灣組成份中因貝殼砂含量較高，屬於碳酸鈣礦石，比較軟，而像風吹砂等被風吹的砂石英成分較高就比較硬，所以雖然顆粒小比較輕但因為比較硬所以使得發聲頻率也就較高。

表十 野外採集的沙粒曬乾分出不同粒徑搓砂實驗

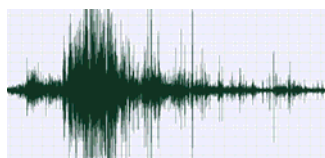
種類	粒徑											
	原形			<0.5mm			>0.5 <2mm			≥2mm		
	波形	頻率	音高	波形	頻率	音高	波形	頻率	音高	波形	頻率	音高
貝殼砂	單梭	241	B3	---	---	---	單梭	205	G#3	不規則	836	G5
白沙灣	單梭	376	F#4	單梭	245	C5	單梭	383	G4	不規則	862	G#5
南灣	單梭	106	G2	單梭	586	D5	雙梭	240 188	B3 F3	雙梭	424 749	G4 F5
風吹砂	不規則	337	F4	雙梭	178 288	F3 D4	雙梭	180 329	F3 G4	雙梭	768 324	G5 G4
矽砂	---	---	---	---	---	---	單梭	225	A3	單梭	315	D4

備註:1. ---貝殼砂以及矽砂過篩後沒有很小(<0.5mm)的顆粒，所以沒有數據

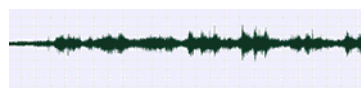
2. 除了南灣小粒徑的頻率偏高以外，皆符合顆粒越大頻率越高的推論。



波形圖：單梭



不規則

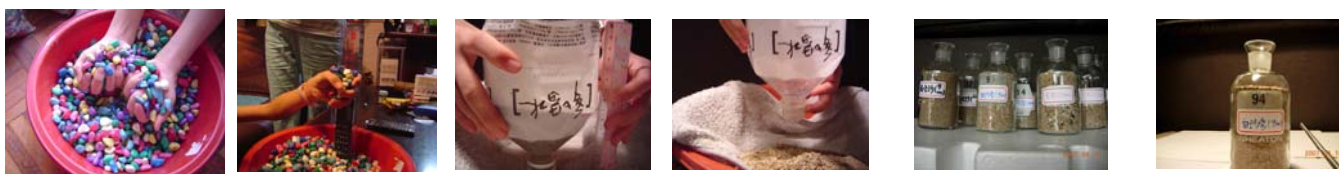


雙梭

四、研究四：其他讓砂子唱歌的方法實驗(比較不同粒徑對砂子發聲頻率的影響)

(一) 研究過程及方法：

1. 搓沙及落沙法:以五彩石進行方法同上。
2. 瓶裝自由落沙法:
 - (1)將沙子裝入 1L 寶特瓶中到所需高度。
 - (2)在距離鋪了布的臉盆上 9cm 處，讓沙子自由落下。
3. 敲沙法:
 - (1)將測試砂子裝入玻璃瓶中 3、6 或 9cm。
 - (2)以鐵筷在瓶子 3cm 的地方敲五下，以數位相機錄影後再進行分析。



搓沙法

落沙法

瓶裝自由落沙法下面鋪布防止摩擦聲

裝入玻璃瓶中的砂子

鐵筷敲瓶子

(二) 研究結果及討論

為了要進一步了解各種方法、粒徑與發聲頻率的關係，以顆粒大小不同的五彩石用搓沙、落沙進行實驗，表十一發現搓沙石頭變大音頻升高，落沙時石頭變小音頻升高。

表十一 彩色石頭實驗

五彩石		小顆	中顆	大顆
粒徑(mm)		6	8	14
搓沙 實驗	頻率	548	762	820
	音高	C#5	F#5	G#5
自由落 砂實驗	頻率	1403	229	21
	音高	F6	A#3	E0

但一般沙丘沙子顆粒並沒有那麼大，因此以海邊採集沙子，進行瓶裝自由落沙實驗(表十二)。我們發現顆粒愈大的(大於 2mm)貝殼砂、矽砂頻率較高，在 400Hz 以上，顆粒較小的沙都在 100Hz 左右，每一種沙子都是粒徑大的頻率高。

表十二 野外採集沙子曬乾分篩後進行瓶裝自由落沙實驗

砂子種類	粒徑 mm	落砂高度 cm	發聲頻率	音高
貝殼砂	≥ 2	8.5	600	D5
	< 2		108	A2
矽砂	≥ 2		427	G#4
	< 2		402	G4
白沙灣	原形		115	A32
	$0.5 < x < 2$		110	A2
	$0.104 < x < 0.5$		100	G2
南灣	原形		101	G#2
	$0.5 < x < 2$		111	A2
	$0.104 < x < 0.5$		87	F2
港口砂	原形		158	D#3
	≥ 0.5		271	C#4
	$0.104 < x < 0.5$	103	G#2	
風吹砂	≥ 0.5	13.5	159	D#3
	< 0.5		125	132

最後我們又進行了一項有趣的實驗，像水瓶音樂一樣想創造敲沙音樂，敲擊瓶子的實驗結果如表十三，砂子的聲音一般比水聲要低，不論是哪一種砂子裝的砂子越多，聲音頻率越高，可能因為裝砂子越多，空氣量越少，振動越多次，頻率就高。貝殼砂的聲音在 3cm 的時候是所有的最低頻率，可能是因為貝殼砂顆粒最粗，空氣孔隙多，振動越少次，但是在 9cm 時卻最高，原因不清楚。白沙灣取的砂，也和野外實驗一樣，頻率是所有砂子中最高的。

表十三、敲擊裝砂的玻璃瓶聲音分析

砂子來源	瓶裝砂高度(cm)		
	<u>3</u>	<u>6</u>	<u>9</u>
	頻率(HZ)		
貝殼砂島	86	126	542
白沙灣	365	322	423
南灣	251	237	315
風吹砂	154	197	292
港口砂	251	326	379
水	118	466	508

*敲擊五次最大聲點的頻率平均值。

陸、綜合討論

綜合以上研究，我們歸納影響沙丘唱歌的原因包括有發聲的方法、施力大小、以及沙子的材質、形狀、大小、濕度等，整理如表十四。

表十四 影響沙丘唱歌的原因歸納表

原因	描述	參考表格、頁數
發聲的方法	刮沙法、滑落法、撞擊法、轉盤法、推沙法、搓沙法、自由落沙法、踢沙法、瓶裝自由落沙法、敲沙法	研究一 ~ 研究四
施力的大小	由 17 公分拉到 28 公分時頻率升高	表三
砂子的材質	軟硬：矽砂(石英)較硬、白沙灣(石灰石)較軟、 表面：爐石表面較粗糙、白沙灣表面較光滑	P24(表十前) P14、圖一
砂子的形狀	白沙灣圓潤，摩擦面大頻率高 南灣有稜角，摩擦面小頻率低	表九
砂子的大小	隨粒徑變大而頻率也跟著變高 或隨粒徑變大而頻率也跟著變低	表十/表十二 表十一
砂子的溼度	溼度愈大，頻率愈高	表七

其中施力、材質、形狀和濕度的影響我們容易了解，但是發聲方法不同為甚麼會造成有的依粒徑變大，音頻升高，有的卻變低。為了要追蹤可能的原因，我們翻閱相關資料，發現造成砂子發出聲音的機制大致有三種理論；分別是縫隙理論、摩擦理論和振動理論。

縫隙理論是說明砂子的表面凹凸不平或其內部有縫隙，當空氣在其縫隙間進出會造成空氣嗡嗡作響。當砂子的粒徑愈小，縫隙就小，音頻愈高。如表十五中刮砂實驗。

振動理論是說振動的愈快，音頻就愈高。當振動的本體是砂子時，同樣的受力，砂子粒徑愈小，振動愈快，音頻愈高，如表十五中爐石轉盤實驗及石頭撞擊實驗。而敲砂法(表十三)，不論哪一種砂，當砂子裝愈多，音頻愈高，此乃因振動的本體是空氣，砂子裝愈高，空氣相對愈少，所以音頻愈高。

摩擦理論：有一些砂子會發出聲響並不是空氣在其細縫進出，而是砂子表面磨擦所造成，不同材質、接觸表面積及摩擦力的大小決定音頻的高低。在相同材質下，砂子的粒徑愈小，其接觸表面積愈小，摩擦力總和愈小，所發出的音頻愈低。如表十五中滑落及搓砂實驗。我們將各種發聲方法、粒徑大小及可能的理論整理成表十五。

表十五 各種發聲方法在不同粒徑對發聲頻率的影響

	實驗方法														
	刮砂			轉盤		撞擊		滑落		搓砂					
種類	工程用砂 (表一)			爐石 (表五)		石頭 (表四)				彩石 (表十一)			風吹砂 (表十)		
粒徑 (mm)	0.005	0.104	0.5	4	9	2	5	2	5	6	8	14	0.5	0.5-2	2
頻率	71	71	77	29	15	59	41	465	539	54	76	82	288	329	768
隨粒 徑增 加音 頻變 化值	>變小			>變小		>變小		<變大		<變大			<變大		
結果 推論	縫隙理論			振動理論				摩擦理論							

這裡我們碰到一個問題，為什麼同樣是由上落下，五彩石(表十三)的結果是顆粒小頻率高，風吹沙(表十五)則是顆粒小頻率低呢？我們推測是比表面積(表面積/體積)的差異，比表面積隨著粒徑變小而變大，彩石比表面積不大(大中小彩石約 9、10、12)，風吹沙比表面積卻相當大，所以掉落時，比表面積大的風吹沙彼此間摩擦機率高，屬於摩擦理論，粒徑大則音頻高。比表面積小的五彩石掉落則是直接碰撞，所以是振動理論，粒徑小音頻高。

柒、結論

1. **沙丘如何唱歌**：歸納使沙丘唱歌的方法有滑落、撞擊、搓沙、推沙、自由落沙及敲沙等，知道使沙丘唱歌的機制有三種，分別為縫隙、振動及摩擦理論。發聲頻率介於 100~1000Hz。在南台灣海岸沒有發現自然界愛唱歌的沙丘，可能原因是因沒有夠大的共鳴體。
2. **比較不同粒徑對發聲頻率的影響**(表十五)：在摩擦理論中，粒徑越大摩擦面積大所以頻率高。在振動理論中，則相反；粒徑小越易振動，頻率越高。
3. **其他影響沙子發聲的因素**(表十四)：還有施力大小(斜面越高滑落速度快則頻率高)、形狀及表面結構(光滑圓潤的摩擦面大頻率高)、材質軟硬及溼度等。
4. **南台灣海岸野外實驗**：
 - (1) 不管用什麼方法讓沙子發聲，相同地點的頻譜圖都相似，或許可以進一步如同指紋，發展成鑑定沙子來源的工具。其中白沙灣頻譜圖像小饅頭、聽起來像女生或小提琴。南灣頻譜圖有個小尖山、聽起來像男生或大提琴。
 - (2) 白沙灣最特殊，各種方法發聲音頻率都最高，原因是顆粒比較大(0.25~1mm)、形狀最圓而且外表被磨的很光潤圓滑的關係，最有可能成為會唱歌的沙子。

捌、心得

這次的實驗讓我學習到很多，一粒砂看世界，這裡面有很多奇妙的事情；白沙灣的砂子總是發音頻率較高！砂子在顯微鏡下竟然那麼特別與漂亮！如果時間夠，我希望除了能把轉盤改進，降低馬達的干擾聲，可以做轉速、推動力…對砂子發生的影響外，也希望能逐一的對台灣各地的砂丘做進一步的探討，期盼再台灣也能找到會唱歌的砂丘，吸引更多人來觀光。

玖、參考文獻

網址類：

1. <http://www.kagakukan.sendai-c.ed.jp/en/guide/c/c24.html>
2. <http://physicsweb.org/articles/news/10/7/5/1>
3. <http://www.schweich.com/sbdA.html>
4. <http://scitech.people.com.cn/BIG5/25895/3733099.html>
5. 砂子為什麼會唱歌
<http://translate.google.com/translate?hl=zh-TW&sl=zh-CN&u=http://meltingpot.fortunecity.com/sudan/47/singsand.html&sa=X&oi=translate&resnum=2&ct=result&prev=/search%3Fq%3Dsingsand%26complete%3D1%26hl%3Dzh-TW>
6. Singing sand 維京百科 http://en.wikipedia.org/wiki/Singing_sand
7. Why sand dunes go boom
http://news.nationalgeographic.com/news/2004/10/1020_041020_sand_dunes.html
8. 書本類：
書名：砂丘探祕。作者：阿尼達·加奈利。年代：民國 94 出版社：如何出版社，頁數：40-48。

【評語】 081564 愛唱歌的沙丘

1. 研究的目的與方法之關連性應加強不宜簡化。
2. 利用音頻分析，以及相關軟體之應用，有超越程度之嫌。
3. 題目與內容不太配合。本篇宜置於物理科，尤其利用到縫隙、振動及摩擦理論時。
4. 建議加強下列幾點，應該可以做的更好：
 - 一、 說明採樣的目的與樣本的差異性與代表性。
 - 二、 說明沙丘移動的機制與搬運方式。不宜全部依賴聲紋分析。
 - 三、 瞭解採樣地點的特性與沙丘形成的原因。
 - 四、 瞭解沙粒的粒徑與風速、含水量甚至表面植生與表面風速的關係。
 - 五、 瞭解影響沙粒碰撞、摩擦發生的條件
 - 六、 瞭解所做的實驗的意義與適宜性。
 - 七、 說明不同粒徑所產生的頻率的差異。
 - 八、 說明小學程度應該可以瞭解的物理現象，以及本研究與課本的關連。
 - 九、 簡化實驗樣本的種類，力求代表性。例如野外採的沙外，還有爐石、彩色石、矽沙。如此很容易混淆報告的內容與方向。
 - 十、 說明由紙箱滑落壓克力刮板、木製轉盤與由風力造成的聲紋有哪些差異，是否需要調整實驗設計？
 - 十一、 為何一定要用沙島的沙，旁邊的沙是一樣的。
 - 十二、 如果一定要做頻率分析，不應該只有一張表六就交代完畢，應該有更多的說明，或有更多重覆實驗的結果，以證明所說明的現象。