

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 地球科學科

第三名

030507

風砂共舞

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 龔庭萱 國二 宋宸榛 國二 陳珮君	指導老師： 侯依伶 曹嘉修
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：砂波紋、風速、沙灘

摘要

本研究的研究目的在探討影響沙灘上風成「砂波紋」外形的變因。除了實地到高雄旗津海岸公園以及西子灣沙灘上進行觀察測量外，我們也在實驗室中利用自行組裝的實驗器材進行各項變因的研究。研究結果發現，以中、細砂做出厚度至少 2 公分的砂堆、用 7.5m/s ~ 8.0m/s 之間的風速吹襲砂堆約 15 分鐘，即可製造出排列整齊、紋路明顯的砂波紋。研究結果也發現風速、砂堆厚度和沉積物顆粒大小都對砂波紋外形有明顯的影響：(1)風速愈小，砂波紋會愈平直，波長也較小；(2)砂堆厚度愈厚，形成的砂波紋波長較長；(3)中細砂和泥土等級的沉積物顆粒才能形成砂波紋，顆粒大的粗砂很難形成砂波紋；(4)當風速相對於沉積物顆粒極小時，有機會形成較不明顯的縱向砂波紋。

壹、前言

一、研究動機

去旗津海灘遊玩的時候，我們注意到在波浪拍打不到的沙灘上，卻也有著像水波痕一樣的波紋，整齊地排列在廣大的沙灘上。查閱資料後我們得知這是因為風的吹襲所造成的「砂波紋(sand ripple)」。我們對這些「砂波紋」充滿了好奇，想要知道要有那些因素的配合，才能形成整齊又漂亮的紋路，因此開啟了一連串的研究。



圖 1：旗津海岸公園的砂波紋



圖 2：西子灣海水浴場的砂波紋

二、文獻探討

(一) 砂波紋(sand ripple)的形成原因

砂波紋是一種受風的強度和砂丘頂峰顆粒粒徑影響所形成的微地形。砂波紋的峰頂軸向會垂直於風向，因風力的作用會形成各種不同的紋路變化，波長大約幾公分～幾十分，波高約在幾公分內。

當風吹在砂地上時，會使砂地上鬆散的砂跳躍堆積形成波峰和波谷，且長軸垂直於風向。砂子在受風帶動的跳躍期間，跳躍的平均長度會對應到砂波紋的波長，即相鄰波峰之間的距離。在砂波紋中，較大的顆粒會聚集在波峰處，這樣的情形與砂丘剛好相反。在砂丘中，較大顆粒的砂子會聚集在波谷中。

影響砂波紋形成過程包括 3 個主要因素包括：

1. 大小粒徑不同的砂粒在沙灘上方形成的風砂流。
2. 風砂流中砂粒對沙灘的碰撞以及碰撞後砂粒的反彈或濺起。
3. 砂粒在沙灘上方的躍移和蠕移。

(二) 砂波紋與砂丘(dune)的差異

砂波紋和砂丘都是由風造成的風積地形，兩者最大的差異是規模的大小，砂波紋的高度一般只有數公釐，但砂丘的高度可以從數十公分～數十公尺。

(三) 砂波紋的種類

依照外形，砂波紋大致上可以分為直脊波紋、彎脊波波紋、鏈狀波紋、蛇形波紋、新月形波紋等。

從文獻資料可以知道，風成砂波紋的形成和水成的砂波紋相似。水成砂波紋可以分為對稱型的波浪波痕(wave ripple)和不對稱型的水流波痕(current ripple)。對稱型的波痕一般發育在水流速度極慢，波浪來回震盪的地方，如果是水流動造成的波痕就會出現一邊平緩一邊陡峭的不對稱波紋。波紋的外形會受到形成時流體速度、深度、粒度和流動方向等因素的影響，而產生不同的變化。

因此，我們推測風成砂波紋的外形也會像水成砂波紋一樣受到風速、沉積物顆粒大小、砂量多寡等因素的影響。因此，我們希望經由實地觀察和進行實驗探究來更進一步了解沙灘上的風成砂波紋。

三、 研究目的與問題

為了進一步了解影響砂波紋的形成因素，我們根據文獻探討的結果，擬定了以下六個研究問題：

- (一) 在海邊的沙灘上，砂波紋的波長和外形與風速的關係為何？
- (二) 在相同條件下，不同位置的砂波紋外形有何差異？
- (三) 風吹時間對砂波紋外形的變化影響為何？
- (四) 風速對砂波紋形狀造成的影響為何？
- (五) 砂堆厚度對砂波紋形狀的影響為何？
- (六) 不同顆粒大小的沉積物形成砂波紋的差異情形為何？

貳、 研究設備及器材

一、 不同大小的沉積物顆粒：

- (一) 大顆粒：直徑約 1~2mm 的粗砂
- (二) 中顆粒：直徑約 0.1mm~1mm 的細砂和中砂
- (三) 細顆粒：直徑約 0.06mm~0.1mm 的泥土

二、 風速計：測量風速。

三、吹風機、電扇、工業用風機：實驗中用來製造風。

(一) 前置實驗結果發現吹風機和電扇的風速較弱，故正式實驗時，使用工業用風機來製造風。

(二) 由於工業用風機無法調整風速，所以製作延長風洞，以改變不同距離來改變風速。



圖 3：風速計



圖 4：工業用風機

四、風洞：使工業用風機製造的風能均勻吹出。



圖 5：風洞的正面及背面

五、正式實驗裝置：

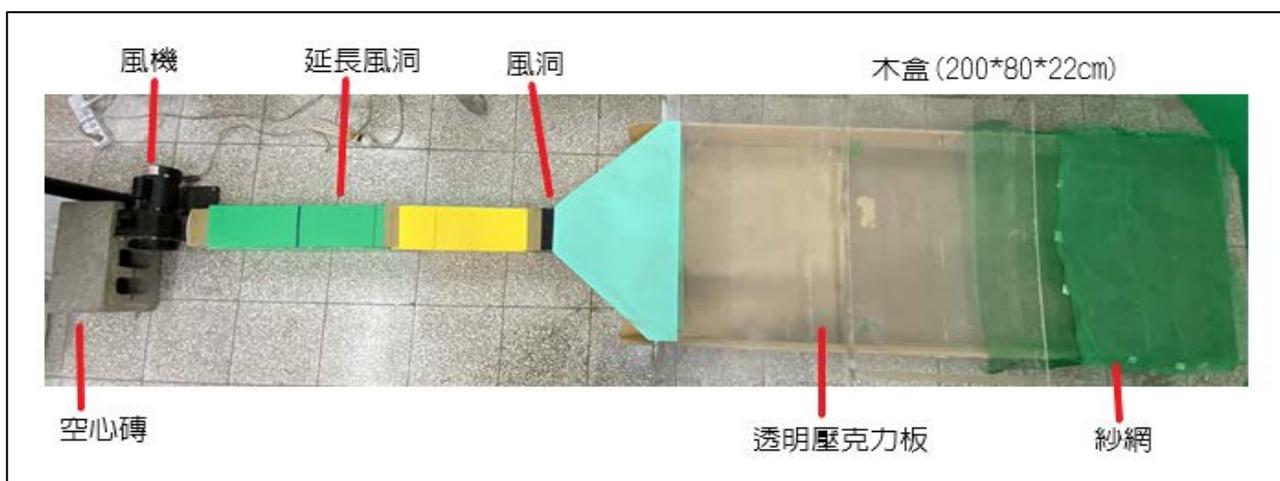


圖 6：正式實驗裝置圖

參、研究過程

本研究的研究過程包括了實地考察、前置實驗測試以及正式實驗三個部分。

一、實地考察

我們以離高雄市區較近的沙灘作為我們實地考察的地點，分別觀察旗津海水浴場、旗津海岸公園、西子灣海水浴場等地的砂波紋。

1. 觀察旗津海水浴場的砂波紋。
2. 討論可能影響砂波紋外形的因素，形成可測試的研究問題。



1. 觀察並調查旗津海岸公園附近砂波紋分布狀況。
2. 測量砂波紋的波長、彎曲度以及風速等數據，探討三者之間的關係。



1. 觀察西子灣海水浴場附近砂波紋與風向、砂子顆粒大小的關係。
2. 測量砂波紋的波長、彎曲度以及風速等數據，探討三者之間的關係。

二、前置實驗測試

(一) 決定測量的風速：

1. 由氣象局資料以及旗津沙灘的實查結果，我們得知海邊的平均風速大約落在每秒 1 公尺~3 公尺之間。
2. 我們先分別使用吹風機和小型電扇來製造風，產生與海邊風速大約相當的風力。但實驗結果發現：
 - (1) 砂子只會在砂堆表面蠕移，很少發生跳躍。
 - (2) 大約經過 1 小時才能略能看到不明顯的直脊狀砂波紋，且波長約 5mm。
 - (3) 這樣的微弱的風力需要較長的時間才能產生砂波紋，無法符合我們實驗的需要。
3. 因此，我們改用工業用的風機來製造風，並因應本實驗需要先量測出風機在不同距離時，所測量到風速（數據皆為裝置完畢風洞的風機所測出來的）。結果如下表 1 所示。



圖 7：測量風機距離與風速的關係

出風口到砂堆最前端的距離(cm)	第一次測量(m/s)	第二次測量(m/s)	第三次測量(m/s)	平均風速(m/s)
90	8.8	8.7	8.9	8.7
105	7.8	8.1	8.1	8.0
120	7.4	7.6	7.5	7.5
135	7.0	7.5	7.6	7.4
150	6.8	7	6.9	6.9
210	5.2	5.3	5.2	5.3

(二) 決定測量的厚度：

1. 由旗津沙灘的實查結果，砂波紋的高度約在 1 公分以下。但由於太薄的砂堆可能在受長期風吹的影響下流失，影響實驗觀察。因此在考量實驗室砂量的前提下，我們決定以厚度 3cm 作為鋪設砂堆的基準。
2. 為討論砂堆厚度對砂波紋形狀的影響，我們也設計實驗來比較砂堆厚度分別是 0.3cm、0.5 公分、1 公分、2 公分、3 公分的情況下，砂波紋形成的差異。

(三) 決定風吹的時間：

1. 在正式實驗之前，我們先觀察砂堆在 7.5 m/s 的風速下，隨時間的變化情形。
2. 測試結果發現，砂波紋形成後，在 10 分鐘以前的形狀都較為固定，但在第 10 分鐘～第 15 分鐘時，砂波紋形狀會出現明顯的變化。
3. 在第 20 分鐘以後，經過木盒反彈後的亂流對砂波紋產生明顯影響，因此我們選擇觀察前 20 分鐘的變化，並以 5 分鐘為間隔，進行觀察，分別測量砂波紋的彎曲程度和砂波紋之間的距離。

(四) 砂波紋的觀察與測量：

1. 每一次的實驗結果，我們都先以相機進行拍攝，並將照片列印成 A4 大小。
2. 在列印出來的照片上，畫出較清楚的砂波紋，以計算砂波紋的**彎曲程度**以及砂波紋的**波長**（波峰之間的距離）來比較砂波紋的差異。
 - (1) 砂波紋彎曲程度：仿照河流「蜿蜒度」的計算方式，以砂波紋兩個端點的實際距離長度（粉紅色線條）除以兩側端點位置的直線距離（黃色線條）來代表砂波紋的彎曲程度（如下圖 8 所示）。

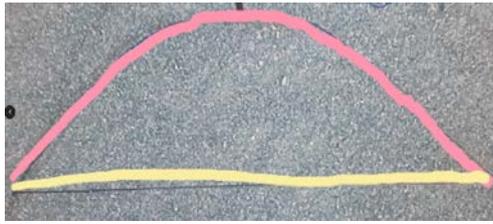


圖 8：彎曲程度計算法的示意圖

- (2) 砂波紋的波長：測量兩相鄰砂波紋的波峰之間的距離：為圖 9 和圖 10 中藍點與藍點之間的距離。因為我們是用列印出來的照片進行測量時，所以研究報告中所有測量的波長值皆要乘以 5.2 才是木盒內砂堆上砂波紋的實際長度。

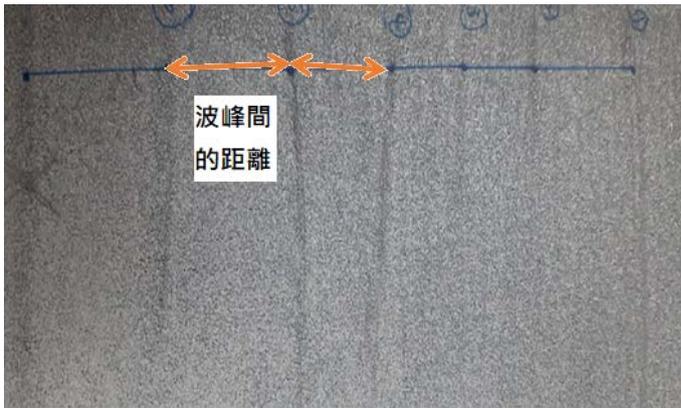


圖 9：波長測量示意圖 1

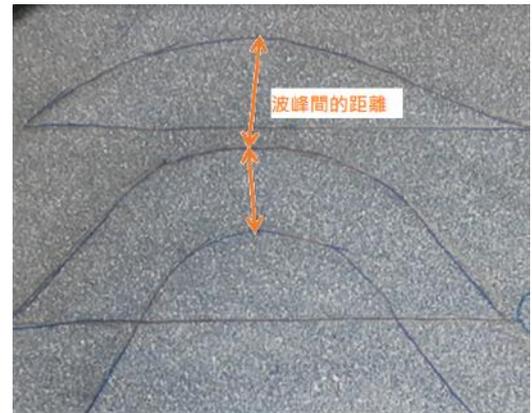


圖 10：波長測量示意圖 2

3. 我們原本也打算測量砂波紋的迎風側的坡度角和背風側的坡度角（圖 11），以了解不同變因下，砂波紋坡度角的變化差異。然而，我們測試的許多不同的測量方法，砂子都容易崩塌而無法測得準確的數據。因此，我們只能觀察整體砂波紋坡度的大致變化趨勢。

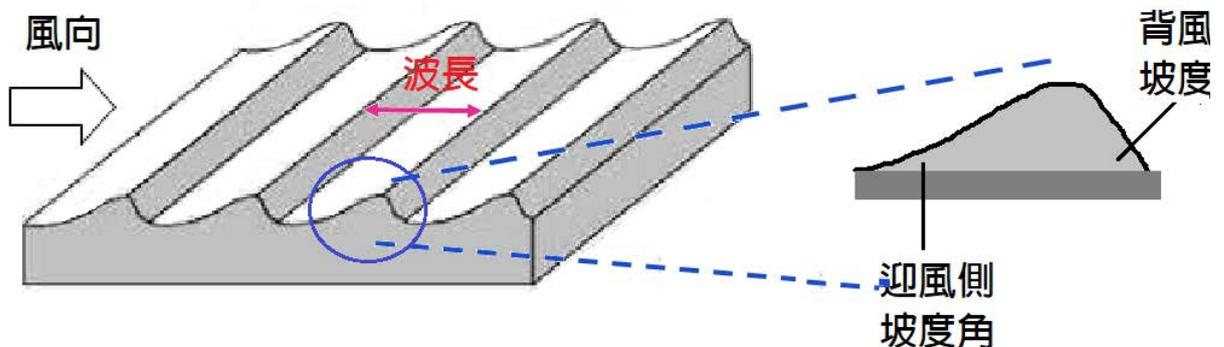


圖 11：砂波紋的迎風側的坡度角和背風側的坡度角示意圖

(原圖修改自參考文獻)

三、正式實驗設置

(一) 實驗步驟：

1. 主要以和旗津沙灘顆粒大小較接近的**中、細砂**進行實驗。
2. 將砂子均勻鋪在木盒內並達到一定厚度，且將紗網覆蓋在上面。
3. 開啟風機並透過風洞均勻吹向砂堆。
4. 20分鐘內，**每5分鐘**暫停風機拍照和觀察一次變化。

(二) 實驗流程規劃：

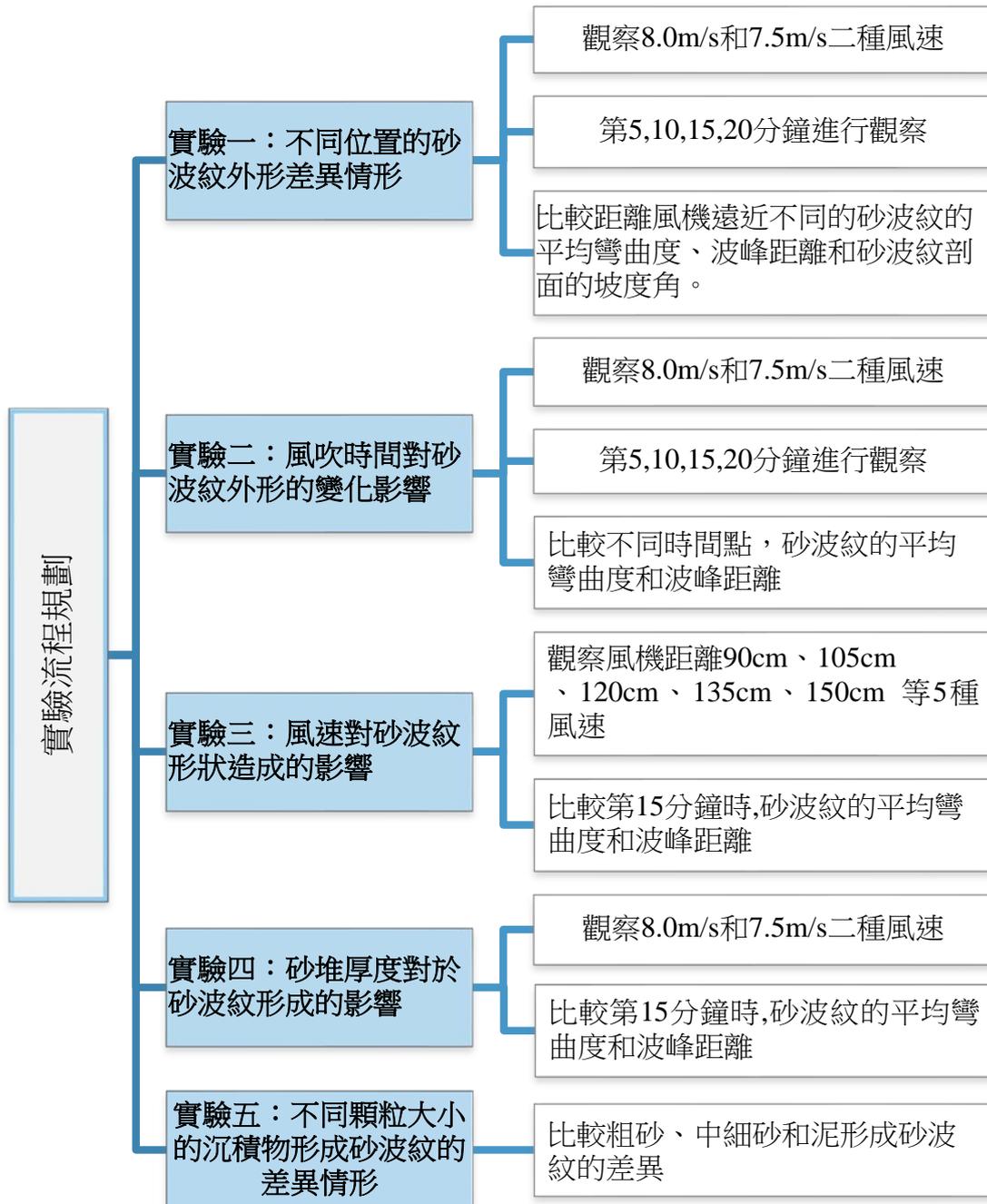


圖 12：實驗流程規劃圖

肆、研究結果

一、旗津海岸公園沙灘與西子灣海水浴場沙灘實查結果

(一) 旗津海岸公園沙灘實查結果

1. 實察時間：2022 年 2 月 27 日下午 14:00~17:00，整體風向偏北風。

2. 觀察發現：

(1) 旗津海岸公園沙灘上的砂波紋方向約和海岸線垂直，也垂直於當時的風向（北風）。

(2) 砂波紋的方向是不對稱的，迎風坡面較平緩，背風坡面較陡

(3) 砂波紋的組成顆粒大小幾乎相同，但在砂波紋的波峰處可以發現較大的砂顆粒（圖 13）。



圖 13：波峰處有較大的砂顆粒

(4) 砂波紋大多是以直脊砂波紋方式出現（圖 14），但仔細觀察，可以發現有多處呈現蛇形砂波紋或彎脊形砂波紋（圖 15、圖 16）。



圖 14：直脊砂波紋



圖 15：蛇形砂波紋



圖 16：彎脊形砂波紋

3. 測量砂波紋：

(1) 我們在旗津海岸公園沙灘選取 10 處砂波紋比較規則一致，且較少受外力破壞的位置進行砂波紋的量測。

(2) 在每一處位置，我們都尋找 5 個連續的波紋來測量波峰間的平均距離和每個砂波紋的彎曲程度，並且以風速計測得每一處位置的平均風速。結果如下表 2、圖 18、圖 19。

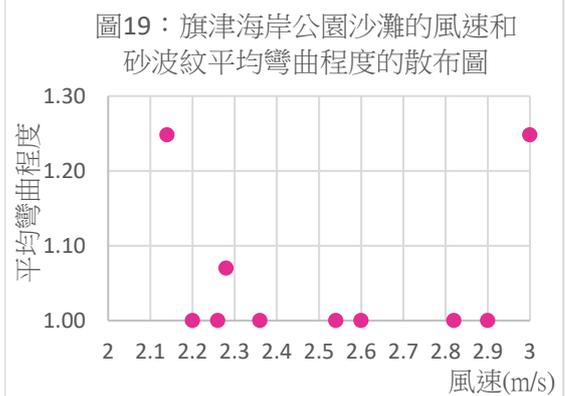
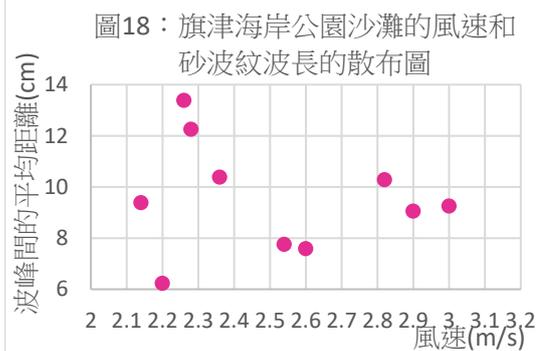
(3) 測量結果發現，旗津海岸公園沙灘上的砂波紋波長約在 6 公分~13 公分之間，平均彎曲程度約在 1~1.25 之間，且這些數值與當時的風速大小無明顯的關聯。



圖 17：在海岸公園沙灘進行測量

表 2：旗津海岸公園沙灘的砂波紋測量結果

砂波紋編號	平均波長 (cm)	平均彎曲程度	平均風速 (m/s)
1	9.25	1.25	3.00
2	9.38	1.25	2.14
3	12.25	1.07	2.28
4	9.05	1.00	2.90
5	10.38	1.00	2.36
6	7.58	1.00	2.60
7	10.28	1.00	2.82
8	13.38	1.00	2.26
9	6.23	1.00	2.20
10	7.75	1.00	2.54



(二) 西子灣海水浴場沙灘實查結果

1. 實察時間：2022年3月6日上午9:00~11:30。觀察期間風向由東北風漸變為南風、西南風。
2. 觀察結果發現：
 - (1) 西子灣海水浴場沙灘上的砂波紋方向約和海岸線平行，與當時的風向大約垂直。
 - (2) 較少直脊狀的砂波紋，大多呈現彎脊狀（圖 20）。
 - (3) 砂波紋的組成顆粒大小差異較旗津海岸公園沙灘大，離海岸較遠處的砂子顆粒較為細小。
 - (4) 砂波紋的兩側是不對稱的，迎風坡面較平緩，背風坡面較陡
 - (5) 在兩個同向彎脊狀砂波紋中間有由較大顆粒砂子組成的反向彎脊狀砂波紋，推測是風向逐漸由偏北風轉成白天的偏南風時所形成的交錯現象（圖 21）。



圖 20：彎脊狀的砂波紋

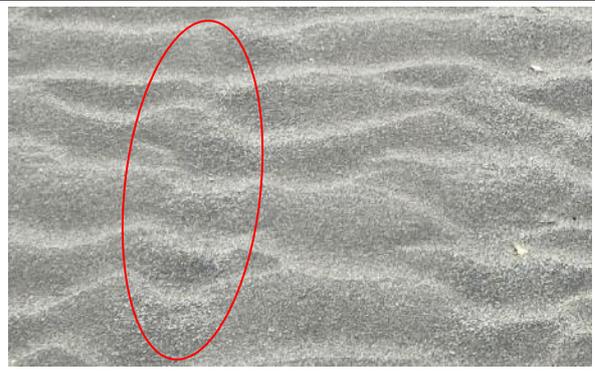


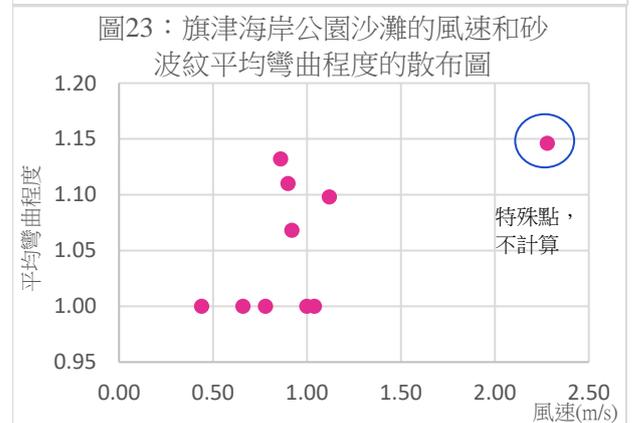
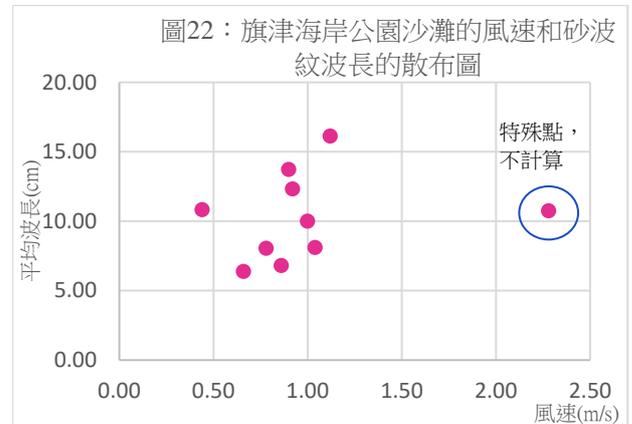
圖 21：同向彎脊狀砂波紋中間的反向彎脊狀砂波紋

3. 測量砂波紋：

- (1) 我們在西子灣海水浴場沙灘選取 10 處砂波紋比較規則一致，且較少受外力破壞的位置進行砂波紋的量測。
- (2) 在每一處位置，我們都尋找 5 個砂波紋來測量波長和彎曲程度，並以風速計測得每一處位置的平均風速。結果如下表 3、圖 22、圖 23。
- (3) 測量結果發現，西子灣海水浴場沙灘上的砂波紋波長約在 6 公分~16 公分之間，平均彎曲程度約在 1~1.15 之間。由散佈圖可以大致看出，由於各處位置的風速差異不大，因此波長和彎曲程度的差異也不大，且之間並沒有一致的關聯性。

表 3：西子灣沙灘的砂波紋測量結果

砂波紋編號	平均波長 (cm)	平均彎曲程度	平均風速 (m/s)
1	16.13	1.10	1.12
2	13.73	1.11	0.90
3	6.38	1.00	0.66
4	8.10	1.00	1.04
5	10.75	1.15	2.28
6	8.05	1.00	0.78
7	6.80	1.13	0.86
8	10.00	1.00	1.00
9	12.33	1.07	0.92
10	10.83	1.00	0.44



小結：

1. 根據我們的實查結果發現旗津和西子灣海灘的砂波紋，彎曲長度不大，波長也都相當接近。
2. 西子灣的觀察結果發現，當風向改變時，砂波紋會重新堆積形成。這些砂波紋的方向也隨著海邊風向的晝夜變化而變化著。
3. 風速的大小對砂波紋的彎曲程度和波長影響不大，但這可能是我們考察的期間內，風速都沒有太大變化所造成的。

二、比較相同條件下，木盒內不同位置形成的砂波紋差異情形

我們發現使用風機對著木盒內的砂子吹風時，在木盒內不同位置形成的砂波紋形狀並不相同，因此我們想先分析木盒內不同位置對於砂波紋形成的影響。我們在木盒內鋪上厚度 3 公分的砂子，觀察在風機在 105 公分(8.0m/s)以及 120 公分(7.5m/s)的距離下，砂波紋的形成情形。每 5 分鐘觀察並記錄一次砂波紋形成的數目、彎曲度以及每一個砂波紋形成的位置，共觀察 20 分鐘。研究結果如下：

(一) 風機放置於砂堆前緣 105 公分距離

1. 第 5 分鐘的觀察結果：

- (1) 彎曲程度：砂波紋大多數都落在 1.10 上下，但是第 9 和第 10 個砂波紋的彎曲程度較大（砂波紋的編號以愈接近風機的編號愈大）。表示離風機較近、風速較大時，砂波紋的彎曲程度有可能隨之增加（圖 24）。
- (2) 波長：分布在 0.6-1.5 公分之間，第 3 個波到第 4 個波之間的波長明顯較長（圖 25）。

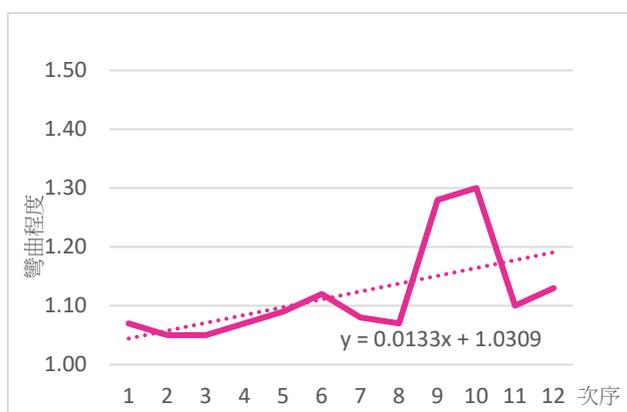


圖 24：距離 105 公分第 5 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度（砂波紋的編號愈大，愈接近風機）

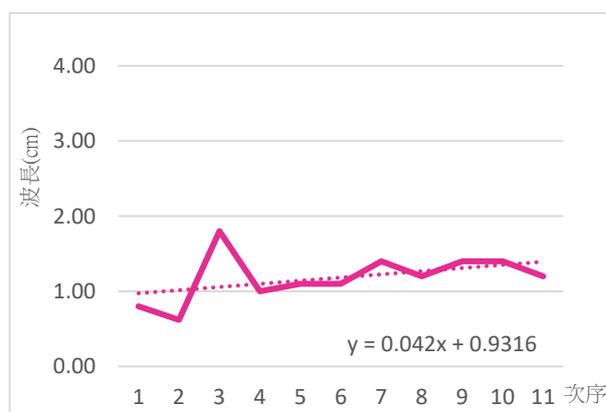


圖 25：距離 105 公分第 5 分鐘時，每一個波紋的波長（砂波紋的編號愈大，愈接近風機）

2. 第 10 分鐘的觀察結果：

- (1) 彎曲程度：彎曲程度的變化範圍較廣，約落在 1.0-1.3 公分之間，依趨勢線來看，越靠近風機彎曲程度會越大（圖 26）。
- (2) 波長：除了第 2 個波和第 9 個波之外，波長都落在 0.5-1.7 公分之間（圖 27），依趨勢線來看，波長的變化與離風機的遠近無關。

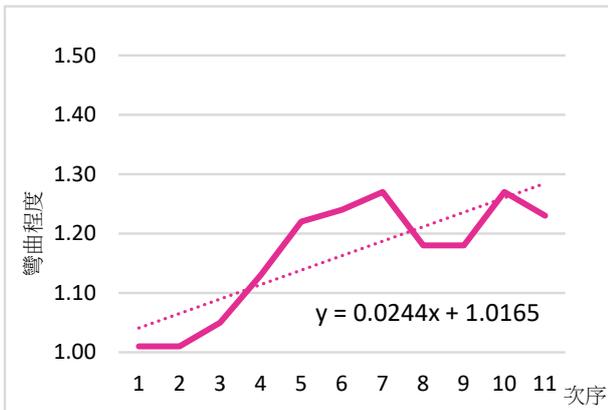


圖 26：距離 105 公分第 10 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度



圖 27：距離 105 公分第 10 分鐘時，每一個波紋的波長

3. 第 15 分鐘的觀察結果：如圖 28、圖 29。

- (1) 彎曲程度：在第 15 分鐘，各個波的彎曲程度皆有明顯較大，大約落在 1.0-1.4 之間，1.1 以上的居多。依趨勢線來看，越靠近風機彎曲程度會越大。
- (2) 波長：波長以第 2 個波和的 9 個波較大，其餘皆在 0.7-2.7cm 之間。由趨勢線顯示，波長的變化與離風機的遠近無關。

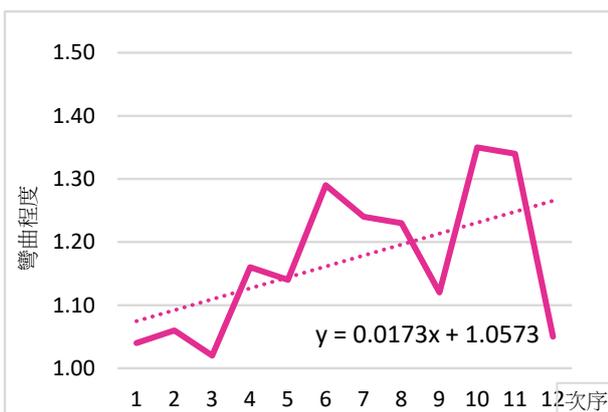


圖 28：距離 105 公分第 15 分鐘時，每一個砂波紋的彎曲程度

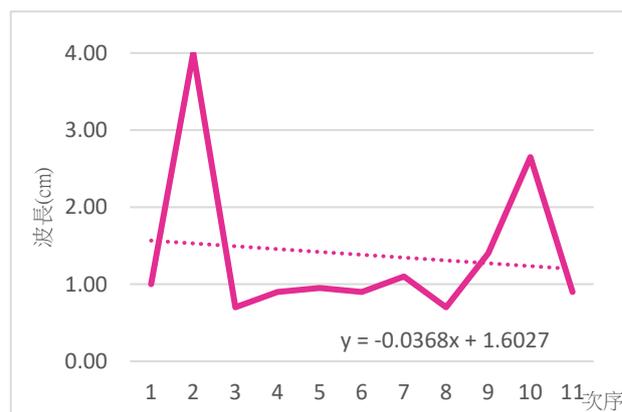


圖 29：距離 105 公分第 15 分鐘時，每一個砂波紋的波長

4. 第 20 分鐘的觀察結果：如圖 30、圖 31。

- (1) 彎曲程度：皆落在 1.0-1.4 之間，且由趨勢線得知，離風機越近彎曲程度越大
- (2) 波長：平均約在 1 公分~2 公分之間，前後側砂波紋的波長較長，中間波紋的波長與前 3 次測量的波長相近。

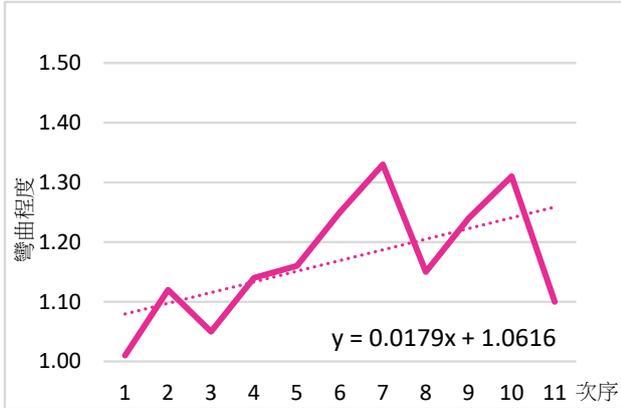


圖 30：距離 105 公分第 20 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度

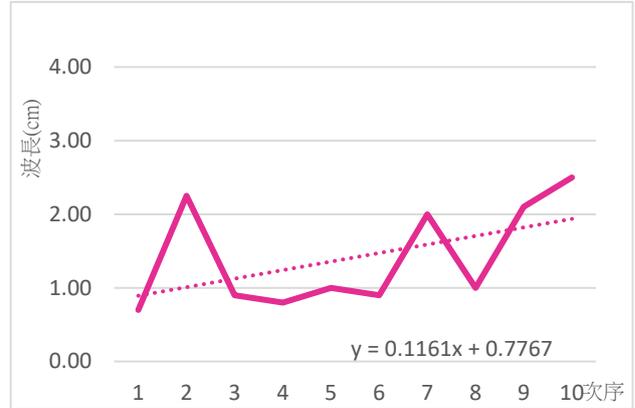


圖 31：距離 105 公分第 20 分鐘時，每一個波紋的波長

5. 綜合以上分析結果：

- (1) 彎曲程度：離風機越近，砂波紋彎曲程度愈明顯，砂波紋出現後，風吹的時間對彎曲程度影響不大。
- (2) 波長：木盒內前後位置的砂波紋，波峰距離有大幅度變化，但位在中間的砂波紋波長無明顯的變化趨勢，一直維持在 1 公分左右的長度。

(二) 風機放置於砂堆前緣 120 公分距離

1. 第 5 分鐘的觀察結果：砂波紋不明顯，形成在較靠近風機位置處。

- (1) 彎曲程度：落在 1.0-1.35 之間，靠近風機的位置，砂波紋的彎曲度較大。
- (2) 波長：約落在 0.7-1.9cm 之間，與風機距離關係不明顯。

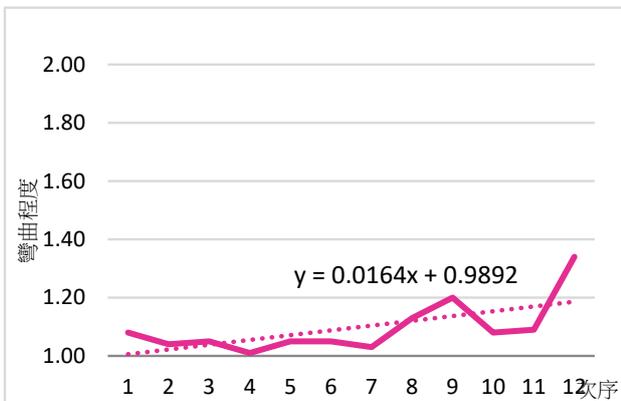


圖 32：距離 120 公分第 5 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度

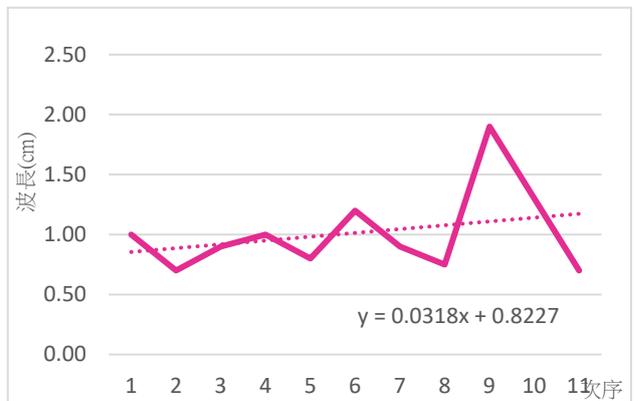


圖 33：距離 120 公分第 5 分鐘時，每一個波紋的波長

2. 第 10 分鐘的觀察結果：砂波紋形成較明顯，不僅高度增加，長度也變長。
- (1) 彎曲程度：在 1.05-1.8 之間，愈靠近風機的位置，砂波紋的彎曲度較大。
 - (2) 波長：在 0.7-2.4cm 之間。趨勢線顯示愈靠近風機的位置，砂波紋的波長愈長。

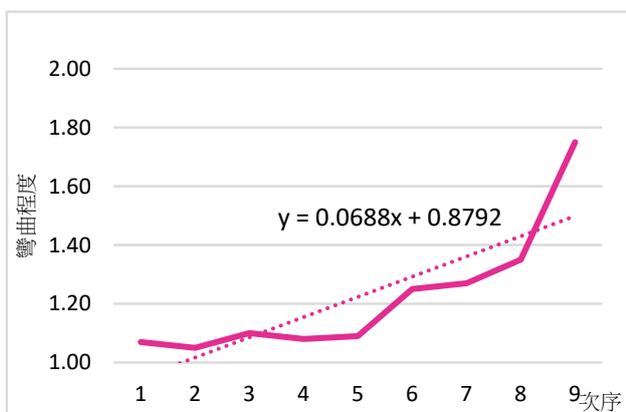


圖 34：距離 120 公分第 10 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度

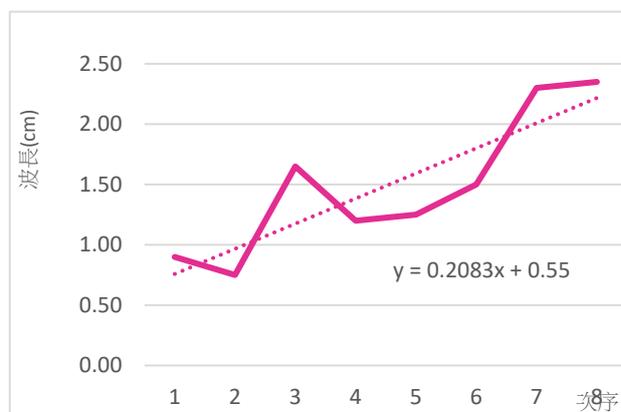


圖 35：距離 120 公分第 10 分鐘時，每一個波紋的波長

3. 第 15 分鐘的觀察結果：如圖 36、圖 37。

- (1) 彎曲程度：落在 1.0-1.5 之間，彎曲程度變化已經不大。
- (2) 波長：約在 0.5-2.3cm 之間，愈靠近風機的位置，砂波紋的波長愈長。

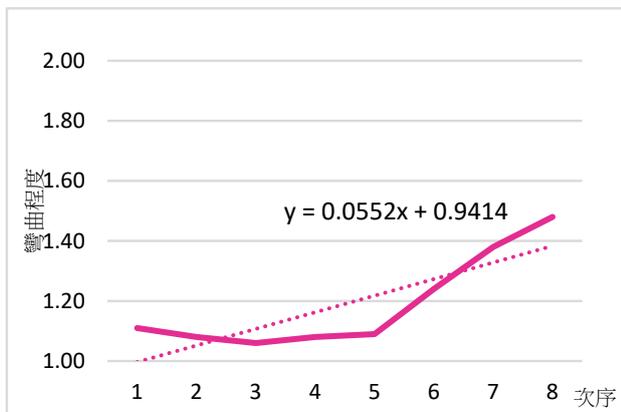


圖 36：距離 120 公分第 15 分鐘時，每一個波紋的彎曲程度

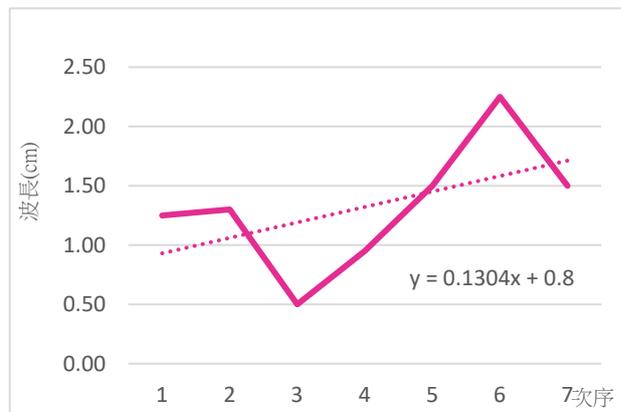


圖 37：距離 120 公分第 15 分鐘時，每一個波紋的波長

4. 第 20 分鐘的觀察結果：砂波紋增加許多，紋路紊亂。

- (1) 彎曲程度：因為 20 分鐘的為較多彎曲行砂波紋相連的情形，所以很難計算個別的彎曲程度，只以觀察形狀變化為主。而從圖 38 和圖 39 中發現從原本的 15 分鐘到 20 分鐘之間，增加了許多彎脊狀砂波紋且彼此相連連，整體而言彎曲程度比第 15 分鐘的小。
- (2) 波長：大約為 0.6-1.8cm，愈靠近風機的位置，砂波紋的波長愈長（圖 40）。

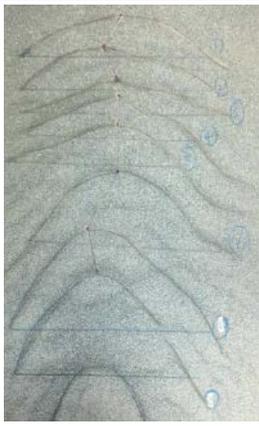


圖 38：距離 120 公分第 15 分鐘時，砂波紋的分布



圖 39：距離 120 公分第 20 分鐘時，砂波紋的分布



圖 40：距離 120 公分第 20 分鐘時，每一個波紋的波長

5. 綜合以上分析結果：

- (1) **彎曲程度**：當風機位在 120 公分處，砂波紋在風吹的第 10 分鐘時，生成明顯，彎曲度大；在第 20 分鐘時，砂波紋由彎脊狀慢慢轉成直脊狀，連接成一長條。
- (2) **波長**：砂波紋形成後，愈靠近風機的砂波紋波長愈長，但在第 20 分鐘時，砂波紋的波長縮短，排列的更密集，但與前面的數據比較，變化並不明顯。

小結：

1. 在風吹的過程中，先形成的砂波紋會往前移動，且逐漸改變彎曲程度；靠近風機處則不斷地有新的砂波紋產生，形成一個動態的歷程。
2. 當砂堆前緣的風速為 8.0m/s 時，砂波紋的彎曲程度與砂波紋和風機的距離有關，距離風機愈近，彎曲程度愈大。但波長變化，無一致趨勢，離風機最近和最遠處的砂波紋波長較長，距離中等位置的砂波紋波長較短。
3. 當砂堆前緣的風速為 7.5m/s 時，砂波紋的彎曲程度與砂波紋和風機的距離有關，距離風機愈近，彎曲程度愈大，波長也愈長。
4. 由於在較小風速的情況下，距離風機愈近的位置，砂波紋的波長愈長，顯示風速會影響砂波紋的波長，風速愈大的情況下，砂波紋的排列較為寬鬆，波長較長。
5. 觀察迎風側和背風側的砂波紋坡腳，發現離風機愈遠，迎風側的坡度愈小，但背風側的坡度愈大。以簡圖表示如下：

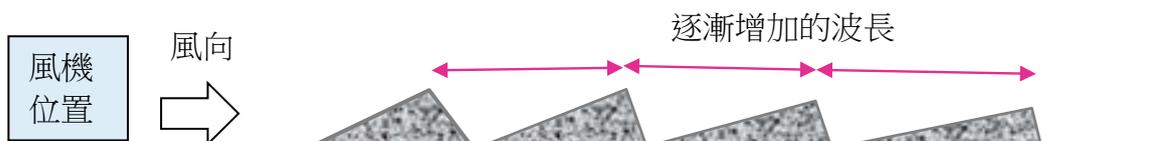


圖 41：砂波紋剖面的波長與坡度變化示意圖

三、 比較不同的風吹時間，砂波紋外形的變化情形

我們在木盒內鋪上厚度 3 公分的砂子，觀察在風機在 105 公分以及 120 公分的距離下，砂波紋形成的情形。每 5 分鐘觀察並記錄一次砂波紋的彎曲度和波長，共觀察 20 分鐘。

為了比較時間對砂波紋外形的影響，我們分別計算第 5 分鐘、10 分鐘、15 分鐘和第 20 分鐘砂波紋的彎曲程度和波峰間距離，求得每隔 5 分鐘的平均值。研究結果如下：

(一) 風機放置於砂堆前緣 105 公分距離

1. 彎曲程度：砂波紋的平均彎曲程度，在前 10 分鐘會隨著時間的增加而逐漸增加，之後就維持在趨近於 1.17 的狀況。
2. 波長：在前 10 分鐘，砂波紋的平均波長會緩慢的增加，之後就維持在 1.40 公分左右（實際波長為 $1.4 * 5.2 = 7.28$ 公分）。

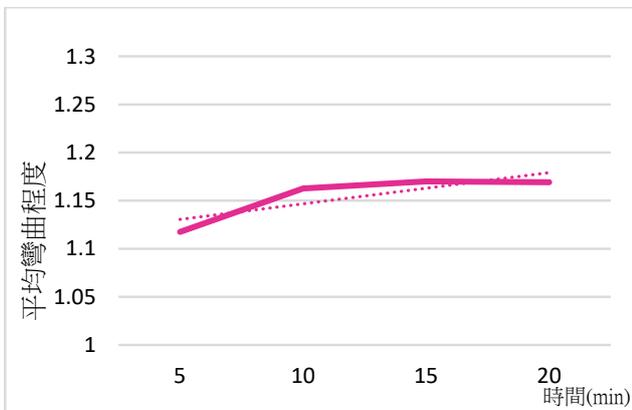


圖 42：距離 105 公分，每隔 5 分鐘砂波紋的平均彎曲程度變化情形

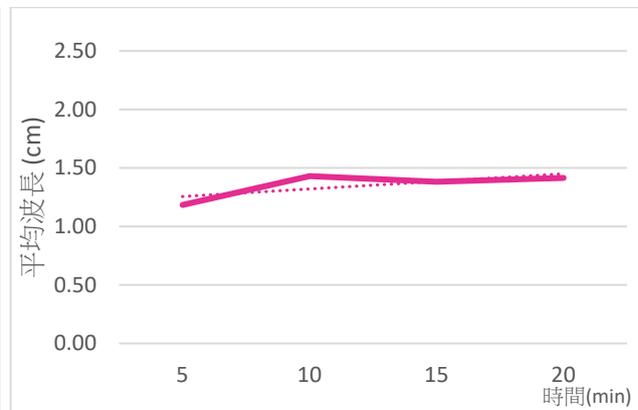


圖 43：距離 105 公分，每隔 5 分鐘砂波紋的波長變化情形

(二) 風機放置於砂堆前緣 120 公分距離

1. 彎曲程度：砂波紋的平均彎曲程度，在前 10 分鐘會隨著時間的增加而逐漸增加到 1.22，之後就下降到 1.19，目測第 20 分鐘的平均彎度更小。但因為波紋過於紊亂而無法測量彎曲程度。
2. 波長：在前 10 分鐘，砂波紋的平均波長會緩慢的增加到 1.49 公分，之後就就下降到 1.12 公分左右（實際波長為 $1.12 * 5.2 = 5.82$ 公分）。

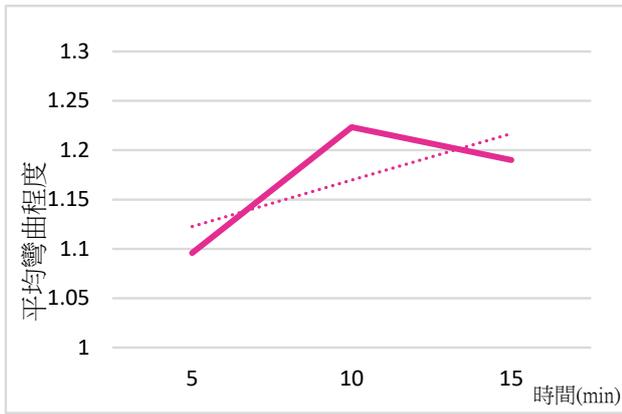


圖 44：距離 120 公分，每隔 5 分鐘砂波紋的平均彎曲程度變化情形

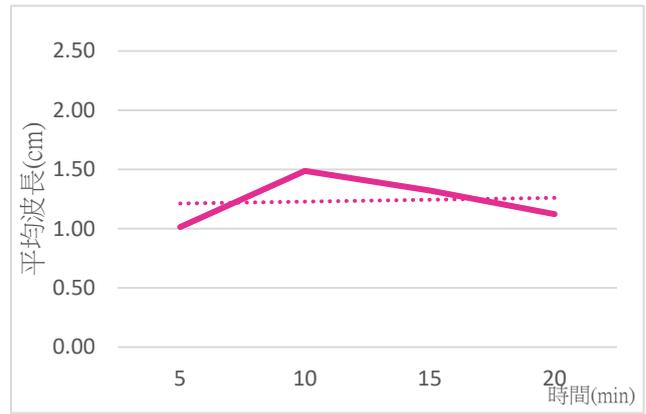


圖 45：距離 120 公分，每隔 5 分鐘砂波紋的波長變化情形

小結：

1. 在風機距離 105cm 時，砂堆前緣的風速 8.0m/s 的情況下，風吹的時間對彎曲程度和波長的影響不明顯。
2. 在風機距離 120cm 時，砂堆前緣的風速 7.5m/s 的情況下，啟動風機的第 20 分鐘，木盒後方開始有出現直脊狀砂波紋的跡象。這種狀況是在風速 8.0m/s 的實驗中沒有看見的。顯示直脊狀砂波紋會在風速較小的情況下產生。

四、比較不同風速對砂波紋形狀造成的影響

我們在木盒內鋪上厚度 3 公分的砂子，觀察在風機在 90cm(8.7 m/s)、105cm (8.0 m/s)、120cm (7.5 m/s)、135cm (7.4 m/s)以及 150cm (6.9 m/s)的距離下，砂波紋的形成情形。根據前述實驗的結果，我們以風吹之後的第 15 分鐘砂波紋的彎曲程度以及波長來討論風速的影響。

(一) 彎曲程度：

從圖 46 的分析結果發現，風機愈靠近砂堆時，形成的砂波紋彎曲度愈大。在風機距離 150 公分（風速 6.9 m/s）的情況下，僅能形成平直的直脊狀砂波紋（圖 47）。

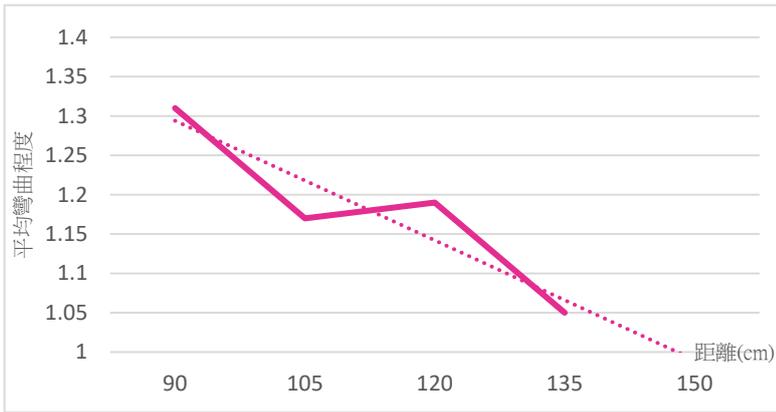


圖 46：風機在不同距離時，第 15 分鐘時砂波紋的平均彎曲程度差異



圖 47：風機在 150 公分處，第 15 分鐘時砂波紋的外形

(二) 波長：

從圖 48 的分析結果發現，風機愈靠近砂堆時，形成的砂波紋的波長愈長。彎曲度愈大。在風機距離 150 公分（風速 6.9 m/s）的情況下，形成的砂波紋平均波長僅有 0.7 公分（實際波長為 $0.7 * 5.2 = 3.64$ 公分）。

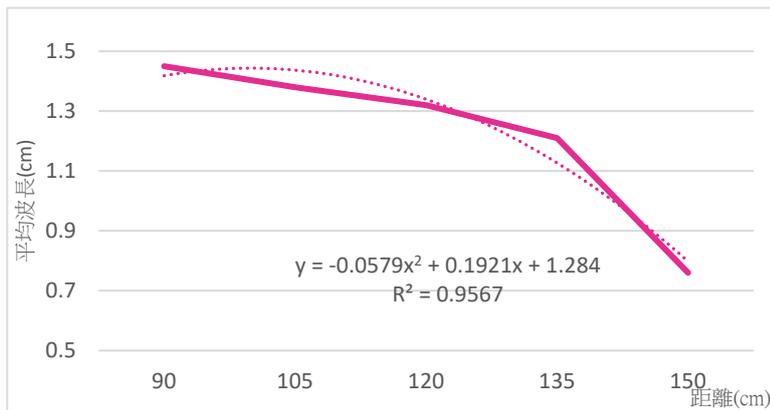


圖 48：風機在不同距離時，第 15 分鐘時砂波紋的平均波長的差異

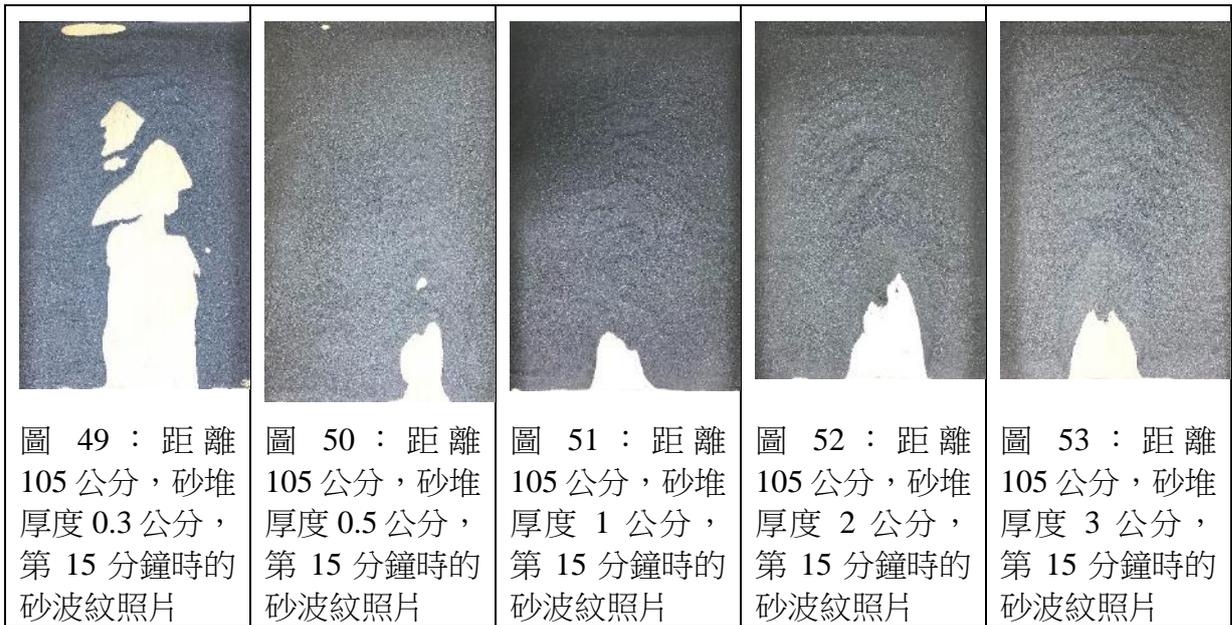
小結：

我們利用改變風機的距離來改變風速，發現當風速愈小時，產生的砂波紋在第 15 分鐘時彎曲程度和波長都愈小。

五、 不同的砂堆厚度對於砂波紋形成的影響

我們分別在木盒中鋪設了 3 公分、2 公分、1 公分、0.5 公分、0.3 公 5 種不同的厚度的砂子，觀察風機在 105 公分(8.0m/s)以及 120 公分(7.5m/s)的距離下，在不同厚度的砂堆上產生砂波紋的情形。

根據前述實驗的結果，我們以風吹之後的第 15 分鐘砂波紋的彎曲程度以及波長來討論風速的影響（圖 49～圖 53 為風機距離 105 公分的實驗照片）。



(一) 風機放置於砂堆前緣 105 公分距離

實驗結果發現當砂堆厚度僅有 0.3 公分時，幾乎所有的砂子都會被吹到木盒後方（圖 49），形成的砂波紋較難測量。測量結果如下：

1. 彎曲程度：在砂堆厚度 0.3 公分~2 公分之間，砂波紋的平均彎曲程度會隨著厚度的增加而增加，但在厚度 3 公分時，砂波紋的彎曲程度會減少到 1.17。
2. 波長：大致上看來，砂波紋的波長會隨砂堆厚度的增加而增加，大約在砂堆厚度 1 公分之後，砂波紋的平均波長就維持在 1.35 公分左右（實際波長為 $1.35 \times 5.2 = 7.02$ 公分）。

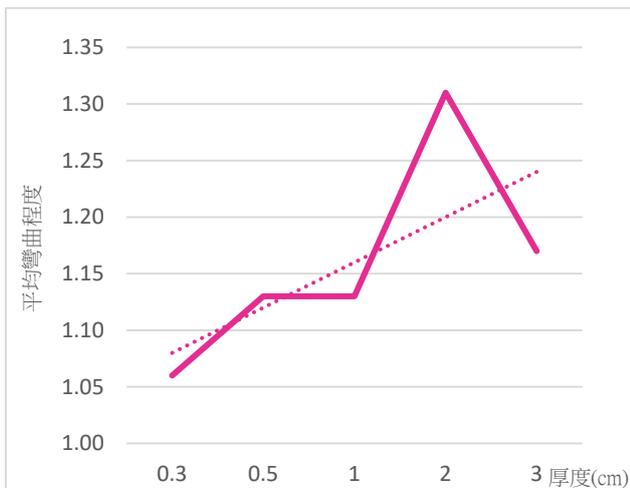


圖 54：距離 105 公分，不同砂堆厚度，第 15 分鐘時砂波紋的平均彎曲度的差異

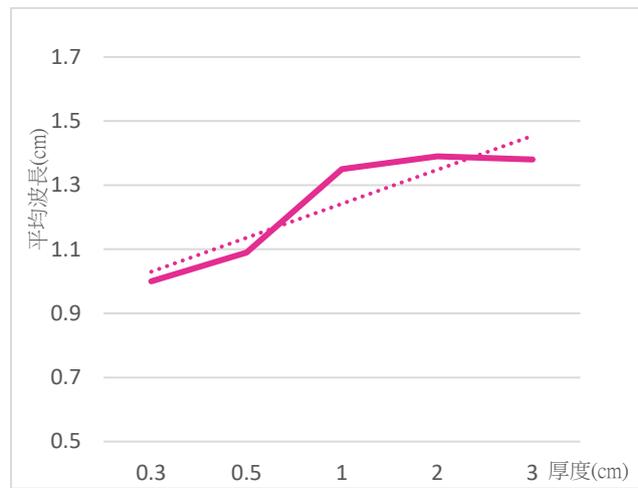


圖 55：距離 105 公分，不同砂堆厚度，第 15 分鐘時砂波紋的平均波長的變化

(二) 風機放置於砂堆前緣 120 公分距離

1. 彎曲程度：砂波紋的彎曲程度沒有隨厚度的變化有一致的趨勢。厚度 1 公分時，砂波紋的彎曲度最低，但在厚度在 1 公分~3 公分之間，砂波紋的彎曲程度有逐漸增加的趨勢。
2. 波長：大致上看來，砂波紋的波長會隨砂堆厚度的增加而增加。在砂堆厚度 3 公分時，砂波紋的平均波長有 1.30 公分左右（實際波長為 $1.30 \times 5.2 = 6.76$ 公分）。

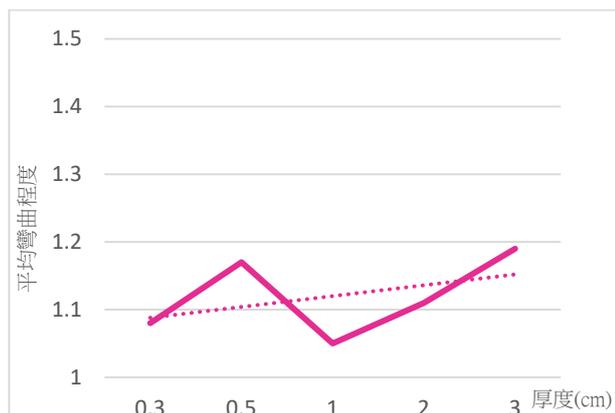


圖 56：距離 120 公分，不同砂堆厚度，第 15 分鐘時砂波紋的平均彎曲度的差異

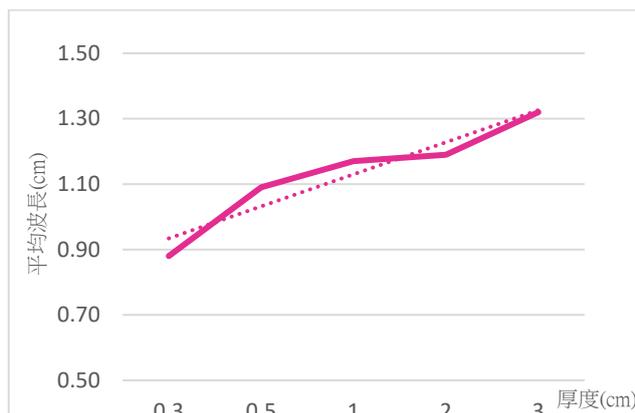


圖 57：距離 120 公分，不同砂堆厚度，第 15 分鐘時砂波紋的平均波長的變化

小結：

我們利用改變了砂堆的厚度，想要了解砂堆厚度對砂波紋形成的影響。結果發現砂堆的厚度對砂波紋波長的影響較明顯，厚度愈厚，砂波紋的波長愈長。然而，砂波紋的彎曲程度和砂堆厚度的關係，在風機距離不同時。卻沒有一致的變化趨勢。

六、比較不同顆粒大小的沉積物形成砂波紋的差異情形

我們以直徑約 1~2mm 的粗砂、直徑約 0.1mm~1mm 的中、細砂以及直徑約 0.06mm~0.1mm 的泥土進行實驗，來比較砂波紋在不同顆粒大小沉積物上形成的差異。

(一) 粗砂形成的砂波紋特徵

我們在木盒內鋪設厚度約 2 公分，直徑約 1~2mm 粗砂，並將風機放置在距離砂堆前緣 105 公分的位置。結果發現：

1. 風機啟動 5 分鐘之後，在靠近風機處形成一條長約 20 公分，有與風向平行的砂波紋（圖 58、圖 59），在靠近木盒後分形成 2 條長約 11 公分的直脊型砂波紋。
2. 直到風機啟動送風的 60 分鐘，木盒內的砂波紋幾乎沒有發生變化，與第 5 分鐘相類似（圖 60）。

3. 粗砂的實驗結果顯示，大顆粒的砂子較無法被 8.0m/s 的風力帶動，因此較難形成砂波紋。



圖 58：粗砂 5 分鐘觀察結果

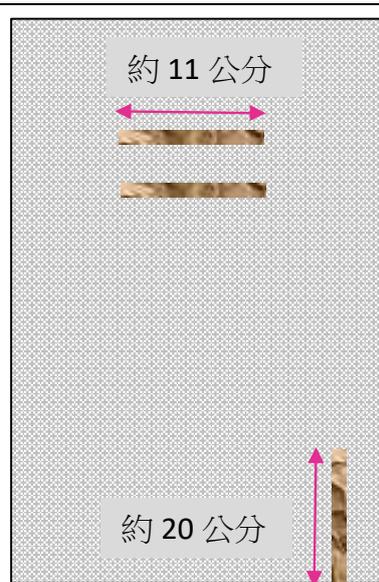


圖 59：粗砂 5 分鐘波紋位置示意圖



圖 60：粗砂 60 分鐘觀察結果

(二) 中、細砂形成的砂波紋特徵

對照由直徑約 0.1mm~1mm 的中、細砂所堆成的厚度 2 公分的砂堆實驗結果，幾乎為彎脊的砂波紋（圖 61），離風機愈遠，砂波紋的彎曲程度愈低。在本研究，中細砂在各種條件改變情況下所形成的砂波紋，皆沒有與風向平行的紋路。

(三) 泥土形成的砂波紋特徵

我們在木盒內鋪設厚度約 0.5 公分，直徑約 0.06mm~0.1mm 的泥土並將風機放置在距離砂堆前緣 150 公分。進行 5 分鐘的實驗，並每隔 1 分鐘觀察一次。結果發現：

1. 大量的泥土被風吹散。
2. 1 分鐘後，砂堆的中間出現由許多個細微的彎脊狀砂波紋連接成的大型彎脊狀砂波紋。大型彎脊狀砂波紋的彎曲度隨著距離風機愈遠而愈小。在砂堆的兩側則出現與風向平行的紋路（圖 62）。
3. 隨著風機啟動的時間愈久，砂堆中間細小的彎脊狀砂波紋愈密集，但整體還是

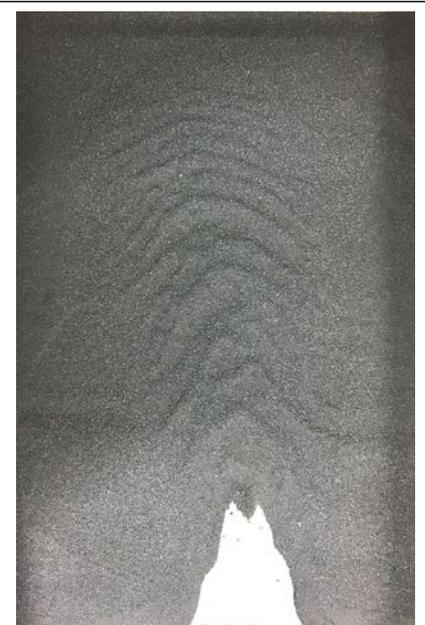
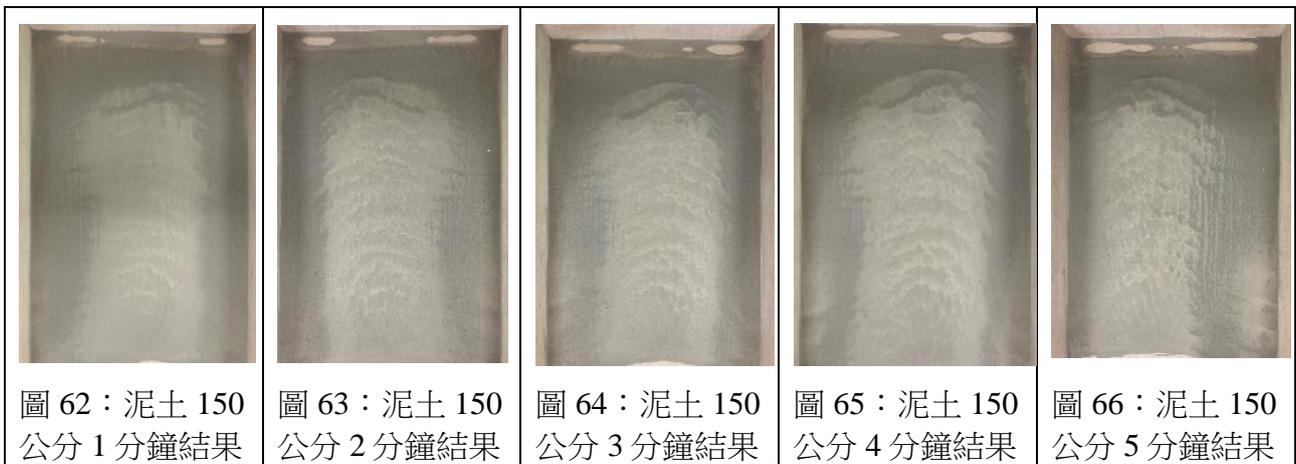


圖 61：中細砂 5 分鐘觀察結果

會形成波長固定的大型砂波紋（圖 63～圖 66）。

- 前 3 分鐘，砂波紋的波長較為固定，約為 5.5 公分。在第 4 分鐘時，砂波紋的波長突然增加為 8.1 公分，第 5 分鐘時平均波長又減少成 6.2 公分左右。



因為風機在 150 公分處，所吹出的風明顯對泥土太強，以至於大量泥土被吹散。我們將風機調整放置在距離砂堆前緣 210 公分的位置，重新進行一次實驗。但因許多泥土已經被風吹散，因此第二次實驗的泥土厚度約只有 0.3 公分。由圖 67～圖 71 的實驗結果可以知道：

- 因為鋪設的泥土較少，木盒中間出現空洞。
- 砂堆中間位置有許多小型彎脊狀砂波紋連綿集結成大型砂波紋，但砂波紋不如風機在 150 公分位置時明顯。
- 砂波紋較為平直，彎曲度較低。砂堆兩側平行風向的砂波紋較不明顯，且占據範圍較小。
- 隨著風機啟動的時間愈久，砂堆中間細小的彎脊狀砂波紋愈密集，但整體還是會形成波長固定的大型砂波紋。
- 風機在剛啟動的 1 分鐘，砂波紋約有 6.5 公分，隨後逐漸下降到 4.3 公分。可以知道風機距離在 210 公分時，形成的砂波紋波長平均略短於風機在 150 公分的狀態。且隨著風機啟動的時間愈久，砂波紋的波長愈短。

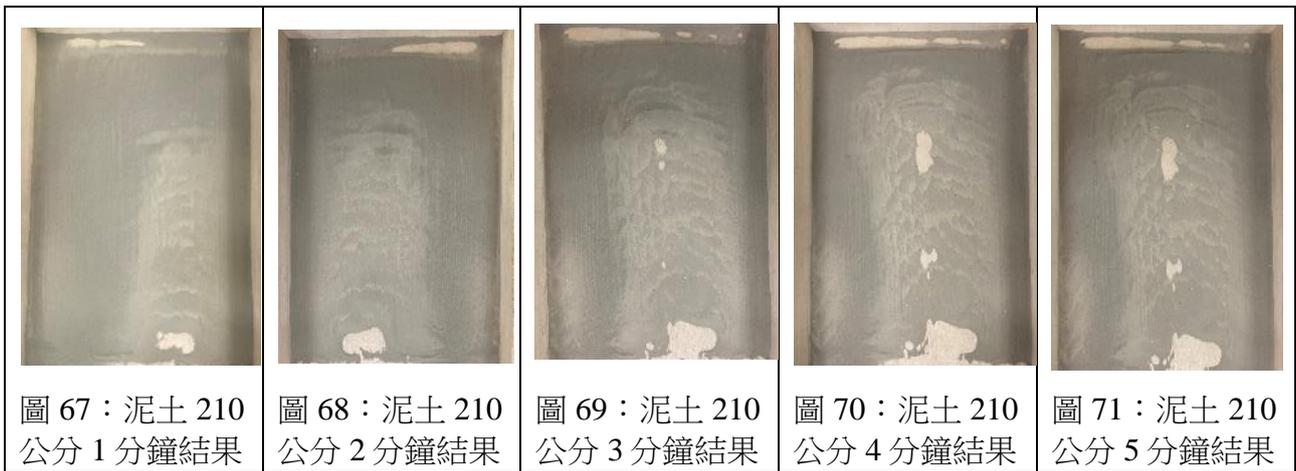


圖 67：泥土 210 公分 1 分鐘結果

圖 68：泥土 210 公分 2 分鐘結果

圖 69：泥土 210 公分 3 分鐘結果

圖 70：泥土 210 公分 4 分鐘結果

圖 71：泥土 210 公分 5 分鐘結果

小結：

1. 比較不同顆粒大小的砂土所形成的砂波紋，可以發現顆粒的大小會影響砂波紋的外觀。顆粒小的泥土形成的砂波紋較為小型，彎曲度也較大；粗砂無法形成彎脊狀的砂波紋，僅有直脊狀砂波紋及平行風向的縱向砂波紋。
2. 在泥土進行實驗的結果中，可以發現木盒的兩側有平行風向的縱向砂波紋（圖 72，紅色框處），應該是風機吹出的風撞擊木盒後方反彈的風，沿著木盒兩側吹回所形成（圖 72，藍色箭頭）。可以推測，風速較弱的風才能在砂堆上形成縱向的波紋。

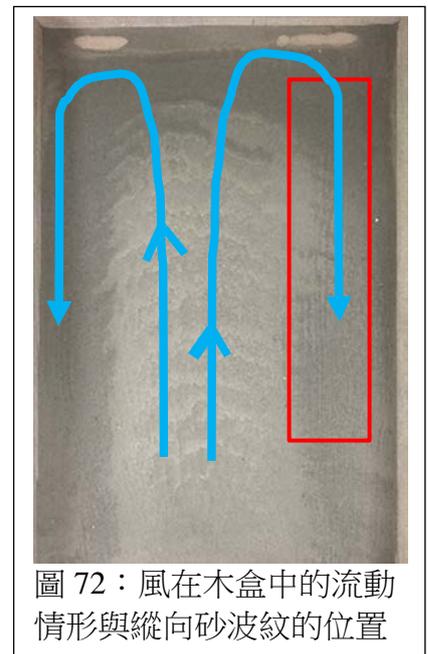


圖 72：風在木盒中的流動情形與縱向砂波紋的位置

伍、討論

一、實驗設計的限制：

(一) 實際的風速很弱，形成砂波紋需要較長的時間

根據我們第一次在海邊實地測量的結果，得知海邊的風速約在 2 m/s~3 m/s 之間。因此，剛開始進行實驗時，我們分別以吹風機和電風扇透過風洞模擬出實際的風速。實驗結果卻發現，吹風機和電風扇啟動了 60 分鐘之後，砂堆上的砂子卻沒有明顯變化。為了考慮實驗的時間與效益，我們改用工業用風機模擬出較大的風速，但這樣的改變也可能造成實驗結果推論上的誤差。

(二) 海邊的風和實驗室中用風機吹出來的風有很大的不同，造成實驗結果的差異。

我們發現即使在實驗室中模仿海邊的平均風速(1m/s~3m/s)，長時間吹向木盒中的砂堆。在經過 24 小時之後，砂堆上仍無法形成類似海邊的砂波紋。



圖 73：實驗室中以風速 2m/吹 24 小時的結果：只能看到不明顯的直脊狀砂波紋



圖 74：相同風速下，海邊的砂波紋

我們討論了兩者之間差異的原因，包括：

1. 海邊的風是全部近地面的空氣在流動，實驗室製造的風只有在高度 20 公分的砂堆上方附近流動。
2. 海邊的風時弱時強，有時會出現較強的風速，而實驗室製造的風速幾乎維持穩定。
3. 海邊的風有時會出現與地面較大夾角的風向，可能有助於砂子產生跳躍遷移。
4. 海邊的風會攜帶的水氣、鹽分以及細砂顆粒，當這些物質作用於沙灘上時，更容易造成砂子移動。

因此，我們的實驗結果只能比較不同條件下砂波紋形成的差異，無法真正對比大自然界的狀況。

(三) 實際的沙灘很寬廣，風也不會受到木盒邊緣的限制

在實驗室進行實驗時，我們為了不讓風把砂子吹散，所以將砂子放在三面包圍的木盒裡面進行實驗。但這樣的實驗裝置也導致了風吹到木盒後方時，產生反射和亂流，使得離風機較遠的木盒後方和兩側形成不規則的砂波紋，造成實驗測量的誤差。因此我們在計算砂波紋的彎曲度和波長時，會排除木盒後方的砂波紋。

(四) 泥土的顆粒性質和砂粒不同，砂波紋的差異不能僅用顆粒大小來解釋

我們以實驗室中本來就有的粗砂、中、細砂和泥土來進行實驗，比較顆粒大小不同形成砂波紋的差異。雖然實驗結果支持，顆粒的大小差異對砂波紋的形成有明顯的影響。但是，後來跟老師討論的結果知道，泥土的組成成分和砂子差異很大，外型也

比較偏向扁平狀，所以在受風吹襲時，泥土顆粒彼此間的黏滯性較高，亦可能是導致細小砂波紋的原因。

二、實地探查的發現

(一) 砂波紋有不同的形式

為了探討砂波紋，我們在旗津和西子灣的海灘上進行探查和測量，才發現原來乍看之下，規則有序的砂波紋，卻有這不同形式的外形：直脊狀、彎脊狀和蛇狀。這些砂波紋的兩側也有著像砂丘一樣的不同坡度：迎風坡面較平緩，背風坡面較陡峭。同一個砂波紋上的的砂子顆粒大小也有著不同的差異，在砂波紋頂峰的砂子顆粒會比兩側坡面上的砂子顆粒大。

旗津和西子灣的砂波紋走向和海岸線的關係也不相同，旗津海岸公園沙灘的砂波紋走向是垂直海岸線的，而西子灣海水浴場的砂波紋走向則平行海岸線，顯示砂波紋與當地盛行的風向有關，與海岸線、波浪的方向無關。

(二) 砂波紋的形成需要一段較長的時間

為了觀察砂波紋的形成，我們趴在海邊進行觀測，也利用相機進行縮時攝影，想要了解砂子在沙灘上受風吹動產生移動或跳動的過程。但是砂子在風速 2 m/s~3 m/s 的情況下，可以觀察到砂子跳動和蠕移的現象，但形成規則砂波紋的速度十分緩慢，以至於縮時攝影進行紀錄。

然而，從觀察到海陸風變化導致的砂波紋方向變化，我們也可推知海邊的砂波紋形成應該是在半天之內就可以完成的。



圖 75：趴在沙灘上實際觀察砂子的移動



圖 76：以相機拍攝砂粒的移動

(三) 風向交替時，可以明顯看出二個不同方向的砂波紋

我們在西子灣海水浴場測量砂波紋時，一開始發現當時的風向和沙灘上大多數砂波紋的方向並不一致風向，砂波紋的陡坡異常的位在迎風面。仔細觀察砂波紋後，

才發現，沙灘上有二個方向完成相反的砂波紋，其中一組較小較不明顯，但組成顆粒較粗的砂波紋與當時風向較為相符。

後來經由中央氣象局的風向紀錄（表 4）才知道當日抵達西子灣時，風向正開始由偏北風轉為偏南風。據此推測我們看到的砂波紋應該大部分都是吹偏北風時的夜晚形成的，而其中的小砂波紋才是正在當時吹南風時形成的。

觀測時間(hour)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
風速(m/s)	0.9	1.9	1.3	1.4	1.9	1.8	1.5	1.9	1.3	2.0	3.0	3.4
風向(360degree)	47	48	51	15	37	53	53	58	154	169	254	275

三、砂波紋會不斷的前進和演化發展

- (一) 我們在實驗過程中，每隔 5 分鐘對木盒內砂波紋進行觀察並拍攝，結果發現砂波紋形成後，會不斷前進（遠離風機）。同一個砂波紋在剛形成時，會隨著時間前進，且彎曲度變大（峰頂移動較兩側快）；但隨後砂波紋兩側也會前進，砂波紋會變得更寬廣，彎曲度就減少了，慢慢演化成接近直脊狀的砂波紋。
- (二) 我們也發現風速的強弱不僅會影響砂波紋向前移動的速度，也會影響砂波紋外形演化的快慢。同樣條件下，風速較弱時，砂波紋外形演化的速度愈慢。
- (三) 因為進行實驗時，風機一啟動，木盒裡面就會塵土飛揚，以至於無法錄製完整的影片支持我們以 5 分鐘為間隔的觀察結果，但由美國科羅拉多大學所拍攝的短片中，可以知道砂波紋的確在風吹動的情況下，會不斷前進。

四、砂波紋研究的應用

科學家發現火星表面有許多砂波紋，而這些砂波紋經過長久的時間後可能膠結固化成岩石，記錄下了火星早期的大氣流動訊息。也有一些文獻從研究阿根廷的「礫石巨波」來推測火星「橫向風成脊」的條件；科學家也從火星岩石中發現的砂波紋之波長相較於現在火星上的砂波紋還短，推測火星以前的大氣層比現在厚。

我們的實驗以風速、風吹時間、砂堆厚度、顆粒大小等因素做為變因，探討這些變因對砂波紋彎曲度和波長的變化的影響。希望能建立相對應的指標應用於行星大氣與古氣候的研究。

陸、結論

本研究從實際的探查旗津、西子灣沙灘上的砂波紋開始，設計一系列的實驗，探討影響沙灘上砂波紋的形成因素。研究結果說明如下：

一、旗津和西子灣沙灘上的砂波紋外型相似，且與風速的關係不明顯

根據我們的實查結果發現旗津和西子灣海灘的砂波紋彎曲度約在 1.00~1.25 之間，波長約在 6 公分-16 公分，兩地的砂波紋彎曲度與波長都相當接近。推測是因為兩地的砂子顆粒大小接近，且我們前往測量時的風速也都大致相當。

我們前往西子灣海水浴場進行觀測時，發現當清晨風向改變之際，砂波紋會按照新的風向重新排列堆積。顯示砂波紋並不是固定不動的，也不是需要很漫長的時間才會形成。

二、在相同條件下，距離風機愈近的砂波紋彎曲度和波長都較大

實驗結果指出：1.風機距離 105cm 時，距離風機愈近，砂波紋的彎曲程度愈大。離風機最近和最遠處的砂波紋波長較長，距離中等位置的砂波紋波長較短；2.在風機距離 120cm 時，和波長都與離風機的遠近有關，距離風機愈近，砂波紋的彎曲程度和波長都愈大。由於風速太強時，遠離風機的木盒後方，亦受反彈風向的干擾，所以我們選擇忽略遠離風機的數據。

而事實上，離風機遠近反映的是該位置的風速。離風機近的砂堆，受到的風力就愈強，砂波紋的彎曲度和波長也隨之愈大。

三、砂波紋的外形幾乎不隨風吹時間而改變

將風機分別放在距離砂堆前緣 105 公分和 120 公分的位置，記錄不同風吹時間，砂波紋外形的變化，實驗結果指出，儘管風速不同，砂波紋一旦形成後，彎曲度和波長就幾乎固定了，風吹時間的長短對砂波紋的外形影響並不明顯。

四、風速對砂波紋外形影響明顯，風速較小時，砂波紋愈平直，波長也較小

我們利用改變風機的距離來改變風速，比較第 15 分鐘時所形成的砂波紋的外形。實驗結果發現當風速愈小時，砂波紋的彎曲程度和波長也會愈小。在風速 6.9m/s 的情況下，僅能形成平直外形的砂波紋，波長也僅平均約 3.64 公分。

五、砂堆厚度愈厚，形成的波長較長；但砂堆厚度對砂波紋彎曲程度的影響較無一致的趨勢

我們原本假設砂堆的厚度會影響砂波紋的外形，希望能藉由砂堆厚度的變化，製作出不同形式的砂波紋。實驗結果顯示，砂堆的厚度的確會影響砂波紋的波長。砂堆愈厚，

砂波紋的波長愈長。

從實際在旗津和西子灣沙灘測量的結果也可以發現，兩地的平均風速都只在 2m/s~3m/s 之間，但砂波紋的波長都約在 10 公分上下。對比實驗使用的風速較大和測量到的波長卻較小，可以知道砂堆的厚度是影響砂波紋波長的關鍵因素之一。

但實驗結果也顯示，砂波紋的彎曲度與砂堆厚度的關係較難預測。在風速較強的情況下，愈薄的砂堆，砂波紋的彎曲程度也會愈小。但如果在風速較弱的情況下，砂波紋的彎曲程度與砂堆的厚度關係就較不明顯。

六、砂波紋較難在顆粒大的粗砂沉積物中形成，中細砂和泥土等級的沉積物顆粒才容易形成砂波紋

七、當風速相對於沉積物顆粒極小時，有機會形成較不明顯的縱向砂波紋

砂波紋一般都出現在沙灘和砂丘上，所以我們想進一步了解當風吹過粗砂顆粒和細砂顆粒，以及泥土顆粒時，形成砂波紋的差異。實驗結果指出，粗砂顆粒因為較大，不容易形成砂波紋，僅在離風機較近處形成一條平行風向的縱向砂波紋以及遠離風機處的直脊狀砂波紋。

顆粒較小的泥土，也能和細砂一樣形成砂波紋，但泥土所形成的砂波紋較為小型而紊亂。雖然乍看之下，也是具有規則的排列，但每一個砂波紋，其實都是許多細小的彎脊狀砂波紋連續排列而成。泥土所形成的砂波紋，大致看來也會因為風速的高低而影響到波峰間的距離。風速愈慢，波峰間的距離會愈短。

此外，由粗砂砂堆的縱向波紋和泥土堆兩側型的縱向波紋，亦能推測在風速相對微弱的沙灘上，應能形成平行風向的縱向波紋。但是，我們在西子灣和旗津的沙灘上，並沒有發現縱向的砂波紋。

八、綜合本研究各項變因的研究結果，我們認為要在實驗室中製造排列整齊、紋路明顯的砂波紋，需要以下的條件配合：

- (一) 以中、細砂製作砂堆
- (二) 砂堆厚度至少要 2 公分
- (三) 風速大約設定在 7.5m/s~8.0m/s 之間
- (四) 風吹的時間大約是 15 分鐘

柒、研究省思與展望

經過這次的科展研究歷程，我們不僅學會了如何尋找文獻、閱讀資料，也學會了設計實驗，以及統整實驗數據，撰寫報告。更重要的是，我們了解到科學研究需要長時間的耐心與毅力才能完成，在面對許多難以控制的變因時，我們必須學會一步一步排除，並尋找其中的規律。我們也逐步學會針對實驗數據進行討論，並形成下一個階段的研究設計，這都是難得的體驗和成長機會。

這一次，我們剛開始在查詢文獻資料時缺乏謹慎的態度，以至於把沙灘上的「砂波紋」，誤以為是地理課本曾經看過的「砂丘」，以至於文獻的閱讀和整理一直在「砂丘」的方向打轉。直到部分的實驗結果開始分析，發現結果和文獻中「砂丘」的特徵不同，我們才發現自己犯了很大的錯誤。此時，我們也發現有關「砂波紋(sand ripple)」的介紹，在台灣網站的資料真的很少，只好逼自己去閱讀英文的網站資料和文章。

雖然我們從國二上學期一開學就開始進行這一次的科學研究，但因為不斷摸索修正，花費了許多時間，以至於有些想做的變因來不及進行。例如「障礙物對砂波紋形成的干擾」、「砂波紋隨時間的移動和演化情形」，希望未來能有機會逐步地把相關的研究完成。

捌、主要參考文獻

1. 砂丘、砂波紋。2022年3月11日取自 <https://kknews.cc/travel/rrgppb4.html>
2. 砂波紋。2022年3月11日取自百度百科
<https://baike.baidu.hk/item/%E6%B2%99%E6%B3%A2%E7%B4%8B/5038667>
3. 鼓山測站日報表。2022年3月18日取自中央氣象局網站 <https://reurl.cc/qOAxWE>
4. *Bedforms: ripples and dunes*. 2022年3月11日取自
<https://geologyistheway.com/sedimentary/bedforms-ripple-marks-and-dunes/>
5. *Ripple marks*. 2022年3月11日取自 Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_marks#cite_note-Gary-3
6. *Sedimentology and Stratigraphy*. 2022年3月11日取自
<https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>
7. University of Colorado Boulder. *Sand Ripples*. 2022年3月11日取自
<https://www.youtube.com/watch?v=UUourQWv5KE>

【評語】 030507

本研究實驗設計及操作用心，觀察仔細，針對研究目的設計實驗並清楚表達成果，精神可嘉。建議於結果圖表中的資料分佈應列或加列相關係數，以評斷是否有相關性，另可考慮邊界帶來的擾流效應。

作品簡報

組別：國 中 組
科別：地球科學科
編號： **030507**

風砂共舞



前言

1. 砂波紋是一種受風的強度和砂丘頂峰顆粒粒徑影響所形成的微地形。
2. 砂波紋的峰頂軸向會垂直於風向，因風力的作用會形成各種不同的紋路變化，波長大約幾公分～幾十公分，波高約在幾公分內。
3. 需要哪些因素的配合，才能形成美麗的砂波紋？



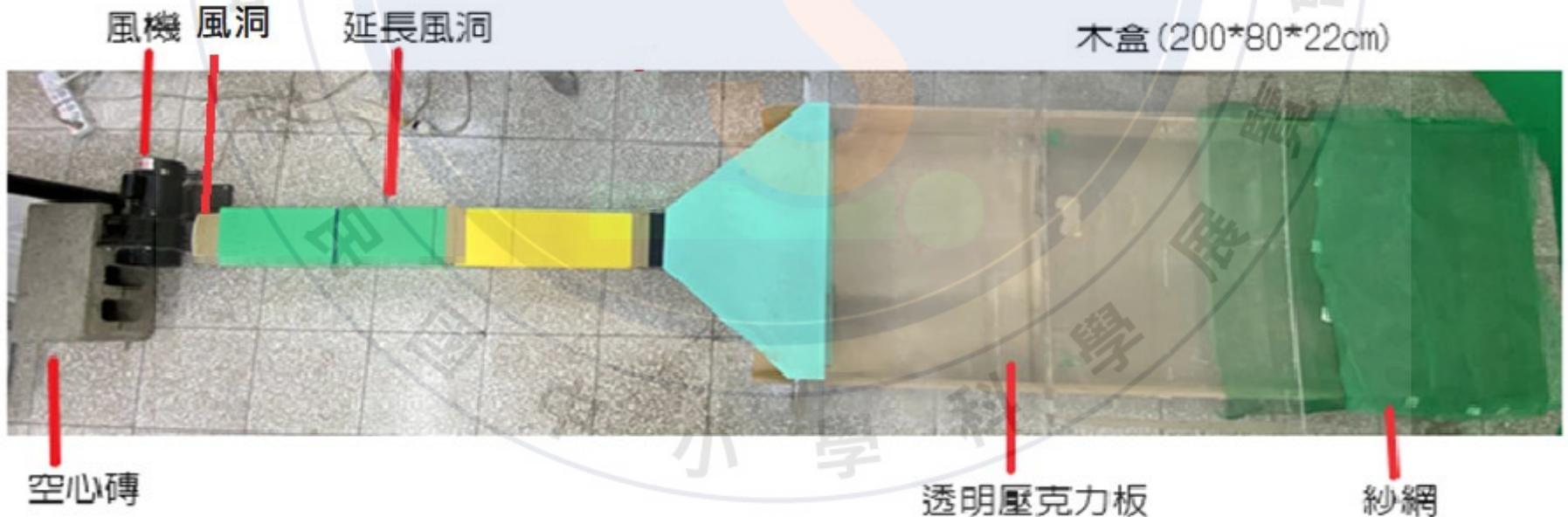
▲旗津海岸公園的砂波紋



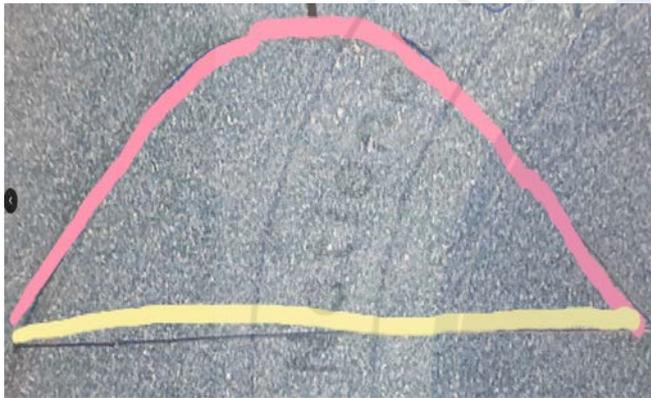
▲西子灣海水浴場的砂波紋

研究問題

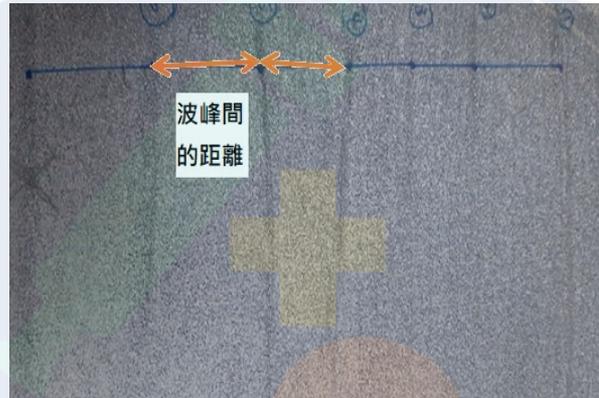
- 一、海邊的沙灘上，砂波紋的波長和外形與風速的關係為何？
- 二、在相同條件下，不同位置的砂波紋外形有何差異？
- 三、風吹時間對砂波紋外形的變化影響為何？
- 四、風速對砂波紋形狀造成的影響為何？
- 五、砂堆厚度對砂波紋形狀的影響為何？
- 六、不同顆粒大小的沉積物形成砂波紋的差異情形為何？



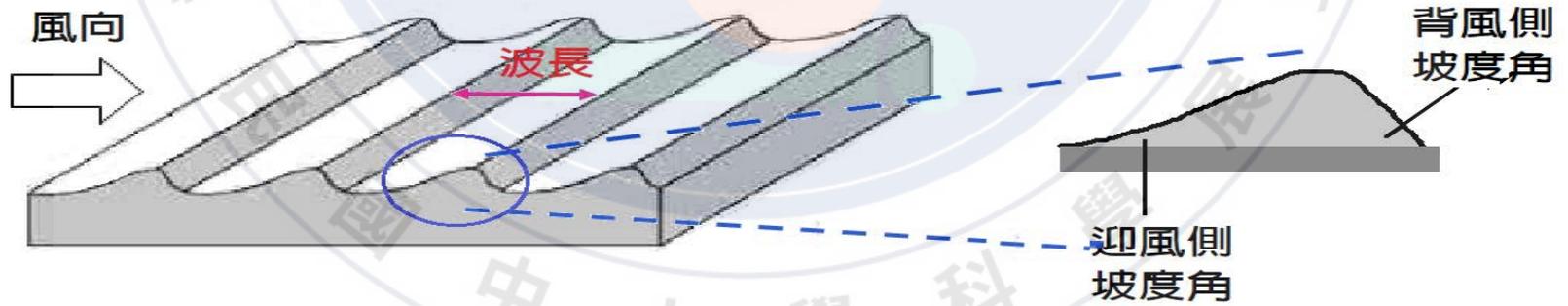
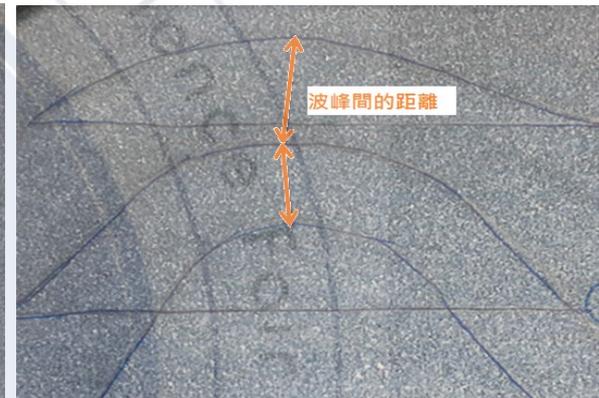
研究方法



彎曲程度計算法的示意圖



波長測量示意圖



(原圖修改自<https://kknews.cc/zh-cn/news/6bq5bzm.html>)

研究結果

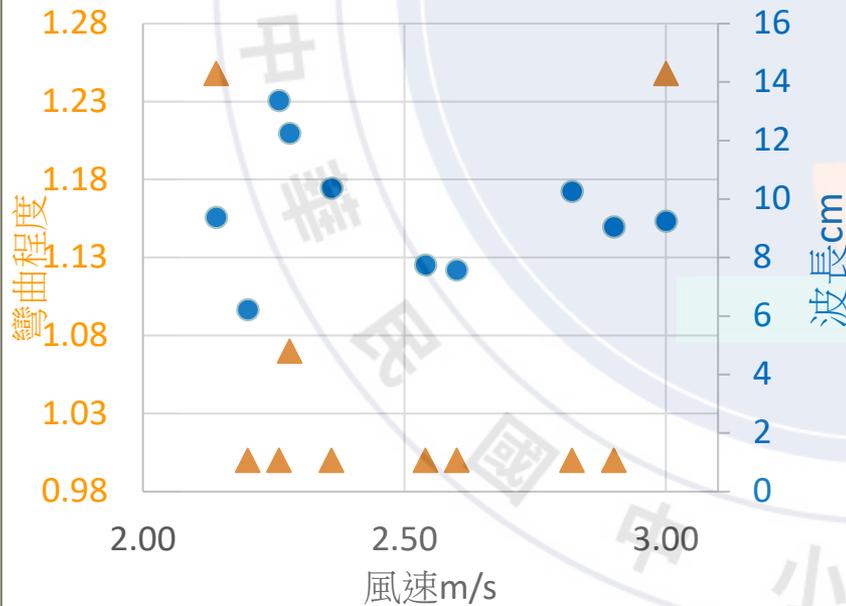
沙灘上砂波紋的外形與風速的關係

1. 觀察旗津的砂波紋。
2. 討論可能影響砂波紋外形的因素，形成可測試的研究問題。

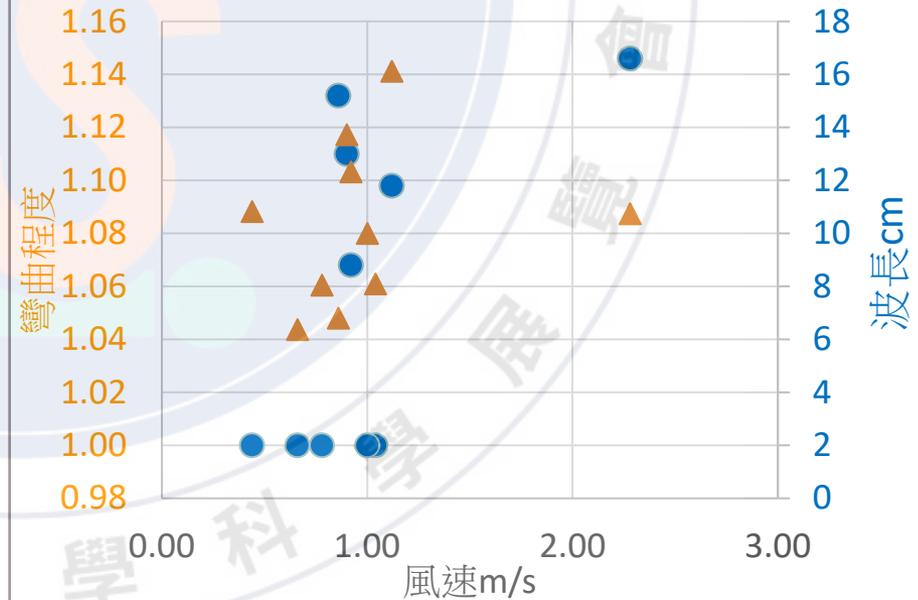
1. 調查旗津海灘砂波紋分布狀況。
2. 測量砂波紋的波長、彎曲度以及風速等數據。

1. 觀察西子灣海水浴場附近砂波紋與風向、砂子顆粒大小的關係。
2. 測量砂波紋的波長、彎曲度以及風速等數據。

旗津沙灘砂波紋調查結果



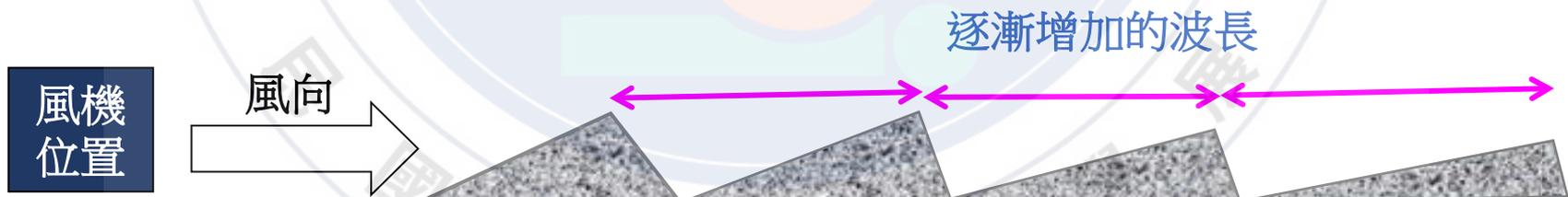
西子灣沙灘砂波紋調查結果



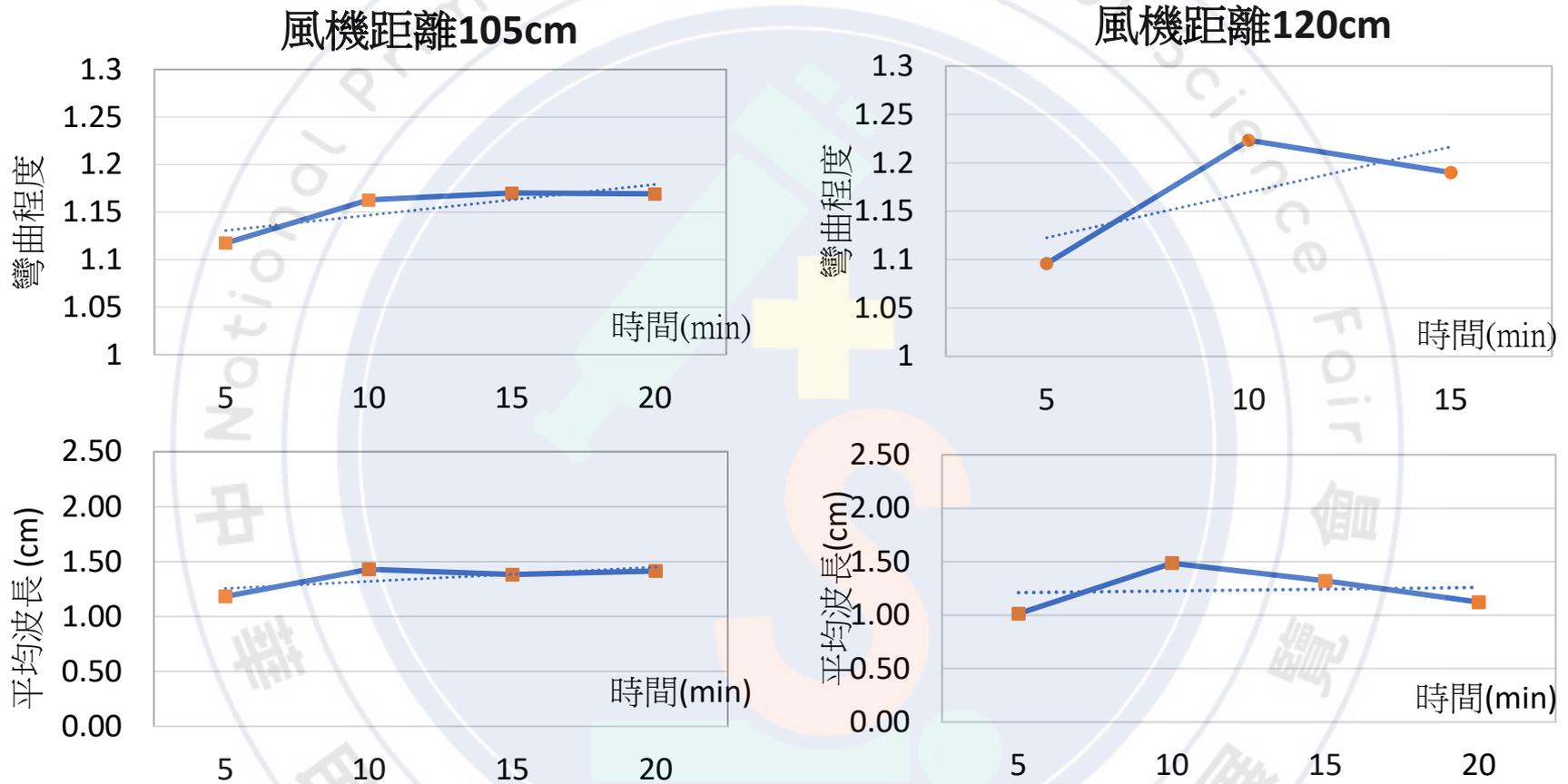
研究結果

不同位置形成的砂波紋差異情形

- 動態的歷程：先形成的砂波紋會往前移動，且逐漸改變彎曲程度；靠近風機處則不斷地有新的砂波紋產生。
- 砂波紋的彎曲程度與砂波紋和風機的距離有關：距離風機愈近，彎曲程度愈大，波長也愈長。
- 離風機愈遠，迎風側的坡度愈小，但背風側的坡度愈大。



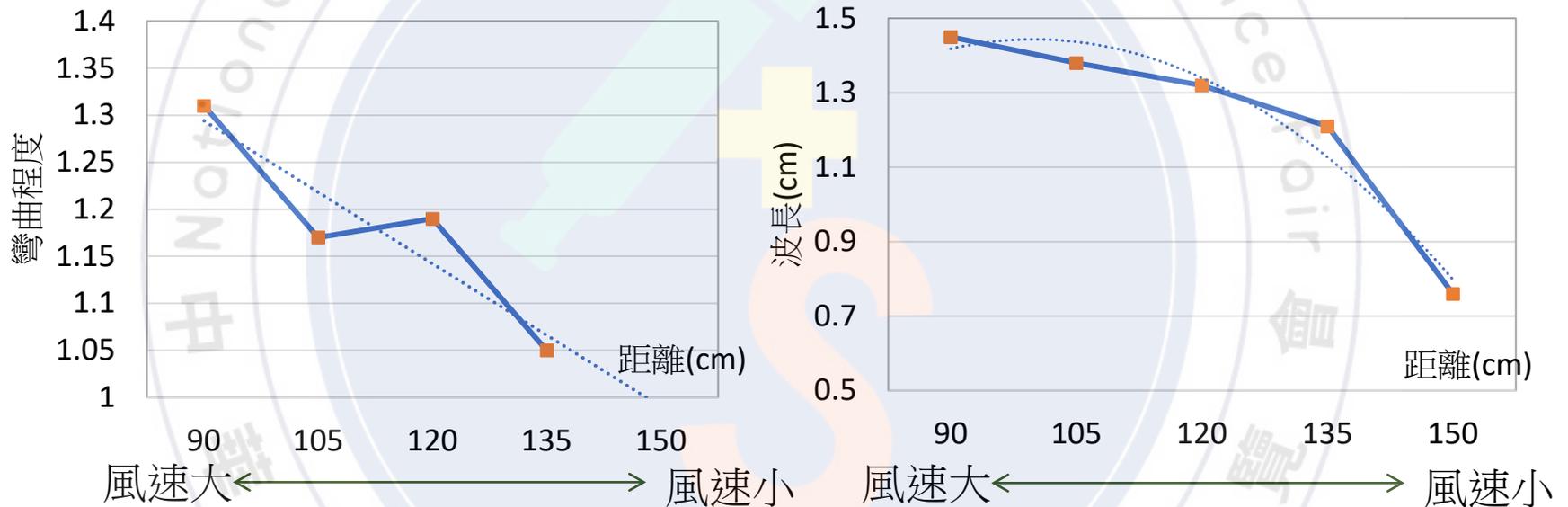
研究結果 不同的風吹時間，砂波紋外形的變化



- ❑ 風機距離105cm時，砂堆前緣的風速8.0m/s：風吹的時間對彎曲程度和波長影響不明顯。
- ❑ 風機距離120cm，風速7.5m/s：啟動風機的第20分鐘，木盒後方開始有出現直脊狀砂波紋的跡象。

研究結果 不同風速對砂波紋形狀造成的影響

第15分鐘末



□ 風速愈小時，產生的砂波紋在第15分鐘末時，彎曲程度和波長都愈小。

研究結果

不同沙堆厚度對於砂波紋的影響



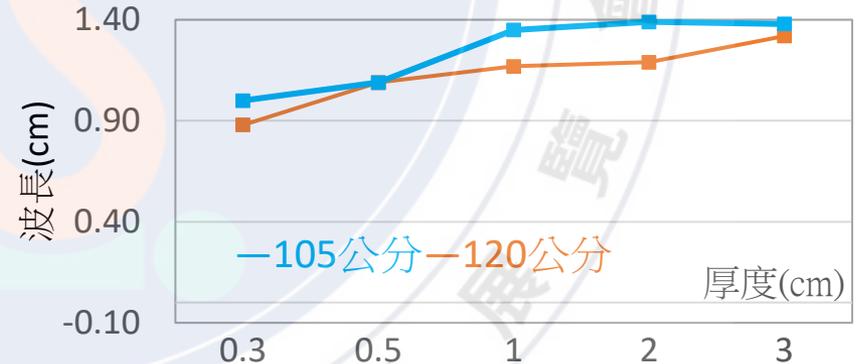
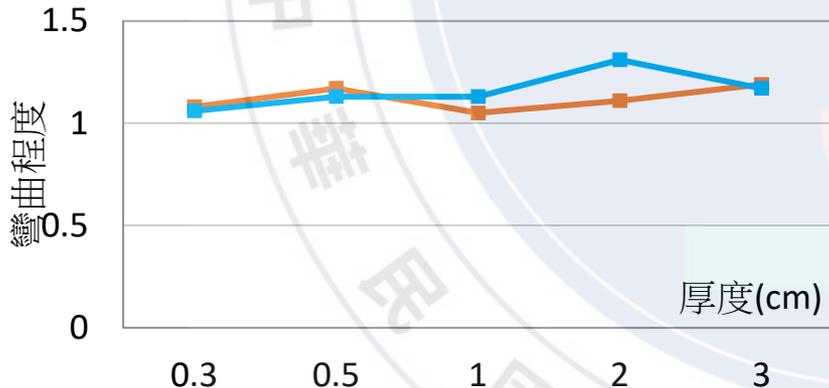
砂堆厚0.3公分

砂堆厚0.5公分

砂堆厚1公分

砂堆厚2公分

砂堆厚3公分



- 砂堆的厚度對砂波紋波長的影響較明顯，厚度愈厚，砂波紋的波長愈長。然而，砂波紋的彎曲程度和砂堆厚度的關係，沒有一致的變化趨勢。

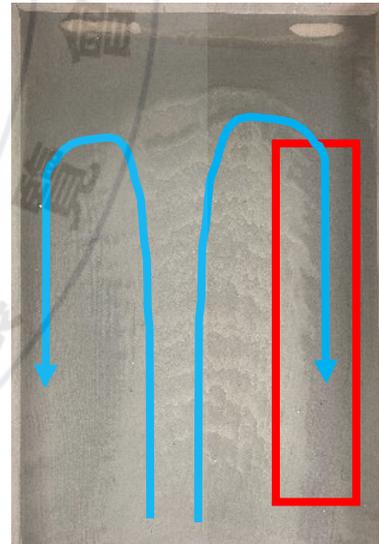
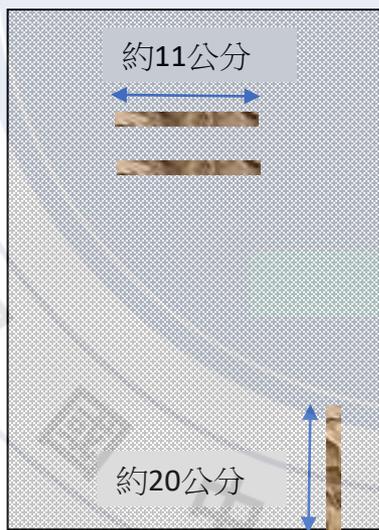
研究結果 不同顆粒大小的沉積物形成砂波紋的差異

- 顆粒的大小會影響砂波紋的外觀。顆粒小的泥土形成的砂波紋較為小型，彎曲度也較大；粗砂無法形成彎脊狀的砂波紋，僅有直脊狀砂波紋及平行風向的縱向砂波紋。
- 在泥土進行實驗的結果中，可以發現木盒的兩側有平行風向的縱向砂波紋，應該是風機吹出的風撞擊木盒後方反彈的風，沿著木盒兩側吹回所形成。可以推測，風速較弱的風才能在砂堆上形成縱向的波紋。

大顆粒的砂子較無法被8.0m/s 的風力帶動，因此較難形成砂波紋。

離風機愈遠，砂波紋的彎曲程度愈低。

木盒的兩側有平行風向的縱向砂波紋



討論

一、實驗設計的限制

1. 海邊的風和實驗室中用風機吹出來的風有很大的不同，造成實驗結果的差異。
2. 實際的沙灘很寬廣，風不會受到木盒邊緣的限制。
3. 泥土的顆粒性質和砂粒不同，砂波紋的差異不能僅用顆粒大小來解釋。

二、實地探查的發現

1. 風向交替時，可以明顯看出二個不同方向的砂波紋
2. 砂波紋的形成需要一段較長的時間，但也應該在半天內即可形成。

三、砂波紋會不斷的前進和演化發展

1. 從實驗的觀察，我們認為砂波紋會不斷向前推進且改變彎曲程度。
2. 美國科羅拉多大學所拍攝的短片中可以支持砂波紋的確在風吹動的情況下，會不斷前進。

四、砂波紋研究的應用

1. 火星表面有許多砂波紋記錄下了火星早期的大氣流動訊息
2. 我們的實驗以風速、風吹時間、砂堆厚度、顆粒大小等因素做為研究變因。希望能建立相對應的指標應用於行星大氣與古氣候的研究。

結論

1. 風速對砂波紋外形影響明顯，風速較小時，砂波紋愈平直，波長也較小。
2. 砂堆厚度愈厚，形成的波長較長；但砂堆厚度對砂波紋彎曲程度的影響較無一致的趨勢。
3. 砂波紋較難在顆粒大的粗砂沉積物中形成，中細砂和泥土等級的沉積物顆粒才容易形成砂波紋，當風速相對於沉積物顆粒極小時，有機會形成較不明顯的縱向砂波紋。
4. 風吹超過15分鐘後，砂波紋的外形幾乎不隨風吹時間而改變。
5. 在實驗室，以中、細砂做出厚度至少2公分的砂堆、用7.5m/s ~ 8.0m/s之間的風速吹襲砂堆約15分鐘，即可製造出排列整齊、紋路明顯的砂波紋。

主要參考文獻

1. Ripple marks. 2022年3月11日取自Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_marks#cite_note-Gary-3
2. Sedimentology and Stratigraphy. 2022年3月11日取自
<https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>