

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160004
參展科別	物理與天文學
作品名稱	滾動的「刺」界—濱刺麥滾動因素之探討

就讀學校	臺中市立臺中第一高級中等學校
指導教師	楊憲忠 紀凱容
作者姓名	廖家溟 蔡秉翰 黃家齊

關鍵詞	<u>濱刺麥、滾動模型、轉動慣量</u>
-----	----------------------

作者簡介



1. 廖家溟

我對科學充滿好奇心，擅長探究與解決問題，喜歡閱讀小說、觀察新事物即動手做實驗。

2. 蔡秉翰

我是ESFP(最E的那種)，高中階段以進物奧選訓營為目標；會彈鋼琴和寫書法。

3. 黃家齊

我是一個很外向的人，巨人所說是童心未泯，興趣是電腦遊戲及閱讀科普文章；專長是物理及各類電腦軟硬體。

2025 年臺灣國際科學展覽會
研究報告

區別：

科別：物理與天文學科

作品名稱：滾動的「刺」界—濱刺麥滾動因素之探討

關鍵詞：濱刺麥、滾動模型、轉動慣量

編號：

目錄

摘要	1
壹、前言	2
貳、研究設備及器材	3
參、研究方法	4
肆、研究過程	15
伍、研究結果與討論	25
陸、結論	29
柒、未來展望	29
捌、參考資料	29

摘要

此實驗主要在探討不同條件對濱刺麥 (*Spinifex littoreus*) 滾動之影響，並利用模型（以下簡稱模擬球）來推導其實際滾動之效果。我們利用木板作為模擬球滾動的環境，並設計了四個操縱變因，分別為刺的長度、數量、材質(模擬球本身的條件)及風速(外在環境條件)，測量模擬球的滾動軌跡、終端速度等物理量，並利用 tracker、Excel 等軟體分析數據，發現了刺的長度和環境風速與模擬球滾動的終端速度呈正相關；而刺的數量則與模擬球滾動的終端速度呈負相關，刺的材質主要影響滾動的阻力。

This study aims to explore the effects of different conditions on the rolling of *Spinifex Littoreus*, using a model (hereafter referred to as the simulated ball) to infer its actual rolling behavior. We used a wooden board as the rolling surface for the simulated ball and designed four manipulated variables: length, quantity, material of the spines (the conditions of the simulated ball itself), and wind speed (external environmental conditions). We measured physical quantities such as the rolling trajectory and terminal velocity of the simulated ball, and analyzed the data by using software like Tracker and Excel. The results showed that the length of the spines and wind speed were positively correlated with the terminal velocity of the simulated ball, while the number of spines was negatively correlated with the terminal velocity. The material of the spines mainly affected the rolling resistance.

壹、前言

一、研究動機

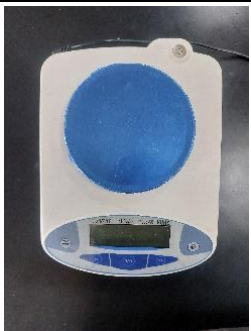
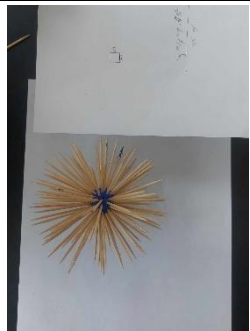
濱刺麥經由風力傳播種子，相較於其他靠風力傳播的植物，濱刺麥是以滾動的方式散播種子而不是在空中飛行。濱刺麥本身的質地很輕、刺的末端有倒鉤、滾動速度快，這樣的特性有助於讓濱刺麥種子傳播的距離增加，而滾動速度快這個現象也是我們值得探討的部分。濱刺麥滾動的動力來源為風力，其生長環境多為濱海沙岸地形，我們透過實地觀測量得濱刺麥滾動速率約為 1.91m/s ，但離岸發電機的平均風速約為 12m/s ，顯示風速對濱刺麥的加速度和傳播速度有顯著的影響。為了更深入了解這些影響因素，我們希望利用自製模擬球建立一套理論模型，並在未來透過這套模型來預測濱刺麥的滾動路徑及速度，進而應用在生活中。

二、研究目的

- (一)探討不同風速與風力大小關係
- (二)探討不同刺密度所受之風力的參考面積
- (三)探討模型不同長度的刺對滾動之影響
- (四)探討模型刺密度對滾動之影響
- (五)探討風力大小對模型滾動之影響
- (六)探討模型刺的材質對滾動之影響

貳、 研究設備及器材

表一、實驗器材（照片來源：作者拍攝）

			
5cm 竹籤	15cm 竹籤	鋁線	牙間刷
			
高密度泡棉球	自製支架	電子秤	風速計
			
木板	直立式電風扇	熱熔膠	釣魚線
			
模擬球			

參、 研究方法

一、文獻探討

(一) 濱刺麥結構

濱刺麥是禾本科的多年生草本植物，其果實為刺球狀造型，在成熟脫離母株後容易藉由風力滾動並傳播種子。刺上面有倒鉤，可以增加和地面的摩擦力。每根刺的根部皆有些許短刺，構成其中心，中心刺密度較高，可增加受風時的截面積。

(二) 轉動慣量(*Rotational inertia*)

轉動慣量顧名思義為物體轉動時的慣量，單位為 $kg \cdot m^2$ 。對於離散的質點來說，其定義為 $\sum m_i r_i^2$ ；對於一個連續的物體而言，其定義為 $\int r^2 dm$ ，其中 r 和 r_i 為物體中每個質量元素到轉動軸的垂直距離。轉動慣量主要受到質量分布、物體形狀及旋轉軸位置影響，質量分布越接近轉動軸，其轉動慣量越小，反之則越大。

(三) 楊氏模量(*Young's modulus*)

楊氏模量定義為應力(σ)與應變(ε)之比值，是材料力學中的一個概念，其中應力為施加在材料上的力除以其橫截面積，而應變則是材料在該力作用下的變形量與其原始長度之比。楊氏模量的單位為帕斯卡(Pa)，通常以百萬帕斯卡(MPa)或十億帕斯卡(GPa)表示。楊氏模量越大，表示材料越剛硬，受力時形變越小。楊氏模量的大小取決於其材質，鑽石的楊氏模量約為 $1200 (GPa)$ ，而低密度聚乙烯的則約為 $0.2 (GPa)$ 。

(四) 參考面積

不規則物體受風時可以利用其風速與風力的關係推出相對應的參考面積。參考面積的公式如下：

A : 參考面積(m^2)

F : 風力($kg \cdot m/s^2$)

C : 風阻係數(無單位)

ρ : 空氣密度(kg/m^3)

v : 風速(m/s)

$$A = \frac{2F}{C\rho v^2}$$

(五) 風阻係數(*Drag coefficient*)

阻力係數就是真實物體所受的阻力相對於理想情形阻力的比值。在理想情形下，所有流體衝撞物體的參考面後停止，因此在整個參考面上產生滯止壓力(*Stagnation Pressure*)。阻力係數與物體的形狀有關，越平滑的物體阻力係數數值越低，阻力係數亦與流體的雷諾數(*Reynolds number*)有關，但本實驗暫不討論雷諾數對阻力係數的影響。球體的阻力係數為0.47，而流線型的物體其阻力係數為0.04。

二、變因測量

濱刺麥在滾動過程主要受到風力、摩擦力、空氣阻力等作用力，又因為空氣阻力極小因此可忽略，故每次實驗僅測量以下物理量：

(一) 滾動時終端速度

滾動速度是直接模擬球滾動時以手機慢動作功能錄影(239.04fps)，再用*tracker*軟體分析其運動狀態，為了分析模擬球滾動時所受的合力，畫出 $v-t$ 圖後將最後速度較穩定的區域平均得到終端速度。

(二) 模擬球轉動慣量

利用扭擺原理，以兩條細繩懸掛，並使其發生小角度的振盪，利用以下算法得出其轉動慣量(I)：

因為其振盪角度極小，故可得：

$$l\varphi = r\theta \quad (1)$$

根據靜力平衡原理，兩側細繩的繩張力合力等於模擬球之重量：

$$2F = mg \quad (2)$$

發生小角度振盪時，繩張力造成的力矩 $\tau = 2F \sin \varphi r$ ，又因 $\varphi \ll 1$ ，故可寫出力矩和轉動慣量的關係式為：

$$2F\varphi r = I\ddot{\theta} \quad (3)$$

將式(1)和式(2)帶入式(3)可得：

$$\frac{mgr^2\theta}{l} = I\ddot{\theta} \quad (4)$$

因其側面之運動軌跡近似為簡諧振盪運動，故可得以下關係式：

$$\ddot{\theta} = \omega^2\theta \quad (5)$$

將式(5)帶入式(4)並化簡即可得轉動慣量和振盪週期之關係式如下：

$$I = \frac{mgr^2}{\omega^2 l} = \frac{mgr^2 T^2}{4\pi^2 l} \quad (6)$$

表二、標號意義說明

標號	意義	標號	意義
φ	繩子與鉛錘線的夾角(rad)	θ	轉動角度(rad)
r	模擬球半徑(m)	ω	角速度(rad/s)
F	繩張力(N)	$\ddot{\theta}$	角加速度(rad/s ²)
g	重力加速度(m/s ²)	T	週期(s)
l	繩長(m)		

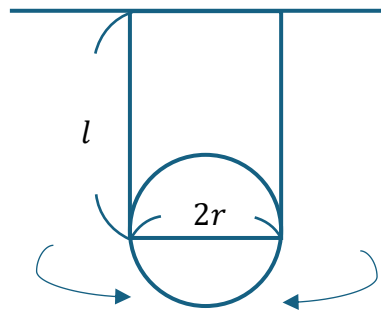


圖 1、轉動慣量實驗方法示意圖

(圖片來源：作者自行繪製)

其中， m, g, r, l 皆為已知，因此只需要測量擺動的週期即可得知轉動慣量。因為扭動方向的關係，側面會近似簡諧運動。我們在其側面做記號，並用手機錄影，最後利用 *tracker* 分析該點運動軌跡，並利用週期算出轉動慣量，每次實驗計算 10 個週期的平均，並實驗三次。測得轉動慣量的實驗值後我們再利用轉動慣量的定義算出其理論值。

轉動慣量計算說明如表三：

表三、標號意義說明

標號	意義	標號	意義
θ	刺與水平面的夾角(rad)	μ	刺的線密度(kg/m)
x	刺到鉛錘線的距離(m)	r	中心球半徑(m)
l	刺長(m)	m	單根刺重(kg)
M	模擬球總重(kg)	n	刺數(根)

$$\text{已知} \int \mu dx = m \cos \theta = \mu x$$

$$x = l \cos \theta$$

$$I_{\text{刺}}(\theta) = \int \frac{\mu}{\cos \theta} x^2 dx + m(r \cos \theta)^2$$

$$= \frac{\mu}{3 \cos \theta} x^3 + m(r \cos \theta)^2$$

$$= \frac{ml^2(\cos \theta)^2}{3} + m(r \cos \theta)^2$$

$$= m(\cos \theta)^2 \left(\frac{l^2}{3} + r^2 \right)$$

$$I_{\text{中心球}} = \frac{2}{5}(M - mn)r^2$$

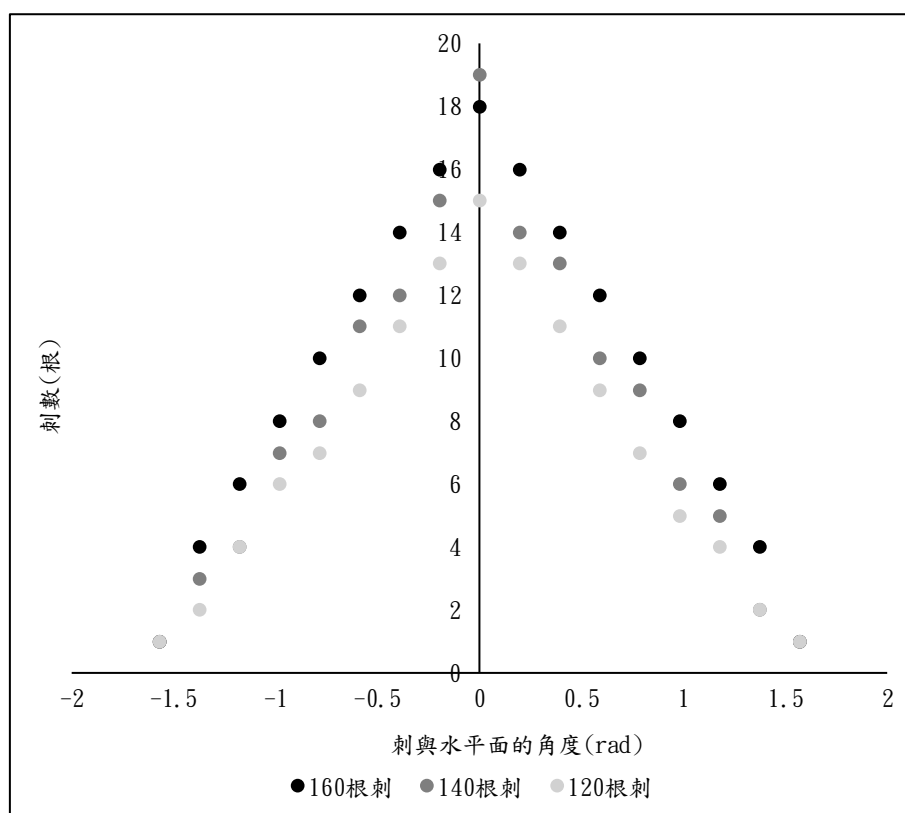


圖 2、不同刺數的模擬球刺的數量分布圖

(圖片來源：作者自行繪製)

根據圖 2，將每個 θ 所對應的刺數(n)乘上其對應的單根刺之轉動慣量值($I_{\text{刺}}$)，再將所有的 $n \times I_{\text{刺}}$ 之值加總即為所有刺之轉動慣量值。

(三) 摩擦力

因為純滾動時的摩擦力是靜摩擦力無法直接量測，因此我們透過以下實驗，透過能量守恆計算出摩擦力(f)。物體在滾動時除了移動的動能，還會有一個轉動動能，當位能為零時兩者相加即為總力學能，再扣除阻力的作功會等於速度為零時的位能。

$$E_T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I \cdot \frac{v^2}{r^2} - f \cdot s = mgh$$

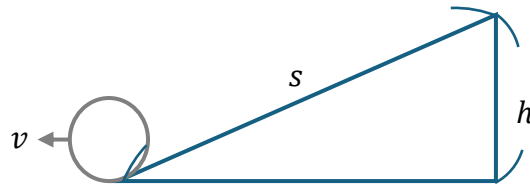


圖 3、摩擦力測量實驗示意圖

(圖片來源：作者自行繪製)

三、模擬球

濱刺麥的刺接近中心處較粗，是由多根短刺聚集，因此中心處較外圍密集。我們利用半徑 2.8cm 泡綿球模擬中心構造，外部的刺則是以 160 根 5cm 竹籤為對照組（以下簡稱標準模型），再依據操縱變因調整。

四、風域選擇

為了減少實驗變因，我們在實驗不同變因時是利用風速較穩定的風場實驗。先在平面上建立一個以電風扇為原點，X 軸向右、Y 軸向前的平面座標系，並以風速計分別在 X、Y 軸每隔 10cm 測量該點風速，每個點測量五次後計算出標準差及不確定度。風速不確定度小於 0.05 表示風速測量數據變異極低，說明實驗環境穩定又因為部分空間不會受到風扇影響風速為 0 m/s，不確定度為 0。因此我們將不確定度小於 0.05 且大於 0 的位置定義為風速穩定。

實驗數據：

表四、不同風速不確定度小於 0.05 且大於 0 之數量

	與風扇 y 軸距離(cm)				總計
	10-50	60-100	110-150	160-200	
風速弱	2	4	18	20	44
風速中	5	10	16	26	57
風速強	4	3	7	21	35

經由數據可發現，風速在 y=110-200cm 時普遍較穩定，而風場的穩定程度與風速大小較無關係。我們考量風場的穩定度及實驗的方便性，做實驗時是選擇 y=100-200cm 的風場，為了量化風速的強度，我們以模擬球滾動的起始位置作為該強度的風速(如表五)。

表五、不同強度的風在距離風扇 1 公尺位置之風速

	距離風扇 1 公尺位置之風速(m/s)
風速弱	2.54
風速中	3.46
風速強	4.20

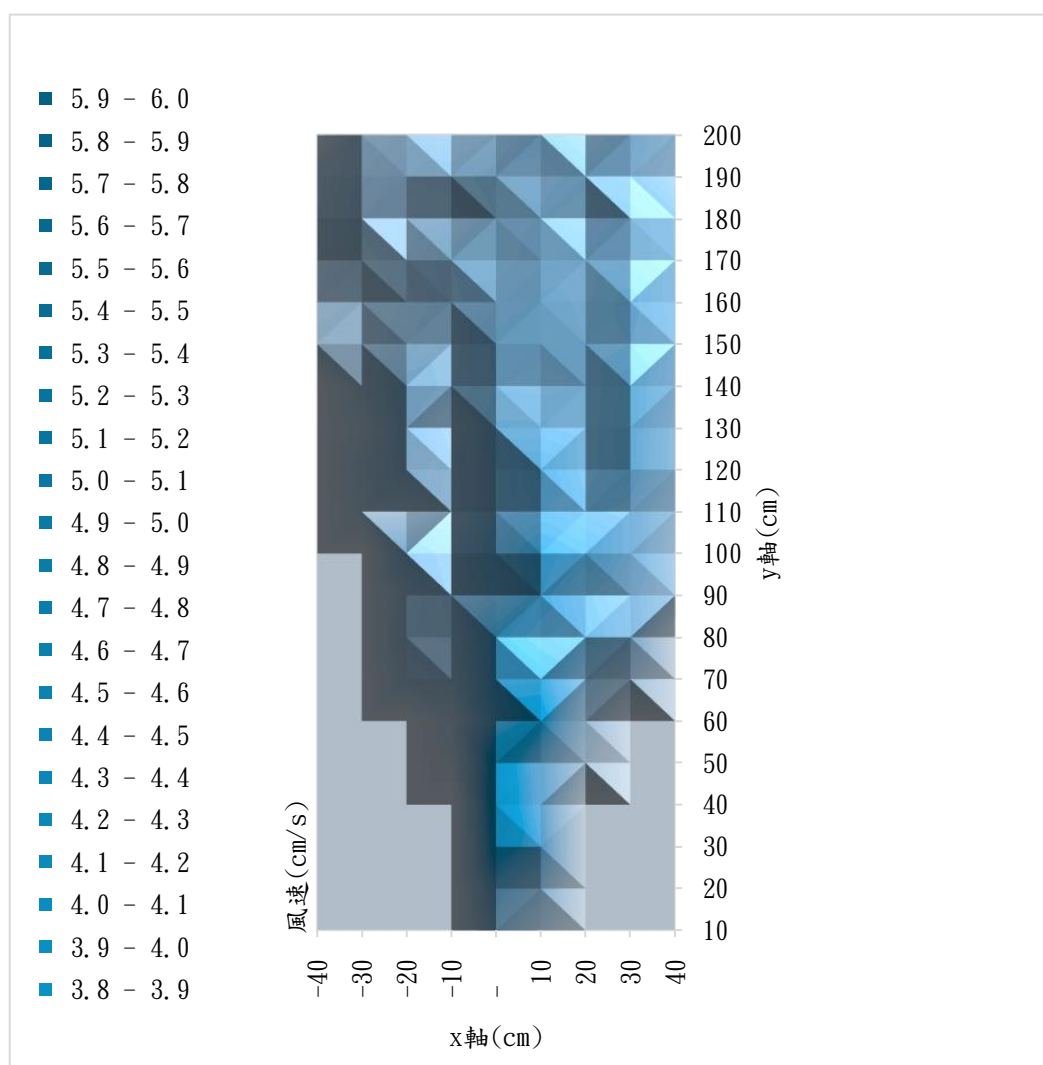


圖 4、風速弱之風速分布圖
(圖片來源：作者自行繪製)

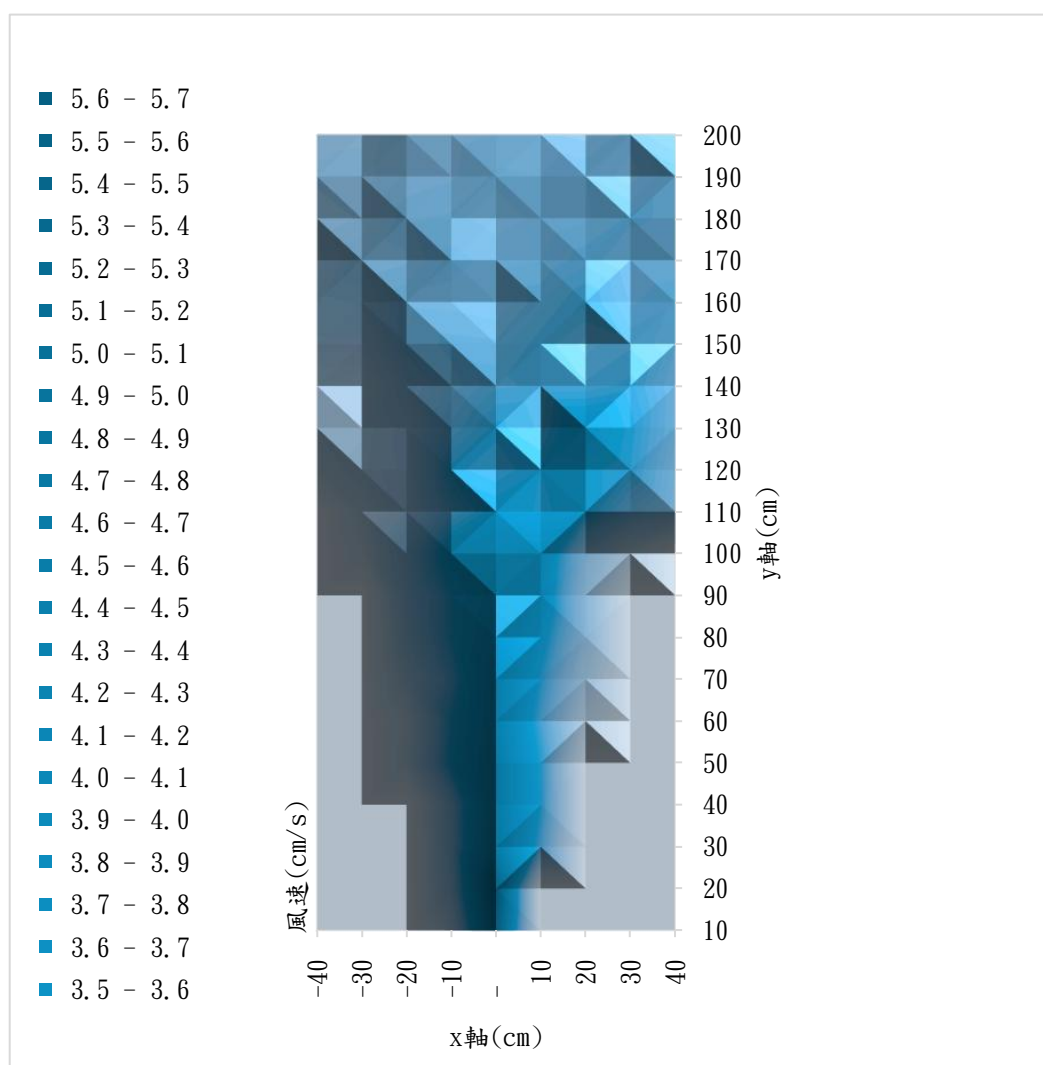


圖 5、風速中之風速分布圖
(圖片來源：作者自行繪製)

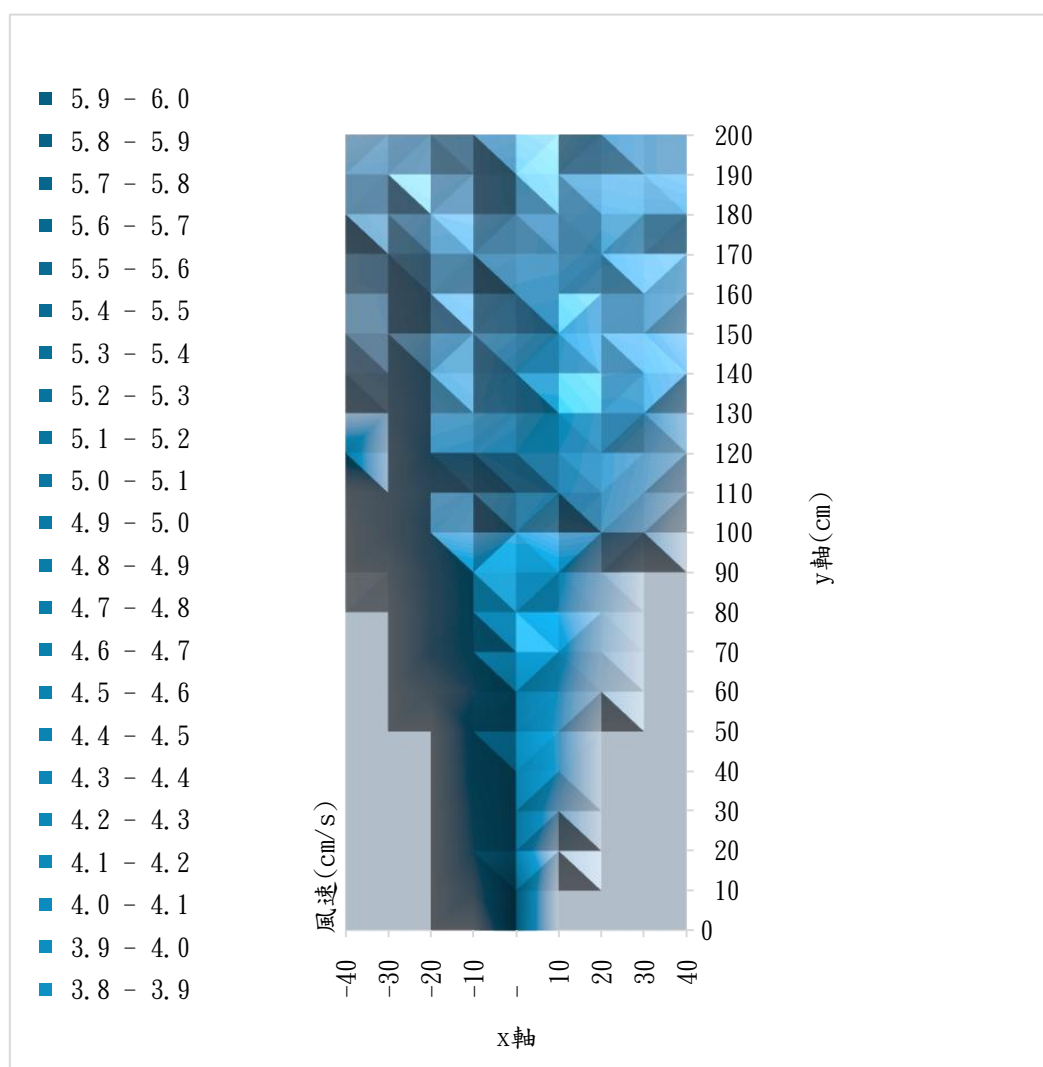


圖 6、風速強之風速分布圖
(圖片來源：作者自行繪製)

五、實驗裝置照片（圖片來源：作者拍攝）

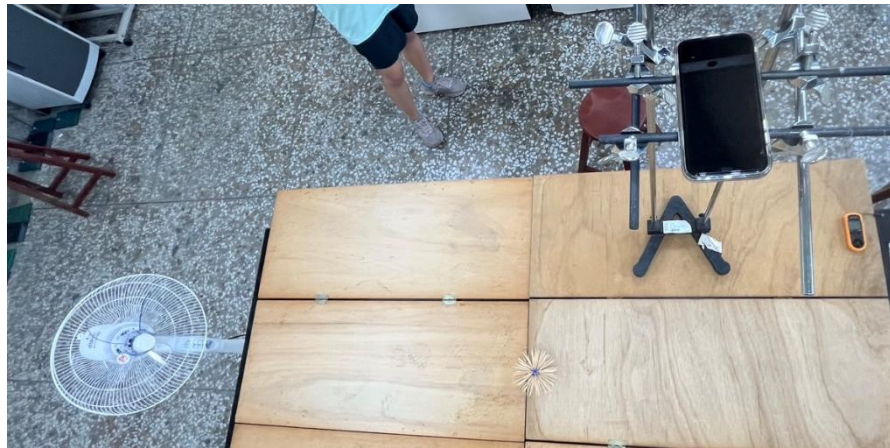


圖 7、測量滾動速度實驗裝置

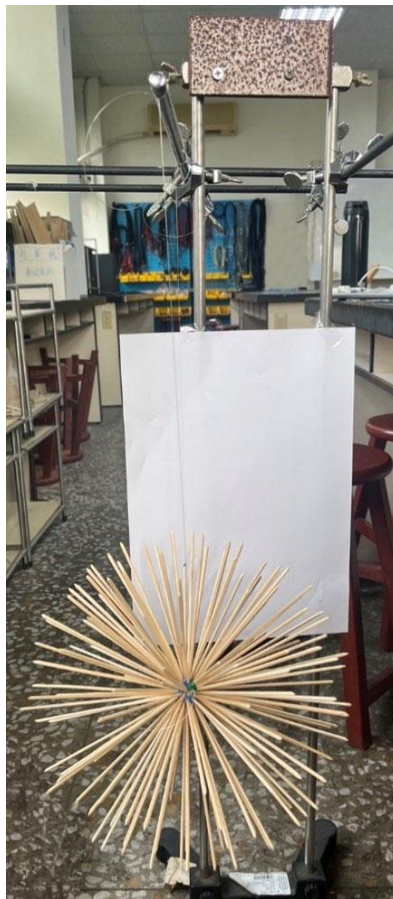


圖 8、轉動慣量實驗裝置



圖 9、摩擦力實驗裝置



圖 10、風速與風力關係實驗裝置

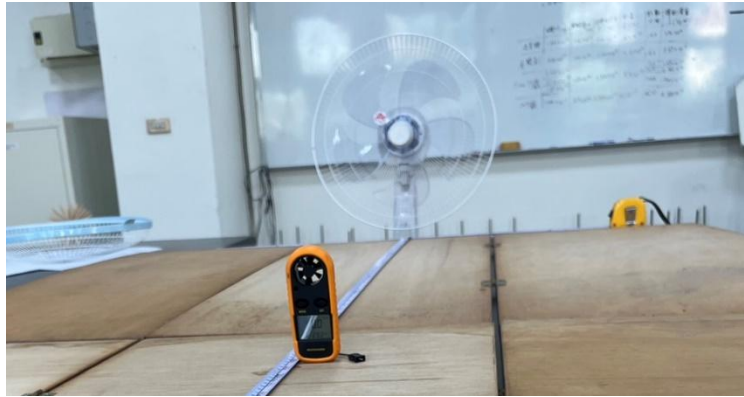


圖 11、風速分布實驗裝置

肆、 研究過程

實驗一 探討不同風速與風力大小關係

一、實驗假設：風速與風力成正相關，兩者為平方關係。

二、實驗設計：將電子秤倒置，並將電子秤一端固定模擬球，本體固定在支架上。利用不同強度及不同高度的風製造出風速的差異，實驗前先測量在風未吹動時電子秤的數值，然後在電風扇由下往上吹動，測量風力並減去原本的數值，每項實驗重複 10 次，這邊的模擬球指標準模型。

三、實驗變因

(一)操縱變因：風速大小

(二)控制變因：模擬球刺的長度、刺的材質、中心球半徑

(三)應變變因：風力大小

四、實驗數據

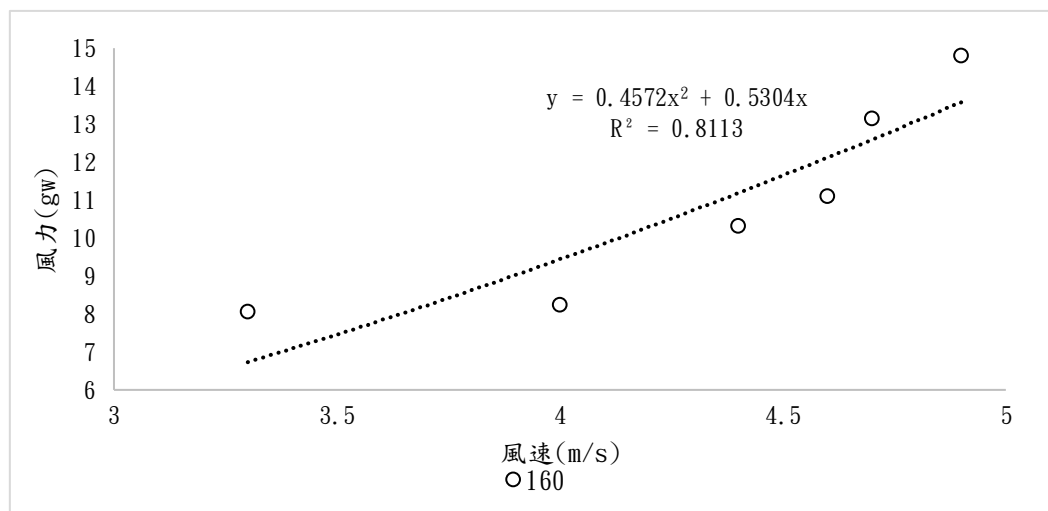


圖 12、160 根刺之模擬球風速與風力關係圖

(圖片來源：作者自行繪製)

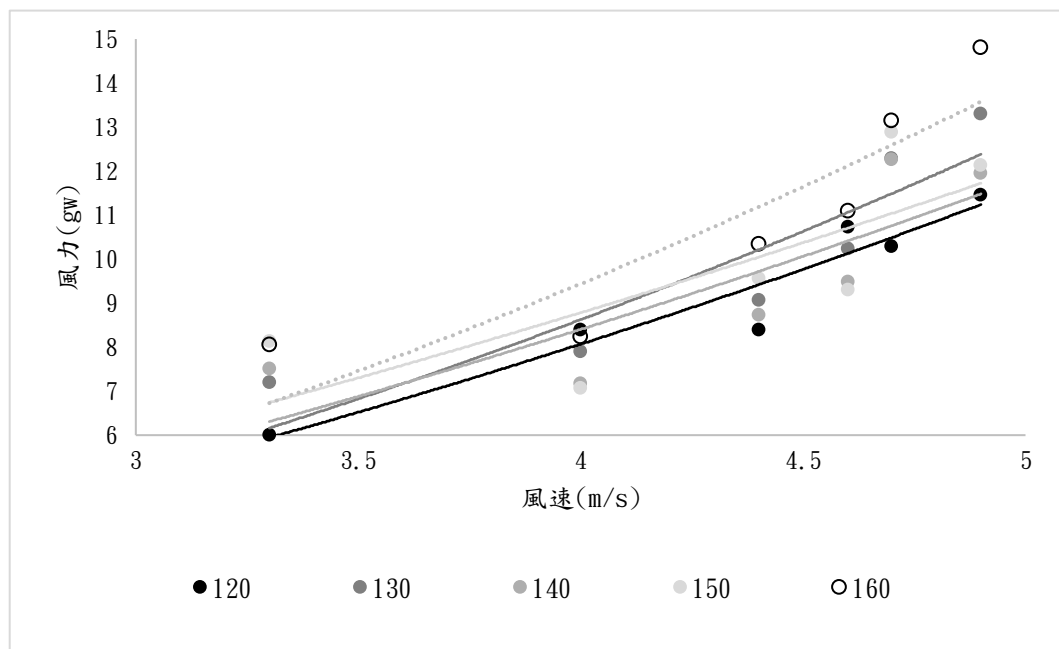


圖 13、不同刺數模擬球風力與風速關係圖

(圖片來源：作者自行繪製)

從圖表可得知風速與風力成正相關，兩者為平方關係。且在相同風速下刺數越大，風力普遍越大，130 根刺的模擬球例外，推測為實驗誤差。

實驗二 探討不同刺密度所受之風力的參考面積

一、實驗假設

模擬球上刺的數量和球的參考面積呈現正相關。

二、實驗設計

將電子秤倒置，並將電子秤放置秤盤的軸承位置固定模擬球，電子秤本體固定在支架上。利用電風扇不同強度的風和不同高度的支架製造出風速的差異，實驗前先測量在風未吹動時電子秤的數值，然後在電風扇由下往上吹動，測量風力並減去原本的數值（上述模擬球亦指標準模型）。參考面積指的是投影面積，我們利用 photoshop 軟體計算模擬球的投影面積像素與一平方公分像素的比例，並得知其實際投影面積。

三、實驗變因

(一)操縱變因：球上刺的數量

(二)控制變因：模擬球刺長度、刺的材質、中心球半徑

(三)應變變因：風力大小

四、實驗數據

表六、不同刺數之模擬球的參考面積

刺數	160	150	140	130	120
參考面積(cm^2)	114.6	107.4	101.8	98.4	93.0

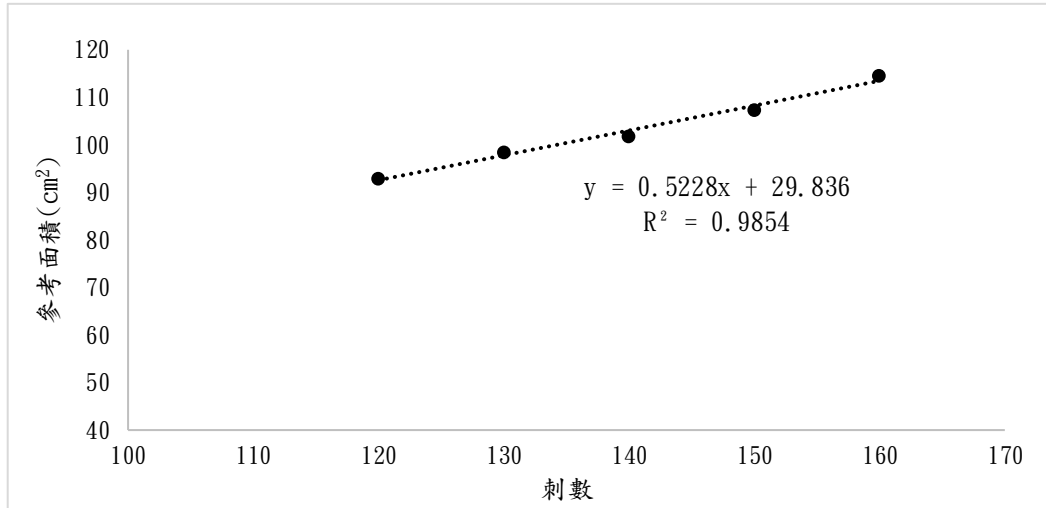


圖 14、模擬球刺數對參考面積之分布圖

(圖片來源：作者自行繪製)

從圖表可得知，模擬球上刺的數量和球的參考面積成一次方關係。

實驗三 探討模型不同長度的刺對滾動之影響

一、實驗假設

刺的長度與滾動終端速度呈正相關。

二、實驗設計

分別測量 5cm、15cm 竹籤所組成的模擬球滾動之終端速度及其轉動慣量。

三、實驗變因

(一)操縱變因：模擬球的刺長度

(二)控制變因：刺的數量、風力大小、刺的材質、中心球半徑、地面材質

(三)應變變因：滾動速度

四、實驗數據

(一)轉動慣量

表七、160 根不同長度刺的模擬球之轉動慣量

模擬球類別	轉動慣量實驗值 ($10^{-5} kg \cdot m^2$)	轉動慣量理論值 ($10^{-5} kg \cdot m^2$)	誤差率(%)
-------	---------------------------------------	---------------------------------------	--------

5cm竹籤	2.56	1.55	65.5
15cm竹籤	64.7	198.8	-67.5

(二)滾動終端速度

表八、不同長度刺的模擬球滾動下之終端速度(實驗三次平均)

	5 公分	15 公分
終端速度(m/s)	0.514	1.642

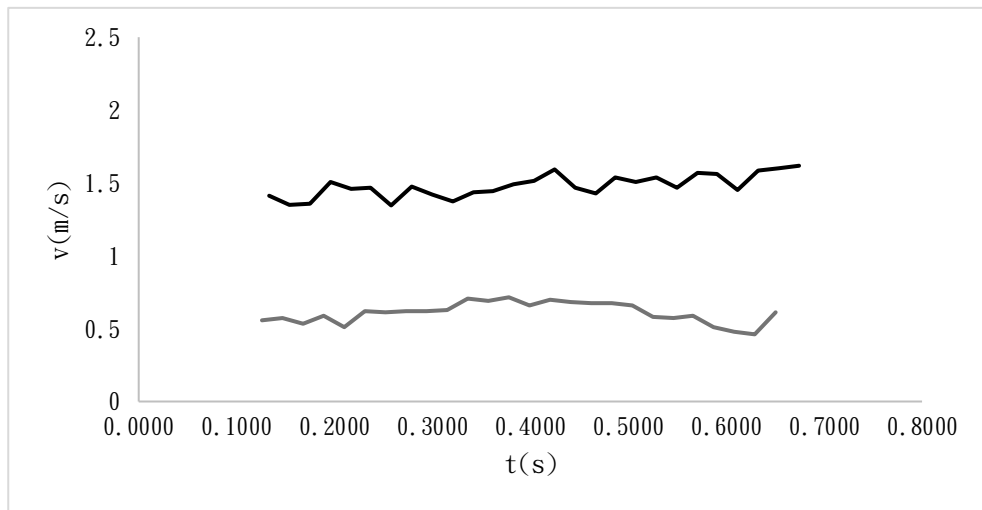


圖 15、不同長度刺的模擬球受風時滾動之 v-t 圖

(圖片來源：作者自行繪製)

從圖表可得知 15 公分竹籤的模擬球滾動速度大於 5 公分模擬球，兩者比例約為 3 倍。

實驗四 探討模型刺密度對滾動之影響

一、實驗假設：竹籤的次數與終端速度成正相關。

二、實驗設計：分別測量以 120、140、160 根竹籤所組成的模擬球滾動之終端速度及其轉動慣量

三、實驗變因

(一)操縱變因：球上刺的數量

(二)控制變因：刺的長度、風力大小、刺的材質、中心球半徑、地面材質

(三)應變變因：滾動速度

四、實驗數據

(一)轉動慣量

表九、不同密度刺的模擬球之轉動動慣量

模擬球類別	轉動慣量實驗值 ($10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$)	轉動慣量理論值 ($10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$)	誤差率(%)
5cm竹籤 (160 根刺)	2.56	1.55	65.5
5cm竹籤 (140 根刺)	1.02	1.41	-27.6
5cm竹籤 (120 根刺)	0.0829	1.21	-93.1

(二)滾動終端速度

表十、不同刺數的模擬球滾動下之終端速度(實驗三次平均)

	160 根刺	140 根刺	120 根刺
質量(kg)	0.0245	0.0213	0.0181
參考面積(m^2)	0.0114	0.0101	0.0092
終端速度(m/s)	0.514	0.906	1.316

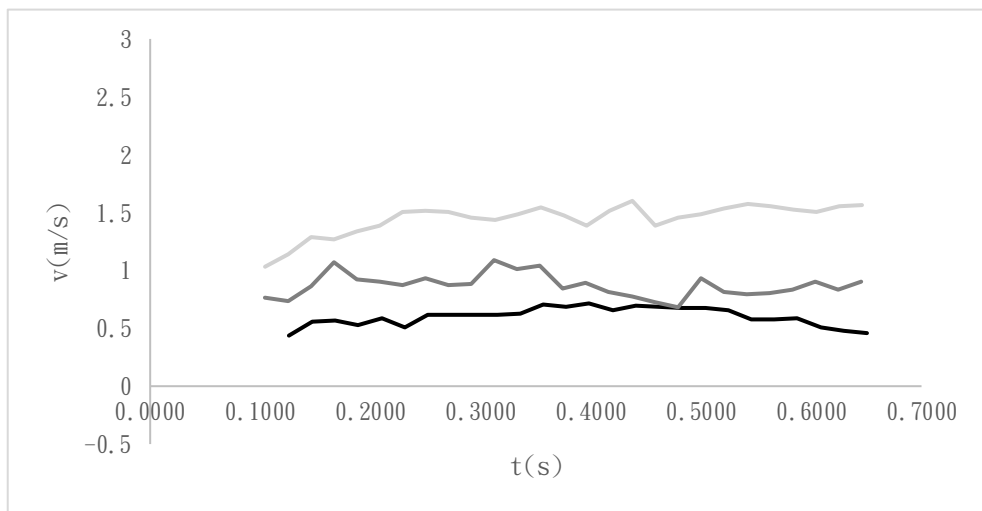


圖 16、不同刺數模擬球受風時滾動之 v-t 圖

(圖片來源：作者自行繪製)

從圖表可得知模擬球刺數介於 120-160 之間時，刺密度越高滾動終端速度越小。

實驗五 探討風力大小對模型滾動之影響

一、實驗假設

風力大小和其滾動終端速度呈正相關。

二、實驗設計

利用不同風速吹模擬球，並將 x-y 圖與風速圖比較進而推算出模擬球所受

風力。

三、實驗變因

(一)操縱變因：風力大小

(二)控制變因：刺的長度、刺的數量、刺的材質、中心球半徑、地面材質

(三)應變變因：滾動速度

四、實驗數據

表十一、模擬球在不同風速滾動下之終端速度(實驗三次平均)

	風速弱(2.54m/s)	風速中(3.46m/s)	風速強(4.20m/s)
終端速度 (m/s)	0.498	0.514	1.041

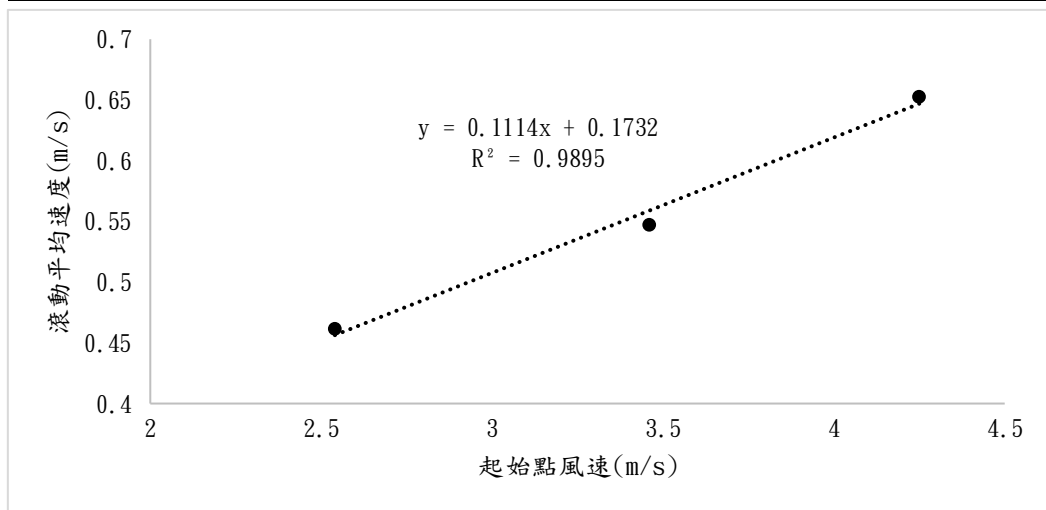


圖 17、模擬球在不同強度的風滾動下之平均速度

(圖片來源：作者自行繪製)

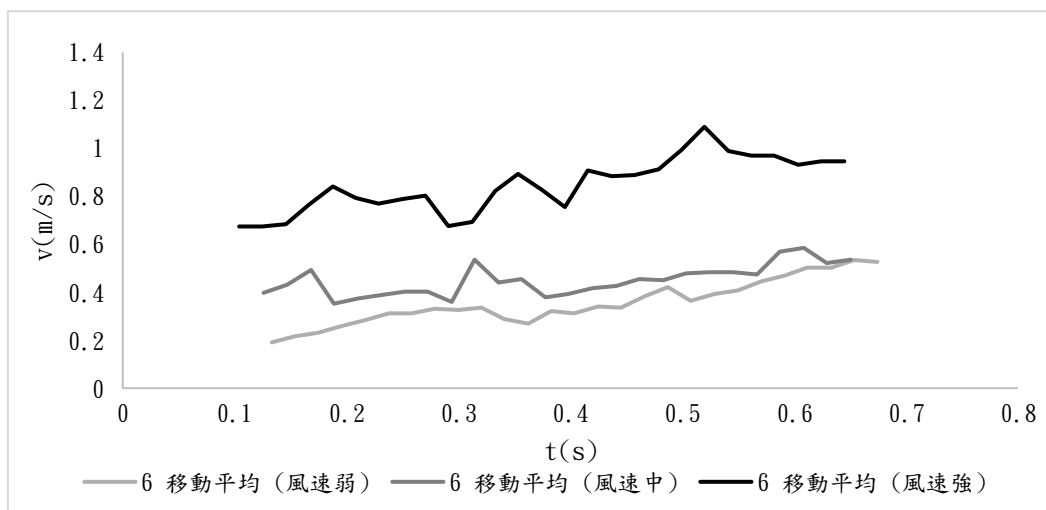


圖 18、模擬球在不同強度的風滾動下之 v-t 圖

(圖片來源：作者自行繪製)

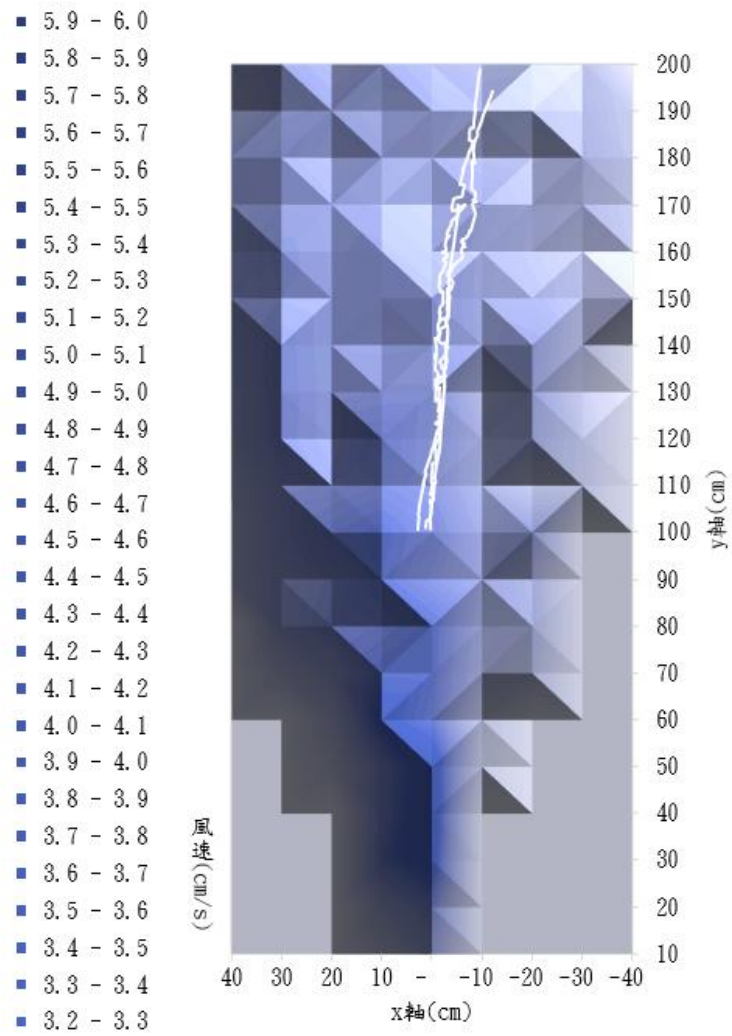


圖 19、模擬球風速為弱的風滾動下之滾動路徑對風速分布圖

(圖片來源：作者自行繪製)

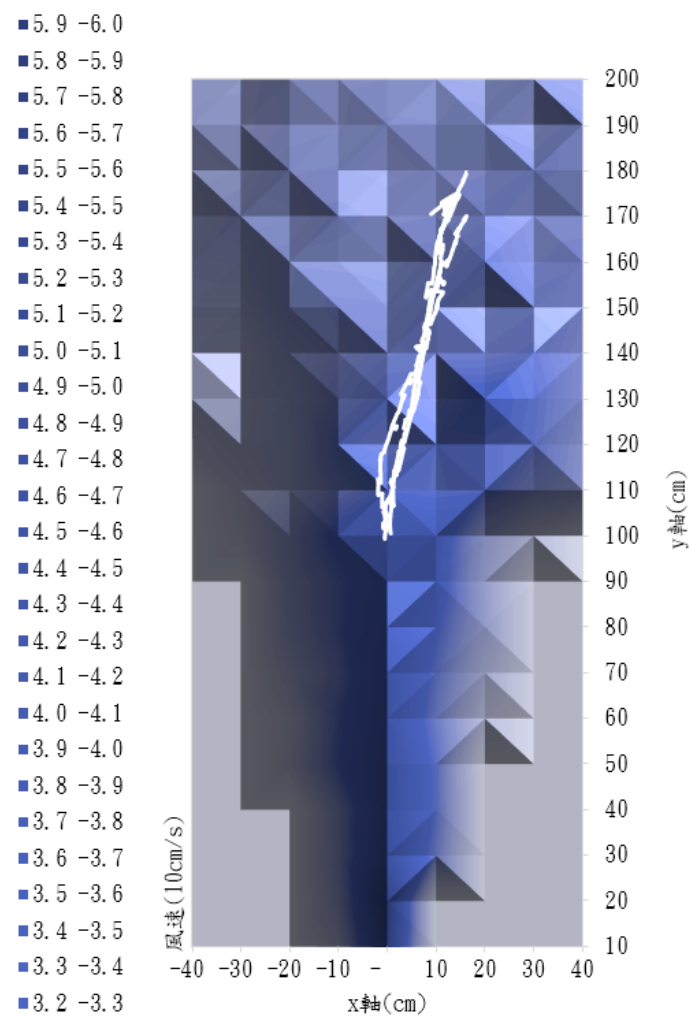


圖 20、模擬球風速為中的風滾動下之滾動路徑對風速分布圖
(圖片來源：作者自行繪製)

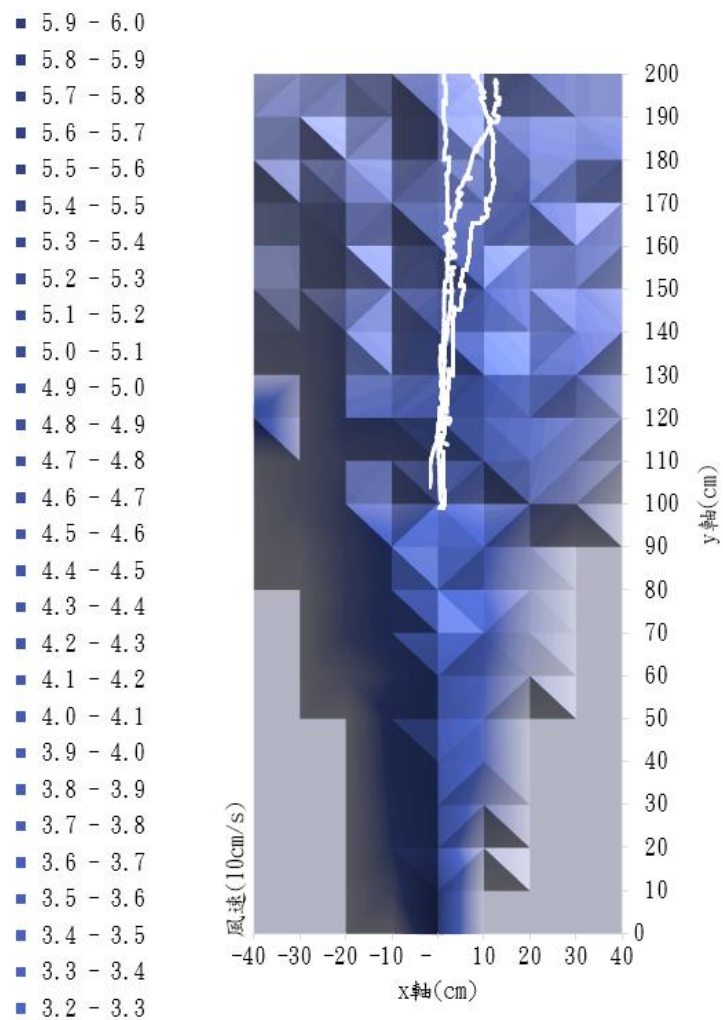


圖 21、模擬球風速為強的風滾動下之滾動路徑對風速分布圖

(圖片來源：作者自行繪製)

經由圖表可發現，風力越大滾動終端速度越大，風速弱的終端速度與風速中的終端速度差異較小。

實驗六 探討模型刺的材質（強度）對滾動之影響

一、實驗假設

質量越大之模擬球滾動時所受阻力越大。

二、實驗設計

分別利用竹籤、牙間刷及鋁線作為模擬球的刺，並讓模擬球透過重力產生加速度，測量模擬球滾動至水平面之瞬時速度，計算模擬球在滾動過程中所受的阻力。

三、實驗變因

(一)操縱變因：刺的材質

(二)控制變因：刺的長度、刺的數量、中心球半徑、地面材質

(三)應變變因：滾動時的阻力

四、實驗數據

(一)轉動慣量

表十二、不同材質刺的模擬球之轉動動慣量

模擬球類別	轉動慣量實驗值 ($10^{-5}kg \cdot m^2$)	轉動慣量理論值 ($10^{-5}kg \cdot m^2$)	誤差率 (%)
5cm鋁線 (160 根刺)	25.7	17.0	51.6
5cm牙間刷 (160 根刺)	1.99	1.61	23.8
5cm竹籤 (160 根刺)	2.56	1.55	65.5

(二)質心下降量

表十三、不同材質刺的模擬球滾動時質心下降量

模擬球類別	滾動時質心下降量(cm)
5cm竹籤(160 根刺)	0.877
5cm牙間刷(160 根刺)	0.833
5cm鋁線(160 根刺)	0.400

(三)滾動阻力

表十四、不同材質刺的模擬球受重力滾動之阻力

模擬球類別	阻力(N)
5cm竹籤(160 根刺)	0.029
5cm牙間刷(160 根刺)	0.024
5cm鋁線(160 根刺)	0.200

經由圖表可發現，刺的材質為鋁線時所受阻力最大，牙籤次之，牙間刷最小；質心下降量的大小依序為竹籤、牙間刷及鋁線。

伍、研究結果與討論

實驗一 探討不同風速與風力大小關係

一、實驗結果：160 根刺的模擬球受風時其風速與風力成正相關，兩者為平方關係，方程式為 $y = 0.4572x^2 + 0.5304x$ 。

二、實驗討論：

根據數據結果顯示，風速與風力呈現正相關且為平方關係，與流體動力學中物體受到的風力會隨風速平方增長相符。這說明風速的提升會顯著增強模擬球的受力，進而影響其終端速度。透過實驗結果，我們精確算出風速與風力的關係式，並利用風速進一步計算模擬球滾動時所受風力。

實驗二 探討不同刺密度所受之風力的等效面積

一、實驗結果：模擬球的刺越多參考面積越大，在刺數為 120-160 根之間時參考面積與刺數的關係式為 $y = 0.5228x + 29.836$ ， x 為刺數、 y 為參考面積(cm/s^2)。

二、實驗討論：

(一) 若假設模擬球為一顆實心球，則其受風面積為 $171.9cm^2$ ，再帶入方程式可得知，當刺數為 273 根時，其參考面積會與實心球相等，阻力係數約為 0.47。

(二) 一物體受風時風速與風力的關係為 $F = \frac{C\rho Av^2}{2}$ ，因此可以透過實驗結果

推導出不同物數之模擬球的風阻係數 $C = \frac{2F}{\rho Av^2}$ 。

表十五、不同刺數模擬球的風阻係數

刺數	160	150	140	130	120
$\frac{F}{v^2}(kg/m)$	0.00484	0.00526	0.00505	0.00525	0.00576
$A(cm^2)$	114.6	107.4	101.8	98.4	93.0
$\rho(kg/m^3)$	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176
C	0.689	0.799	0.809	0.871	1.011

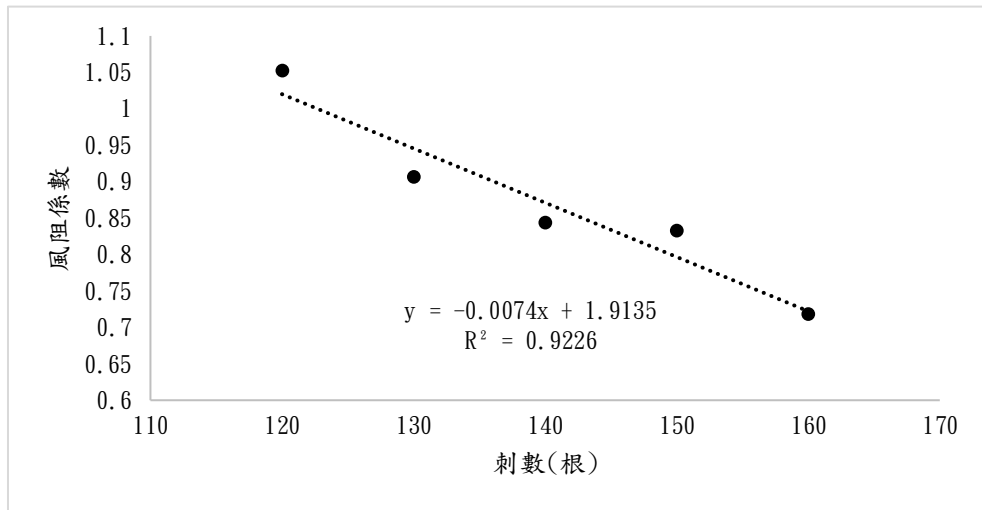


圖 22、模擬球刺數與風阻係數分布圖

(圖片來源：作者自行繪製)

當模擬球刺數為 x 時，其參考面積為 $0.5228x + 29.836(cm^2)$ ，風阻係數為 $-0.0074x + 1.9135$ ，則當環境為 27° 、 $1atm$ 時，風力(F)與風速(v)和刺數(x)關係如下：

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{(-0.0074x + 1.9) \times 1.17 \times ((0.52x + 29.8)/10000)v^2}{2} \\
 &= \frac{-0.0045v^2x^2 + 0.92v^2x + 67.1v^2}{2} \times 10^{-4} \\
 &= v^2(-0.0023x^2 + 0.46x + 33.6) \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

實驗三 探討模型不同長度的刺對滾動之影響

一、實驗結果：模擬球刺長度越長，滾動終端速度越大。

二、實驗討論：

刺長與轉動慣量、參考面積、質量、半徑、終端速度呈正相關；與風阻係數呈負相關。滾動的終端速度 $v' = v_{\text{風}} - \sqrt{\frac{2I\alpha}{c\rho Ar}}$ 。15 公分模擬球之轉動慣量大約為 5 公分模擬球之轉動慣量的 100 倍、半徑約為 3 倍，其餘相關之長數差異不大，故模擬球的刺長與終端速度呈正相關，且模擬球的刺長與角加速度呈負相關。

實驗四 探討模型刺密度對滾動之影響

一、實驗結果：模擬球刺數為 120-160 時，刺密度越高滾動終端速度越小。

二、實驗討論：

表十六、不同刺數模擬球的滾動參數

刺數	160	140	120
$m(kg)$	0.0246	0.0218	0.0189
$A(m^2)$	0.01146	0.01018	0.00930
$\rho(kg/m^3)$	1.176	1.176	1.176
C	0.689	0.809	1.011
$r(m)$	0.077	0.077	0.077
終端速度 $v'(m/s)$	0.514	0.906	1.316

所受風力 $F = \frac{C\rho Av^2}{2}$ ，假設到達終端速度時的風速為 $v_{\text{風}}$ ，模擬球在到達終端

速度時，其受到的風力($F_{\text{風}}$) = 阻力(f) = $\frac{C\rho A(v_{\text{風}} - v')^2}{2}$ ，則在 $t = 0$ 時，角加

速度 $\alpha = \frac{C\rho A(v_{\text{風}} - v')^2 r}{2I}$ 。由實驗二和本實驗可知，風阻係數、終端速度與刺數成負相關，參考面積、模擬球質量、轉動慣量均與刺數呈正相關。假設刺數為 x ，以上之相關係數如下：

風阻係數 $C = -0.0074x + 1.91$

參考面積 $A = 0.52x + 29.8$

終端速度 $v' = -0.02x + 3.7$

角加速度(α)與刺數(x)和到達終端速度時的風速($v_{\text{風}}$)的關係式如下：

$$\alpha = \frac{C\rho A(v_{\text{風}} - v')^2 r}{2I(x)}$$

$$= \frac{1.18(-0.0074x + 1.91)(0.52x + 29.8)(v_{\text{風}} + 0.02x - 3.7)^2}{2I(x)}$$

已知實驗時是以風速中作為滾動動力，其初始風速為 $3.46m/s$ ，而不同刺數的轉動慣量差異不大，因此以刺數為 140 的模擬球之轉動慣量($1.41 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$)帶入公式並化簡後角加速度(α)與刺數(x)的關係式如下：

$$\alpha = -0.064x^4 + 14.5x^3 + 633x^2 - 21001x + 137184$$

根據實驗結果，刺數越少模擬球到達的終端速度越快，但其滾動終端速度較小。

實驗五 探討風力大小對模型滾動之影響

一、實驗結果：風力越大滾動終端速度越大，風速弱的終端速度與風速中的終端速度差異較小。

二、實驗討論：

從實驗結果可以看出終端速度隨風速變化符合理論預期，而風速中與風速強的滾動終端速度差異較大是因為風速與風力成平方關係，若風速增加的數值相同，風速較大的風力增加越多。

實驗中觀察到模擬球會向右偏折，這可能是由於風場內存在風速梯度的影響。風速在模擬球的左右兩側不均勻，導致模擬球一側受力較大，從而出現偏折。隨著風速增大，偏折的角度反而減小，這可能是因為在高風速下，風速梯度變得更加均勻，從而減少了偏折的影響，下圖為不同風速下模擬球偏折角度的關係。

表十七、風速強度與模擬球偏折角度(°)關係

風速弱	風速中	風速強
4.54	8.11	5.79
-9.03	19.27	1.47
21.63	15.85	-0.27

從表格可發現風速強的偏折角標準差較小，模擬球的滾動較穩定，且風速越強，偏折的角度越小。

實驗六 探討模型刺的材質（強度）對滾動之影響

一、實驗結果：刺的材質為鋁線時所受阻力最大，牙籤次之，牙間刷最小；質心下降量的大小依序為竹籤、牙間刷及鋁線。

二、實驗討論：

(一)滾動的阻力主要受到質量影響，為了扣除質量的因素，定義一常數：

$$k = \frac{f}{m}, \text{ 常數的大小依序為竹籤、牙間刷、鋁線。因此可推測竹籤與木}$$

板間的摩擦力最大，牙籤次之，鋁線與木板間的摩擦力最小。

(二)鋁線為金屬材質，受力時形變量最小。而理論上牙間刷為塑膠材質，其楊氏模量會小於竹籤，兩者的實驗結果差異不大，推測為實驗誤差所導致。

陸、 結論

根據實驗結果，滾動的終端速度受到模擬球刺的長度、密度、風力及阻力所影響，而其中又以刺的長度影響較大，模擬球滾動時路徑的偏折主要是因為風場的不穩定而導致。經由上述討論中整理出以下摘要：

- 一、風速與風力成正相關，兩者為平方關係。
- 二、實驗結果可推導出不同刺數的模擬球與其參考面積之關係式，並進一步得知其風阻係數及風速與風力關係。
- 三、模擬球刺長度與滾動終端速度成正相關。
- 四、透過模擬球滾動參數推導出模擬球刺數與滾動角加速度之關係，而模擬球刺數與滾動終端速度成負相關。
- 五、風力大小與滾動終端速度成正相關，風速較弱時模擬球易往風速較強處偏折。
- 六、刺的材質為鋁線時滾動所受阻力主要受質量影響。

柒、 未來展望

- 一、將現有的實驗新增更多項目提升數據可信度，例如不同材質的刺及不同長度的刺。
- 二、測量不同材質的刺之楊氏模量以更了解材料特性及運動時之形變。
- 三、測量模擬球不同長度的刺對風阻係數之關係，並進一步計算模擬球受風時滾動的角加速度與刺長度關係式。
- 四、比對實際濱刺麥滾動與實驗模擬之差別。

捌、 參考資料

- 一、林大惠(2020)。離岸風電：風場評估篇—專家 QA。台灣科技媒體中心。
<https://smctw.tw/4236/>
- 二、張以恆(2018)。風媒傳播-濱刺麥果實滾動之生物力學。國立中興大學物理學系。
- 三、盧昭暉(2012)。熱流系統設計與分析第四章外流場。中興大學機械工程研究所。
<https://www.me.nchu.edu.tw/lab/ICE/www/Courses/thermalf fluid/chap4.pdf>
- 四、David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker(2020)。
Halliday and Resnick's Principles of physics 11/E。

【評語】160004

本實驗主要在探討不同條件對濱刺麥 (*Spinifex littoreus*) 滾動之影響，並利用模型（以下簡稱模擬球）來推導其實際滾動之效果。實驗結果，滾動的終端速度受到模擬球刺的長度、密度、風力及阻力所影響，而其中又以刺的長度影響較大，模擬球滾動時路徑的偏折主要是因為風場的不穩定而導致。這是簡單的實驗設計模擬。可是，整個報告像是一個月考考題，一問一答，缺少一個中心的物理問題。所有數據應呈現誤差 (Error bar) 及不準度 (Uncertainty)。