

2013 臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	100031
參展科別	工程學科
作品名稱	利用風洞分析微粒運動量-以蕨類孢子為例
得獎獎項	四等獎

就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 張素卿、金佳龍

作者姓名 高子涵、施詠心

關鍵字 可旋式鏡頭、雙鏡頭相機、立體效果量化

作者簡介



My name is Shih, Yung-Hsin. Currently, I study in Lishan senior high school. I am now a sophomore student in senior high school. Our school has thematic courses, and I chose physical one. Though high school life is quite busy, I always do my best at almost everything, for instance, thematic courses, homework, and even maintaining good family relationship.

Very Fortunately, I was born in a joyous and supportive family. My father is a professional medical technologist; however, I think he is more like a “versatile plumber” of my family because he can fix everything. In addition, he is a man of plentiful creativity, and always encourages me to think more.

Today I have great enthusiasm for science and I believe it is all attributed to my dad. My mother is a housewife. She has passion for nature, especially mountain forests. My family members always go mountain climbing together; therefore, mountain climbing has become “a piece of cake” for my family. My brother studies in the Department of Power Mechanical Engineering in Tsinghua University. As long as I have

problems for my homework, he always teaches me. As for my elder sister, she specializes in art and we always exchange ideas about art. My sister makes me experience the beauty in our life more.

I am so lucky to have such a great and supportive family. I must say without them, I won't be able to participate in International Science Fair and do what I like to do. Therefore, I will share all the glory I have today with my dear family.

摘要

本研究設計了兩個風洞實驗裝置，分為水平風洞與垂直風洞，兩者皆進行飄浮模擬試驗進而推算微小物質的運動量，並以小保麗龍球作為標準圓球，確保儀器的可用性，最後再透過醫檢儀器進行驗證。

水平風洞利用機率的觀念統計孢子的分布，透過孢粉落下的高度差，帶入公式求得質量。垂直風洞則使用高倍率攝影鏡頭觀察孢子飛行，利用三力平衡的觀念推算其微小質量。

最後，無論是自製風洞測出的質量、精確度、成本、測量速度和加速度的能力以及花費時間的長久，本實驗的儀器皆有優勢。

Abstract

In my study, I have designed two experimental devices. One is a horizontal wind tunnel and the other, a vertical wind tunnel. With these two devices I ran experiments based on floating simulation testing and to use this to calculate the movement of tiny substances.

In order to ensure my homemade wind tunnels were accurate, I used small Styrofoam balls as the experimental standard substance. I calculated the average of the Styrofoam ball mass in wind tunnel using the analytical balance measurement application. Using this data I was able to confirm the ability and accuracy of wind tunnel to measure tiny substance movements.

After establishing the accuracy of my wind tunnels, I proceeded on with my experiment. Beginning with the horizontal wind tunnel, I shot two kinds of spores individually into the wind tunnel, and observed the distribution of spores by using statistical techniques. At the end of this procedure, I was able to calculate the different heights in the tunnel of the two types of spores and estimated the average mass, of the two spores.

Next, I began running this same test, shooting two spore types into the vertical wind tunnel, at this point introducing Dandelion seeds as a new substance to observe, using a high magnification lens. As the spores reached terminal velocity, I used the concept of mechanical formulas to infer the spore's average mass.

To verify the data of my wind tunnels, I used the counting chamber and hematology analyzer. Consequently, the mass of all data stayed centered around the minus eighth power of ten grams.

In conclusion, my experiments concluded that my homemade wind tunnels were able to accurately measure these tiny substances... Thank you for listening and for your time.

壹、前言

一、研究動機：

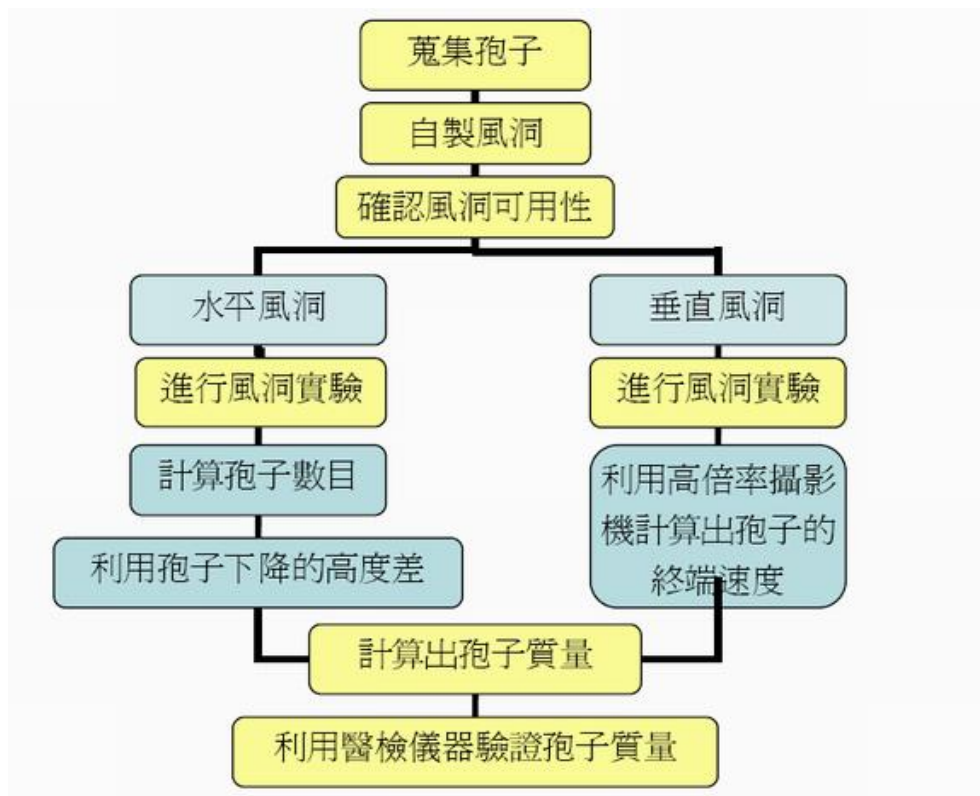
起初是要做蕨類孢子在不同風速中落下時的終端速度比，在設計實驗的過程中卻遇上了難關，因為物理公式中需要其質量，但蕨類的粉狀孢子極為細小，其大小約在 20-30 μm 之間，但測量微小質量的機器皆十分昂貴。此時，我們開始反向思考：如果我們設計一個小型風洞並控制空氣阻力等變因，便可利用物理公式推知其微小質量，做為一微小質量測量的方法。

二、目的：

- (1) 設計風洞測量微小質量的方法
- (2) 以保麗龍球作為標準物並利用醫檢儀器驗證測量方法的可行性
- (3) 分析南洋山蘇(*Asplenium australicum* (J.Sm.) Hook)及翅柄鳳尾蕨(*Pteris grevilleana* Wall)在受風狀態下的運動量

貳、研究方法或過程

一、研究流程



二、研究方法

1. 孢子蒐集方法

- (1) 將有孢子囊堆的葉片，裝於標本紙袋中。
- (2) 放置烘箱中以 50°C 烘烤 4 天，以利孢子釋放。
- (3) 用刷子將葉子上的附著物刷落於紙上。
- (4) 因為孢子的質量與體積很小，較易附著於紙上，因此以抖動方式重複數次，即可將孢子與其於雜質(如孢子囊、葉子碎片)分離。
- (5) 用刷子將孢子集於蠟紙袋內。

2. 風洞應用原理

物質於水平風洞與垂直風洞中受到了以下三種力的作用：

(1) 重力

物質下降的力量為重力，重量 W （重力）等於體積乘上密度，及下墜加速度。假設物質為完美球型式子可寫成

$$W = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$$

其中 r 為物質半徑， g 為下墜加速度， ρ 為物質密度。

(2) 浮力

為更精確的計算物質的重量，計算時需將重量減去空氣對物質造成的浮力 B 。假設物質為完美球形，則式子可寫成

$$B = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{air}} g$$

其中 r 為物質半徑， g 為下墜加速度， ρ_{air} 為空氣密度。

(3) 空氣阻力

除了重力與浮力，物質下降時還受到向上的空氣阻力。根據斯托克定律推算物質所受的空氣阻力

$$F = 6\pi r \eta v_1$$

其中 r 為物質半徑， η 為空氣的黏滯係數， v_1 為物質的終端速度。

物質在運動過程中受了以上三種力的作用產生合力，但由於風洞裝置本身的不同帶入的方程式也將不同

(4) 水平風洞：由合力 $\sum F = -W + F + B$ 可得物質速度隨時間變化之

方程式，再將其對時間積分兩次可得其位移方程式

$$\Delta y = -\frac{mg - B}{k}t + \frac{m^2g - Bm}{k^2}\left(e^{\frac{k}{m}t} - 1\right)$$

藉由物質掉落時的高度差求出物質的質量

(5) 垂直風洞：物質到達終端速度時，加速度為零，此時作用於物質

的合力為零，使空氣阻力(F)加浮力(B)與重力(W)互相抵消，也

就是 $F+B=W$ ，得到終端速度後便得物質質量。

另外，在計算物質受力時有以下的假設：

- (1) 將物質設為等體積大小的完美球體
- (2) 假設物質受力不旋轉
- (3) 假設噴入氣流不影響結果
- (4) 物質飛行速度與風洞風速相同

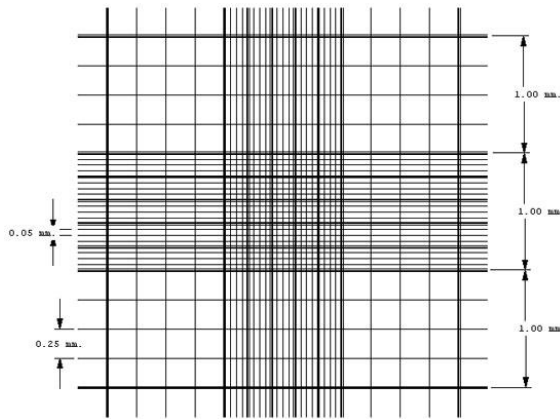
3. 分析天秤量測

為驗證本實驗裝置正確，利用可量測到公克小數點後四位的分析天平，量測一顆孢子的質量：

- (1) 量測孢子質量
 - a. 將塑膠管放入分析天平內歸零
 - b. 以勺子將孢子倒入塑膠管，放入分析天平，直到孢子秤至 0.0150 克
 - c. 用 PIPETTE 微量吸入 100 μ ml 的水 10 次並倒入塑膠管中，均勻搖擺至未見孢子團狀分布。
- (2) 血球計數器

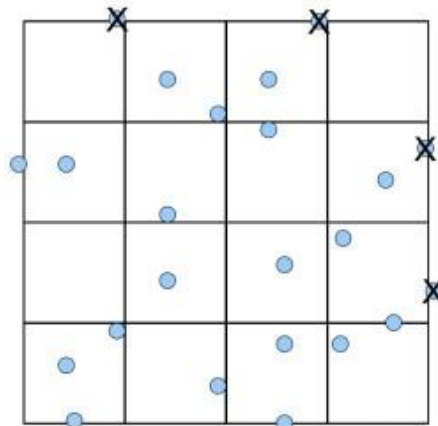


圖(一) 血球計數器



圖(二) 血球計數器的九宮格

- a. 血球計數器上有 9mm^2 的九空格，
- b. 九空格內又有 400 格小格，最小單位面積為 0.0025mm^2 。
- c. 將塑膠管中的水與孢子倒入血球計數器中，並平攤於血球計數器上，再蓋上蓋玻片。
- d. 將血球計數器放於光學顯微鏡上，以 100 倍率觀察。
- e. 以人工方式用 100 倍率數九空格上的孢子總數，邊界上的孢子則是兩邊算、兩邊不算，如圖(三)。



圖(三) 計數原則

4. 自動血球計數儀
 - (1) 使機器吸入 0.0150g 的孢子。
 - (2) 由螢幕即可得其數目。

三、實驗設計：

1. 水平風洞

- (1) 使用自製風洞，自側邊距頂部 35mm 插入填有孢子之毛細管(插於塑膠滴管)。將振動器對準滴管擠壓處。
- (2) 於出風口(距離管口 20cm)左、中、右各黏一條寬 1.2cm 的膠帶，中間留之空隙為不使管內氣流受到影響、產生亂流。
- (3) 開啟風扇，以 2m/s 速度吹送。
- (4) 開啟振動器擠壓滴管，噴出孢子。
- (5) 以相同風速重複 1-5 動作三次，使膠帶上有足夠觀察之孢子附著。
- (6) 將膠帶置於顯微鏡下以 40 倍率觀察，視野對於寬之中線，自上端開始每隔 5mm 數一次視野內孢子數。

2. 垂直風洞

- (1) 使用高 150 公分×長 30 公分×寬 30 公分的自製風洞，並於管底下方 30 公分處，每 10 公分開一個噴發孢粉的孔洞，共開了 6 個洞。
- (2) 上方為 4 個抽風的風扇，並以電源供應器適時調整風速，讓孢粉達到等速度或是停滯在空中。
- (3) 選定一孔洞後將其餘五個以膠帶封閉，並在 2 面壓克力板內以黑紙覆蓋以利於觀察微小物質，另 2 面則是觀察面與燈光發射處。
- (4) 開啟空壓機後，將管子密封於吸管内，內部的孢粉便噴發，孢粉隨向上的抽風達終端速度。
- (5) 高倍率攝影機捕捉孢粉運動情形
- (6) 分析與推算微小物質質量

參、研究結果與討論

一、研究結果

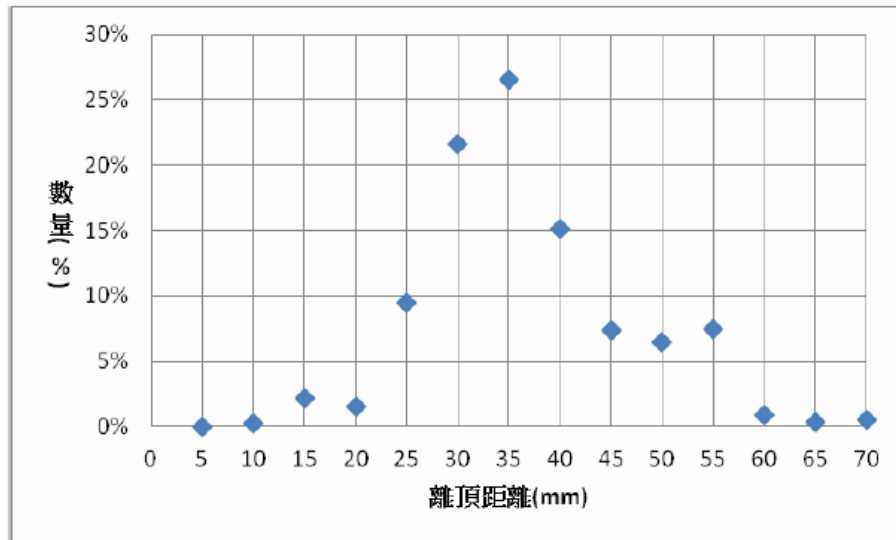
(一) 水平風洞

1. 南洋山蘇高度分布：

- a. 左側孢子高度分布分析：從表(一)數據可看出許多次分布有兩個高蜂值，推測原因為噴出後，末端產生分流，加上靠近管壁，因此分布略為混亂。將各數據分布百分比平均後得圖(四)。

表(一)左側膠帶孢子顆數及高度分布

離頂距(mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	總和
[1]	0	0	9	7	5	64	100	50	15	65	31	0	0	1	347
[2]	0	0	1	0	3	16	6	1	6	0	0	0	0	0	33
[3]	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	0	5
[4]	0	0	1	2	15	39	34	9	17	34	0	0	0	0	151
[5]	0	0	9	13	42	48	73	32	9	0	0	0	0	0	226
[6]	0	0	1	1	7	28	50	73	38	3	0	1	3	0	205
[7]	0	4	42	22	68	150	64	46	31	129	1	0	3	0	560
[8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[9]	0	0	0	0	1	59	104	39	6	0	0	0	0	3	212
[10]	0	0	1	0	62	124	65	30	0	4	0	1	0	0	287
[11]	0	0	0	4	5	59	91	51	1	0	2	0	0	0	213
[12]	0	4	2	0	20	45	61	10	4	3	3	2	0	0	154
[13]	0	0	4	2	8	3	6	10	0	0	0	0	1	2	36
[14]	0	0	0	2	13	39	121	121	100	84	40	0	0	0	520
[15]	0	0	0	0	3	1	0	0	3	1	8	2	0	0	18
總和	0	8	70	53	252	675	777	473	230	323	87	6	7	6	1527
百分比(%)	0.0	0.5	4.6	3.5	16.5	44.2	50.9	31.0	15.1	21.2	5.7	0.4	0.5	0.4	100.0

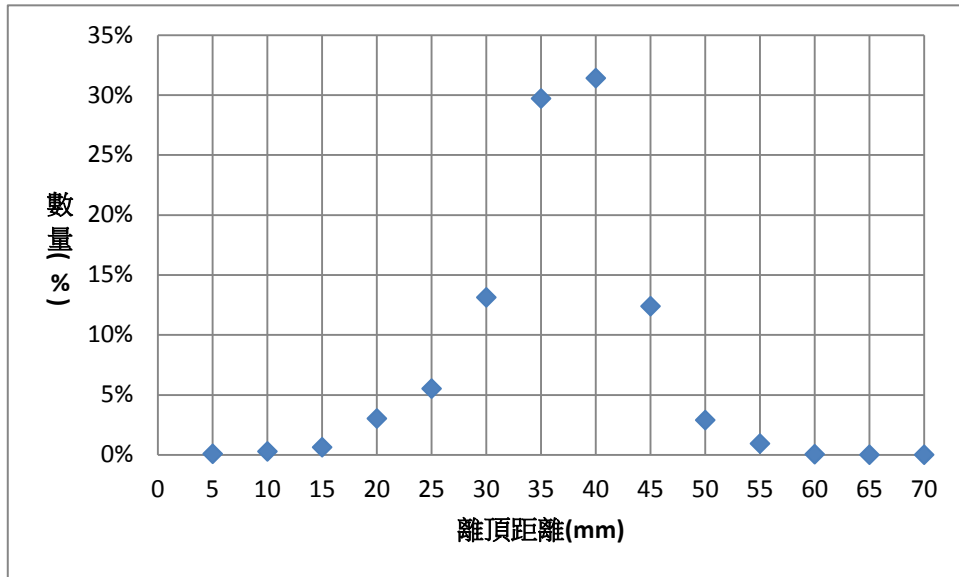


圖(四)左側膠帶孢子高度分布百分比

- b. 中間孢子高度分布分析：由表(二)可看出每筆數據非常一致，將各數據分布百分比平均後得圖(五)。呈常態分佈，南洋山蘇部分結果以此部分為代表。

表(二)中間膠帶孢子顆數及高度分布

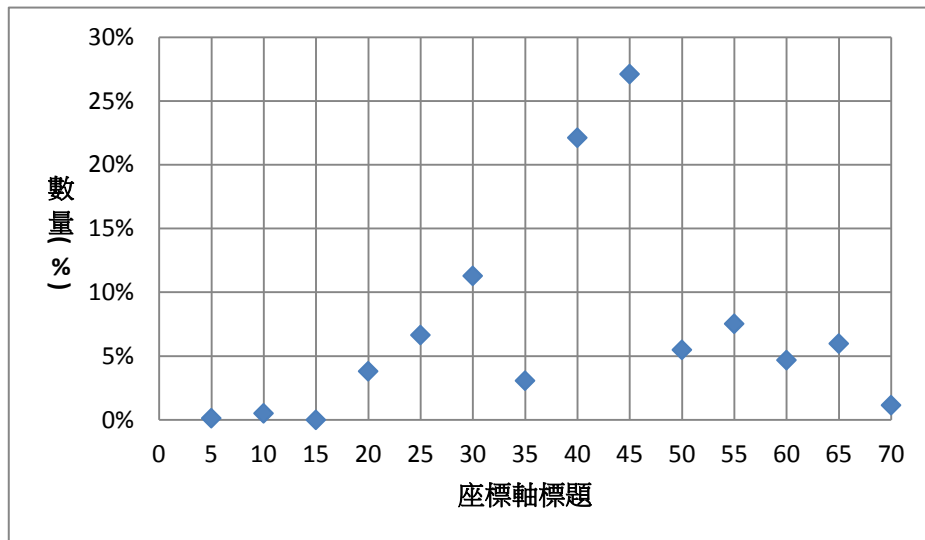
離頂距(mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	總和
[1]	1	0	2	0	3	15	100	147	66	0	0	0	0	0	334
[2]	0	0	9	114	48	67	117	230	18	2	1	2	0	0	608
[3]	0	5	1	24	31	190	249	203	94	16	0	0	0	0	813
[4]	0	0	1	5	23	40	111	52	8	0	0	0	0	0	240
[5]	0	0	1	2	13	41	99	105	1	0	0	0	0	0	262
[6]	2	7	12	21	24	22	39	73	27	0	0	0	0	0	227
[7]	0	0	0	1	1	26	32	99	67	60	15	1	0	0	302
[8]	0	0	0	3	2	77	195	196	104	35	0	0	0	0	612
[9]	0	0	1	4	50	140	117	122	68	0	0	0	0	0	502
[10]	0	0	2	9	12	23	81	86	41	15	12	0	0	0	281
[11]	0	0	0	0	1	105	199	165	131	47	23	0	0	0	671
[12]	0	0	1	28	59	47	77	267	47	0	0	0	0	0	526
[13]	0	2	0	0	7	30	152	129	109	8	5	0	0	0	442
[14]	0	0	0	2	76	67	167	92	68	4	0	0	0	0	476
[15]	0	0	0	4	5	56	239	114	5	2	0	0	0	0	425
總合	3	14	30	217	355	946	1974	2080	854	189	56	3	0	0	6721
百分比(%)	0.0	0.2	0.4	3.2	5.3	14.1	29.4	30.9	12.7	2.8	0.8	0.0	0.0	0.0	100.0



圖(五)中間膠帶孢子高度分布百分比

- c. 右側孢子高度分布分析：表(三)中，不論是每筆數據或平均百分比。從表(三)中可看出每筆數據孢子數少，且分布不一致，不易看出其規律。推測是因為靠近噴出口。數據僅蒐集 7 組便停止。

表(三)右側膠帶孢子顆數及高度分布



離頂距(mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	總合
[1]	0	2	0	0	2	0	0	23	17	1	0	4	1	4	54
[2]	0	0	0	0	0	1	2	10	10	2	6	2	7	0	40
[3]	1	0	0	0	0	1	3	27	25	10	24	12	9	1	113
[4]	0	0	0	0	2	0	0	1	3	2	1	1	1	0	11
[5]	0	0	0	1	0	2	1	7	6	0	1	0	0	0	18
[6]	0	0	0	23	27	20	9	10	6	5	2	1	6	0	109
[7]	0	0	0	0	0	6	0	1	6	0	0	0	0	0	13
總和	1	2	0	24	31	30	15	79	73	20	34	20	24	5	358
百分比(%)	0.3	0.6	0.0	6.7	8.7	8.4	4.2	22.1	20.4	5.6	9.5	5.6	6.7	1.4	100.0

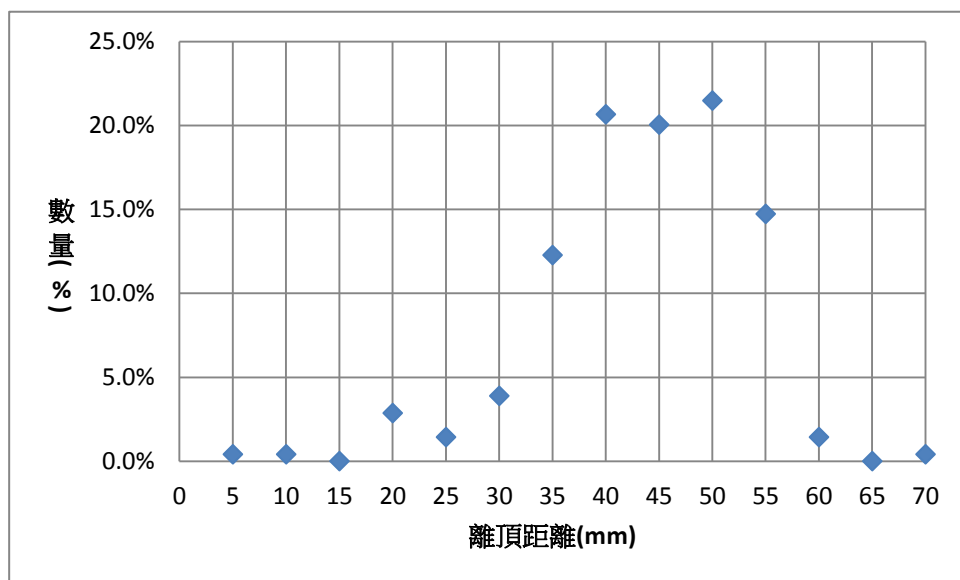
圖(六) 右側膠帶孢子高度分布百分比

2. 翅柄鳳尾蕨高度分布：

因有南洋山蘇的經驗，此部分數據只取中間膠帶之分布。

表(四) 中間膠帶孢子顆數及高度分布

離頂距(mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	總和
[1]	0	0	0	0	0	6	29	42	34	86	62	7	0	0	266
[2]	0	0	0	0	0	1	2	12	12	9	9	0	0	0	45
[3]	2	2	0	0	0	1	4	4	5	1	0	0	0	2	21
[4]	0	0	0	14	7	8	13	11	8	0	0	0	0	0	61
[5]	0	0	0	0	0	3	12	32	39	9	1	0	0	0	96
總和	2	2	0	14	7	19	60	101	98	105	72	7	0	2	489
百分比(%)	0.4	0.4	0.0	2.9	1.4	3.9	12.3	20.7	20.0	21.5	14.7	1.4	0.0	0.4	100.0

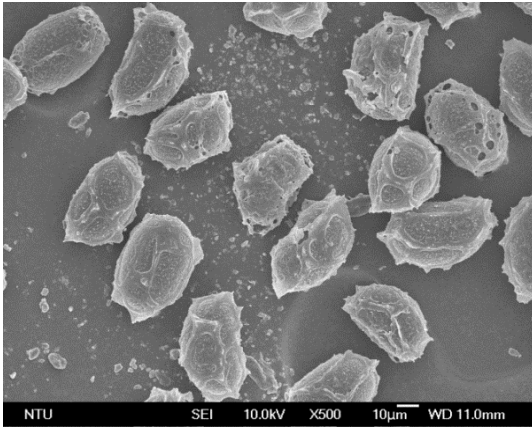


圖(七) 中間膠帶孢子高度分布百分比

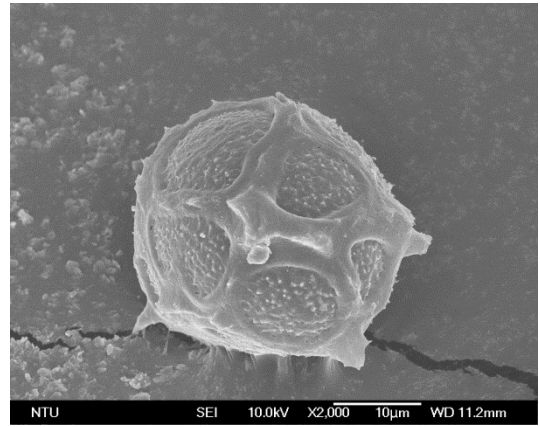
3. SEM 拍攝結果：

由南洋山蘇孢子 SEM 電顯照片可見(圖八-十三)，赤道面為豆型呈左

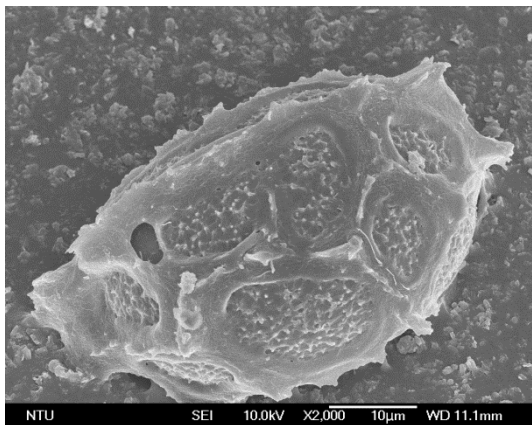
右對稱，長約 $40\mu\text{m}$ ，寬約 $20\mu\text{m}$ ；極面呈圓形，半徑約 $20\mu\text{m}$ 。體積約 $16000\mu\text{m}^3$ ，換算同體積圓球半徑 r 約 $23\mu\text{m}$ ；翅柄鳳尾蕨呈圓角三角形，高約 $50\mu\text{m}$ ，設其為半徑 $25\mu\text{m}$ 的球體。



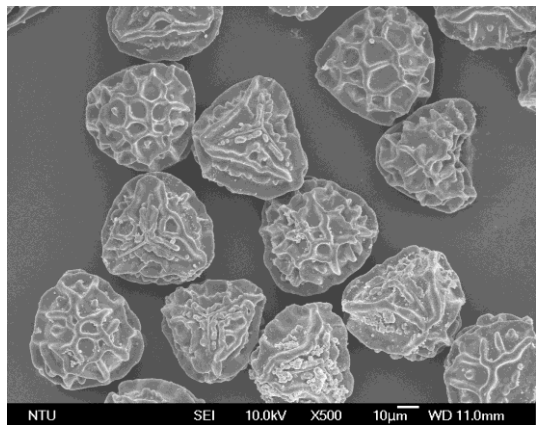
圖(八)南洋山蘇 SEM



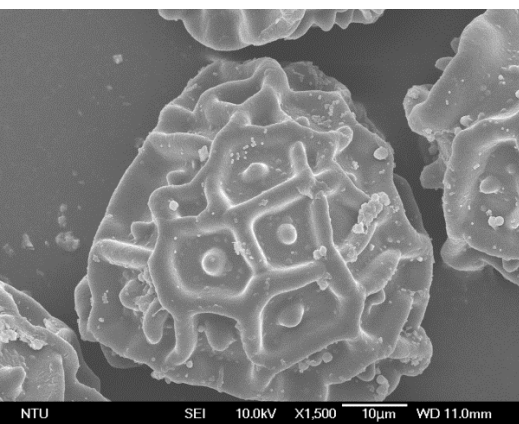
圖(九)南洋山蘇極面觀



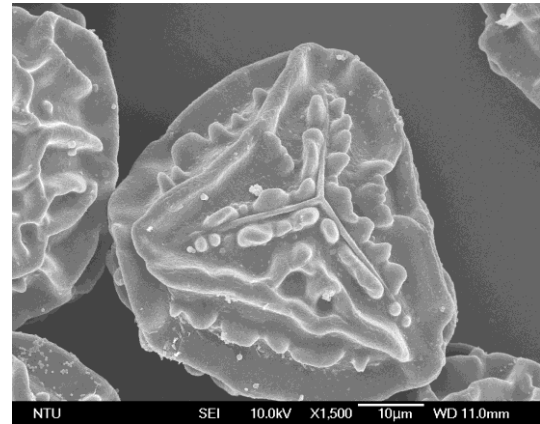
圖(十)南洋山蘇赤道面觀



圖(十一)翅柄鳳尾蕨 SEM



圖(十二)翅柄鳳尾蕨極面觀(正)



圖(十三)翅柄鳳尾蕨極面觀(反)

4. 孢子質量推算：

數據中，兩種蕨類中間膠帶的高度分布都呈常態分布。以下方式計算其曲線方程式：

設高度為 x_i (為 5,10,15.....)，各高度對應之孢子數百分比為 n_i

$$\frac{\sum_1^{14}(x_i \times n_i)}{\sum n_i} = \mu$$

μ 為峰值(期望值)，再求其標準差 σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i (x_i - \mu)^2}{\sum n_i}}$$

再帶入常態分布公式

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

將兩蕨類數據帶入，算出孢子分布機率最大的高度 μ ，相對於初始高度 35mm 得 Δy 。將兩者帶入先前推導的公式中，即可得到每顆孢子的質量：

a. 南洋山蘇： $\mu=36.55\text{mm}$ ， $\Delta y=1.55\text{mm}=0.00155\text{m}$ 。

質量 $1.2 \times 10^{-8}\text{g}$

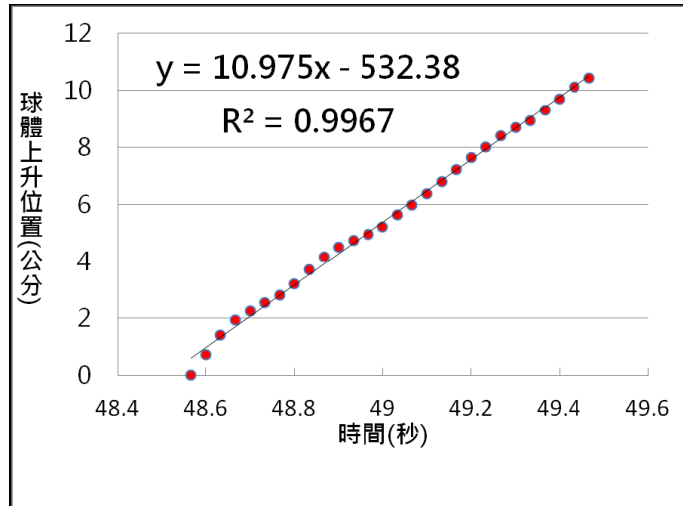
b. 翅柄鳳尾蕨： $\mu=43.71\text{mm}$ ， $\Delta y=8.71\text{mm}=0.00871\text{m}$ 。

質量 $5.9 \times 10^{-8}\text{g}$

(二) 垂直風洞

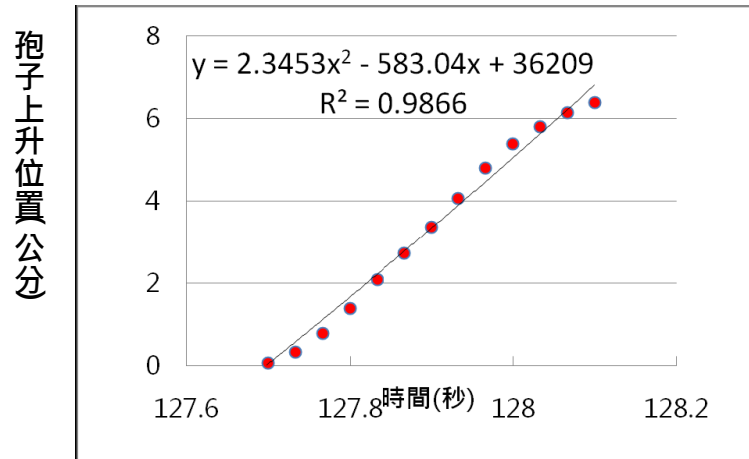
1. 標準物——小保麗龍球

a. 運動量分析：利用 tracker 軟體，分析物質在垂直風洞中的運動情形，由影片分析並找到成等速度的物質，便可知道物質的斜率，進而帶入公式算出質量。



圖(十四) 小保麗龍球數據圖

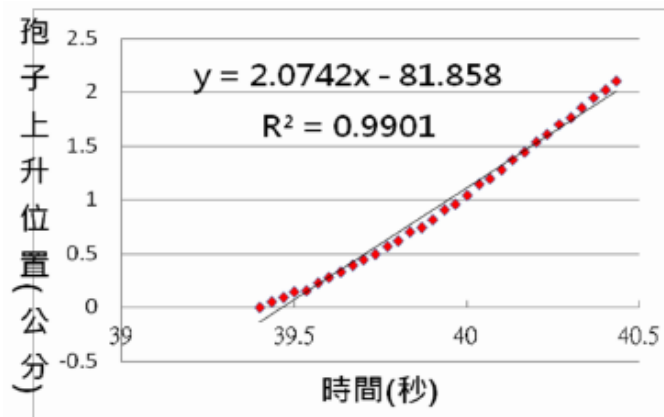
b. 受抽風力的速度變化：



圖(十五) 小保麗龍球速度變化圖

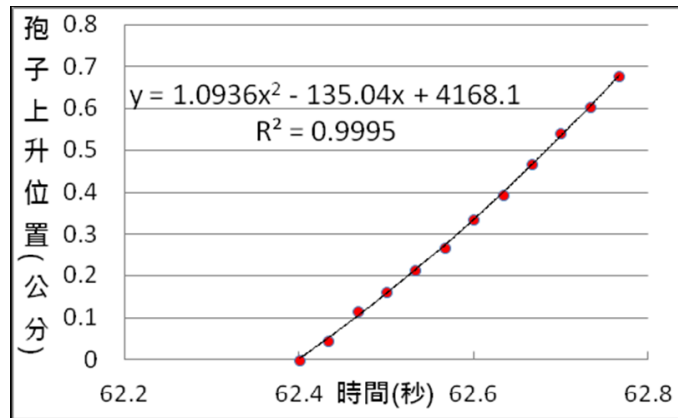
2. 南洋山蘇孢子

a. 運動量分析：



圖(十六) 南洋山蘇孢子數據圖

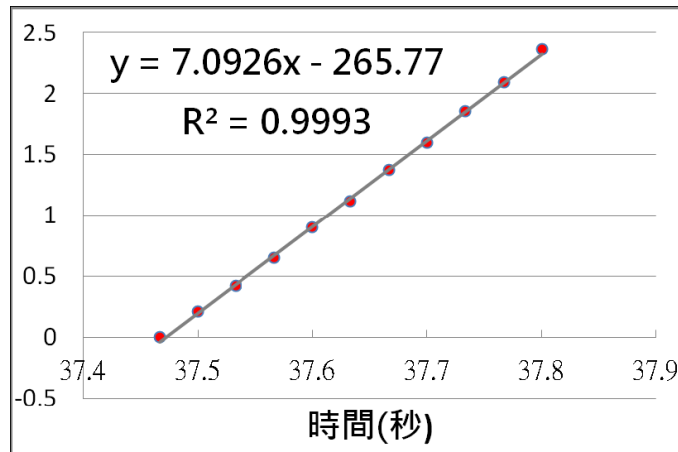
b. 受抽風力的速度變化：



圖(十七) 南洋山蘇孢子速度變化圖

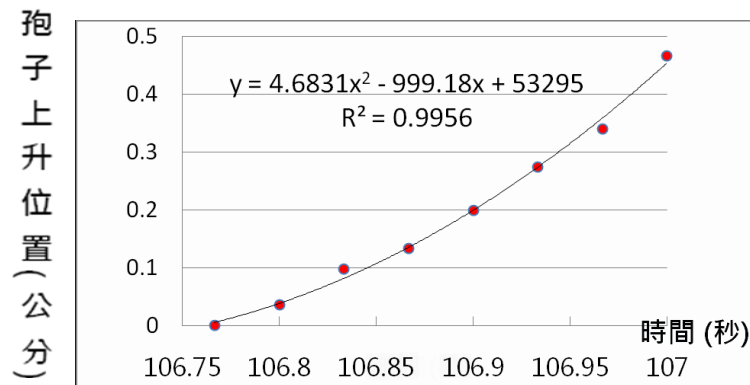
3. 翅柄鳳尾蕨孢子

a. 運動量分析：



圖(十八) 翅柄鳳尾蕨孢子數據圖

b. 受抽風力的速度變化：



圖(十九) 翅柄鳳尾蕨孢子速度變化圖

4. 物質質量計算

數據中，三種物質都呈現斜直線，也就是等速度。得知物質的速度後，便可帶入以下公式計算其質量：由一些基本的物理公式，知道此合力的重力等於浮力和空氣阻力的總合。

$$F + B = W$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{air}} g + 6\pi r \eta v = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$$

再將三物質數據帶入後，即算出物質質量：

- a. 小保麗龍球：質量 $2.39 \times 10^{-5} \text{g}$
- b. 南洋山蘇：質量 $1.72 \times 10^{-8} \text{g}$
- c. 翅柄鳳尾蕨：質量 $6.32 \times 10^{-8} \text{g}$

5. 物質平均加速度

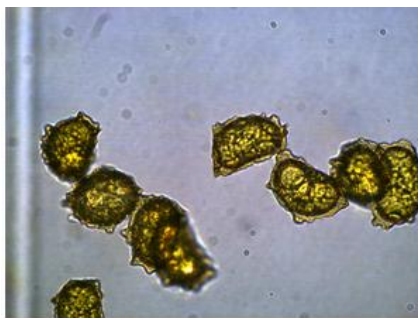
由圖(十五)、圖(十七)以及圖(十八)的圖形趨勢，得物質至起始位置的速度變化：

- a. 小保麗龍球：平均加速度 4.69cm/s^2
- b. 南洋山蘇：平均加速度 2.19cm/s^2
- c. 翅柄鳳尾蕨：平均加速度 9.37cm/s^2

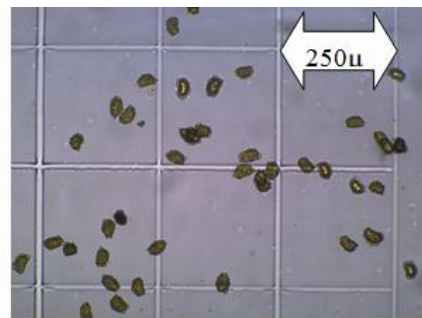
(三) 驗證孢子質量

1. 人工方式—血球計數器和光學顯微鏡

a. 南洋山蘇孢子



圖(二十) 400 倍率的孢子



圖(二十一) 100 倍率的孢子

用微量天平秤得0.0150克的南洋山蘇孢子，並與1mL的水混合均勻，倒在血球計數器上並蓋上蓋玻片，經光學顯微鏡算得：血球計數器上，共計有372顆南洋山蘇孢子(九大格)

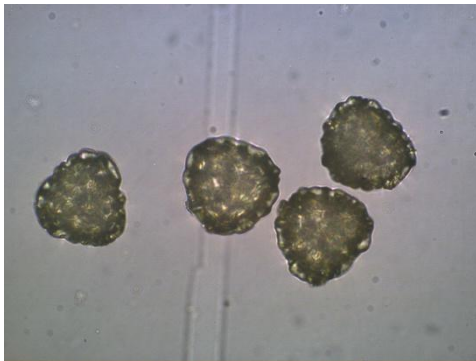
九大格體積為 $0.1\text{mm}(\text{蓋玻片與血球計數距離})\times 3\text{mm}\times 3\text{mm}=0.9\text{mm}^3$

所以換算成 1.0mm^3 共有 $372\div 0.9=413$ 顆孢子

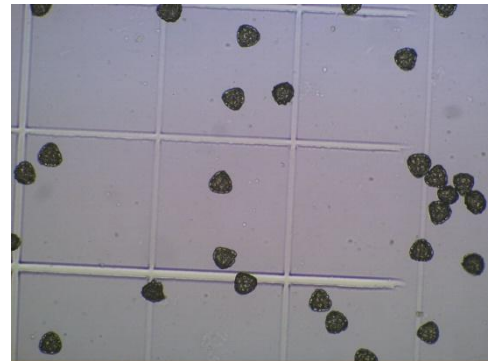
故 1ml的水總共有 $413\times 1000=413,000$ 顆孢子

\therefore 求得一顆孢子質量為 $0.0150\text{g}\div 413,000 \text{顆}=3.632\times 10^{-8}\text{g}$

b. 翅柄鳳尾蕨孢子



圖(二十二) 400 倍率的孢子



圖(二十三)100 倍率的孢子

用微量天平秤得0.0150克的翅柄鳳尾蕨孢子，並與1mL水混合均勻，倒在血球計數器上並蓋上蓋玻片，經光學顯微鏡算得：

血球計數器上，共計有220顆翅柄鳳尾蕨孢子(九大格)

九大格體積為 $0.1\text{mm}(\text{蓋玻片與血球計數距離})\times 3\text{mm}\times 3\text{mm}=0.9\text{mm}^3$

所以換算成 1.0mm^3 共有 $220\div 0.9=244$ 顆孢子

故 1ml的水總共有 $244\times 1000=244,000$ 顆孢子

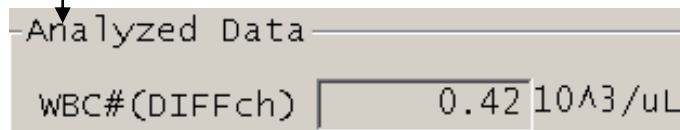
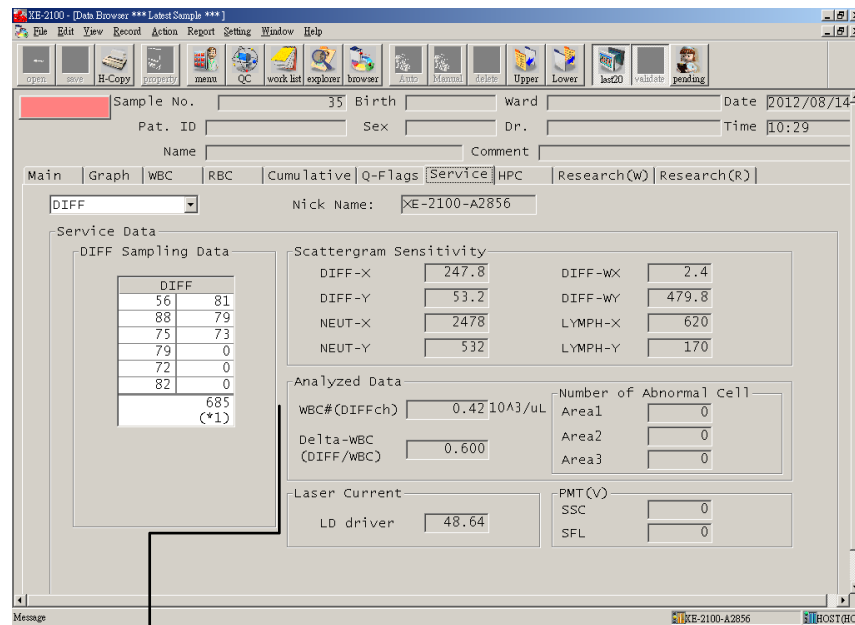
\therefore 求得一顆孢子質量為 $0.0150\text{g}\div 244,000 \text{顆}=6.148\times 10^{-8}\text{g}$

2. 機器方式—自動血球計數儀



圖(二十四) 自動血球計數儀

c. 南洋山蘇孢子



圖(二十五) 機器銀幕畫面→顆數顯現的放大畫面

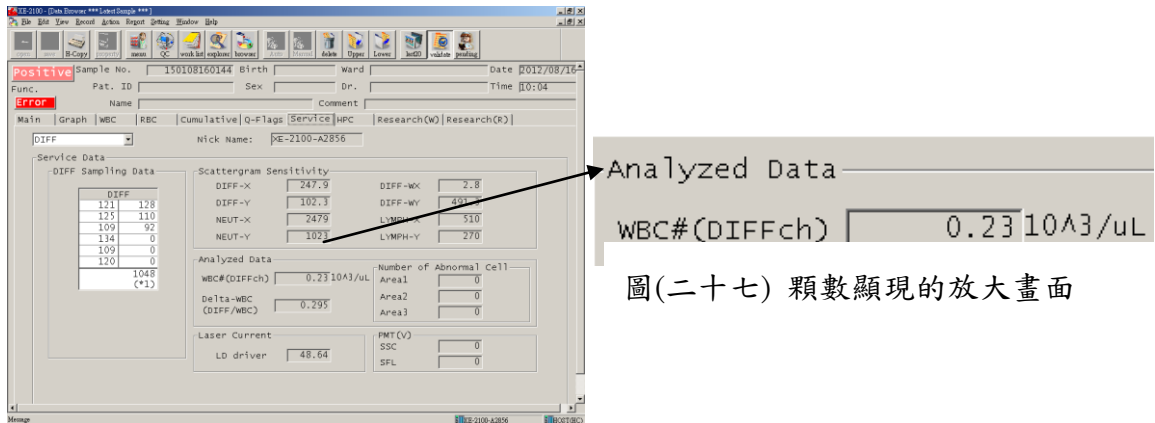
用微量天平秤得 0.0150 克的南洋山蘇孢子，並與 1ml 的水混合均勻放入機器中，由機器銀幕得知：

每 1.0mm³ 的水共有 420 顆南洋山蘇孢子

故 1ml 的水總共有 420×1000=420,000 顆孢子

∴求得一顆孢子質量為 0.0150g÷420,000 顆=3.571×10⁻⁸g

d. 翅柄鳳尾蕨孢子



圖(二十七) 顆數顯現的放大畫面

圖(二十六) 機器銀幕畫面

用微量天平秤得 0.0150 克的翅柄鳳尾蕨孢子，並與 1ml 水混合
 均勻放入機器中，由機器銀幕得知：

每 1.0mm³ 的水共有 230 顆翅柄鳳尾蕨孢子

故 1ml 的水總共有 230×1000=230,000 顆孢子

∴求得一顆孢子質量為 0.0150g÷230,000 顆=6.522×10⁻⁸g

二、討論

(一) 水平與垂直的測量結果

表(五)確保儀器準確度

測量對象	方法	垂直風洞	分析天秤
	小保麗龍球孢子質量		2.39×10 ⁻⁵ 克

表(六)兩種孢子在不同測量方法下的結果

方法 測量對象	水平風洞	垂直風洞	人工方式 血球計數盤	自動血球 分析儀
南洋山蘇 孢子質量	1.2×10^{-8} 克	1.72×10^{-8} 克	3.632×10^{-8} 克	3.571×10^{-8} 克
翅柄鳳尾蕨 孢子質量	5.9×10^{-8} 克	6.32×10^{-8} 克	6.148×10^{-8} 克	6.522×10^{-8} 克

(二) 孢子數據比較圖

根據表(六)，利用自製風洞所測量南洋山蘇孢子質量與醫檢儀器數據差距較翅柄鳳尾蕨大，所以我們開始探討兩種蕨類孢子的差異，並由公式中找出影響質量的變因：孢子半徑-若南洋山蘇孢子半徑較小，理論上質量應該會比原先大，但數據並非如此，由此可知孢子半徑不是影響差距的因素，於此推測是孢子形狀造成數據上的差距。

由 SEM 照片得知，南洋山蘇孢子呈現不對稱的豌豆狀，而翅柄鳳尾蕨孢子呈對稱的三角形狀，因此南洋山蘇孢子飛行時垂直降落速度較慢，滯空時間較長，導致飛行距離較遠。

肆、結論與應用

(一) 結論

1. 我們設計出兩種可以測量微小質量的方法
 - a. 水平風洞統計法：經由孢子直線飛行一段距離後，下降的高度差，計算求得孢子質量。
 - b. 垂直風洞攝影法：藉由孢子在風洞中達到三力平衡，求出終端速度後，代入公式得孢子質量。
2. 為了驗證本實驗結果的精確性，同時利用兩種醫檢儀器進行抽樣

統計，求得母群的總個數，除以母群總質量，得每顆微粒較準確的質量。再與兩種風洞實驗方法的結果進行比對。

a. 人工方式血球計數盤

b. 自動血球分析儀

3. 總結：自製風洞優勢

無論是我們測出的質量、精密度、成本、得速度與加速度的能力，以及時間的長短，本實驗儀器都有優勢。

(二) 應用

利用自製風洞的設計與理念—水平風洞的統計分析與垂直風洞中的力平衡攝影分析等，繼續延伸：

1. 繼續改良本實驗儀器的精確度，以及適用範圍
2. 得物質質量並帶回 $f+B=W$ 的公式，得各種物理量，以研究之
3. 研究各種微小物質的質量及運動量測量及其應用，例如：灰塵的沾粘狀態分析、落塵量的測量等
4. 研究不同植物孢粉的傳播和範圍

伍、參考文獻

1. 王瑋龍、王麒麟、沈明雅、郭禮瑜。2004。利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)技術觀察台灣產 10 種碗蕨科孢子形態。取自特有生物研究保護中心：http://tesri.coa.gov.tw/show_index.php。
2. 吳冠賢、林坤霈、蕭舜鴻。2007。談紙神功—紙飛機的滑翔研究。取自中華民國第四十七屆中小學科學展覽會。
3. 林子真、陳昱雯、董懿萱。2010。看你飛多久—火焰木種子滯空的奧秘。中華民國第五十屆中小學科學展覽會。
4. 李柏萱、林郁翰、張祐誠、梁靖怡、葉怡君、戴珊。2008。種子飛機—飛翔果實的構造分析與飛行模擬。中華民國第四十八屆中小學科學展覽會。

5. 邱文良、黃曜謀、翁韶良。2003。蕨類植物孢子的收集與保存。台灣林業科學。18 卷 1 期。取自 <http://www2.tfri.gov.tw>。
6. 牟善傑。2000。台灣蕨類植物的多樣性及其保育。取自塔山自然實驗室：<http://tnl.twbbs.org/tnlhome.htm>。
7. 陳友剛副教授-長榮管理學院職業安全衛生系、勞工衛生組。氣罩外氣流干擾外裝型氣照補集能力研究。勞工安全衛生簡訊第四十八期。
8. 溫怡文、蘇銘言、蘇桂瑢、劉怡佳。風中奇緣—桃花心木種子的傳播。國立旗美高中。
9. 連振昌。2000。農業機械學刊 89.09。第 9 卷第三期。
10. 游云豐。2008。流場可視化定性觀察及產品設計應用。取自朝陽科技大學碩博士論文系統。
11. 簡志祥。2008。御風飛行—自製垂直風洞看種子飛行。取自科學月刊

評語

研究分析探討具有未來實用化之可能，亦可應用未來微細顆粒之質量精測，唯建議可多考量不同性質顆粒測量，如多孔性細粉材質、不同幾何形狀物質等。