

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

探究精神獎

051904

坑坑洞洞的秘密－探討隕石坑型態及形成原因

學校名稱：臺中市立臺中女子高級中等學校

作者： 高二 洪菲亞 高二 黃 云	指導老師： 游明珠
---------------------------------	------------------

關鍵詞：隕石坑、散射、撞擊模擬

摘要

本研究的主要目的是探討隕石在不同撞擊條件及不同落下地質環境對撞擊坑大小的影響。分成實驗與電腦模擬兩部分：實驗使用自製模擬實驗設備上，使用體積、質量不同的鋼球作為撞擊物，被撞擊物經多次實驗後，採用麵粉上面鋪上粉筆、鹽或細沙；而模擬利用 Impact Earth 模擬器來模擬隕石進入地球時所產生的隕石坑。利用實驗結果推測月球隕石坑的撞擊角度和產生隕石坑所需的能量，進而推測外星天體上造成隕石坑的隕石大小和撞擊角度。研究結果發現，撞擊物動能愈大的隕石，坑洞大小、震波大小、散射的角度與散射的距離也呈正相關，而被撞物表面材質越軟、厚度越厚，相關坑洞數值也越大，但是，模擬中卻顯示，和地面的夾角愈接近 90 度的隕石所造成的隕石坑愈大。

壹、 研究動機

太空航行的技術日益成熟，近年來傳回地球的太空資訊也愈來愈詳細，現在我們除了月球表面，也可以更清楚的看到離我們更遠的太陽系星體表面的樣子。在月球、火星……等星體上有各式各樣的隕石坑，像是火星上有個看起來像打到泥地裡的隕石坑（如圖 2）或是木星衛星木衛四上形狀稍微不規則的隕石坑（如圖 3）……等，有著各自不同特色的隕石坑，究竟造成各式各樣坑洞的隕石有何不同。隕石坑大小可能會受撞擊角度、隕石直徑、落下速度影響，希望透過簡單的模擬來找到原始隕石可能的大小，並做進一步的分析，探討不同變因，對於隕石坑形態的影響。

研究指出撞擊物撞擊至地面時，其動能以衝擊波形式向下傳至地岩(Ground Rock)，向上傳至撞擊物本身。衝擊波能量以接觸點為中心，與距離平方成反比，造成了汽化、溶化、破碎位移及破裂等現象，其坑洞形成的過程如下圖 1 所示。

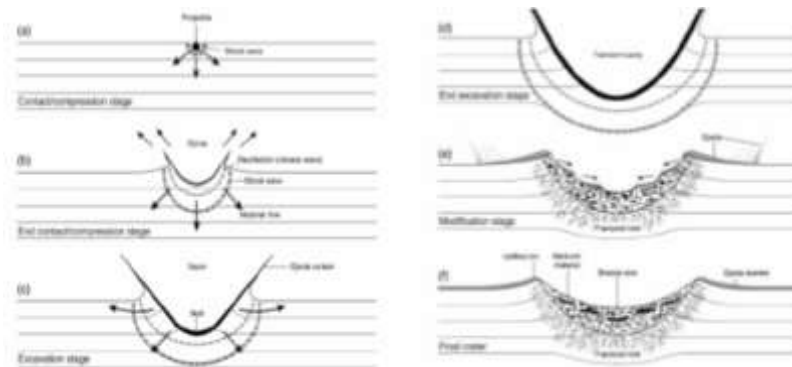


圖 1 撞擊坑形成過程

從歷屆科展相關作品中瞭解到 5 個重要結論，分述如下。但相關的作品中都未討論到撞擊後的散射狀況及坑洞和撞擊物、被撞物的分析與討論，這將是本文主要研究的方向。

- 一、撞擊物的質量越大，產生的坑洞越深、越寬及體積也愈大，但寬深比會先增加後再減少。（如圖 4、5）
- 二、撞擊的速度越快，產生的坑也越深、越寬，且寬深比越大。（如圖 6）
- 三、相同質量的撞擊物，會因密度的不同而讓坑洞的體積改變。（如圖 6）
- 四、入射角愈大，會因撞擊力被分散而讓寬變大，但深度變小。（如圖 7）
- 五、被撞擊物表面愈硬，會因阻力愈大而讓坑洞體積愈小。

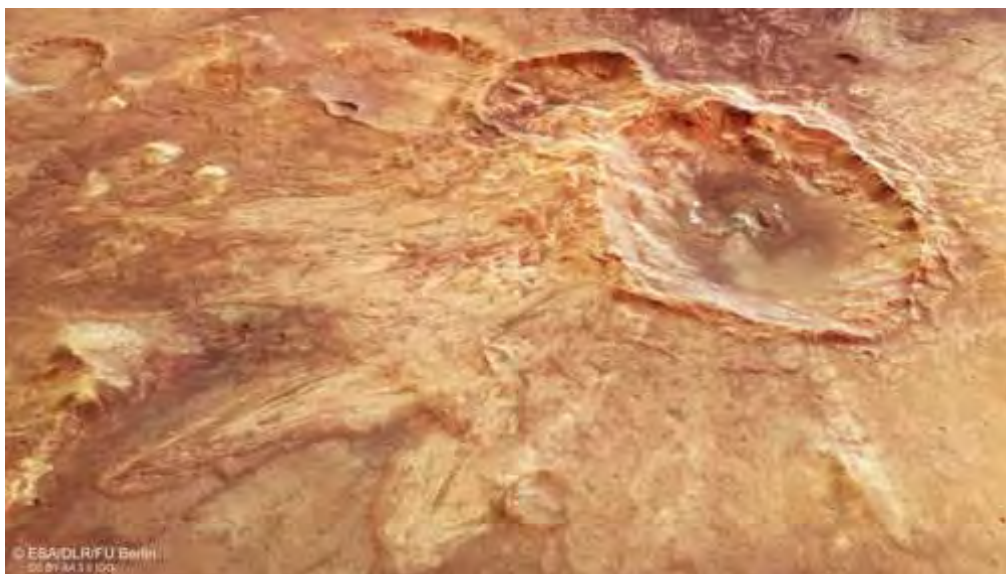


圖 2 火星的 Hellas 盆地以北 32 公里寬的撞擊坑



圖 3 木星衛星 Callisto 上的撞擊坑 Tindr

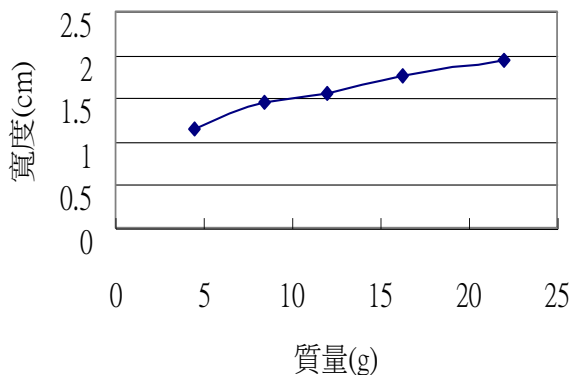


圖 4 撞擊物質量對坑寬度的關係

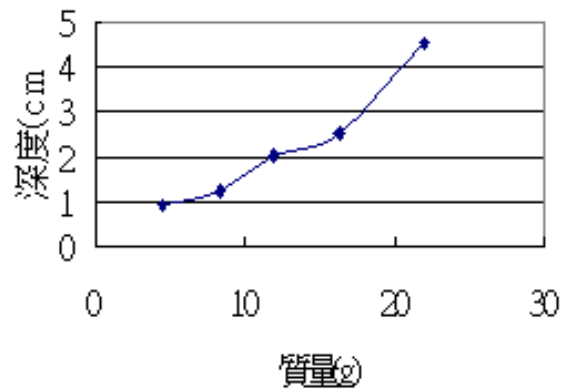


圖 5 撞擊物質量對坑深度的關係

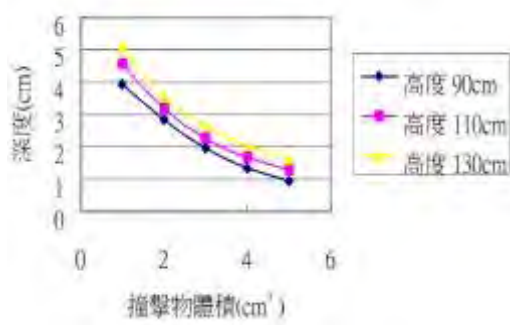


圖 6 不同速度對坑深度的關係

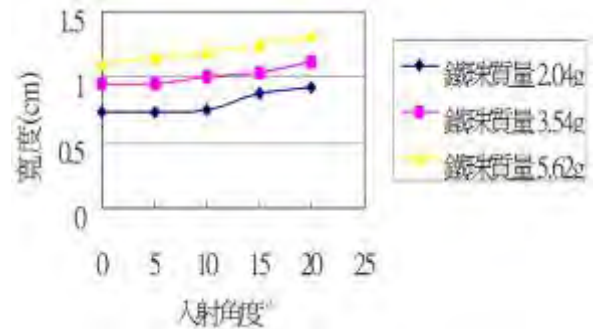


圖 7 撞擊物質量與角度對坑寬度的關係

貳、研究目的

一、實驗部分

- (一) 探討隕石直徑對撞擊坑的影響。
- (二) 探討地質型態對撞擊坑的影響。
- (三) 探討隕石落下角度對撞擊坑的影響。
- (四) 探討撞擊條件對散射的影響。

二、電腦模擬部分

- (一) 隕石直徑對隕石坑直徑及深度的影響。
- (二) 隕石直徑對隕石坑型態的影響(中央峰的有無)。
- (三) 隕石直徑對通過大氣所散失的能量。
- (四) 落下的地質型態對隕石坑直徑及深度的影響。
- (五) 隕石落下角度對隕石坑直徑及深度的影響。
- (六) 隕石落下角度對通過大氣所散失的能量。
- (七) 隕石落下速度對隕石坑直徑及深度的影響。
- (八) 隕石落下速度對通過大氣所散失的能量。

三、利用實驗結果，推論及模擬月球隕石坑撞擊角度和其他天體上的原始隕石大小。

參、 研究設備及器材

- 一、實驗部分：自製發射器、鋼珠(19mm、16mm、11mm)、麵粉、鹽、細沙、廣告原料、各色粉筆、攝影機、電腦、百格紙(1mm, 240×210mm)、砂紙、塑膠箱(260×140×70mm)、電子秤、游標卡尺、量角器、直尺、彈性繃帶。
- 二、模擬部分：
 - (一) 個人電腦
 - (二) 使用軟體：Microsoft Excel、Microsoft Word、Impact Earth

肆、 研究過程或方法

一、 實驗部分：

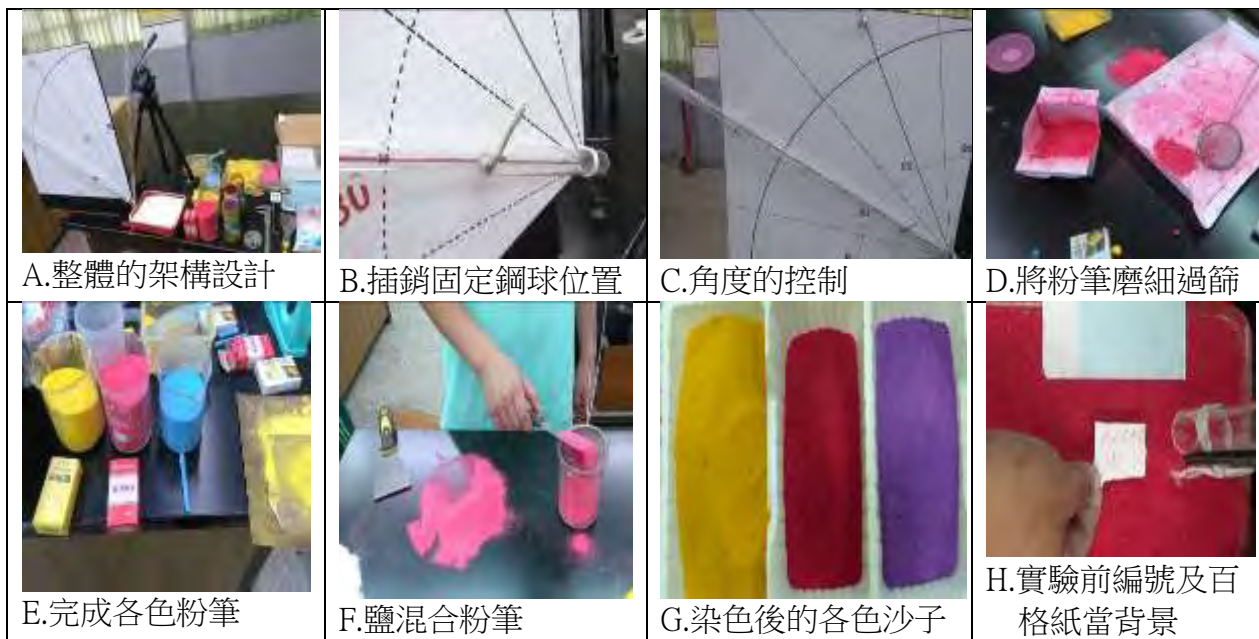
(一)實驗設計：

1. 整體的架構設計：為求系統的穩定性，利用紙箱設計簡單的整體結構，使整體系統能固定不動，以確保其固定性，並在桌面黏貼膠帶確定位置。(圖A)
2. 鋼球運行軌跡方面：利用水管來控制鋼球運動的方向和高度，確保每次的撞擊都能控制在合理的範圍。
3. 速度(高度)的控制方面：將水管在量測後的地方挖洞，每次實驗前先利用插銷固定鋼球位置，利用不同的高度所產生的速度，確定每次的速度都能準確。(圖B)
4. 控制角度的部分：使用大型海報紙確定角度(30°、60°、90°)後，再利用鬆緊帶固定水管，每次做完同角度的實驗後再更動角度，確保實驗的相對準確性。(圖C)
5. 為求實驗的準確性，每次實驗錄影前，利用百格紙當背景，確保實驗後的分析。

(二)材料準備：

1. 撞擊物：大鋼珠直徑19mm，中鋼珠直徑16mm，小鋼珠直徑11mm。
2. 被撞物：使用麵粉當被撞物，表面材質使用粉筆、鹽巴混粉筆、沙子利用顏料染色，以方便觀察。
3. 由文獻知道地層的結構會影響實驗結果，用塑膠盒來穩定此變數，確定每次的撞擊不會撞擊到底部。
4. 各色粉筆利用砂紙磨細後過篩備用。(圖D)

5. 鹽的處理：先將鹽過篩→混合粉筆染色→過篩→完成。(圖F)
6. 沙子的處理，先將沙子清洗→曬乾→過篩→染色→曬乾→過篩→完成(圖G)。
7. 將塑膠箱內裝滿麵粉，再鋪上經步驟4或5或6處理過篩的有色材料，利用不同的參數模擬撞擊後結果。為了模擬撞擊後會產生明顯的散射現象，把不同的沙子、麵粉拿來測試，發現麵粉因重量輕盈容易有散射現象，有利於分析。
8. 每次實驗之前，先把攝影機高度固定，百格紙放於塑膠盒旁邊比對，以便於實驗完後的測量與分析。(圖H)



(三)坑洞基本長度量測：



圖 8 a：坑洞直徑長；
 a'：坑洞的最長距離
 b：經坑洞圓心與 a 相互垂直外圓距離
 c：前震波影響的距離
 d：後震波影響的距離

(四) 散射基本長度量測：

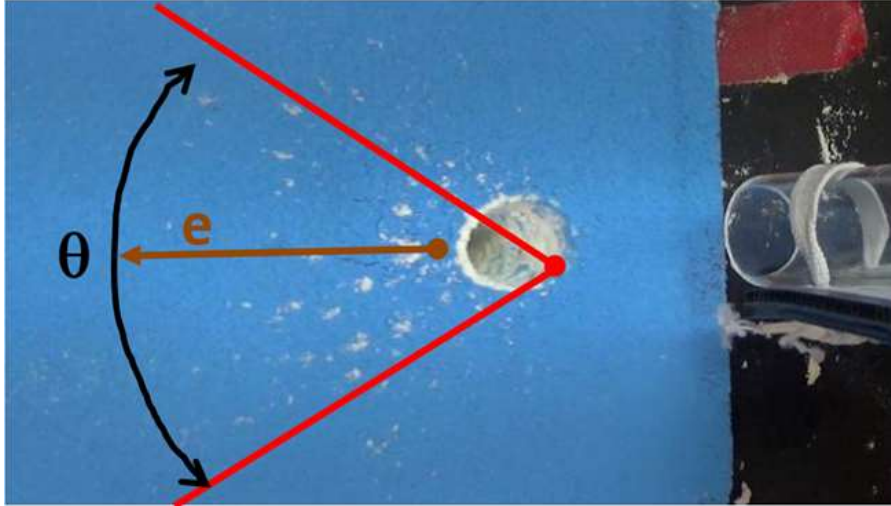


圖 9 e：散射的距離， θ ：散射的角度

二、模擬部分：利用美國普渡大學和倫敦帝國大學聯合開發的模擬軟體－Impact Earth

(一) 在落下速度 20km/s、落下角度 90 度、落入沉積岩的情況下，代入不同隕石直徑大小(25m~60m 每 2.5m 一次、100m~240m 每 10m 一次)

(二) 在隕石直徑 100m、落下角度 90 度、落入沉積岩的情況下，代入不同落下速度 (11km/s 和 15km/s~70km/s 每 5km/s 一次)

(三) 在隕石直徑 100m、落下速度 20km/s、落入沉積岩的情況下，代入不同落下角度 (5 度~90 度 每 5 度一次)

(四) 在落下速度 20km/s、落下角度 90 度的情況下，撞擊在不同的地質環境(沉積岩或火成岩)

(五) 天體上的隕石坑，以網路上的資料發現，隕石坑(視為半球體)體積(V)和撞擊地面的能量(e)成正比($V=ke$ ，其中 $k=10^3\text{J}/\text{cm}^3$)，以撞擊的能量帶回軟體，是模擬原本的隕石大小(落下速度 20km/s、落下角度 90 度)

伍、 研究結果

一、隕石直徑

(一) 實驗部分

撞擊物的鋼球直徑(A:19mm、B:16mm、C:11mm)。撞擊的角度(30°、60°、90°)。

撞擊物到被撞物的距離(100 mm、200 mm、30 mm)。

實驗一：固定撞擊角度 30° ，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度，結果如圖 1 0。

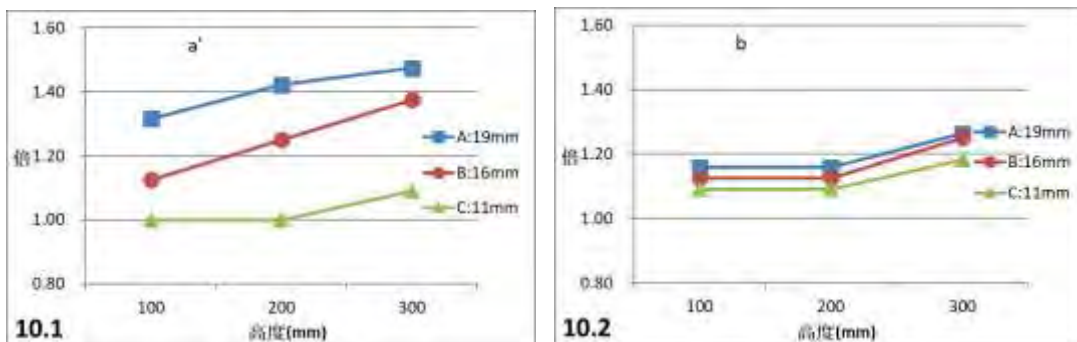


圖 1 0 撞擊 30° ，鋼球大小及撞擊高度所造成的坑洞距離與鋼球直徑比值

實驗二：固定撞擊角度 60° ，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度，結果如圖 1 1。

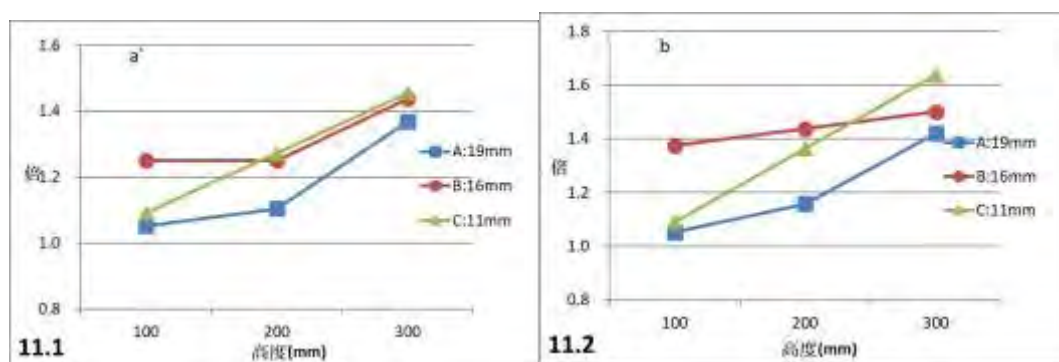


圖 1 1 撞擊 60° ，鋼球大小及撞擊高度所造成的坑洞距離與鋼球直徑比值

實驗三：固定撞擊角度 90° ，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度，結果如圖 1 2。

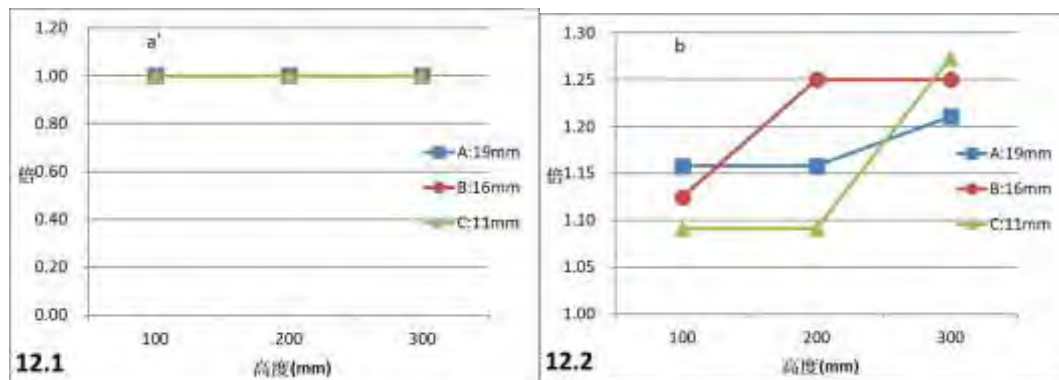


圖 1 2 撞擊 90° ，鋼球大小及撞擊高度所造成的坑洞距離與鋼球直徑比值

(二) 模擬部分

1. 隕石直徑和生成隕石坑的直徑呈現正相關。(如圖 1 3)
2. 隕石直徑和生成隕石坑的瞬間深度呈現正相關。(如圖 1 4)
3. 隕石直徑對通過大氣所散失的能量，呈現類似指數的關係，在隕石直徑愈大時，增長程度愈多。(如圖 1 5)

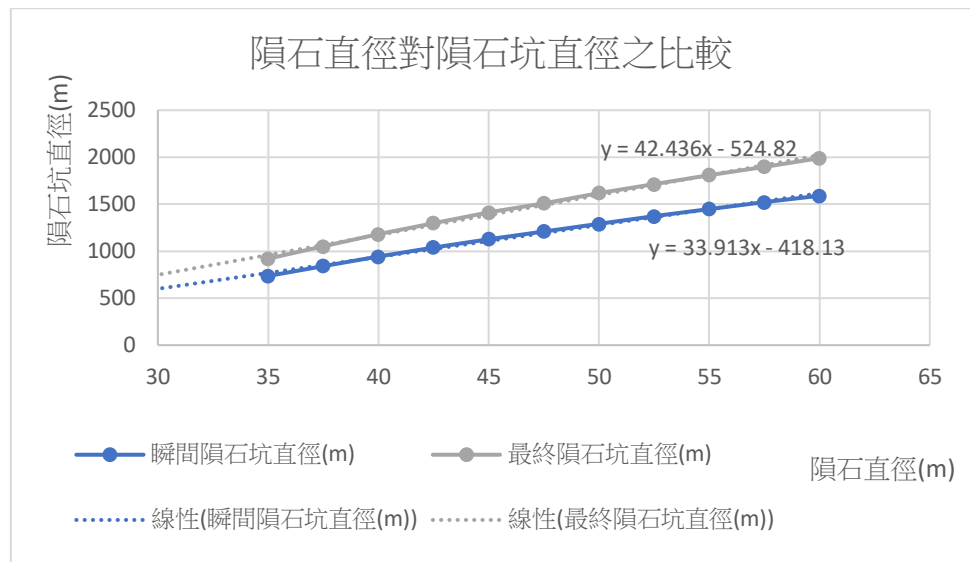


圖 1 3 隕石直徑對隕石坑直徑關係圖

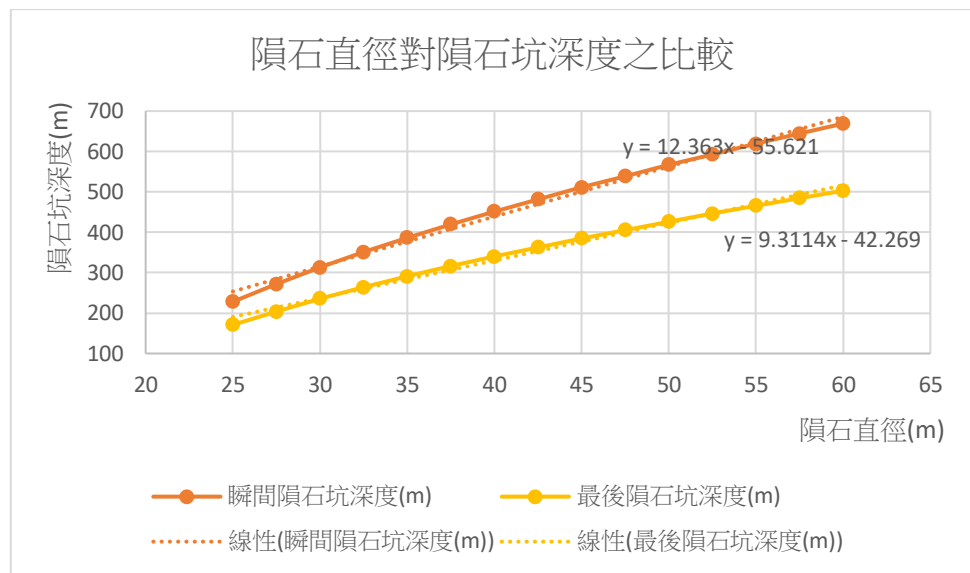


圖 1 4 隕石直徑對隕石坑深度關係圖

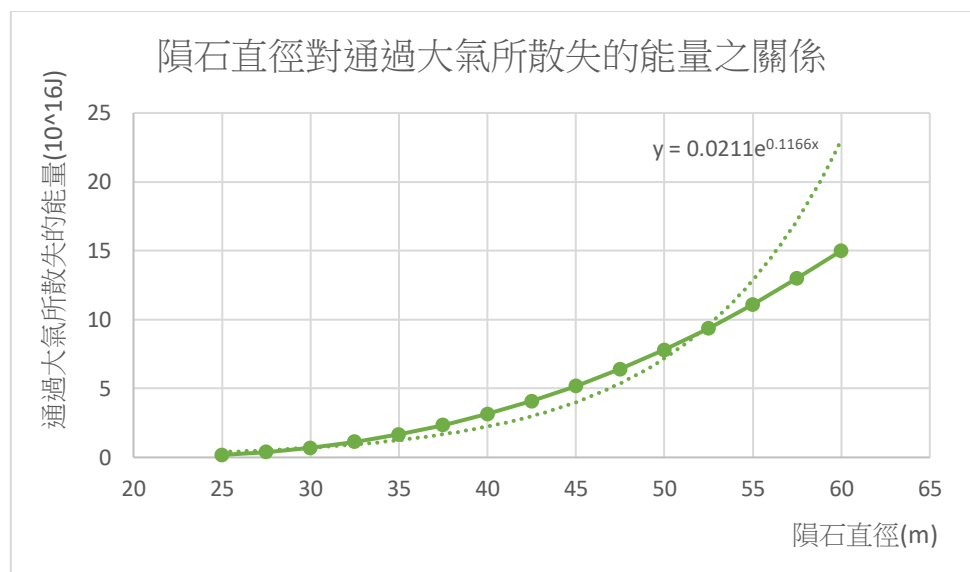


圖 1 5 隕石直徑對通過大氣所散失的能量關係圖

二、不同的地質型態對撞擊坑的影響

(一) 實驗部分：固定撞擊角度 60° ，選擇不同被撞物的表層材料，沙子、粉筆、鹽巴，如圖 1 6。

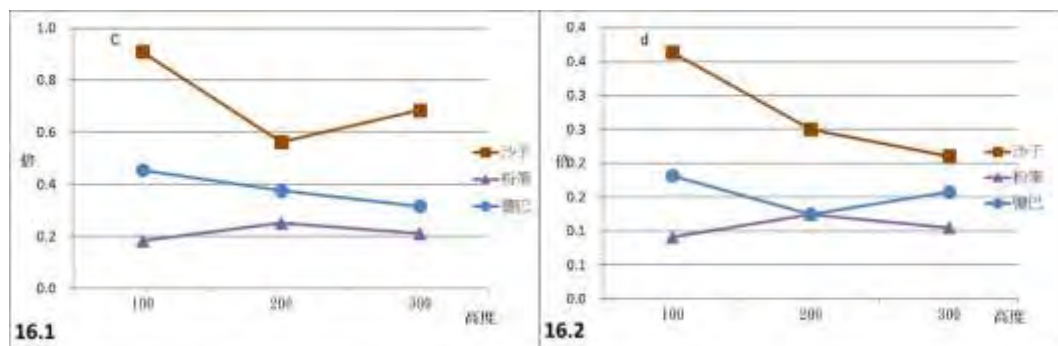


圖 1 6 被撞物表層材料所造成的坑洞距離與鋼球直徑比值

(二) 模擬部分

1. 隕石落於不同地質的隕石坑直徑不同，且沉積岩的數值較火成岩大。(如圖 1 7)
2. 隕石落於不同地質的瞬間隕石坑深度不同，且沉積岩的數值較火成岩大，但最後深度兩種地質環境的差異並不明顯。(如圖 1 8)

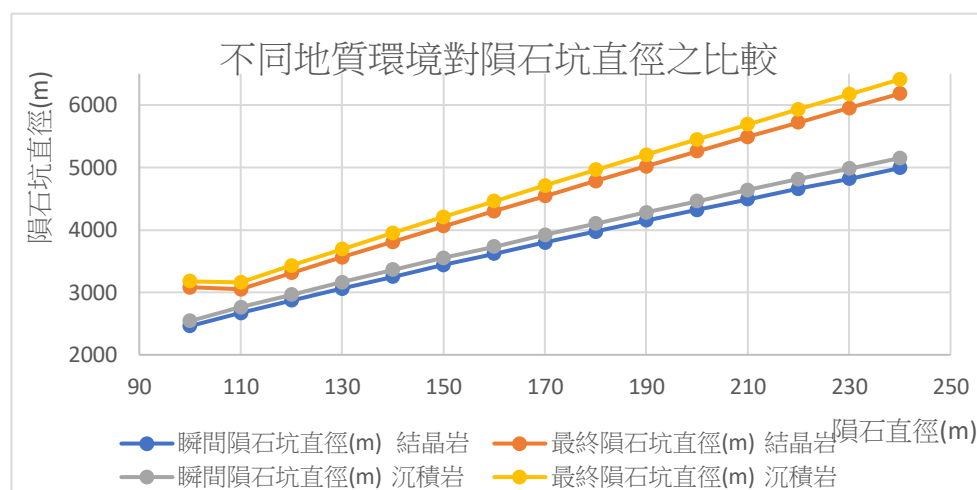


圖 1 7 隕石直徑對隕石坑大小及不同地質的關係圖

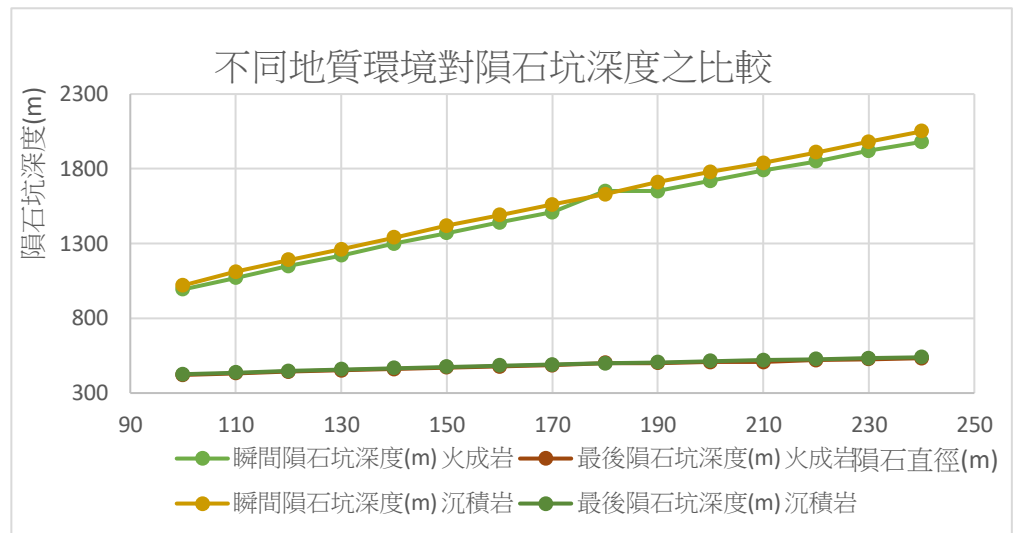


圖 1 8 隕石直徑對隕石坑深度及不同地質的關係圖

三、隕石落下時和地面的夾角

(一)隕石落下時和地面的夾角和隕石坑直徑和深度均呈現正相關，只是在最終隕石坑直徑和最終隕石坑深度的圖形中，角度為 50 度的地方有變小再上升的情形(如圖 1 9、2 0)

(二)隕石落下時和地面的夾角和隕石的通過大氣所散失的能量呈現正相關，以逐漸趨緩的情況上升(呈現對數關係)，在角度 5 度和 10 度時，和其他的資料很不一樣(呈現正相關)。(如圖 2 1)

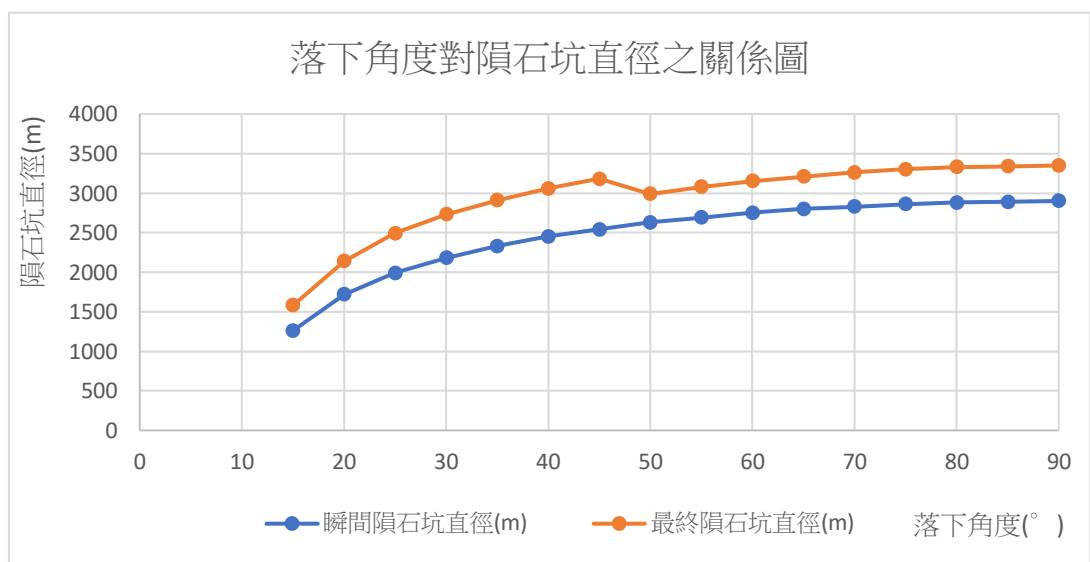


圖 1 9 落下角度對隕石坑直徑之關係圖

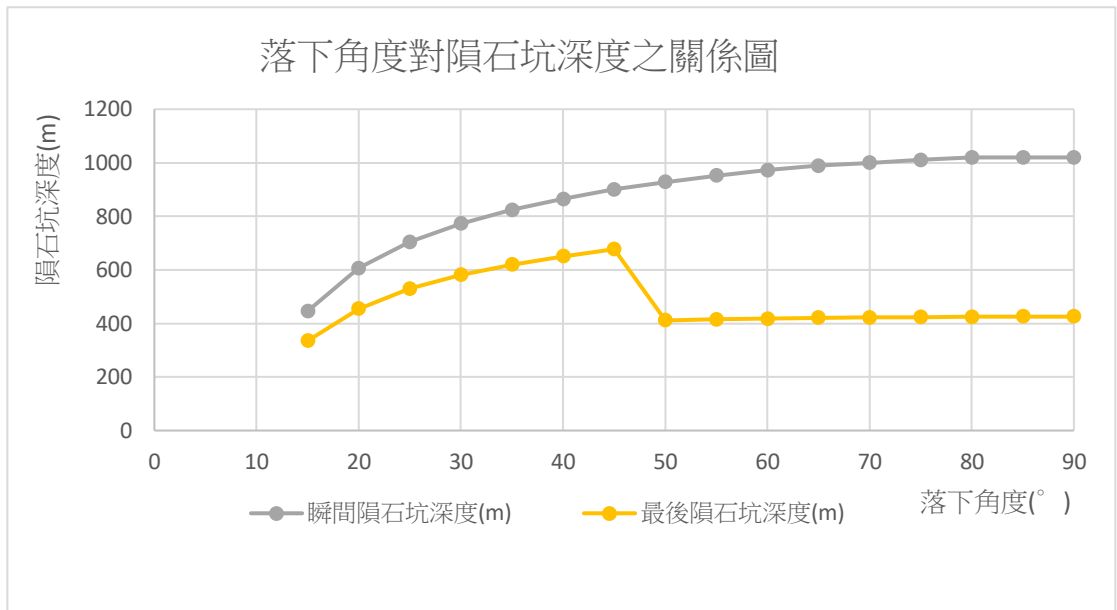


圖 2 0 落下角度對隕石坑深度之關係圖

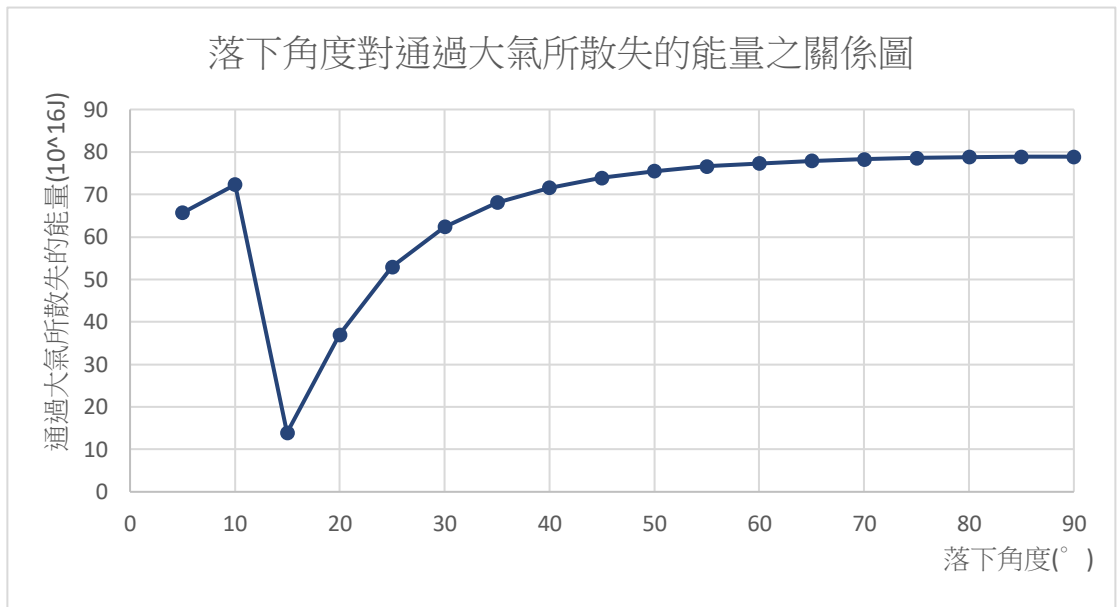
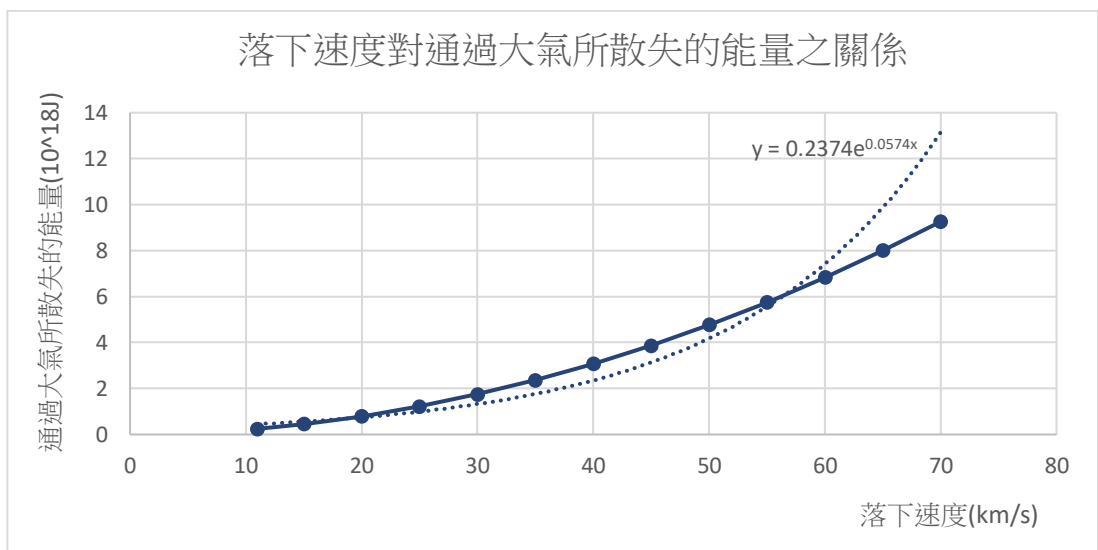
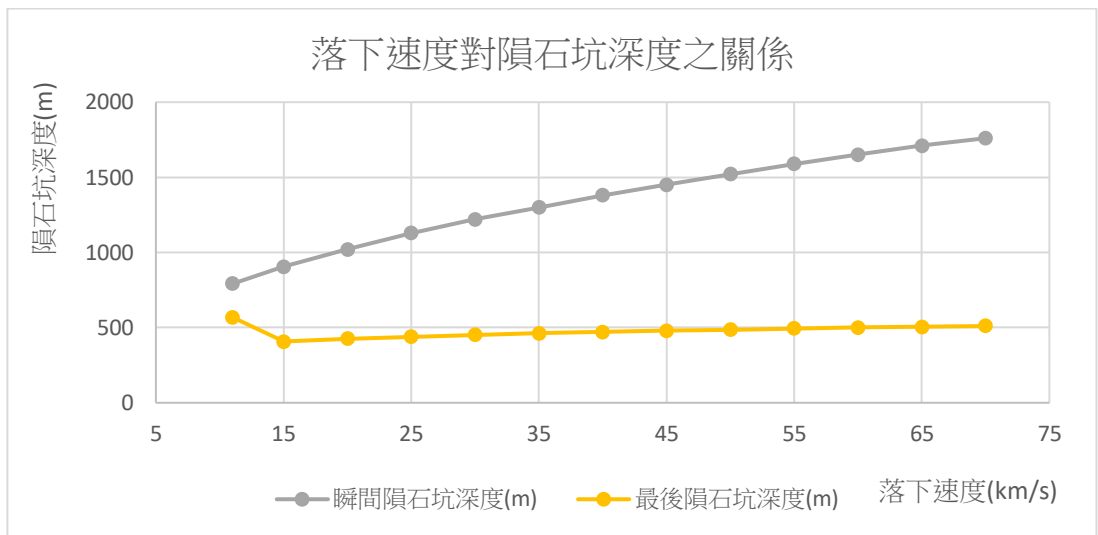
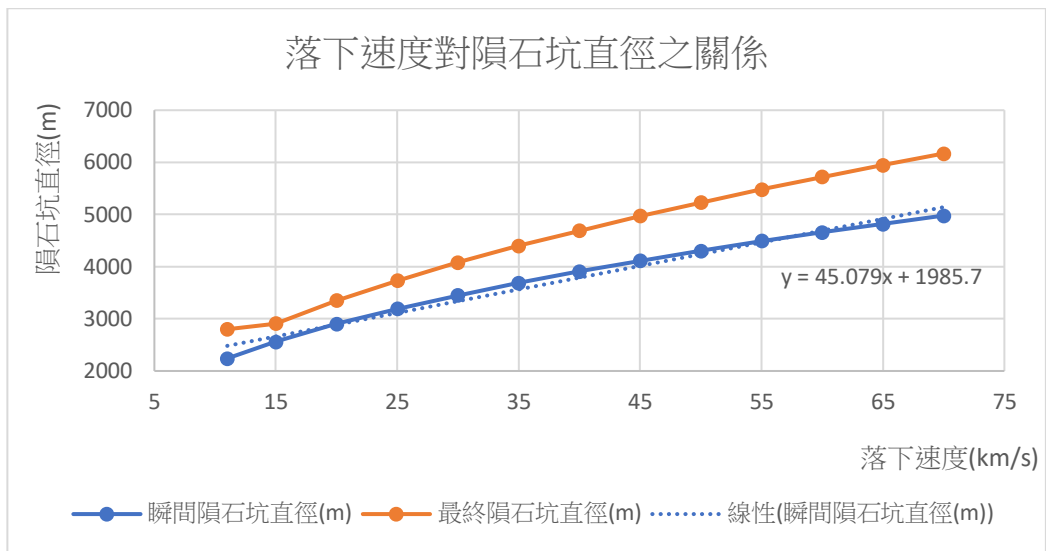


圖 2 1 落下角度對通過大氣所散失的能量之關係圖

四、隕石落下速度的大小

- (一)速度的大小和隕石坑直徑呈現正相關，最終隕石坑直徑在速度為 25km/s 時，為一個分界點，11km/s~20km/s 為一個斜率、25km/s~70km/s 為一個斜率(如圖 2 2)
- (二)速度的大小和隕石坑深度呈現正相關，但是最後隕石坑深度在速度為 15km/s 時，有最小值 (如圖 2 3)
- (三)落下速度大小對通過大氣所散失的能量呈現類似指數的關係，在隕石直徑愈大時，增長程度愈多 (如圖 2 4)



五、探討撞擊條件對散射的影響。

(一)探討撞擊條件對散射的影響

1.利用上述實驗結果，分析撞擊物大小、角度及高度的散射距離及散射角度。

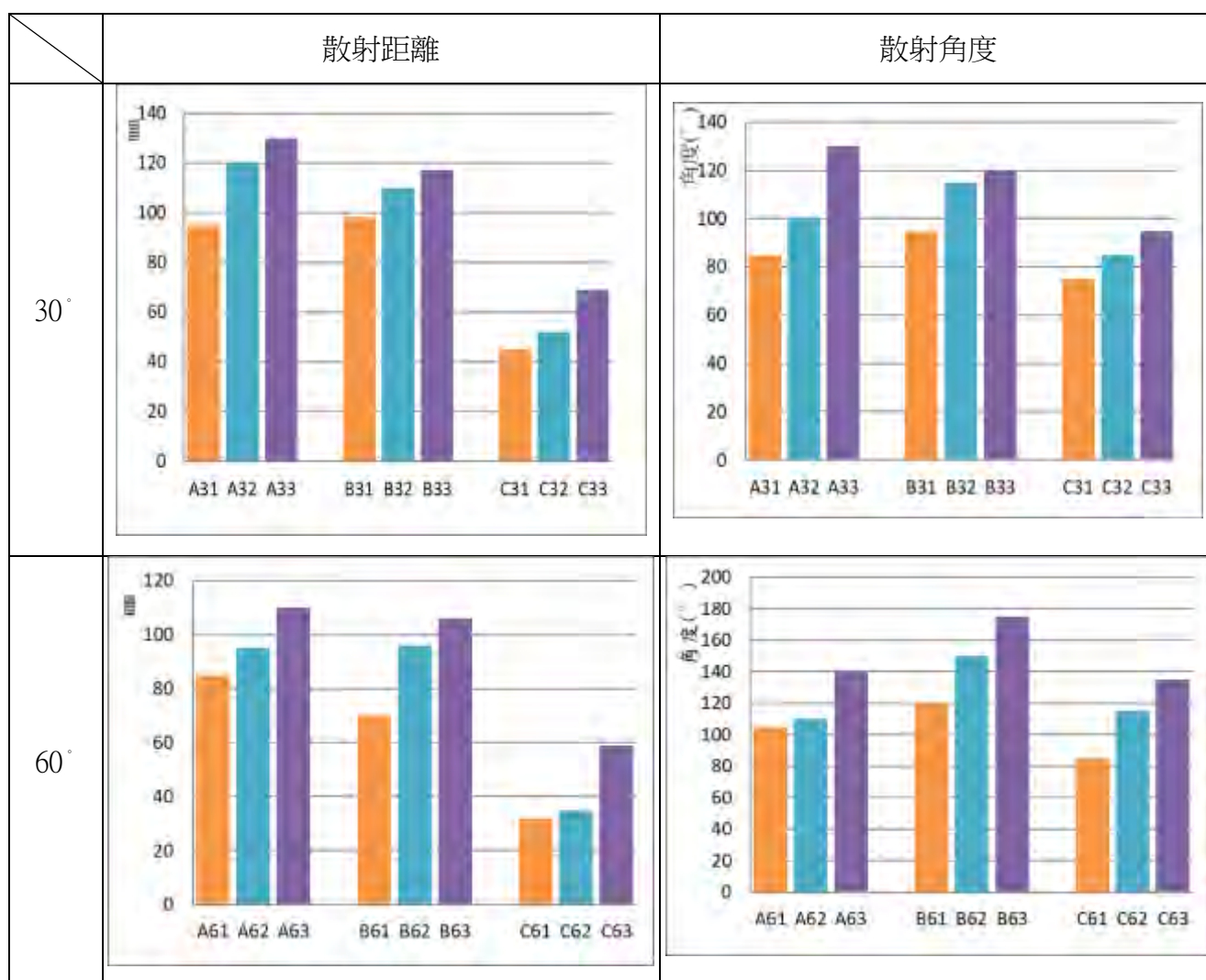


圖 2 5 不同撞擊條件所造成的散射距離及角度

實驗小結：

- (1)撞擊物大小對散射距離呈正相關，撞擊物越大能量越大，且高度越高動能越大，散射距離越遠，散射角度越廣。
- (2)撞擊角度越小，對散射距離越遠但散射角度越小，可推斷出，散射距離與角度呈負相關，因撞擊角度越小的橫作用力較大，散射距離遠。
- (3)撞擊高度對散射距離與散射角度:**3 的數值普遍最大，**2 次之，**1 最小，可明顯看出，高度與散射距離與散射角度成正相關。
- (4)撞擊 60° 的散射角度大於 30° 的散射角度，因為 60° 縱向施力大，可揚起較大範圍散射。另外 A 球 30° 的散射角度，比 B 球及 C 球大。

2.在撞擊角度 60°、高度 20cm，分析不同撞擊物大小、被撞物硬度所施加的壓力(H:500 公克、M:400 公克、L:300 公克)的散射距離及散射角度值。

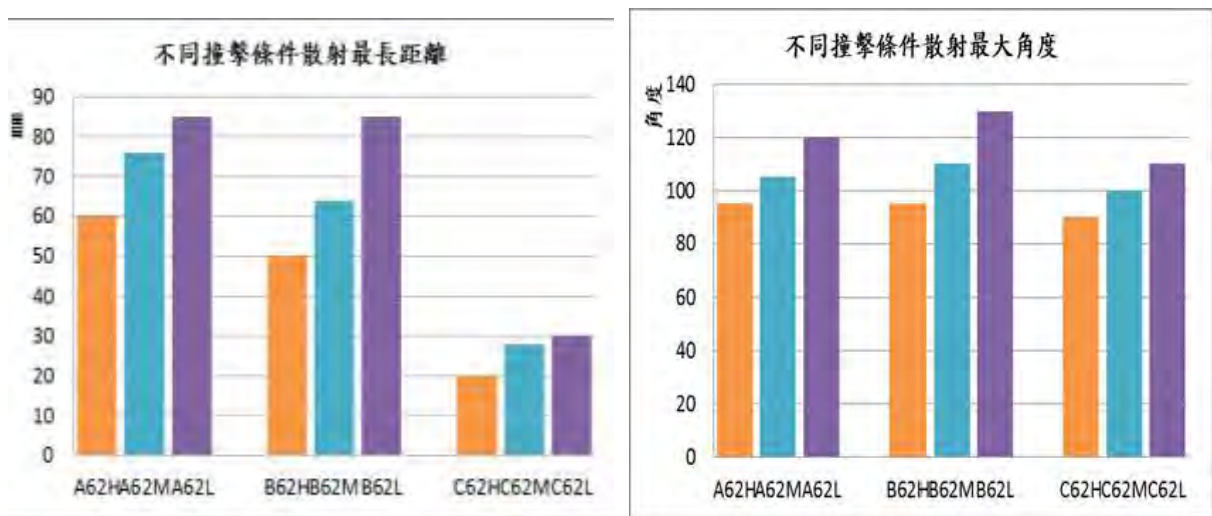


圖 2 6 不同被撞物的硬度所造成的散射距離及角度

實驗小結：

- (1)從圖 2 6【A62*、B62*、C62*】發現，**被撞物越硬，散射距離越近**，***H > ***M > ***L，因被撞物吸收了很大的動能造成的結果。
- (2)當表層越硬，散射的角度越小，**硬度與散射角度是負相關**。
- (3)撞擊物的大小與散射角度呈零相關。
- (4)不同被撞物的硬度所造成的散射距離與散射角度呈正相關。

3.固定撞擊角度 60°、高度 20cm，分析不同撞擊物大小、被撞物鬆軟度的散射距離及散射角度值。

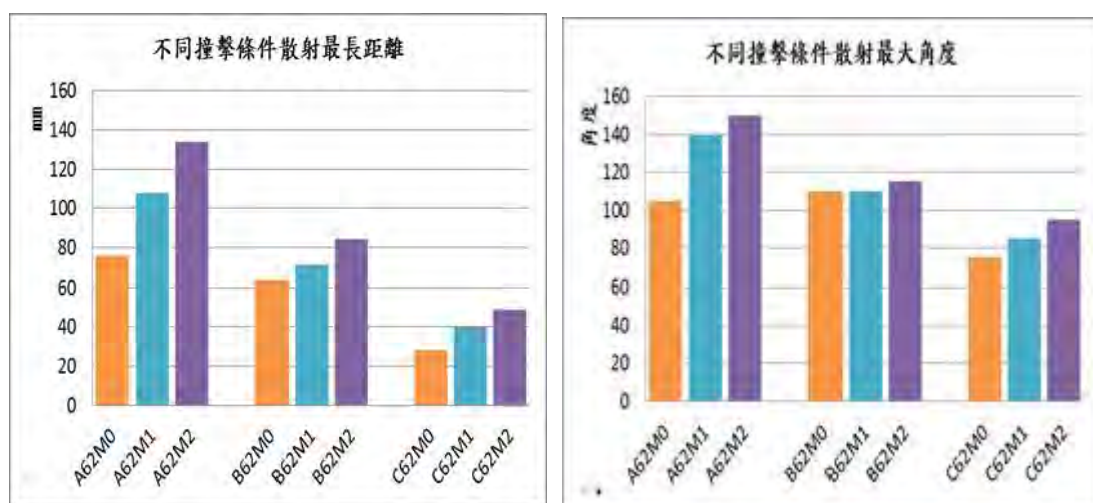


圖 2 7 不同厚度的硬度所造成的散射距離及角度

實驗小結：

- (1)被撞物的鬆軟度與散射距離正相關，尤其撞擊物越大越顯，尤其【A62M2】散射距離超過鋼球直徑的7倍以上。
- (2)散射距離與角度不論撞擊物的大小，結果都是 M2 > M1 > M0，因為撞擊物表層較多的麵粉比較易揚起。

4.固定撞擊角度 60°、高度 20cm，分析不同撞擊物、被撞物表層材料的散射距離及散射角度。

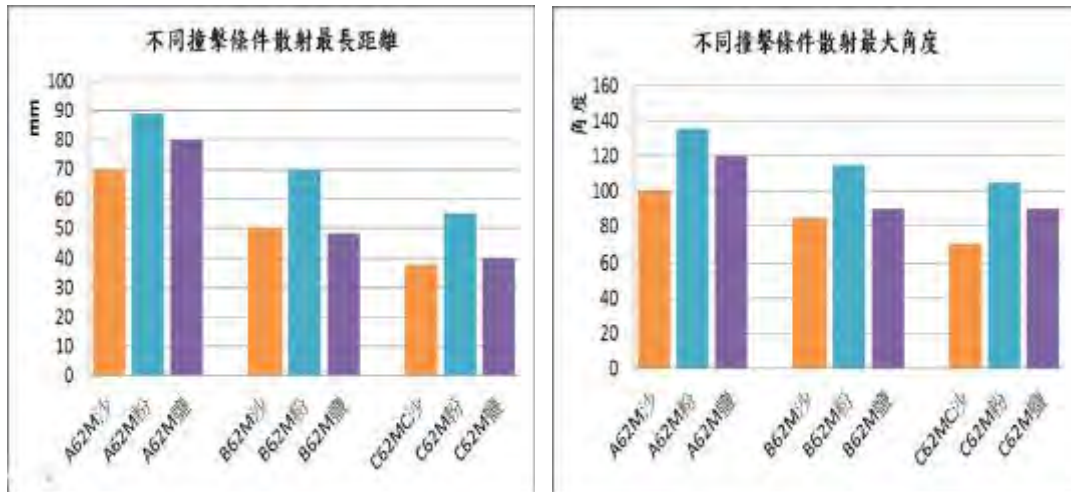


圖 2 8 被撞物的表層材料所造成的散射距離及角度

- (1)表層材料對散射距離的影響如圖 2 8 (左)，發現撞擊物的體積越大，散射距離越遠越明顯，而散射距離為粉筆>彩鹽>沙子。
- (2)撞擊物大小對散射角度並無太大關聯，主要還是取決於撞擊角度與表層材料，而表層材料與散射角度的關係如圖 2 8 (右)，粉筆>彩鹽>沙子。
- (3)表層材質重量沙子>彩鹽>粉筆，與散射的距離及角度為負相關。

六、天體上的實例

(一) 火星

表 1 火星隕石坑

	隕石坑直徑(km)	推測爆炸能量(J)	隕石直徑(m)
古瑟夫撞擊坑	166	9.15×10^{18}	221.9
伽勒撞擊坑	230	2.43×10^{19}	307.2
斯基亞帕雷利撞擊坑	471	2.09×10^{20}	630

在火星上，隕石直徑和隕石坑直徑基本上成正比(如圖 2 9)

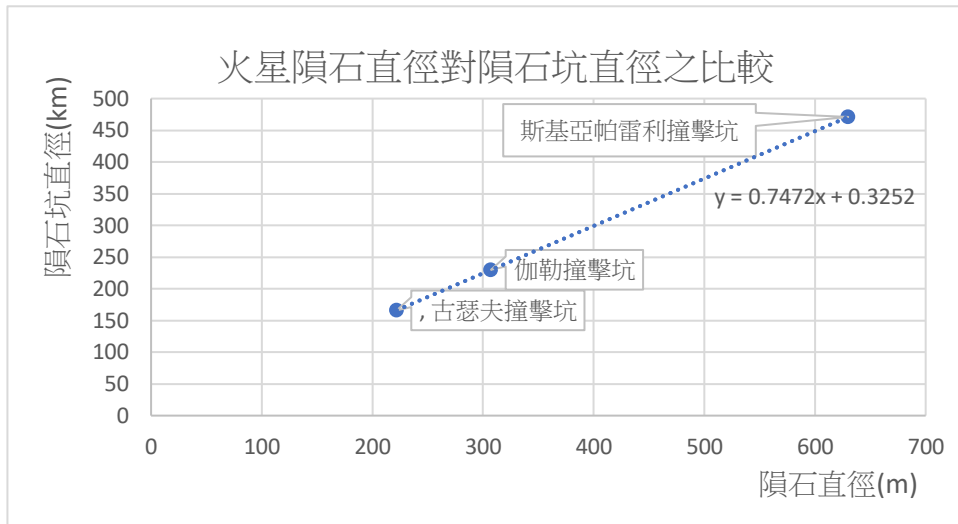


圖 2 9 火星上隕石直徑對隕石坑直徑關係圖

(二) 月球

表 2 月球隕石坑

	隕石坑直徑 (km)	推測爆炸能量 (J)	隕石直徑 (m)
阿爾巴塔尼 C	10	6.4×10^{14}	9.14
畢奧隕坑(如圖 3 0)	13.01	7.15×10^{14}	9.48
索西琴尼隕石坑(如圖 3 1)	17	8.67×10^{14}	10.12
特里斯納凱爾隕石坑(如圖 3 2)	25	3.45×10^{15}	16.03
第谷坑(如圖 3 3)	85	4.06×10^{16}	36.45

在月球上，隕石直徑和隕石坑直徑基本上成正比，但是有幾個點在線外(如圖 3 4)

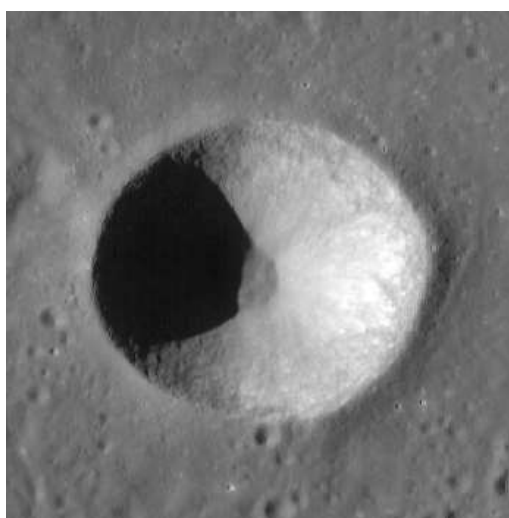


圖 3 0 畢奧隕坑

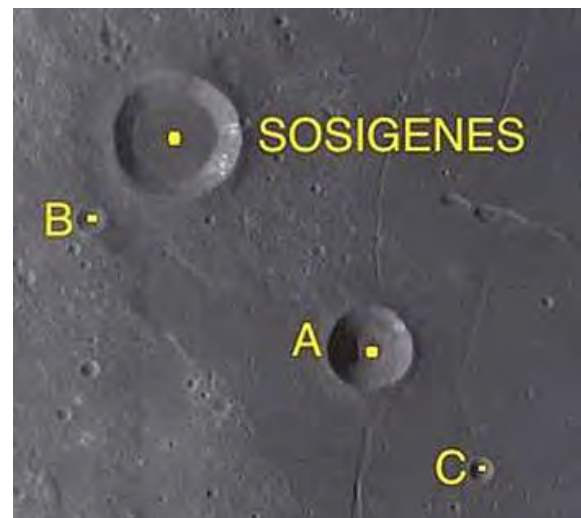


圖 3 1 索西琴尼隕石坑



圖 3 2 特里斯納凱爾隕石坑

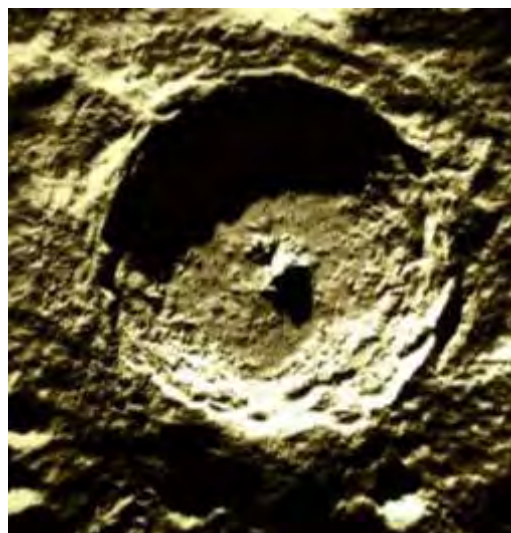


圖 3 3 第谷坑

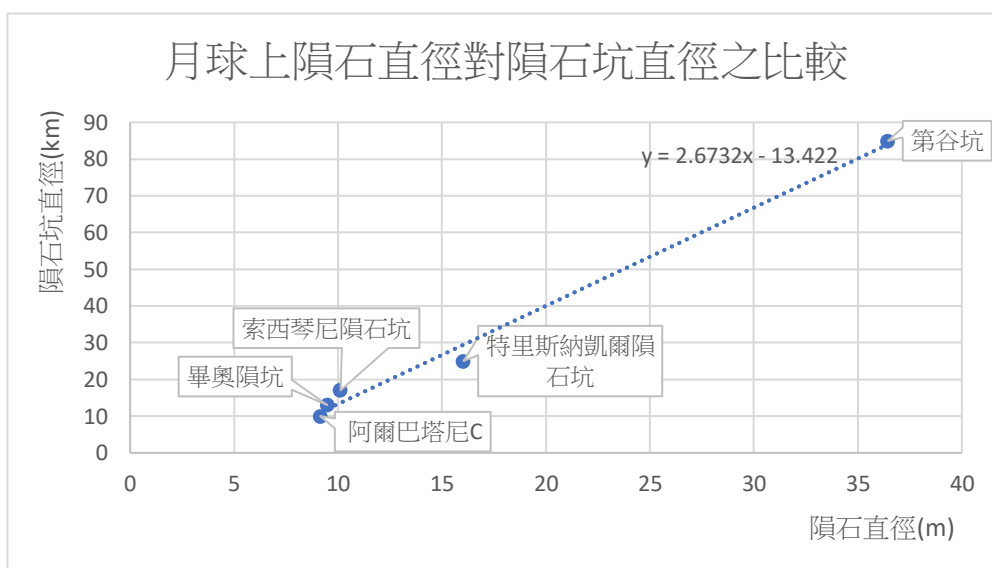


圖 3 4 月球上隕石直徑對隕石坑直徑關係圖

(三) 木衛四

表 3 木衛四隕石坑

	隕石坑直徑(km)	推測爆炸能量(J)	隕石直徑(m)
阿卡斯撞擊坑	60	4.32×10^{17}	80.17
阿斯嘉特撞擊坑	1600	5.12×10^{21}	1839

利用先前模擬的條件畫出圖 3 5，在不同角度及撞擊條件下相對的折線圖，接著使用 google 地球可測得月球隕石坑大小及散射的 $e/(a/2)$ 比值，再利用漸近線方式求出撞擊公式，再將比值帶入公式，反推出當時隕石撞擊月球時原本隕石撞擊的角度，並參考相關文獻確認其正確性。

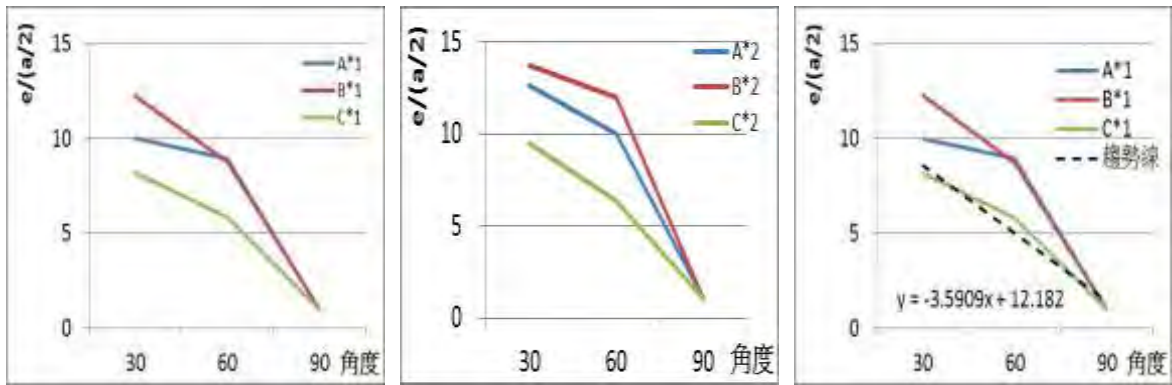


圖 3 5 不同撞擊條件下，入射角與 $e/(a/2)$ 折線圖

選擇【C*1】的狀況來模擬，可求得線性趨勢線方程式為 $y = -3.5909x + 12.182$ ，可計算出大約撞擊角度如表 4，發現結果非常接近，很適合簡易判斷出撞擊的角度值。

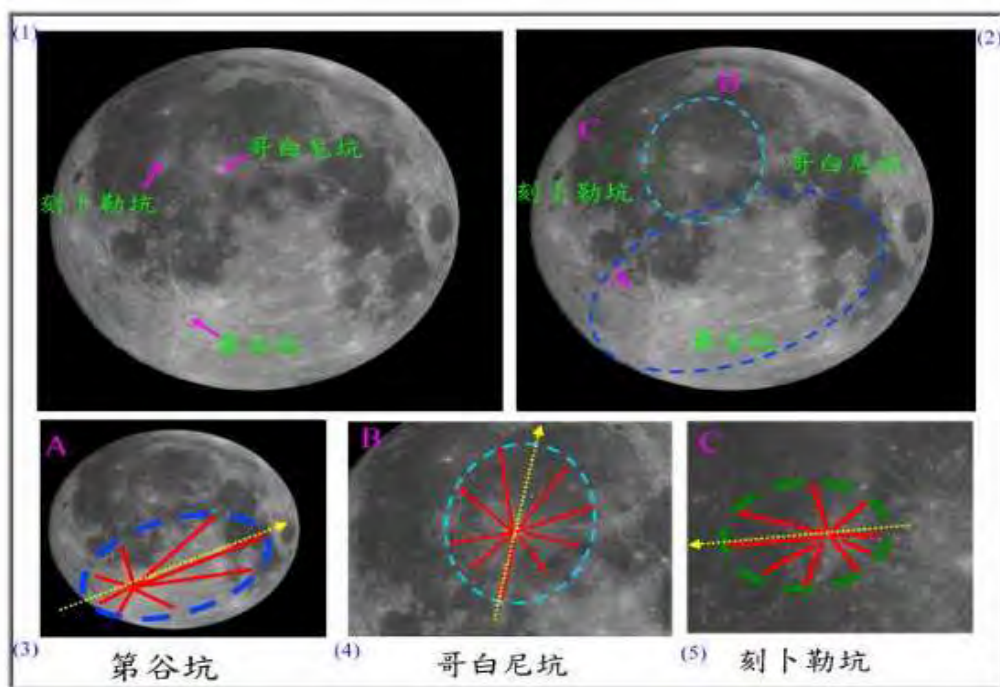


圖 3 6 月球隕石坑分析

表 4 計算月球的隕石坑撞擊角度

月球的隕石坑	第谷坑	哥白尼坑	刻卜勒坑
$e(\text{km})$	1050	677	470
$a/2(\text{km})$	351	350	221
$e/(a/2)$	2.99	1.93	2.12
撞擊角度	71.6	80.2	78.7
模擬撞擊角度	76.8	85.6	84.0

根據表 4 發現：

- 一、月球上的隕石坑以第谷坑的 $e/(a/2)$ 比值最大，但計算出的角度卻是最小，所以隕石撞擊時的角度和 $e/(a/2)$ 比值呈現負相關。
- 二、將撞擊點和散射距離之間連起來，可以得到一個圓形。如果圓形越扁，比值會越大，角度也就愈小。藉由這個圓形可以不必帶入公式而得知大約撞擊的角度。
- 三、透過數值發現，月球上的隕石坑幾乎都是接近垂直撞擊，到底原因為何，目前還不確定，但希望以後能進一步探究這個問題。

陸、討論

一、探討不同的撞物條件對撞擊坑的影響

- (一) 由圖 10、11 分析可看出，撞擊物越大，撞擊能量越大，所造成的坑洞也更大，對於 b 及 c 也是正相關，但對 d 影響較小。另外由模擬看出其對於瞬間直徑的影響愈大
- (二) 在沒有中央峰的情況下，隕石坑直徑的膨脹或深度的收縮都是成比例的，我推測應該是超高速碰撞所造成的(如圖 3 7、3 8)
- (三) 隕石坑是否有中央峰並不會對瞬間直徑造成影響，但對最終的直徑就會有些微的影響，我猜測是因為形成有中央峰的隕石坑所需能量較大，所以造成的影響

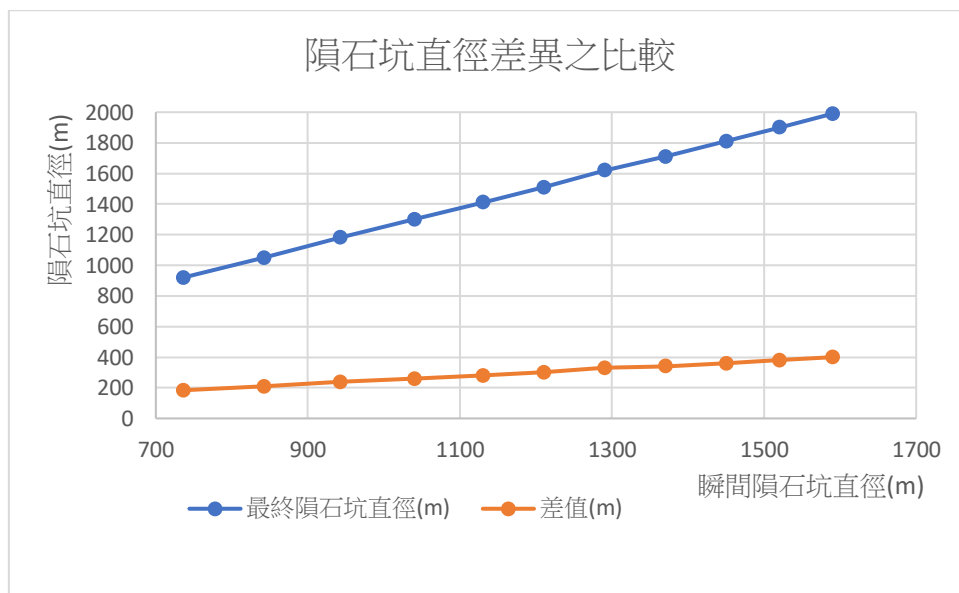


圖 3 7 隕石坑直徑差異之比較關係圖

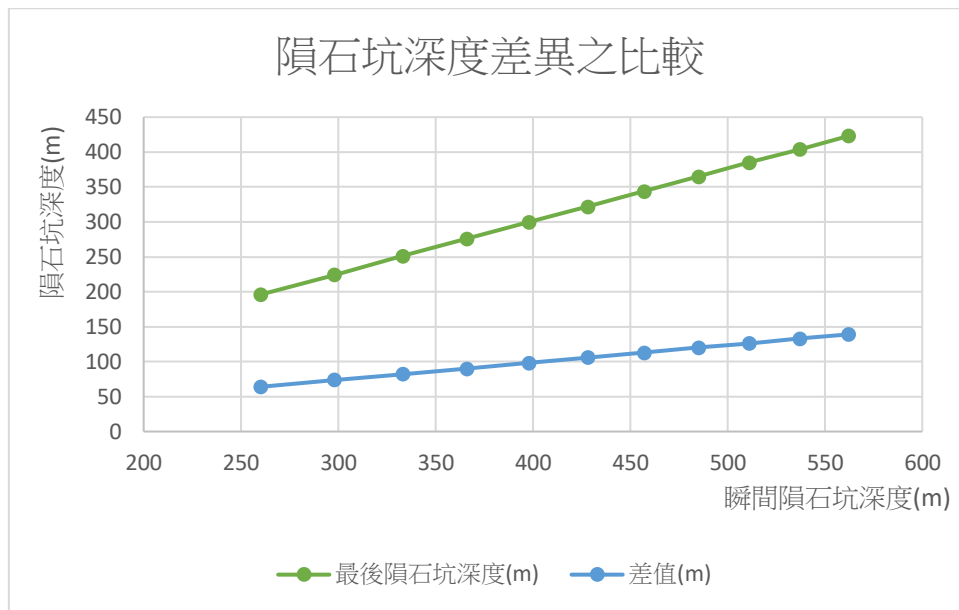


圖 3 8 隕石坑深度差異之比較關係圖

二、探討不同的被撞物條件對撞擊坑的影響

- (一) 由圖 1 6 分析可看出，被撞物表層硬度對 b 的影響大於 a' 值，對 d 影響小，不如角度對震波後面效果 d 的影響。
- (二) 在相同基底硬度下，表層結構越鬆軟，對坑洞影響越大。因上層較麵粉吸收衝擊，所以噴濺能量較小造成 a' 會隨厚度增加而變大，但 b 則相反，數值會變小。如同模擬所得結果，直徑愈大的隕石對於瞬間深度的影響愈大，在隕石直徑愈大的情況下，在不同地質所造成的瞬間深度影響也愈明顯，但地質和隕石大小對最終隕石坑的深度影響都不明顯。其中是否產生中央峰並不會對瞬間深度造成影響，但是對最終的深度就會有明顯的影響。
- (三) 表層材質的影響上，主要是表層的質量為主要影響因素，質量越大坑洞越大，因為表層重量加重，所以動能越高，所造成的各項數值較大。與實際狀況沉積岩因地質結構較火成岩鬆軟，所以隕石坑直徑和深度都較火成岩大的結果相同。

三、隕石落下時和地面的夾角

- (一) 入射角度比高度及撞擊物對坑洞影響大。圖 1 2 在不同高度撞擊角 90° 下，其坑洞大小並無太大差異，但隨角度降低，坑洞大小的狀況反而明顯，高度越高 b 些微增加。
- (二) 在最終隕石坑直徑和最終隕石坑深度的圖形中，角度為 50 度的地方數值有變小處，但是並不是因為 45 度沒有中央峰而 50 度有中央峰。

- (三) 在夾角大於 15 度時，呈現對數關係，而 5 度和 10 度之間是呈現負相關，因為 5 度和 10 度並不會產生隕石坑，因而造成圖形不同。
- (四) 隕石落下時和地面的夾角和隕石的撞擊能量呈現正相關，角度 5 度和 10 度時，因為不會產生隕石坑所以和其他的資料很不一樣。
- (五) 有很多出現折點的地方和前後的性質(是否產生中央峰或隕石坑)並無不同，推測除了隕石坑的性質外應該還有其他變因會影響最後隕石坑所呈現的型態。
- (六) 比較實驗和模擬可以發現實驗中角度愈大撞擊坑愈小，反之，模擬得出的結果卻是角度愈大撞擊坑愈大，推測是因為模擬中距離較遠造成鉛直速度的差異愈明顯，進而造成隕石動能的差異

四、隕石落下速度

- (一) 落下速度對隕石坑的直徑和深度均不是成正比，推測是因為落下時受大氣的影響而造成的
- (二) 有中央峰的(在速度達到每秒 15 公里以上)直徑和沒有中央峰最終直徑大小的變化量並不明顯，推測其能量可能在產生中央峰的時候消耗掉。
- (三) 有中央峰的(在速度達到每秒 15 公里以上)深度較沒有中央峰的深度明顯的變淺了。推測應為超高速碰撞所造成的物理現象
- (四) 在實驗部分，實驗【*3*】特別明顯可看出坑洞的差異，另高度越高，速度越快，坑洞越大，邊緣易崩落，影響坑洞的大小也越大，對於 b 及 c 也是正相關。

五、坑洞外緣大小分析：

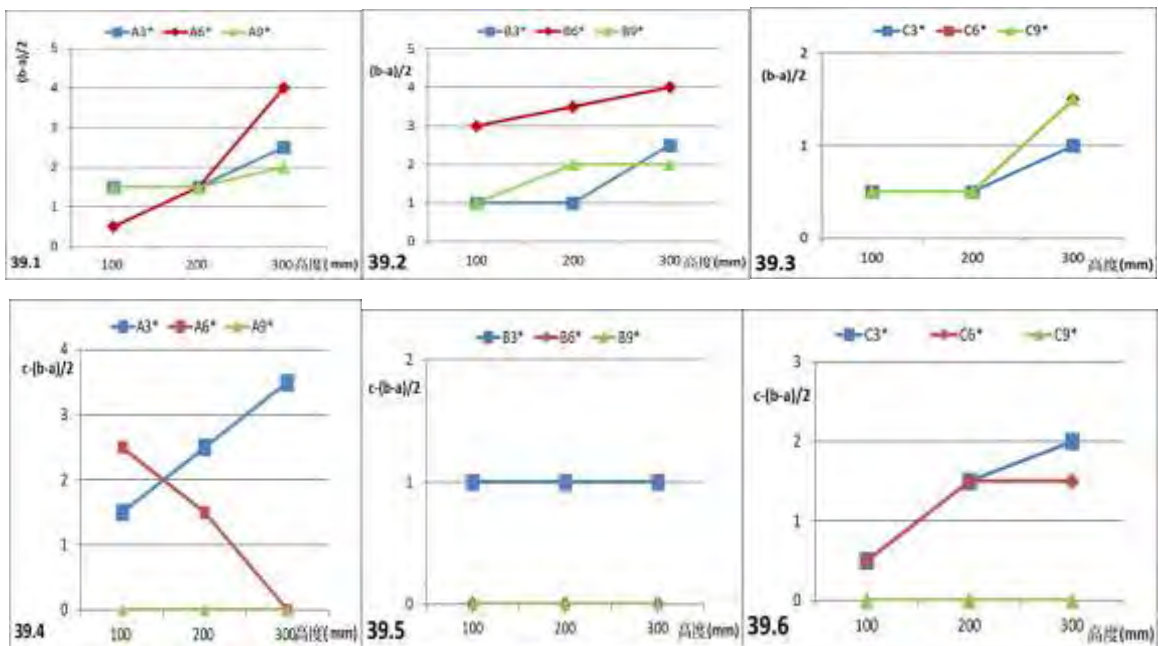


圖 3 9 不同入射角度下，造成坑洞外緣大小比值

- (一) 由圖 3 9.1 至 3 9.3 發現，隨入射角度增加 $(b-a)/2$ 的值也增加，尤其在【B6*】時更明顯，可說明是縱向的力量大於 30° 時的狀況。
- (二) 由圖 3 9.4 至 3 9.6 發現，動量 $c-(b-a)/2$ 在 30° 時會隨高度增加，橫向力大，但入射角度從 60° 到 90° 時，橫向力更加明顯降低。

六、探討撞擊條件對散射的影響

- (一) 分析圖 2 5，撞擊物越大，其散射的距離越遠，被撞擊物散射的量越多，角度越廣，但其**散射並非依照球撞擊物的大小而等比例**，表示影響的因素很多，包含誤差的影響。
- (二) 在入射角 90° 下，由【*9*】可明顯看出，其坑洞大小並無太大差異，幾乎無散射的現象出現，但隨角度降低，散射的狀況反而明顯，高度越高散射的角度及距離越遠，所以，高度與鋼球大小影響**散射現象的重要不如角度此參數**。
- (三) 撞擊的角度越大，所造成的散射角度也會越大，但散射距離卻越近。因為角度越大，縱向施力越大，所造成的散射角度越廣，但相對的，橫向施力較小，散射距離也較近。
- (四) 在相同撞擊角度下，散射的角度越大，散射距離也越長，兩者呈正相關。

七、探討被撞物條件對散射情況的影響

- (一) 由圖 2 6 分析可看出，被撞物越硬，散射距離越近，而硬度與散射角度是負相關，散射距離與散射角度呈正相關。
- (二) 由圖 2 7 分析可看出，被撞物的鬆軟度與散射距離呈正相關，尤其撞擊物越大，現象越明顯。散射距離與角度不論撞擊物的大小，結果都是 $M2 > M1 > M0$ ，因為撞擊物表層較多的麵粉較易揚起。
- (三) 表層材料對散射距離的影響，發現撞擊物越大，散射距離越遠越明顯，而散射距離為粉筆>鹽巴>沙子。撞擊物大小對散射角度並無太大關聯，主要還是取決於撞擊角度與表層材料，而表層材料與散射角度的關係，粉筆>鹽巴>沙子。表層材質重量沙子>鹽巴>粉筆，與散射的距離及角度為負相關。

八、散射距離及散射角度分析

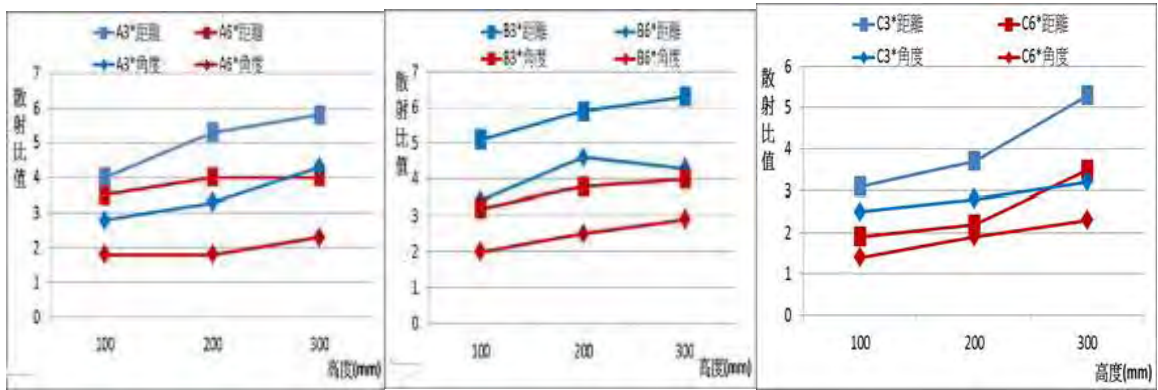


圖 4 0 不同入射角度下，散射距離與散射角度比值

- (一) 散射距離與散射角度比值，隨撞擊角度增加而減少，呈負相關。
- (二) 撞擊高度的增加對散射距離與角度，呈正相關。
- (三) 撞擊物大小對比值的影響比上述兩者的影響較不明顯。

九、實際狀態和理想模擬

- (一) 在火星上，隕石直徑和隕石坑直徑成正比，但是月球有幾個例子並沒有落於回歸直線上，推測應該是因為隕石坑的型態不同所導致
- (二) 在實驗中可以根據公式簡單算出隕石的撞擊角度，而模擬可以大致推出實際的隕石大小，如此一來可以更精確地以隕石坑型態去推測當時隕石落下的情形。

柒、結論

在實驗中發現，撞擊物質量越大、速度越快、角度越小，撞出的坑洞大小、震波大小、散射的角度等數據都越大，且被撞物表面材質越軟、厚度越厚，相關坑洞數值也越大，但是，模擬中卻顯示，動能愈大(直徑愈大、速度愈快、和地面的夾角愈接近 90 度)的隕石對於地面愈顯著，且對於地面的影響是一次的線性關係。

另外，動能愈大的隕石，散射的角度與散射的距離也呈正相關，而被撞物表面材質取決於材質重量，會影響其坑洞相關數據。此外，我發現，撞擊的角度是一個重要變因，當撞擊角度越大($30^\circ \rightarrow 60^\circ$)，造成的散射角度也會越大，但散射距離卻越近，且撞擊角度與 a' 、 c 值為負相關，與 b 值為正相關。而大氣方面，動能愈大的隕石對於其影響也愈顯著，隕石在大氣中所耗的能量應該是呈現指數關係

也發現撞擊坑散射的 $e/(a/2)$ 比值和實際隕石坑相似，計算出結果後發現，月球上的隕石

坑撞擊角度都趨近於 90 度。雖然有了實驗加上模擬的配合，但是和實際狀況仍有出入，所以推論除了以上的操作變因以外應該還有不同性質會造成不同的隕石坑。

捌、參考資料

- 一、吳俊穎等，月球隕石坑的觀測與模擬實驗，第三十七屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 二、王致勻等，外太空來的腳印—探討隕石撞擊的現象，第四十屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 三、陳泓維等，石破天驚-隕石撞關西，第四十七屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 四、李育勸等，月神阿提米斯（Artemis）的傷疤~月球隕石坑和輻射紋之模擬與探討，第五十屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 五、維基百科，第谷坑，
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%AC%AC%E8%B0%B7%E5%9D%91>
- 六、http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/09/Perspective_view
- 七、<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01657>
- 八、Impact: Earth!<https://www.purdue.edu/impactearth/>
- 九、<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%95%E5%A5%A5%E9%99%A8%E5%9D%91>
- 十、<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A2%E8%A5%BF%E5%90%89%E6%96%AF%E9%99%A8%E7%9F%B3%E5%9D%91>
- 十一、<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E9%87%8C%E6%96%AF%E7%BA%B3%E5%87%AF%E5%B0%94%E9%99%A8%E7%9F%B3%E5%9D%91>
- 十二、經福謙. (1990). 超高速碰撞現象. 爆炸與衝擊, 10(3), 279-288.
- 十三、曹承麟, 鄒泰松, 周超, & 錢廣銳. (2006). 二次災難. 大學物理, 25(10), 55-55.

【評語】 051904

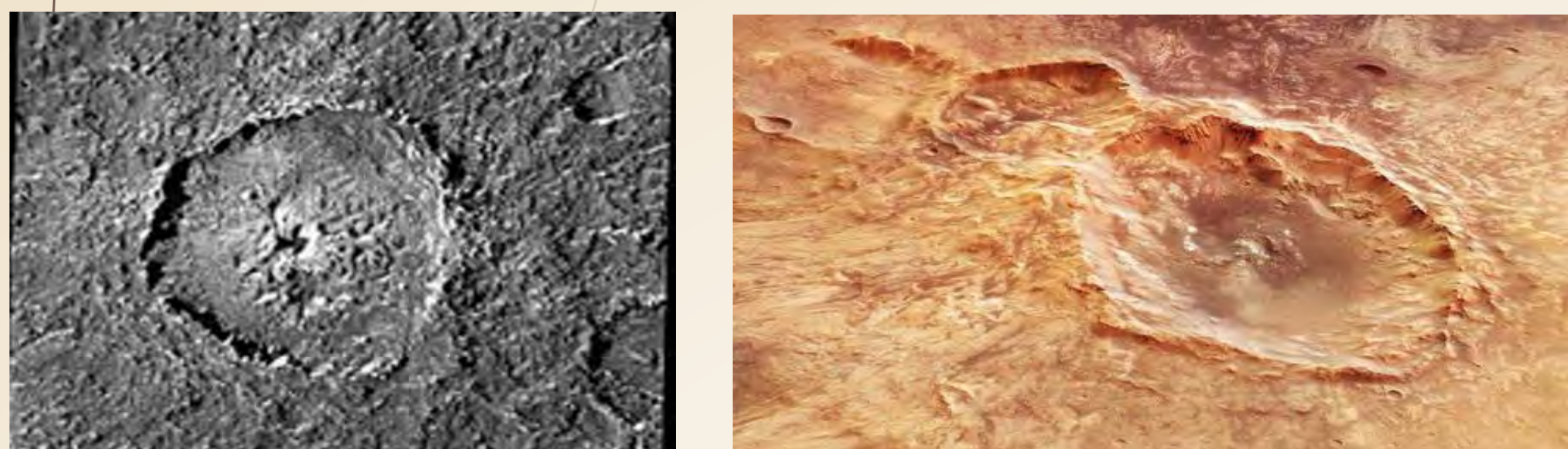
此作品探討隕石坑型態的成因，題目具有探索特色。內容包括利用現有撞擊模擬軟體計算，以超高速撞擊時，材料的性質改變，傳統剛體力學已不適用，而趨於流體，是困難的課題。另外實驗的部分，無論在材料或速度都則與實際情況差別太大。使用的「散射」一詞，或許是「濺灑」之意。作品內文看似由一人進行。圖片來源若使用參考資料宜清楚標示。建議養成習慣確實記錄實驗日誌。

摘要

本研究的主要目的是探討隕石在不同撞擊條件及不同落下地質環境對撞擊坑大小的影響。分成實驗與電腦模擬兩部分：實驗為自製架構設計，使用體積、質量不同的鋼球作為撞擊物，被撞擊物經多次實驗後，採用麵粉上面鋪上粉筆、鹽或細沙；而模擬利用Impact Earth模擬器來模擬隕石進入地球時所產生的隕石坑，撞擊角度和產生隕石坑所需的能量，進而推測外星天體上造成隕石坑的隕石大小和撞擊角度。實驗發現，撞擊物動能愈大的隕石，坑洞大小、震波大小、散射的角度與散射的距離也呈正相關，而被撞物表面材質越軟、厚度越厚，相關坑洞數值也越大，但是，模擬中卻顯示，和地面的夾角愈接近90度的隕石所造成的隕石坑愈大。最後藉由數值發現，月球上的隕石坑幾乎都是接近垂直撞擊，值得以後能進一步探究這個問題。

壹、研究動機

太空航行的技術日益成熟，近年來傳回地球的太空資訊也愈來愈詳細，現在我們除了月球表面，也可以更清楚的看到離我們更遠的太陽系星體表面的樣子。在月球、火星.....等星體上有各式各樣的隕石坑，像是木衛四上形狀稍微不規則的隕石坑究竟造成各式各樣坑洞的隕石有何不同。



貳、研究目的

- 一、探討隕石直徑對撞擊坑及大氣的影響。
- 二、探討地質型態對撞擊坑的影響。
- 三、探討隕石落下角度對撞擊坑及大氣的影響。
- 四、探討隕石落下速度對撞擊坑及大氣的影響。
- 五、探討撞擊條件對散射的影響。
- 六、推論及模擬月球隕石坑撞擊角度和天體的原始隕石大小。

參、研究設備器材

- 一、實驗部分：自製發射器、鋼珠(19mm、16mm、11mm)、麵粉、鹽、細沙、廣告原料、各色粉筆、攝影機、電腦、百格紙(1mm, 240X210mm)、砂紙、塑膠箱(260X140X70mm)、電子秤、游標卡尺、量角器、直尺、彈性繃帶。
- 二、模擬部分：Microsoft Excel、Word、Impact Earth。

肆、研究過程或方法

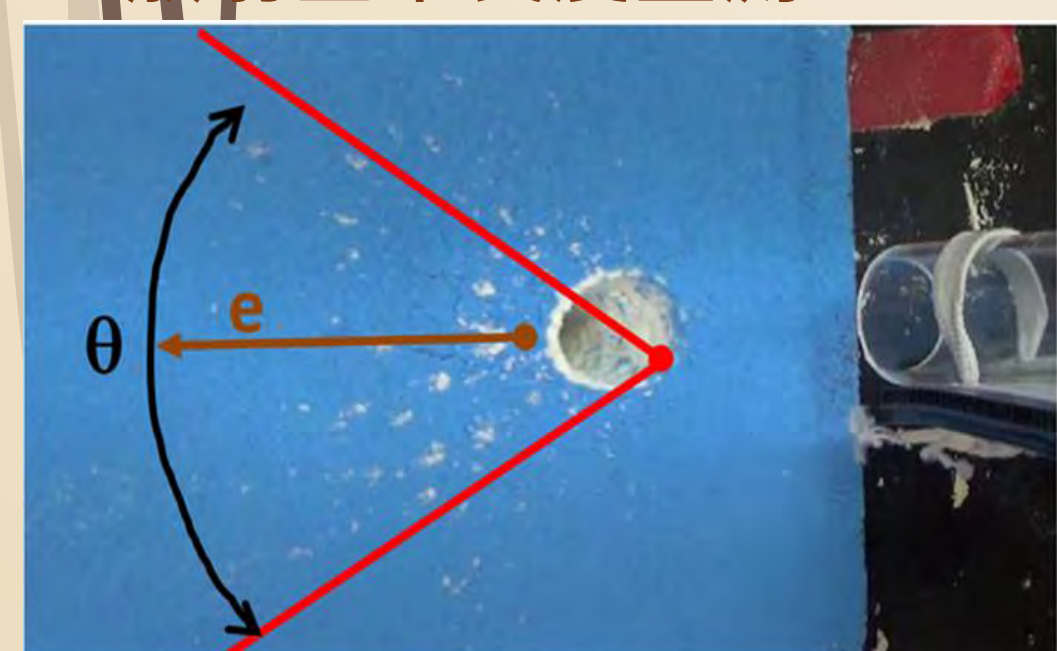
一、實驗部分



二、坑洞基本長度量測



三、散射基本長度量測



- a：坑洞直徑長
- a'：坑洞的最長距離
- b：與a相互垂直外圓距離
- c：前震波影響的距離
- d：後震波影響的距離
- e：散射的距離
- θ：散射的角度

四、模擬部分

利用美國普渡大學和倫敦帝國大學聯合開發的模擬軟體 - Impact Earth帶入不同參數進行模擬

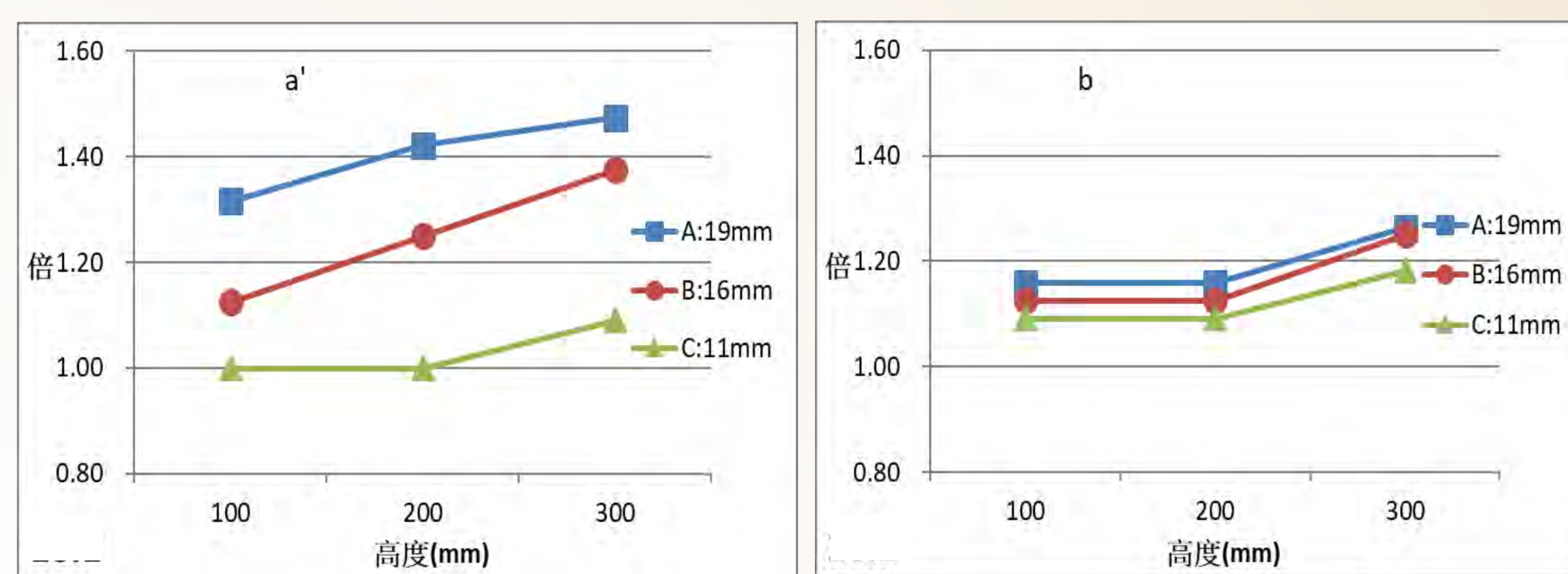
- (一)在落下速度20km/s、落下角度90度、落入沉積岩的情況下，代入不同隕石直徑大小(25m~60m每2.5m一次、100m~240m每10m一次)
- (二)在隕石直徑100m、落下角度90度、落入沉積岩的情況下，代入不同落下速度(11km/s和15km/s~70km/s每5km/s一次)

- (三)在隕石直徑100m、落下速度20km/s、落入沉積岩的情況下，代入不同落下角度(5度~90度每5度一次)
- (四)在落下速度20km/s、落下角度90度的情況下，撞擊在不同的地質環境(沉積岩或火成岩)
- (五)天體上的隕石坑，以網路上的資料發現，隕石坑(視為半球體)體積(V)和撞擊地面的能量(e)成正比($V=ke$ ，其中 $k=10^3\text{J/cm}^3$)，以撞擊的能量帶回軟體，是模擬原本的隕石大小(落下速度20km/s、落下角度90度)

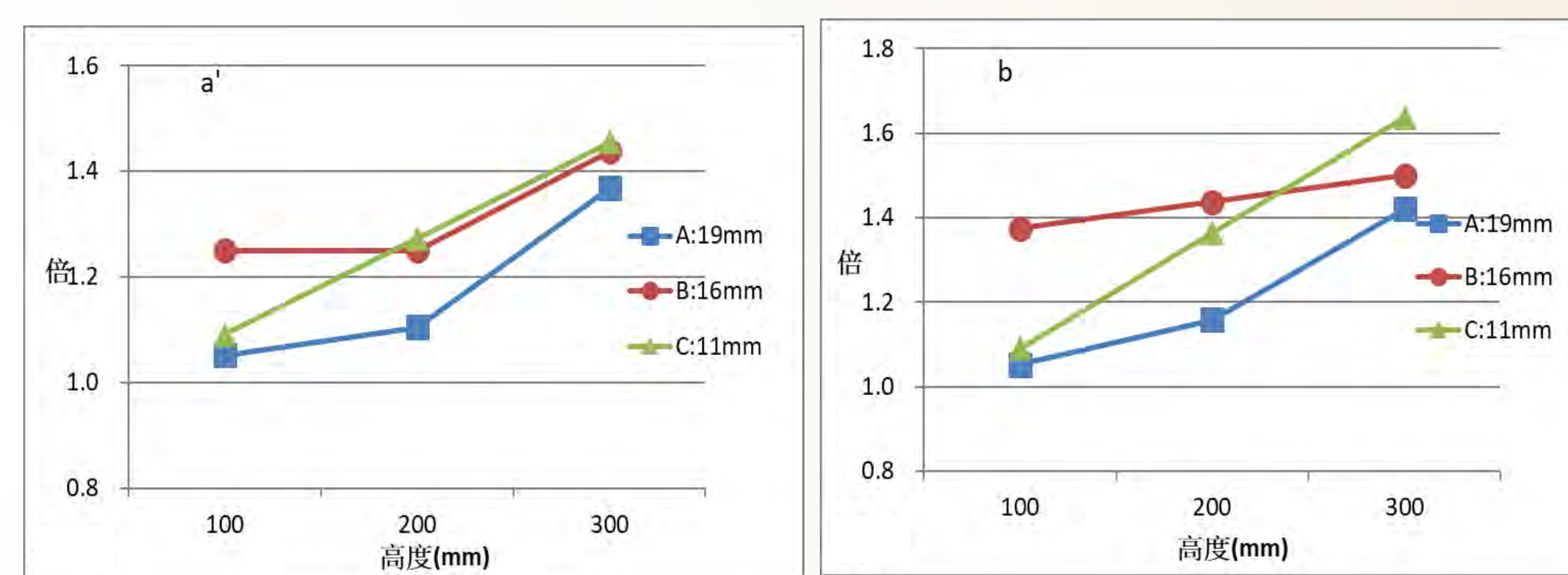
伍、研究結果

一、探討不同的撞物條件對撞擊坑的影響

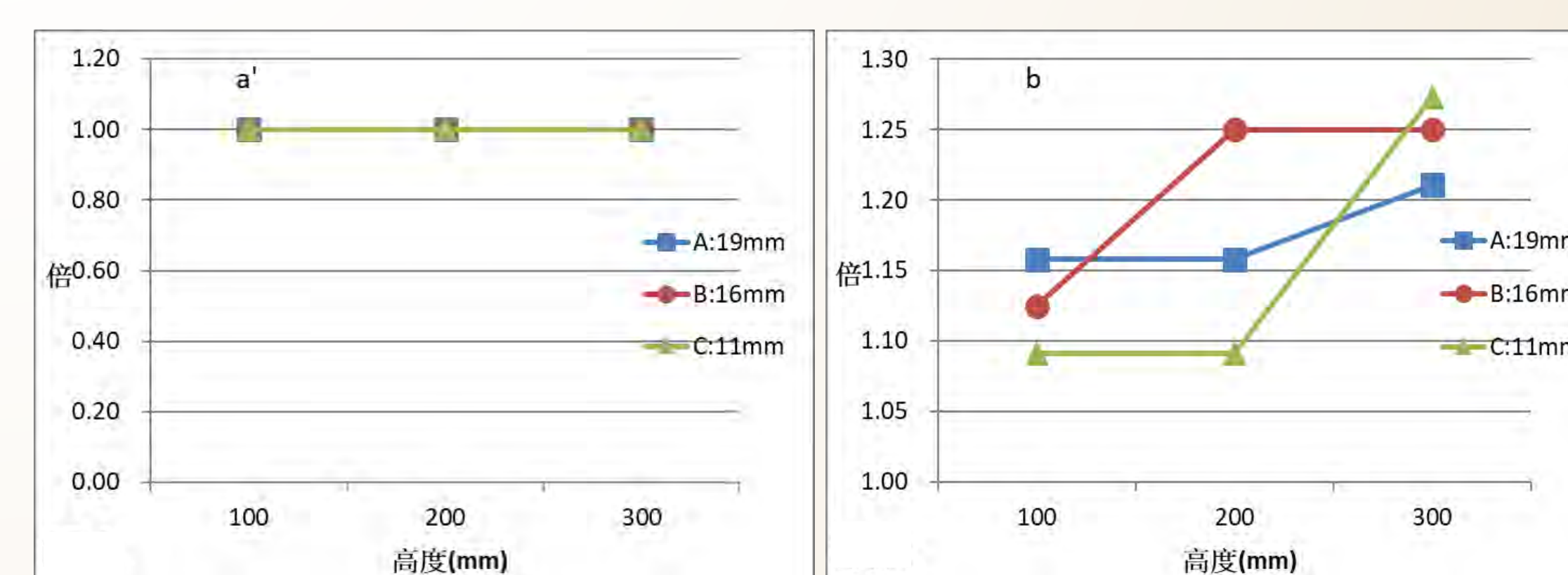
實驗1.1 固定撞擊角度30°，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度



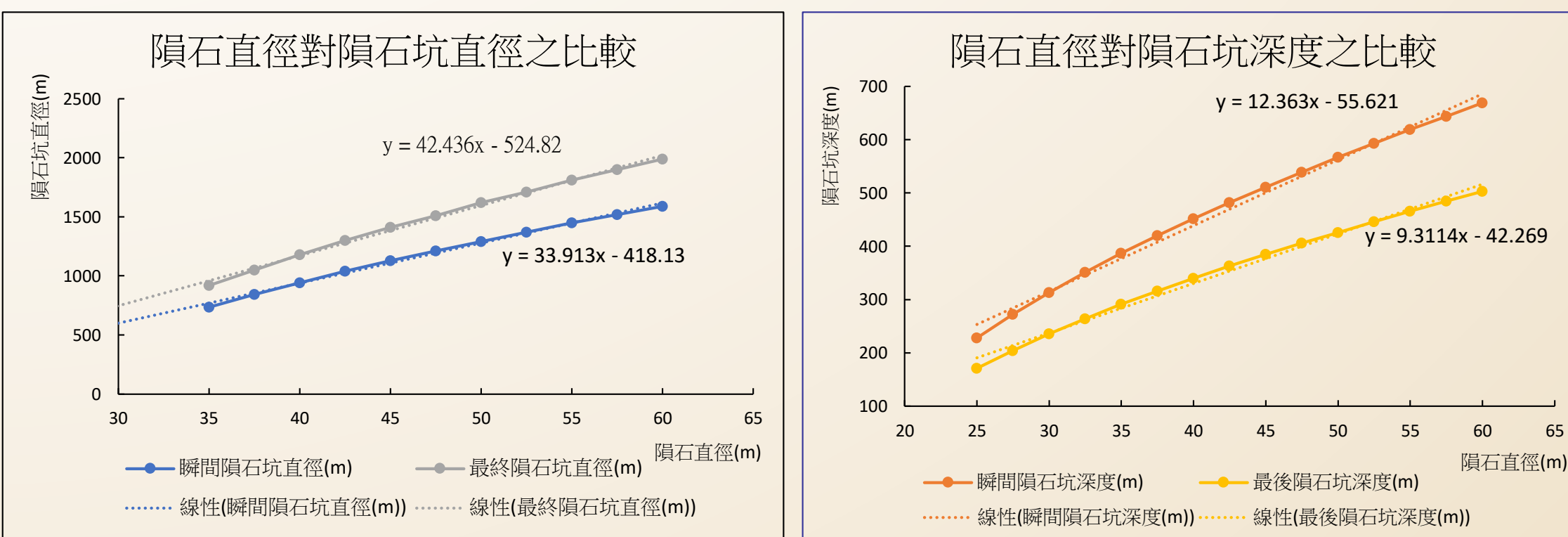
實驗1.2 固定撞擊角度60°，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度



實驗1.3 固定撞擊角度90°，選擇不同撞擊物大小及撞擊高度

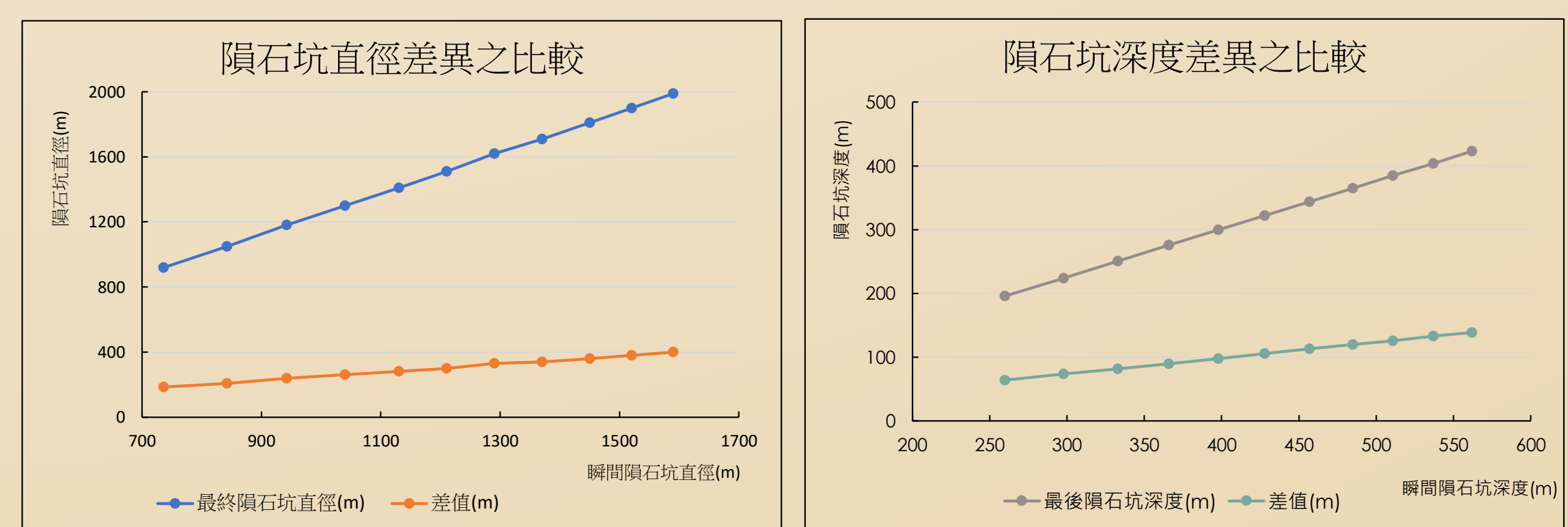


實驗1.4 模擬



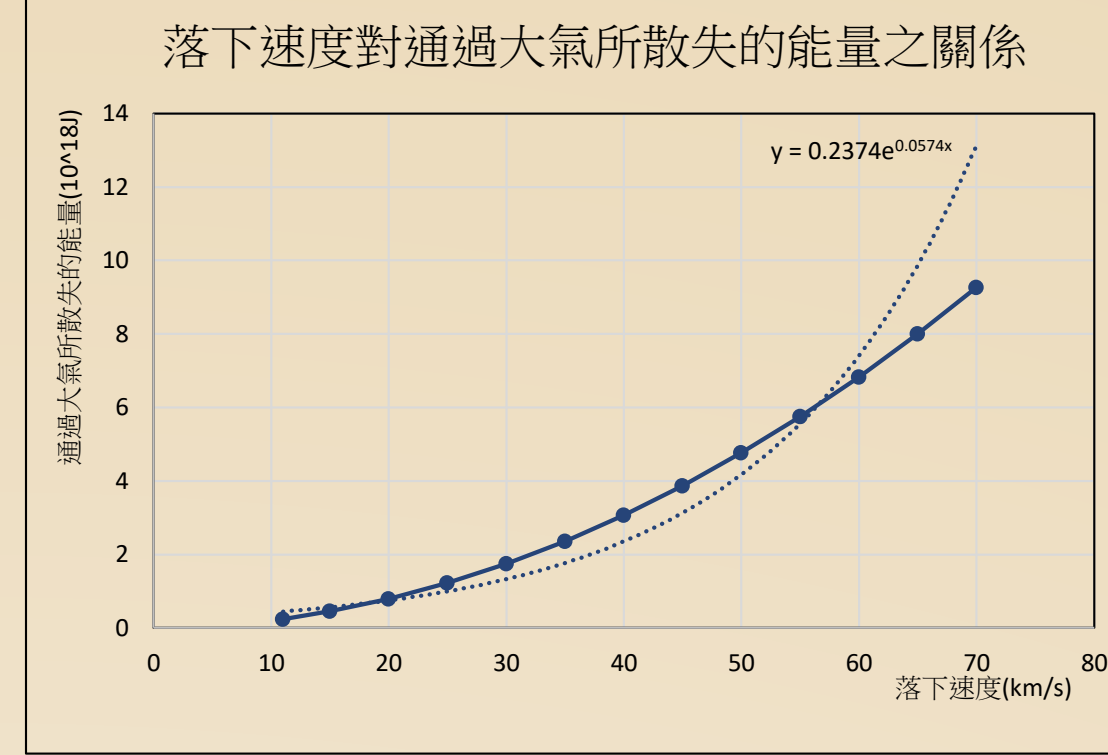
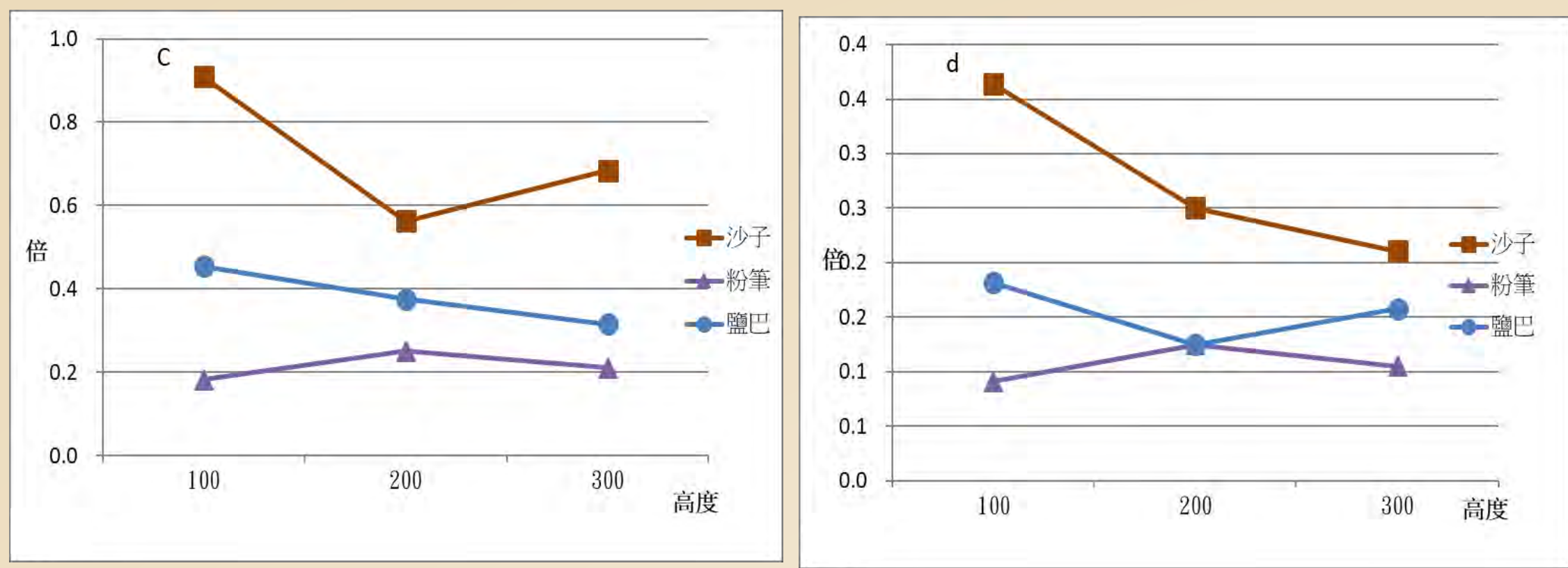
討論

- 1.由實驗1.1、1.2分析可看出，撞擊物越大，撞擊能量越大，所造成的坑洞也更大，對於b及c也是正相關，但對d影響較小。另外由模擬看出其對於瞬間直徑的影響愈大。
- 2.在沒有中央峰的情況下，隕石坑直徑的膨脹或深度的收縮都是成比例的，我推測應該是超高速碰撞所造成的。
- 3.隕石坑是否有中央峰並不會對瞬間直徑造成影響，但對最終的直徑就會有些微的影響，我猜測是因為形成有中央峰的隕石坑所需能量較大，所以造成的影響。



二、探討不同的被撞物條件對撞擊坑的影響

實驗2.1 固定撞擊角度60°，選擇不同被撞物的表層材料，沙子、粉筆、鹽巴

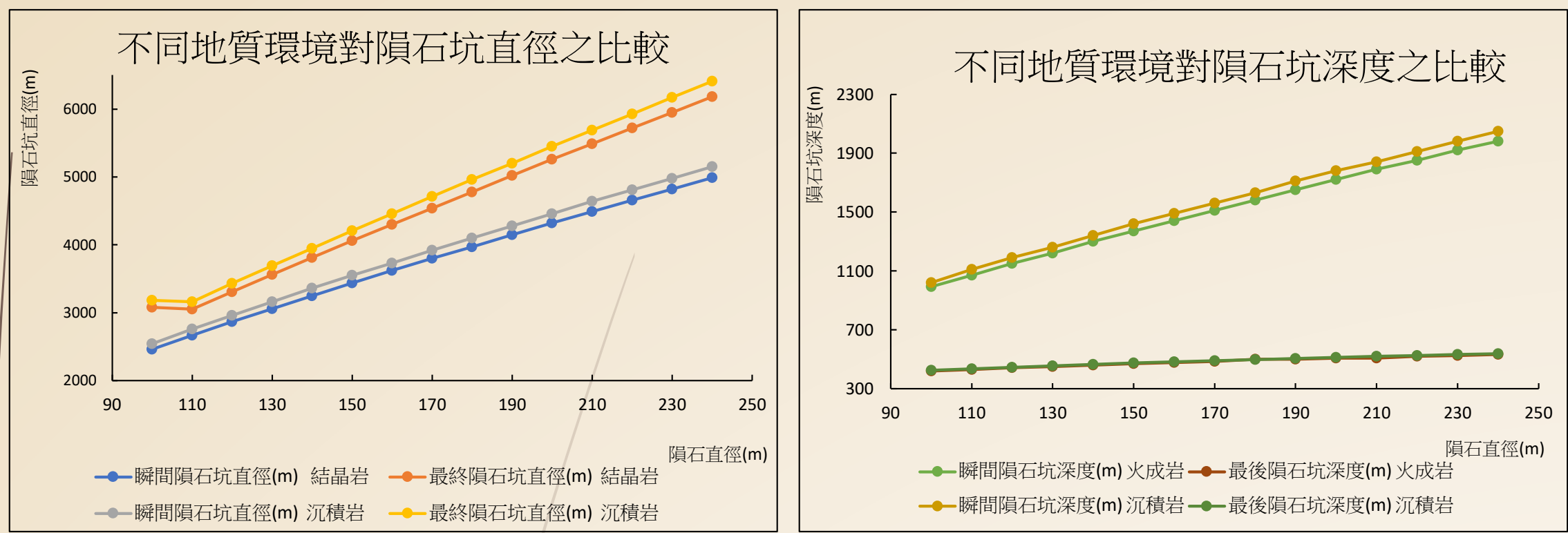


- 速度的大小和隕石坑直徑呈現正相關，最終隕石坑直徑在速度為25km/s。
- 速度的大小和隕石坑深度呈現正相關，但是最後隕石坑深度在速度為15km/s時，有最小值。
- 落下速度大小對通過大氣所散失的能量呈現類似指數的關係。

討論

- 落下速度對隕石坑的直徑和深度均不是成正比，推測是因為落下時受大氣的影響而造成的。
- 有中央峰的(在速度達到每秒15公里以上)直徑和沒有中央峰最終直徑大小的變化量並不明顯，推測其能量可能在產生中央峰的時候消耗掉。
- 有中央峰的(在速度達到每秒15公里以上)深度較沒有中央峰深度明顯的變淺了。推測應為超高速碰撞所造成的物理現象。

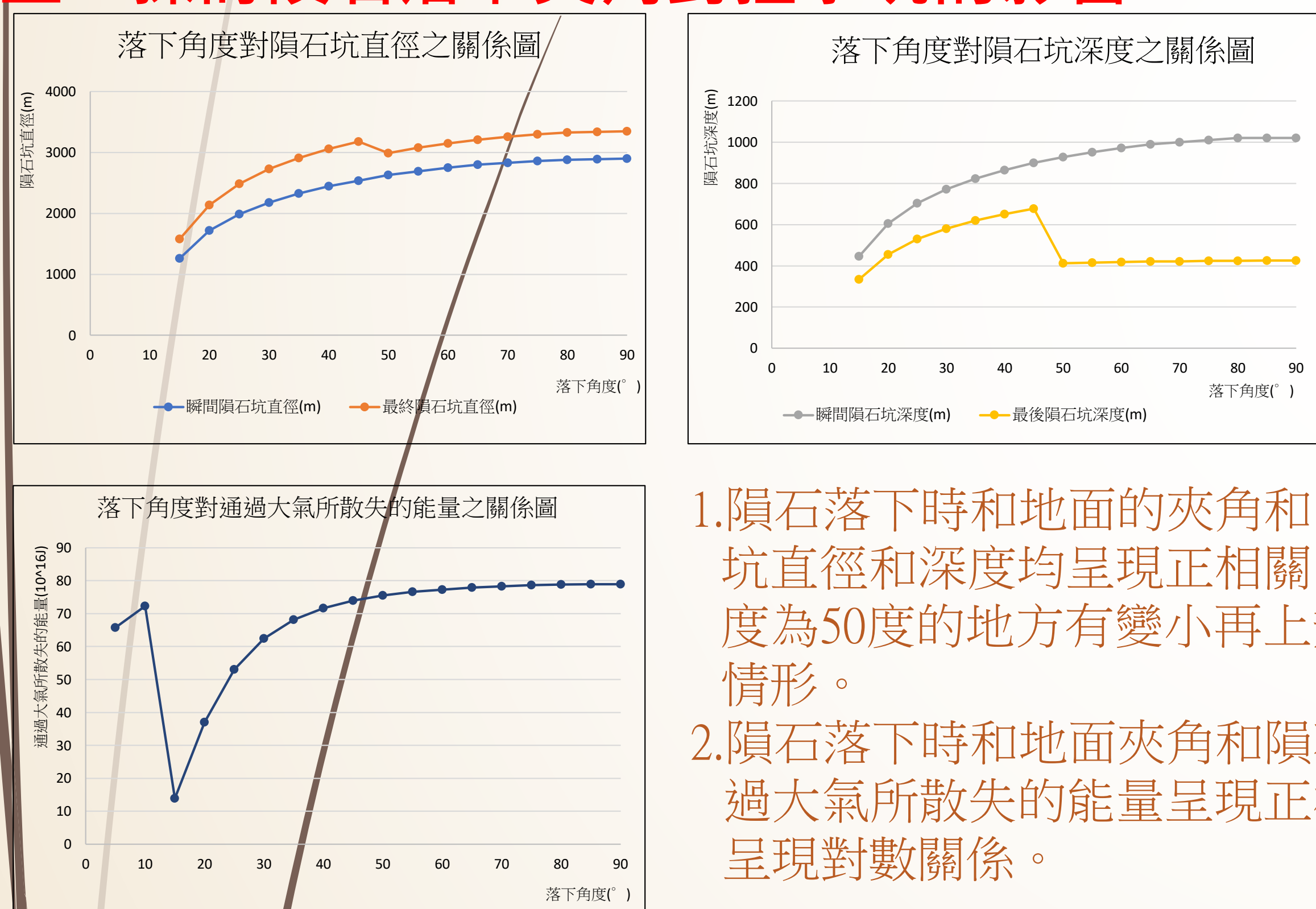
實驗2.2 模擬



討論

- 由實驗2.1分析可看出，被撞物表層硬度對b的影響大於a'值，對d影響小，不如角度對震波後面效果d的影響。
- 在相同基底硬度下，表層結構越鬆軟，對坑洞影響越大。因上層吸收衝擊，所以噴濺能量較小造成a'會隨厚度增加而變大，但b則相反，數值會變小。如同模擬所得結果，直徑愈大的隕石對於瞬間深度的影響愈大，在隕石直徑愈大的情況下，在不同地質所造成的瞬間深度影響也愈明顯，但地質和隕石大小對最終隕石坑的深度影響都不明顯。其中是否產生中央峰並不會對瞬間深度造成影響，但是對最終的深度就會有明顯的影響。
- 表層材質的影響上，主要是表層的質量為主要影響因素，質量越大坑洞越大，因為表層重量加重，所以動能越高，所造成的各項數值較大。與實際狀況沉積岩因地質結構較火成岩鬆軟，所以隕石坑直徑和深度都較火成岩大的結果相同。

三、探討隕石落下夾角對撞擊坑的影響

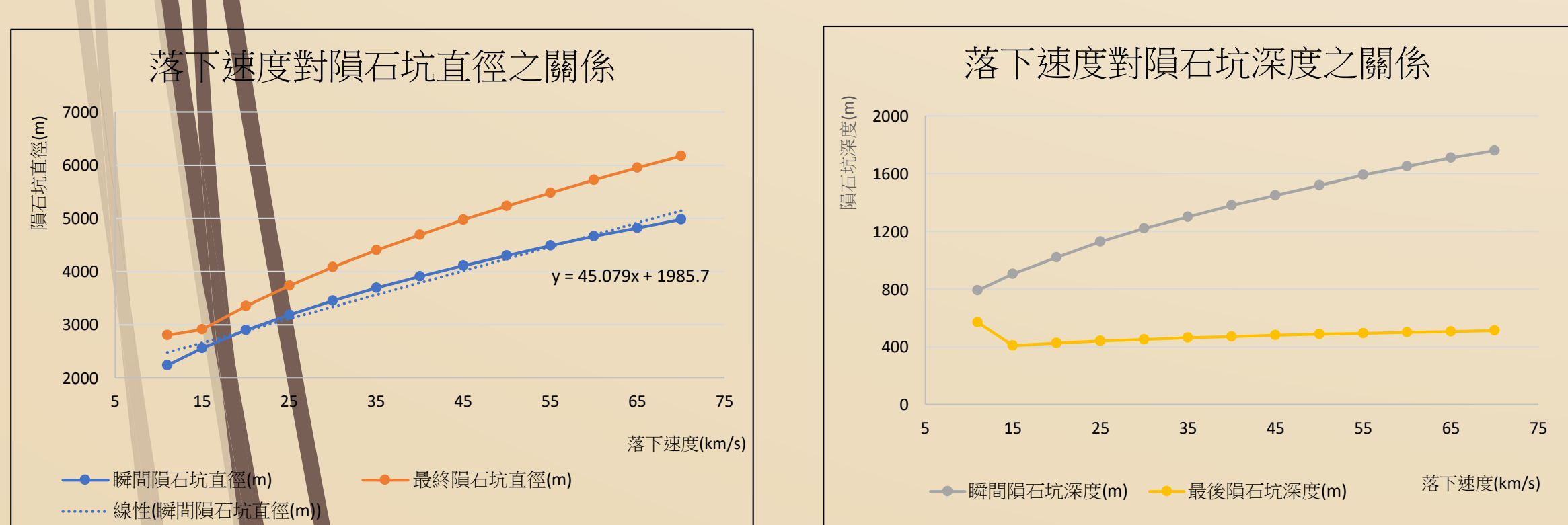


- 隕石落下時和地面的夾角和隕石坑直徑和深度均呈現正相關，角度為50度的地方有變小再上升的情形。
- 隕石落下時和地面夾角和隕石通過大氣所散失的能量呈現正相關，呈現對數關係。

討論

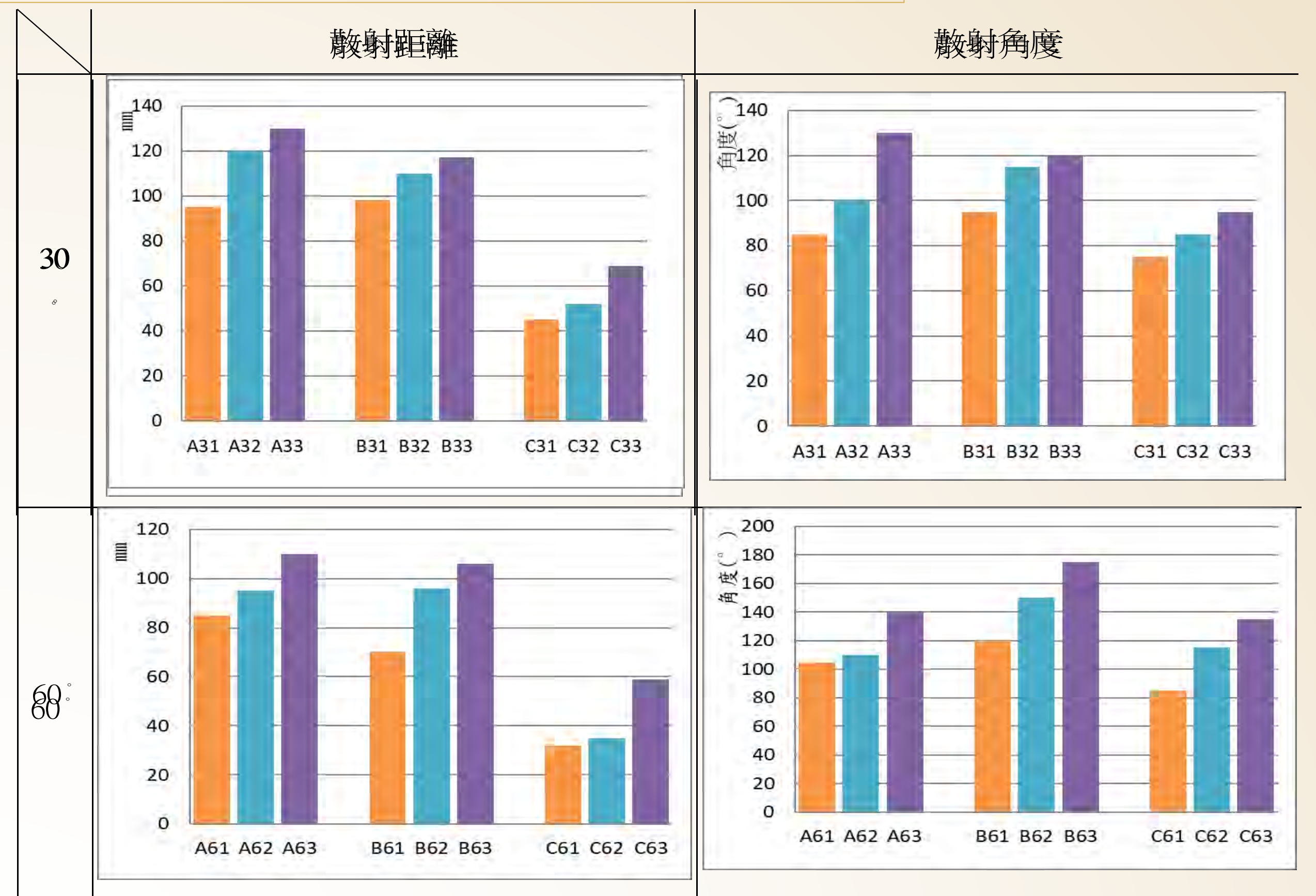
- 入射角度比高度及撞擊物對坑洞影響大。實驗1.3在不同高度撞擊角90°下，其坑洞大小並無太大差異，但隨角度降低，坑洞大小的狀況反而明顯，高度越高b些微增加。
- 在最終隕石坑直徑和最終隕石坑深度的圖形中，角度為50度的地方數值有變小處，但是並不是因為45度沒有中央峰而50度有中央峰。
- 在夾角大於15度時，呈現對數關係，而5度和10度之間是呈現負相關，因為5度和10度並不會產生隕石坑，因而造成圖形不同。
- 隕石落下時和地面的夾角和隕石的撞擊能量呈現正相關，角度5度和10度時，因為不會產生隕石坑所以和其他的資料很不一樣。
- 有很多出現折點的地方和前後的性質(是否產生中央峰或隕石坑)並無不同，推測除了隕石坑的性質外應該還有其他變因會影響最後隕石坑所呈現的型態。
- 比較實驗和模擬可以發現實驗中角度愈大撞擊坑愈小，反之，模擬得出的結果卻是角度愈大撞擊坑愈大，推測是因為模擬中距離較遠造成鉛直速度的差異愈明顯，進而造成隕石動能的差異。

四、探討不同隕石落下速度對撞擊坑的影響

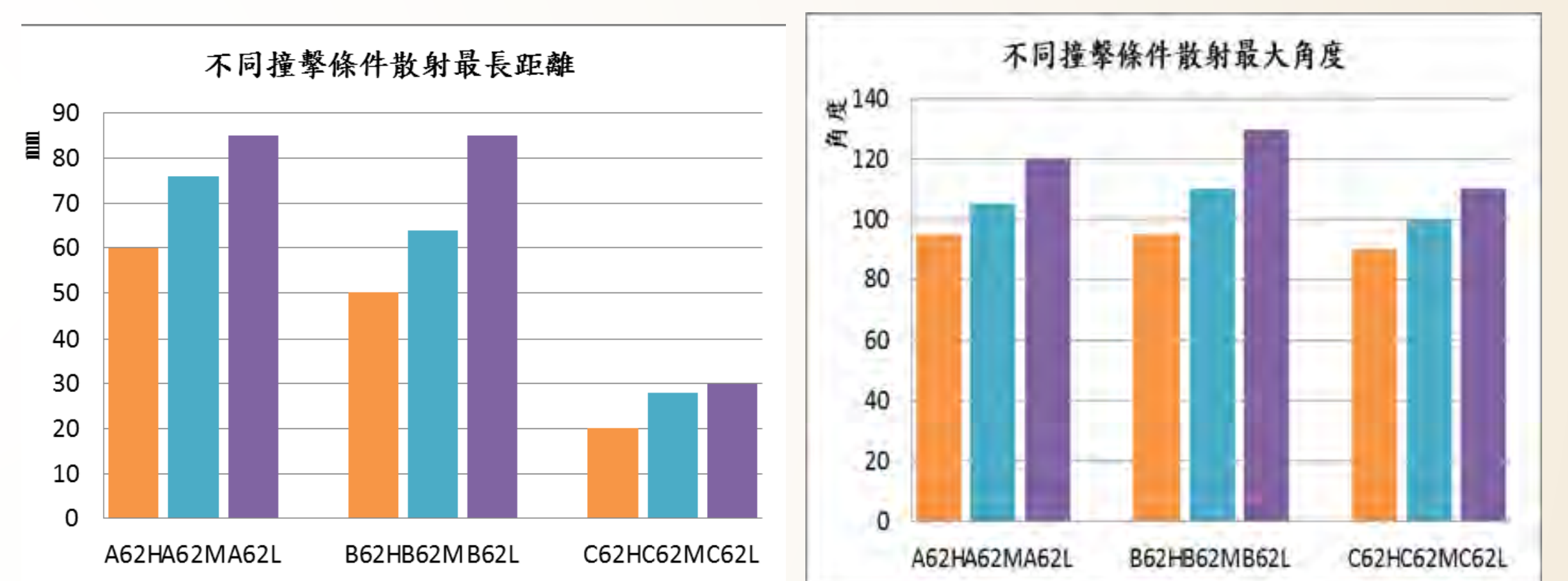


五、探討撞擊條件對散射的影響

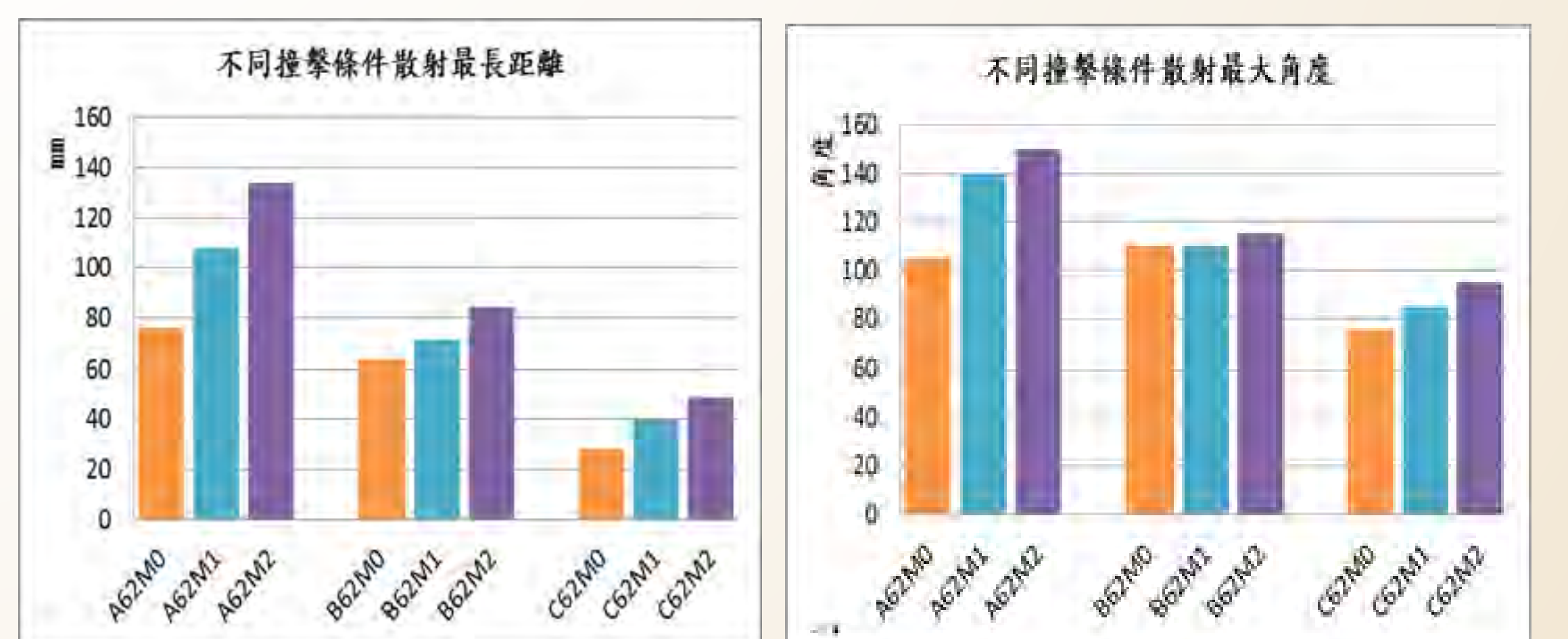
實驗5.1 不同撞擊條件所造成的散射距離及角度



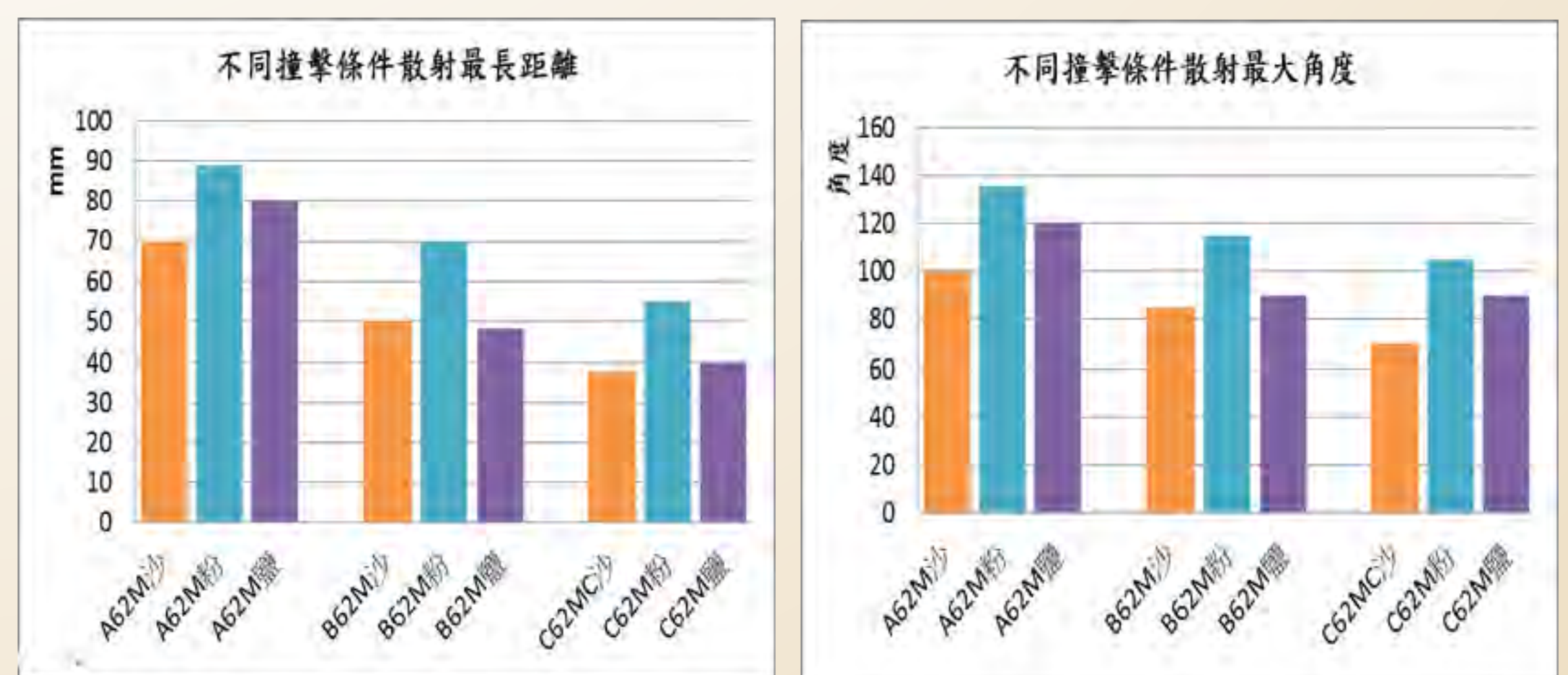
實驗5.2 不同被撞物的硬條件所造成的散射距離及角度



實驗5.3 不同厚度的硬條件所造成的散射距離及角度



實驗5.4 被撞物的表層材料所造成的散射距離及角度



討論

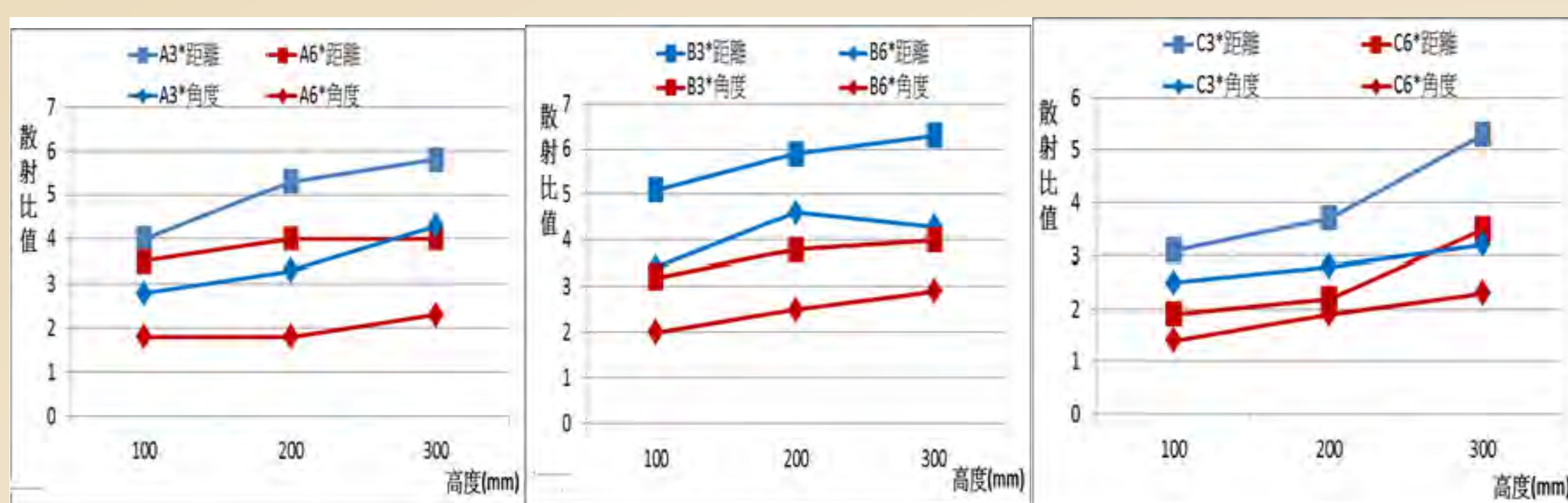
一、探討撞擊條件對散射的影響

- 分析實驗5.1，撞擊物越大，其散射的距離越遠，被撞擊物散射的量越多，角度越廣，但其散射並非依照球撞擊物的大小而等比例，表示影響的因素很多，包含誤差的影響。
- 在入射角90°下，由【*9*】可明顯看出，幾乎無散射的現象出現，但隨角度降低，散射的狀況反而明顯，高度越高散射的角度及距離越遠，所以，高度與鋼球大小影響散射現象的重要不如角度此參數。
- 撞擊的角度越大，所造成的散射角度也會越大，但散射距離卻越近。因為角度越大，縱向施力越大，所造成的散射角度越廣，但相對的，橫向施力較小，散射距離也較近。

二、探討被撞物條件對散射情況的影響

1. 探討實驗5.2，被撞物越硬，散射距離越近，而硬度與散射角度是負相關，散射距離與散射角度呈正相關。
2. 由實驗5.3分析可看出，被撞物的鬆軟度與散射距離呈正相關，尤其撞擊物越大，現象越明顯。
3. 撞擊物越大，散射距離越遠越明顯，但對散射角度並無太大關聯，主要還是取決於撞擊角度與表層材料。

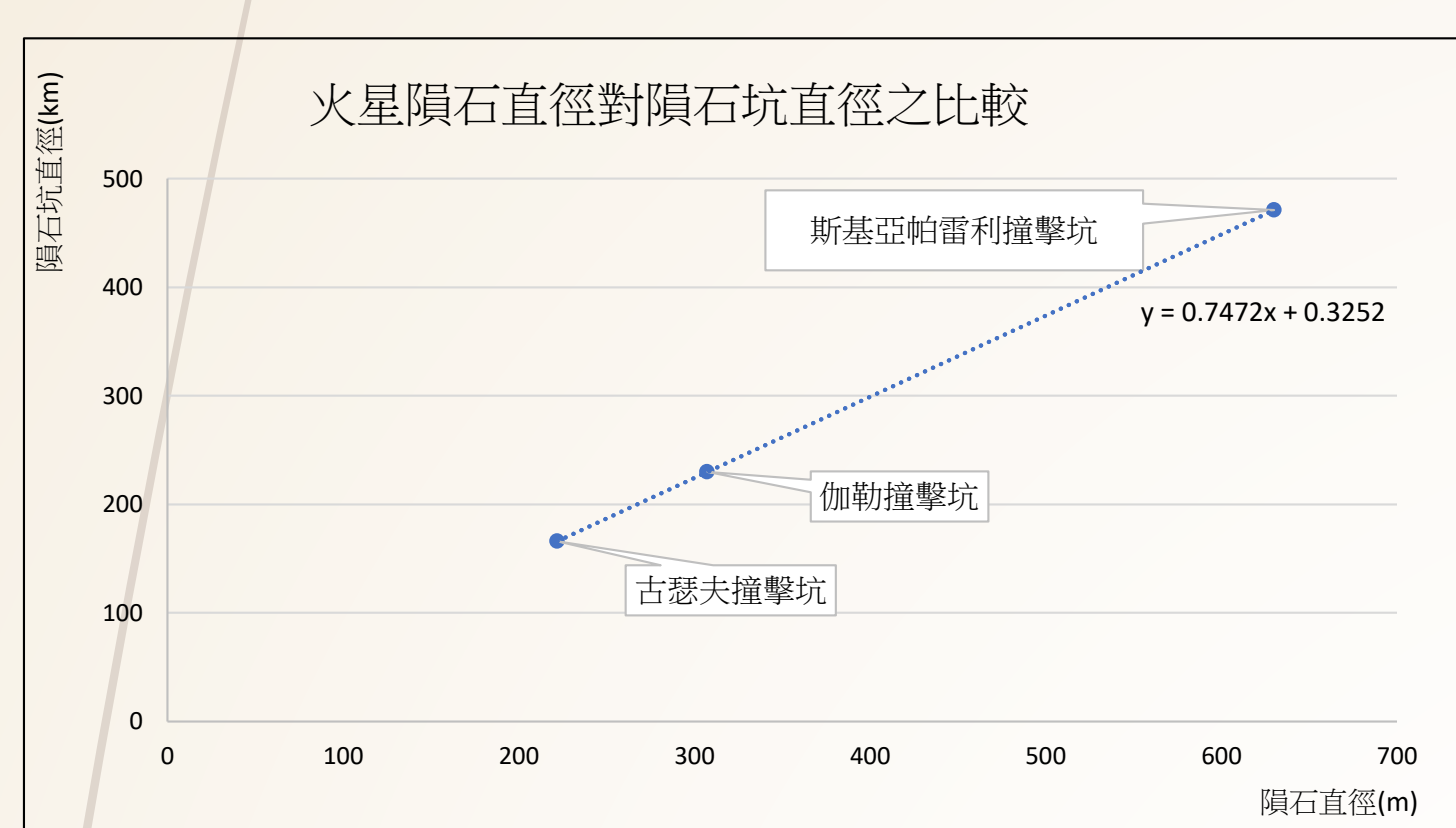
三、散射距離及散射角度分析



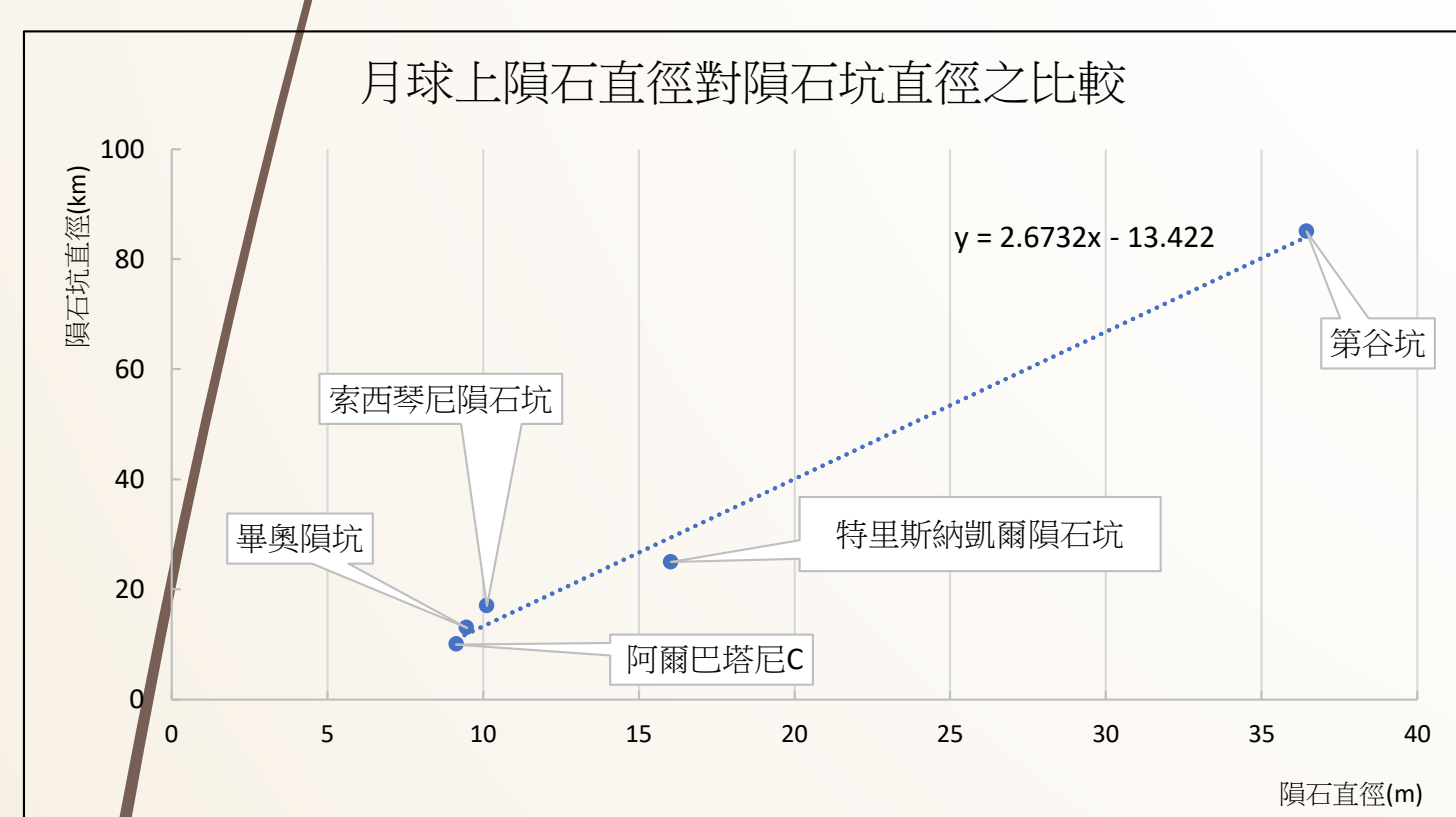
1. 散射距離與散射角度比值，隨撞擊角度增加而減少，呈負相關。
2. 撞擊高度的增加對散射距離與角度，呈正相關。

六、天體上的實例

(一) 火星	隕石坑直徑 (km)	推測爆炸能量 (J)	隕石直徑 (m)
古瑟夫撞擊坑	166	9.15×10^{18}	221.9
伽勒撞擊坑	230	2.43×10^{19}	307.2
斯基亞帕雷利撞擊坑	471	2.09×10^{20}	630

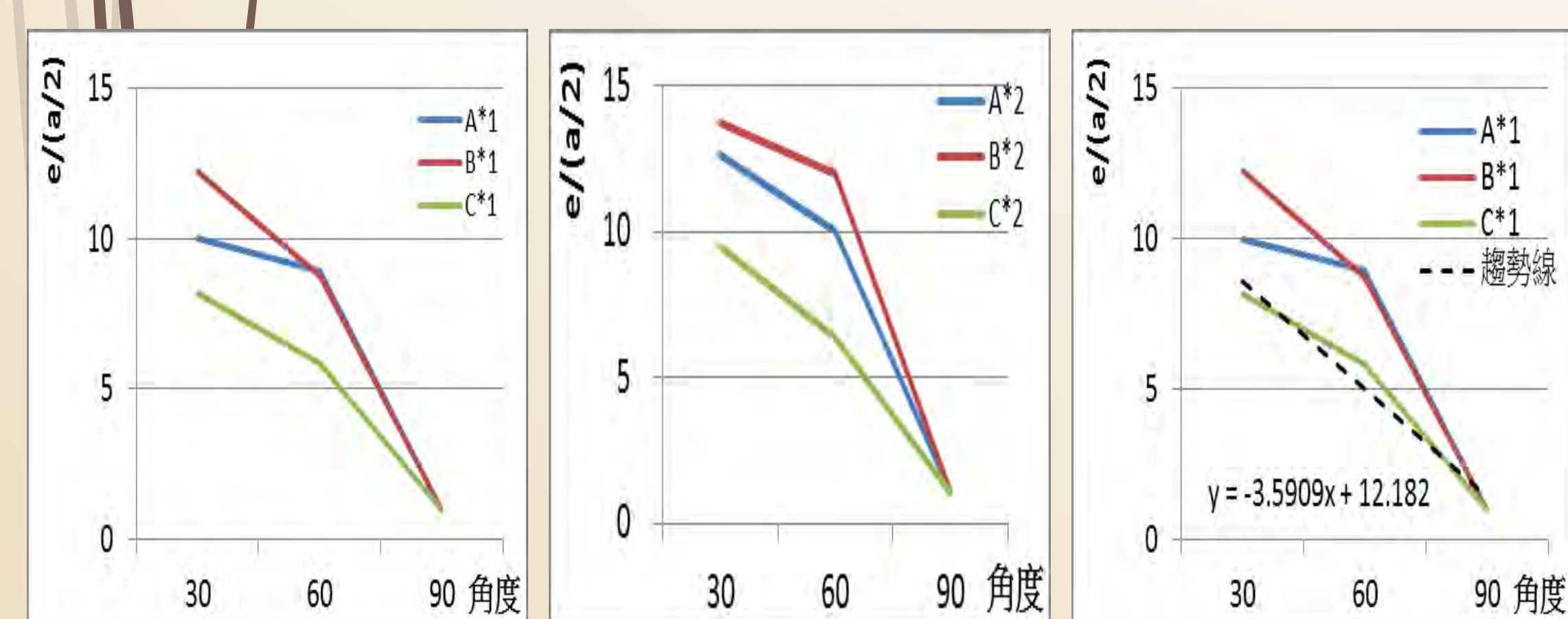


(二) 月球	隕石坑直徑 (km)	推測爆炸能量 (J)	隕石直徑 (m)
阿爾巴塔尼C	10	6.4×10^{14}	9.14
畢奧隕坑	13	7.15×10^{14}	9.48
索西琴尼隕石坑	17	8.67×10^{14}	10.12
特里斯納凱爾隕石坑	25	3.45×10^{15}	16.03
第谷坑	85	4.06×10^{16}	36.45



(三) 木衛四	隕石坑直徑 (km)	推測爆炸能量 (J)	隕石直徑 (m)
阿卡斯撞擊坑	60	4.32×10^{17}	80.17
阿斯嘉特撞擊坑	1600	5.12×10^{21}	1839

(四) 不同撞擊條件下，入射角與e/(a/2)折線圖



選擇【C*1】的情況來模擬，可求得線性趨勢線方程式為 $y = -3.5909x + 12.182$ ，可計算出大約撞擊角度如下表，發現結果非常接近，很適合簡易判斷出撞擊的角度值。

(五) 隕石坑撞擊角度

月球的隕石坑	第谷坑	哥白尼坑	刻卜勒坑
e(km)	1050	677	470
a/2(km)	351	350	221
e/(a/2)	2.99	1.93	2.12
撞擊角度	71.6	80.2	78.7
模擬撞擊角度	76.8	85.6	84.0

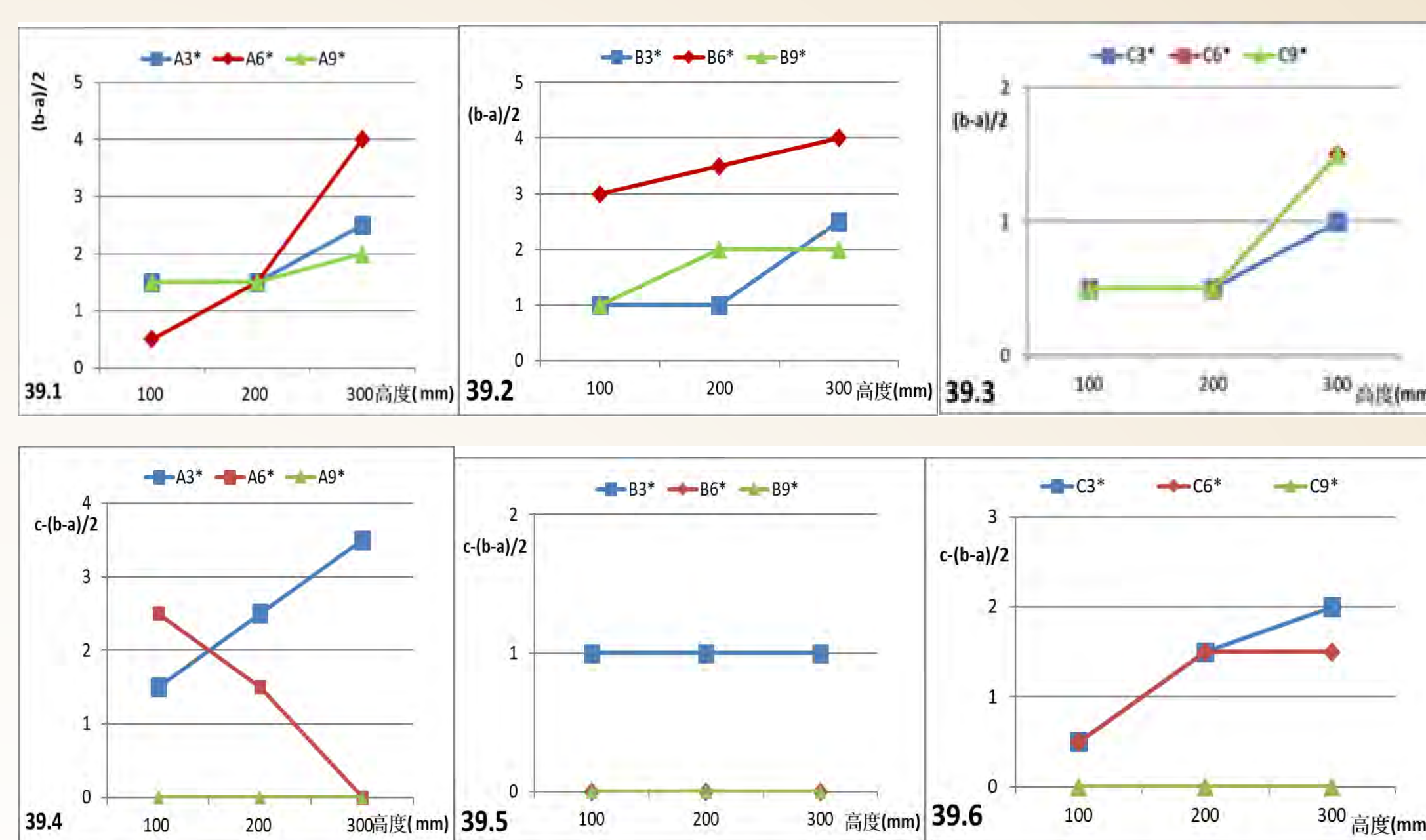
根據上表發現：

1. 月球上的隕石坑以第谷坑的e/(a/2)比值最大，但計算出的角度卻是最小，所以隕石撞擊時的角度和e/(a/2)比值呈現負相關。
2. 將撞擊點和散射距離之間連起來，可以得到一個圓形。如果圓形越扁，比值會越大，角度也就愈小。藉由這個圓形可以不必帶入公式而得知大約撞擊的角度。
3. 透過數值發現，月球上的隕石坑幾乎都是接近垂直撞擊，到底原因為何，目前還不確定，但希望以後能進一步探究這個問題。

討論

1. 在火星上，隕石直徑和隕石坑直徑成正比，但是月球有幾個例子並沒有落於回歸直線上，推測是因為隕石坑的型態不同所導致。
2. 在實驗中可以根據公式簡單算出隕石的撞擊角度，而模擬可以大致推出實際的隕石大小，如此一來可以更精確地以隕石坑型態去推測當時隕石落下的情形。

七、坑洞外緣大小分析



1. 由上圖發現，隨入射角度增加，(b-a)/2的值也增加，尤其在【B6*】時更明顯，可說明是縱向的力量大於30°時的狀況。
2. 動量c-(b-a)/2在30°時會隨高度增加，橫向力大，但入射角度從60°到90°時，橫向力更加明顯降低。

陸、結論

在實驗中發現，撞擊物質量越大、速度越快、角度越小，撞出的坑洞大小、震波大小、散射的角度等數據都越大，且被撞物表面材質越軟、厚度越厚，相關坑洞數值也越大，但是，模擬中卻顯示，動能愈大(直徑愈大、速度愈快、和地面的夾角愈接近90度)的隕石對於地面愈顯著，且對於地面的影響是一次的線性關係。

另外，動能愈大的隕石，散射的角度與散射的距離也呈正相關，而被撞物表面材質取決於材質重量，會影響其坑洞相關數據。此外，撞擊的角度是一個重要變因，當撞擊角度越大(30度→60度)，造成的散射角度也會越大，但散射距離卻越近，且撞擊角度與a'和c值為負相關，與b值為正相關。而大氣方面，動能愈大的隕石對於其影響也愈顯著，隕石在大氣中所耗的能量應該是呈現指數關係。

也發現撞擊坑散射的e/(a/2)比值和實際隕石坑相似，計算出結果後發現，月球上的隕石坑撞擊角度都趨近於90度。雖然有了實驗加上模擬的配合，但是和實際狀況仍有出入，所以推論除了以上的操作變因以外應該還有不同性質會造成不同的隕石坑。

柒、參考資料

- 一、吳俊穎等，月球隕石坑的觀測與模擬實驗，第三十七屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 二、王致勻等，外太空來的腳印—探討隕石撞擊的現象，第四十屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 三、陳泓維等，石破天驚—隕石撞關西，第四十七屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 四、李育歡等，月神阿提米斯(Artemis)的傷疤~月球隕石坑和輻射紋之模擬與探討，第五十屆中小學科學展覽會，地球科學科。
- 伍、維基百科，第谷坑，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%AC%AC%E8%B0%B7%E5%9D%91>
- 六、<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01657>
- 七、Impact: Earth!<https://www.purdue.edu/impactearth/>
- 八、經福謙。(1990)。超高速碰撞現象爆炸與衝擊。10(3)。279-288。
- 九、曹承麟，鄒泰松，周超，錢廣銳。(2006)。二次災難。大學物理。25(10)，55-55。