

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

團隊合作獎

030501

愛的迫降-火流星事件型態及現象模擬之研究

學校名稱：苗栗縣立頭份國民中學

作者： 國二 謝阡芊 國二 陳亮妤 國二 林心喬	指導老師： 張聖麒 李桂雲
---	-----------------------------

關鍵詞：火流星、現象模擬、羽狀碎屑雲

摘要

火流星於空中爆炸及撞擊地面之型態，以模擬實驗觀察空中爆炸後碎屑雲及撞擊地面隕石坑現象。撞擊模擬利用 BB 槍射擊(1 焦耳動能)不同地質層，得到與現實相同結果：

(1)模擬之撞擊坑多數有形成環形山及中央丘

(2)無論不同角度、模擬物質量，隕石坑都接近圓形。

另發現乾燥土壤(125-250 μm)，長寬深不會因為撞擊角度改變；玉米粉(10-15 μm)，角度 30 度-90 度所形成之隕石坑，長寬與深度比值接近，15 度因撞擊時間較短差異較大，撞擊能量與地質作用占較大影響因素。以土球進入水中不同介質做測試實驗，有碎屑產生。在氣球內放入玉米粉等小顆粒粉末，在不同移動角度下，皆成功模擬出羽狀碎屑雲、蝴蝶狀衝擊波，與 2013 年俄羅斯隕石事件及通古斯大爆炸相符。

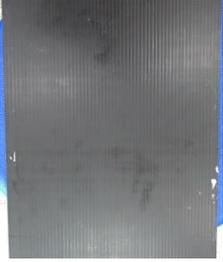
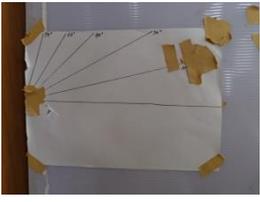
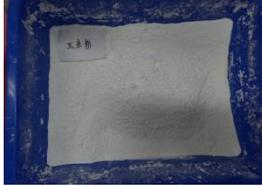
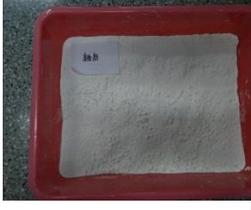
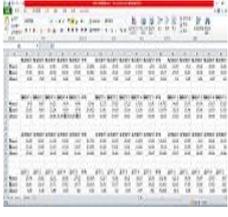
壹、 研究背景及動機

流星常常代表的希望及許願，也可以能像你的名字中那顆一瞬即逝的彗星，帶來毀滅。但實際上的流星，應該是什麼狀況呢？我們從生物課本上得知，在數千萬年前，火流星撞擊地球是造成恐龍滅絕的原因之一，尤其是在白堊紀的希克蘇魯伯撞擊事件，更剩約四分之一物種存活。因此我們很好奇，火流星的撞擊到底具有多大的威力呢？因此我們展開了這次研究，希望能用簡單的方式，了解流星在地球上留下的故事。於是我們展開了此次研究，希望能藉由周遭方便取得的資源，模擬出接近真實的情形。

貳、 研究目的

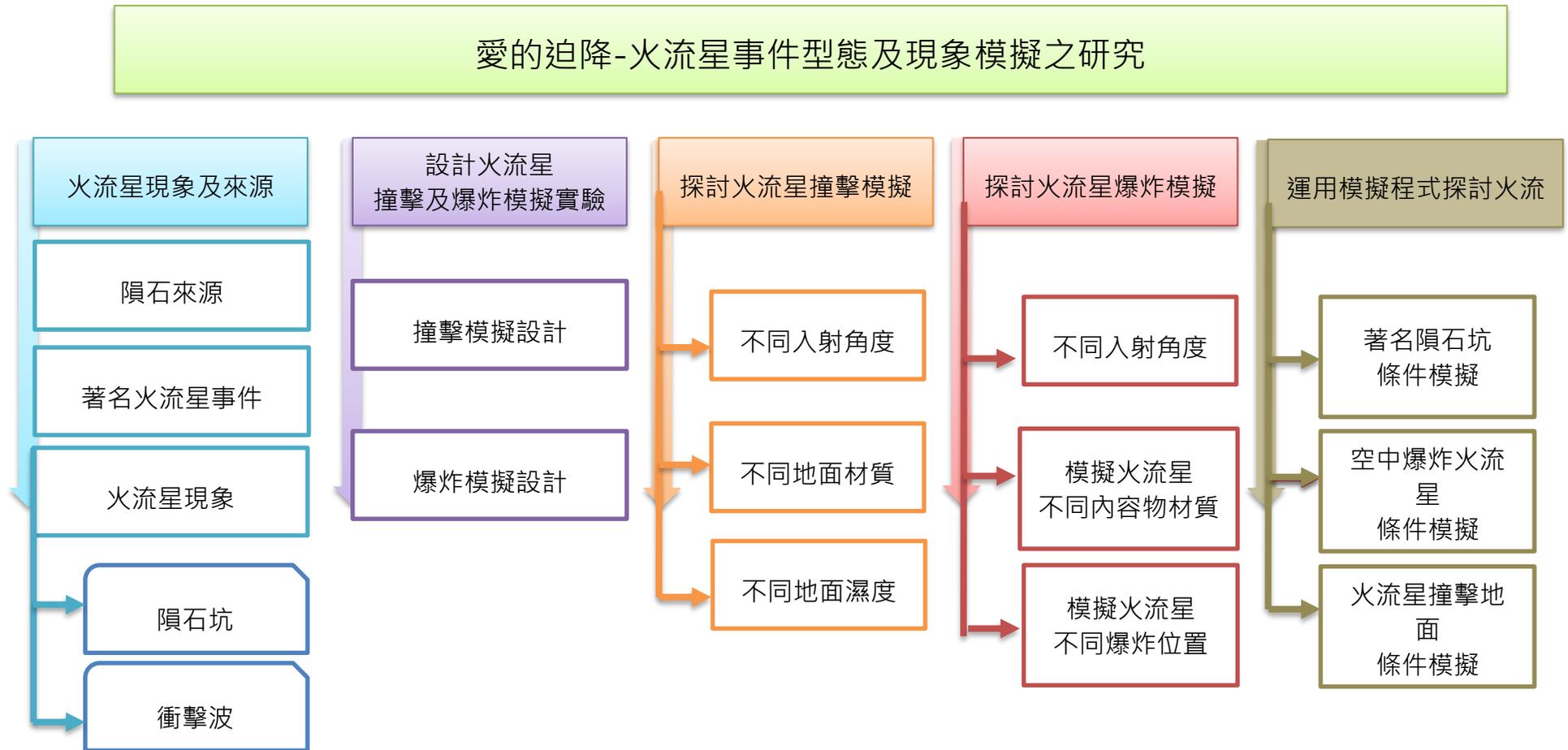
- 一、從文獻探討火流星類型及在地球觀察到的現象
- 二、設計火流星撞擊及爆炸模擬實驗
- 三、探討火流星撞擊模擬的情形
- 四、探討火流星爆炸模擬的情形
- 五、運用模擬程式探討模擬實驗

參、 研究器材

				
3 吋汽球	腳架	針	PP 板 (黑色)	磚頭
				
自製角度標記	游標尺	捲尺	風箏線	自製發射器(跳繩、橡皮筋繩、吸管)
				
相機	BB 槍	BB 彈	測速器	碎石
				
水缸	塑膠盆	玉米粉	地瓜粉	麵粉
				
土	電腦	Impact Earth 模擬程式	Microsoft Excel	鋼珠

肆、 研究方法

◆研究架構



一、從文獻探討火流星類型及在地球觀察到的現象

(一)火流星來源

火流星是進入大氣層後因摩擦生熱而燃燒並發出可見光芒的彗星、小行星或流星體(在太陽系裡散佈成千上萬的冰塊、灰塵顆粒，一般稱這些顆粒為流星體)，燃燒後所剩、墜落到地表的火流星殘骸則是隕石。

(二)著名火流星事件

1. 1908 通古斯加爆炸事件

西元1908年6月30日，發生於現今俄羅斯西伯利亞埃文基自治區上空。起因為一顆直徑17-20公尺，重量大約11,000噸的小行星爆炸所引起的。產生的衝擊波將附近650公里內的窗戶玻璃震碎，並且觀察到了蕈狀雲的現象。科學家們估計釋放出的能量規模約185個投擲廣島的原子彈。此爆炸事件沒有留下隕石坑，原因可能是這小行星在穿過大氣時因遽增的壓力和溫度而崩解，力量太大以致於天體沒有留下明顯的碎片。

2. 2013年俄羅斯隕石事件

為通古斯加大爆炸後最大規模的火流星撞擊事件，又名為「車里雅賓斯克小行星撞擊事件」，發生在2013年2月15日的俄羅斯烏拉爾聯邦管區車里雅賓斯克市，為一次小行星撞擊事件。此小行星直徑約為17公尺，爆炸規模約相當於30顆廣島原子彈。主要的碎片擊中了切巴爾庫爾湖，因為當時湖面結冰以及碎片極小，並沒有產生隕石坑。

3. 巴林傑隕石坑

巴林傑隕石坑約在50000年前形成。位於美國亞利桑那州北部的沙漠，保存完好。根據推測，形成巴林傑隕石坑的火流星是一顆直徑50公尺左右的鎳鐵質火流星，而撞擊速度至少達到每秒數公里。撞擊時所釋放的能量相當於10兆噸黃色炸藥，但大約一半的隕石體在撞擊前就已在大氣層中氣化，只有極少數隕石碎片散布在隕石坑周圍。

(三)火流星現象

1. 隕石坑

當物體撞擊到地球表面，可能形成隕石坑。隕石坑為火流星撞擊後形成的環狀凹坑，中間通常有一座小山。也稱為撞擊坑或環形山。

2. 衝擊波

當物體進入大氣層，與空氣摩擦，受壓力和與大氣氣體的化學相互作用使其升溫並輻射能量，在空中裂解後產生的衝擊波。

二、設計火流星撞擊模擬實驗（撞擊地面）

目標：嘗試以生活上能取得的物品，模擬火流星撞擊地面的情形。

1. 讓模擬火流星達到高速

首先嘗試彈弓，但是有準確率跟速度不容易控制的問題；再來嘗試使用自製空氣槍，但有加壓過程及子彈不易射準的問題；後來改以較為安全的 BB 槍(平均射速 38.3m/s)。(因法規有限制，BB 槍、空氣槍等需滿 14 歲)

2. 不同變因選擇

設計實驗結果：BB 槍僅有一種射速、子彈大小也有限制(6mm)，因此不改變速度變因，以射擊角度、地面材質、土壤溼度、地質結構和火流星質量等進行模擬火流星撞擊之探討。原欲使用鋼珠，以符合鐵質隕石的條件，但有相關法規規定，故皆以塑膠 BB 彈模擬火流星，並從固定高度往固定地質發射，觀察火流星在不同角度撞擊地面對隕石坑生成的影響。裝置圖如下(如圖 1)：

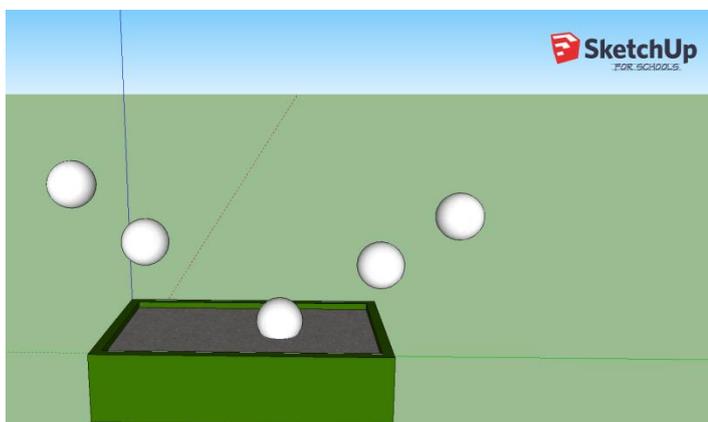


圖 1 撞擊實驗示意圖

根據此實驗項目及變因探討，設計下列實驗：

實驗 1 操縱變因：操作不同撞擊入射角度(90°、75°、60°、45°、30°、15°)，角度控制由手機感測儀，如下圖 2 所示。旨在探討火流星從不同角度撞擊所造成的隕石坑形狀、深淺。



圖 2 手機感測器調整角度

實驗 2 操縱變因：不同地面模擬材質(土壤、地瓜粉、麵粉、玉米粉)，旨在探討火流星撞擊對不同地面地質造成的隕石坑形狀、深淺。除土壤外，另選擇地瓜粉、麵粉及玉米粉原因為：撞擊物體為塑膠 BB 彈，質地較軟，因此嘗試以顆粒較均勻、質地較軟之材質來做模擬地面比較。

實驗 3 操縱變因：不同地面溼度(乾燥土壤、濕度 10%土壤、濕度 20%土壤)，藉由不同水含量，探討火流星撞擊地面時，不同軟硬度的地質對隕石坑的影響。

實驗 4 操縱變因：不同地質結構(以土壤 3 公分厚度+不同彈性的結構層(海綿、木板、磁磚、保麗龍、碎石層)，探討火流星撞擊不同地質結構對隕石坑影響。

實驗 5 操縱變因：不同火流星質量，調整 BB 彈質量(0.12g、0.25g、0.36g，直徑皆為 6mm)，以相同 1 焦耳動能，可探討不同質量的火流星撞擊地表對隕石坑形成的影響。

三、設計火流星爆炸模擬實驗（空中爆炸）

目標：嘗試以生活上易取得的物品，模擬火流星在空中爆炸的狀況。

我們從 2013 俄羅斯隕石事件來思考(如下圖 3) 火流星在空中爆炸的情形，若我

們能製造一個軌道，讓火流星模擬物在運行時爆炸，也許就可以了解碎屑及衝擊波的狀況。



圖 3 2013 俄羅斯隕石事件

生活中最常見爆炸的狀況，就是看到氣球爆炸，也是我們能夠取得的「安全爆裂物」。為了看到衝擊波，我們思考以下列方式進行：

設計實驗結果：

為了解火流星在大氣層中的現象，逐步設計下列實驗進行探討：

1. 在盛滿粉末的塑膠盆上將氣球引爆，觀察粉末飛散狀況(參考樹木傾倒概念)。但是氣球引爆造成的氣流，卻不足以讓粉末產生明顯的痕跡。(如下圖 4)

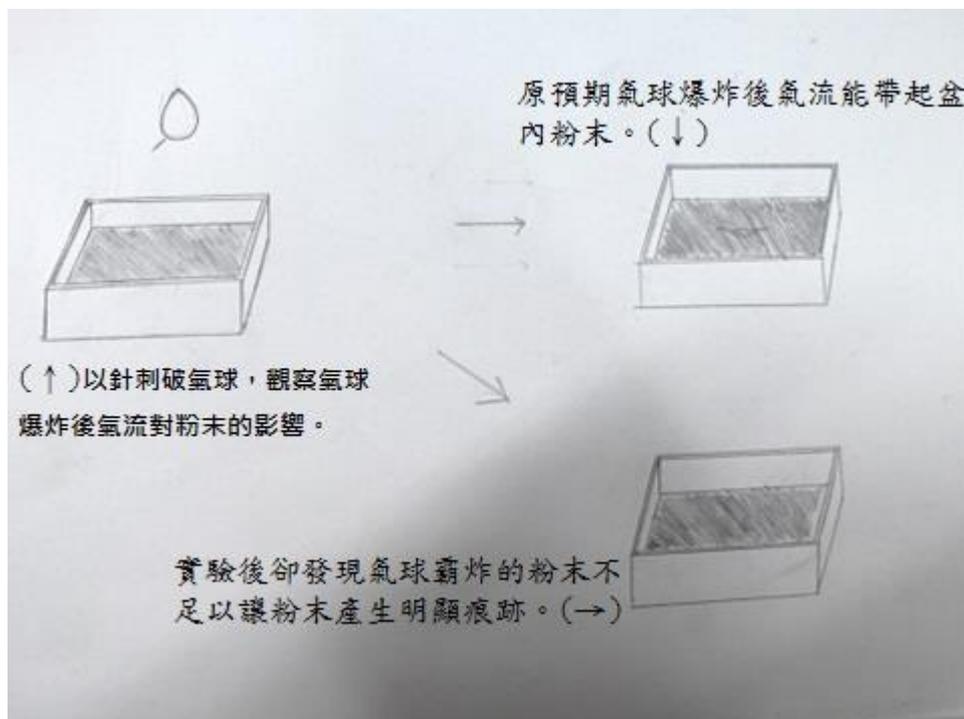


圖 4 測試實驗示意圖

2. 思考火流星進入大氣層中，是從密度低的環境(宇宙)進入到密度較高(大氣層)的環境，因此以土球投入水中，進行測試實驗，以觀察土球受水阻力作用時，碎屑散佈情形。



圖 5 土球進入水中測試實驗過程

3. 在氣球中填入粉末，觀察引爆氣球之後的痕跡。首先先驗證粉末不是僅以慣性落下。引爆氣球爆炸後，粉末呈現發散狀、羽狀及蝴蝶狀，符合爆炸可能產生的衝擊波形狀。(如下圖 6)

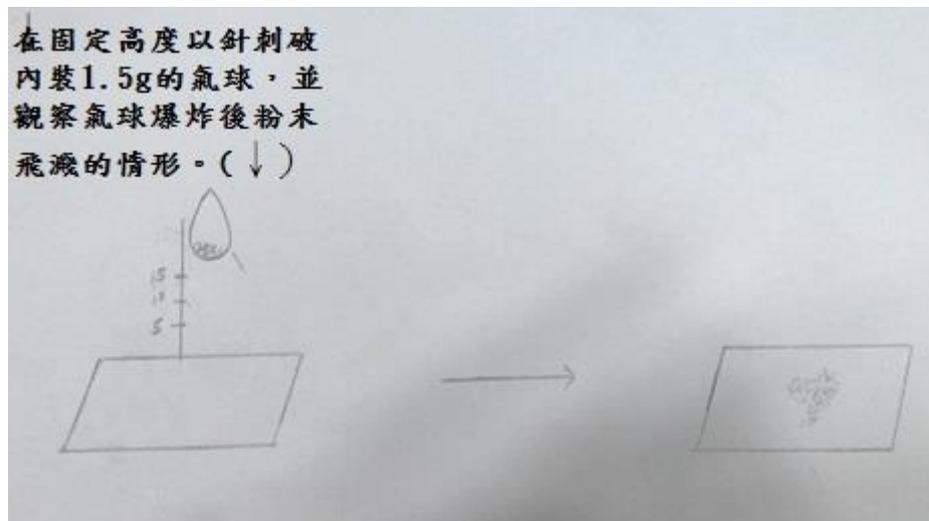


圖 6 測試實驗示意圖

4. 以自製發射器發射內裝有粉末的氣球，並使氣球在運行時被刺破，以觀察氣球破裂後粉末濺散之情形。(如下圖 7)

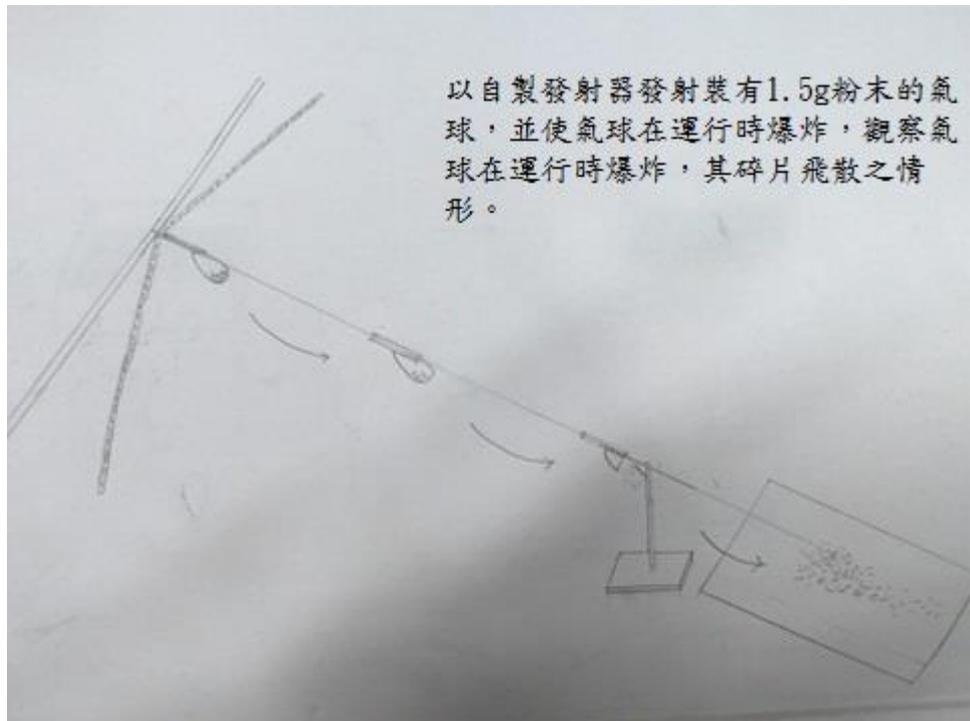


圖 7 爆炸模擬實驗示意圖

此實驗利用自製發射器，分為三組實驗。

實驗 1 的操縱變因為**不同入射角度**，可探討火流星從不同角度墜落中爆炸，火流星碎片散落的形狀。

步驟：以氣球模擬火流星，內裝有相同材質的粉末（玉米粉、地瓜粉或麵粉），實驗中不調整針的位置，並從不同角度（ 10° 、 20° 、 25° ）發射，再觀察粉末飛散的情形。

實驗 2 的操縱變因為**不同顆粒大小組成之火流星**，探討不同顆粒大小流星碎片飛散情形。

步驟：以氣球模擬火流星，氣球內裝有不同材質的粉末（玉米粉、地瓜粉、麵粉），實驗中固定針的位置，並從固定角度（ 10° 、 20° 或 25° ）發射氣球，再觀察粉末飛散的情形。

實驗 3 操縱變因為**不同火流星爆炸位置**，可探討火流星從不同位置爆炸對隕石碎片飛散的影響。

步驟：以氣球模擬火流星，內裝有相同材質的粉末（玉米粉、地瓜粉或麵粉），每一組實驗改變架設針的位置（下算做一邊、左為一邊），並從固定角度（ 10° 、 20° 、 25° ）發射，再觀察粉末飛散的情形。

四、運用模擬程式探討火流星現象

（一）著名隕石坑條件模擬

以 Impact Earth 模擬器提供的著名火流星爆炸事件的火流星數據進行模擬，並探討此類事件對地球的影響。

（二）空中爆炸火流星條件模擬

操縱變因為直徑、角度、速度及離地球的距離，每套模擬變更一項操縱變因，其餘三項及火流星密度、目標類形(地質)皆為控制變因，再比較同一操縱變因下，未造成隕石坑的數據，進而推測每一項操縱變因與火流星進入大氣層後，在空中爆炸的情形有何關連。

（三）撞擊地面火流星條件模擬

操縱變因及控制變因如(二)，比較同一操縱變因造成的隕石坑數據，進而推測每一項操縱變因對隕石坑的影響為何。

伍、 結果與討論

一、探討火流星的類型及在地球觀察到的現象

(一)火流星來源

在外來星體進入地球後，會有兩種狀況，一種狀況是撞擊到地面形成隕石坑，另一種是在大氣層就因與空氣摩擦而裂解，在空中爆炸。因此許多空中爆炸事件，可能是外來星體在空中燃燒殆盡造成的。

(二)火流星現象

1. 隕石坑

隕石坑的形成，可以從圖 1 得知，當火流星撞擊地表時，會與地面上的應力作用而產生坑洞，撞擊過程及地面的回饋。因此，隕石坑的形成與火流星撞擊角度、速度、火流星大小、質量、成分、地面材質等等有關係，其形成的環形山及中央丘是很重要的判斷依據。

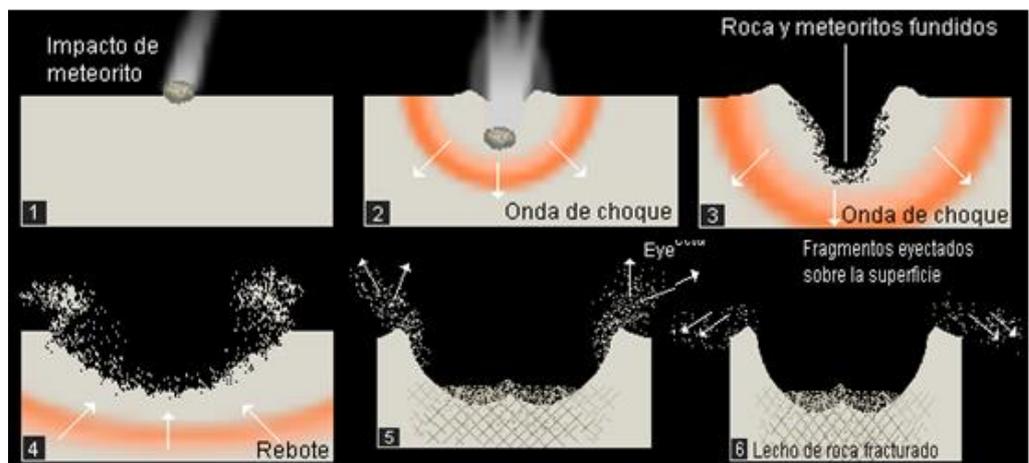


圖 8 隕石坑形成原因

2. 衝擊波

針對火流星在空中爆炸的狀況，如圖 2 所示，1994 至 2013 於大氣層爆炸的小行星。從這些事件資料彙整，假設以速度 17 公里/秒，角度 45 度進入地球為條件，列出小行星直徑 4m 到 70m 在空中裂解的遭遇頻率，每 1.3 年會有一次 4m 小行星、每 10 年會有一次 10m 小行星、每 764 年會有一次 50m 小行星、每 1900 年會有一次 70m 小行星。而常

見造成的衝擊波，有羽狀(如 2013 俄羅斯隕石事件)、蝴蝶狀(如通古斯大爆炸)等，會造成地面樹木傾倒或是門窗破裂的情形。

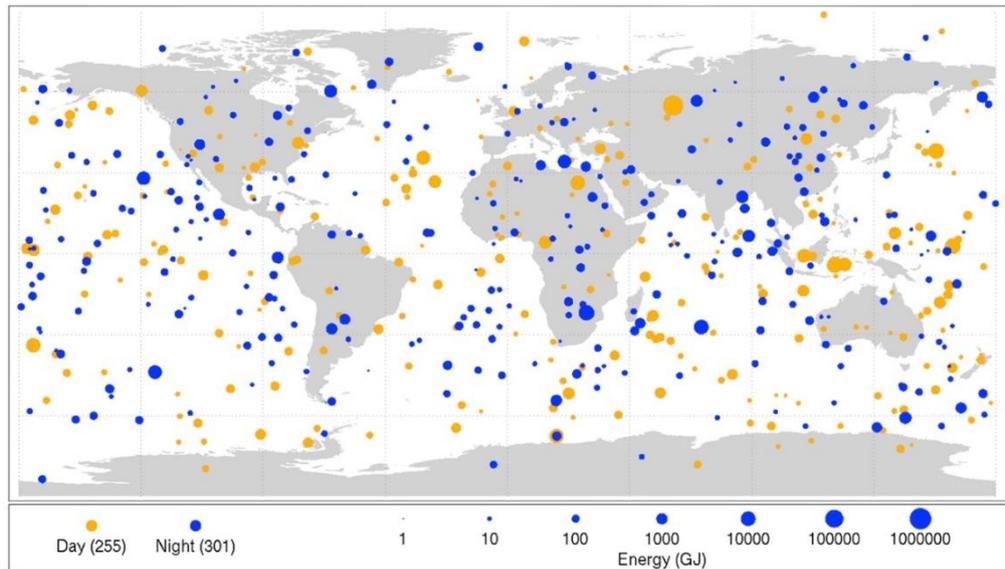


圖 9 1994 年至 2013 年在大氣層爆炸的小行星分布

其中 2013 俄羅斯隕石事件，是能找到較詳細記錄及影像的事件，觀察到明顯的爆炸蕈狀雲及羽狀碎塵雲。(如圖 10、11)



圖 10 隕石蕈狀雲及碎屑雲

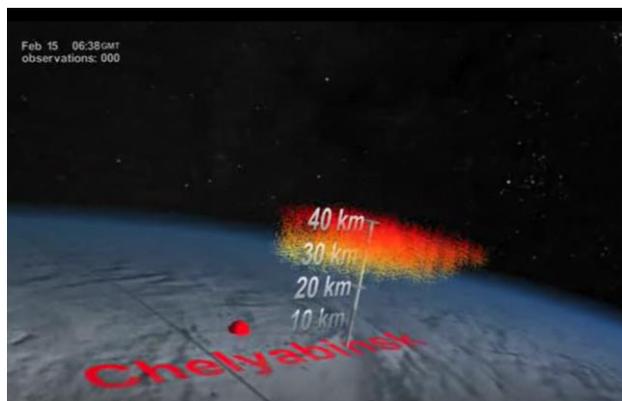


圖 11 NASA 羽狀雲模擬圖

二、設計火流星撞擊及爆炸模擬實驗

(一)設計火流星撞擊模擬實驗(撞擊地面)

目標：嘗試以生活上能取得的物品，模擬火流星撞擊地面的情形。

1. 讓模擬火流星達到高速

首先嘗試彈弓，但是有準確率跟速度不容易控制的問題；再來嘗試使用自製空氣槍，但有加壓過程及子彈不易射準的問題；後來改以較為安全的 BB 槍(平均射速 38.3m/s)。(因法規有限制，BB 槍、空氣槍等需滿 14 歲)

2. 變因選擇

BB 槍射速固定、子彈大小也有限制(6mm)，因此不改變速度變因，以射擊角度、地面材質、土壤溼度、地質結構和火流星質量等進行模擬火流星撞擊之探討。

實驗結果：火流星進入大氣層再到撞擊地面所形成的隕石坑，會受到自身材質、質量、大小、速度、地面材質及角度的影響。

(二)設計火流星爆炸模擬實驗(空中爆炸)

目標：嘗試以生活上易取得的物品，模擬火流星在空中爆炸的狀況。

實驗結果：火流星在空中爆炸的情形，從 2013 俄羅斯隕石事件來思考(如下圖 5)，若我們能製造一個軌道，在中間嘗試讓火流星模擬物爆炸，也許就可以了解碎屑，生活中最常見爆炸的狀況，就是看到氣球爆炸，也是我們能夠取得的「安全爆裂物」。為了看到衝擊波，我們思考以下列方式進行：

1. 直接將氣球引爆，看地面散步的粉末飛散狀況(參考樹木傾倒概念)。但是氣球引爆造成的氣流，卻不足以讓粉末產生明顯的痕跡。
2. 後來嘗試在氣球中填入粉末，觀察引爆氣球之後的痕跡。首先先驗證粉末不是僅以慣性落下。引爆氣球爆炸後，粉末呈現發散狀、羽狀及蝴蝶狀，符合爆炸可能產生的衝擊波形狀。

因此以氣球進入角度、不同內容物、不同引爆點作為變因進行探討。

三、探討火流星撞擊模擬的情形

(一)不同入射角度撞擊模擬情形

目標：嘗試以不同角度進行撞擊模擬，觀察撞擊坑的形狀及大小

實驗結果：

1. 以不同角度撞擊不同粉末，撞擊坑形狀多為圓形，部分為橢圓形，與地球、月球上觀察到的現實隕石坑現象相同。
2. 除玉米粉之條件，以不同角度撞擊時，撞擊坑大小並不會受角度影響。僅有低角度(15度)入射時，較容易出現橢圓形撞擊坑。

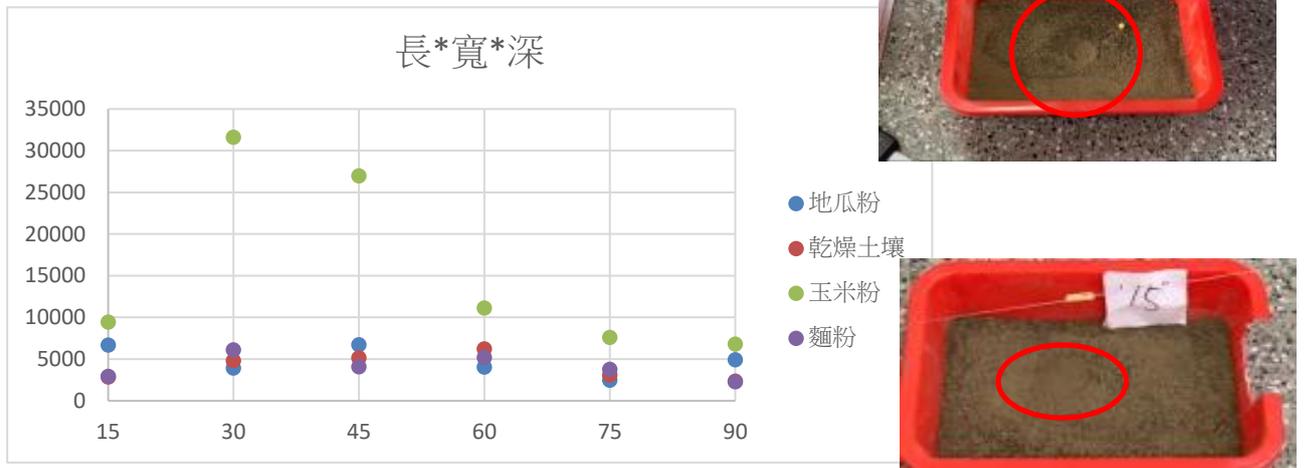


圖 12 不同角度(X軸)撞擊，不同粉末撞擊坑長*寬*深(Y軸)數值

(二)不同地面材質撞擊模擬情形

目標：了解不同地面材質對撞擊模擬的影響

實驗結果：顆粒大小土壤(125-250 μ m)>地瓜粉>麵粉>玉米粉

1. 顆粒較小的地面材質，除低角度外，容易造成較深的撞擊坑。(如圖)
2. 顆粒較小的地面材質，除低角度外，撞擊坑長寬乘積較小。(如圖)
3. 從長*寬/深的比值來比較，大於 30 度的狀況下，玉米粉及麵粉撞擊坑面積與深度比值較一致，未來可以再進一步探討。

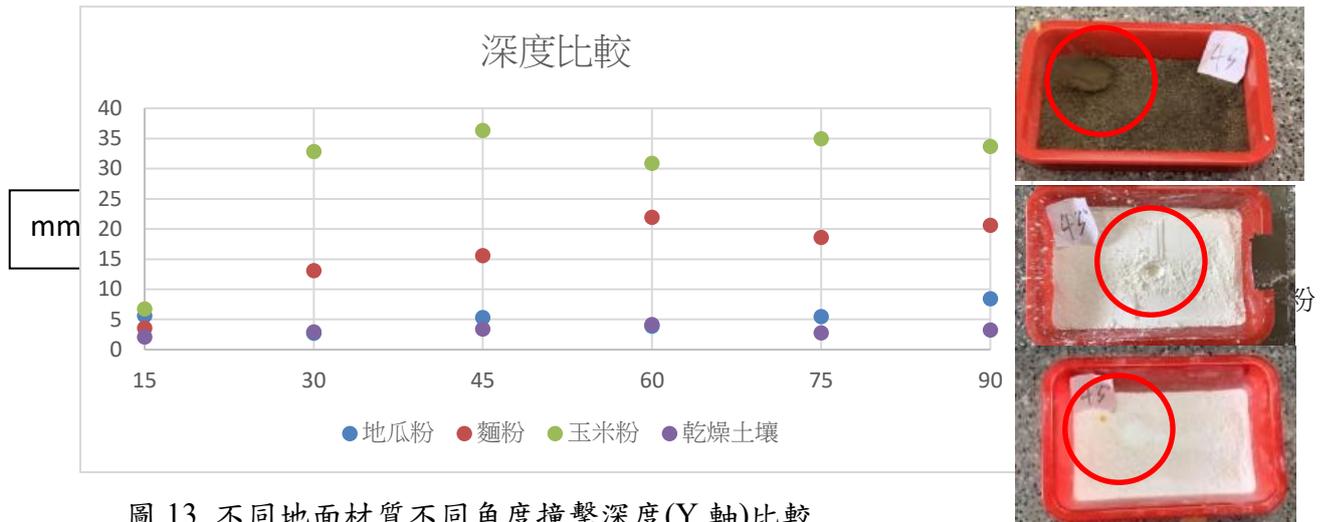


圖 13 不同地面材質不同角度撞擊深度(Y 軸)比較

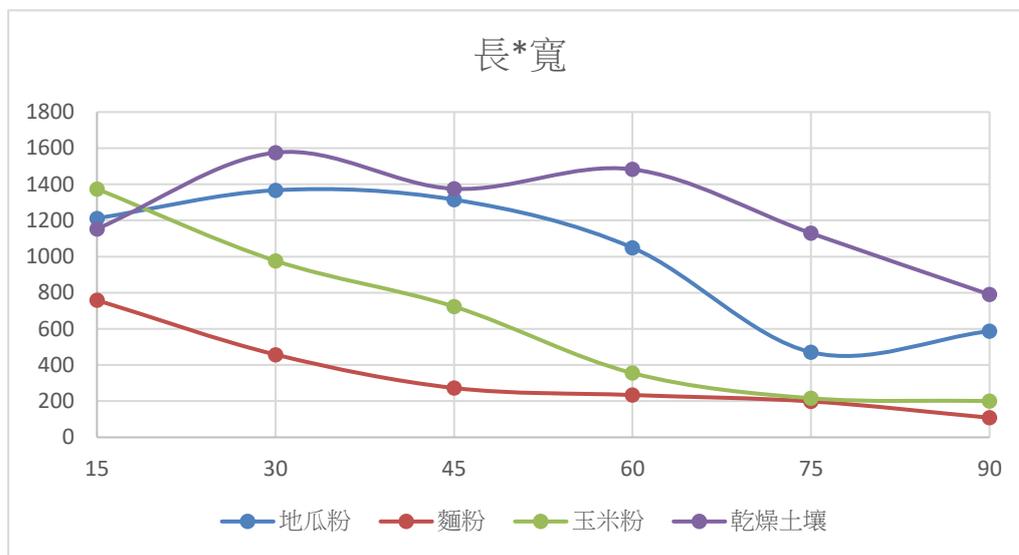


圖 14 不同角度(X 軸)撞擊，不同粉末撞擊坑長寬(Y 軸)比較

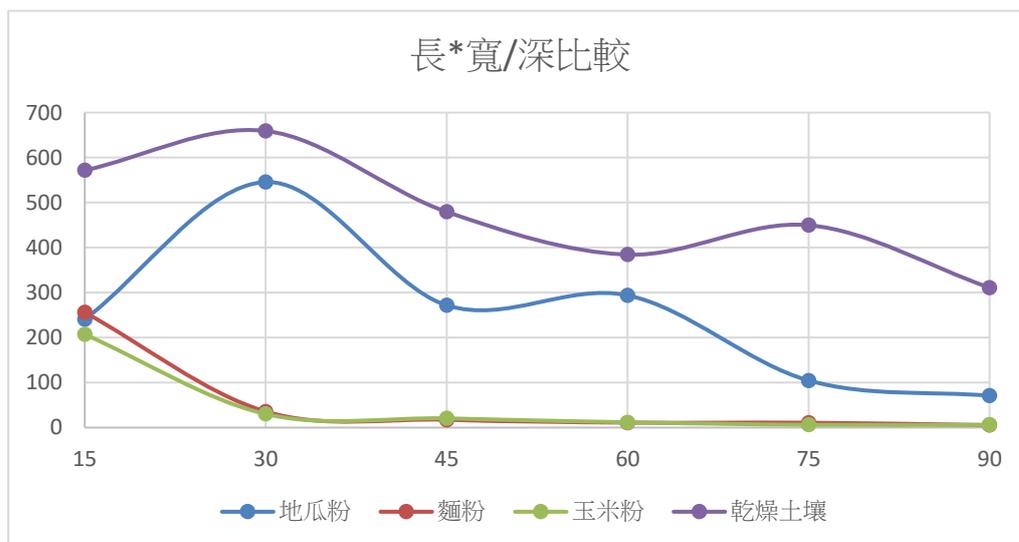


圖 15 不同角度(X 軸)撞擊，不同粉末撞擊坑長寬/深(Y 軸)比較

(三)不同地面濕度撞擊模擬情形

目標：了解不同水分含量的土壤(即不同地形，窪地、沙漠等)，撞擊坑的情形

實驗結果：撞擊角度大於 30 度，濕度較高時可以撞擊出較深的撞擊坑

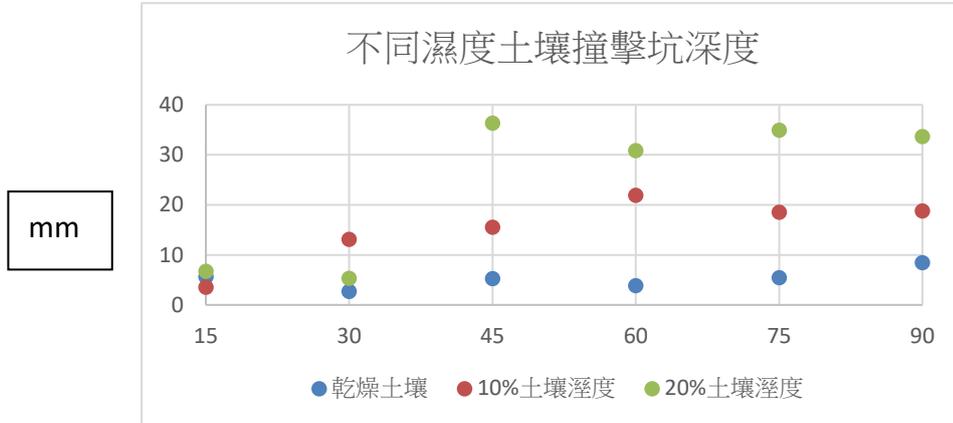


圖 16 不同土壤溼度不同角度撞擊深度比較

(四)不同模擬地質結構撞擊情形

目標：了解在不同的地質結構下，撞擊坑變化情形

實驗結果：

1.測量不同結構彈性，取鋼球從 50cm 高度落下，海綿反彈 17.53cm 最佳、保麗龍反彈 10.62cm、木板反彈 7.60cm、磁磚反彈 1.26cm、碎石反彈接近 0 最差。

2.從這些結構與土壤結合，發現：

(1) 碎石無法提供土壤層均勻支撐力，因此長寬深乘積較低，撞擊角度越大，深度越深。

(2) 海綿結構，因海綿提供較佳彈性，因此撞擊後又使土壤反彈，中央丘最明顯，長寬無論各種角度皆較一致。僅有 90 度撞擊時，造成的撞擊坑長寬較小，但深度變化無太大差異。

(3)其他樣本，與預計猜想相同，越能提供支撐力且較硬的底層，撞擊形成的隕石坑長寬深皆會較大，且較具彈性的結構，出現中央丘機率越高。(如碎石、保麗龍在撞擊角度較小時，中央丘出現機率較低)

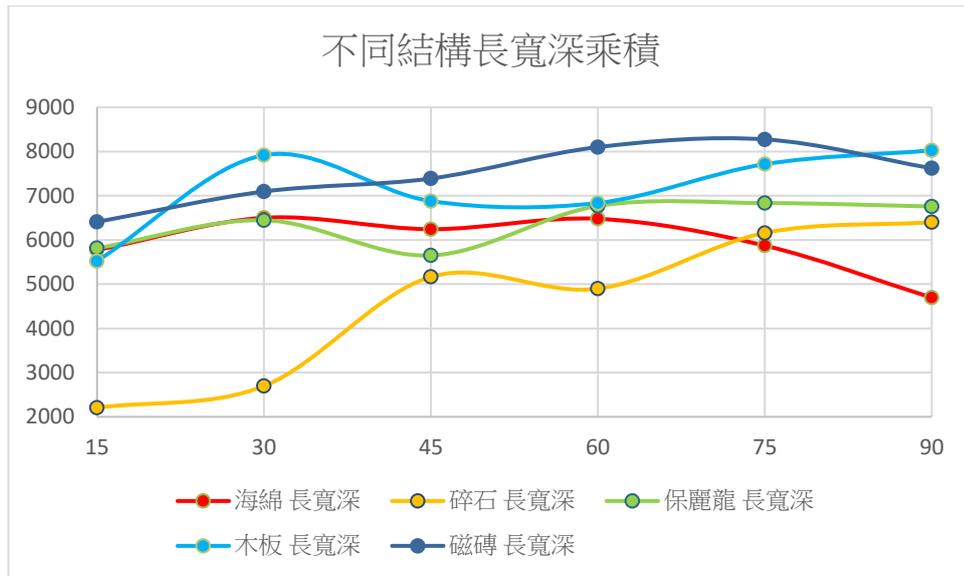


圖 17 不同地層結構模擬撞擊情形

(五)不同模擬隕石質量撞擊情形

目標：了解模擬隕石(BB 彈)質量不同時，對於撞擊坑變化情形

實驗結果：

在不同質量 BB 彈射擊時，質量較高的 BB 彈射速會下降，總能量為 1 焦耳。但在不同角度射擊下，撞擊坑大小(長寬)是 0.25gBB 彈略大於 0.12gBB 彈，深度無太大差異。

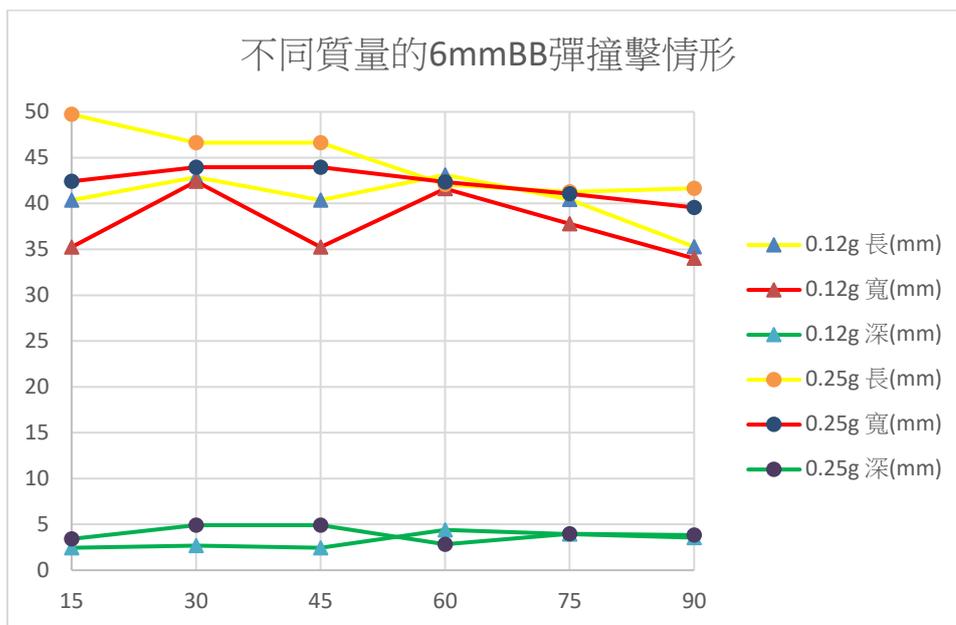


圖 18 不同質量 BB 彈撞擊情形

(六)不同模擬隕石質量撞擊情形

目標：了解不同土壤厚度地層，對於撞擊坑變化情形

實驗結果：

若地層厚度較淺時，隕石坑大小(長寬)較大。而深度會因為撞擊能量影響，因而有極值(扣除地質無法承受撞擊而穿透之狀況)。

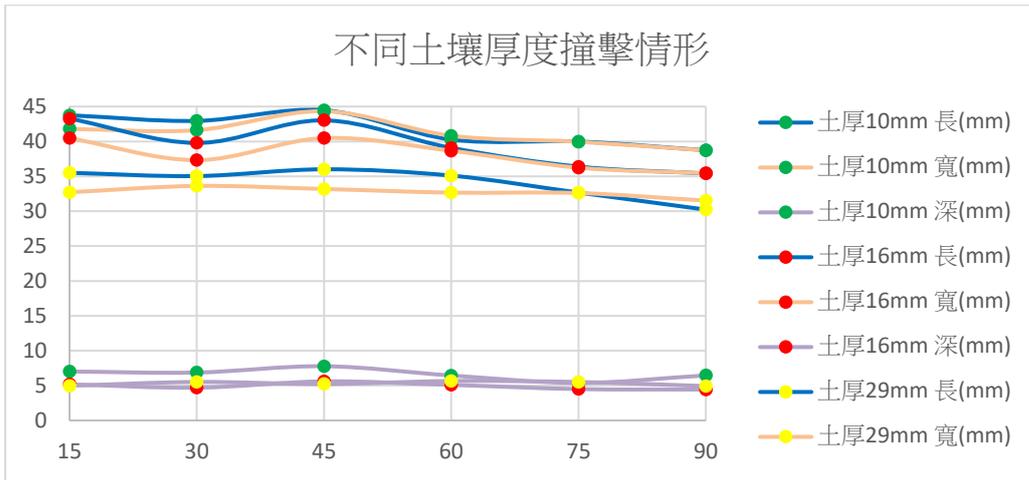


圖 19 不同土壤厚度撞擊情形

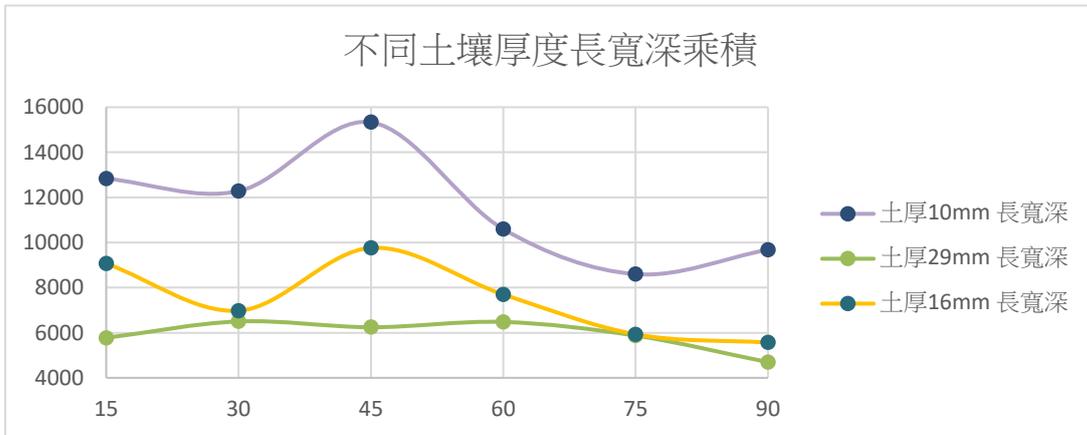


圖 20 不同土壤厚度長寬深乘積

四、探討火流星爆炸模擬的情形

(一)不同爆炸高度模擬情形

目標：為了測試爆炸的衝擊波及碎屑波，先以靜止的狀態，調整高度探討

實驗結果：在不同高度下，皆可以觀察到不同的爆炸波，且非單純慣性落下的影響，在高度越低的時候，各種材質粉末飛散狀況較一致；在高度較高時，粉末會受到地面反射之衝擊波，造成粉末痕跡長寬不均的狀況。

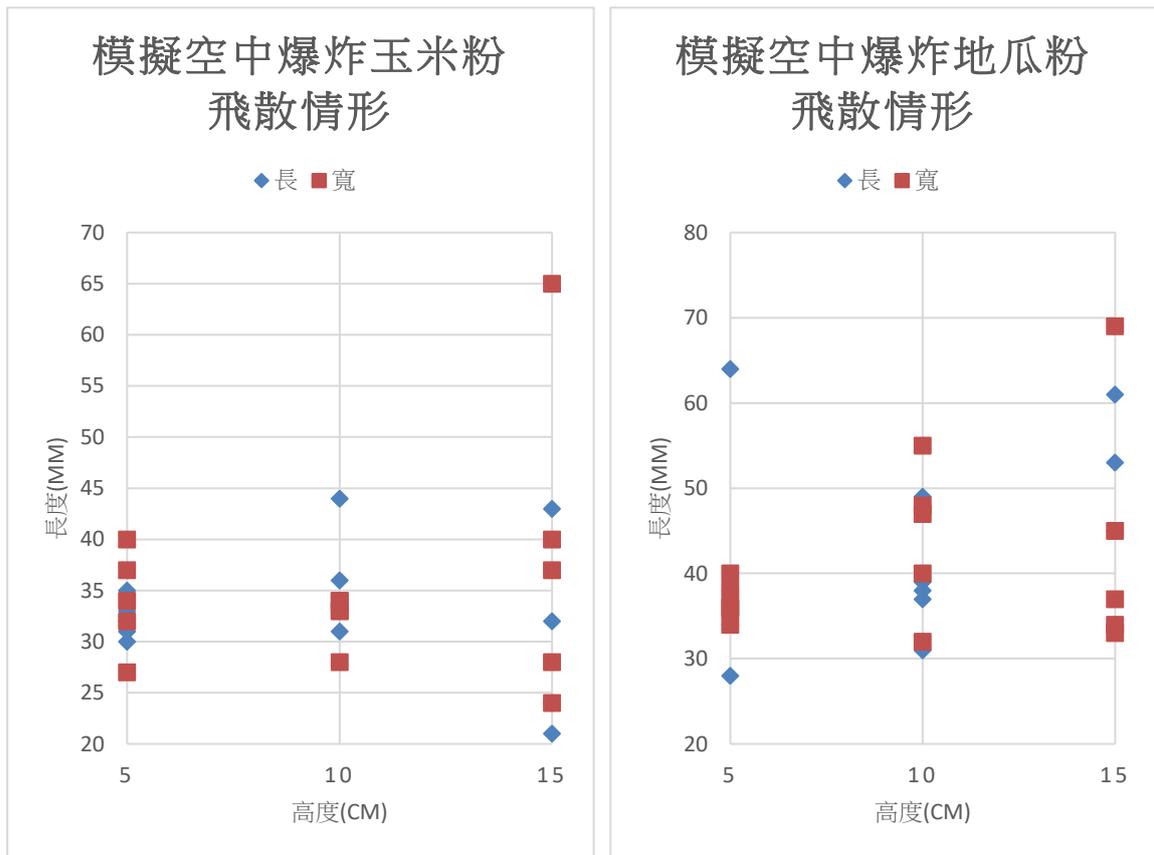


圖 21 不同粉末在不同高度爆炸後，粉末飛散情形

(二)不同入射角度爆炸模擬情形

目標：氣球用自製發射器以固定速度(23.3m/s)，不同角度爆破，觀察粉末痕跡

實驗結果：入角度越大的時候，同一種粉末飛散長度較長；而寬度數值不穩定原因，同為受到地面衝擊波反射影響，因而部分粉末被吹散。

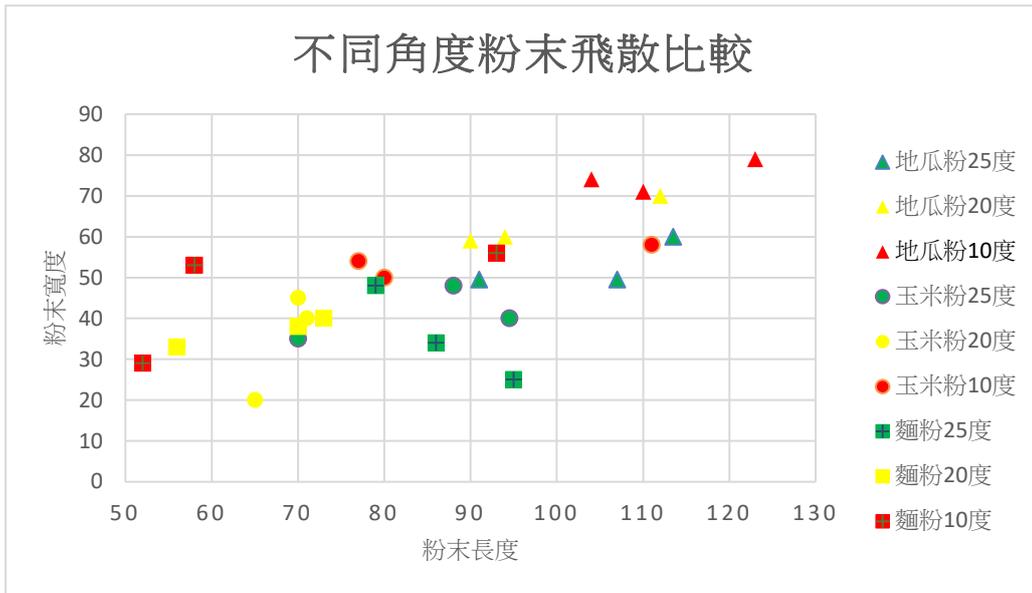


圖 22 不同角度不同粉末爆炸後粉末飛散比較

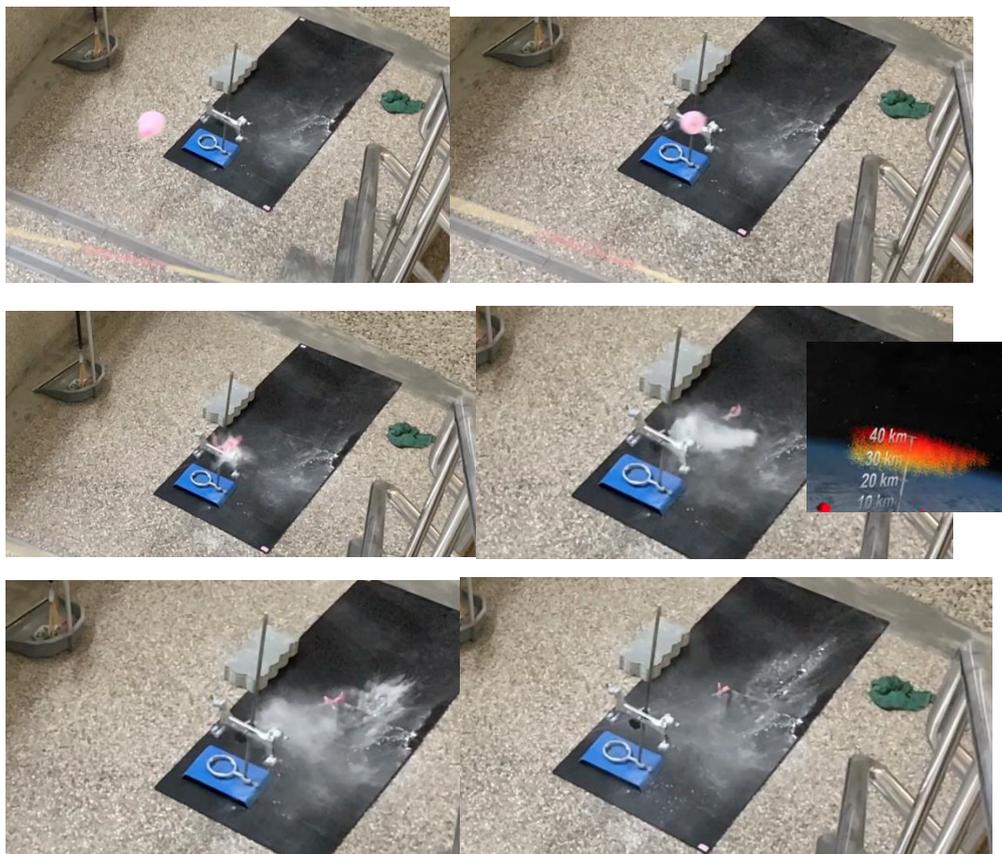


圖 23 空中爆炸模擬(與 2013 俄羅斯隕石事件相同，碎屑成羽狀雲)

(三)不同模擬火流星內容物爆炸模擬情形

目標：嘗試比較不同內容物，觀察不同粉末差異

實驗結果：發現顆粒大的粉末較容易受到爆炸影響散開，猜測與粉末顆粒所帶的動能有關。與一般思考的顆粒小易飛比較遠有所差異。

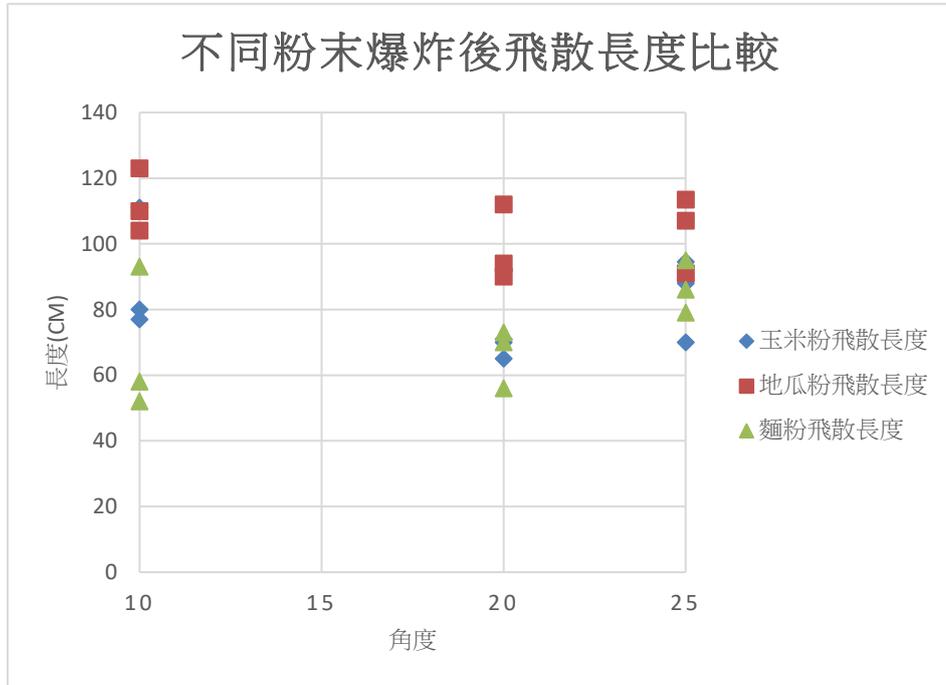


圖 24 不同粉末爆炸後飛散長度比較

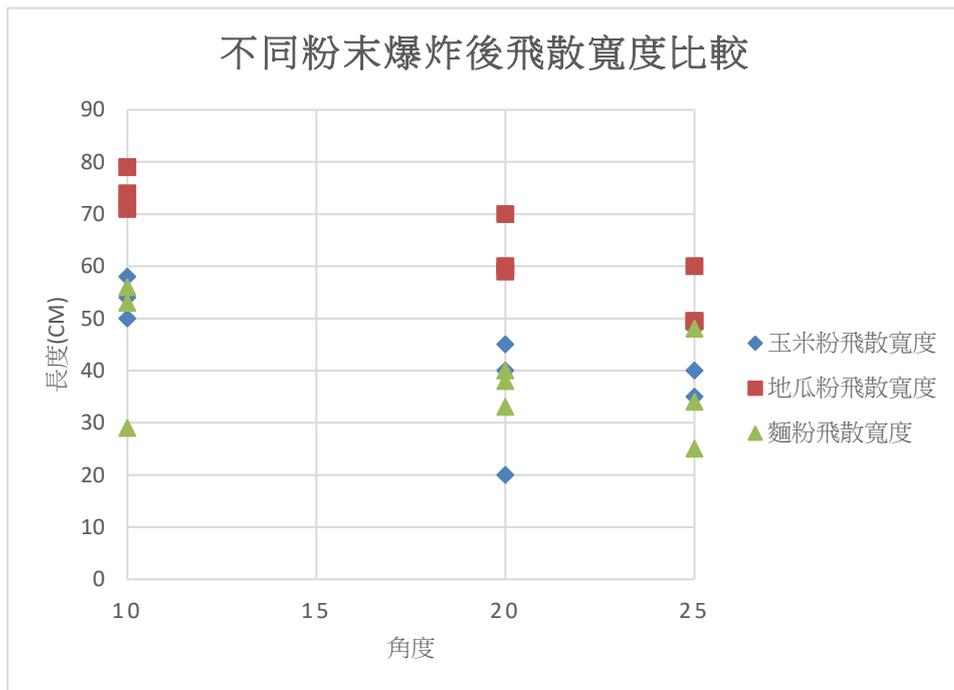


圖 25 不同粉末爆炸後飛散寬度比較

(四)不同爆炸位置爆炸模擬情形

目標：了解火流星不同分解爆炸的位置對於衝擊波及碎屑影響。

實驗結果：從實驗結果顯示，側邊爆炸的狀況，長度都會低於從下方爆炸的樣本，因能量無法傳達至前進方向。寬度部分，因實驗過程無法達到完全無風狀態，數據部分有所落差，側邊爆炸的樣本碎屑痕跡多比下方爆炸樣本為寬，未來會嘗試以無風狀態進行實驗，達到更好的說明。

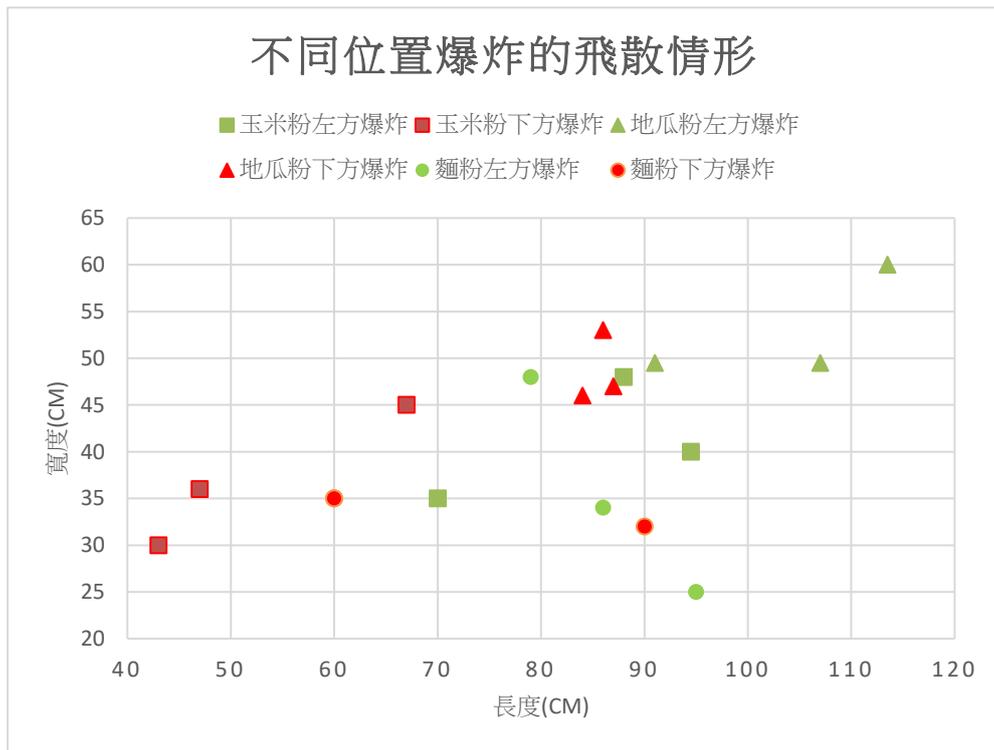


圖 26 不同位置爆炸的飛散情形

五、運用模擬程式探討火流星現象

火流星模擬程式比較

目標：模擬不同火流星條件，了解火流星對地球之影響

實驗結果：已知火流星距地球之距離不影響隕石坑形成大小，根據實驗結果(以 11km/s 進行測試)，若火流星在空中爆炸，直徑小於 120 公尺(火流星太小易被大氣層分解)或角度小於 45°(可能與大氣層接觸時間長)則不形成隕石坑。模擬程式提供的最低速度 11km/s 依然可形成隕石坑。若火流星撞擊地面，直徑 120 公尺的火流星形成較簡單的環形山，直徑 350 公尺及以上的火流星形成的環形

山較複雜。角度及速度對環形山的複雜程度沒有影響。火流星直徑和角度越大、速度越快，環形山的直徑越大；反之則越小。

陸、 結論及未來展望

一、探討火流星的類型及在地球觀察到的現象

從各種火流星事件的探討及資料收集，有一部分的人群常會以神秘事件來探討。但回歸科學本質，不同火流星大小、材質、速度、角度等等的因素，造成了各種不同的火流星現象，因此讓人容易發揮想像力，因此本研究希望設計不同的模擬方式，來探討火流星現象。

二、設計火流星撞擊及爆炸模擬實驗

我們嘗試許多方式，在製造撞擊模擬實驗時，需要固定彈道、準確的射擊，並在許多可以產生高速的裝置中。因無法真實模擬火流星撞擊時熔融岩石的狀態，因此選用不同角度、不同地面材質、不同地面溼度等變因，並嘗試不同地質狀況。在製造爆炸模擬實驗時，使用氣球及自製發射器，盡可能模擬火流星在大氣層中爆炸的情形。

三、探討火流星撞擊模擬的情形

在不同角度的撞擊實驗後，長寬深度沒有太大的差異，在角度較大時，容易產生較深的深度。在入射角度 15、30 度水平方向速度較高，撞擊時間較短，因此容易造成較長、較淺的撞擊坑。地面材質影響，主要受到顆粒大小影響，顆粒較大的地面材質，不容易產生較深的撞擊坑，且顆粒大的材質撞擊坑長寬一致。在不同溼度的土壤，適當的水量會讓土壤軟化，製造出更深更大的撞擊坑，但是太過黏稠的地面，會讓撞擊坑不容易變大。若地質基底較硬，會讓形成的隕石坑較大，若地質基底較軟，隕石坑會較深，面積較小。彈性較好之地層，會更容易形成環形山及中央丘。

四、探討火流星爆炸模擬的情形

在不同高度下，皆可以觀察到不同的爆炸波，且非單純慣性落下的影響，

在高度越低的時候，各種材質粉末飛散狀況較一致；在高度較高時，粉末會受到地面反射之衝擊波，造成粉末痕跡長寬不均的狀況。角度越傾斜的時候，因水平速度較高，因此長度較長；而寬度數值不穩定原因，同為受到地面衝擊波反射影響，因而部分粉末被吹散。發現顆粒大的粉末較容易受到爆炸影響散開，與粉末顆粒所帶的動能有關。與一般思考的顆粒小易飛比較遠有所差異。

產生羽狀碎屑雲的狀況，則是氣球被刺破後，從爆炸點向外擴散，加上移動中的狀態，因此產生羽狀碎屑雲，衝擊波沿羽狀碎屑雲方向向地面反彈(與 NASA 模擬 2013 俄羅斯隕石事件相符)，在地面形成蝴蝶形衝擊波(與通古斯大爆炸地面樹木傾倒樣貌相符)。

五、運用模擬程式探討火流星現象

實驗結果(以 11km/s 進行測試)，若火流星在空中爆炸，直徑小於 120 公尺(火流星太小易被大氣層分解)或角度小於 45°(可能與大氣層接觸時間長)則不形成隕石坑。若火流星撞擊地面(以 11km/s 進行測試)，直徑 120 公尺的火流星形成較簡單的環形山，直徑 350 公尺及以上的火流星形成的環形山較複雜。而本實驗在多數模擬情形，都有環形山與中央丘之產生。



圖 27 撞擊坑形成

綜合上述內容，可以從各種空中爆炸事件，以衝擊波及碎屑做為科學證據，證實許多空中爆炸事件都是小行星在大氣層分解的狀況。火流星坑的研究及找尋，可以藉由地面材質、地面殘餘隕石、中央丘、環形山等等隕石坑遺跡，進一步了解古時候所發生的事件。未來可以嘗試更多不同材質、粉末等，並進一步改進實驗裝置及環境，得到更好的模擬環境。

柒、 參考文獻

1. 通古斯大爆炸 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sTHY.htm>
2. 2013 年俄羅斯隕石事件
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/2013%E5%B9%B4%E8%BD%A6%E9%87%8C%E9%9B%85%E5%AE%BE%E6%96%AF%E5%85%8B%E5%B0%8F%E8%A1%8C%E6%98%9F%E6%92%9E%E5%87%BB%E4%BA%8B%E4%BB%B6>
3. 巴林傑隕石坑
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B7%B4%E6%9E%97%E6%9D%B0%E9%99%A8%E7%9F%B3%E5%9D%91>
4. 第 59 屆中小學科學展覽會坑坑洞洞的秘密-探討隕石坑型態及形成原因
<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=12950&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=15910>
5. 第 50 屆中小學科學展覽會-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 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/080502.pdf>
6. 個人立方衛星-知道如何區分彗星、小行星、火流星體、火流星、火球、隕石嗎?
https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=1133710113325157&id=995564540473049

【評語】 030501

此作品研究主題清楚，能使用科學方法進行檢驗和探討，實驗設計具創意，但與實際自然界的現象不相雷同，應適當說明研究結果所做推論的限制。在口語表達上清楚，且參賽成員團對於作品都有大致的理解且都有貢獻。

摘要

火流星於空中爆炸及撞擊地面之型態，以生活易取得物品模擬實驗觀察空中爆炸後碎屑雲及撞擊地面隕石坑現象。撞擊模擬利用BB槍射擊(1焦耳動能)不同地質層，得到與現實相同結果：

- (1)模擬之撞擊坑多數有形成環形山及中央丘
- (2)無論不同角度、模擬物質量，隕石坑都接近圓形。

另發現乾燥土壤(125-250 μm)，長寬深不會因為撞擊角度改變；玉米粉(10-15 μm)角度30度-90度所形成之隕石坑，長寬與深度比值接近，15度因撞擊時間較短差異較大。撞擊能量與地質作用占較大影響因素。

爆炸模擬以土球進入水中(不同介質)做測試實驗，有碎屑產生。另在氣球內放入玉米粉等小顆粒粉末，在不同移動角度下，皆成功模擬出羽狀碎屑雲、蝴蝶狀衝擊波，與2013年俄羅斯隕石事件及通古斯大爆炸相符。

動機

流星常常代表的希望及許願，也可以能像「你的名字」中那顆一瞬即逝的彗星，帶來毀滅。但實際上的流星，應該是什麼狀況呢？我們從生物課本上得知，在數千萬年前，火流星撞擊地球是造成恐龍滅絕的原因之一，尤其是在白堊紀的希克蘇魯伯撞擊事件，更剩約四分之一物種存活。因此我們很好奇，火流星的撞擊對地球會造成什麼影響？因此我們展開了這次研究，希望能藉由周遭方便取得的資源，模擬出接近真實的情形，了解火流星在地球上留下的故事。

架構圖

愛的迫降-火流星事件型態及現象模擬之研究



一、探討火流星的類型及在地球觀察到的現象

1. 隕石坑

隕石坑的形成，可以從圖1 得到撞擊過程及地面的回饋。因此，隕石坑的形成與撞擊角度、速度、隕石大小、質量、成分、地面材質等等有關係，其形成的環形山及中央丘是很重要的判斷依據。為了進一步模擬隕石撞擊，本研究選擇以高速、固定大小的物體模擬隕石，改變撞擊角度、地面材質等方式，進一步探討隕石坑的形成。

2. 衝擊波

針對火流星在空中爆炸的狀況，如圖2 所示，可以看到1994至2013於大氣層爆炸的小行星。從這些事件資料彙整，假設以速度17公里/秒，角度45度進入地球為條件，可以列出小行星直徑4m到70m在空中分解的遭遇頻率，每1.3年會有一次4m小行星、每10年會有一次10m小行星、每60年會有一次20m小行星、每764年會有一次50m小行星、每1900年會有一次70m小行星。而常見造成的衝擊波，有羽狀(如2013俄羅斯隕石事件)、蝴蝶狀(如通古斯大爆炸)等，會造成地面樹木傾倒或是門窗破裂的情形。

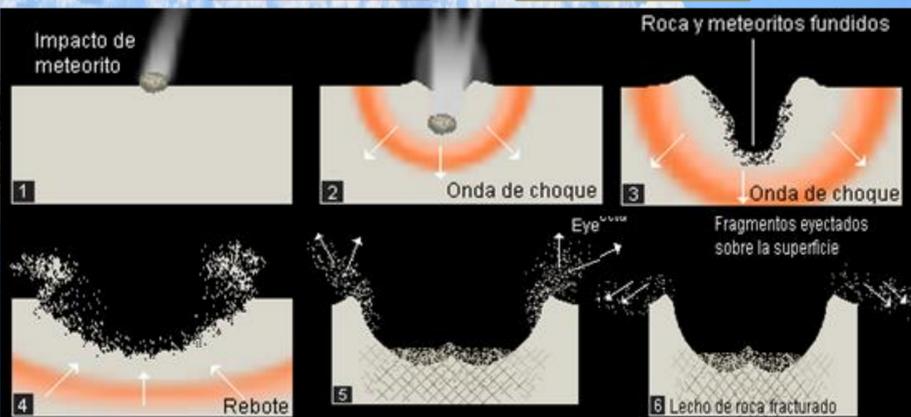


圖1 隕石坑形成

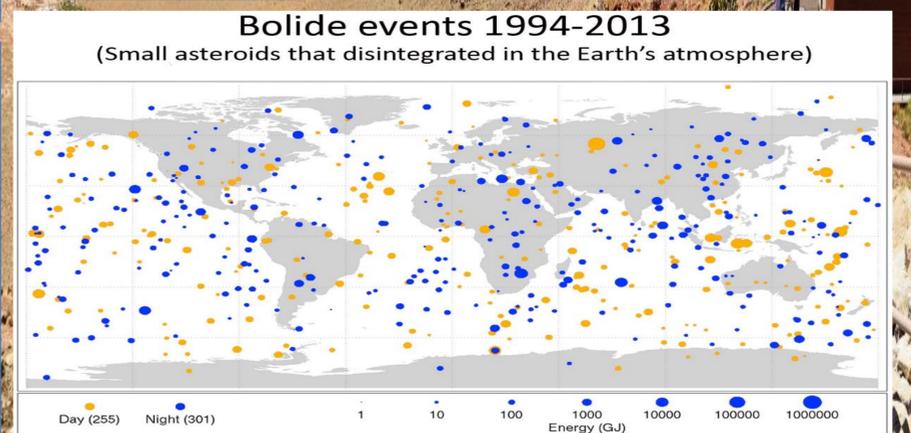


圖2在大氣層爆炸小行星分布

2013年俄羅斯隕石事件
通古斯加大爆炸後最大規模的隕石撞擊事件，又名為「車里雅賓斯克小行星撞擊事件」，發生在2013年2月15日的俄羅斯烏拉爾聯邦管區車里雅賓斯克市的一次小行星撞擊事件。
此隕石直徑約為17公尺，爆炸規模約相當於30顆廣島原子彈。主要的碎片擊中了切巴爾庫爾湖。



圖3 火流星蕈狀雲及碎屑雲

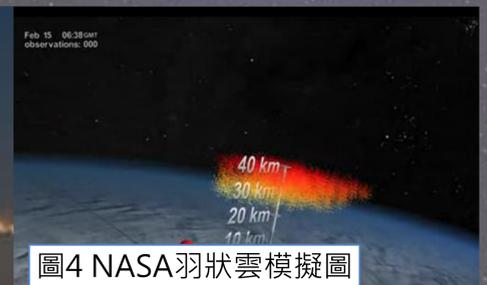


圖4 NASA羽狀雲模擬圖

二、設計隕石火流星撞擊及爆炸模擬實驗

(一) 設計火流星撞擊模擬實驗(撞擊地面)

目標：嘗試以生活上能取得的物品，模擬火流星撞擊地面的情形
實驗結果：從資料探討，火流星進入大氣層再到撞擊地面，會受到自身材質、質量、大小、速度、地面材質及角度的影響。

1. 讓模擬火流星達到高速

首先嘗試彈弓，但是準確率跟速度都不容易控制；再來嘗試用自製空氣槍，但加壓過程及子彈不易射準的問題；後來改以較為安全的BB槍(平均射速38.3m/s)。(因法規限制，BB槍、空氣槍等需滿14歲)

2. 變因選擇

BB槍僅有一種射速、子彈也有限制(6mm)，因此不改變速度變因，以地面材質、射擊角度、土壤溼度等進行模擬隕石撞擊之探討。

(二) 設計火流星爆炸模擬實驗(空中爆炸)

目標：嘗試以生活上易取得的物品，模擬火流星在空中爆炸的狀況。
實驗結果：火流星在空中爆炸的情形，從2013俄羅斯隕石事件來思考，若我們能製造一個軌道(圖6)，在中間嘗試讓火流星模擬物爆炸，也許就可以了解碎屑及衝擊波的狀況。



圖5 火流星撞擊模擬



圖6 火流星爆炸模擬

三、探討火流星撞擊模擬的情形

(一) 不同入射角度撞擊模擬情形

目標：嘗試以不同角度進行撞擊模擬，觀察撞擊坑的形狀及大小

實驗結果：

- 以不同角度撞擊不同粉末，撞擊坑形狀多為圓形，部分為橢圓形，與地球、月球上觀察到的現實隕石坑現象相同。
- 除玉米粉之條件，以不同角度撞擊時，撞擊坑大小並不會受角度影響。僅有低角度(15度)入射時，較容易出現橢圓形撞擊坑。

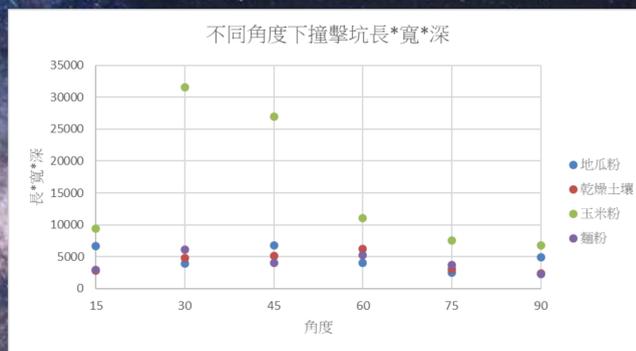


圖7 不同角度撞擊坑長寬深比較



圖8 90度入射撞擊乾燥土壤情形

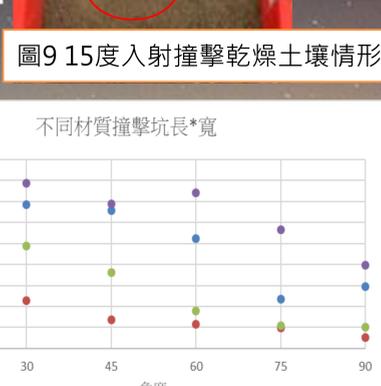


圖9 15度入射撞擊乾燥土壤情形

(二) 不同地面材質撞擊模擬情形

目標：了解不同地面材質對撞擊模擬的影響

實驗結果：

顆粒大小：

- 土壤(125-250 μ m) > 地瓜粉 > 麵粉 > 玉米粉
- 顆粒較小的地面材質，除低角度外，容易造成較深的撞擊坑。
 - 顆粒較小的地面材質，除低角度外，撞擊坑長寬乘積較小。
 - 從長*寬/深的比值來比較，大於30度的狀況下，玉米粉及麵粉撞擊坑面積與深度比值較一致，未來可以再進一步探討。

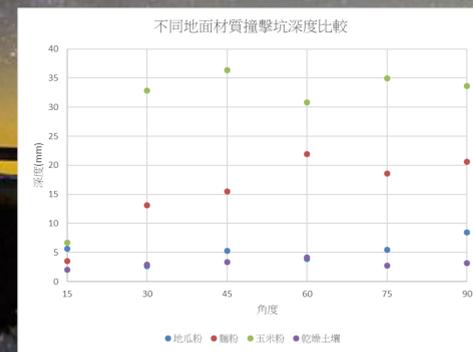


圖10 不同地面材質撞擊坑深度比較

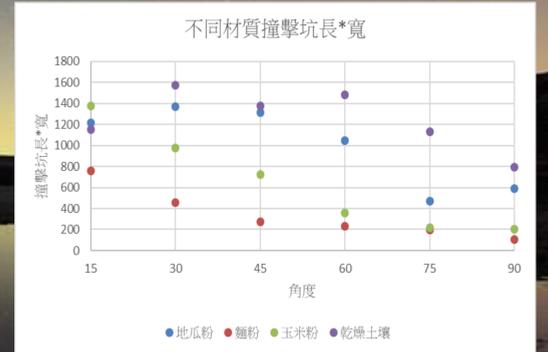


圖11 不同地面材質撞擊坑深度比較



圖13 45度入射撞擊乾燥土壤情形



圖14 45度入射撞擊玉米粉情形



圖15 45度入射撞擊地瓜粉情形

(三) 不同地面濕度撞擊模擬情形

目標：了解不同水分含量的土壤(即不同地形，窪地、沙漠等)，撞擊坑的情形

實驗結果：

- 溼度較高的土壤，黏性較高，因此不易撞擊出較大的撞擊坑。
- 角度大於30度時，濕度越高的樣本可以產生較深的撞擊坑。

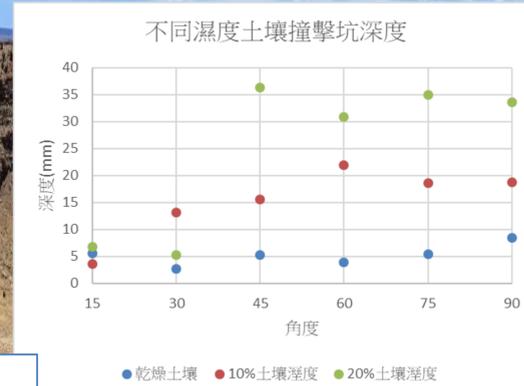


圖16 不同地面濕度撞擊深度比較

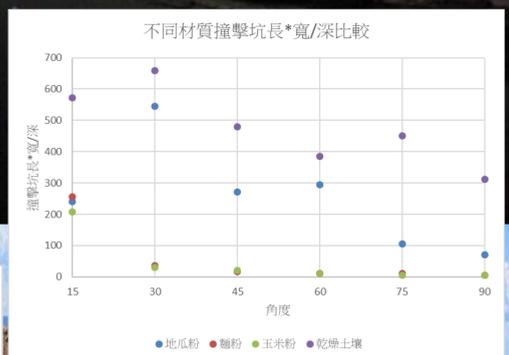


圖12 不同地面材質撞擊坑長*寬/深比較

(四) 不同地面結構撞擊模擬情形

目標：了解不同的地質結構下，撞擊坑變化情形

實驗結果：

- 測量不同結構彈性，取鋼球從50cm高度落下，海綿反彈17.53cm最佳、保麗龍反彈10.62cm、木板反彈7.60cm、磁磚反彈1.26cm、碎石反彈接近0最差。
- 從這些結構與土壤結合，發現：
 - 碎石無法提供土壤層均勻支撐力，因此長寬深乘積較低，撞擊角度越大，深度越深。
 - 海綿結構，因海綿提供較佳彈性，因此撞擊後又使土壤反彈，中央丘最明顯，長寬無論各種角度皆較一致。僅有90度撞擊時，造成的撞擊坑長寬較小，但深度變化無太大差異。
 - 其他樣本，與預計猜想相同，越能提供支撐力且較硬的底層，撞擊形成的隕石坑長寬深皆會較大，且較具彈性的結構，出現中央丘機率越高。(如碎石、保麗龍在撞擊角度較小時，中央丘出現機率較低)

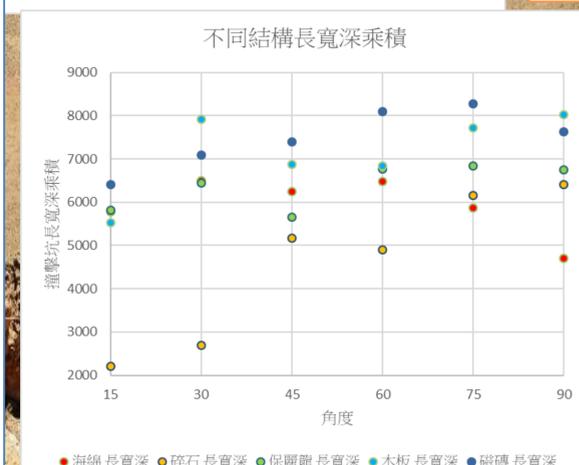


圖17 不同地面結構撞擊長寬深乘積比較

四、 探討火流星爆炸模擬的情形

(一) 不同爆炸高度模擬情形

目標：為了測試爆炸的衝擊波及碎屑波，先以靜止的狀態，調整高度探討
 實驗結果：在不同高度下，皆可以觀察到不同的爆炸波，且非單純慣性落下的影響，在高度越低的時候，各種材質粉末飛散狀況較一致；在高度較高時，粉末會受到地面反射之衝擊波，造成粉末痕跡長寬不均的狀況。

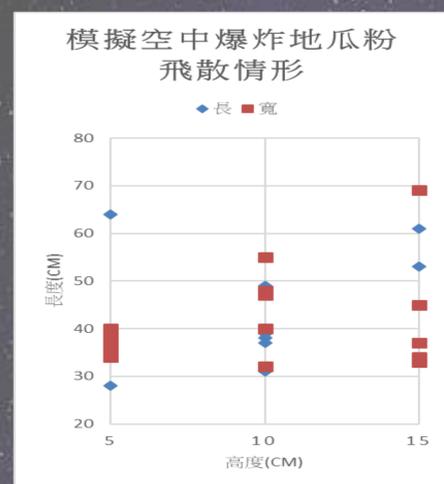
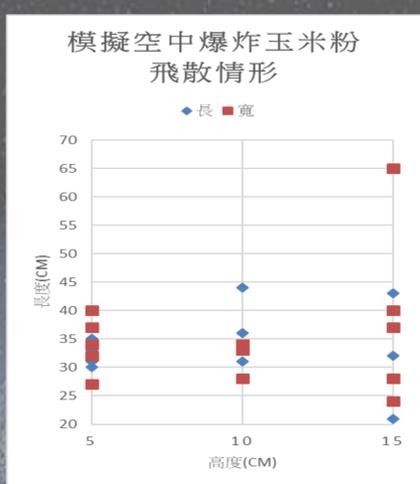


圖18 不同高度爆炸後，粉末飛散情形



圖19 爆炸模擬實驗過程(固定彈力拉伸距離、沿固定軌道至引爆點)

(二) 不同入射角度爆炸模擬情形

目標：讓氣球用自製發射器以固定速度，不同角度爆破，觀察粉末痕跡
 實驗結果：入角度越小的時候，同一種粉末飛散長度較長；而寬度數值不穩定原因，同為受到地面衝擊波反射影響，因而部分粉末被吹散。

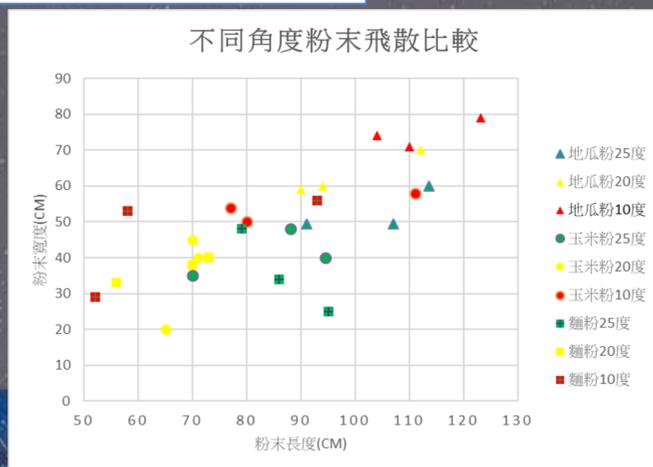


圖20 不同角度入射，爆炸粉末飛散長寬比較



圖21 爆炸模擬實驗過程(固定彈力拉伸距離、沿固定軌道至引爆點)

(三) 不同火流星內容物爆炸模擬情形

目標：嘗試比較不同內容物，觀察不同粉末差異
 實驗結果：發現顆粒大的粉末較容易受到爆炸影響散開，與粉末顆粒所帶的動能有關係。



圖22 不同粉末爆炸後飛散長度比較

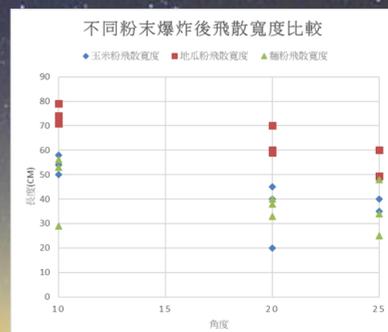


圖23 不同粉末爆炸後飛散寬度比較

項目	模擬程式	本研究結果
不同角度撞擊	角度越大時，撞擊坑直徑越大、深度越深	角度越大時，撞擊坑深度越深
不同質量隕石	相同直徑、質量越大之隕石，撞擊坑直徑越大、深度越深	直徑相同、質量越大模擬物，撞擊坑直徑較大
不同地質硬度	地面為沉積岩撞擊坑直徑及深度較大 地面為火成岩撞擊坑直徑及深度較小	基底彈性較好，撞擊坑較大 越軟的材質，撞擊坑越深

結論

- 一、 探討火流星的類型及在地球觀察到的現象
 火流星為落在地上的殘留物，在外來星體進入地球後，會有兩種狀況，一種狀況是撞擊到地面形成隕石坑，另一種是在大氣層就因與空氣摩擦而分解，在空中爆炸。因此許多空中爆炸事件，可能是外來星體在空中燃燒殆盡造成的。
- 二、 設計火流星撞擊及爆炸模擬實驗
 我們嘗試許多方式，在製造撞擊模擬實驗時，需要固定彈道、準確的射擊，並在許多可以產生高速的裝置中選擇符合法規的BB槍。因無法真實模擬火流星撞擊，因此選用不同角度、不同地面材質、不同地面溼度等變因。在製造爆炸模擬實驗時，使用氣球及自製發射器，盡可能模擬火流星在大氣層中爆炸的情形。
- 三、 探討火流星撞擊模擬的情形
 在不同角度的撞擊實驗後，長寬深度沒有太大的差異，在角度較大時，容易產生較深的深度。在入射角度15、30度水平方向速度較高，因此容易造成較長的撞擊坑。地面材質影響，主要受到顆粒大小影響，顆粒較大的地面材質，不容易產生較深的撞擊坑，且顆粒大的材質撞擊坑長寬一致。在不同溼度的土壤，適當的水量會讓土壤軟化，製造出更深更大的撞擊坑，但是太過黏稠的地面，會讓撞擊坑不容易變大。
- 四、 探討火流星爆炸模擬的情形
 在不同高度下，皆可以觀察到不同的爆炸波，且非單純慣性落下的影響，在高度越低的時候，各種材質粉末飛散狀況較一致；在高度較高時，粉末會受到地面反射之衝擊波，造成粉末痕跡長寬不均的狀況。角度越傾斜的時候，因水平速度較高，因此長度較長；而寬度數值不穩定原因，同為受到地面衝擊波反射影響，因而部分粉末被吹散。發現顆粒大的粉末較容易受到爆炸影響散開，與粉末顆粒所帶的動能有關係。與一般思考的顆粒小易飛比較遠有所差異。
- 五、 運用模擬程式探討火流星現象
 實驗結果(以11km/s進行測試)，若火流星在空中爆炸，直徑小於120公尺(火流星太小易被大氣層分解)或角度小於45°(可能與大氣層接觸時間長)則不形成隕石坑。若火流星撞擊地面(以11km/s進行測試)，直徑120公尺的火流星形成較簡單的環形山，直徑350公尺及以上的火流星形成的環形山較複雜。而本實驗的撞擊坑都未有中央丘的狀況(因BB彈容易留在坑內)，部分樣本有環形山產生。