

# 月球隕石坑的觀測與模擬實驗

高中組地球科學科第一名

高雄市立左營高級中學

作者：陳致光、吳俊穎、楊喬帆、楊金龍  
指導教師：林明良、黃琦雯

## 一、研究動機

西元1994年舒梅克—李維 9 號彗星撞擊木星時，曾引起了全世界的震撼，也同時引起我們對天體互撞產生了極大的興趣。因此，我們從最簡單、最方便觀測的月球開始著手，研究隕石撞擊月球的種種變化。

## 二、研究目的

1. 探討影響隕石坑深度的寬度的變因。
2. 由地球上測量月球隕石坑的大小及深度。

## 三、研究概要

1. 以不同質量的重球，由同一高度垂直落下，撞擊未凝結石膏。
2. 以同一質量的重球，由不同高度垂直落下，撞擊未凝結石膏。
3. 以未凝結染色石膏球代替重球，撞擊未凝結石膏。
4. 以未凝結染色石膏球，以不同入射角撞擊，觀察其變化。
5. 以未凝結染色石膏球，撞擊不同凝結時間的石膏。
6. 推導由任何月相照片的隕石坑影長換算坑深的公式。
7. 拍攝月球照片，統計分析隕石坑的陰影量出隕石坑的寬寬深積與深寬比。

## 四、研究器材設備

- |            |                    |
|------------|--------------------|
| 1. 石膏      | 2. 加熱器             |
| 3. 石臘      | 4. 天球模型（代替月球）      |
| 5. 三樑天平    | 6. 口徑25公分反射叉式天文望遠鏡 |
| 7. 計時器     | 8. 三種不同質量體積的鋼球和玻璃球 |
| 9. 相機及膠卷   | 10. 木板             |
| 11. 紙盤及攪拌器 | 12. 投影機            |
| 13. 紅染劑    | 14. 一元硬幣           |

15.游標尺

16.幻燈機

17.傾斜儀

18.電腦及WORD 7.0 & EXCEL試算表

## 五、研究過程與方法

### (一)實驗設計

#### (1)隕石坑模擬實驗

- 1.以紙碗盛未凝結石膏模擬月面，再由高處以鐵球、玻璃球、未凝結石膏球自由落下模擬隕石。
- 2.模擬月面的未凝結石膏由兩種不同凝結狀態的石膏組成，下層凝結時間5分鐘，上層凝結2分鐘，以模擬撞擊發生時，撞擊點表層因高溫融熔的情形。
- 3.形成隕石坑後立刻以融熔的石臘倒入，石臘迅速凝固，可固定撞擊坑的形狀，避免繼續變形，坑的深、寬、撞擊角也可由石臘鑄模測量。
- 4.由不同高度 $h$ 自由落下，可變更撞擊速度 $v$ ， $v = (2gh)^{1/2}$ 。
- 5.球仍自由落下，紙碗斜置，可以變更入射撞擊角度，角度則由石臘模以傾斜儀測出。

#### (2)月面攝影模擬

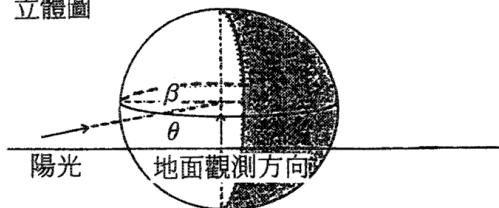
##### 1.地面觀測陽光照射角度的推算：

以天球儀代替月球置中，以投影機於一側打燈光代替太陽，每15度拍攝月面盈虧，則由 $A/R$ 可推知月日及月地夾角

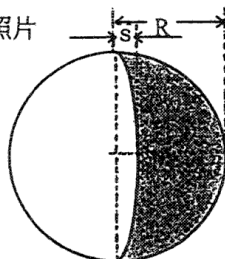
$$\beta = \sin^{-1}(A/R)$$

上下弦時， $A/R=0$ ；滿月時則為1。因此由照片量取 $S$ 、 $R$ 即可得知 $\beta$ 。

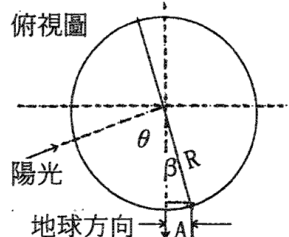
立體圖



照片



俯視圖



##### 2. 隕石坑直徑的測量：

天球儀貼上一元硬幣替代隕石坑，設坑直徑 $w$ ，而照片上的視直徑

為 $d$ ，坑到中心線的距離為 $S$ ，坑所在的小圓半徑為 $R$ ，

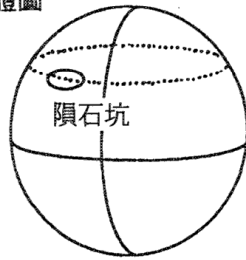
$$\sin \phi = S/R \cdots \cdots (1)$$

$$\cos \phi = d/W \cdots \cdots (2)$$

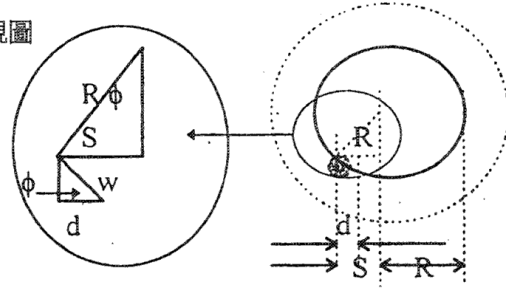
$$(1)^2 + (2)^2 \quad 1 = (d/W)^2 + (S/R)^2$$

所以隕石坑直徑為  $W = (1/(R^2 - S^2))^{1/2} R d$

立體圖



俯視圖

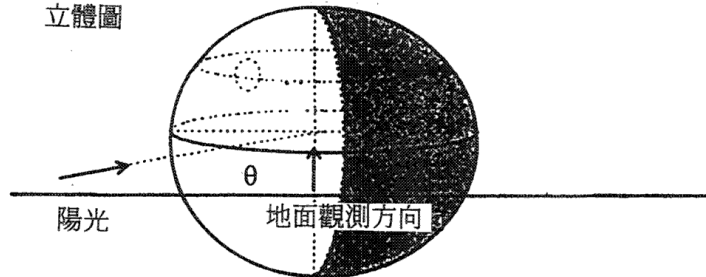


### 3. 月球隕石坑的實際測量

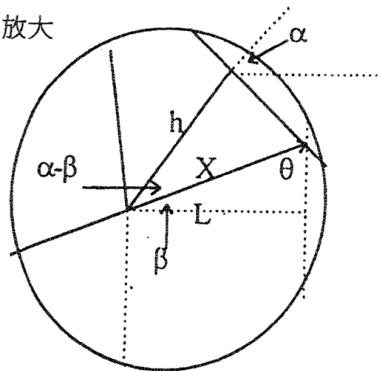
隕石坑的直徑測量方法如上，而坑深的測量可利用簡單的三角測量法獲得，Jerry Waxman的“A Workbook for Astronomy”就提供弦月時的測量方法，不過一個月也才只有兩次弦月，因此我們決定自行推導任何月相時的公式：

隕石坑深  $h = X \cos(\alpha - \beta)$ ，而  $\alpha = \cos^{-1}(S/R)$ ， $\beta = \sin^{-1}(A/R)$ ， $X = L / \cos \beta$ 。

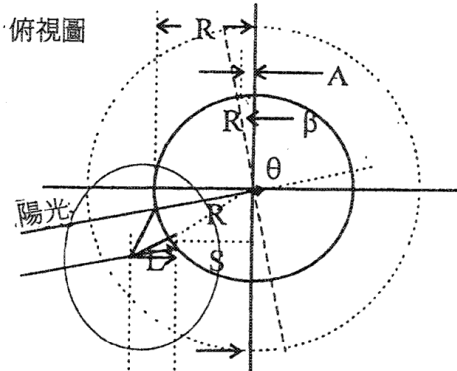
立體圖



局部放大



俯視圖



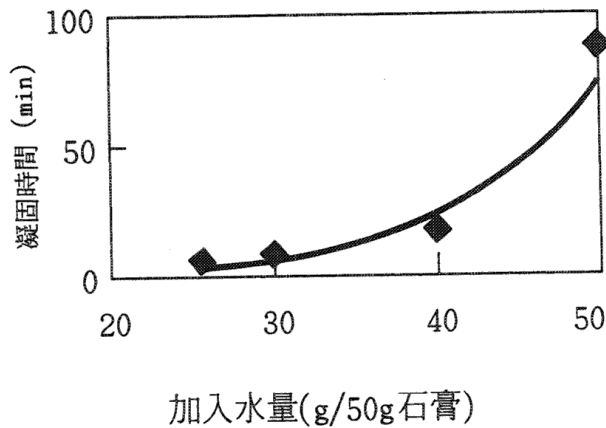
### (二)前置實驗

石膏固定50g與不同水量相同混合，記錄其凝結時間，並觀察何時石膏狀態適合實驗。如表2-a。

分析：

石膏與水比值大於 2 時，石膏過多無法完全溶解，比值小於 1.5 時，石膏會過稀，無法保持坑洞形狀，所以以 5/3 為基準比例，靜置 5 分鐘來實驗。

表2-a  
石膏與水比例對凝固時間關係



石膏50g		
加入水量 (g)	石膏重 / 水重	凝固時間 (min)
25	2	5
30	5/3	10
40	5/4	25
50	1	90

### (三) 撞擊質量對撞擊坑的影響

#### (1) 重球模擬實驗 I

以 100g 石膏加水 60g 靜置 5 分鐘，再以不同質量重球同高度投彈。

分析：

1. 未凝結石膏常被重球擊穿觸底，無法獲得數據。
2. 隕石撞擊時，只有表層融熔，下層仍保持較硬狀態，因此作以下改進。

#### (2) 重球模擬實驗 II

以 100g 加 60g 水靜置 5 分鐘做底，150g 石膏加 90g 水靜置 2 分鐘做表面，以模擬月面受撞擊時表面融熔，下層較硬情況，再重複以上實驗。結果如數據圖一。

分析：

1. 一般而言，撞擊質量越大，坑越深，寬深積越大，深寬比越小。
2. 隕石撞擊時因高溫而大部份融熔，所以重球的撞擊坑形狀不若常見之損石坑。
3. 故改以未凝結石膏球代替重球，以資比較，為瞭解撞擊球的去向，再以紅染劑染色。

#### (3) 石膏球模擬實驗

以100g加60g水靜置5分鐘做底，150g石膏加90g水靜置2分鐘做表面，50g石膏加30g水，加紅染料代替重球垂直投入。（數據圖略）

分析：

1. 撞擊球質量越大，坑越寬，越深，寬深積越大，但深寬比由小變大再變小。
2. 石膏球形成之撞擊坑，比重球更類似隕石坑。
3. 石膏球分佈在撞擊坑表層，並向四面飛濺呈放射狀，坑緣凸出高起，分佈在坑緣較中央多。
4. 質量較大時，坑中心會有反彈現象，質量越大時越容易發生。
5. 同速度下，質量大者，能量也大，影響能量的變因尚有速度，所以進行以下實驗。

#### (四)撞擊速度對撞擊坑之影響

分別以石膏球及重球自不同高度落下，重複上列實驗。結果如數據圖二。

分析：

1. 石膏球與重球有相似結果。
2. 撞擊速度越大者，撞擊坑越寬、越深、寬深積越大、深寬比越大。
3. 一般而言，深寬比小於1，石膏球分佈於0.1~0.2，重球則在0.2~0.6之間。
4. 寬深積的規律較其它明顯，可用於表示撞擊球之能量。
5. 寬深比越小，撞擊坑較淺較寬，產生此種結果之原因可能是入射角度較大，或被撞擊之表面較硬。

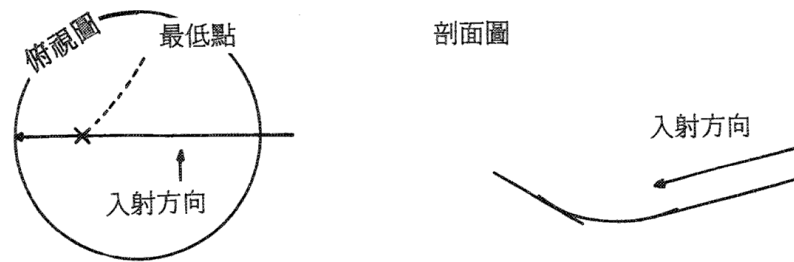
#### (五)撞擊角度對撞擊坑的影響

將石膏盤以木板墊高成某一角度，以不同質量石膏球，自150cm處落下，重複上述實驗。結果如數據圖三。

分析：

1. 入射角越大，撞擊坑越寬、越淺、寬深積越小，深寬比也越小。
2. 質量越大者，寬深積也越大。
3. 角度越大時，不同質量之寬深積，變化越不明顯。
4. 入射角越大時，鉛直方向的動能越小，所以寬深積越小，又鉛直方向動能越大，坑越深，水平方向動能越大，坑越寬，飛濺更遠，所以深寬比越小。
5. 入射邊之坑壁斜度較緩，對邊較陡，入射方向可由坑中心與最低點的連線

，或通過最低點與進點的連線決定。



#### (六)被撞表面的硬度對撞擊坑的影響

以不同凝結時間的石膏作為被撞表面，10g石膏球由150cm自由落下，重複上述實驗。結果如數據圖四。

分析：

1. 被撞表面越硬，寬度越小，深度越淺，深寬比越小，寬深積越小。
2. 凝固10分鐘的被撞表面有些微突起，10分鐘後因表面堅硬，撞後石膏突起，深度以負值表示。
3. 我們無法實地觀測地球表面上的隕石坑，因此以月球的隕石坑作為觀測對象。

#### (七)月球表面隕石坑測量及統計

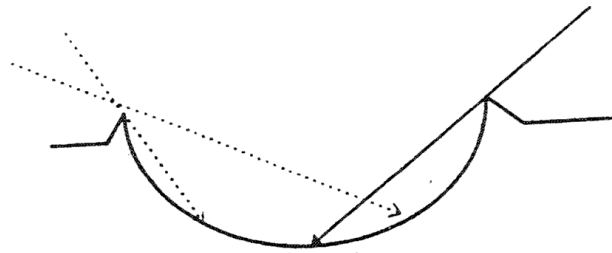
於一月三十日早零時至三時（虧凸月），二月十四日晚二十時至二十二時（上弦月），及三月六日早三時至五時（殘月），以25cm反射式望遠鏡直焦拍攝月相。再將底片製成幻燈片，以幻燈機放大於方格紙上，三張幻燈片分別由南到北選取隕石坑，以前述方法計算深度及寬度，結果如表（略）。

另經由全球資訊網取得月面隕石坑直徑資料軟體“Moon”，及月面圖查得樣本的直徑資料作為比較。

分析：

1. 測得隕石坑直徑誤差大部份約在5%至30%之間。
2. 隕石坑的直徑越大者，寬深積越大。
3. 在黃道面附近的微行星，被月球重力吸引，而奔向月球，他們的動能來自減少的重力位能 $\Delta(GmM/r) = 0.5mV^2$ ，因此他們撞擊月面的速度相當，所以質量大者，能量大，撞擊後的寬深積較大。
4. 隕石坑的直徑越大者，深寬比越大，但約在80km以上時，深寬比反而減少，與模擬實驗的結果吻合。
5. 上弦月西明東缺，因此測得為隕石坑東邊的坑壁的深度，虧凸月東明西缺，測得為東邊坑壁的深度。
6. 所選隕石坑較近日夜線時，因測量造成的誤差影響較大。

7. 若隕石坑較小時，坑成碗形，陰影可能未落在最低點，因此推算出的坑深可能較小，使用不同月齡的照片重複推算，可避免這個誤差。



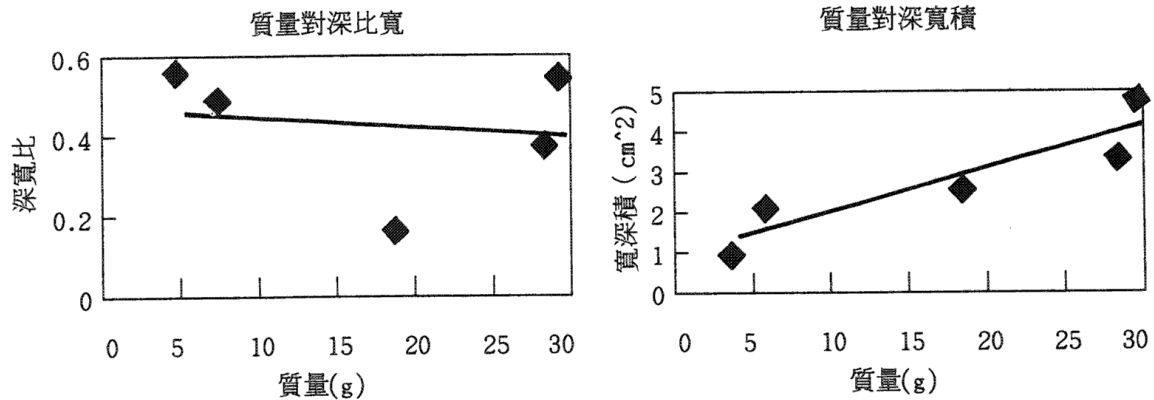
## 六、結論與討論

1. 撞擊物的質量越大，產生的撞擊坑越深，越寬，寬寬深積越大，深寬比增加後再減少。
2. 撞擊的速度越大，產生的坑也越深，越寬，寬寬深積也越大，深寬比越大。
3. 撞擊的能量可用寬寬深積來表示。
4. 被撞表面較硬時，撞擊球質量較大時，坑中心會有突起現象。
5. 撞擊入射角較大時，坑較寬，深較淺，深寬比較直撞小。
6. 一般而言，隕石坑的深寬比小於一，亦即寬比深大。
7. 上弦月的二號樣本隕石坑，中間有突起現象，寬寬深積較小，可能是由質量較大的隕石撞擊而來。
8. 模擬實驗撞擊後未凝結石膏會有回填現象，我們在撞擊後立即倒入石臘，以固定撞擊坑，並方便坑深及寬的測量。
9. 照片的測量不易，因此以底片裝入幻燈片夾，利用幻燈機放大投影於全開方格紙上，可提高測量的精確度。
10. 拍攝月球隕石坑時，快門再快些，如此不會因為太亮而無法拍攝隕石坑。
11. 我們重導的公式直接從月相照片獲得陽光入射與我們視線的夾角，無須知道照片拍攝時太陽、月亮、拍攝者三者的位置關係，因此可用來推算無陰影者除外的任何一張月球照片。
12. 雖然我們重導的公式不侷限於弦月，但弦月時影長較長，測量的誤差較小，接近滿月或新月，影長越短，誤差較大，滿月時無陰影，無法測量坑深。
13. 較小的隕石坑呈碗型，則陰影前緣落在隕石坑最深點時，可獲得最佳的推算結果，否則測到的並非真正的最深點；較大的隕石坑，呈平底狀，上述的限制較小。因此不同大小、形狀、位置的隕石坑，最好選擇不同月齡的相片推算。

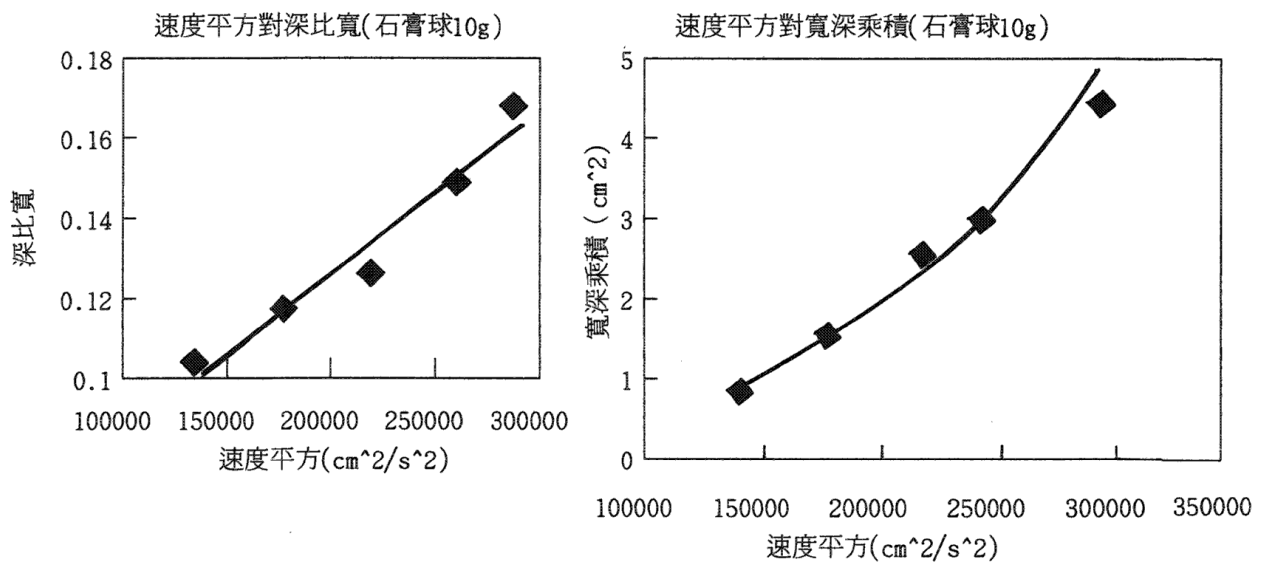
## 七、參考資料

- 1.天文年鑑（1977），台北市立天文台。
- 2.蔡章獻審定（1992）：天文觀測入門，初版，銀禾文化。
- 3.牛頓編輯小組（1987）：從各種星球間激烈的撞擊談太陽系的起源，牛頓雜誌，Vol.4 No.11, p70~79。
- 4.水谷仁（1986）：隱藏在圓坑中的秘密，牛頓雜誌，Vol.4 No.6, p84~91。
- 5.Jerry Waxman (1989): A Workbook for Astronomy, Cambridge University, New York.
- 6.Jean Audouze & Guy Israel (1988): The Cambridge Atlas of Astronomy, Cambridge University, New York.

數據圖一：撞擊質量對撞擊坑的影響

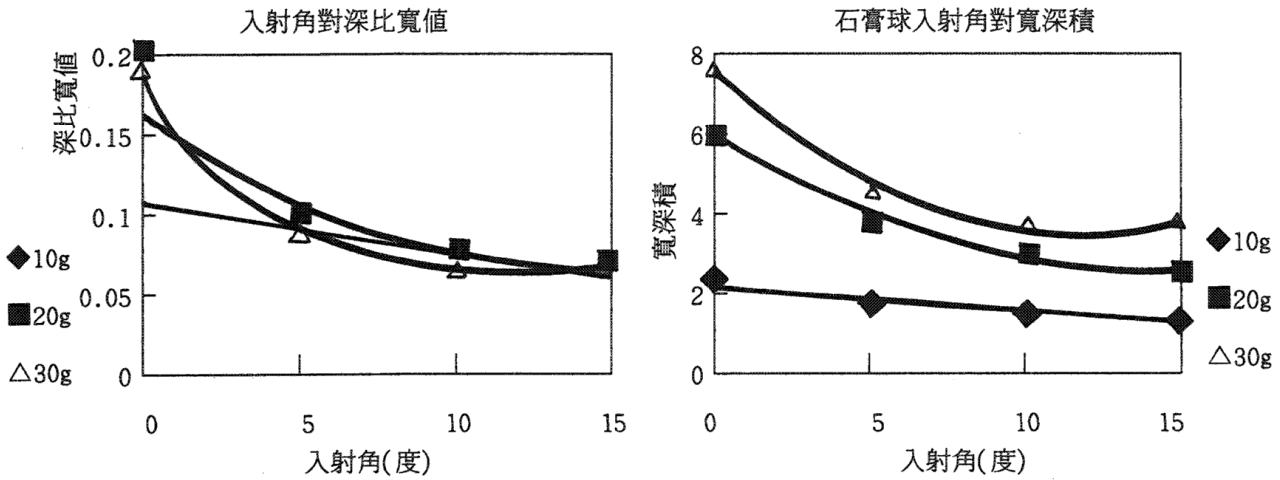


數據圖二：撞擊速度對撞擊坑的影響

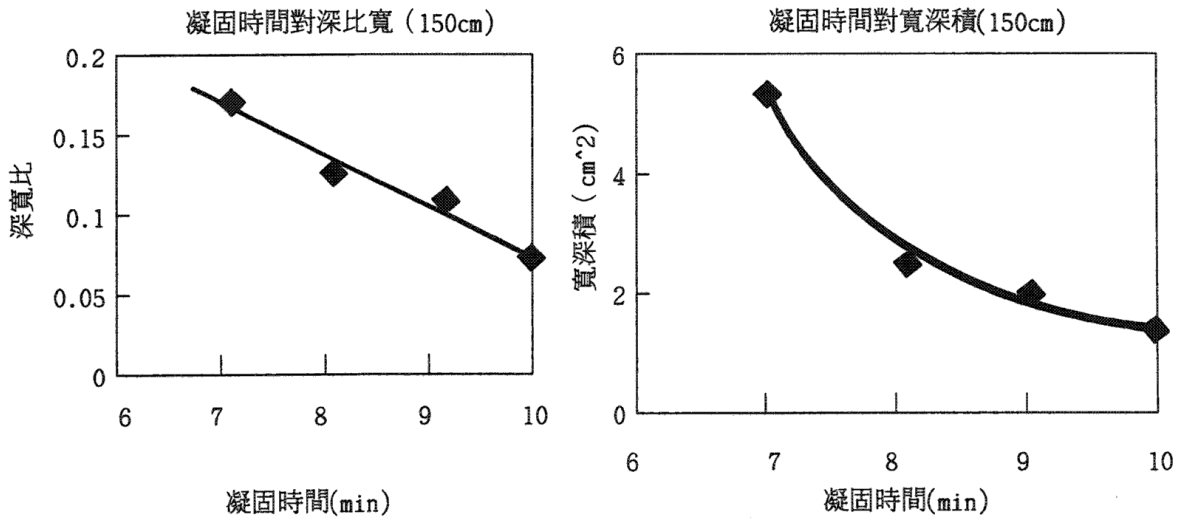




數據圖三：撞擊角度對撞擊坑的影響



數據圖四：被撞擊表面的硬度對撞擊坑的影響



## 評語

本作品利用石膏作為材料模擬月球隕石坑之形成富有創意，此外亦探討隕石坑之實際比與（撞擊）隕石之質量與速度有關，本作品亦拍攝月球表面之照片作為研究隕石坑之基礎，本作品作者共有三人富有團隊精神，研究方法正確，學生表達之能力甚佳，收集相關文獻豐富。