

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

030501

千里共嬋娟—月表地形的遠距測量與探討

學校名稱：高雄市立右昌國民中學

作者： 國二 方子揚 國二 葉天樺	指導老師： 林聖翰
-------------------------	--------------

關鍵詞：月表坑洞、地形測量、坑洞特性

千里共嬋娟-月表地形的遠距測量與探討

摘要

關於月表坑洞已有不少研究進行過坑洞深度的討論，並提出深度的計算方法，但卻鮮少實際算出深度資料，我們的研究重點即是利用自製方式對月表 55 個坑洞，進行高解析攝影處理法拍攝，取得清晰坑洞影像後，從拍攝之日期與時間中求得日月相對位置並測量及推算坑洞深度，再加以驗證、分析與討論。此外，我們也測量坑洞其他地形數據，例如「寬度」、「面積」、「寬度與深度比值」、「面積與深度比值」，並將數據分析歸納，對數據在月表上分布情形進行討論，研究最後發現月表坑洞的寬度、深度與面積有由北向南遞增之明顯趨勢，而坑洞「寬度與深度比值」與「面積與深度比值」部分，則有「月陸比值普遍大於月海比值」的顯著分布趨勢。

壹、研究動機

自然與生活科技課本第五冊 5-4 中提到月球上有許多隕石撞擊所留下的坑洞，地形景觀十分特殊，與地球的地貌有著天壤之別，使我們感到十分好奇。且月球離地球平均只有 38 萬公里左右，透過望遠鏡即可清楚看見月表的坑洞，此外月表因風化作用微弱，地貌不易隨時間改變，是研究的好題材！因此，我們就打算利用自己的方法測量出月表的坑洞大小與深度，並從這些數據當中進一步了解月球坑洞的分布特性，以解決心中的疑惑與好奇。

貳、研究目的

- 一、利用自製方法對月表坑洞的深度、寬度、面積進行測量。
- 二、探索月球坑洞深度、寬度、面積、寬度與深度的比值（寬深比）、面積與深度的比值（面深比）各項數據的分布規律與特性。

參、研究設備及器材

- 一、硬體：Vixen VC200L 天文望遠鏡、Vixen GP2 赤道儀、網路攝影機、電腦。
- 二、軟體：Microsoft Word、Excel、影片疊合軟體 Registax 5、影像處理軟體 PhotoImpact 11、Google 地球 6.0、GSP 幾何繪圖 4.06、Stellarium 星圖軟體 0.10.4

肆、研究過程與方法

一、 將研究過程利用流程圖來呈現（如圖1）。

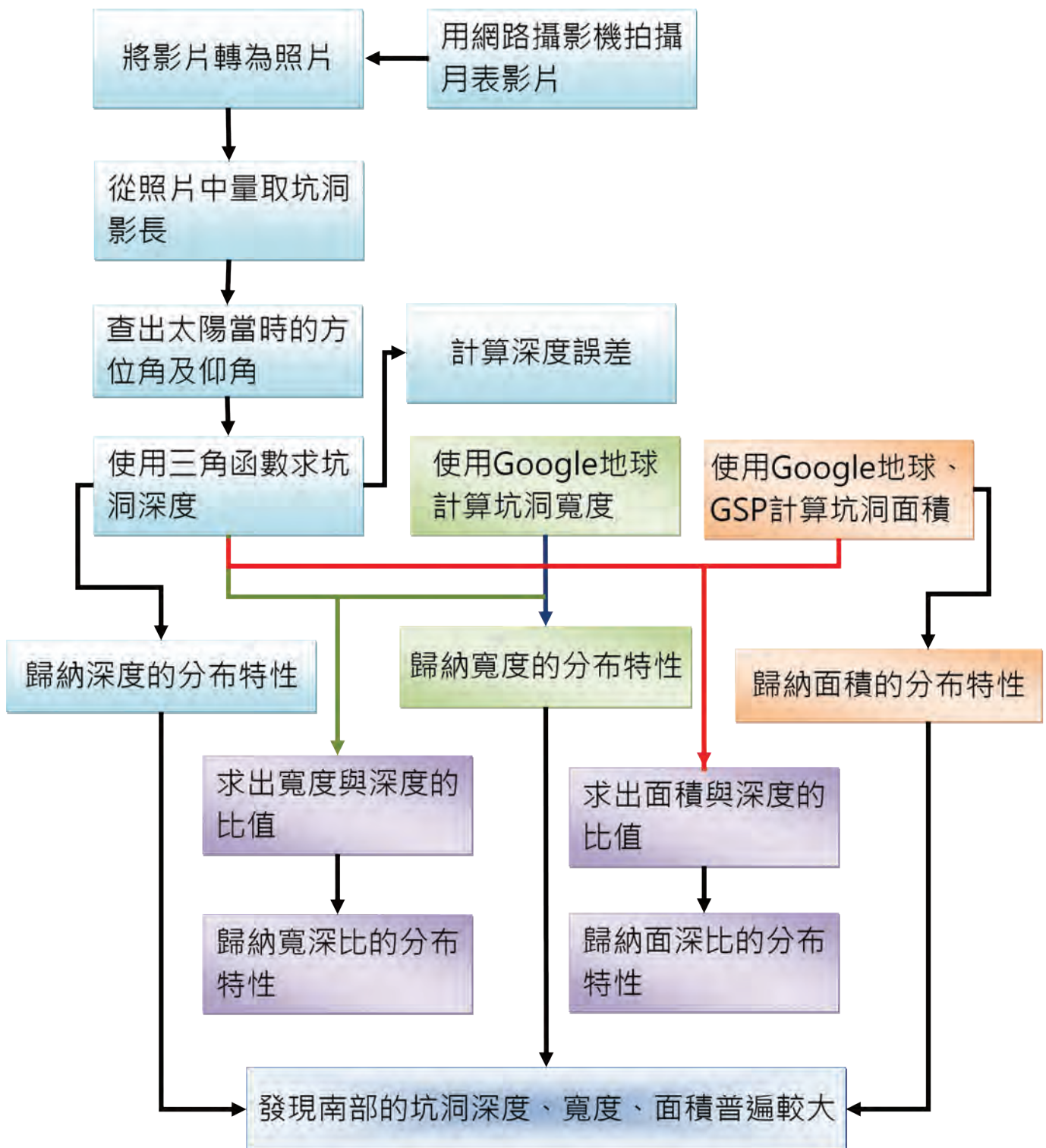


圖1：研究流程圖

二、 利用自製方法測量月表坑洞的地形數據：

(一) 拍攝月表照片：拍攝高解析度照片以取得計算坑洞深度時所需的影長。

1. 將網路攝影機連接至望遠鏡的目鏡接口，對月球的一個區塊進行影像接收，將即時傳回電腦的影像錄製成影片。(如圖 2)

(影片的影像播放頻率設定為每秒 15~30 張不等，每段影片約拍攝一分鐘)

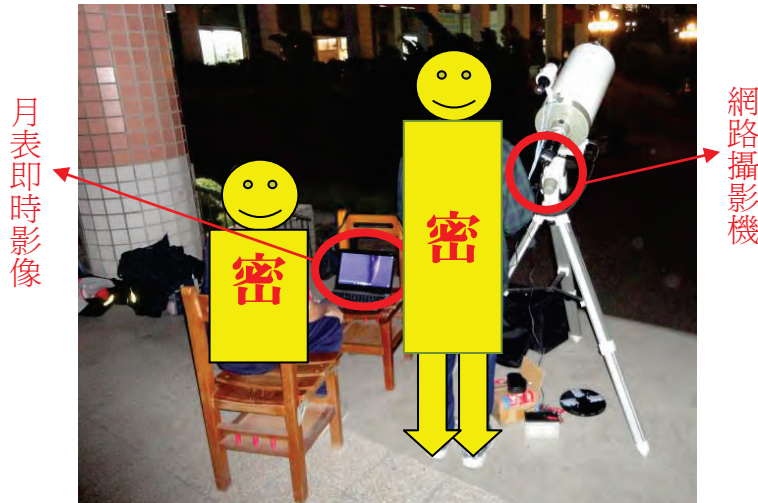


圖 2：利用網路攝影機拍攝月表影片。

2. 使用 Registax 軟體將錄製好的月球局部區域影片分解為多張靜態影像。
3. 從多張靜態影像中篩選出較佳的月面影像，刪除受到大氣擾動而模糊的影像。
4. 將較佳的影像疊合並調整參數，使圖片更清楚，即完成局部的高解析月表照片(如圖 4)。

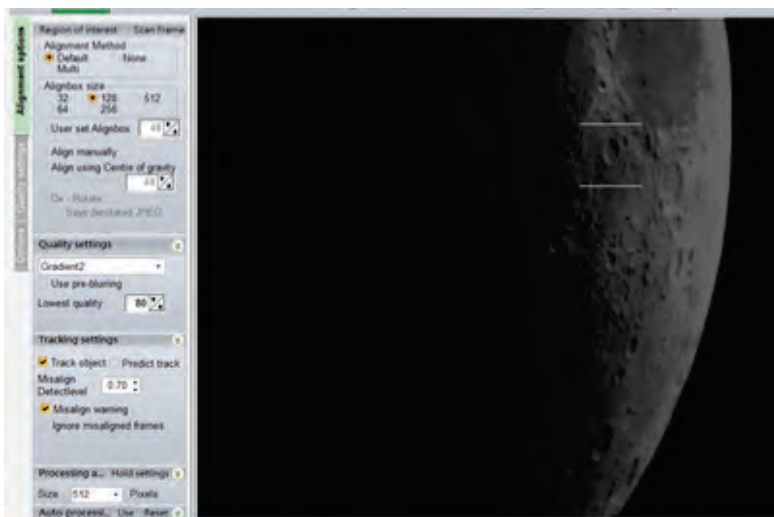


圖 3：分解後，選定一張最清楚的照片，軟體會自動將其他照片與此照片的特定目標比對，決定何者為較佳及較差之影像。

5. 照上述步驟將月表的每個部分都拍攝一次。
6. 使用 PhotoImpact 中「縫合掃描的影像」工具將每一

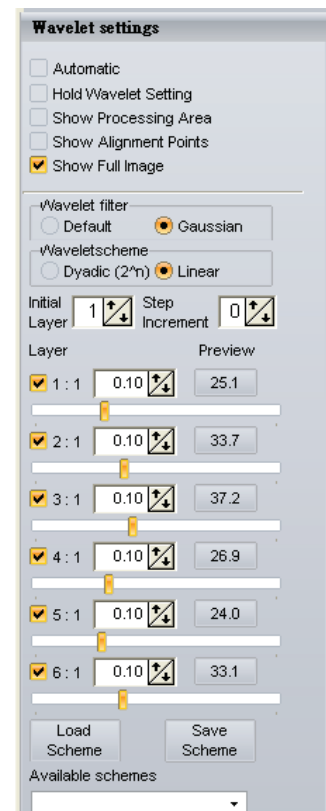


圖 4：調整參數銳化照片。

區塊的月球照片拼接起來，即成為一張完整的高解析度的表照片(如圖 5)。

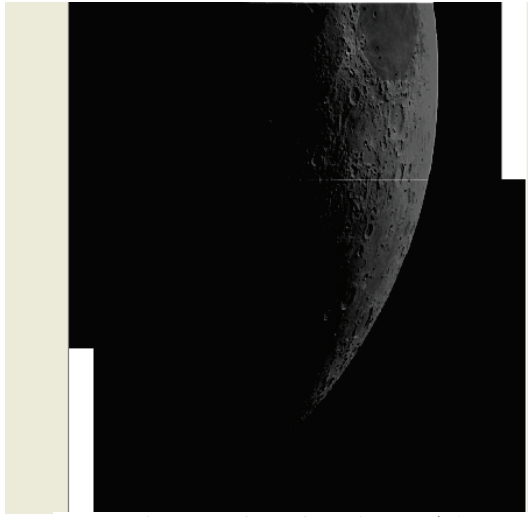


圖 5：將兩張局部月表區塊影像合併。

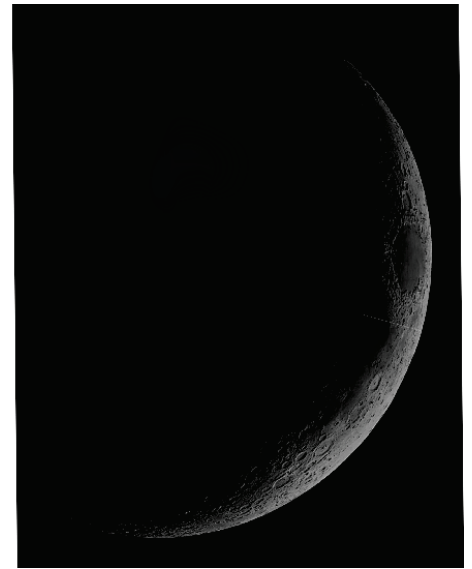


圖 6：將所有月表區塊一一拼接，即完成一張高解析度的月表照片。

(二) 照片資訊分析：取得高解析度月表照片之後，即可開始對月表上的坑洞進行地形測量與計算，以下舉斯特芬坑（Stevinus）為例，詳細說明測量坑洞深度、寬度與面積的方法。

1. 測量並計算坑洞深度

- (1) 使用 PhotoImpact 將月球的北極點旋轉至照片的正上方（對北）。
- (2) 利用 Stellarium 星圖軟體調整至拍攝月球照片當時的日期與時間，並查出當時從斯特芬坑看太陽的方位角及仰角（如圖 7）。

- (3) 用 PhotoImpact 的測量工具計算斯特芬坑的寬度及影長（如下頁圖 8）。

註：拍攝當時從斯特芬坑看太陽的方位角為 84° ，而 PhotoImpact 是以水平為 0° 角，所以 PhotoImpact 測量時用的角度為 $84-90=-6^\circ$ （如方位角為 273° ，則角度為 $273-270=3^\circ$ ）

- (4) 用 Google 地球的尺規工具量出坑洞的實際寬度（如圖 9）。（從斯特芬坑看太陽的方位角為 84° ，所以在 Google 地球上要朝向 84° ）



圖 7：查出 Stellarium 軟體中從斯特芬坑看太陽的仰角及方位角。

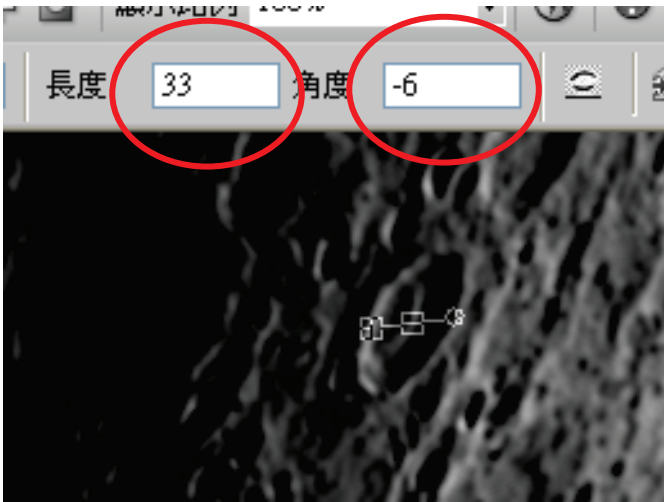


圖 9：用 PhotoImpact 量出照片上的寬度。

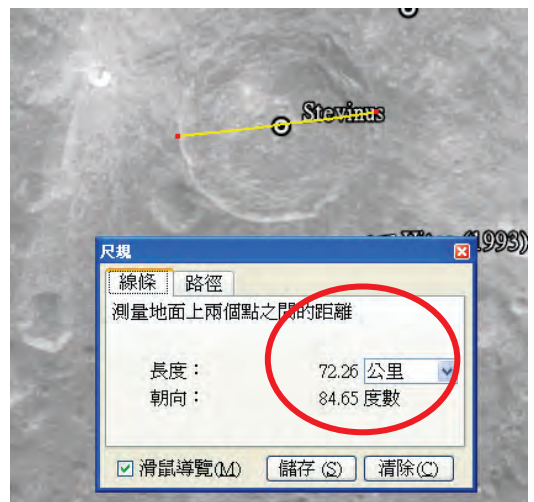


圖 8：Google 地球取得實測寬度

(5) 使用比例的方式求出該坑洞在拍攝當時的實測影長。

註：軟體測量的寬度：軟體測量的影長＝月表的實測寬度：月表的實測影長

33：9.62＝72.26：實測影長，計算得知月表的實測影長為 21.07 公里

(6) 用三角函數即可求出坑洞深度（如圖 10）。

$$\tan(\text{太陽仰角}) = \frac{\text{坑洞深度}}{\text{實測影長}}$$

當天（2010/3/19，19：20）從斯特芬坑看太陽的仰角為 9.25°，

假設坑深為 Xkm，實測影長為 21.07km，則 $\tan(9.25^\circ) = X \div 21.07$

$$\tan(9.25^\circ) \doteq 0.162, X = 0.162 \times 21.07 \doteq 3.41334$$

經計算後該坑深度大約為 3.4km

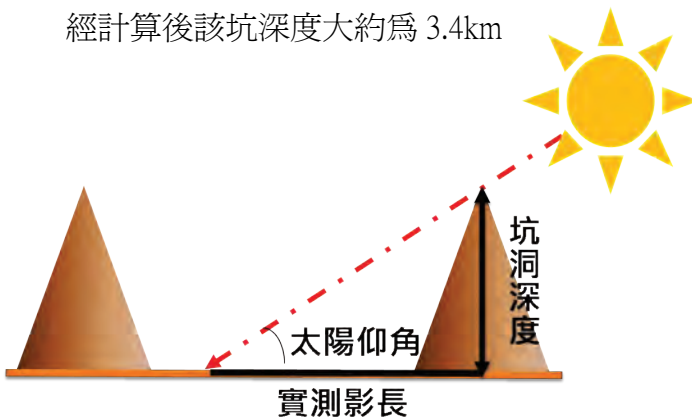


圖 10：三角函數求坑洞深度示意圖。

2. 測量坑洞寬度

(1) 使用 Google 地球的尺規工具量出實測寬度（如圖 11）。

(2) 若坑洞是橢圓形，則我們將寬度定義為最長寬度與最小寬度之平均值。

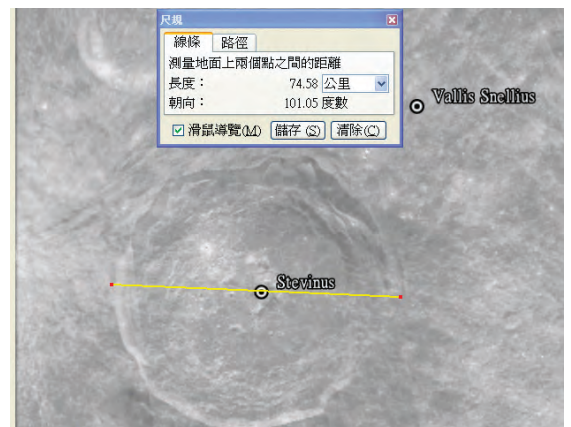


圖 11：量出坑洞的寬度

3. 求出坑洞面積

- (1) 截取 Google 地球上的斯特芬坑畫面，並將之讀至 GSP 幾何繪圖軟體上。
- (2) 用線段將坑洞圍起。

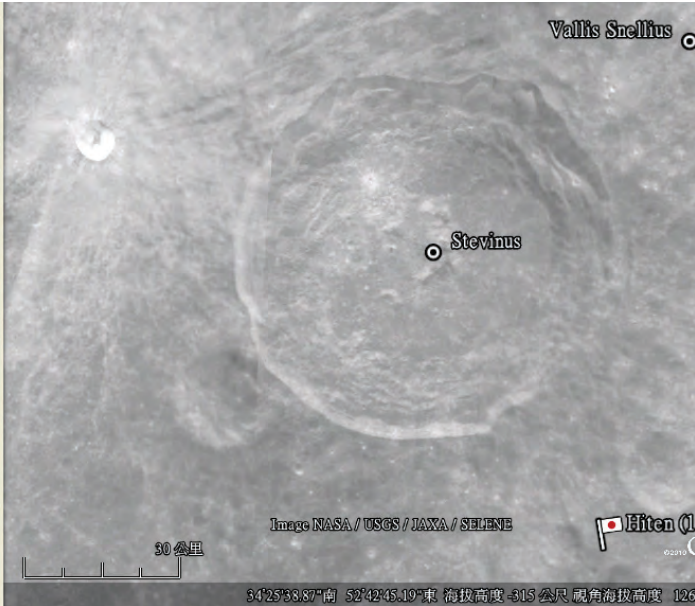


圖 13：Google 地球截圖。

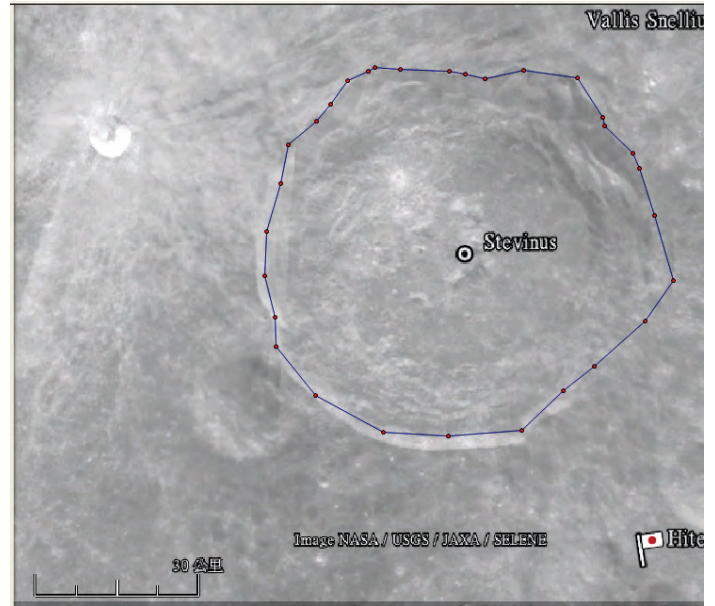


圖 12：在 GSP 中圍起該坑洞的範圍。

- (3) 計算線條圍繞之面積：GSP 可自動計算線條圍繞之面積，但比例未經轉換（如圖 14）。

- (4) 還原至實際大小比例：

因為截圖的尺寸非坑洞實際尺寸，因此計算出來的面積尚需經過比例尺的轉換方為實際面積：

$$\begin{aligned} \text{實測面積 (km}^2\text{)} &= \\ & \text{GSP 測量面積} \times \left(\frac{\text{比例尺的實際長度}}{\text{比例尺的測量長度}} \right)^2 \\ & 92.37 \times \left(\frac{30}{4.6} \right)^2 \approx 3928 \text{ (km}^2\text{)}, \\ & \text{可知實測坑洞面積約為 3928km} \end{aligned}$$

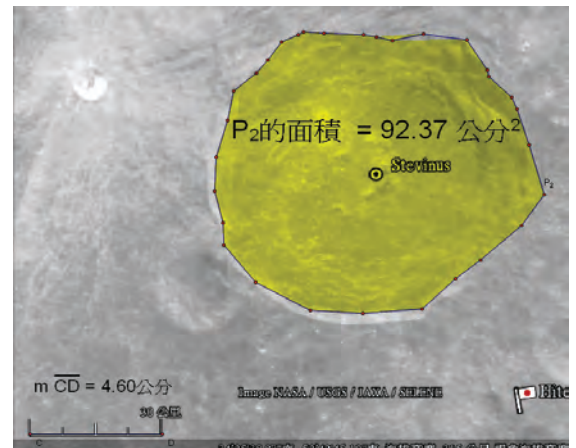



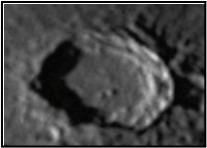

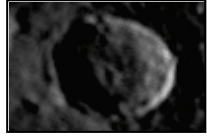






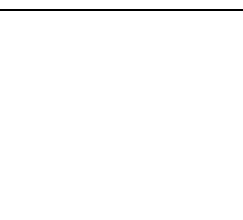

圖 14：GSP 可自動計算出線條圍繞之面積。

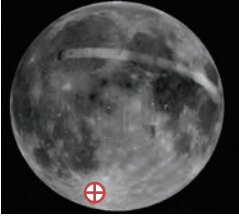




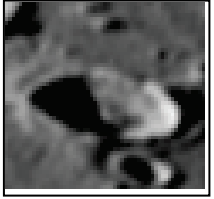



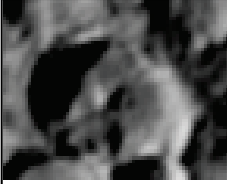

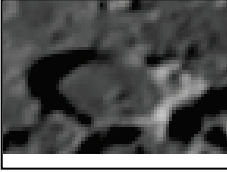
4. 將以上步驟（測量深度、寬度、面積），套用在月表 55 個坑洞上，其資料統整後於研究結果中列表呈現（如表一）。


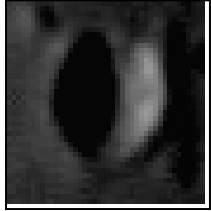

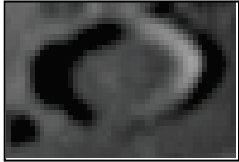

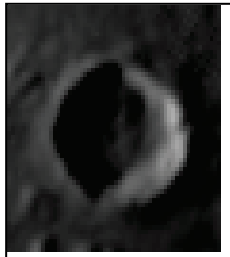

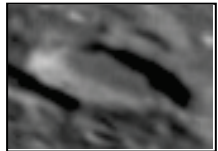



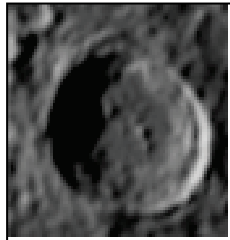
伍、研究結果：


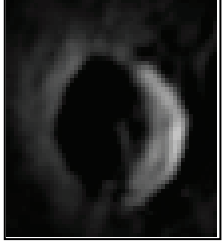

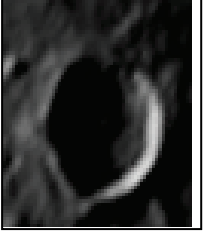

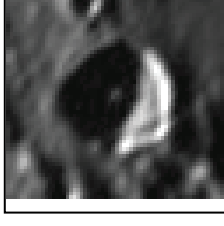
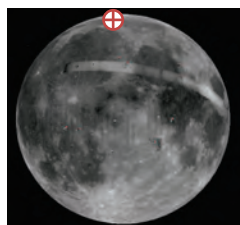
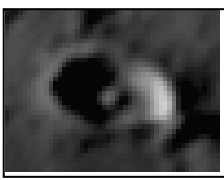

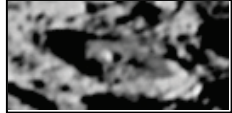

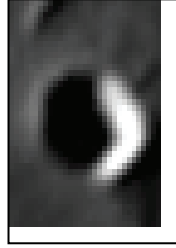
一、經過長時間的月面攝影及分析、測量計算，我們將月表的坑洞資料整理歸納為表格，呈現如下表一：


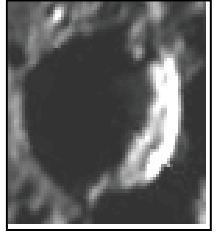

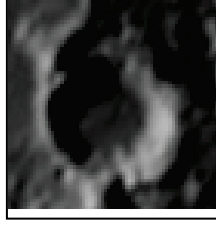

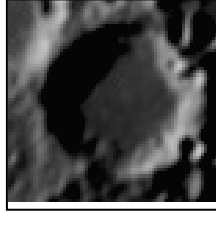

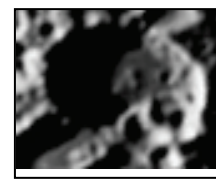

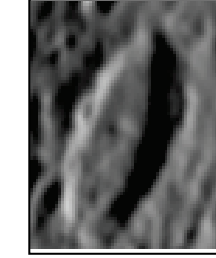

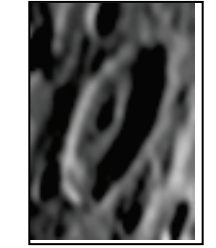
表 1：坑洞深度、寬度、面積資料表


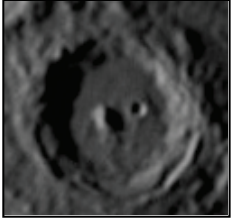

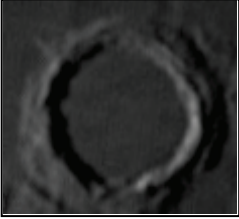

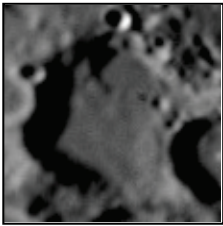

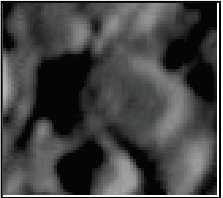

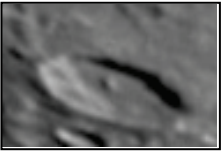

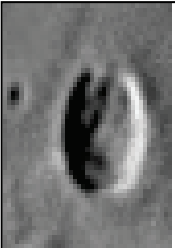
坑洞名稱	坑洞位置 	實際影長	太陽仰角	實測深度	實測寬度	實測面積	實際拍攝坑洞照片 
		(km)	(度)	(km)	(km)	(km ²)	
亞里斯多德坑 (Aristoteles)	50.20°N 17.40°E 	26.69	6.83	3.18	85.63	6456	
歐多克斯坑 (Eudoxus)	44.30°N 16.30°E 	23.79	8.41	3.52	63.80	2906.29	
提莫恰里斯坑 (Timocharis)	26.70°N 13.10°W 	5.61	27.37	2.90	33.39	915.64	
阿里斯基爾坑 (Aristillus)	33.90°N 1.20°E 	13.44	13.78	3.31	53.48	1703.43	
厄拉多塞內斯坑 (Eratosthenes)	14.50°N 11.30°W 	12.79	17.50	4.03	52.90	2869.83	


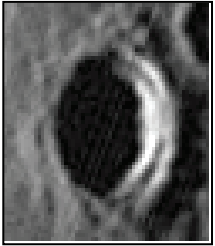

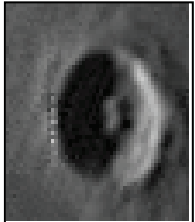

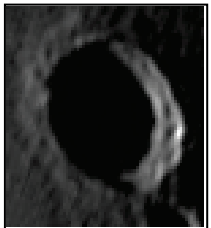

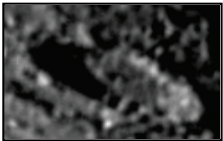

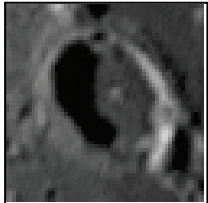
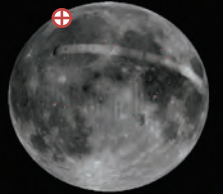
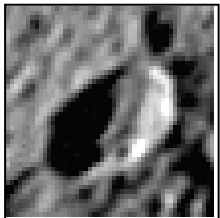


第谷坑 (Tycho)	43.40°S 11.10°W 	12.92	20.23	4.76	82.78	5469.23	
Philolaus	72.10°N 32.40°W 	18.10	11.22	3.58	69.04	4244.38	
阿諾薩戈臘斯坑 (Anaxagoras)	73.40°N 10.10°W 	22.11	7.70	2.99	50.50	2080.96	
赫協爾坑 (Herschel)	5.70°S 2.10°W 	10.50	19.87	3.79	36.65	1270.87	
米勒坑 (Miller)	39.30°S 0.80°E 	14.99	13.12	3.49	55.87	2846.94	
Epigenes	67.50°N 4.60°W 	12.23	8.42	1.80	54.82	2738.17	

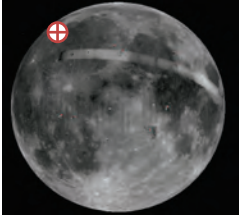
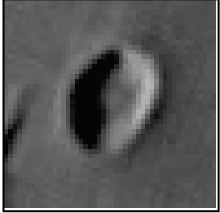

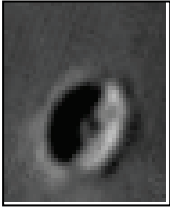

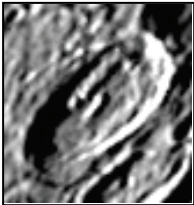



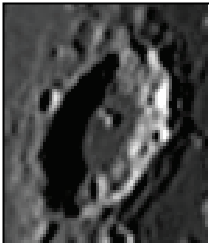

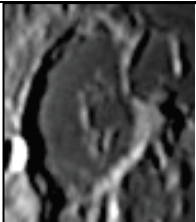
莫斯汀坑 (Mösting)	0.70°S 5.90°W 	6.49	23.77	2.86	22.93	489.60	
Fontenelle	63.40°N 18.90°W 	8.23	11.22	1.63	37.94	1151.53	
奧多利卡斯坑 (Autolycus)	30.70°N 1.50°E 	12.69	14.03	3.16	38.07	1247.69	
布蘭卡納斯坑 (Blancanus)	63.80°S 21.40°W 	12.13	18.45	4.04	42.47	8766.40	
阿里辛西斯坑 (Aliacensis)	30.60°S 5.20°E 	21.96	10.87	4.04	82.36	5456.66	
沃納坑 (Werner)	28.00°S 3.30°E 	17.84	12.82	4.04	61.33	2230.36	






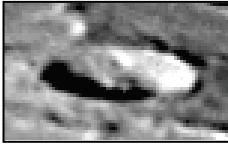

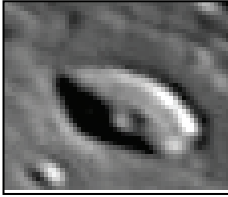

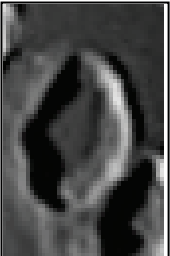

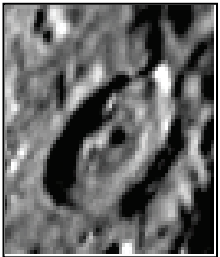

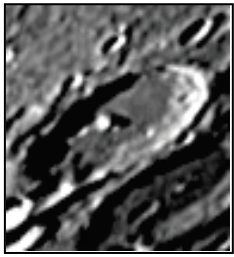
馬尼呂斯坑 (Manilius)	14.50°N 9.10°E 	19.83	8.48	2.95	36.36	1111.83	
阿格里巴坑 (Agrippa)	4.10°N 10.50°E 	24.77	7.35	3.17	42.79	1315.91	
果丹坑 (Godin)	1.80°N 10.20°E 	21.72	7.67	2.91	35.43	655.95	
Timaeus	62.80°N 0.50°W 	16.96	7.85	2.32	30.00	823.73	
莫雷特坑 (Moretus)	70.60°S 5.80°W 	36.01	7.65	4.82	99.02	10156.47	
Theaetetus	37.00°N 6.00°E 	15.23	9.45	2.53	21.75	413.71	

Abulfeda	13.80°S 13.90°E 	53.62	3.85	3.22	65.28	1388.75	
Playfair	23.50°S 8.40°E 	18.54	8.45	2.74	48.20	1484.44	
Apianus	26.90°S 7.90°E 	12.82	8.90	2.00	63.02	1675.90	
Licetus	47.10°S 6.70°E 	31.25	7.57	4.13	73.67	4561.45	
斯內拉斯坑 (Snellius)	29.30°S 55.70°E 	20.07	10.88	3.80	56.20	3294.23	
斯特芬坑 (Stevinus)	32.50°S 54.20°E 	21.07	9.25	3.29	50.39	3669.95	

阿爾扎切爾坑 (Arzachel)	18.20°S 1.90°W 	23.01	8.25	3.31	96.66	5127.00	
阿基米德坑 (Archimedes)	29.70°N 4.00°W 	11.84	9.37	1.95	81.77	4868.61	
歐朗塔斯坑 (Orontius)	40.60°S 4.60°W 	22.02	8.48	3.28	78.07	8639.61	
Pictet	43.60°S 7.40°W 	16.58	10.20	2.97	60.12	1689.61	
Bettinus	63.40°S 44.80°W 	20.11	9.85	3.48	72.89	2107.85	
克卜勒坑 (Kepler)	8.10°N 38.00°W 	6.74	20.05	2.45	28.32	645.82	

倫霍耳德坑 (Reinhold)	3.30°N 22.80°W 	33.44	5.05	2.94	44.58	1350.40	
蘭斯柏坑 (Lansberg)	0.30°S 26.60°W 	21.21	8.83	3.29	38.68	1136.08	
布利奧杜坑 (Bullialdus)	20.70°S 22.20°W 	47.12	4.13	3.39	58.90	2645.52	
席奈爾坑 (Scheiner)	60.50°S 27.50°W 	59.12	4.75	4.84	106.68	7104.81	
康龐努斯坑 (Campanus)	28.00°S 27.80°W 	13.71	8.83	2.12	43.62	1508.84	
Bianchini	48.70°N 34.30°W 	15.60	10.85	2.98	38.41	878.72	
Mairan	41.60°N 43.40°W 	10.55	18.80	3.59	38.69	1163.80	

Delisle	29.90°N 34.60°W 	9.80	14.55	2.54	24.51	439.11	
Euler	23.30°N 29.20°W 	12.39	10.50	2.29	25.90	487.17	
法布里夏斯坑 (Fabricius)	42.90°S 42.00°E 	19.63	7.85	2.69	70.34	4663.71	
梅提斯坑 (Metius)	40.30°S 43.30°E 	23.38	7.20	2.95	83.49	5111.56	
散特貝克坑 (Santbech)	20.90°S 44.00°E 	31.04	8.17	4.44	65.53	1598.35	
古騰堡坑 (Gutenberg)	8.60°S 41.20°E 	10.34	11.43	2.09	69.79	2803.37	

馬克羅布坑 (Macrobius)	21.30°N 46.00°E 	32.43	6.30	3.57	63.38	2594.06	
富蘭克林坑 (Franklin)	38.80°N 47.70°E 	37.34	3.95	2.58	53.14	2279.01	
Scoresby	77.70°N 14.10°E 	17.06	7.67	2.29	56.06	2181.41	
Democritus	62.30°N 35.00°E 	15.04	8.18	2.15	37.59	1015.43	
Magelhaens	11.90°S 44.10°E 	14.56	8.40	2.14	40.77	1064.82	
Neander	31.30°S 39.90°E 	18.08	10.95	3.49	50.06	387.09	
Vlacq	53.30°S 38.80°E 	22.32	8.28	3.24	82.22	5257.29	

(一) 我們將月表 55 個坑洞的實測寬度與實測深度、實測面積與實測深度製成散布圖進行比較 (如圖 15、16)：

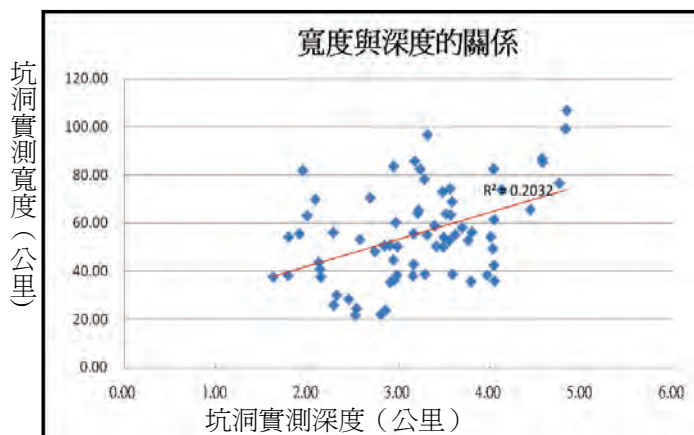


圖 15：寬度與深度的關係。

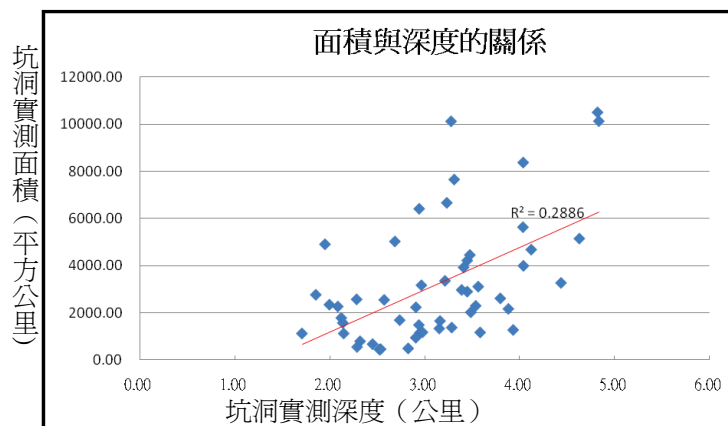


圖 16：面積與深度的關係。

1. 將實測寬度與實測深度製成散布圖進行比較，發現兩數據大致有「寬度越大，深度越大」之關係，但 $R^2 = 0.2032$ ，表示散布圖的資料點與迴歸線的吻合度不高。
2. 將實測面積與實測深度製成散布圖進行比較，發現兩數據亦有「面積越大，深度越大」之關係，但 $R^2 = 0.2886$ ，表示散布圖的資料點與迴歸線的吻合度不高。

(二) 我們將坑洞深度、寬度、面積與緯度的關係畫成散布圖進行比較 (如圖 17、18、19)：

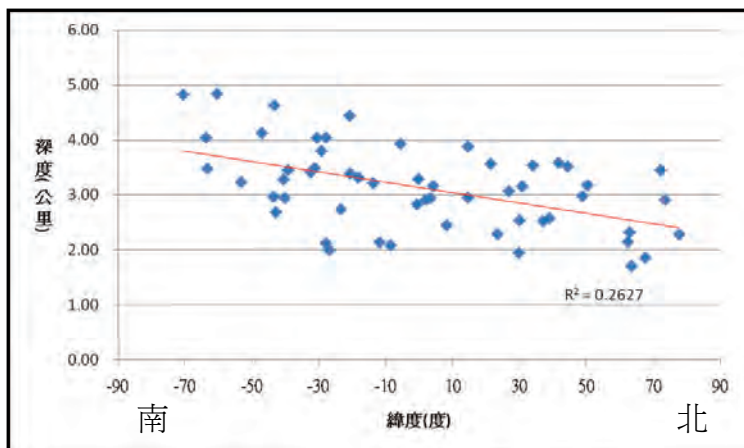


圖 17：深度與緯度的關係。

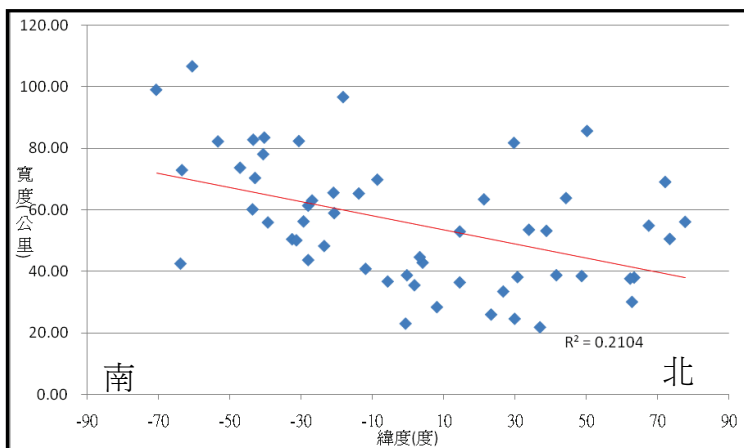


圖 18：寬度與緯度的關係。

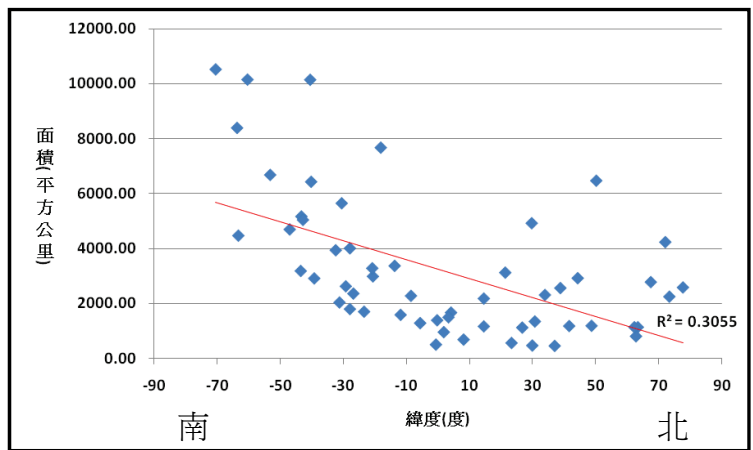


圖 19：面積與緯度的關係。

(三) 再將「深度」、「寬度」、「面積」數據繪製在月表對應坑洞位置，並將數據依相等差距由紅到紫區分為 7 種顏色表示，並將顏色接近的坑洞以線條圍起以利分析（如圖 20、21、22）。

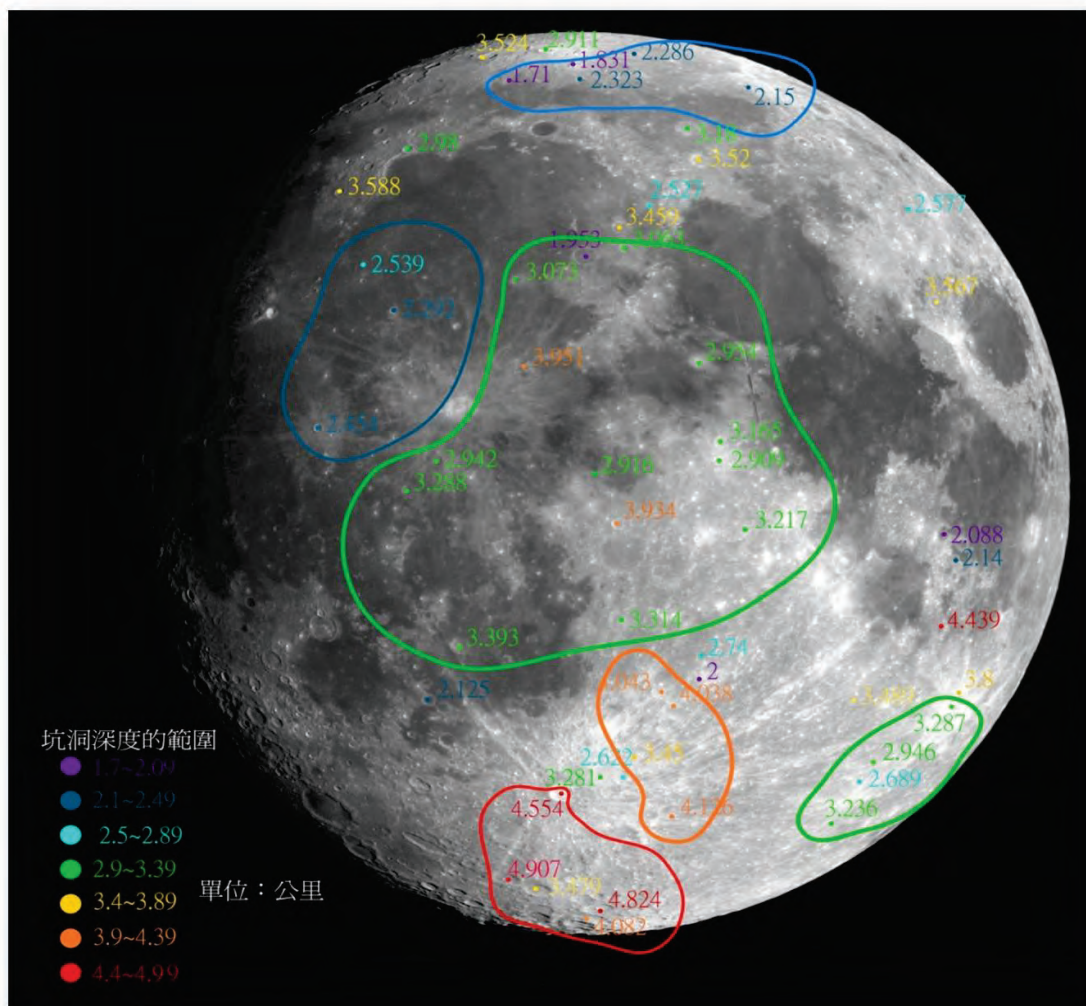
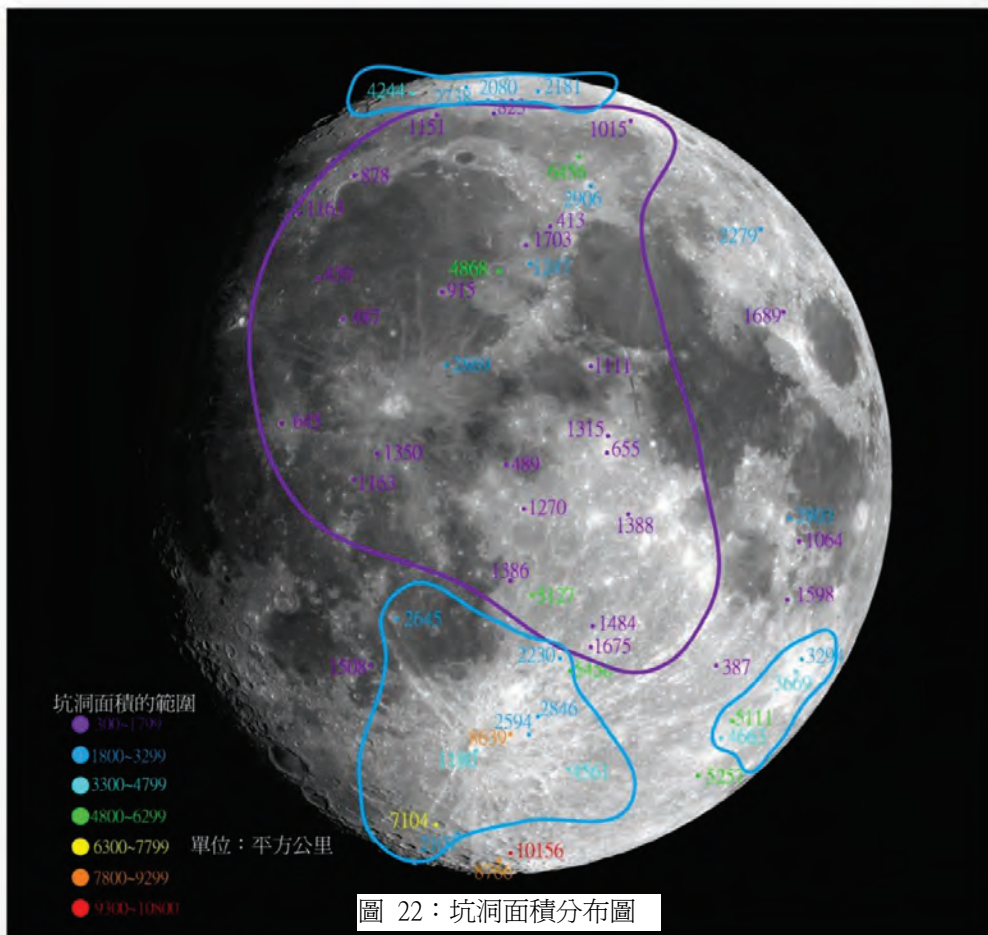
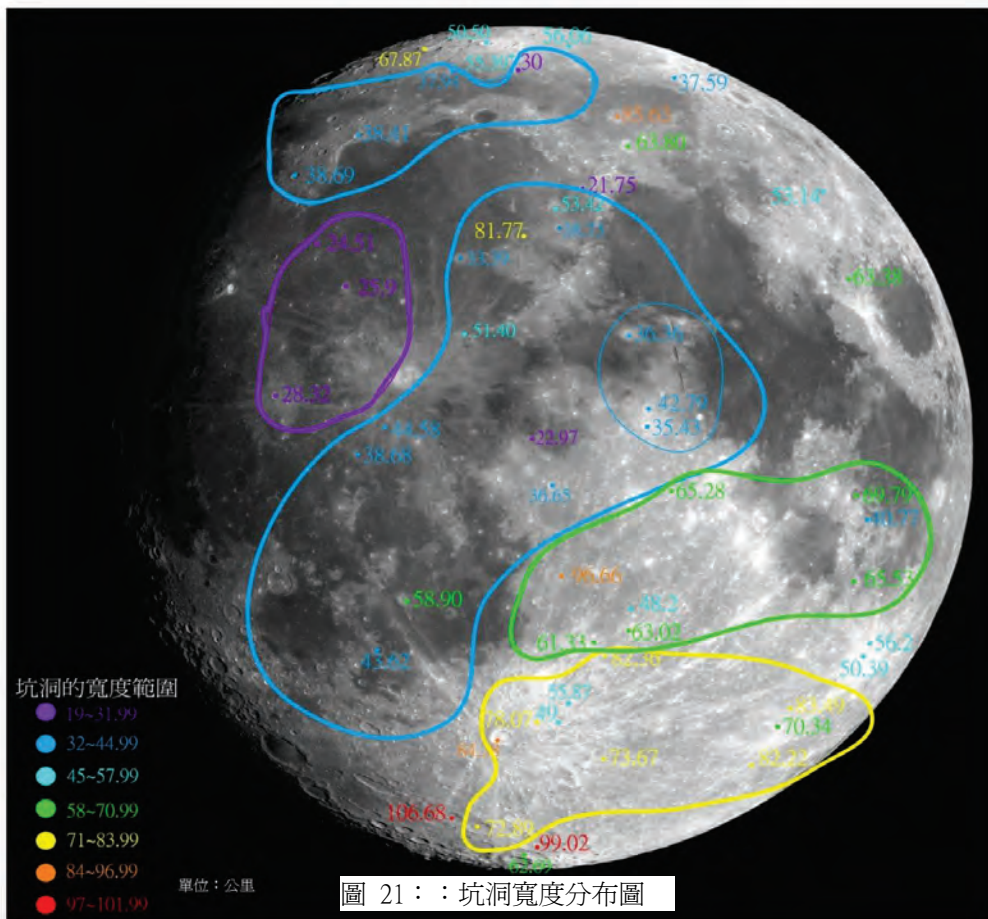


圖 20：坑洞深度分布圖



二、求得的深度、寬度、面積等資料後，再將寬度與深度比值（寬深比）、面積與深度的比值（面深比）整理成表格如下表 2：

表 2：寬度與深度比值、面積與深度比值

坑洞名稱	實測寬度與深度比值	實測面積與深度比值	坑洞名稱	實測寬度與深度比值	實測面積與深度比值
亞里斯多德坑 (Aristoteles)	26.93	2030.35	斯特芬坑 (Stevinus)	15.33	1116.51
歐多克斯坑 (Eudoxus)	18.13	825.65	阿爾扎切爾坑 (Arzachel)	29.17	1547.06
提莫恰里斯坑 (Timocharis)	10.90	298.00	阿基米德坑 (Archimedes)	41.87	2493.18
阿里斯基爾坑 (Aristillus)	15.16	481.07	歐朗塔斯坑 (Orontius)	23.79	2633.24
厄拉多塞內斯坑 (Eratosthenes)	13.67	738.79	(Pictet)	20.25	569.14
第谷坑 (Tycho)	17.90	1180.71	(Bettinus)	20.95	605.93
(Philolaus)	20.01	1229.90	克卜勒坑 (Kepler)	11.54	263.12
阿諾薩戈臘斯坑 (Anaxagoras)	11.54	714.82	倫霍耳德坑 (Reinhold)	15.15	458.96
赫協爾坑 (Herschel)	9.32	322.97	蘭斯柏坑 (Lansberg)	11.76	345.54
米勒坑 (Miller)	16.24	824.99	布利奧杜坑 (Bullialdus)	17.36	779.78
(Epigenes)	29.55	1474.94	席奈爾坑 (Scheiner)	21.74	1468.85
莫斯汀坑 (Mösting)	8.10	173.03	康龐努斯坑 (Campanus)	20.53	710.08
(Fontenelle)	22.23	673.32	(Bianchini)	12.89	294.83
奧多利卡斯坑 (Autolycus)	12.06	395.21	(Mairan)	10.78	324.39
布蘭卡納斯坑 (Blancanus)	10.51	2169.57	(Delisle)	9.65	172.93
阿里辛西斯坑 (Aliacensis)	20.40	1351.33	(Euler)	11.30	212.59
沃納坑 (Werner)	15.17	551.66	法布里夏斯坑 (Fabricius)	26.16	1734.17
馬尼呂斯坑 (Manilius)	12.31	376.38	梅提斯坑 (Metius)	28.34	1735.38
阿格里巴坑 (Agrippa)	13.52	415.77	散特貝克坑 (Santbech)	14.76	360.08

果丹坑 (Godin)	12.18	225.49	古騰堡坑 (Gutenberg)	33.42	1342.30
(Timaeus)	12.91	354.60	馬克羅布坑 (Macrobius)	17.77	727.24
莫雷特坑 (Moretus)	20.53	2105.40	富蘭克林坑 (Franklin)	20.62	884.50
(Theaetetus)	8.61	163.71	(Scoresby)	24.52	954.12
(Abulfeda)	20.29	431.69	(Democritus)	17.48	472.26
(Playfair)	17.59	541.76	(Magelhaens)	19.05	497.47
(Apianus)	31.52	838.11	(Neander)	14.35	110.95
(Licetus)	17.86	1105.66	(Vlacq)	25.41	1624.64
斯內拉斯坑 (Snellius)	14.79	866.90			

(一) 將上表整理出的寬深比及面深比依相同的方法將之繪製在月表對應坑洞位置上。(如圖 23、24)

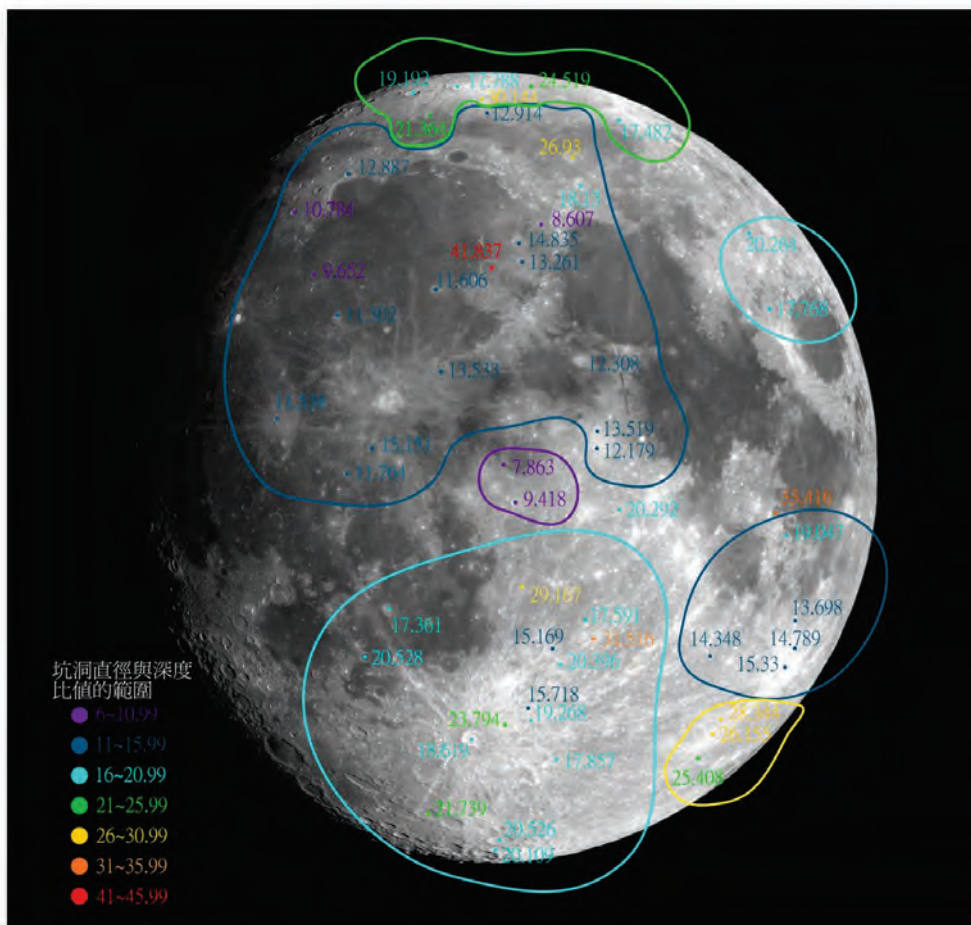
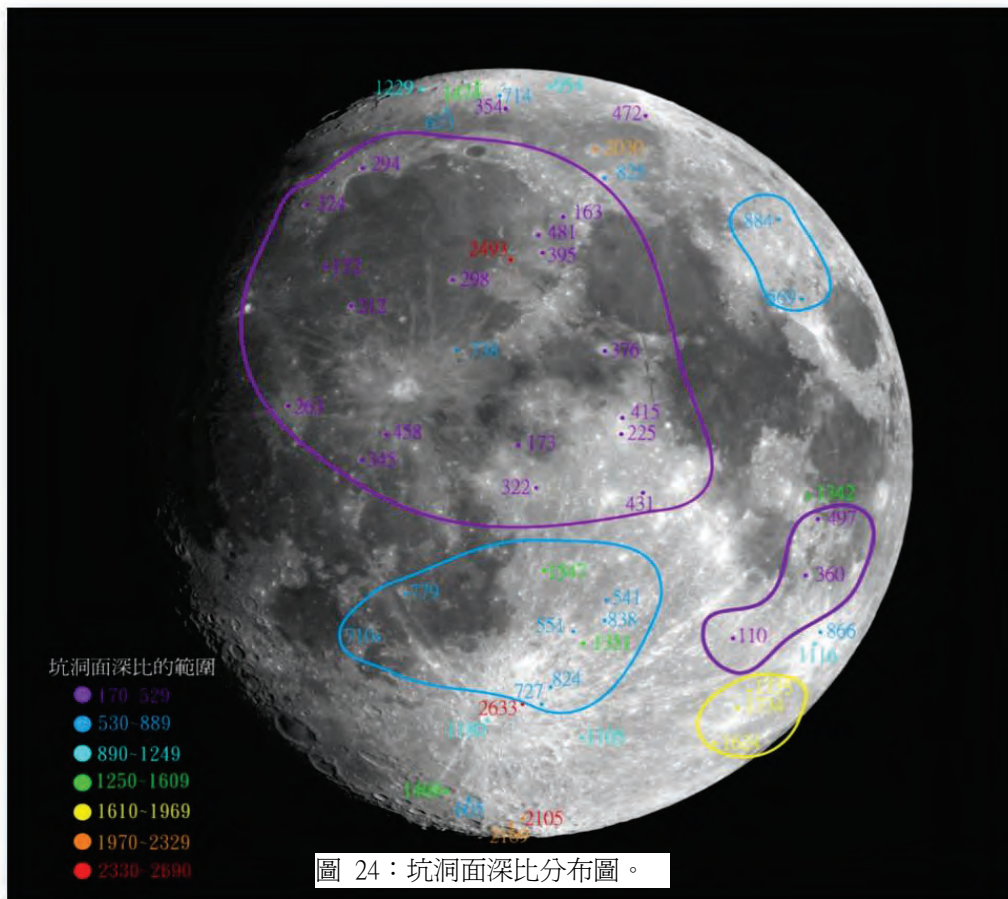


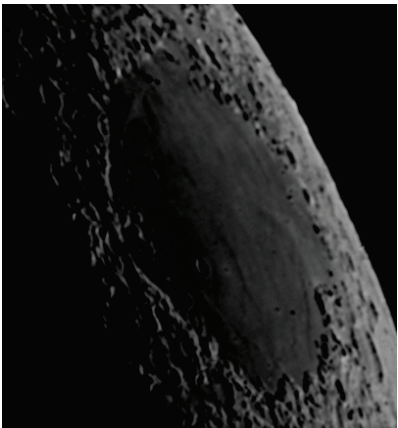

圖 23：坑洞寬深比分布圖



陸、討論

一、網路攝影機與單眼相機拍攝方法之比較，如下表 3 所示：

表 3：攝影方式的各項特性比較

拍攝器材	網路攝影機	單眼相機
價格	約 1000~3000 元	數萬元
拍攝頻率	可達每秒 30 張	每秒 3~5 張
解析度	640x480	一千萬畫素以上
實拍影像		

優點	1.每秒拍攝張數較多 2.價格較親民 3.可利用軟體篩選出品質較佳的影像進行疊合，利於研究分析。	1.單張解析度較高 2.一次可拍攝較大面積的月表
缺點	處理後的照片只是一部份的月表，要多次的拍攝、處理，才能做成完整的照片。	1.價格較高昂 2.難以克服大氣擾動的影響

二、研究月表地形必須自行拍攝高解析照片的原因：

雖然網路上不乏許多超清晰的高解析度月表影像，甚至環月探測器的影像都能自由瀏覽，但這些影像往往都缺少了研究所需要的條件：拍攝當時的日期與時間！在我們研究的月表坑洞地形中，「寬度」與「面積」屬於平面的範圍，不需陽光照射角度資訊，只要在 Google 地球的月球上即可測量得到數據。唯獨「深度」是屬於立體的範圍，無法從任何影像中直接量測，必須由陽光照射的角度與陰影的長度去換算，而光影的角度則取決於拍攝「當時」的日月相對位置以及坑洞在月表上的位置，因此影像的「時間資訊」是研究月表地形不可或缺的一環！我們利用自製的方法，只要天氣條件許可，即能對月表上的許多坑洞進行拍攝，以得到最精確的拍攝時間資訊與高解析度的月表影像，在研究的正確性與誤差控制方面更能掌握。

三、坑洞深度計算的誤差統計

- (一) 連續數日拍攝月表的結果，發現有些坑洞會同時出現在不同日期影像中的斜射區，陰影明顯可見之外，還可用不同的陽光照射角度來驗證計算出之坑洞深度是否相近。
- (二) 我們將月表 55 個坑洞，含多日重複拍攝的坑洞共計 75 張影像的實測結果與實際數據進行誤差比對，證實研究方法與計算數據之可信度，誤差統計表則如附錄一所示。

$$\text{註：誤差率} = \frac{\text{實測值} - \text{實際值}}{\text{實際值}} \times 100\%$$

- (三) 誤差分析結果：實測深度誤差值範圍：-19.1%~9.6%，誤差總平均為 5.6%

註：總平均誤差的定義為每個坑洞平均誤差取絕對值後加總，再除以坑洞總數。

四、討論月表坑洞實測數據誤差來源：

- (一) 在進行月表坑洞深度誤差值分析後，發現誤差多為負值（亦即實測深度小於實際深度），判斷其原因為坑洞底部並非完全平坦（中央受隕石衝擊力量較大），而有略為下凹的情形，因此坑洞中央處的地勢會較坑洞邊緣為低，而實測深度所計算出的數據約為坑洞邊緣環形山的高度，故會使得實測深度之誤差多為負值。（詳見下圖說明）

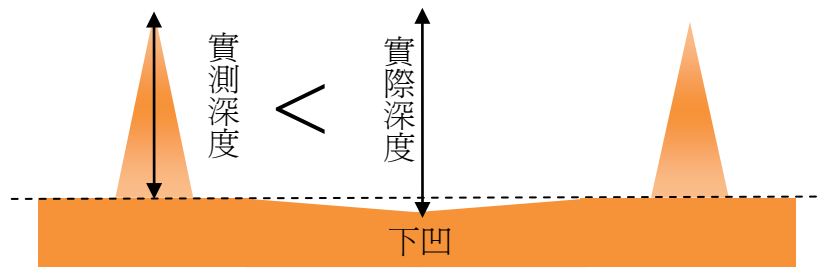


圖 25：坑洞深度誤差多為負值的原因示意圖

- (二) 拍攝時大氣擾動太過嚴重，導致坑洞影像扭曲變形而影響測量與計算結果。
- (三) 在將影片疊合處理為照片時未篩選出最清晰影像，造成 Registax 製作出的影像品質下降，導致測量時發生誤判。
- (四) 有些坑洞本身邊界清晰度不足，或無明顯的邊界，導致測量坑洞寬度時發生誤判。

五、坑洞分布的特性分析：

(一) 坑洞深度之分布情形（如圖 20）：

觀察月表坑洞深度的位置分布，可約略歸納為下列幾點特性：

1. 月表坑洞深度有由北向南遞增之趨勢。
2. 北極點附近的坑洞深度較小，約略在 2.1~2.3 公里之間。
3. 中心區域坑洞深度居中，約略在 2.9~3.3 公里之間。
4. 南端至南極點一帶的坑洞深度最深，約略在 4~4.9 公里左右。

(二) 坑洞寬度之分布情形（如圖 21）：

觀察月表坑洞寬度的位置分布，可約略歸納為下列幾點特性：

1. 月表坑洞寬度有由北向南遞增之趨勢。
2. 北極點附近的坑洞寬度較小，約略在 37~38 公里之間。
3. 中部區域坑洞寬度居中，約略在 39~51 公里之間。
4. 第谷坑東北部區域（東南半球）坑洞寬度較大，約略在 61~69 公里之間。
5. 第谷坑東邊區域（接近南極）坑洞寬度最大，約略在 72~83 公里之間。

(三) 坑洞面積之分布情形（如圖 22）：

觀察月表坑洞面積的位置分布，可約略歸納為下列幾點特性：

1. 月表坑洞面積有由北向南遞增之趨勢。
2. 中北部區域的坑洞面積較小，約略在 1800 平方公里以下。
3. 北極點一帶坑洞面積較中北部地區略大，約略在 2000 平方公里上下。
4. 南半球一帶坑洞面積較大，約略在 2000~4000 平方公里之間。

(三) 觀察坑洞之深度、寬度、面積分布情形，發現數據皆由北向南遞增，可見此三數據分布特性與坑洞撞擊之「地理位置」密切相關，推測可能為以下原因：

1. 背離地球之月球半球面（以下簡稱月球背面）為月表之主要受撞擊面，其隕石行進所受的引力為月球引力與地球引力之同方向合力，故此處出現之坑洞普遍深度、寬度與面積都較大。
2. 面向地球之月球半球面（以下簡稱月球正面）為月表之次要受撞擊面，其隕石行進所受的引力除月球拉引之外，還被地球引力反向牽制，故此處出現之坑洞普遍深度、寬度與面積都較小（如圖 26）。

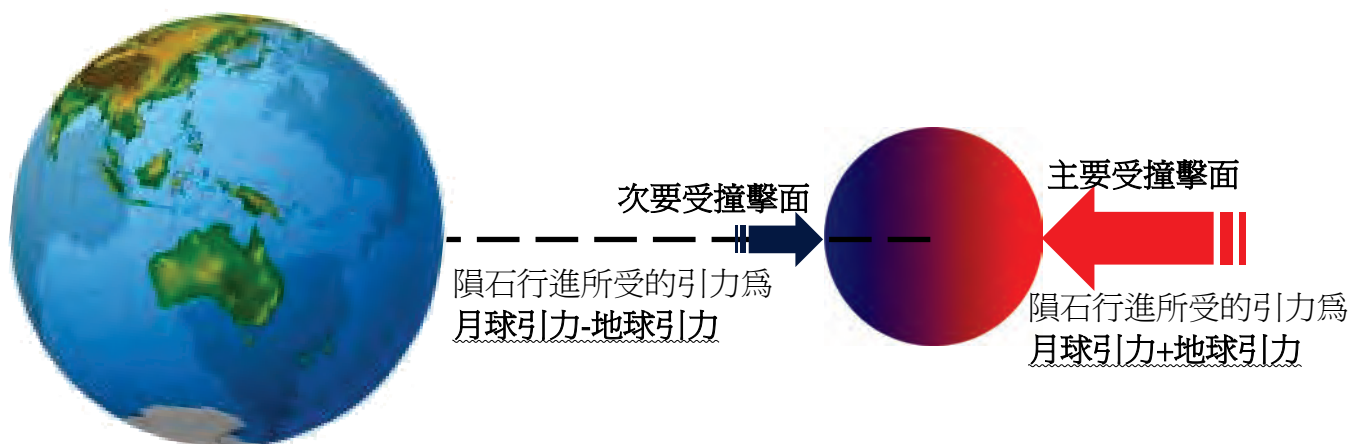


圖 26：隕石撞月球所受到的引力示意圖。

3. 深度、寬度、面積由北向南遞增的原因推測

從上述特性推測坑洞深度、寬度與面積皆向南極遞增之原因，可能是因為月球在許久之前面向地球之半球面與今日情形有著顯著的差異，推測月球本體可能曾沿本初子午線方向由南向北偏轉（以下稱此現象為異常偏轉），使得原本月表主要受撞擊面的大型隕石坑從月球背面經過南極繞至面向地球這一面（詳見下圖 27）。

我們一度想驗證此想法的正確性，但找遍許多文獻卻未發現對此現象（坑洞尺寸向南遞增）的相關解釋。有文獻提及關於月球的「緯度天秤動」，但其偏移角度甚小（約 $\pm 6^{\circ}41'$ ），無法解釋坑洞尺寸向南遞增的現象，故排除此一原因。

關於月球本體疑似異常偏轉的其他重點如下：

- (1) 月球本體異常偏轉之幅度從坑洞的分布情形估計約在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之間。
- (2) 造成月球本體異常偏轉的原因分析：
 - A. 月球曾受超大型隕石或小行星劇烈撞擊所致。
 - B. 月球本體的質量分布有顯著的南北落差，導致南北半球所受之地球引力不平均，長時間作用下出現偏轉情形。
- (3) 在月球發生偏轉事件的前後，月軸相對於白道面並未產生大量歪斜，因為月球受到地球強大引力鎖定，故月球本體即使發生偏轉，也不易影響月軸與白道面的相對關係（月軸未隨月球本體偏轉）。

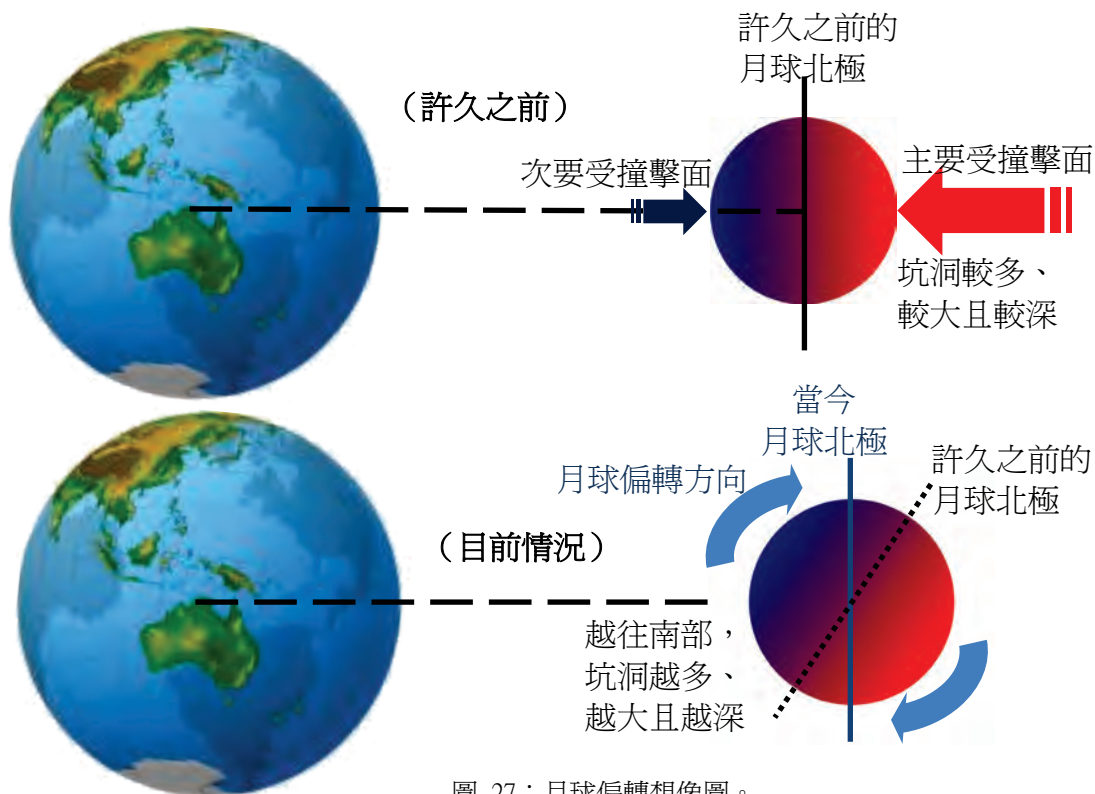


圖 27：月球偏轉想像圖。

(五) 寬深比之分布情形（如圖 23）：

寬深比數據所呈現的是該坑洞的形狀，如寬深比越大，表示該坑洞越接近「盤狀」；若寬深比越小，則該坑洞越接近「碗狀」。歸納月表之寬深比分布情形如下：

1. 寬深比數據之分布情形與月海、月陸之分布情形有一致性：月海比值較小、月陸比值較大。
2. 月海出現之坑洞寬深比約在 8~15 之間。月海多為玄武岩成分，玄武岩的礦物平均硬度接近 7，推測撞擊在月海上所造成之坑洞寬度較小，故較接近碗狀。
3. 南部月陸出現之坑洞寬深比約在 17~23 之間。月陸大部分為斜長石組成，硬度為 6，較玄武岩略低，推測因此撞擊留下的坑洞寬度較大而接近盤狀。

(六) 面深比之分布情形（如圖 24）：

面深比的分布情形與寬深比雷同，歸納月表之面深比分布情形如下：

1. 面深比數據之分布情形與月海、月陸之分布情形有一致性：月海比值較小、月陸比值較大。
2. 中北部區域的月海面深比較小，約略在 200~500 之間。
3. 南部區域的月陸面深比較大，約略在 500~700 之間。

※觀察坑洞之寬深比與面深比分布情形，發現數據皆與月海、月陸的分布有一致性，可見「坑洞形狀」的分布與隕石撞擊地點之「地質特性」相關。

六、討論同一區域內，特定坑洞之地形較其他坑洞差異甚大（特例）之原因：

- (一) 出現時間較久的坑洞，若受到月表熔岩流覆蓋，使得此類坑洞之深度變淺、寬深比與面深比增加（趨向平坦）。
- (二) 受其他隕石在鄰近區域撞擊影響，被撞擊產生的飛濺物覆蓋表面，使得此類坑洞之深度變淺、寬深比與面深比增加（趨向平坦）。
- (三) 月表風化作用（溫度因素）雖微弱但長時間作用對坑洞地形也會有所影響，使得此類坑洞之寬度增加、面積增加、深度變淺、寬深比與面深比增加（趨向平坦）。
- (四) 形成該坑洞的隕石撞擊之角度與周圍的坑洞有所不同，撞擊入射角度較大之隕石，其造成的坑洞寬度與面積較大，深度較淺，寬深比與面深比較大。

七、研究中所遭遇的困難

- (一) 拍攝月表照片需要天氣的配合：往往預計要拍攝月球的時候，天空滿布雲層，使得拍攝計畫無法進行。
- (二) 拍攝月表照片需要時間的配合：不同日期月表被陽光直射的區域都不同，若要拍攝利於計算陰影長度的坑洞，不能使該坑洞被直射（沒有陰影），也不能太過斜射（陰影蓋過坑洞），更不能沒有照到陽光。因此最適合計算的坑洞是位於月表受光面與背光面交界再略偏受光面的地帶（略稱斜射帶，詳見右圖 28），而每天斜射帶的位置都在改變，因此只要預計拍攝日的天氣條件不利拍攝，就得再等一個月，才能使目標坑洞再度重返斜射帶。
- (三) 起初單純地想從數據中討論坑洞寬度與深度的關係，以為越大的坑洞就會越深，而且說不定還有線性關係，沒想到散布圖一畫出來，製作迴歸線的結果不如預期， R^2 只有 0.2。還好我們沒有因此放棄，繼續討論這些數據的比值以及數據在月表上分布的特性，才漸漸找到了規律，也重新點燃了研究的熱情。

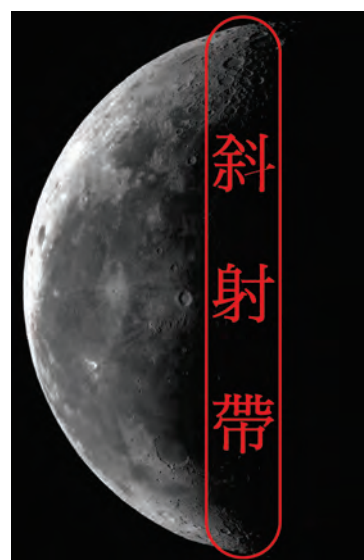


圖 28：月表斜射帶的坑洞最適合計算陰影長度

八、未來將進一步研究的項目：

- (一) 探討月球本體疑似異常偏轉的原因，並模擬、驗證。
- (二) 研究坑洞年齡對地形各項數據的影響，並求出關係式。
- (三) 探討坑洞出現數量與時間的關係，並推算隕石撞擊地球的機率。
- (四) 從坑洞的實際深度與實測深度推算出坑洞底部的傾斜程度（斜率）。

$$\text{坑洞底部斜率} = \frac{|\text{實際深度} - \text{實測深度}|}{\text{坑洞半徑}}$$

柒、結論

一、利用自製方法對月表坑洞的深度、寬度、面積進行測量：

- (一) 利用網路攝影機進行月表拍攝之方式較單眼相機單張拍攝更清晰、更利於研究。
- (二) 使用自行拍攝月表照片搭配星圖軟體進行三角函數運算求出坑洞深度的方法確實可行，所得之實測值與實際值相近，誤差總平均為 5.6%。

二、探索月球坑洞各項數據的分布規律與特性：

- (一) 月表坑洞的寬度與深度、面積與深度大致有「寬度越大，深度越深」、「面積越大，深度越深」的趨勢，但趨勢不甚顯著。
- (二) 坑洞的深度、寬度、面積皆由北向南遞增，此分布與坑洞出現之地理位置相關。
- (三) 發現月球本體疑似異常偏轉之現象。
- (四) 月表坑洞的寬深比與面深比分布情形皆為「月海比值 < 月陸比值」，此分布與隕石撞擊地點之地質特性相關。

捌、參考資料及其他

- 一、陳培堃（民 87）。月面觀測指南。台北市：百通
- 二、佩倫特（民 96）。世界岩石與礦物圖鑑。貓頭鷹
- 三、The-MOON WIKI。（無日期）。民國 100 年 1 月 25 日，取自：
<http://the-moon.wikispaces.com/Introduction>
- 四、月球。（無日期）。維基百科。民國 100 年 3 月 16 日，取自：
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%88%E7%90%83>
- 五、天秤動。（無日期）。維基百科。民國 100 年 2 月 16 日，取自：
<http://zh.wikipedia.org/zh-hk/%E5%A4%A9%E7%A7%A4%E5%8B%95>
- 六、月表地形名稱圖（無日期）。臺北市立天文教育館。民國 99 年 12 月 17 日，取自：
<http://tcgwww.taipei.gov.tw/lp.asp?ctNode=12652&CtUnit=7100&BaseDSD=7&mp=104051>
- 七、月亮的表面。（無日期）。月姑娘的秘密。民國 100 年 1 月 14 日
http://msa.yes.tpc.edu.tw/~organization/online/online_study/moon/moon_3.htm

【評語】 030501

優點：長期進行月表拍攝，蒐集月表照片，研究精神佳。

缺點：缺乏原始觀測紀錄

建議：宜保留原始觀測記錄，加強觀測操作與過程之記錄。

注意誤差分析。