

**109-110 年度「七星山張裂帶爆裂口
之研究」**

**The Study of Explosive Craters
along the Chihsingshan Rifting
Valleys**

陽明山國家公園管理處委託研究報告

中華民國 110 年 12 月

(本報告內容及建議純係研究小組觀點，不應引申為本機關之意見)

109-110 年度「七星山張裂帶爆裂 口之研究」

The Study of Explosive Craters along the Chihshingshan Rifting Valleys

受委託單位：中華民國地質學會

研究主持人：宋聖榮

研究助理：楊雅閔、唐懷昱、邱玉嵐

研究期程：中華民國 109 年 3 月至 110 年 12 月

研究經費：新臺幣 350 萬元

陽明山國家公園管理處委託研究報告

中華民國 110 年 12 月

(本報告內容及建議純係研究小組觀點，不應引申為本機關之意見)

目次

圖目錄.....	5
表目錄.....	15
計畫摘要.....	16
ABSTRACT.....	18
第一章、緒 論.....	20
一、前言.....	20
二、研究動機與目的.....	26
三、計畫範圍.....	27
四、預期成果.....	27
第二章、地質背景與前人研究.....	28
一、大地構造與區域地質.....	28
二、火山地質.....	30
第三章、研究方法.....	35
一、爆裂口地形分析.....	36
二、爆裂口岩石與沉積物.....	36
(一)、野外調查.....	36
(二)、鑽井取芯.....	36
(三)、岩芯分析.....	37
(四)、C-14 定年研究.....	37
三、資料彙整.....	37
第四章、結果與討論.....	38
一、火山爆裂口地形分析.....	38
(一)、資料獲取原理.....	39
1、測量：.....	39
2、原始資料前處理：.....	40
3、製作高精度DEM與DSM：.....	40
4、最後產品輸出.....	41
(二)、資料處理方法.....	42
(三)、DEM判釋結果與野外調查.....	44
1、6m DEM 結果.....	44
2、1m DEM 與野外調查結果.....	46
(四)、碎形幾何理論分析.....	56

1、碎形幾何理論背景介紹.....	56
2、碎形組成要素與特性.....	57
3、碎形理論應用方法.....	61
4、碎形幾何利用於大屯火山體的研究.....	75
(五)、碎形幾何利用於火山爆裂口的研究.....	87
1、碎形幾何結果.....	87
(六)、小結.....	96
二、岩芯鑽取與分析.....	97
(一)、鑽井場址.....	97
(二)、七星山火山體東側.....	97
1、夢幻湖鑽井.....	99
2、鑽井成果.....	103
3、岩心整備與採樣.....	116
4、岩芯描述.....	123
5、岩芯磁感率分析結果.....	146
6、岩芯火山岩岩象學分析.....	153
7、岩芯沉積物分析.....	163
8、岩芯定年結果.....	168
(三)、七星山火山體西側.....	177
1、鑽井位置與分布.....	177
2、鑽井成果.....	178
3、岩芯描述.....	187
4、岩芯沉積物分析.....	223
5、岩芯定年結果.....	305
(四)、爆裂口成因.....	312
(五)、小結.....	320
三、世界火山蒸氣噴發形成爆裂口的案例.....	321
(一) 伊尼奧火山(INYO CRATERS) (LONG VALLEY CALDERA, 美國加州).....	321
(二) 塔拉威拉裂谷(TARAWERA RIFT) (陶波火山帶, 紐西蘭).....	324
(三) 御嶽火山(MT. ONTAKE)、日本.....	327
(四) INYO CRATERS、TARAWERA RIFT、MT. ONTAKE 與七星山亞群爆裂口比較.....	334
(五) 小結.....	337
第五章、結論與建議.....	338
一、結論.....	338
(一) 確立七星山張裂帶構造之分布趨勢, 其爆裂口保留完整外形, 顯示形成的年代相當年輕:.....	338
(二) 建立大屯火山群之噴發順序:.....	338
(三) 碎形維度分析可有效地獲得過去火山活動形成之地形特徵:.....	339

(四) 了解爆裂口可能形成的年代與特性:.....	339
(五) 七星山蒸氣型火山噴發之初探與國際案例之比較:.....	340
二、建議.....	341
(一) 短期可行建議.....	341
(二) 中、長期可行建議.....	341
參考文獻.....	344
附錄一：期初審查意見回覆表.....	353
甘梯圖 (GANTT CHART).....	355
附錄二、第一次期中審查意見回覆表.....	356
附錄三、第二次期中審查意見回覆表.....	360
附錄四、第三次期中報告修正意見對照表.....	364
附件五、期末報告修正意見對照表.....	377
附件六、七星山張裂帶爆裂口之研究—通俗文章.....	387

圖目錄

圖 1-1、火山噴發作用與產物模式圖(修改自 USGS)。	21
圖 1-2、臺灣北部地質與火山岩區分布圖(改繪自何春蓀, 1986)。	25
圖 1-3、地熱活動型火山的噴發週期和特徵(KAGIYAMA & MORITA, 2008).....	25
圖 1-4、七星山張裂帶 LiDAR 影像。	27
圖 2-1、北臺灣火山形成示意圖。	29
圖 2-2、七星山東、西兩側之東北-西南走向張裂帶位置分布圖。	33
圖 3-1、研究方法與流程圖.....	35
圖 4-1、七星山地區火山地形與爆裂口位置之 6M DEM 地形高程疊合圖。	38
圖 4-2、七星山地區張裂帶與爆裂口位置之 1M DEM 地形陰影圖。	39
圖 4-3、空載光達作業示意圖(RENSLOW, 2001)。	40
圖 4-4、LiDAR 資料處理作業流程(詹瑜璋等人, 2005)。	41
圖 4-5、兩種數值模型比較圖(詹瑜璋等人, 2005)。	42
圖 4-6、地形計測之三維分析方法示意圖(LiDAR 影像為中央地調所提供)。	43
圖 4-7、地表形態之判釋與圈繪步驟流程圖。	43
圖 4-8、七星山地區火山地形與爆裂口位置之 6M DEM 地形高程疊合圖。	45
圖 4-9、七星山地區張裂帶與爆裂口位置之 1M DEM 地形陰影圖。	47
圖 4-10、小油坑張裂帶及西側張裂帶北段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。	49
圖 4-11、西側張裂帶南段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。	51
圖 4-12、東側張裂帶北段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。	53

圖 4-13、東側張裂帶南段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。	55
圖 4-14、兩大碎形幾何圖形代表。	58
圖 4-15、碎形幾何與歐氏幾何區分圖(改繪自 BURROUGH, 1981)。	59
圖 4-16、寇赫雪花(KOCH, 1904)。	60
圖 4-17、定規法量測碎形維度示意圖(葉寶安, 1994)。	64
圖 4-18、盒子計數法切割方法示意圖—以英國海岸線為例。	65
圖 4-19、高程與二維自我相似維度之關係圖(CHENG ET AL., 1999)。	66
圖 4-20、坡度等值線。紫線、藍線、青線分別代表坡度 30、40、45 度。	67
圖 4-21、盒子計數法之步驟流程圖。	67
圖 4-22、三角柱頂面積法示意圖(改繪自 CLARKE, 1986; 黃怡靜, 2007)。	68
圖 4-23、三角柱頂面積法之步驟流程圖。	71
圖 4-24、不同量測尺度大小之矩陣示意圖。背景資料為 17 X 17 的標準矩陣。	72
圖 4-25、變異曲線法之二維碎形維度全部取點方式示意圖(葉寶安, 1994)。	73
圖 4-26、變異曲線法之步驟流程圖。	74
圖 4-27、三角柱頂面積法計算結果。	77
圖 4-28、各產狀之分布與對應之碎形維度值	78
圖 4-29、坡向之分布與其碎形維度值。	78
圖 4-30、構造分區與對應碎形維度值。	79
圖 4-31、熔岩流之分布圖。	80
圖 4-32、磺嘴山剖面。	82
圖 4-33、七星山亞群與竹子山亞群之熔岩流分布與碎形維度。	84
圖 4-34、大屯山亞群與湊子-丁火朽山之熔岩流分布與碎形維度。	85
圖 4-35、屯火山各亞群之分期與噴發順序。	86
圖 4-36、西側張裂帶爆裂口三種坡度之碎形維度值比較圖。	88
圖 4-37、東側張裂帶爆裂口三種坡度之碎形維度值比較圖。	89
圖 4-38、整體平均碎形維度比較圖。	90
圖 4-39、TPSA 法之 2M 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。	92
圖 4-40、TPSA 法之 1M 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。	93
圖 4-41、變異曲線法之 2M 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。	95
圖 4-42、本研究計畫規劃擬鑽探取芯的位置(星號為新的 S-1 鑽井場址)。	97
圖 4-43、東側鑽孔位置圖(底圖為 GOOGLE 衛星影像圖)。	99
圖 4-44、1990 年度夢幻湖鑽井位置分布圖(劉聰桂, 1990)。	100
圖 4-45、1990 年度夢幻湖鑽井岩芯岩性柱狀圖(劉聰桂, 1990)。	101
圖 4-46、S-1 鑽井場址照片圖。	104
圖 4-47、S-1 鑽井 0-4 公尺岩芯	104
圖 4-48、S-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。	105
圖 4-49、S-1 鑽井 9-12 公尺岩芯。	105
圖 4-50、S-1 鑽井 13-16 公尺岩芯。	105

圖 4-51、S-1 鑽井 17-20 公尺岩芯。	106
圖 4-52、S-2 鑽井場址所搭建之吊架台。	106
圖 4-53、S-2 鑽井場址內的鑽井位置(從上方拍照)。	107
圖 4-54、S-2 鑽井場址內的鑽井位置。	107
圖 4-55、S-2-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。	108
圖 4-56、S-2-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。	108
圖 4-57、S-2-1 鑽井 9-10 公尺岩芯。	108
圖 4-58、S-2-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。	109
圖 4-59、S-2-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。	109
圖 4-60、S-2-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。	109
圖 4-61、S-3 鑽井場址內的鑽井位置。	110
圖 4-62、S-3-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。	110
圖 4-63、S-3-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。	111
圖 4-64、S-3-1 鑽井 9-12 公尺岩芯。	111
圖 4-65、S-3-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。	111
圖 4-66、S-3-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。	112
圖 4-67、S-3-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。	112
圖 4-68、S-4-1 鑽井場址。	113
圖 4-69、S-4-2 鑽井場址。	113
圖 4-70、S-4-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。	114
圖 4-71、S-4-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。	114
圖 4-72、S-4-1 鑽井 9-10 公尺岩芯。	114
圖 4-73、S-4-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。	115
圖 4-74、S-4-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。	115
圖 4-75、S-4-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。	115
圖 4-76、岩芯整備與取樣流程圖。	116
圖 4-77、退除岩芯的外層保鮮膜包覆。	117
圖 4-78、海洋科學研究中心地質實驗室的 MSCL 研究倉。	118
圖 4-79、多感測岩芯掃描分析儀(MSCL)岩芯分析實景圖。	118
圖 4-80、岩芯剖半操作示意圖，照片左側為新的岩芯托片半管。	119
圖 4-81、若遇到膠結程度較好的沉積物，則使用手持線鉅進行岩芯剖半。	120
圖 4-82、封存岩芯拍攝完畢後，立刻使用保鮮膜將其包覆，避免岩芯發生氧化。	121
圖 4-83、工作岩心使用鋼製聶與挖勺進行取樣，取樣後使用鋁箔紙包覆裝入夾鏈袋中密封。	122
圖 4-84、工作岩芯於拍攝以及岩芯描述紀錄之前須使用刮刀清潔岩芯表面，以便後續觀察。	122
圖 4-85、S-1 鑽井岩性柱狀圖。	124
圖 4-86、S-2-1 鑽井岩性柱狀圖。	126

圖 4-87、S-2-2 鑽井岩性柱狀圖。	129
圖 4-88、S-3-1 鑽井岩性柱狀圖。	131
圖 4-89、S-3-2 鑽井岩性柱狀圖。	136
圖 4-90、S-4-1 鑽井岩性柱狀圖。	139
圖 4-91、S-4-2 鑽井岩性柱狀圖。	143
圖 4-92、SITE 2-1 0-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	147
圖 4-93、SITE 2-1 5-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	148
圖 4-94、SITE 2-2 0-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	149
圖 4-95、SITE 3-1 0-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	150
圖 4-96、SITE 3-2 0-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	151
圖 4-97、SITE 3-2 4-6M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。	152
圖 4-98、S-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	154
圖 4-99、S-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	154
圖 4-100、S-2-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	155
圖 4-101、S-2-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	155
圖 4-102、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	156
圖 4-103、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	156
圖 4-104、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	157
圖 4-105、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	157
圖 4-106、S-3-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	158
圖 4-107、S-3-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	158
圖 4-108、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	159
圖 4-109、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	159
圖 4-110、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	160
圖 4-111、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	160
圖 4-112、S-4-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	161
圖 4-113、S-4-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	161
圖 4-114、S-4-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。	162
圖 4-115、S-4-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。	162
圖 4-116、本研究針對泥質沉積物中富含粗砂至細砂的岩屑進行採樣分析。	163
圖 4-117、石英外型於圓度與球度呈現顯著的差異，本照片中石英取樣自 S-3-2 深度	165
圖 4-118、S-3-2 孔位中深度 612CM 所發現的砂岩岩屑。	165
圖 4-119、石英圓度差異明顯，本照片中石英取樣自 S-3-1 深度 394CM。	166
圖 4-120、可觀察到石英具有貝殼狀斷口，本照片中石英取樣自 S-3-2 深度 71CM。	166
圖 4-121、百分比含量對比圖(AFTER TERRY AND CHILINGAR, 1955)。	167
圖 4-122、圓度(ROUNDNESS)與球度(SPHERICITY)視覺估計對比圖(KURMBEIN AND SLOSS, 1963)。	167
圖 4-123、S-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	170
圖 4-124、S-2-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	171

圖 4-125、S-2-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	172
圖 4-126、S-3-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	173
圖 4-127、S-3-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	174
圖 4-128、S-4-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	175
圖 4-129、S-4-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	176
圖 4-130、西側鑽孔位置圖。	177
圖 4-131、S-5 鑽井場址照片圖。	178
圖 4-132、S-5-1 0-5 M 岩芯實拍圖。	178
圖 4-133、S-5-1 6-10 M 岩芯實拍圖。	179
圖 4-134、S-5-2 0-5 M 岩芯實拍圖。	179
圖 4-135、S-5-2 6-10 M 岩芯實拍圖。	179
圖 4-136、S-6 鑽井場址照片圖。	180
圖 4-137、S-6-1 0-5 M 岩芯實拍圖。	180
圖 4-138、S-6-1 6-10 M 岩芯實拍圖。	181
圖 4-139、S-6-2 0-5 M 岩芯實拍圖。	181
圖 4-140、S-6-2 0-5 M 岩芯實拍圖。	181
圖 4-141、S-7 鑽井場址照片圖。	182
圖 4-142、S-7-1 0-5 M 岩芯實拍圖。	182
圖 4-143、S-7-1 6-10 M 岩芯實拍圖。	183
圖 4-144、S-7-2 0-5 M 岩芯實拍圖。	183
圖 4-145、S-7-2 6-10 M 岩芯實拍圖。	183
圖 4-146、S-8 鑽井場址照片圖。	184
圖 4-147、S-8-1 0-4M 岩芯實拍圖。	184
圖 4-148、S-8-1 4-8M 岩芯實拍圖。	184
圖 4-149、S-8-2 0-4M 岩芯實拍圖。	185
圖 4-150、S-8-1 8-10M 岩芯實拍圖。	185
圖 4-151、S-8-2 4-8M 岩芯實拍圖。	185
圖 4-152、S-8-2 20-21M 岩芯實拍圖。	186
圖 4-153、S-8-2 16-20M 岩芯實拍圖。	186
圖 4-154、S-8-2 12-16M 岩芯實拍圖。	186
圖 4-155、S-8-2 8-12M 岩芯實拍圖。	186
圖 4-156：↑ SITE5-1 0-10M 岩芯柱狀圖。	188
圖 4-157：→ SITE5-1 0-2M 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 CM。	188
圖 4-158：↑ SITE5-1 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	189
圖 4-159：↑ → SITE5-1 2-6M 細部岩芯柱狀圖。	189
圖 4-160：↑ SITE5-1 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	190
圖 4-161：↑ → SITE5-1 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	190
圖 4-162：↑ SITE5-2 0-10M 岩芯柱狀圖。	192

圖 4-163 :	→SITE5-2 0-2M 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 CM。	192
圖 4-164 :	↑ SITE5-2 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	193
圖 4-165 :	↑ → SITE5-2 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	193
圖 4-166 :	↑ SITE5-2 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	194
圖 4-167 :	↑ → SITE5-2 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	194
圖 4-168 :	↑ SITE6-1 0-10M 岩芯柱狀圖。	196
圖 4-169 :	→SITE6-1 0-2M 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 CM。	196
圖 4-170 :	↑ SITE6-1 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	197
圖 4-171 :	↑ → SITE6-1 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	197
圖 4-172 :	↑ SITE6-1 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	198
圖 4-173 :	↑ → SITE6-1 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	198
圖 4-174 :	SITE6-2 0-10M 岩芯柱狀圖。	199
圖 4-175 :	↑ SITE6-2 0-2M 細部岩芯柱狀圖。	200
圖 4-176 :	↑ →SITE6-2 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	200
圖 4-177 :	↑ SITE6-2 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	201
圖 4-178 :	↑ →SITE6-2 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	201
圖 4-179 :	↑ SITE6-2 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	202
圖 4-180 :	↑ SITE7-1 0-10M 岩芯柱狀圖。	204
圖 4-181 :	→SITE7-1 0-2M 細部岩芯柱狀圖。	204
圖 4-182 :	↑ SITE7-1 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	205
圖 4-183 :	→SITE7-1 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	205
圖 4-184 :	↑ SITE7-1 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	206
圖 4-185 :	→SITE7-1 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	206
圖 4-186 :	↑ SITE7-2 0-10M 岩芯柱狀圖。	208
圖 4-187 :	↑ SITE7-2 0-2M 細部岩芯柱狀圖。	209
圖 4-188 :	↑ →SITE7-2 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	209
圖 4-189 :	↑ SITE7-2 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	210
圖 4-190 :	↑ →SITE7-2 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	210
圖 4-191 :	↑ SITE7-2 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	211
圖 4-192 :	↑ SITE8-1 0-10M 岩芯柱狀圖。	212
圖 4-193 :	↑ SITE8-1 0-2M 細部岩芯柱狀圖。	213
圖 4-194 :	↑ →SITE8-1 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	213
圖 4-195 :	↑ SITE8-1 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	214
圖 4-196 :	↑ SITE8-1 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	214
圖 4-197 :	↑ SITE8-1 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	215
圖 4-198 :	↑ SITE8-2 0-21M 岩芯柱狀圖。	217
圖 4-199 :	↑ →SITE8-2 0-2M 細部岩芯柱狀圖。	217
圖 4-200 :	↑ SITE8-2 2-4M 細部岩芯柱狀圖。	218

圖 4-201 : ↑→SITE8-2 4-6M 細部岩芯柱狀圖。	218
圖 4-203 : ↑→SITE8-2 8-10M 細部岩芯柱狀圖。	219
圖 4-202 : ↑ SITE8-2 6-8M 細部岩芯柱狀圖。	219
圖 4-204 : ↑ SITE8-2 10-12M 細部岩芯柱狀圖。	220
圖 4-205 : ↑→SITE8-2 12-14M 細部岩芯柱狀圖。	220
圖 4-206 : ↑ SITE8-2 14-16M 細部岩芯柱狀圖。	221
圖 4-207 : ↑→SITE8-2 16-18M 細部岩芯柱狀圖。	221
圖 4-208 : ↑ SITE8-2 18-20M 細部岩芯柱狀圖。	222
圖 4-209 : ↑→SITE8-2 20-21M 細部岩芯柱狀圖。	222
圖 4-210 : SITE5-1 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	225
圖 4-211 : SITE5-1 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	226
圖 4-212 : SITE5-1 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	227
圖 4-213 : SITE5-2 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	228
圖 4-214 : SITE5-2 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	229
圖 4-215 : SITE5-2 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	230
圖 4-216 : SITE6-1 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	231
圖 4-217 : SITE6-1 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	232
圖 4-218 : SITE6-1 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	233
圖 4-219 : SITE6-2 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	234
圖 4-220 : SITE6-2 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	235
圖 4-221 : SITE6-2 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	236
圖 4-222 : SITE7-1 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	237
圖 4-223 : SITE7-1 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	238
圖 4-224 : SITE7-1 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	239
圖 4-225 : SITE7-2 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	240
圖 4-226 SITE7-2 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	241
圖 4-227 : SITE7-2 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	242
圖 4-228 : SITE8-1 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	243
圖 4-229 : SITE8-1 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	244
圖 4-230 SITE8-1 8-10M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	245
圖 4-231 : SITE8-2 0-2M & 2-4M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	246
圖 4-232 : SITE8-2 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	247
圖 4-233 : SITE8-2 8-10M & 10-12M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	248
圖 4-234 : SITE8-2 12-14M & 14-16M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	249
圖 4-235 : SITE8-2 16-18M & 18-20M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	250
圖 4-236 : SITE8-2 20-21M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。	251
圖 4-237 : SITE5-1 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	252
圖 4-238 : SITE5-1 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	253

圖 4-239 : SITE5-1 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	254
圖 4-240 : SITE5-2 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	255
圖 4-241 : SITE5-2 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	256
圖 4-242 : SITE5-2 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	257
圖 4-243 : SITE6-1 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	258
圖 4-244 : SITE6-1 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	259
圖 4-245 : SITE6-1 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	260
圖 4-246 : SITE6-2 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	261
圖 4-247 : SITE6-2 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	262
圖 4-248 : SITE6-2 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	263
圖 4-249 : SITE7-1 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	264
圖 4-250 : SITE7-1 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	265
圖 4-251 : SITE7-1 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	266
圖 4-252 : SITE7-2 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	267
圖 4-253 : SITE7-2 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	268
圖 4-254 : SITE7-2 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	269
圖 4-255 : SITE8-1 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	270
圖 4-256 : SITE8-1 4-6M & 6-8M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	271
圖 4-257 : SITE8-1 8-10M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	272
圖 4-258 : SITE8-2 0-2M & 2-4M 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	273
圖 4-259 : SITE8-2 4-6M & 6-8M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	274
圖 4-260 : SITE8-2 8-10M & 10-12M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	275
圖 4-261 : SITE8-2 12-14M & 14-16M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	276
圖 4-262 : SITE8-2 16-18M & 18-20M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	277
圖 4-263 : SITE8-2 20-21M 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。	278
圖 4-264 : SITE5-1 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	279
圖 4-265 : SITE5-1 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	280
圖 4-266 : SITE5-1 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	281
圖 4-267 : SITE5-2 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	282
圖 4-268 : SITE5-2 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	283
圖 4-269 : SITE5-2 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	284
圖 4-270 : SITE6-1 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	285
圖 4-271 : SITE6-1 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	286
圖 4-272 : SITE6-1 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	287
圖 4-273 : SITE6-2 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	288
圖 4-274 : SITE6-2 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	289
圖 4-275 : SITE6-2 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	290
圖 4-276 : SITE7-1 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	291

圖 4-277 : SITE7-1 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	292
圖 4-278 : SITE7-1 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	293
圖 4-279 : SITE7-2 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	294
圖 4-280 : SITE7-2 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	295
圖 4-281 : SITE7-2 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	296
圖 4-282 : SITE8-1 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	297
圖 4-283 : SITE8-1 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	298
圖 4-284 : SITE8-1 8-10M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	299
圖 4-285 : SITE8-2 0-2M & 2-4M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	300
圖 4-286 : SITE8-2 4-6M & 6-8M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	301
圖 4-287 : SITE8-2 8-10M & 10-12M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	302
圖 4-288 : SITE8-2 12-14M & 14-16M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	303
圖 4-289 : SITE8-2 16-18M & 18-20M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	304
圖 4-290 : SITE8-2 20-21M 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(G/CC)。	305
圖 4-291、S-5 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	307
圖 4-292、S-6 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	308
圖 4-293、S-7 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	309
圖 4-294、S-8 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。	310
圖 4-295、堆積於硫磺谷內的蒸氣噴發產物。	313
圖 4-296、2014 年日本御嶽火山發生蒸氣型爆發事件的模式圖(SANO ET AL., 2015)。	314
圖 4-297、第一類型的蒸氣噴發模式(STIX AND DE MOOR, 2018)。	316
圖 4-298、第二類型的蒸氣噴發模式(STIX AND DE MOOR, 2018)。	317
圖 4-299、七星山東、西兩側張裂帶的分布和方位。	319
圖 4-300、七星山火山亞群可能的岩漿噴發和蒸氣噴發年代分布。	320
圖 4-301、SAN ANDREAS 斷層系統的板塊演化(DICKINSON, 1981)。	322
圖 4-302、流紋岩爆裂口分布與形成年代(RFZ 是火山陷落口邊界)。	323
圖 4-303、MONO-INYO 火山鏈近五千年的噴發事件。	324
圖 4-304、陶波火山帶火山陷落口、噴發產物、斷層、地熱場等分布。	325
圖 4-305、TARAWERA RIFT 爆裂口與玄武岩岩脈(黑色)分布圖(NAIRN & COLE, 1981)。	326
圖 4-306、御嶽火山的位置圖。	327
圖 4-307、日本週遭的地體構造。	328
圖 4-308、1979 年御嶽火山所形成的爆裂口(A-G)和火山灰分布等厚圖(數字部分)(KUSAKABE ET AL., 1982)。	329
圖 4-309、御嶽火山 2014 年噴發的爆裂口和火山碎屑流堆積物的分布圖(OIKAWA ET AL., 2016)。	331
圖 4-310、御嶽火山 2014 年的火山碎屑流噴發(OIKAWA ET AL., 2016)。	332
圖 4-311、御嶽火山 2014 年的火山碎屑流堆積物分布圖(OIKAWA ET AL., 2016)。	332
圖 4-312、御嶽火山 2014 年的噴發演變過程(OIKAWA ET AL., 2016)。	333

圖 4-313、御嶽火山 2014 年蒸氣噴發的噴發機制模式(OGAWA ET AL., 2016)。	334
圖 4-314、伊尼奧火山口(INYO CRATERS)。	335
圖 4-315 塔拉威拉裂谷(TARAWERA RIFT)。	335
圖 4-316、MT. ONTAKE。	336



表目錄

表 1-1、IAVCEI 選定的 16 座全世紀末十年火山	21
表 2-1、大屯火山群之亞群劃分與各亞群所包含之山峰(引自陳培源，2006)	31
表 4-1、七星山地區爆裂口之 6M DEM 地表形態性質表	46
表 4-2、小油坑爆裂口及其張裂帶之 1M DEM 地表形態性質表。	48
表 4-3、七星山西側張裂帶及爆裂口之 1M DEM 地表形態性質表。	56
表 4-4、七星山東側張裂帶及爆裂口之 1M DEM 地表形態性質表。	56
表 4-5、自我相似圖形的碎形維度(廖思善，2006)。	61
表 4-6、臺灣本島碎形維度與各項地形參數之相關性(黃怡靜，2007)。	70
表 4-7、本研究與歷來磺嘴火山噴發層序比較	82
表 4-8、本研究與前人對大屯火山之分期與噴發順序比較	86
表 4-9、西側張裂帶爆裂口對照表。	88
表 4-10、東側張裂帶爆裂口名稱對照表	89
表 4-11、鑽井名稱與深度	98
表 4-12、夢幻湖 9 號鑽井岩芯八個碳物質樣本的碳十四年代測定結果(劉聰桂，1990)。	103
表 4-13、MSCL 磁感率送測岩芯深度表。	146
表 4-14、岩芯中安山岩塊岩象學的分析結果。	153
表 4-15、採樣位置與深度表。	164
表 4-16、東側 12 個碳質樣 C-14 的定年結果。	169
表 4-17、鑽井名稱與深度(*:預計鑽探深度)	177
表 4-18、MSCL 分析深度表	223
表 4-19、西側 11 個碳質樣 C-14 的定年結果。	306
表 4-20、爆裂口鑽井結果	311
表 4-21、大屯火山群最年輕蒸氣噴發事件的可能定年結果	318
表 4-22、INYO CRATERS、TARAWERA RIFT、MT. ONTAKE 與七星山亞群爆裂口的比較	336

計畫摘要

整合大屯火山群過去的地質、地球物理和地球化學的研究成果，以及依據國際火山學會對活火山經驗和現象的定義：一萬年內仍有火山活動和地下存在岩漿庫，大屯火山群已被認定為一座活火山，故科技部在大屯火山群設立『大屯火山觀測所(TVO)』，以及內政部立法訂定『火山災害防救業務計畫』，都是為了因應大屯火山群未來可能的噴發活動和伴隨所產生的災害，尤其類似 2014 年日本御嶽山的蒸氣噴發所造成無預警的人命傷亡。

從 LiDAR 地形判釋七星山火山體東、西兩側各有一條地形陷落帶(張裂帶)，其內分布各有數個爆裂口，這些爆裂口(火山窪地)可能都是由蒸氣噴發所造成的，且其地形保存相當完整，顯示其形成的年代相當年輕。但過去鮮少有深入探究這些火山爆裂口，若能釐清這些爆裂口的成因、形成年代與噴發機制，將有助於建立大屯火山最近的噴發模式與歷史。鑒於此，本研究計畫針對七星山體東(109 年)、西(110 年)兩側張裂帶中的爆裂口進行分析與研究，透過光達數值地形模型(LiDAR)的應用以及野外踏勘實查，了解爆裂口的分布與地形特徵，並針對爆裂口中的沉積物進行採樣分析；探明其形成年代、機制以及其在大屯火山噴發歷史中的意義，做為未來建立火山噴發行爲預警建立，並提供更詳實的大屯火山群地質資料給國家公園未來保育教育及推廣使用之參考。

大屯火山群主要的噴發產物包括有熔岩流、火山碎屑流、火山灰落堆積物、火山穹窿、碎屑崩落和火山泥流等，而晚期的噴發作用以蒸氣噴發為主，噴出大量含石英的火山灰物質分布於大屯火山的山頂上。利用火山爆裂口的地形分析，綜合比較東西兩側斷層上爆裂口之碎形維度，推測可能形成的順序為 $EFC5 < WFC5 < WFC1 < EFC6 < DP < EFC4 < EFC2 < WFC2$ ，顯示東側火山爆裂口形成的年代都較西側年輕。在東西兩側各四個爆裂口從事 10 公尺鑽探連續取芯的工作，獲得堆積於爆裂口的產物主要以有機物質夾有崩落或火山泥流的安山岩塊為主，在東側爆裂口中可見偶夾有石英顆粒富集層，但西側的爆裂口則無石英的發

現。利用有岩芯中的有機物質碳 14 定年結果，顯示東側的夢幻湖形成於距今約 5,600 年前、S-2 爆裂口形成的年代約為 3,800 年、S-3 爆裂口形成的年代約為 1,800 年。但七星山西側爆發口都未鑽獲底部，無法獲得其可能噴發形成的年代，但由底部有機物質的碳 14 定年，推測西側四個爆裂口的噴發形成年代可能都老於 7,400 年前。此定年結果與由碎形維度分析的結果相符合。

綜合野外觀察、地形分析、產物特徵和參考世界其它火山噴發的例子，分布於七星山東西兩側的爆裂口是由蒸汽噴發所形成的。一般而言，蒸氣噴發有兩種模式：一為岩漿侵入火山地下深處，高溫解壓的火山氣體從岩漿離溶上升侵入具有黏土(矽質)覆蓋層的火山地熱系統累積氣體壓力，當累積的壓力超過上覆岩石的強度就發生蒸氣型噴發。另一為岩漿侵入火山地下深處，岩漿體結晶釋放出大量高溫的火山氣體侵入火山口湖底部，導致湖底受壓水層的氣化累積增加氣體壓力而噴發。七星山蒸氣型噴發是屬於地下有熱液儲集層、累積氣體壓力後噴發形成。比較世界其他蒸氣型噴發作用的例子，如 Mt. Ontake、Inyo Craters 與 Tarawera Rift，可發現以下共通點：(1)皆形成於張裂環境；(2)可能皆由地底下沿著斷層或裂隙形成的岩脈或岩漿侵入為熱源；(3)都有地下水、湖泊、熱液等水源。而七星山亞群爆裂口的地質和形成機制和 Mt.Ontake 較為相似。

關鍵詞：陽明山國家公園、大屯火山群、活火山、爆裂口、蒸氣噴發

Abstract

Based on the geological, geophysical and geochemical data, the Tatun Volcano Group (TVO) has been identified as an active volcano in terms of empirical and phenomenological definitions. Therefore, the Ministry of Science and Technology (MOST) built up the Taiwan Volcano Observatory at Tatun (TVO) and the volcanic hazards have been included into the national system of disaster reduction by Ministry of the Interior. The missions are to understand the activity and to mitigate the volcanic hazards in the future, especially an event like the 2014 Ontake phreatic eruption causing casualty.

There are two rifted valleys with several explosive craters cutting through both sides (the east and the west) of the Chihshingshan volcano, which were identified by the LiDAR images. They may be occurred very young and by the phreatic eruption, based on their landforms preserved very well. However, very few studies focus on them before. This project will spend two years to focus on studying the east craters in 2020 and the west ones in 2021. The methods, including LiDAR images, drilling, analyzing core sediments and C^{14} age dating, will be used. The aims are to understand what characteristics and implying are, when occurred and how work they were, for future monitoring and mitigating the volcanic hazards in Tatun volcanic area. Furthermore, those results can provide the Yingmingshan National Park for environmental education and promoting for public understanding the volcanic risks in the future.

The eruption products of TVO are composed of lava flows, lava domes, pyroclastic flows, ash falls, debris avalanches and lahars. But the eruptions of latest stage switched from magmatic to phreatic, which ejected abundant rock fragments with quartz distributed in the summit of volcanoes and created many lineament explosive craters distributed in both sides of Chihshingshan volcano. Using the fractal dimension method to analyze the geomorphology and get the explosive sequences of those craters. The results show the ages of craters in east side are probably younger than west ones, with the occurring sequences, $EFC5 < WFC5 < WFC1 < EFC6 < DP < EFC4 < EFC2 < WFC2$. We drilled 4 crater sites with whole coring in each side of Chihshingshan

volcano. The deposit is predominantly composed of organic matters with blocks, lahars and fine muds. Meanwhile, some quartz grains can be found in the cores of eastern craters, but not in the western ones. The bottom ages, dated by C-14, are 5,600, 3,800 and 1,800 yrbp, of the Menghuan Pond, S-2 crater and S-3 crater, respectively, which indicated the formation ages of those explosive craters. But, all of the craters in the western side didn't penetrate into the basements. So, the formation ages for the western craters are older than 7,400 yrbp, based on the bottom C-14 dating.

Based on the field observations, geomorphologic analyses, characteristics of ejecta, as well as the cases of world volcanoes, the explosive craters distributed in both sides of Chihshingshan volcano were produced by the phreatic eruption. Generally, two models of phreatic eruption have been proposed. One is a deeper hydrothermal system fed by magmatic gases being sealed and produces overpressure sufficient to drive explosive eruptions, and the other one where magmatic gases are supplied via open-vent degassing to a near-surface hydrothermal system, vaporizing liquid water which drives the phreatic eruptions. The mechanism of Chihshingshan phreatic eruption is similar to the type I, which has hydrothermal reservoir underneath the volcano. Comparing other types of phreatic eruption in the world, for example, Mt. Ontake (Japan)、Inyo Craters (USA) and Tarawera Rift (New Zealand), they have similar common characteristics, (i) occurred in rifting conditions, (ii) heat source from magma intruded along the faults, (iii) had water body, such as groundwater, lakes or hydrothermal fluids, etc. near the conduit of magma. The geology and mechanism of phreatic eruption in the Chihshingshan volcano is more or less similar to the 2014 phreatic eruption of Mt. Ontake, Japan.

Keywords: Yangmingshan National Park、Tatun Volcano Group、Active Volcano、
Explosive Crater、Phreatic Eruption

第一章、緒 論

一、前言

綜觀歷史紀錄，火山活動提供肥沃土壤、礦產與地熱能源，為人類文明社會帶來發展的動力；同時也是僅次於洪水與地震對人類社會發展帶來危機與衝擊的重大自然災害。火山的噴發作用包括有噴發柱(eruptive column)、熔岩湧出(lava effusion)、噴發柱崩塌(column collapse)、火山穹丘的產生與崩塌(doming and collapse)，以及噴發過程中或火山活動停止時的山崩(rock avalanche)和火山活動過後的侵蝕作用。這些作用所產生的火山產物則包括有：(1)熔岩流(lava flow)、(2)火山灰落堆積物(ash fallout)、(3)火山湧浪堆積物(pyroclastic surge deposit)、(4)火山碎屑流堆積(pyroclastic flow deposit)、(5)火山泥流堆積物(Lahar)和再積性火山碎屑(epiclastic volcanics)(圖 1-1)。這些火山噴發作用與伴生的噴發產物可對於人類文明社會造成直接性或間接性的災害衝擊，如：西元 79 年義大利的維蘇威(Vesuvius)火山的噴發，大量的火山噴發物直接掩埋鄰近的龐貝城(Pompeii)，造成不可逆的傷害。另一個例子是西元 1815 年印尼的坦博拉(Tambora)火山噴發，大量火山灰被噴發至高空中因此造成陽光難以穿透大氣層，進而影響美國與歐洲的氣候大亂長達兩年之久。

鑒於過去火山噴發所造成的人類文明重大損失災害，聯合國贊助國際火山學會與地球內部化學協會(International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior，簡稱 IAVCEI)，特別挑選世界上 16 座具有靠近人口稠密都市區以及大面積破壞歷史紀錄特性的火山(表 1-1)，鼓勵專家學者們於這 16 座火山進行深入研究以及舉辦公共教育活動，期望能透過科學研究更加瞭解這些火山。進行火山研究的目的，在學術方面理解火山的噴發頻率與模式機制之外，除有助於評估火山熱能源之開採與使用評估的同時，更重要的是可以協助人們對火山可能帶來的災害進行預測，並透過預測之結果預先進行完整的防災評估與規劃，防

患於未然，減低火山噴發所帶來的災害，提升整體防災之能力與人民之防災教育，如何學習與火山共存並妥善運用其所提供的資源是相當重要的課題。



圖 1-1、火山噴發作用與產物模式圖(修改自 USGS)。

<https://pubs.usgs.gov/gip/64/>



表 1-1、IAVCEI 選定的 16 座全世紀末十年火山

Avachinsky-Koryaksky	俄國(Russia)
Colima	墨西哥(Mexico)
Galeras	哥倫比亞(Colombia)
Mauna Loa	美國(United States)
Mount Etna	義大利(Italy)
Mount Merapi	印尼(Indonesia)

Mount Nyiragongo	剛果(Congo)
Mount Rainier	美國(United States)
Mount Vesuvius	義大利(Italy)
Mount Unzen	日本(Japan)
Sakurajima	日本(Japan)
Santa María	瓜地馬拉(Guatemala)
Santorini	希臘(Greece)
Taal	菲律賓(Philippines)
Teide	西班牙(Spain)
Ulawun	巴布新幾內亞(Papua New Guinea)

日本御嶽山(Ontake volcano)位居東日本火山帶的西端，高度約 1,400-1,900 公尺，是日本相當受登山界喜歡的一座火山。其是由含橄欖石和兩輝石的安山岩所組成的層狀火山(複式火山)。過去噴發時，熔岩流往西向摩利支天山的第 6 熔岩流最遠可達 17 公里。一般認為最後的岩漿噴發是發生在約 2 萬年前，但在 2006 年岐阜縣的調查與 2008 年日本國土交通省多治見砂防國道事務所及產業技術綜合研究所的調查發現，包含約 5200 年前爆發的火山碎屑流在內，御嶽山在兩萬年間共發生了四次（約 1 萬年前、約 9000 年前、約 5200 年前、約 5000 年前）的岩漿噴發。在 1979 年御嶽火山曾發生蒸氣型噴發(phreatic eruption)，噴發六個月前，在其低地三之池出現池水混濁與冒泡現象。噴發六小時前，御嶽山發生火山口下方地震，被認為是噴發的前兆現象。1979 年以後，御嶽山一直有（1991 年、2007 年）小規模噴氣活動。2014 年，日本氣象廳在山頂周邊設有觀測火山活動的地震儀、空氣振動測量儀、傾斜儀、火山氣體監測器、GPS 觀測裝置、監視鏡頭等設備。但 103(2014)年 9 月 27 日 11 時 52 分（日本時間）日本御嶽山發生火山蒸氣型爆發事件(Kaneko et al., 2014)，至 10 月 8 日為止已造成 55 人死亡，是日本自雲仙岳(Unzen Volcano)1991 年熔岩崩塌以來首起致命的火山噴發，也是自 1902 年導致約 150 人死亡的鳥島火山(Torishima volcano)噴發以來，第二次世界大戰之後死亡人數最多的火山噴發。御嶽山噴發前火山性地震呈明顯減少趨勢

且地殼變動也未發現明顯變化，導致警戒失調造成遊客傷亡情形發生。此種火山蒸氣噴發的不可預測性是日前世界火山學界熱門討論的話題。

位處西太平洋火環帶上的臺灣，歸因於板塊之間的擠壓碰撞與隱沒作用發生，有呂宋與琉球兩個火山島弧系統生成，這樣得天獨厚的地質條件，使得臺灣的北部、東部、西部都可見到火山的蹤跡。北臺灣有數個火山分布，其中位於臺北盆地北緣緊鄰於首都臺北市的大屯火山群(圖 1-2)，其出露與分布面積最為廣泛，火山形貌保存最為良好。若進入大屯火山群踏勘可以立即發現，火山群之中有著旺盛的噴氣以及溫泉上湧，意即後火山作用相當明顯，這些現象都指示著大屯火山群底下可能仍有岩漿庫的存在。

臺灣北部大屯火山群和北部外海之諸火山島，傳統上地質學家認為是屬於琉球島弧西延的一部份(莊文星、陳汝勤，1989；陳正宏，1990)；而 Teng et al. (1992) 與 Teng (1996) 則更進一步推測，臺灣北部的岩漿活動因為沖繩海槽逐漸向西張裂而將停止活動。Wang et al. (1999; 2002; 2004) 的研究，則開始挑戰傳統認為臺灣北部火山活動是導因菲律賓海板塊隱沒所造成島弧岩漿活動的看法。他們認為這些具有「島弧」地球化學特徵的熔岩，不一定與現在正在進行中琉球海溝隱沒作用所生成的島弧系統直接有關；Wang et al. (1999) 指出這些岩漿活動，可能與臺灣北部因為碰撞作用所生成的造山崩解張裂作用(extensional collapse)有關。若是此說法是正確的，則傳統認為大屯火山群及北部諸火山島已經逐漸停止活動的看法將必須要作很大的修正，因為臺灣北部的張裂活動現正逐步加強發育當中，若是地殼下方有岩漿庫存在，則隨時有可能提供管道給岩漿噴發至地表，為一座活火山。

近二十年來多項研究皆指出，大屯火山群仍有再次活躍的可能性，論證直指大屯火山群底下仍有岩漿庫存在，包括：(1)利用氦同位素分析大屯火山群的噴氣與溫泉，並發現仍噴氣與溫泉之中有大於 60%的氣體來自深部地函，指示仍有岩漿庫提供熱能(Yang et al., 1999;; 楊燦堯等，2003)。(2)透過廣布於大屯火山群之

中的地球物理監測器，分析 S 波陰影與 P 波緩達兩個現象，證實位於金山、萬里地區地下約 15 公里，有火山岩漿庫的存在(Lin, 2016)。若從地層與岩石的紀錄來看大屯火山群過去的活動歷史，岩石放射性定年法的結果顯示，大屯火山群最年輕的噴發活動少於一萬年(Belousov et al., 2010; Zellmer et al., 2015)。依照國際使用之火山活躍/休眠與否之火山分類方法(Szakacs, 1994)進行分類，上述的三項論證都表明位於臺灣北部的大屯火山群符合活火山的定義：(1)能用科學方法與火山下方發現岩漿庫以及(2)火山於過去一萬年以來曾有噴發紀錄。因此大屯火山群應被歸類為「活火山」，有著再次活動噴發的可能性。

臺北盆地的地層紀錄顯示，過去曾因為大屯火山群的噴發，使得噴發物和火山泥流堆積物沿著火山斜坡進入臺北盆地西北方；堵塞臺北盆地主要河流的出海口，造成臺北盆地形成大規模的堰塞湖(Tsao et al., 2001; 鄧屬予等，2004)。這樣的歷史紀錄訴說著若大屯火山群再次噴發，將會直接危害與影響臺北盆地七百萬人口生命、財產以及北部電力網路命脈的安全，臺灣社會不得不重視大屯火山群。因此瞭解大屯火山群的噴發歷史與模式，便以用於進行防災與監測，對於火山所可能帶來的災害防範於未然，是必須正視的重要議題。

另外，依據 Kagiya & Morita (2008) 對於日本火山的研究分類，大屯火山群的火山噴發型態較接近於地熱活動型(Geothermal activity dominant, GD)的火山活動，其特徵是兩次大噴發的時間間距較長、中間夾著數次小規模的地熱流體活動所引發的蒸氣型噴發(phreatic eruption)或規模小的地震群活動(earthquake swarms)(圖 1-3)。若此模式能比對於大屯火山群過去的火山活動，則對於了解大屯火山群的火山活動史、噴發特徵和規劃防災體系是件刻不容緩的事。



圖 1-2、臺灣北部地質與火山岩區分布圖(改繪自何春蓀，1986)。

大屯火山群座落於臺北盆地外圍，且與核一廠與核二廠非常接近，火山任何動靜皆可能影響臺北市民日常生活。

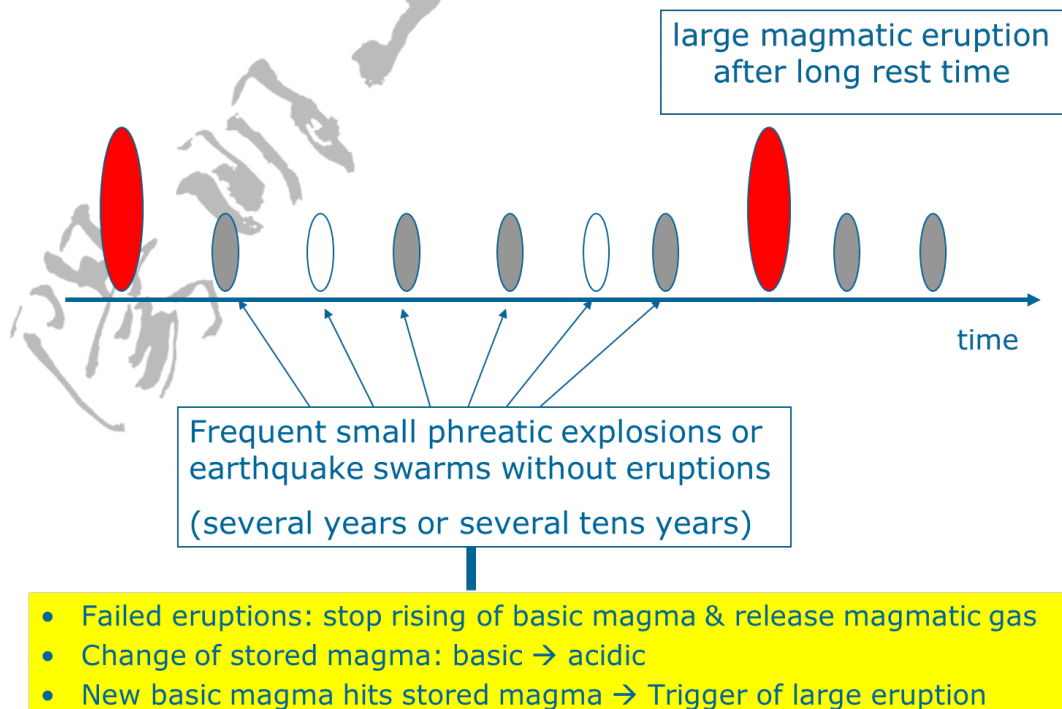


圖 1-3、地熱活動型火山的噴發週期和特徵(Kagiyama & Morita, 2008)

二、研究動機與目的

為保障我國人民生命財產以及對火山災害防範於未然，透徹理解大屯火山群的噴發歷史、模式與週期有其必要與迫切性。回顧大屯火山群的相關前人研究，大多著墨於火山地質圖繪製、岩石學以及火山監測，鮮少探究有關火山的噴發模式與週期。然而大屯火山群七星山的東、西側有兩條東北-西南向分布的張裂帶，張裂帶中並有數個外型保存完整封閉的圓形至橢圓形爆裂口。所謂的張裂帶是指在火山地區因岩漿上升造成區域最大應力(σ_1)的方向為垂直地面、水平方向為最小應力，以至於在火山活動過程中會在火山體週遭形成線型凹谷，規模可達數百公尺至數公里的長度，如夏威夷基拉韋厄火山兩側在噴出熔岩流時，形成東張裂帶(east rift zone)和西南張裂帶(southwest rift zone)，並在東張裂帶上有數個熔岩池爆裂口分布。爆裂口則是指火山噴發所形成的獨立凹地。大屯火山群的張裂帶呈現寬約幾十公尺且連續低凹的地形特徵。並有數個外型保存完整封閉的圓形至橢圓形爆裂口分布其中，完整的外型暗示著其形成的年代可能相當年輕(圖1-4)。另外，Belousov et al.(2010)在紗帽山腳下發現古堰塞湖，且沉積物中有四層火山灰，硫磺谷和龍鳳谷等凹地也可能是後期所形成的爆裂口。但過去鮮少有深入探究這些火山爆裂口，若能釐清這些爆裂口的成因、形成年代與噴發機制，將有助於建立大屯火山群的噴發模式與歷史。鑒於此，本研究將針對七星山東(109年)、西(110年)兩側張裂帶中的爆裂口進行分析與研究，透過空拍機判釋地形和光達數值地形模型(LiDAR)的應用以及野外踏勘實查，了解爆裂口的分布與地形特徵，並針對爆裂口中的沉積物進行採樣分析；探明其形成年代、機制以及其在大屯火山噴發歷史中的意義，做為未來建立火山噴發行為預警建立讓似日本御嶽山的憾事不會發生在臺灣，並提供更詳實的大屯火山群地質資料提供國家公園未來保育教育及推廣使用之參考。

三、計畫範圍

本研究計畫以穿過七星山兩側的張裂帶地形和其中的爆裂口為研究對象(圖 1-4)，這些爆裂口保持的相當完整，可能是由蒸氣噴發所形成，類似 2014 年日本御嶽火山蒸氣噴發所形成的爆裂口。

四、預期成果

本研究之預期成果包括：

1. 張裂帶與爆裂口之分布範圍、面積與地形特徵。
2. 爆裂口之形成年代。
3. 爆裂口之噴發形式與噴發物。
4. 張裂帶的形成年代以及其與爆裂口之關係。
5. 張裂帶與爆裂口於大屯火山群之可能形成機制和火山學意義。
6. 了解大屯火山群後期蒸氣噴發的特性和規模大小。

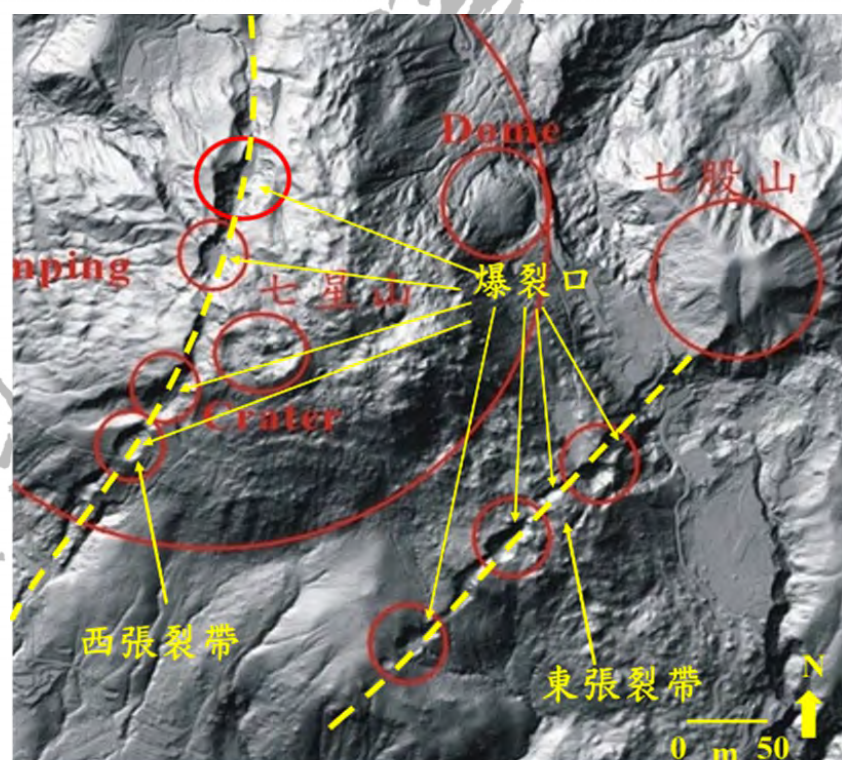


圖 1-4、七星山張裂帶 LiDAR 影像。

LiDAR 影像中顯示穿越過七星山的兩條張裂帶，中間有數個保存良好的火山爆裂口。

第二章、地質背景與前人研究

大屯火山群位於臺北盆地北緣，分布範圍北至三芝、金山，南至北投，西至淡水。大屯火山群的地質研究與調查緣起自日治時期，為滿足探採硫磺之需求，相關學者針對大屯山地區，進行地形調查與區域地質圖的繪製(大島十郎, 1904; 出口雄三, 1912; 大江二郎與小笠原美津, 1932)。隨著國民政府來台，因建置首都臺北的需求，針對大屯山區繪製五萬分之一和兩萬五千分之一的地質圖(顏滄波與陳培源, 1953; Ku et al., 1959)。直到 1980 年代左右才有較為詳細的地質圖發表(Chen and Wu, 1971; 陳培源與楊昭男, 1985)。現階段已公開發表的區域地質圖，屬中央地質調查所(Central Geological Survey, CGS)所出版之五萬分一地質圖資訊最為豐富，最常受到引用，但因為大屯火山群分布面積廣泛，分布橫跨於臺北、三芝、林口三個地質圖圖幅之中。地質圖幅的精進，同時帶起大屯火山群的研究風潮，學者們亦針對不同的研究議題進行深入探討，代表性論述作品包括有：火山岩岩石學特徵(Chen and Wu, 1971; Chen, 1975, 1978; 黃鑑水, 1988; 陳正宏, 1990; 莊文星與陳汝勤, 1989)，火山地形判識(陳文山等, 2003, 2007; 宋聖榮, 2006; 莊文星與陳汝勤, 2008)，放射性定年分析探索個火山演群的噴發年代，並結合岩石學與火山地形之研究建立大屯火山群的火山層序(Chen and Wu, 1971; 王文祥, 1989; 李淑芬, 1996; 陳培源, 2006; 林詠忠, 2008; 葉斌, 2009; Belousov et al., 2010; Zellmer et al., 2015)。本研究回顧與整理這些前人研究，並於下列拆分歸納為(1)大地構造與區域地質、(2)火山地質進行回顧與論述。

一、大地構造與區域地質

若從大地構造尺度來看，歸因於歐亞板塊與菲律賓海板塊發生弧陸碰撞，臺灣周圍有琉球島弧與呂宋島弧兩個火山島弧系統生成與發展(Suppe, 1981; 1984)。板塊的隱沒作用反轉，使得北臺灣由原本的擠壓造山轉變至造山崩毀的階段，山

脈陷落下沉形成臺北盆地(Teng, 1996)；而琉球島弧的火山活動隨之引發(鄧屬予, 2007)，岩漿隨著山脈陷落下沉時所發育的裂隙通道上升，這些上升的岩漿穿越第三紀地層形成火山體，並在盆地北方噴發，不整合覆蓋在一系列(五指山層、木山層、大寮層、石底層、南港層、南莊層)沉積地層之上(Song, 2007a)(圖 2-1)，成為今日所見之大屯火山群。

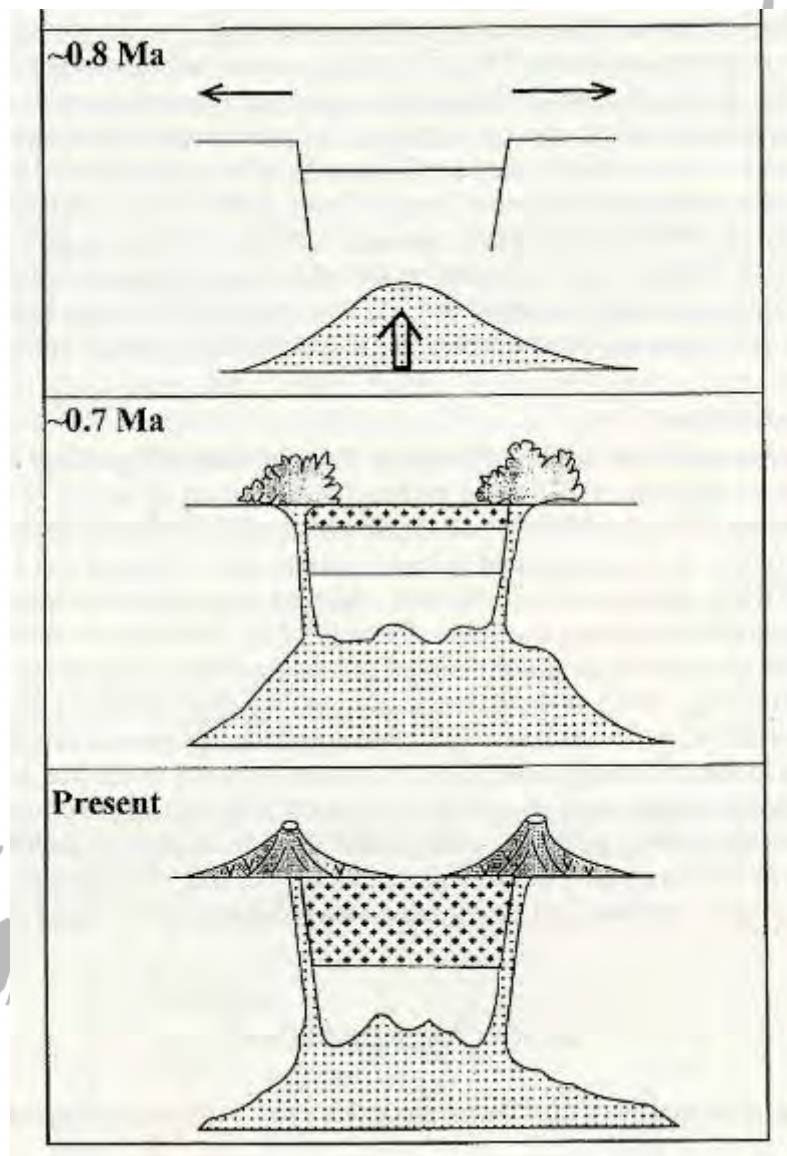


圖 2-1、北臺灣火山形成示意圖。

擠壓環境轉變成張裂環境，新的減壓環境導致岩漿上升，沿著裂隙穿越沉積地層抵達

大屯火山群之中主要有兩個逆衝斷層構造分布，分別為：(1)金山斷層、(2)崁腳斷層(圖 1-2)，此兩斷層的主要形成原因與山脈隆起有關。另外，後期山脈陷落引發的張裂性的山腳斷層和造成台北盆地的陷落，其在大屯火山群內的軌跡可能和金山斷層重疊(圖 1-2)。以下將簡短介紹斷層的分布位置與構造特徵。

(1) 金山斷層：

金山斷層是為一逆衝斷層，呈現北東走向，斷面向東南傾斜，斷層的分布區域集中於金山區，東北延伸入海，西南延伸至大屯火山群之內(黃鑑水，1988)。

(2) 崁腳斷層：

崁腳斷層位於金山斷層之東南側，為一規模較大之逆掩斷層。主要走向為北 60 度東，主要分布於崁腳至萬里海邊，長約六公里。崁腳斷層東北延伸入海，西南延伸至臺北盆地東緣之士林(黃鑑水，1988)。

(3) 山腳斷層

山腳斷層由臺北盆地南端的樹林地區向北延伸至金山地區。在臺北盆地內，山腳斷層被第四紀沖積層所掩覆，雖然以往由地形特徵認為斷層位於林口臺地與臺北盆地的交接帶，但由鑽探結果顯示，斷層跡的位置距臺地東緣數百公尺以上；而在盆地內斷層兩側的基盤落差約 60~220 公尺。山腳斷層的北段，在大屯火山區，斷層約沿著大屯山與七星山交界的鞍部；在金山地區，斷層約沿著山地與平原的交界；鑽探顯示斷層北段兩側的基盤落差超過 600 公尺。這些基盤的落差可能是山腳斷層的正移斷層作用所造成的，而斷距似乎有由南向北增加的趨勢。山腳斷層的最近一次活動時間，可能在距今約 1 萬年以前，暫列為第二類活動斷層(地調所，2012)。

二、火山地質

大屯火山群之中共有將近 20 餘座火山體已被命名(Chen and Wu, 1971)，若

以兩大斷層帶做為地理位置的參考點，坐落於金山斷層西北側的竹子山、小觀音山、大屯山呈現東北—西南向排列分布；而坐落於金山斷層以東至崁腳斷層之間則有七星山、紗帽山、磺嘴山、大尖後山、丁火朽山等山略呈現東西向分布。透過火山錐與熔岩地形的空間分布與疊置關係配合岩性特徵，共可將大屯火山區分為五個火山亞群：(1)大屯山亞群、(2) 七星山亞群、(3) 竹子山亞群、(4) 丁火朽山亞群、(5) 磺嘴山亞群，各火山亞群之主要山峰將整列於下表 2-1。

大屯火山群的火山地形保存尚屬完整，若利用 LiDar 數值模擬地形圖進行大屯火山群的火山地形判識，可發現大屯火山群之中含有火山錐、熔岩穹丘、火山口、大型舌狀熔岩流、小型圓弧狀熔岩流、指狀熔岩流、平行脊構造與火山碎屑流等火山地形特徵(陳文山等人，2007)。其中如磺嘴山亞群中的磺嘴山、大尖後山與大屯山亞群中的面天山皆有保存良好的火山口地形，七星山亞群中的七星山與大屯山亞群中的大屯山則保有相當良好的錐狀外型。這些錐狀外形的火山，依照其形態特徵可分別區分出不同類型的火山形式，於大屯火山群中被判釋出的火山體類型有包括：複式火山(composite volcano)、火山穹丘(lava dome)、火山渣錐(scoria cone)、熔岩錐(lava cone) (圖 2-2)。

表 2-1、大屯火山群之亞群劃分與各亞群所包含之山峰(引自陳培源，2006)

亞群名稱	主要山峰
大屯山亞群	大屯山、南大屯山、中正山、面天山、向天山、二子山、枕頭山、菜公坑山、烘爐山。
七星山亞群	七星山、七股山、內寮山、白雲山、紗帽山、竹篙山
竹子山亞群	小觀音山、篙山、圓頂山、竹子山、內橫山、外橫山、九芎林山、西勢湖山。
丁火朽-楠子山亞群	丁火朽山、楠子山、八斗山。

磺嘴山亞群	磺嘴山、大尖後山、赤石六山、冷水山、大尖山、石梯山、頂山。
-------	-------------------------------

大屯火山群的火山由熔岩流(lava flow)、火山角礫岩(pyroclastic breccias)、凝灰岩(tuffs)以及再積性火山碎屑岩(epiclastic)等不同的產狀的火山岩所組成(Chen and Wu, 1971; Song, 2000)。這些產狀之中，火山噴發物的產狀主要以熔岩流為主；火山碎屑噴發物(Tephra)則相對少見於大屯火山群之中，這些少量且零散分布的火山碎屑噴發物於大屯火山群中，分別展現火山碎屑流(pyroclastic flow)、火山湧浪(surge)、火山灰落堆積物(ash fallout)等機制的沉積特徵(王文祥，1989; Tsai et al., 2010)。與火山碎屑噴發物產狀相當接近的再積性火山碎屑岩，是非直接由火山噴發所形成的火山泥流堆積物(Lahar)，經常可以於大屯火山群中的凹谷或是火山群外圍鄰近區域(例如：臺北盆地、三芝與淡水海岸)。

大屯火山群的火山岩種類主要為安山岩，僅有少數火山由玄武質安山岩(玄武岩)所構成。大屯火山群之中的安山岩都具有明顯的斑狀組織特徵(porphyritic texture)，岩石中這些較大的礦物晶體是鐵鎂礦物，並可常見角閃石與輝石類，橄欖石與黑雲母則較為稀少。若依照鐵鎂礦物的含量進一步進行區分，可將大屯火山群之中的安山岩分為下列八種安山岩與玄武岩(玄武質安山岩)：(1)含橄欖石角閃石兩輝安山岩(olivine-bearing hornblende two-proxene andesite)、(2)兩輝安山岩(two-proxene andesite)、(3)含角閃石兩輝安山岩(hornblende-bearing two-proxene andesite)、(4)角閃石兩輝安山岩(hornblende two-proxene andesite)、(5)兩輝角閃石安山岩(two-proxene andesite)、(6)紫蘇輝石角閃石安山岩(hypersthene andesite)、(7)普通輝石角閃石安山岩(augite hornblende andesite)、(8)角閃石安山岩(hornblende andesite)、(9)玄武岩。

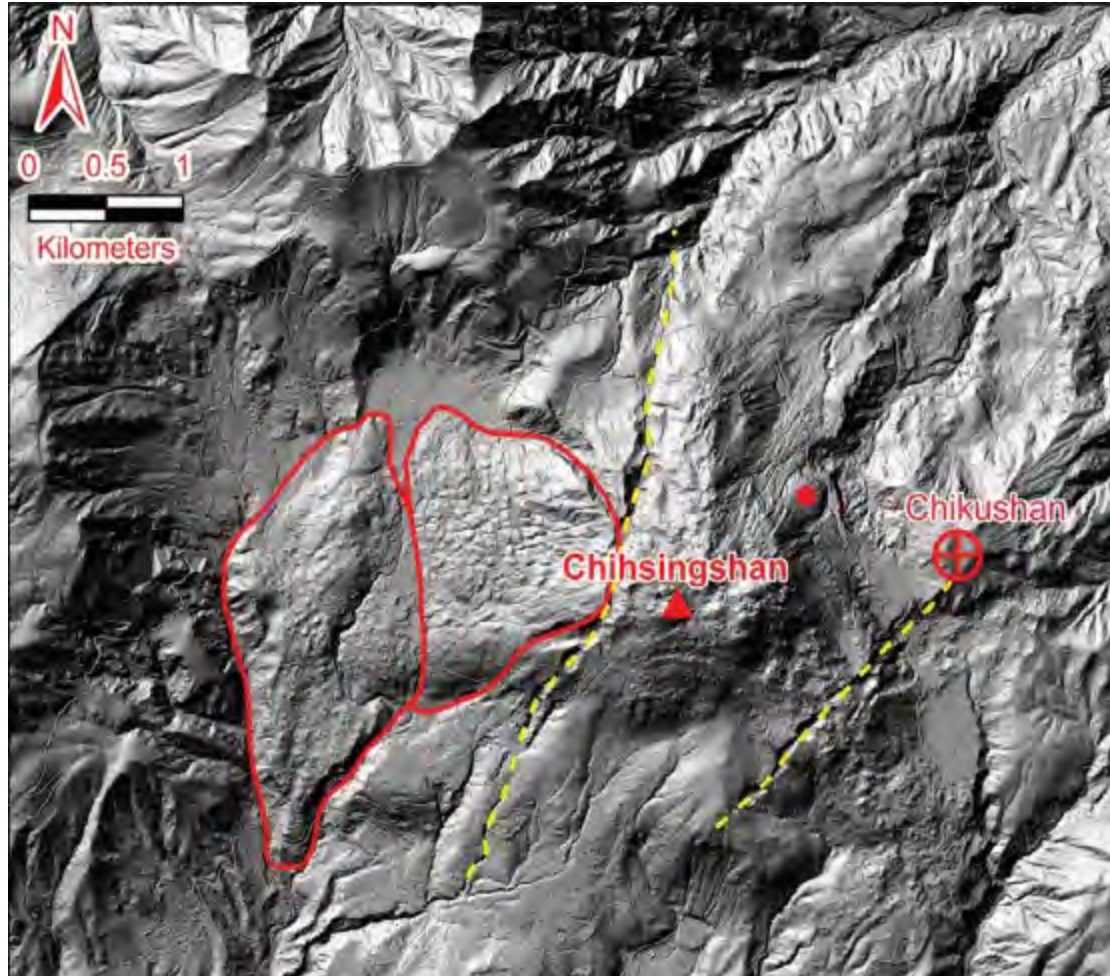


圖 2-2、七星山東、西兩側之東北-西南走向張裂帶位置分布圖。

黃色虛線為張裂帶，紅色區塊為岩屑崩落堆積物。▲:複式火山(composite volcano)、●火山穹丘(lava dome)、⊕火山渣錐(scoria cone)。Chihshingshan: 七星山，Chikushan: 七股山 (圖片引用自 Tsai et al., 2010)。

關於大屯火山的噴發方式以及噴發年代一直是學者們關注與討論的議題，亦是理解大屯火山噴發模式與歷史相當重要的線索。岩石放射性定年的分析結果顯示，大屯火山群的噴發年代主要分布於兩個時間區段，分別為(1)2.5~2.8 Ma 與 (2)0.1~0.8 Ma 兩個時段。火山活動起始於 2.8 Ma，並噴發形成東半部的原始丁火宿山與西半部的原始大屯山；中間沉寂了將近一百五十萬年之後，至 0.8 Ma 又開始活躍，並且這一系列的噴發活動持續了將近 70 萬年才停止，形成今日所見之大屯火山群。至於大屯火山群最後噴發停止的時間為何，還未有明確的認定；從火山岩定年資料來推斷，最後噴發停止可能的年代約為 3.8 萬年左右，但由於

定年方法誤差、新鮮岩石材料的取得等局限性，以及由大屯火山群的地形來判斷，此一年代可能是低估，應該還要再年輕。於臺北盆地的鑽井中，在井下松山層中發現火山灰，而松山層的年代可能年輕於 20,000 年，故推測大屯火山群的火山活動時間可能年輕於 20,000 年 (Chen and Lin., 2002; 陳中華和林朝宗，2006)。進一步 Belousov et al.(2010)在紗帽山附近古湖泊的火山灰，獲得年代介於 11.6~19.5 千年前，甚至年代可年輕至 5.5 千年前左右。另外，Zellmer 等人利用鈾-鈷-釷定年法測定紗帽山熔岩穹窿的年代年輕於 1,370 年(Zellmer et al., 2015)。但因從古湖泊的火山灰可能是風化侵蝕而來，並不是直接火山噴發的產物，故有人質疑所獲得的年代可能是碎屑性火山物質沉積的年代，並不代表真正火山噴發的年代。而利用鈾-鈷-釷定年法測定的年代只有一個，代表性可能不夠，需有更多的樣本從事定年工作。

過去有學者利用火山噴發指數(Volcanic Explosivity Index (VEI))進行推論，大屯火山群的噴發方式應該屬於流出或寧靜式的噴發方式(Song et al., 2000)。近期的研究更指出大屯火山群的噴發方式多變，有著從較小規模強度較弱的蒸氣式噴發形式，到高強度的普林尼式噴發(Plinian eruption)形式，並且從火山噴發物的產狀推論顯示，噴發階段岩漿與地下水的接觸相當普遍(Belousov et al., 2010)。大屯火山群之中的小油坑、大油坑、八煙、硫磺谷、冷水坑等地皆被判釋出火山爆裂口(莊文星與陳汝勤，2008)，這些爆裂口經常伴隨著旺盛的噴氣作用以及溫泉湧出。過去有相關文章曾提及七星山東、西側有兩條東北-西南走向的張裂帶(圖 2-2 黃色虛線處)，張裂帶之中有著一系列接近圓形凹地，前人推論這些爆裂口可能是蒸氣噴發的證據(Belousov et al., 2010; Tsai et al., 2010)。

第三章、研究方法

本研究針對七星山東西兩側張裂帶爆裂口進行地形分析與爆裂口岩石與沉積物的研究，研究方法與流程如圖 3-1。各個方法詳細的描述如下：

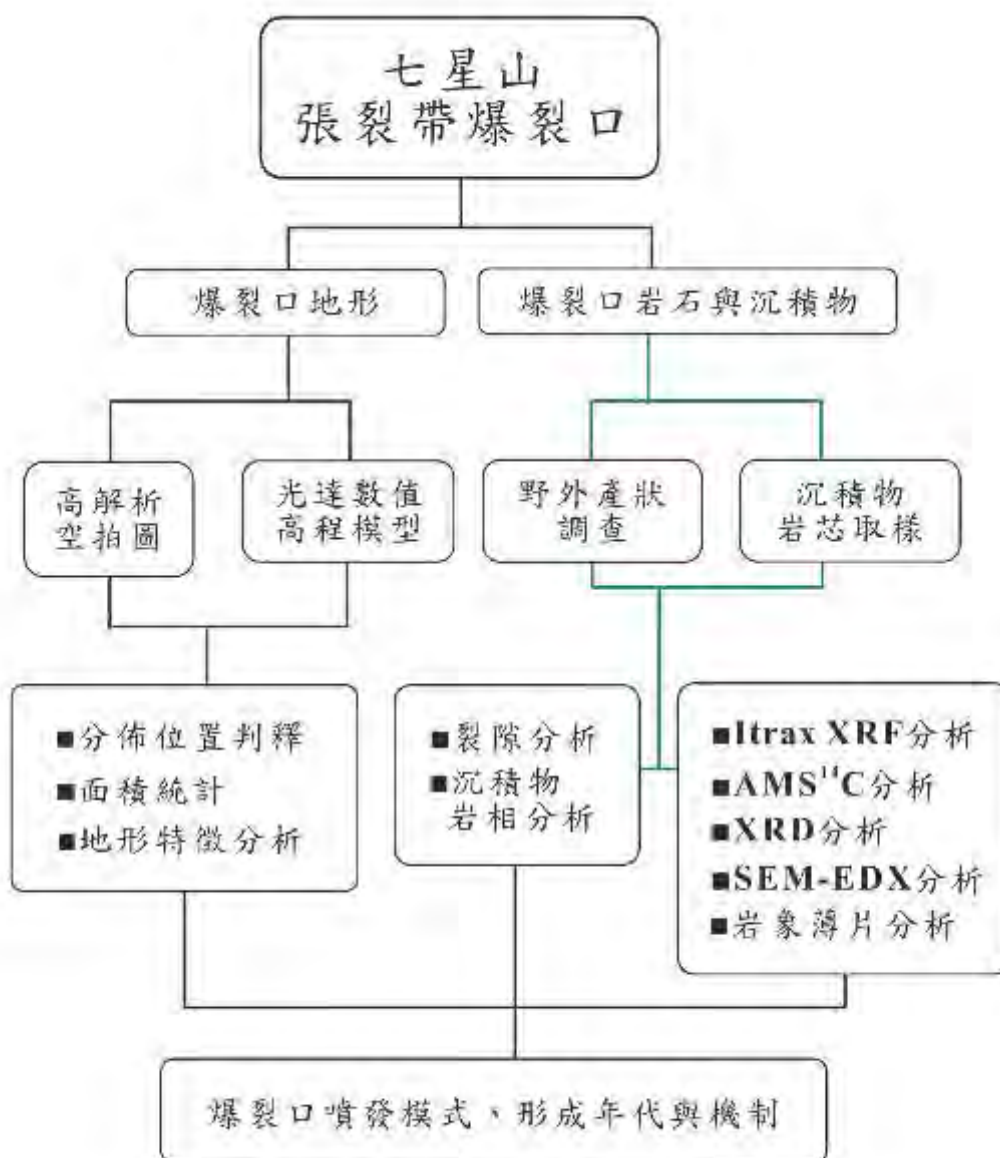


圖 3-1、研究方法與流程圖

一、爆裂口地形分析

利用光達數值 (LiDAR) 地形模型進行地形分析，以及配合空拍機進行高解析度的爆裂口航照圖拍攝(需視有無航空管制而定，若有航空管制不能進行此一研究，則以較高解析度的 LiDAR 影像取代之)，用以進行爆裂口的分布位置、面積統計與估算，再進行爆裂口地形特徵分析。

地形分析研究可分為兩部分：首先探討分布於七星山地區的張裂帶與爆裂口之地表形態，對於航測資料所製作的光達數值高程模型(LiDAR-DEM)，利用地理資訊系統(GIS)軟體的分析工具，進行地形上的判釋與描繪。然後以碎形幾何理論(Fractal Geometry Theory)的概念，訂定裂隙與爆裂口在數值量化上的比較基準，嘗試解釋爆裂口之間相對形成年代可能的先後順序。

二、爆裂口岩石與沉積物

(一)、野外調查

利用光達數值地形模型進行地形分析後，釐清爆裂口的分布位置與面積，透過實際野外調查分析爆裂口的岩石產狀。針對七星山地區附近的張裂帶、爆裂口構造、溫泉露頭等地點進行實地的野外勘查與記錄。主要地點分為七星山西側張裂帶上的西側斷層爆裂口(West Fault Crater, 簡稱 WFC)、七星山東側張裂帶上的東側斷層爆裂口(East Fault Crater, 簡稱 EFC)，和現存噴氣活躍的爆裂口如小油坑等。

(二)、鑽井取芯

以鑽井設備鑽透表覆沉積物進行岩芯取樣進行分析。針對七星山火山體東側地形陷落帶及火山口進行岩芯採集工作，完成四處 8 口鑽井穿透沉積層之岩芯鑽探工作。針對七星山火山體西側地形陷落帶及火山口進行岩芯採集工作，完成四處 8 口鑽井穿透沉積層之岩芯鑽探工作。但為了易於議價和節省經費，擬把兩

年的鑽井工作在本年度包裹發包。

(三)、岩芯分析

進行 Itrax、XRD、SEM-EDX、XRF 以及沉積物岩象觀察等分析，探討爆裂口沉積物之組成特性、以及組成物是否隨時序變化產生組成或化學特徵上的變化。尤其注意是否有火山灰層的分布。另外，與國內研究古氣候專家學者合作，利用鑽井所獲得的沉積物材料，研究臺灣北部古氣候變環境的演變。第一年(109 年)著重於七星山火山體東側地形陷落帶所鑽獲的岩芯進行分析；第二年(110 年)著重於七星山火山體西側地形陷落帶所鑽獲的岩芯進行分析。

(四)、C-14 定年研究

取沉積物中的碳物質從事 C-14 的定年工作，以了解沉積物沉積的年代，並推斷爆裂口可能的形成年代。

三、資料彙整

最後彙整爆裂口的分布、地形、岩石與沉積物特徵和年代，探討爆裂口的噴發模式、形成年代與機制。

第四章、結果與討論

一、火山爆裂口地形分析

此項工作利用過去中央地質調查所所完成的光達數值(LiDAR)地形模型進行地形分析，擬用的 LiDAR 影像解析度為 6m(圖 4-1)和 1m(圖 4-2)，並配合無人飛機(UFO)拍攝火山爆裂口的影像和野外調查認定，獲得真實的影像，提供後續定量的分析工作，如爆裂口大小直徑、深度、面積和可能的形成順序等，並進一步提供作為環境教育解說材料。地形分析的 LiDAR 影像已獲得中央地質調查所的首肯，可到該所進行相關的分析工作，預計在 7 月底完成分析工作，作為第一次期中報告的基礎。

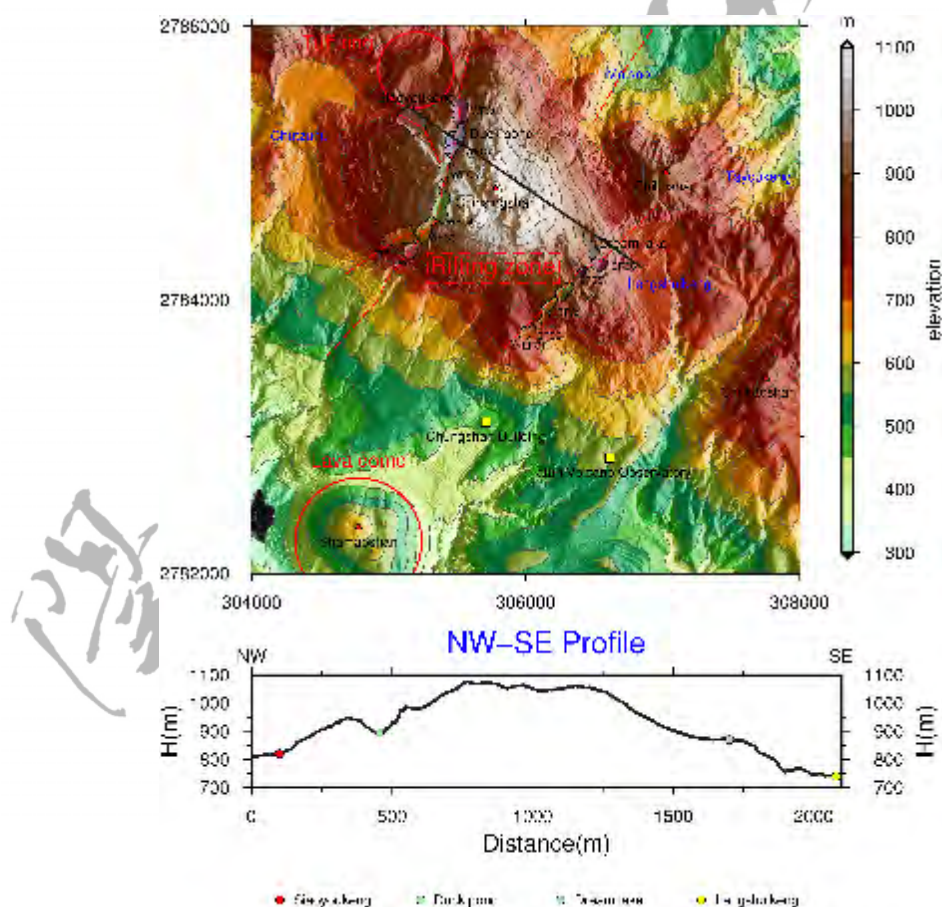


圖 4-1、七星山地區火山地形與爆裂口位置之 6m DEM 地形高程疊合圖。

紅虛線為裂隙(張裂帶)；粗黑線為小油坑至冷水坑之西北—東南剖面(LiDAR 影像為中央地調所提供)。

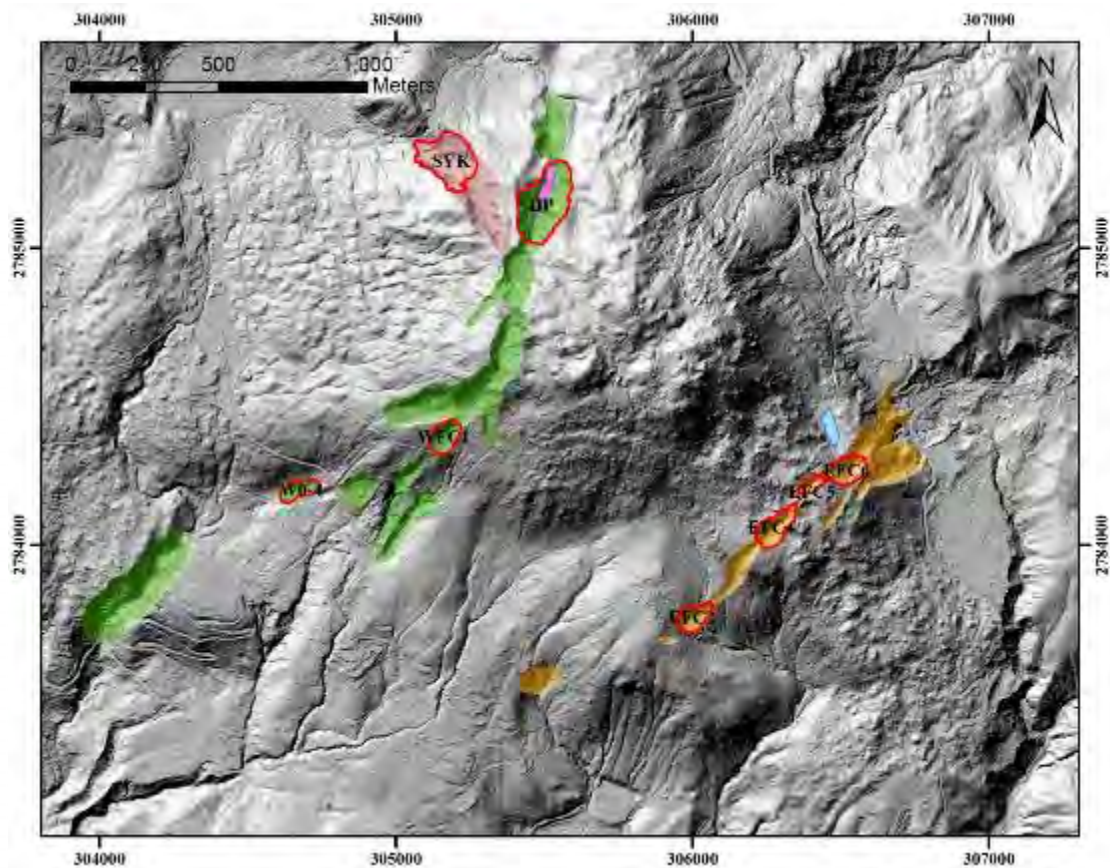


圖 4-2、七星山地區張裂帶與爆裂口位置之 1m DEM 地形陰影圖。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

(一)、資料獲取原理

光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)或稱作雷射掃描，其原理和流程如下：

1、測量：

大範圍的地形觀測多以飛機搭載的方式進行測量，稱作空載光達(Airborne LiDAR)，其他測量形式還包括測深光達(Bathymetric LiDAR)和地面型光達(Terrestrial LiDAR)。空載光達的掃描配備主要包含三個部分：(1)定位定向系統(Position and Orientation System, POS)，整合了全球定位系統(Global Positioning System, GPS)與慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)的資訊，可得到精密的航跡定位。(2)雷射掃描儀(Laser Scanner)，使用高頻率的雷射光作為發射光

源，打至地表反射而接收到的多重反射訊號可以記錄距離及反射強度。(3)控制器連結定位定向與雷射量測資訊，可獲取大量原始點資料(圖 4-3)。因點資料有分布密集的特性，其點集合被稱為點雲(point cloud)。故空載光達技術相較傳統的測量具有較高的精度、解析度、自動化程度和效率(徐偉城，2008)。

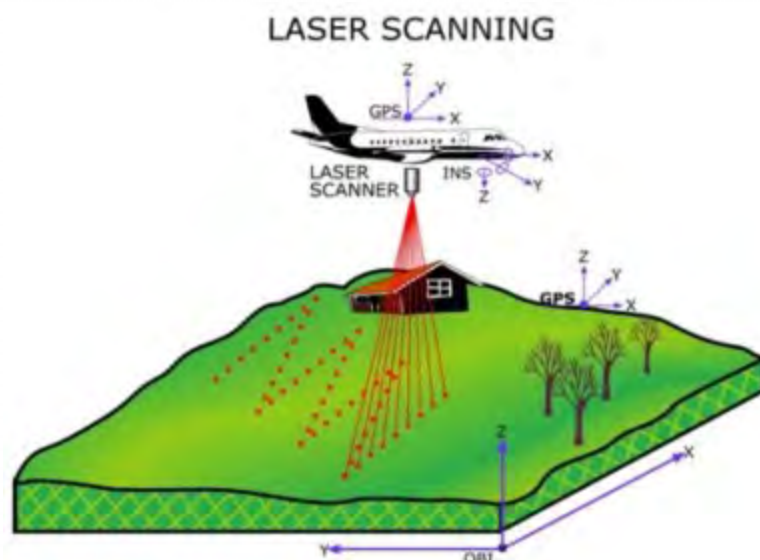


圖 4-3、空載光達作業示意圖(Renslow, 2001)。

2、原始資料前處理：

圖 4-4 為資料處理的流程，其簡單步驟為：(1)將硬碟資料下載與解壓縮，轉換後得到雷射點雲資料；(2)將 POS 資料的 GPS 和 INS 的慣性姿態儀等資料使用不同軟體進行計算(淡紅框)，可推得 TWD97 投影座標。(3)資料精度分析與評估，修正誤差。(4)過濾和移除部分資料，如植被與建物。

3、製作高精度 DEM 與 DSM：

經過上述前處理步驟的點雲資料，經軟體內插處理可產生兩大類的數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)：(1)剝除植被、反映真實大地高程的數值高程模型(圖 4-5 左)；(2)涵蓋植被高度的數值地表模型(圖 4-5 右)。本研究為地質領域範疇，故選用 DEM 進行資料分析。

4、最後產品輸出

LiDAR-DEM 其主要檔案格式為 ERDAS Imagine 之 IMG 格式，也就是目前國家數值地形模型的儲存格式，儲存網格式(raster)的二進位影像檔資料(黃怡靜，2007)。

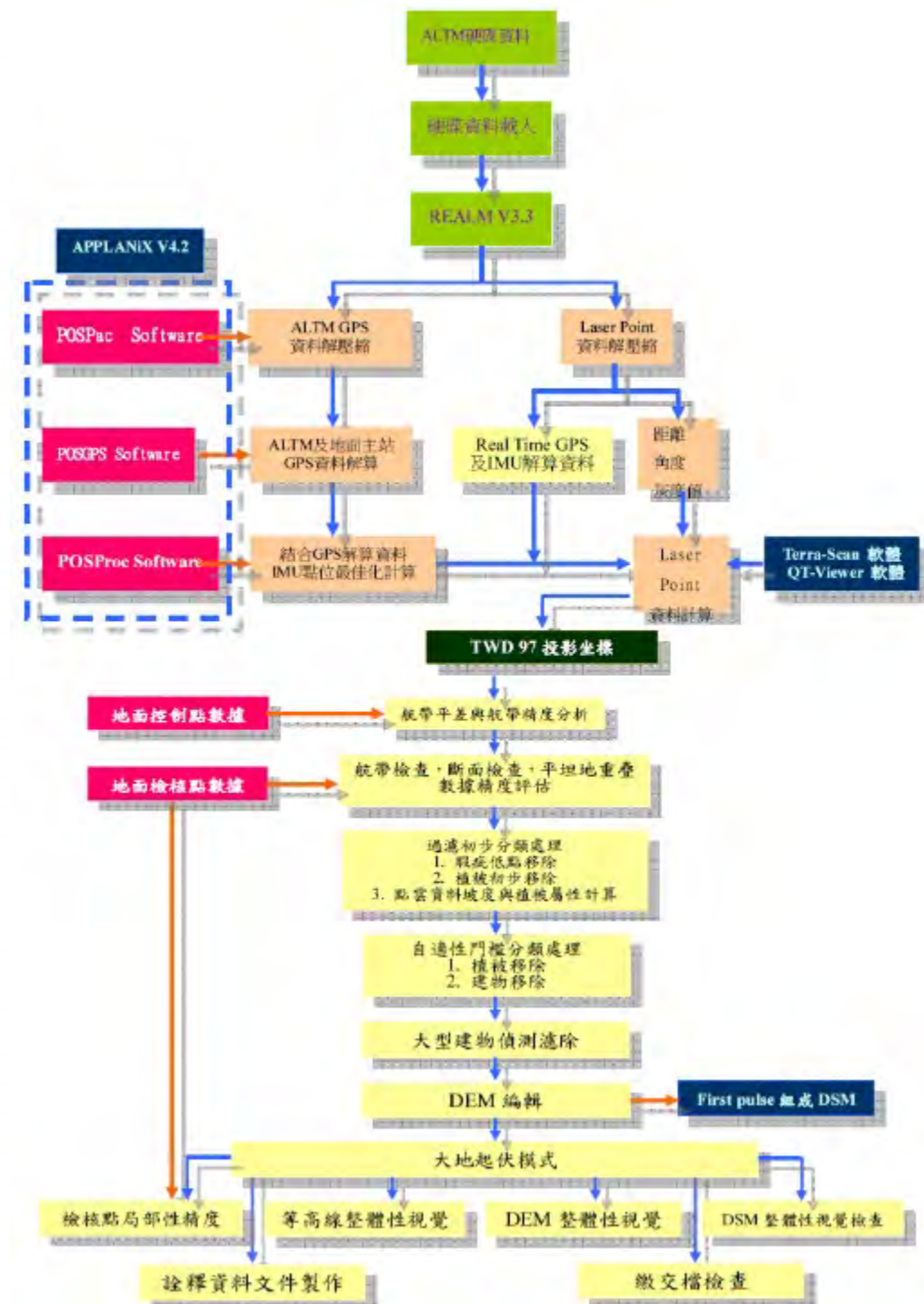


圖 4-4、LiDAR 資料處理作業流程(詹瑜璋等人，2005)。

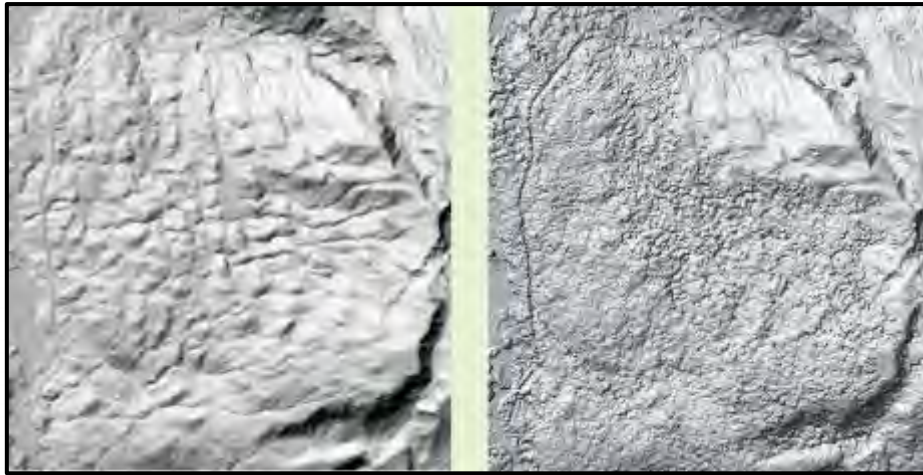


圖 4-5、兩種數值模型比較圖(詹瑜璋等人，2005)。

左圖：2m LiDAR-DEM；右圖：2m LiDAR-DSM。

(二)、資料處理方法

對於 6 m x 6 m 和 1 m x 1 m 解析度之 LiDAR-DEM，使用的 GIS 軟體為美國環境系統研究所公司(Environmental Systems Research Institute, ESRI)所開發之 ArcGIS 10.3 和 10.4，可直接讀取 IMG 檔。利用 ArcGIS 內建之三維分析工具來進行地形計測，量化和分析地表地形。分析工具主要包括：

- (1)坡度(Slope)，代表地表的傾斜程度，為水平距離內高程值的平均變化量。其預設值由坡度低至高，顏色由綠漸變至紅色(圖 4-6a)。
- (2)坡向(Aspect)，意指坡面的朝向，呈現地表某處最陡峭的傾斜方向。預設值為 45 度一區間設定為同色，依 0 至 360 度順時針方向，由紅至紫的八種彩虹色系色彩呈現(圖 4-6b)。
- (3)地形陰影(Hillshade)，透過假定的光源方向和角度，加上前述的坡度與坡向計算，演算出各個網格的陰影值(灰度值)，數值由 0 至 255，顏色由黑漸變至白(圖 4-6c)。
- (4)等高線(Contour)，由等值的高程相連而成的封閉曲線(謝有忠等，2014)。

另外還嘗試上述各項方法之間互相疊圖的應用(圖 4-6d)，並藉由繪製線性剖面(Profile)來觀察細部區域的高程變化。

根據前人文獻對於七星山的地形描述，初步對 6 m DEM 沿著斷層帶上的陷落區域依外形將可能的爆裂口位置一一圈繪出來。因爆裂口的特徵為其邊界通常坡度陡峭，故以坡度為主的方式搭配不同角度的日照光影圖做判釋和圈繪的工作。後續對 1 m DEM 也依循相同作法來進行(圖 4-7)。

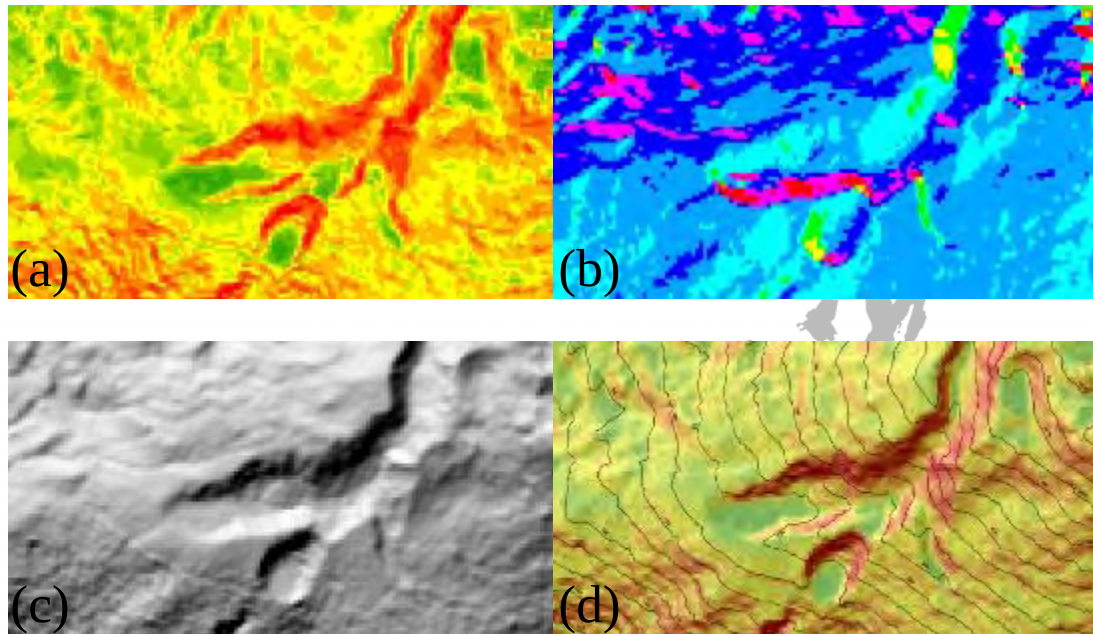


圖 4-6、地形計測之三維分析方法示意圖(LiDAR 影像為中央地調所提供)。
(a)坡度圖；(b)坡向圖；(c)地形陰影圖；(d)綜合疊圖。

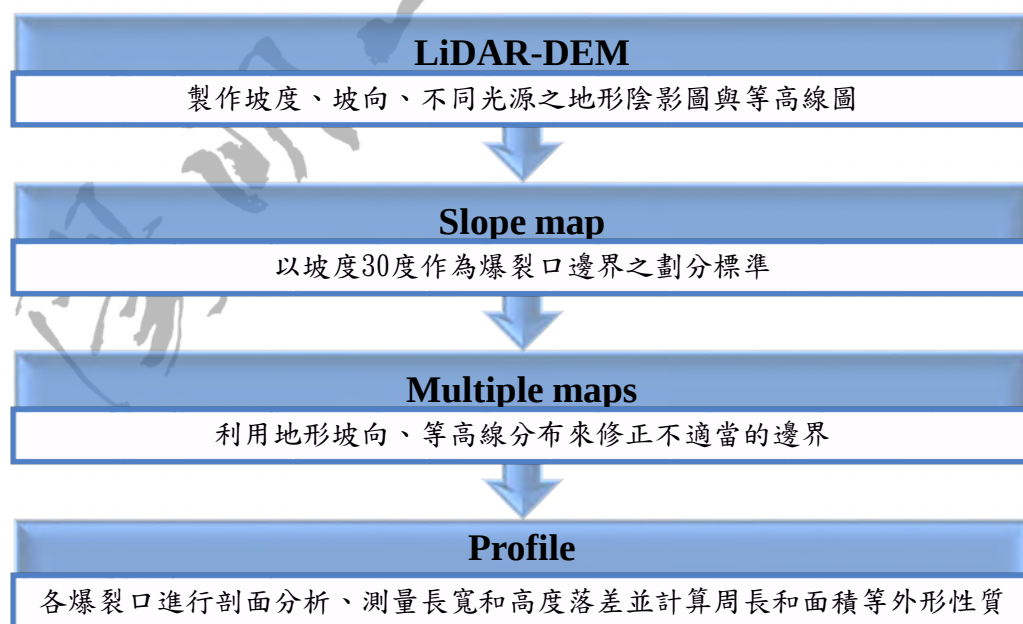


圖 4-7、地表形態之判釋與圈繪步驟流程圖。

(三)、DEM 判釋結果與野外調查

1、6m DEM 結果

由 DEM 觀察七星山火山體周圍之火山地形，並利用現今可見之小油坑爆裂口邊緣界線做為判釋爆裂口的依據，認為在地形上可描述爆裂口的特徵為：兩側或是四周陡峭、中央低平陷落，並沿線性排列之似橢圓狀構造(圖 4-8 半透明七彩多邊形)。這些爆裂口分布於七星主峰東側和西側各一條的正斷層上(Chen and Wu, 1971)。然而在調查上僅見山體張裂之裂隙，並無實地證據顯示此正斷層之錯移活動與方向，故本研究不討論其斷層性質，而是以七星山東、西側張裂帶(Rifting zone)分別表示之(圖 4-8 紅色虛線)。

七星山西側張裂帶初步判釋出 8 個爆裂口，以 WFC1 至 WFC8 命名之，其外觀性質如表 1-1 IAVCEI 選定的 16 座全世紀末十年火山所示。其中 WFC6 和 WFC7 位在鴨池(七星池)之封閉谷地中，後來考量其整體地形封閉完整，將其二者合併為一爆裂口，稱為鴨池爆裂口(DP)。西側張裂帶的裂隙還呈現出分支的特徵，如 WFC1 與 WFC2 不位在同一線上；小油坑及其向上之張裂裂隙可連接至 WFC5 上，或為另一張裂帶分支。此外，張裂帶有向西南方下游溪溝、山谷延伸之趨勢。

七星山東側張裂帶初步判釋出 6 個爆裂口，以 EFC1 至 EFC6 命名之，其外觀性質如表 4-1 七星山地區爆裂口之 6m DEM 地表形態性質表所示。這些爆裂口外形較為扁長，皆排列於同一線性方向上，向東北似可延伸至七股山南坡一帶之破碎地形；西南方向上則有中山樓溫泉區的陷落谷地，可能和東側張裂帶屬於同一張裂系統。夢幻湖緊鄰東側張裂帶，因湖水長存而積滿沉積物，不排除其曾經也是爆裂口的可能性，但目前已無法觀察。本研究略繪出夢幻湖之平坦區域做為面積大小的比較參考。

根據所繪小油坑至冷水坑之西北—東南剖面(圖 4-8 下方)，清楚顯示張裂帶通過七星山體的位置：西側位於鴨池(距離約 480m 處)，東側則介於夢幻湖與冷

水坑之間(距離約 1,900m 處)，足見其明顯之高程落差。

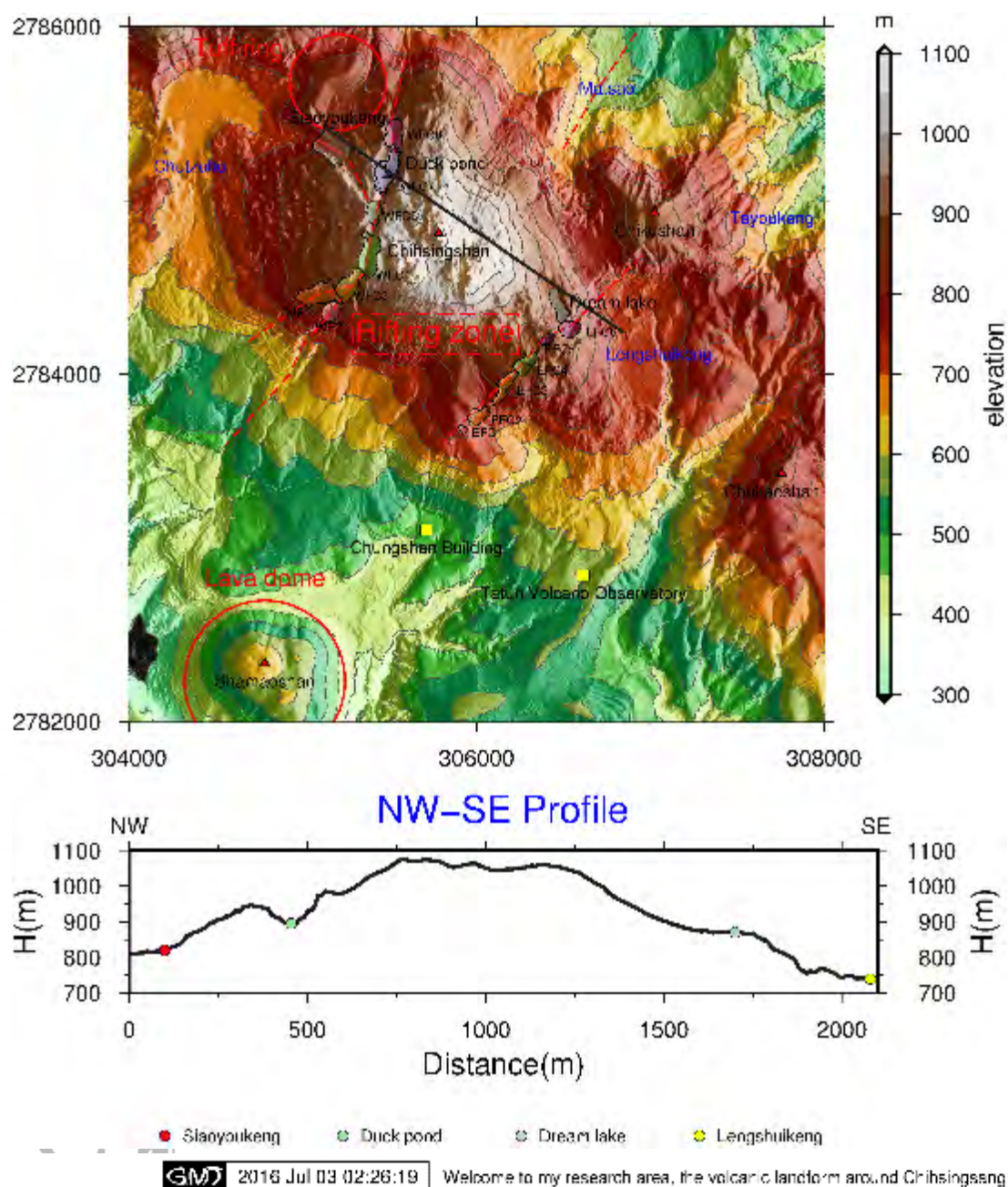


圖 4-8、七星山地區火山地形與爆裂口位置之 6m DEM 地形高程疊合圖。
紅虛線為裂隙(張裂帶)；粗黑線為小油坑至冷水坑之西北—東南剖面。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

表 4-1 七星山地區爆裂口之 6m DEM 地表形態性質表為使用 ArcGIS 計算所描繪的爆裂口大小和略估的長寬和落差(兩側崖高與中央低地之高程差)，顯示出西側爆裂口(WFCs)之間寬度相似，普遍較東側爆裂口(EFCs)的寬。WFCs 粗估陷落面積約 10,000 至 20,000 m²，而部分爆裂口中尚可再細分出更小規模的爆裂口；EFCs 則略小於 10,000 m²，有的甚至未達一半。不過兩者所含爆裂口最大規模之差異並不大，故一較大的爆裂口其大小可視為約 10,000 m² 左右。巧合的是夢幻湖之平坦區域面積也是在約 10,000 m² 左右，和爆裂口之規模大小相仿。其他關於爆裂口之比較將由更佳的 1m DEM 結果來呈現。

表 4-1、七星山地區爆裂口之 6m DEM 地表形態性質表

名稱	周長(m)	面積(m ²)	海拔(m)	長(m)	寬(m)	落差(m)
WFC1	390	9440	790-850	130	100	40/20
WFC2	740	22330	800-870	220	100	35/15
WFC3	670	16760	850-950	190	100	40/15
WFC4	780	21750	950-1000	220	100	20/45
WFC5	430	9280	955-980	140	80	10/20
DP	760	23280	890-950	280	140	50/30
WFC8	550	14580	845-890	170	100	35/50
SYK	710	30050	790-880	210	150	50/40
EFC1	160	1600	750-765	50	40	10
EFC2	440	8710	730-760	140	80	10-40
EFC3	670	11020	760-840	230	70	20-80
EFC4	540	11030	825-870	150	100	40
EFC5	290	4100	865-895	90	50	20-30
EFC6	410	9250	825-870	120	100	40
DL	540	11700	865-870	190	65	5

2、1m DEM 與野外調查結果

利用 1m DEM 之描繪結果如圖 4-9 所示，將七星山地區的張裂帶分為三種：

小油坑、(七星山)西側與東側張裂帶，並描繪出其明顯的延伸區域；爆裂口僅針對外形較完整的特定幾個作描述。以下將張裂帶分段逐一呈現，以農林所之正射影像與 DEM 地形相互對比。

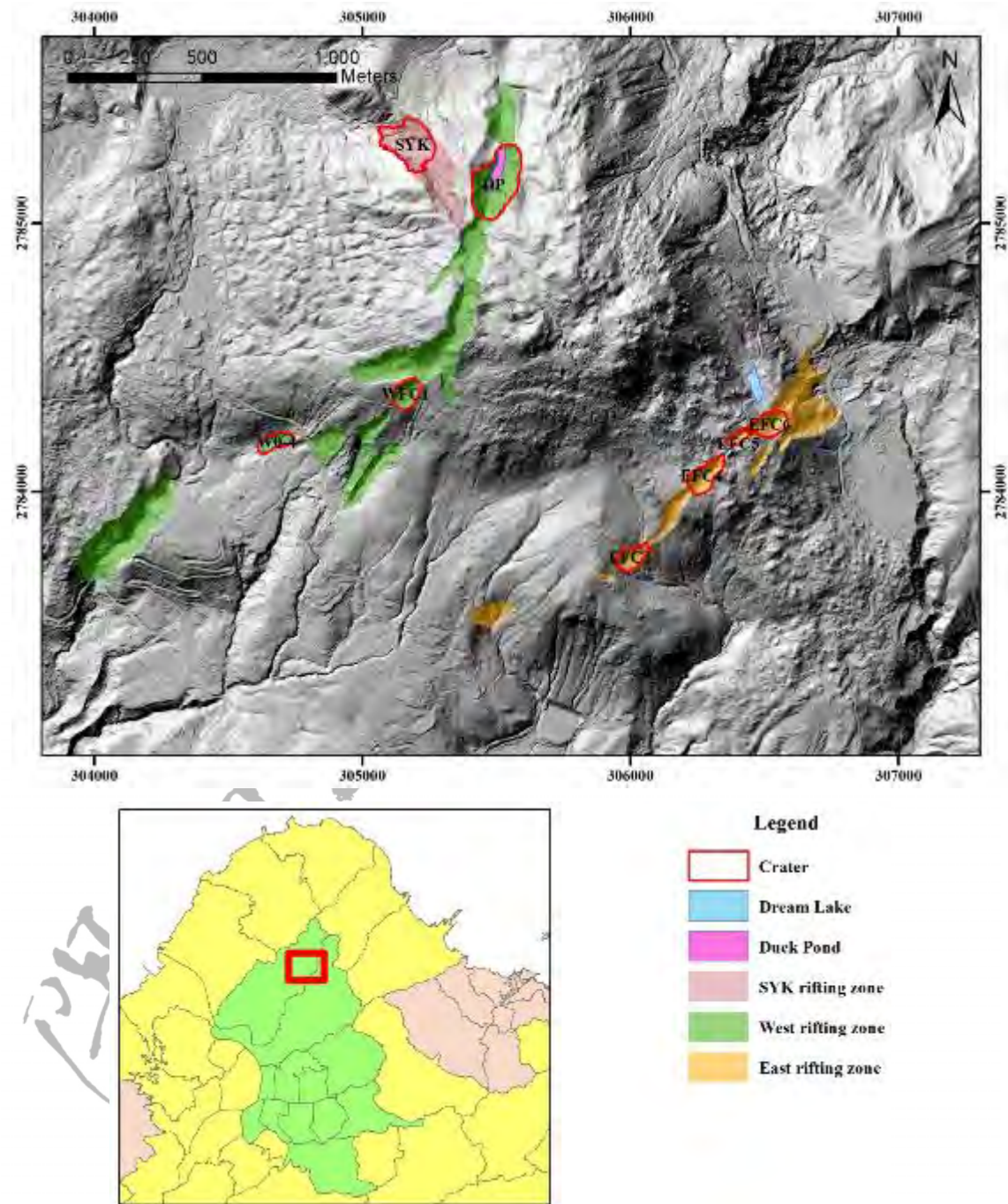


圖 4-9、七星山地區張裂帶與爆裂口位置之 1m DEM 地形陰影圖。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

(1)、小油坑張裂帶及西側張裂帶北段

小油坑為現存之爆裂口，終年不斷有活躍的噴氣現象。推測其成因很可能源自地底下熱的氣體累積壓力過大，向上釋放至地表產生大型的爆炸而留下之坑洞。又酸性氣體的環境使得圍岩漸漸蝕變成為結構鬆散的矽化岩，易發生崩塌，導致坑洞不斷向外擴大而形成今日所見之規模(表 4-2；圖 4-10)。小油坑並非偶然出現於這個位置，而是跟裂隙發展息息相關。小油坑張裂帶(包含小油坑爆裂口本身)呈一線性帶狀走向，向上延伸可通至 WFC5，可視為西側張裂帶其中的一分支裂隙。而小油坑張裂帶至今仍不斷有熱氣上湧，顯示其可能為最年輕的張裂活動產生之裂隙與噴氣孔(圖 4-10 藍點)。

鴨池為小油坑附近一封閉幽靜之谷地，其池水位置依所在高度不同可分為下池、中池與上池三處。池水於四季不同時間之水位變化極大，乾季谷底乾涸，雨季則可蓄水達 2 公尺以上。谷底周遭幾乎為植被所覆蓋，僅下池旁可見性質鬆軟之岩壁，為火山碎屑物偶夾一些安山岩塊。下池與中池間散落著許多大型堅硬厚實的安山岩塊，推測由四周陡峭崖壁的崩落而致。中池與上池間有著近 10 公尺的高低落差，外觀仿若一天然岩堤。若依地形而言，將 3 池各自視為一小型爆裂口，由岩堤分隔，也是一種合理的解釋。

WFC5 位置特殊，為張裂帶的交會口，有明顯的橢圓外形低地。中央低地已布滿植被，而西側邊緣可見多處裸露之噴氣孔活動，有向西南延伸出分支裂隙的趨勢。七星步道通過 WFC5 邊界南緣之高嶺，為西側張裂帶高程最高處，故以此界線來分段，正是恰到好處。

表 4-2、小油坑爆裂口及其張裂帶之 1m DEM 地表形態性質表。

小油坑	周長(m)	面積(m ²)	高程(m)	長(m)	寬(m)	落差(m)
小油坑爆裂口(SYK)	1100	25850	760-900	220	150	30-60
小油坑張裂帶總和		55850	760-980	450		

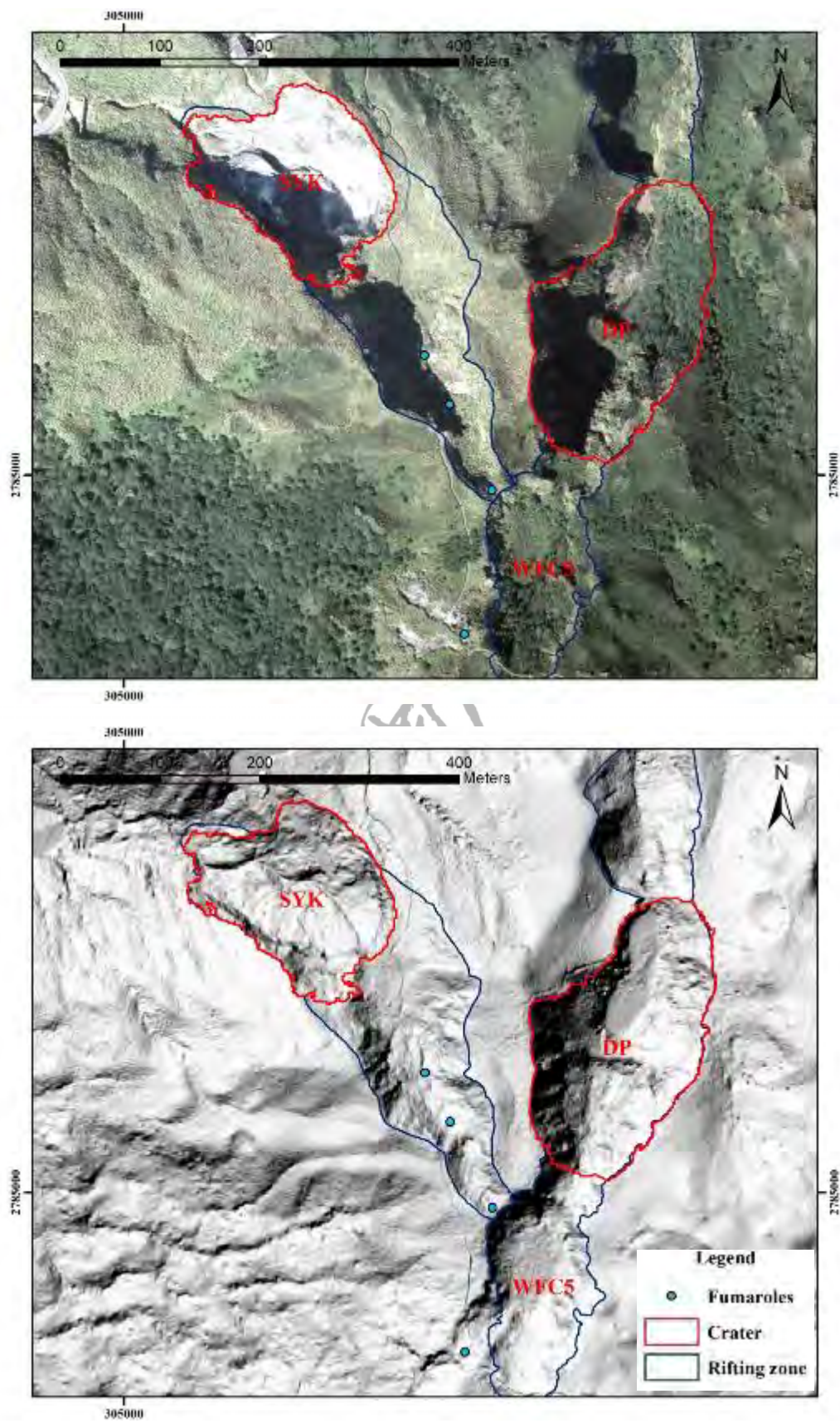


圖 4-10、小油坑張裂帶及西側張裂帶北段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

(2)、西側張裂帶南段

西側張裂帶於七星步道以南，在先前定為 WFC2 至 WFC4 的位置，雖有幾處隱約能看出似橢圓狀構造，實際上裂隙區域已串連成一條帶狀，且中央低地有溪溝痕跡通過，顯示其間並無岩堤的阻隔，難以互相區隔描繪，故不細究其大小。此區植被茂密，行走困難，未有明顯之野外露頭。在 WFC2 西南緣低平處湊巧發現一小水池，作為岩芯採樣之理想地點。

WFC1 為人造宮廟建築—金露天宮所在的爆裂口，橢圓狀外形甚為完整，三面封閉且中央陷落，開口向西南方。本研究又稱之為金露爆裂口。遇雨量較多的時節可短暫蓄水成一天然小池塘，估計也有沉積物的堆積。然而池中央已受到人工鋪設水泥的影響，廟宇建築也阻礙了現地觀察整個爆裂口地形的機會，實為可惜。

WFC1 沿西南方開口可向下游連結到 W0-2 的谷地區域，出露熱液換質帶與溫泉，名為竹子湖溫泉露頭(圖 4-11 藍點)。換質帶之噴氣現象不明顯，但有硫磺結晶生成，硫氣作用仍存在，且有溫泉露頭和許多取用溫泉之水管管線，顯示此區尚有微弱的地熱活動徵兆。W0-4 位於胡宗南墓後方之谷地，呈半橢圓狀，開口向西南，有溫泉出露以及鬆軟砂化帶的岩壁(宋聖榮，2005)。

W0-2 換質帶呈狹長型，與張裂之裂隙相似，且 W0-4 似為一爆裂口，故本研究認為其可代表西側張裂帶向下之延伸。依此原則尋找出裂隙延伸的谷地共 5 處，以 W0-1~W0-5 表示，而這些谷地皆有溪流通過，故受外力侵蝕影響較大。後續經由野外調查結果研判，僅 W0-2 與 W0-4 發現換質作用的跡象，其他的推測為溪流切過原先存在之裂隙，其侵蝕產生加劇放大谷地的效果。尤其是在 W0-5 溪流的溯源侵蝕，形成連續瀑布群之景觀，和本區裂隙關係較不清楚，遂未呈現之。西側張裂帶之外觀性質比較由表 4-3 所示。

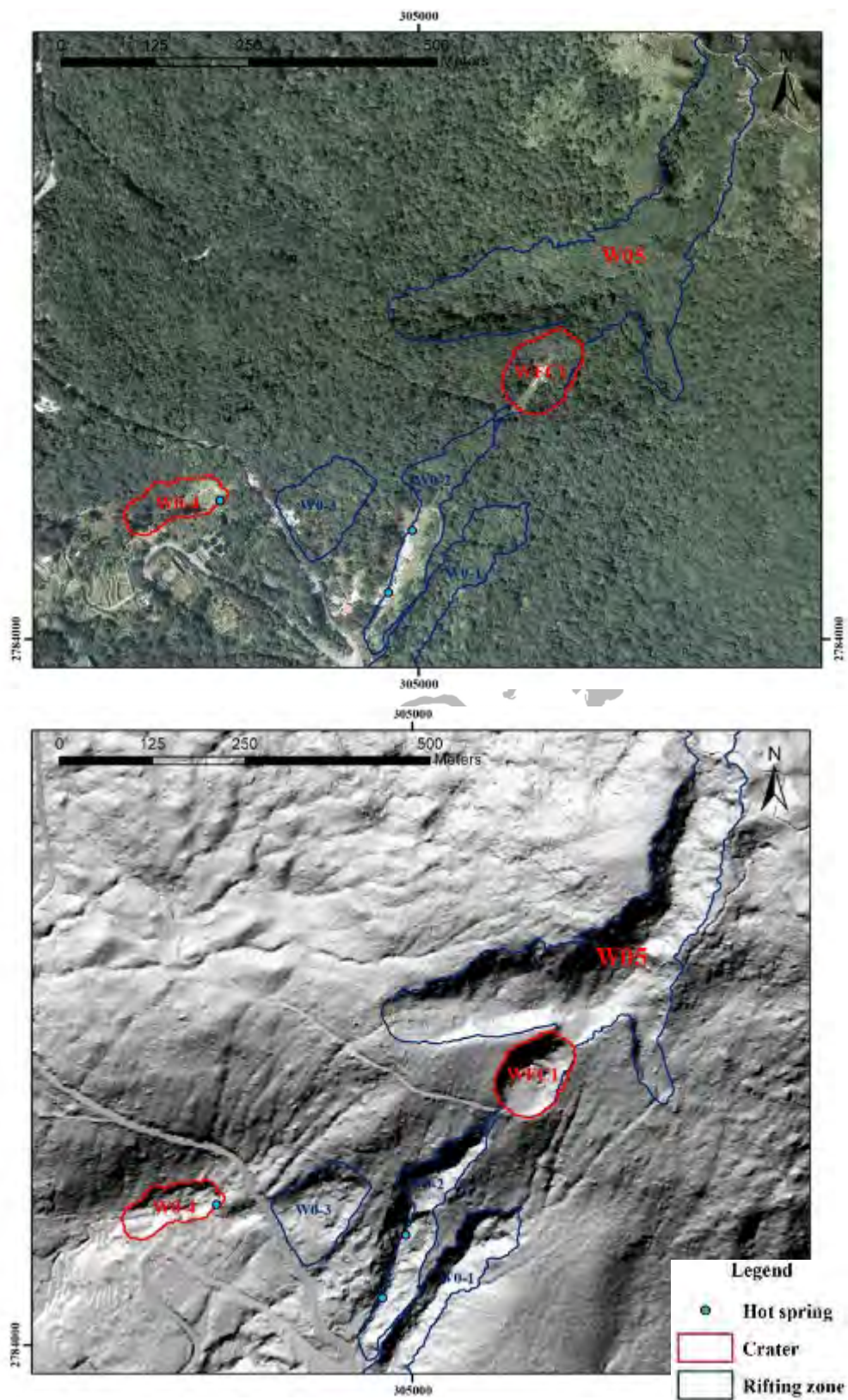


圖 4-11、西側張裂帶南段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。

(LiDAR 影像為中央地調所提供)

(3)、東側張裂帶北段

東側張裂帶在此區有三個明顯外形的爆裂口：EFC4、EFC5 與 EFC6，以原先定為 EFC3 之狹長裂隙為南北之分段。EFC4 下部分為明顯圓狀和好幾十公尺的陷落，但和上部分的另一個較小的陷落邊緣有重疊，難以劃分開，得將二者合併為同一爆裂口，整體呈現似葫蘆狀外形。EFC5 之形狀較其他更為扁長，所在的高程為東側張裂帶之最高。EFC6 有向東北傾斜的坡向，低區較偏中央東側，與其他爆裂口不同。夢幻湖則位在 EFC6 北側上方之平坦區域。

實地探查時，在 EFC4 中布滿箭竹等植物，宛若密林，未達陷落中央即無法前行。步道旁有一觀景涼亭緊鄰 EFC5，可輕而易舉觀察 EFC5 的凹陷地形，以及其表面布滿芒草，未有岩石露頭。然而周圍高低落差之大，竟也無法以安全的方式抵達凹陷中央，估計得使用到垂直吊掛的工具。同樣的情況也在 EFC6 出現，有一種「可遠觀而不可褻玩焉」的無奈。

EFC6 以東至冷水坑尚有地形破碎區，存在著多組裂隙，非一完整爆裂口。因於東側冷水坑的位置受到開發的影響而無法反映原始地形樣貌，便無法有效判釋張裂帶的範圍。本研究略將冷水坑以西所有可能裂隙繪入，稱之為不完整區域。冷水坑旁有一人工硫磺口(圖 4-12 藍點)，代表有硫氣於此釋出，為裂隙存在的證據之一；冷水坑著名的白色牛奶湖(圖 4-12)，也是由硫的懸浮膠體所致，兩者皆在東側張裂帶的延伸方向上。磺坪(七股山西側平坦地區)與冷水坑之間的陡崖落差可能為東側張裂帶活動所造成，冷水坑另一有名的「冷水」溫泉也出露於附近。

東側張裂帶不僅延伸至冷水坑北側一帶，透過 1m DEM 更清楚觀察到七股山南坡地形上之異常破碎，並有數個似爆裂口的陷落地分布於附近，然其既不明顯也不規則。這顯示 EFC4 至 EFC6 相對較容易保留下完整之爆裂口外形特徵。

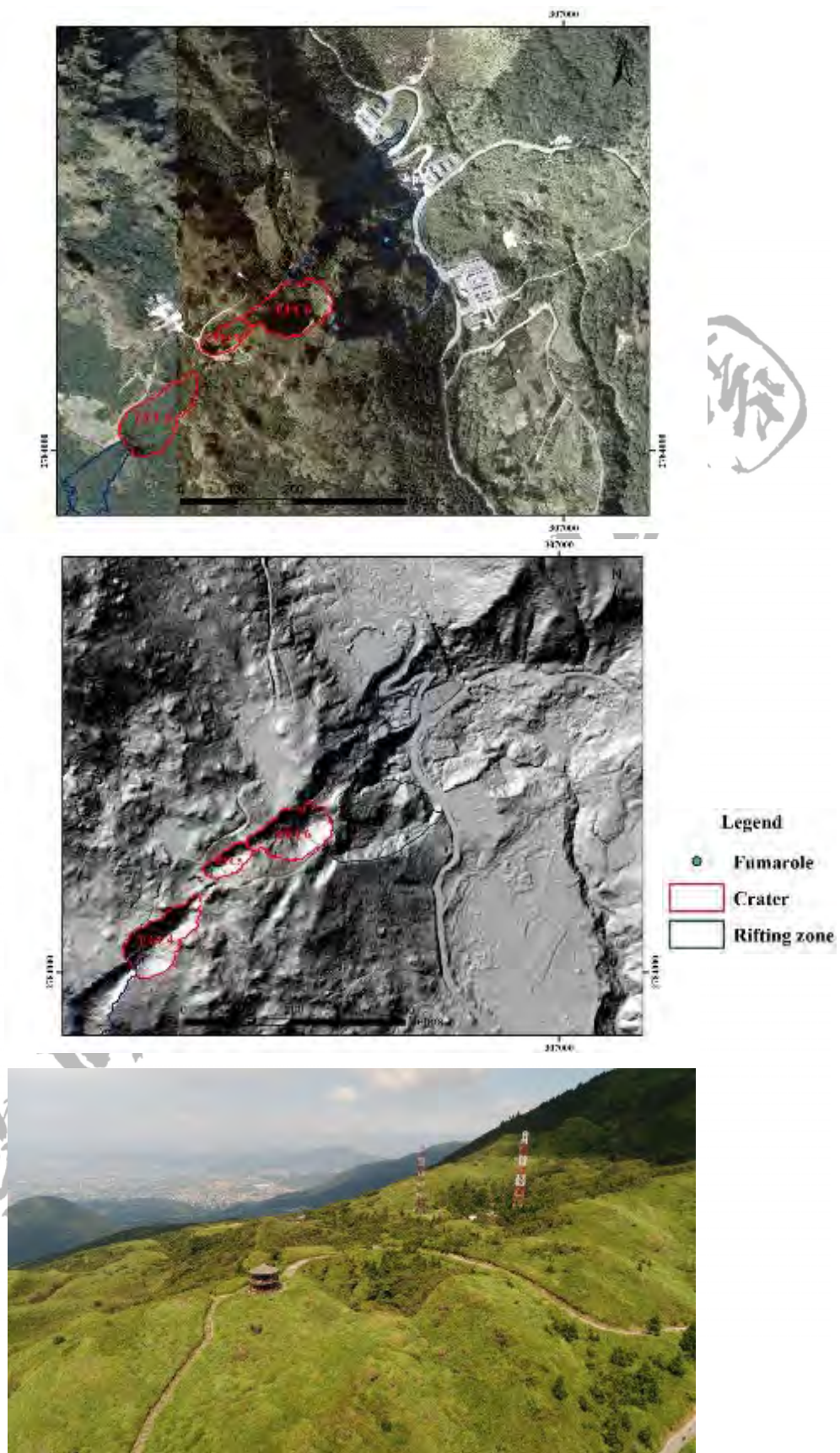


圖 4-12、東側張裂帶北段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

(4)、東側張裂帶南段

原先所繪之 EFC3 銜接 EFC4 至 EFC2 的裂隙，下半部因高程陡降而有彎曲轉折的外形。探查 EFC3 的實地情況就像隱密的一道溪溝，同樣寸步難行。EFC2 是個被礮溪內溪其一支流(舊稱松溪)切穿的爆裂口，凸顯其受到溪流侵蝕作用影響而有所變形的邊界外緣，但仍能從三面陡峭和一較平坦的中間凹陷地帶給描繪出來。EFC2 中央受沉積物填平，推測其沉積物大多為上游沖刷下來的安山岩屑為主。

EFC1 為所見最小面積的爆裂口，橢圓外型明顯，可作為單一小型爆發的規模大小依據(表 4-4)。E0 為東側張裂帶西南延伸上的一陷落地，然而其亦有一溪流通過，並在此分成兩道小支流，地形受水流侵蝕影響極大，可能導致其符合爆裂口條件的假象。故僅呈現於表 4-4，而排除於討論中。

中山樓溫泉區出露好幾處溫泉與噴氣孔，地熱徵兆旺盛(圖 4-13 藍點)，又其約略位在東側張裂帶西南向之谷地，屬於同一張裂帶系統的可能性極高。中山樓溫泉區之陷落區域是否為一爆裂口，因中山樓等人為建築的建造，目前已無從進行判釋。不過從許多面向皆指示著此區有很強烈熱液換質現象：除了多處溫泉露頭之外，於中山樓北側山坡上有三處裸露出來之灰黑色岩石(圖 4-13 橘圈)，經野外確認為熱液換質嚴重之矽化岩。雖說目前已無觀察到任何高溫的跡象，但仍表示此山曾經為熱液換質作用區域。若將此山和中山樓溫泉區視為熱水、裂隙發展之通道，便能與東側張裂帶串連成一線。另還有一溫泉露頭出露於松溪溪谷上(圖 4-13)，顯示裂隙影響範圍可能相當寬。

東側張裂帶之外觀性質比較由表 4-4 所示。

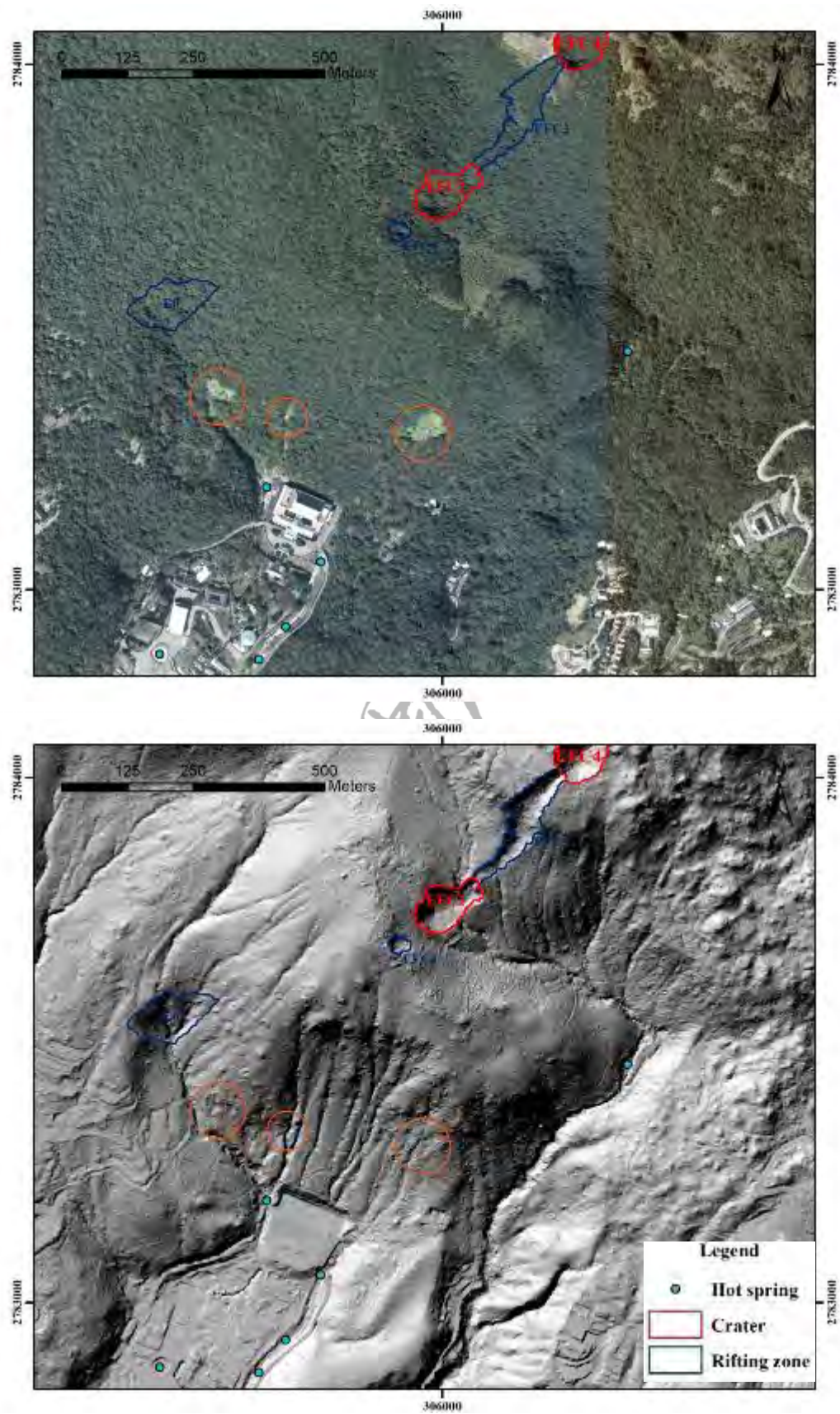


圖 4-13、東側張裂帶南段與爆裂口位置之正射影像和地形比較圖。
(LiDAR 影像為中央地調所提供)

表 4-3、七星山西側張裂帶及爆裂口之 1m DEM 地表形態性質表。

七星山西側	周長(m)	面積(m ²)	高程(m)	長(m)	寬(m)	落差(m)
W0-1	860	15210	610-720	350	70	15-20
W0-2	850	14140	610-780	350	70	15-25
W0-3	430	10910	620-700	130	90	5-10
W0-4	490	6500	560-610	140	50	15-20
*W0-5	1440	61110	390-550	480	160	60-80
金露爆裂口(WFC1)	490	8690	790-850	130	100	20-40
鴨池爆裂口(DP)	1090	35190	890-950	280	140	30-50
西側張裂帶(不含 W0)		151250	790-950	1300		
西側張裂帶總和		259120	390-950	2500		

表 4-4、七星山東側張裂帶及爆裂口之 1m DEM 地表形態性質表。

七星山東側	周長(m)	面積(m ²)	高程(m)	長(m)	寬(m)	落差(m)
*E0	480	10270	550-620	180	90	20-40
EFC1	200	1100	750-765	50	40	10
EFC2	540	8030	730-760	140	80	10-40
EFC3	1040	11440	760-840	230	70	20-80
EFC4	620	10760	820-880	150	100	40
EFC5	320	3200	865-890	90	50	20-30
EFC6	620	10160	820-890	120	100	40
不完整區域(冷水坑旁)		40510	740-860			
東側張裂帶(不含 E0)		85200	730-890	1200		
東側張裂帶總和		95470	550-890	1600		

*W0-5 與 E0 之裂隙意義不明，排除於討論中。

(四)、碎形幾何理論分析

1、碎形幾何理論背景介紹

碎形幾何理論源自於數學幾何學上的碎形(fractal)，原意是破碎的或不規則的(Mandelbrot, 1967)。碎形幾何的概念源自於自然萬物中無法用簡單且規則的點、直線、矩形、圓形等傳統歐氏幾何(Euclidean Geometry)詮釋的形體和現象。曼德

博在此著作作用許許多多的碎形幾何模擬出地表樣貌，代表著大自然萬物也是由碎形組成，隱含著某種規律性，可以說是無所不在。因此，碎形幾何可用來描述普遍存在自然界複雜系統中破碎或不規則現象其潛在的規律性(張志三，1996)，不同大小尺度上具有自我相似性質而可以無限延伸的結構。舉例來說，著名的曼德博集合(Mandelbrot Set)是由簡單的數學映射公式： $Z_{k+1} = Z_k^2 + C$ (Z 為複數， C 為常數)，經反覆疊代運算即可成形(圖 4-14 左)；蕨類的葉子內部的單一構造和整體形狀相似(圖 4-14 右)，是一種在大自然中具有良好碎形特徵的例子。

另一方面，碎形理論和混沌理論(Chaos Theory)兩者息息相關：碎形是一種靜態幾何，可描述系統的結構；混沌(Chaos)是一種動力行為，呈現系統的變化。自然界中，混沌系統俯拾皆是，而混沌雖然「混亂」，且對初始條件非常敏感，卻也隱藏著規律，封閉空間中混沌系統的軌跡往往最終都會落在一種具有無窮結構的碎形上，而系統也恢復到有序(order)的狀態。簡單來說，碎形是大自然的常態，是混沌的幾何(廖思善，2006)。最典型的例子為流體紊流(Fluid Turbulence)，當個別觀察此動力系統中流體對流的結果會是似隨機性而不規律的變化，而就統計結果來看則可呈現出碎形幾何的特性(Turcotte, 1997)。

2、碎形組成要素與特性

碎形的基本組成三要素為形狀(form)、機率(chance)和維度(dimension)(Mandelbrot, 1977)。形狀為區分不同碎形最直觀的要素；依照機率可將碎形分為兩大類：(1)具有嚴格數學規則之定率碎形(Deterministic Fractal)和(2)隨機和近似自我相似性之序率碎形(Stochastic Fractal)；維度概念的差異即是碎形幾何學與傳統幾何學在理論上最大的分歧與突破。

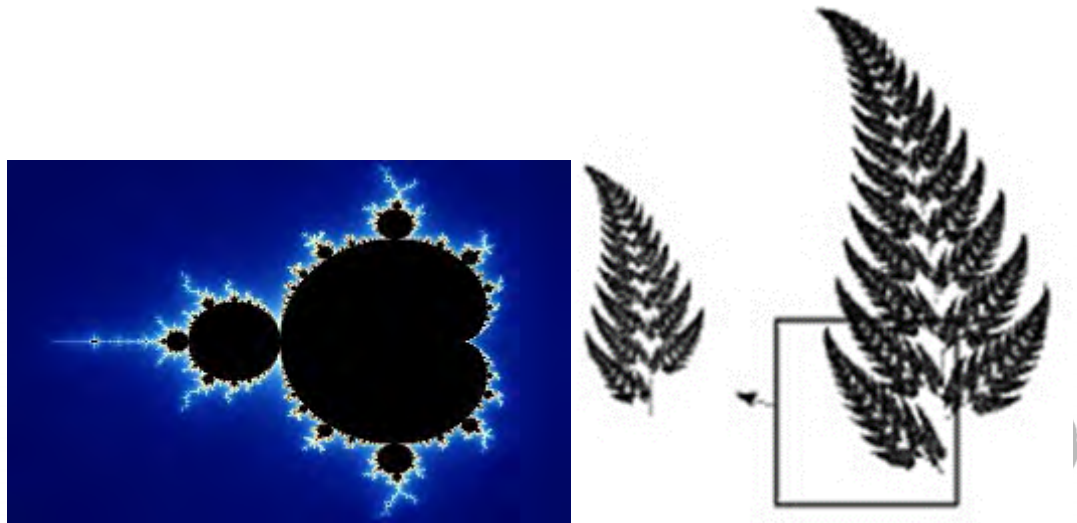


圖 4-14、兩大碎形幾何圖形代表。

左圖：曼德博集合，背景和圖形內部分別以藍色和黑色填滿，凸顯白黃色線段的無窮結構(https://en.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot_set)。

右圖：蕨類植物葉子在不同尺度大小下的自我相似性質(張志三，1996)。

若物體本身並非一個完整的形狀，在不同尺度下又會呈現另一種相似的形狀，這樣的物體即為具有碎形的構造(Burrough, 1981)。根據前人對碎形的描述，碎形的主要特性可歸納為3大點：

- (1)自我相似性(self-similarity)，表示某種結構的特徵不論空間尺度的縮放看起來皆為相似，或是細微部分和整體的樣子大致相同。自我相似性本身也隱含著一種整體性，可由小尺度推知大尺度的大致樣貌，反之亦然(圖 4-14 右)。
- (2)尺度不變性(scale-invariant)，觀察測量地質現象時需要用適當的比例尺作為單位基準，稱為特徵尺度，而理想的碎形幾何沒有特定的尺度，即為無標度性或尺度不變性。然而一般自然界的物體只在特定的尺度範圍下才具有自我相似性和尺度不變性，屬於序率碎形或稱作統計碎形。
- (3)碎形維度(fractal dimension)的值為非整數。維度的定義是量測一集合其在座標上表現的行為，在縮放形狀之過程中所需最少的次方關係來重塑此集合，這

個次方即是維度(D)。形狀規則的傳統歐氏幾何圖形其維度只有整數：零維是一點，一維由直線組成，二維是平面，三維則是立體(圖 4-15)。碎形維度則跳脫整數的框架來描述物體破碎或不規則的程度：介於直線和平面的曲線，其碎形維度介於一至二維之間，曲線越複雜則數值越趨向 2；同理，介於平面和立體之間的複雜曲面，其碎形維度則介於二至三維之間，曲面越複雜則數值越趨向 3(圖 4-15)。總而言之，碎形維度可以用來比較物體間其某種特性變化的程度。其他有關碎形的細節可參考黃怡靜(2007)彙整許多前人文獻的詳盡內容。

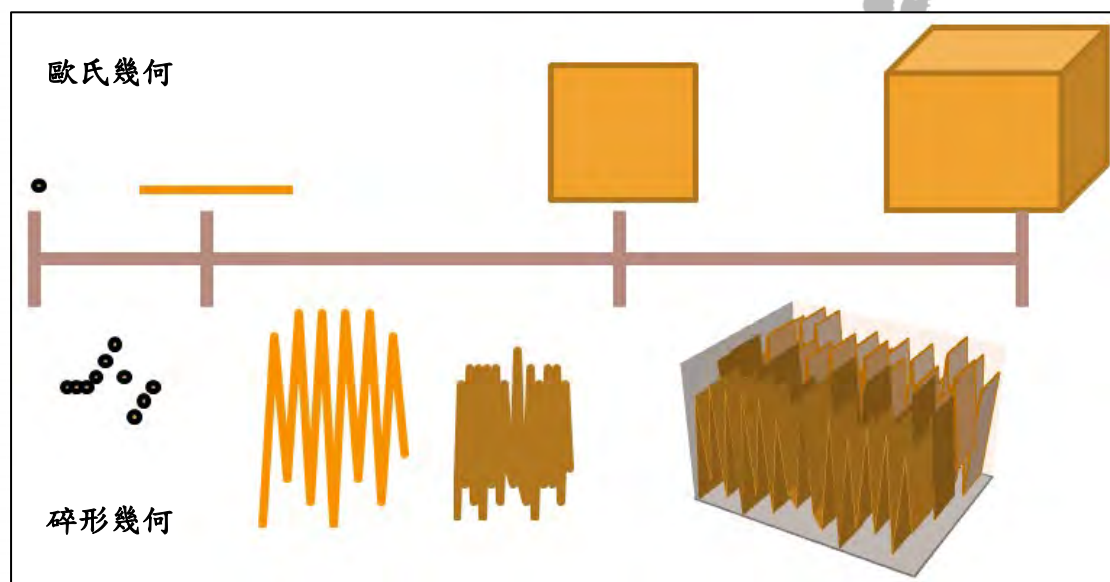


圖 4-15、碎形幾何與歐氏幾何區分圖(改繪自 Burrough, 1981)。

「碎形幾何」這個名詞是 1960 年代誕生的，但早在 19 世紀末就開始有數學家提出具備碎形特性的圖形。舉例來說，1904 年瑞典數學家寇赫(Helge von Koch)發明特別的曲線：寇赫曲線(Koch curve)，作法為將一條線段做三等分，中間的三分之一往上拉出一個正三角形，再把三角形底部去掉(圖 4-16 上綠色線段)，不斷重覆這些步驟無數次即能成形。若是以正三角形的三邊開始做出寇赫曲線，則會形成雪花狀的圖形，被稱為寇赫雪花(Koch snowflake)(圖 4-16 下)。

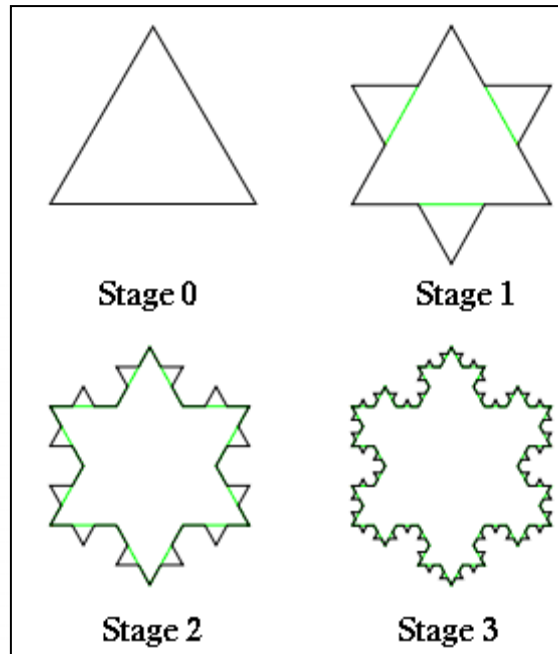


圖 4-16、寇赫雪花(Koch, 1904)。

上圖為成形過程示意圖；下圖為結果。

對於簡單的幾何圖形和寇赫曲線這類型的定率碎形，根據維度之定義計算碎形維度(D)的公式如下：

$$N = n^D \quad \text{式 4-1}$$

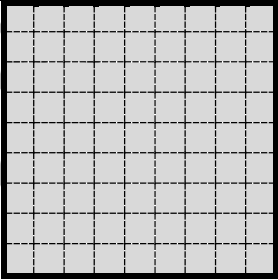
取 log 移項可得碎形維度 D 為：

$$D = \log N / \log n \quad \text{式 4-2}$$

其中 N 為量測要涵蓋滿原先圖形所需之數量(一維是長度，二維是面積)， n 為單位長的倒數， D 為碎形維度，又稱郝思多夫維度(Hausdorff dimension)。

選擇不同長度的單位長來量測 N ，在一維直線可直接地看出分成 3 段， N 即需要 3 個單位長的線段，故 D 為 1 ($N=n^1$)；二維平面的邊長分成 3 段後， N 則需要 $3*3$ 個和原先相似的方形，故 D 為 2 ($N=n^2$)；寇赫曲線在分成 3 等分之後出現 4 段和原圖形相似的曲線段，故 $4=3^D$ ， D 計算出來約為 1.2618 的非整數(表 4-5)。碎形維度之基本理論計算方法如式 4-1 和式 4-2 所示，後續發展出來之不同演算法，其原理皆基於此兩式。

表 4-5、自我相似圖形的碎形維度(廖思善，2006)。

圖形			寇赫曲線 
單位長	L^1 量度(長度)	L^2 量度(面積)	L^D 量度(一維碎形)
(1/n)	(N)	(N)	(N)
1	1	1	1
1/3	3	9	4
1/9	9	81	16
維度			
$D = \log N / \log n$	$\log 3 / \log 3 = 1$	$\log 9 / \log 3 = 2$	$\log 4 / \log 3 = \mathbf{1.2618}$

3、碎形理論應用方法

利用碎形理論來描述自然界這些不規則、不穩定且具有高度複雜架構之現

象廣泛地應用於地形地質、土地分析、流體水文、生態系統等不同領域方面的研究(林伯航, 2004)。自然界不可勝數的混沌系統中, 地形為地表受侵蝕作用所呈現的形貌, 也就具備在混亂之中潛藏的碎形特性。故理論上可應用碎形特性來模擬地形, 也提供了精確描述地形的數學方法(Feder, 1988; Xu et al., 1993), 可觀察不同地形所隱含之特性變化。

碎形理論做為研究複雜物體的基礎工具, 逐漸發展出不同的演算法來描述個別物體的特性。但是對於地形和地質上存在的複雜結構, 並沒有特定方法能夠完整詮釋, 僅能用統計的方式計算出碎形維度(序率碎形)來了解其代表的碎形特性(趙培文, 1995)。換言之, 不同的研究對象需要用不同的計算手段來做統計, 嘗試逼近其碎形維度。研究方法無專一性, 需視情況而做修改。

根據碎形理論研究地形特性的常用碎形維度計算方法如下:

- (1) 定規法(Divider method);
- (2) 盒子計數法(Box counting method);
- (3) 三角柱頂面積法(Triangular prism surface area method, TPSA);
- (4) 變異曲線法(Variogram method)。

各種計算方法之理論基礎不同, 所測得的值會不同, 代表的特性亦不同, 故不能將不同方法計算的結果混合比較(趙培文, 1995)。以下分別介紹這些方法的原理和應用, 以及對各方法使用的相關設定。

3.1、定規法

碎形幾何理論最早的論文研究為發明碎形的曼德博在 1967 年同年探討英國的海岸線長度問題, 認為數據結果是依觀察者與其對象而改變的。海岸線因量測尺度而異, 並無確定的長度, 基本上任何海岸線在某種意義之下皆為無限長(Mandelbrot, 1967)。當量測尺度較大所得之總長度會較小, 反之當量測尺度

越小所得之總長度會越大，故不同量測尺度和總長度之間存在一關係式(延伸自式 4-1 與式 4-2)：

$$D = - \log N_n / \log r_n \quad \text{式 4-3}$$

$$N_n r_n^D = 1 \quad \text{式 4-4}$$

其中 N_n 為段數， r_n 為相似率，移項得

$$N_n r_n = r_n^{1-D} \quad \text{式 4-5}$$

其中 $L_n = N_n r_n$ ， $S_n \propto r_n$ ，可得

$$L_n = C S_n^{1-D} \quad \text{式 4-6}$$

或 $\log L_n = C + (1-D) \log S_n \quad \text{式 4-7}$

其中 L_n 為總長度， C 為常數， S_n 為量測尺度， D 為碎形維度。 D 值越大表示海岸線越不規則，反之越平直。可利用像是定規法等方法，量測不同尺度的海岸線總長度，迴歸得到斜率 $1-D$ ，即可求得碎形維度 D (葉寶安和李錫堤，1994)。

一維的自我相似碎形，以定規法的量測方式：考慮一數值曲線(圖 4-17)，假設該曲線有 N 個點，則兩點間長度 d 以畢氏定理求得，並求出平均長度 $\overline{d}$ 。

$$\text{量測尺度通常取為 } 1 S_n = \overline{d} \cdot 2^{n-1} (n=1, \dots, n_{\text{MAX}}) \quad \text{式 4-8}$$

n_{MAX} 一般以不使量測尺度大於最大直線長的二分之一為原則，亦可由相關係數來決定；若不同幾何物件欲比較其碎形維度時，應取相同的量測尺度(葉寶安，1994)。

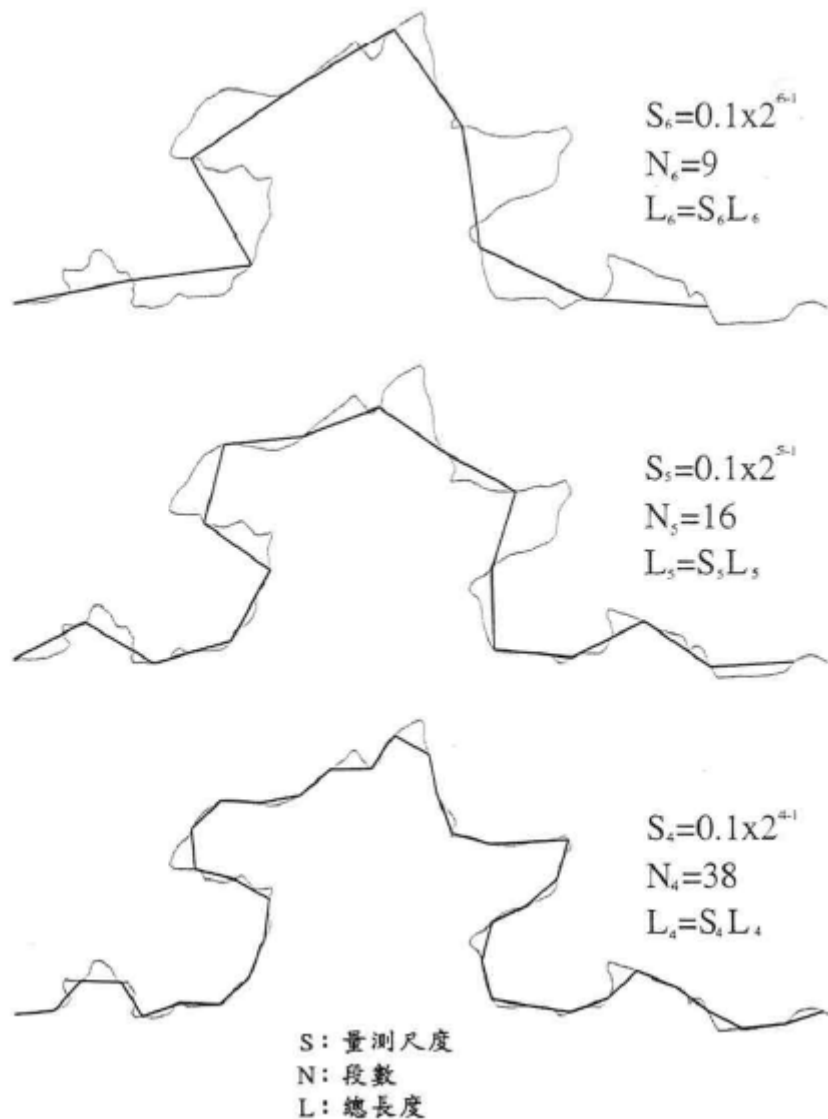


圖 4-17、定規法量測碎形維度示意圖(葉寶安，1994)。

葉寶安和李錫堤(1994)利用定規法量測臺灣海岸線的碎形維度，比較並討論其所代表的特性。其中惟有金山斷層以南的東北海岸與蘇澳附近之碎形維度值較高，表現出岬灣海岸或沉降海岸的地形特性。本研究考量到定規法適用於描述大尺度的曲折海岸線，可能不適合用於僅數百公尺尺度的爆裂口邊緣界線(不論是手繪邊界或是坡度等值線)，遂不使用此方法。

3.2、盒子計數法

盒子計數法又稱格子法(grid method)，是將圖形以某特定邊長的方格進行切割，其方格邊長和圖形涵蓋的格子數可求出維度，也是一種自我相似維度(圖 4-18)。盒子計數法即是實際應用上最常見的方法之一(林伯航，2004)。運算原理與式 4-1 和式 4-2 相同，推導如下：

$$N(\epsilon) \propto (1/\epsilon)^D \quad \text{式 4-9}$$

其中 N 為覆蓋方格數目， ϵ 為方格邊長(尺度)， D 為盒計維度。

給定一個常數 C ：

$$N(\epsilon) = C (1/\epsilon)^D \quad \text{式 4-10}$$

$$\log N(\epsilon) = \log C + D \log (1/\epsilon) \quad \text{式 4-11}$$

當 ϵ 趨近於 0 時， C 可忽略，關係式可改寫為

$$\log N(\epsilon) = D \log (1/\epsilon) \quad \text{式 4-12}$$

$$D = \log N(\epsilon) / \log (1/\epsilon) \quad \text{式 4-13}$$

依公式 4-13 將所有的 ϵ 與 $N(\epsilon)$ 進行線性迴歸，求其斜率的絕對值即為盒計維度 (Cheng et al., 1999；黃怡靜，2007)。

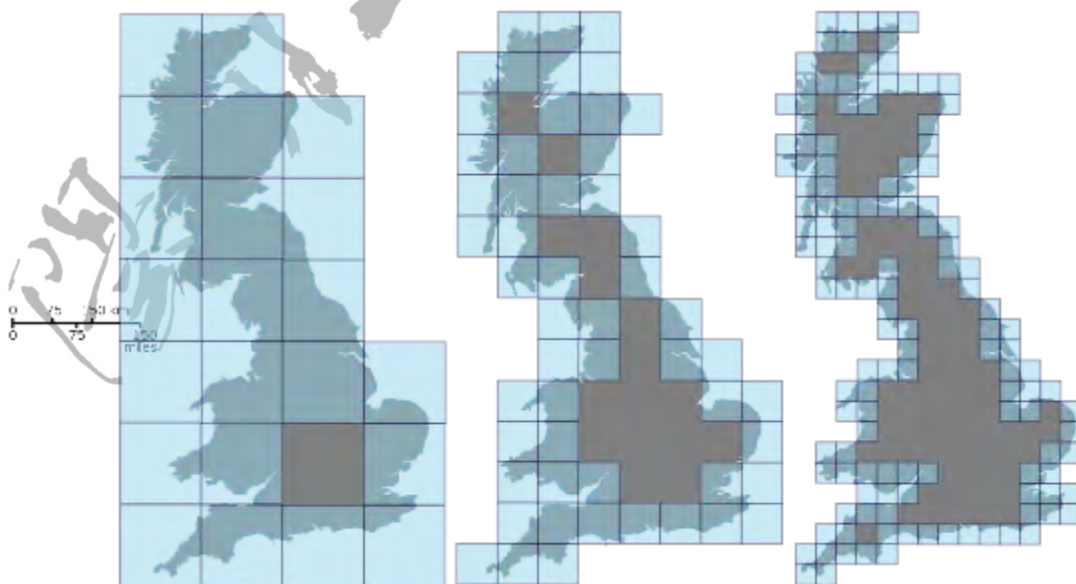


圖 4-18、盒子計數法切割方法示意圖——以英國海岸線為例。

From Wikipedia, the free encyclopedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Minkowski%E2%80%93Bouligand_dimension

Cheng et al.(1999)以中央大學 40m 解析度之 DTM 數據，利用盒子計數法將臺灣在八種不同分割階段，以不同尺度來測量高程上的二維自我相似維度。可看出地形起伏(relief)變化隨高程增加而越趨複雜，與一般認知相符。其中還顯示高程在 1000m 以上的維度值變化差距較小，可能代表侵蝕作用在這些山區的表現趨向一致等等(圖 4-19)。

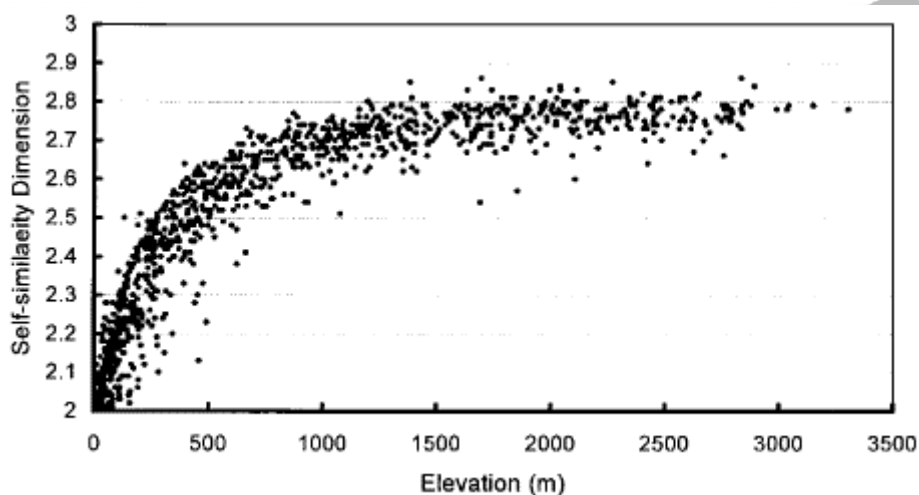


圖 4-19、高程與二維自我相似維度之關係圖(Cheng et al., 1999)。

因盒子計數法可廣泛用於測量一般所見之圖形，且在使用上較其他方法簡易又方便，受到的限制較小，故本研究嘗試利用此方法來探討爆裂口邊緣界線的一維碎形維度及其所代表的特性。

首先在設計方法流程與採用的量測標準等等測試，發現於 LiDAR-DEM 下手動判釋與圈繪的圖形因為是按照 6m 或 1m 網格邊長去描繪，爆裂口等地形又多為橢圓狀，可能使界線稍微變形或失真，故認為手繪邊界計算出來的碎形維度會有問題。因此，使用的圖形改為用 1m DEM 製作之坡度圖並做等值線(contour)，挑選出可代表爆裂口邊緣界線的等值線。後續選擇直接使用這些線段進行量測，並沒有將其分段連接成一個封閉圖形，也是為了排除主觀意識判斷描繪的偏差。坡度的大小則在坡度 30 至 50 度間會有較好的爆裂口邊緣外形。

研究方法設計如下：選定其中 30、40、45 度三種坡度的等值線進行網格計數(圖 4-20)。使用 ArcGIS 內建工具做出不同網格大小的魚網圖(Fishnet)，網格邊長定為 30、24、12、6、3、1m，共 6 種大小。將魚網圖和目標等值線進行疊合選取，記錄等值線所佔據的網格數目。以此網格大小和數目分別取 log 作圖得到一斜率為負的線性迴歸(式 4-12)，其斜率的絕對值即為所求曲線之一維碎形維度值(簡易步驟流程圖見圖 4-21)。

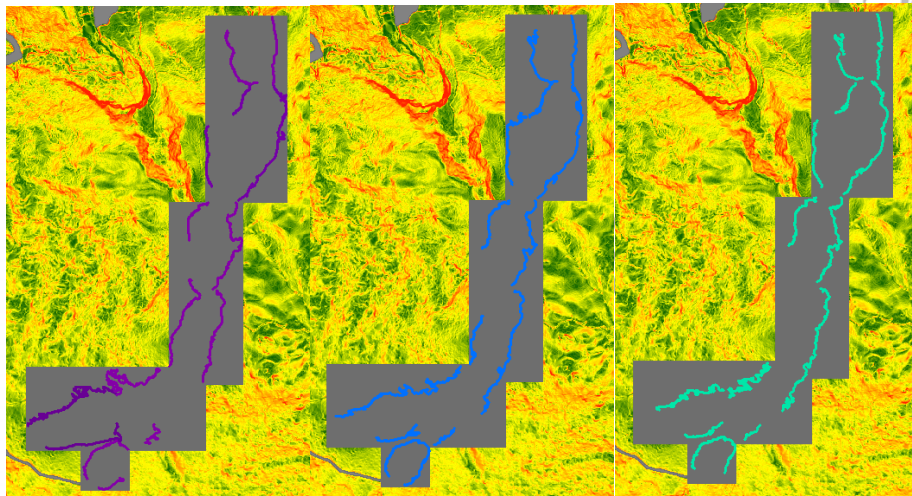


圖 4-20、坡度等值線。紫線、藍線、青綠線分別代表坡度 30、40、45 度。

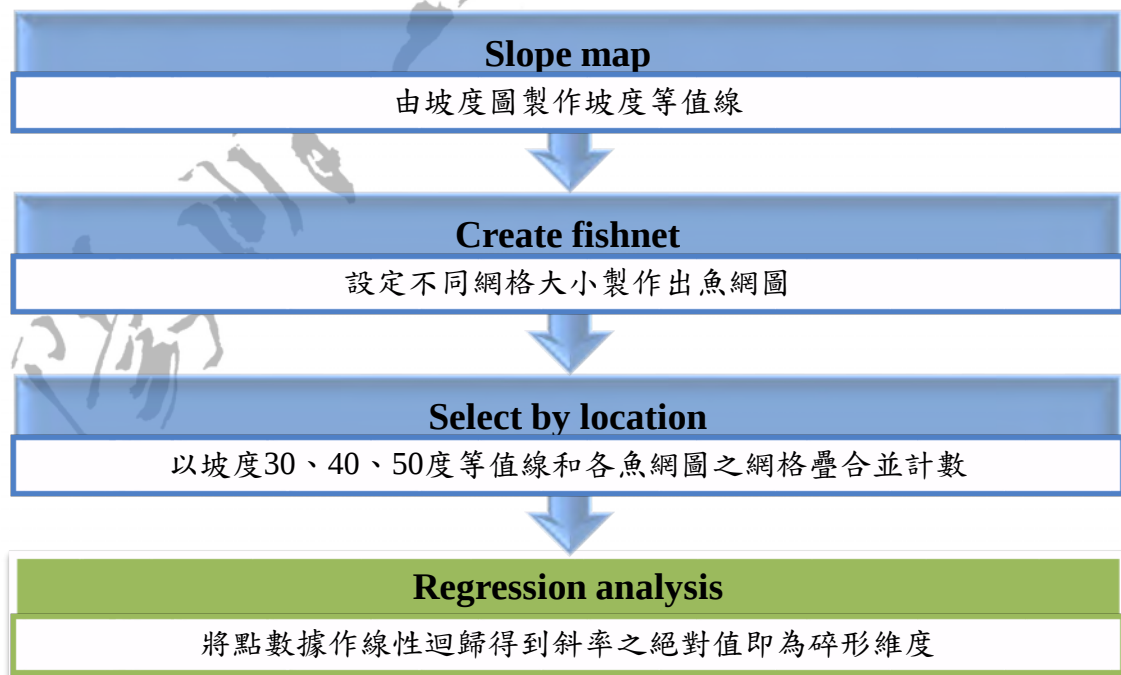


圖 4-21、盒子計數法之步驟流程圖。

3.3、三角柱頂面積法

三角柱頂面積法或稱三角稜柱表面積法(簡稱 TPSA 法)為 Clarke(1986)提出用來計算自我相似碎形維度之簡易幾何面積關係的方法，優點在於此方法簡單、圖像化、計算方便且快速等。其做法為由 DTM 讀取之高程資料，以不同基準面積量測地形面而得到不同之總面積：

$$A_t = C A_0^{(2-D)} \quad \text{式 4-14}$$

或 $\log A_t = C + (2-D) \log A_0 \quad \text{式 4-15}$

其中 A_t 為總面積， A_0 為量測基準面積， C 為常數， $2-D$ 為線性迴歸之斜率， D 即為二維之碎形維度(葉寶安，1994)。

計算過程首先選取矩陣資料中尺度長為 s 的方形其四角之 a, b, c, d 四點高程資料，求出四點平均高程 e 置於四點正中央，五點相互連線可形成四組三角柱組成之稜柱體(圖 4-22)。點與點間的距離 w, x, y, z, o, p, q, r 可由尺度長 s 和高程差之畢氏定理(Pythagorean theorem)求得，故四組三角柱的頂面積 A, B, C, D 可由海龍公式(Heron's formula)求出，面積加總即為 A_t 。 A_0 為尺度長 s 的平方。計算公式如下：

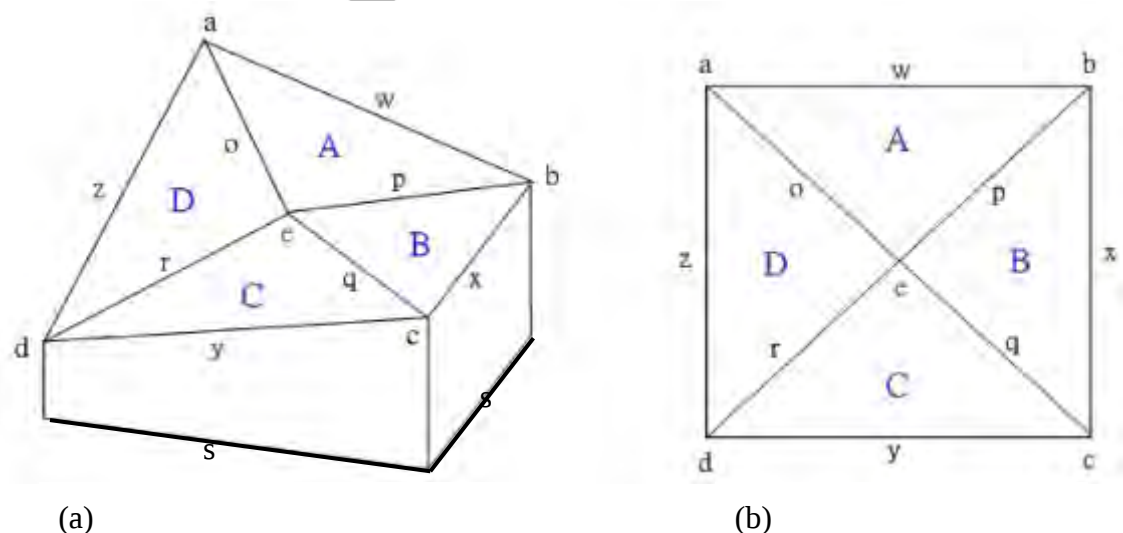


圖 4-22、三角柱頂面積法示意圖(改繪自 Clarke, 1986；黃怡靜，2007)。

(a)真實地表立面圖；(b)真實地表頂面圖。

選取高程值 $z_{i,j}$: $a = z_{i,j}$ 式 4-16

$b = z_{i+s,j}$ 式 4-17

$c = z_{i+s,j+s}$ 式 4-18

$d = z_{i,j+s}$ 式 4-19

$e = (a + b + c + d) / 4$ 式 4-20

其中 i 及 j 分別為資料矩陣之行與列。

求線段長 : $w = \sqrt{(b - a)^2 + s^2}$ 式 4-21

$x = \sqrt{(c - b)^2 + s^2}$ 式 4-22

$y = \sqrt{(d - c)^2 + s^2}$ 式 4-23

$z = \sqrt{(a - d)^2 + s^2}$ 式 4-24

$o = \sqrt{(a - e)^2 + (\sqrt{2}/2s)^2}$ 式 4-25

$p = \sqrt{(b - e)^2 + (\sqrt{2}/2s)^2}$ 式 4-26

$q = \sqrt{(c - e)^2 + (\sqrt{2}/2s)^2}$ 式 4-27

$r = \sqrt{(d - e)^2 + (\sqrt{2}/2s)^2}$ 式 4-28

求三角形半周長 : $sa = \frac{1}{2} (w + p + o)$ 式 4-29

$sb = \frac{1}{2} (x + p + q)$ 式 4-30

$sc = \frac{1}{2} (y + q + r)$ 式 4-31

$sd = \frac{1}{2} (z + o + r)$ 式 4-32

求面積 : $A = \sqrt{sa(sa - w)(sa - p)(sa - o)}$ 式 4-33

$B = \sqrt{sb(sb - x)(sb - p)(sb - q)}$ 式 4-34

$C = \sqrt{sc(sc - y)(sc - q)(sc - r)}$ 式 4-35

$D = \sqrt{sd(sd - z)(sd - o)(sd - r)}$ 式 4-36

$A_t = A + B + C + D$ 式 4-37

葉寶安(1994)利用 TPSA 法研究大屯火山區地形之碎形幾何特性，認為 TPSA 法確實能反映碎形維度之變化，其特性意義可代表地形坡度與高度差的變化。黃怡靜(2007)利用 TPSA 法探討臺灣本島地質與地形、碎形維度及地形參數之相互關聯性，結果顯示高度、坡度、地形起伏度及地表粗糙度皆呈高度正相關，也確實能反映這些地表特徵的變化(表 4-6)。

表 4-6、臺灣本島碎形維度與各項地形參數之相關性(黃怡靜，2007)。

碎形維度與各項地形參數相關係數(R^2)	
	碎形維度
碎形維度	1
高程	0.8592
坡度	0.9981
地形起伏度	0.9864
地表粗糙度	0.9355

另一方面，張秉良等人(2005)研究中國吉林龍崗火山碎屑的碎形，發現不同噴發類型的碎屑物其 TPSA 法之維度值有所差異，不同時期噴發碎屑物的比較也相異，故碎形維度可作為區分不同噴發源和劃分火山噴發地層序列的一種指標。吳宗叡等人(未發表資料)在 2011 年地質專題競賽中也嘗試用碎形的統計方法比對大屯火山群火山地形演育和年代的關聯性。以三角柱頂面積法在面積涵蓋大且易處理分析的熔岩流層序上得到好的統計結果，且和已確認的熔岩流先後形成順序相吻合，碎形維度越大則形成年代越久遠。故其認為 TPSA 法可定量且非主觀判定火山熔岩流層序，進而應用於缺乏野外資料、定年資料或無法直接地形判釋的地區(例如行星地質)，作為判斷層序上先後順序的一種依據。

因有上述許多前人研究的結果支持，本研究欲嘗試利用 TPSA 法探討爆裂口與張裂帶邊界的碎形維度所反映的特性。而葉寶安(1994)之研究區域和碎形維度的呈現方式，與本研究所需相近，遂以其研究處理方法做為基礎範本並做部分修改。

研究材料分別使用 1m 和 2m DEM 之高程值計算七星山地區的二維碎形維度。資料處理過程由 Arc GIS 設定 DEM 所要進行運算的座標範圍，將圖層剪裁 (clip) 為方陣，以 raster calculator 的 Int 功能將高程值化為整數，方能輸出高程值，為 ASCII(American Standard Code for Information Interchange)形式之文字檔(.txt)。接著由 Excel 開啟文字檔，以資料剖析將資料排列成矩陣。利用自己撰寫的 Excel 內建程式語言(Visual Basic for Application, VBA)程式碼對高程值矩陣進行上述的三角柱幾何運算(式 3-4-16 至 3-4-37)，其面積和尺度的 log 圖可求出二維的碎形維度值。再將碎形維度值之矩陣資料用 Join 功能匯入其所對應 DEM 座標的魚網圖 table 中，以顏色漸變來呈現碎形維度高低的變化，並另外疊加線性迴歸的決定係數(coefficient of determination, R^2)。簡易步驟流程圖如圖 4-23 所示。預計不同解析度所計算出的結果可觀察不同尺度的碎形維度值變化趨勢。

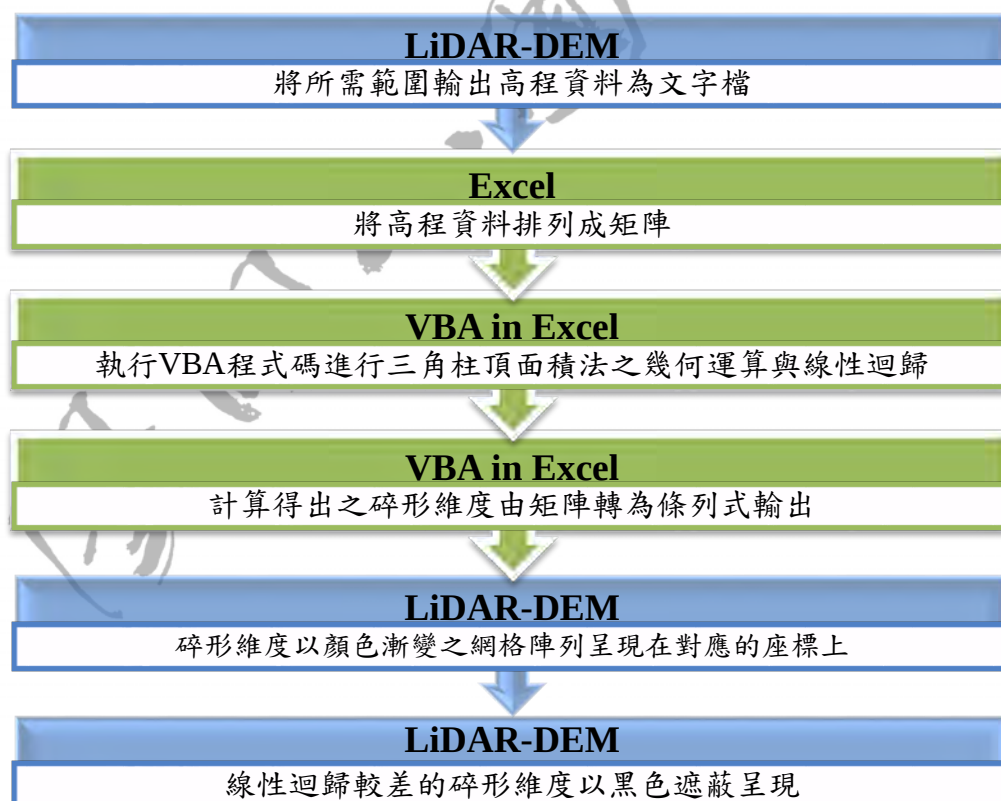


圖 4-23、三角柱頂面積法之步驟流程圖。

使用設定：輸入 1025 x 1025 筆高程資料成陣列，以每 17 x 17 筆讀取資料做為一標準矩陣，邊界會重複讀取，共 $64 \times 64 = 4096$ 個標準矩陣。對每個標準矩陣運算五種不同量測尺度大小的矩陣，分別為 1×1 、 2×2 、 4×4 、 8×8 和 16×16 單位(圖 4-24，須為 2 的次方才能在運算中完全覆蓋到所有資料)，求其三角柱頂面積和，取 log 後可得碎形維度值與其 R^2 共 4096 筆數據。1m DEM 輸入的陣列資料包含的 TWD97 座標範圍即是 $1025 \times 1025 \text{ m}^2$ ，輸出範圍是 $1024 \times 1024 \text{ m}^2$ ，網格邊長為 16m；而 2m DEM 資料範圍則為 $2050 \times 2050 \text{ m}^2$ ，輸出範圍是 $2048 \times 2048 \text{ m}^2$ ，為 1m DEM 範圍的四倍，網格邊長為 32m。結果輸出排列成二維座標的網格形式呈現在 DEM 上，每個包含 17×17 筆資料的網格有一個對應的碎形維度值，將碎形維度值由小至大排列，顏色由藍至紅。另外將其對應的 R^2 高低做為可信度高低的標準，將訂定標準之下的網格($R^2 < 0.9$)用黑色來遮蔽。

833	832	830	826	823	821	822	823	819	818	816	812	810	807	806	803	801
830	826	825	821	819	818	819	817	815	814	811	808	805	802	801	801	796
827	822	821	818	813	812	814	814	811	810	805	803	801	801	801	796	792
821	819	817	815	811	808	809	810	804	801	801	801	801	797	794	791	785
816	814	811	809	805	803	801	801	801	801	801	800	796	792	790	787	781
812	811	805	801	801	801	801	800	801	799	797	795	791	789	786	784	779
809	803	801	801	798	794	793	795	796	794	793	790	788	786	781	780	776
801	801	801	798	793	790	789	789	790	789	789	786	783	778	775	775	773
801	796	794	792	790	786	784	783	786	785	784	782	779	773	774	771	768
795	791	790	789	786	783	780	779	780	781	780	776	770	768	763	765	763
791	789	784	784	781	778	775	773	777	776	777	771	768	765	756	757	751
789	786	781	779	775	774	772	767	765	770	770	768	764	758	754	750	749
787	783	779	775	771	770	768	762	762	763	765	765	760	753	749	745	742
784	780	777	773	770	764	762	759	756	760	762	760	756	748	743	742	739
783	779	775	771	766	761	758	756	752	752	757	756	752	745	740	738	735
782	778	774	769	765	759	755	752	750	749	749	751	747	743	736	733	730
780	777	770	768	764	759	755	750	744	742	739	745	741	736	732	729	727

圖 4-24、不同量測尺度大小之矩陣示意圖。背景資料為 17×17 的標準矩陣。

3.4、變異曲線法

變異曲線法或作變異元法，源自於部分布朗運動(fractional Brownian motion, fBm)自我仿射(self-affine)性質的碎形，碎形維度在沿著 x 軸方向上，不因垂直 x 軸方向尺度的變化而改變(Mandelbrot, 1982；Turcotte, 1997)。一維自我仿射碎形為在地形剖面上兩點間距離差(lag, l)與高度差變異數期望值之關係式：

$$l = X_{i+h} - X_i \quad \text{式 4-38}$$

$$E[(Z_{i+h} - Z_i)^2] = \sum_{i=1}^{n-h} (Z_{i+h} - Z_i)^2 / 2(n-h) \quad \text{式 4-39}$$

得 $E[(Z_{i+h} - Z_i)^2] \propto |l|^{2H} \quad \text{式 4-40}$

其中一維碎形維度 $D = 2 - H$ ，可由不同的 lag 值與高度差變異數期望值取對數後，以線性迴歸求得斜率 $2H$ 並推得碎形維度 D 。

假設二維地形面的高度為 $Z(x, y)$ ，則根據上式推至二維碎形維度之關係式：

$$E[\{Z(x + \Delta x, y + \Delta y) - Z(x, y)\}^2] \propto |l|^{2H} \quad \text{式 4-41}$$

其中二維碎形維度 $D = 3 - H$ ，同理可利用線性迴歸求得碎形維度 D (圖 4-25)。

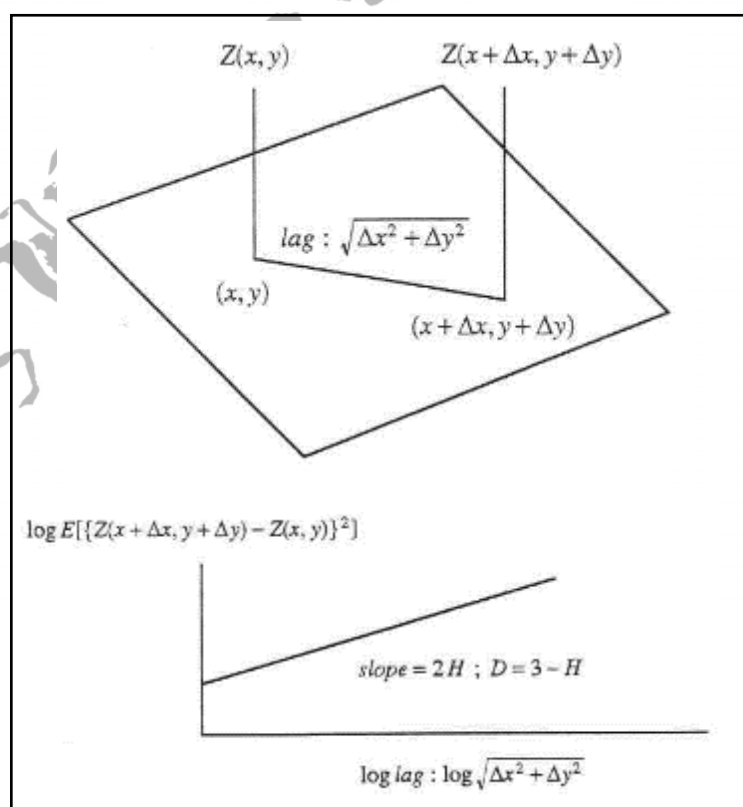


圖 4-25、變異曲線法之二維碎形維度全部取點方式示意圖(葉寶安，1994)。

葉寶安(1994)利用變異曲線法研究大屯火山區地形之碎形幾何特性，認為其反映的是特定尺度下高程起伏的頻率變化，也可看作是水系密度變化的大小，碎形維度較大的地區，似為河川密集的地區。宋國城等人多年來利用變異曲線法研究臺灣許多不同地形的碎形特性，探討幾種碎形參數如碎形維度、截距值和碎形玫瑰圖等指標，能反映岩性與構造等地質特徵，故也以碎形為基礎對臺灣做地形分區之研究等，累積成果豐富(Sung et al., 1998；詹大偉，1992；趙培文，1995；陳彥傑和宋國城，1999)。

本研究欲探討之爆裂口和張裂帶可能的相對年代順序，也就是地形相對受侵蝕程度的多寡，故不考慮已知的岩性特徵，與構造造成的方向性差異，也就是碎形玫瑰圖呈現的異向性(anisotropy)。因此本研究僅採用葉寶安(1994)以二維碎形維度探討之碎形特性，且處理方法仿照 TPSA 法，方便兩者結果之相互比較。研究步驟流程和圖 4-23 相同(圖 4-26) 於此不再多做贅述。使用設定也大多相同，僅 VBA 運算之程式碼不同。

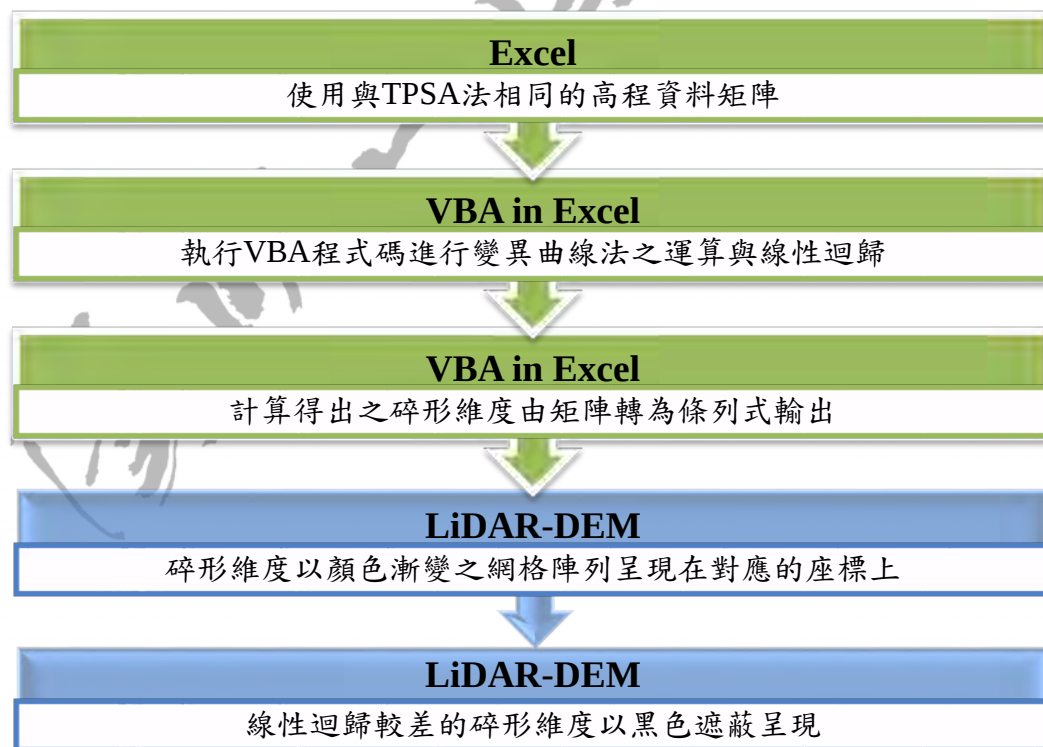


圖 4-26、變異曲線法之步驟流程圖。

4、碎形幾何利用於大屯火山體的研究

前人對於大屯火山噴發史之研究，除Chen and Wu (1971)以野外建立火山層序以外，其它大多以定年的結果作為劃分的依據。現有之定年資料有鉀氩定年(莊文星與陳汝勤，1989；Juang and Bellon, 1984; Juang, 1993; 曹恕中，1994)、核飛跡定年(王文祥，1989；Wang and Chen, 1990)以及氦氦定年(李淑芬，1996)。然而由於大屯火山之噴發年齡大多小於一百萬年，對於年輕火山岩而言，同位素定年往往有很大的誤差(曹恕中，1994；林詠忠，2008)，導致同一熔岩流所得之年代有所差異，而不同熔岩流也因彼此噴發年代相近，而造成許多用來判定噴發先後的定年結果，事實上仍在定年的誤差範圍之內。因此是否能依此建立噴發史尚需仔細考慮。對於地形保存完整之火山群，應先以航照、地形圖來判讀火山地形，再經由野外建立火山層序，最後輔以定年資料。然而部份之熔岩流彼此並無疊置關係，最終仍需回到定年結果來獲得層序(e.g. Tsai *et al.*, 2010)。

火山噴發後隨著風化侵蝕時間越久地形就越破碎，火山地形所具有之碎形特性透過現生火山之觀察已有了詳盡之瞭解(Bruno *et al.*, 1992; 1994; Pyle and Elliott, 2006)。大屯火山之火山地形保存完整(Chen and Wu, 1971; 楊志成等人，2004；陳文山等人，2007)，而利用地形之破碎程度來建立噴發順序的方法，也曾多次在過往的研究中定性的提及(陳文山等人，2003; 2007；Lai *et al.*, 2010)。故此報告彙整本人和指導學生的工作成果，目的即是希望能透過碎形維度的計算，分析火山地形，藉以獲得大屯火山群各單元破碎程度之定量結果。再經由彙整前人之野外交觸關係以及比較定年之結果，重建大屯火山群可能的火山岩層序。

4.1、資料選取

陳彥傑(2004)認為在計算碎形維度時，網格內的節點數若達到 31 點 x31 點已有 80%的正確性，但因為本報告中需要提取不同熔岩流或火山產狀的碎形維度值，故若使用節點數 31 點 x31 點的網格可能會因為其涵蓋範圍超過提取範圍，

或是提取範圍內的數值數過少而失真。且與葉寶安(1994)所做的 64 點 x64 點、32 點 x32、16 點 x16 點之網格比較，確實發現使用 8 點 x8 點之網格較能表現出提取範圍的碎形維度值差異，故本研究以 8 點 x8 點網格計算碎形維度值。另外，研究團隊利用 40m、10m、6m 解析度 DTM 計算碎形維度，發現以 6m 的數值地形模型計算結果最能夠顯示出差異。本報告利用移動網格法(moving window)檢驗計算結果，以避免因為人為切割造成誤差，但經 t-test 檢驗發現移動後計算結果並無顯著差異，故往後便以移動前的網格做為判斷依據。

4.2、結果

本研究利用三角柱頂面積法計算 8 點 x8 點網格分割 6 米數值地形模型，計算碎形維度所得到的結果如圖 4-27。計算結果碎形維度值較低處主要分布於地勢平緩以及平原地區；而碎形維度值較高處則分布在地勢陡峭或山區等地形破碎的地方，並且由圖中可以觀察出部分熔岩流、河道之位置。此結果與前人(黃怡靜，2007)認為碎形維度與高度、坡度、地表粗糙度以及地形起伏度成正相關相符。故本研究便以此計算結果做為地形演育之量化數值而進一步討論之。

本研究即是希望建立碎形維度與噴發時間先後之關係，但地表碎形是各地質作用下的綜合表現(Sung *et al.*, 1998)，為氣候、構造、岩性、產狀與時間的函數(Lifton and Chase, 1992; 葉寶安，1994)。根據現生火山熔岩流之碎形維度計算，流經的底岩種類(Bruno *et al.*, 1992)，以及不同岩性(安山岩或玄武岩質)(Pyle and Elliott, 2006)在碎形維度上並未有顯著之差異，可以忽略。因此本研究之後將鎖定氣候、構造與岩性加以分析並將之排除，最後建立碎形維度值與時間之關係。

(1) 產狀

以碎形分析大屯火山群噴發產物的表面地形的結果，由碎形維度小到大依序是：火山泥流、熔岩流、火山碎屑流、火山穹窿、碎屑崩落(圖 4-28)。本研究

對此的解釋，是由於以水流營力為主的火山泥流的地形最平緩，其次是熔岩流、碎屑流，再來是呈現鐘狀突起的火山穹窿，最後是崩積成堆且表面破碎的岩屑崩落。

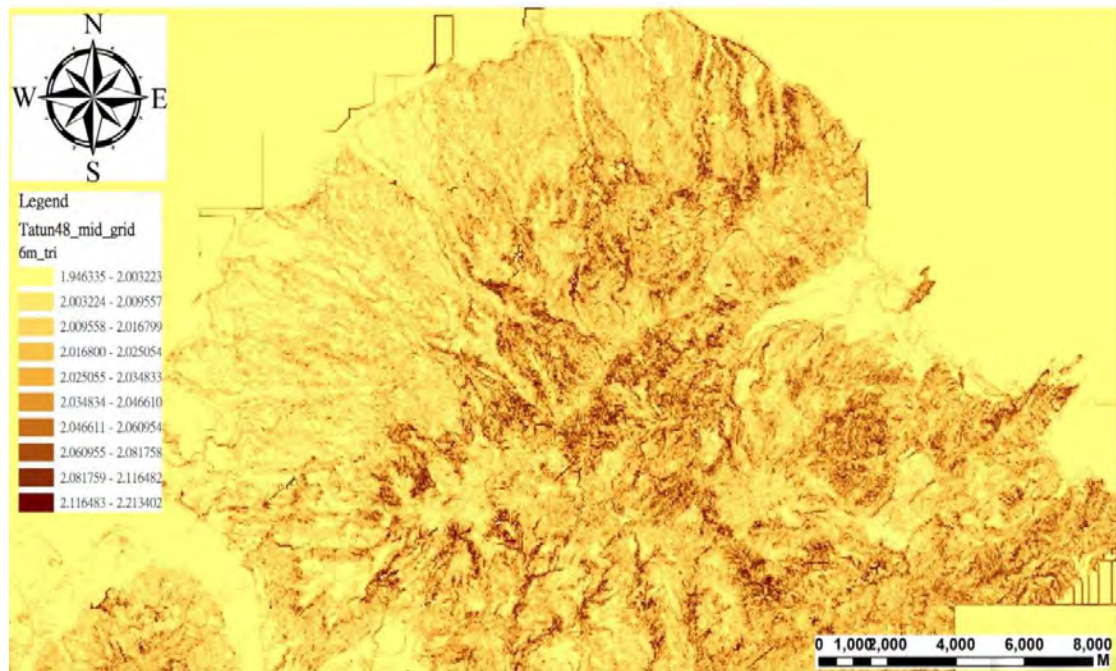


圖 4-27、三角柱頂面積法計算結果。

(2) 氣候

臺灣北部由於受到季風的影響，氣候在迎風面跟背風面會略有差異(陳淑華，2010)，為了探討氣候對碎形維度的影響，此研究分別提取東北坡向跟西南坡向的碎形維度值(圖 4-29)，兩者比較之下並無顯著差異，因此認為氣候對大屯火山群之碎形維度的影響並不顯著。

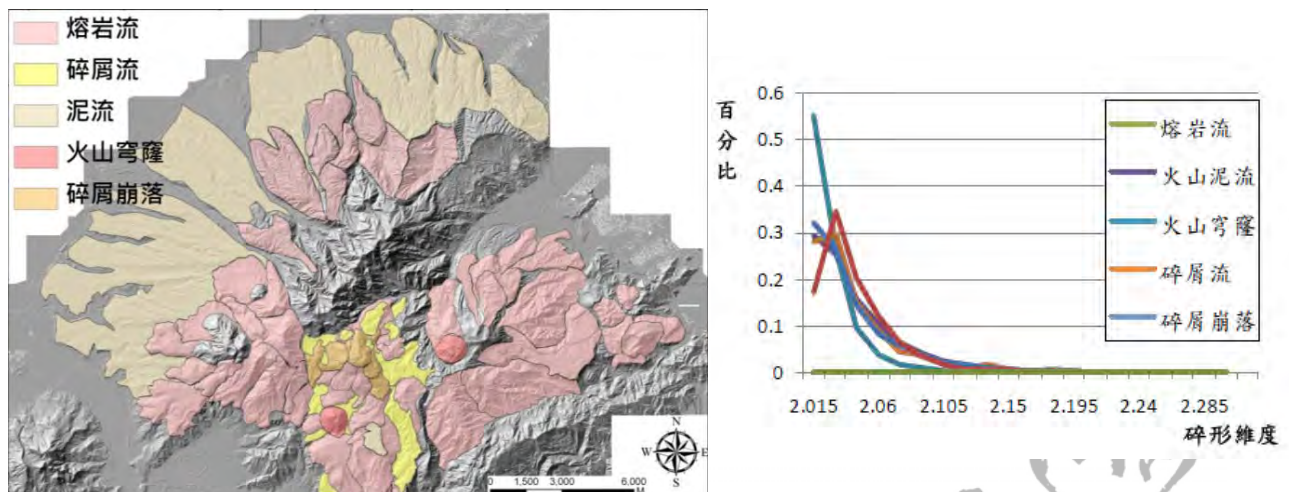


圖 4-28、各產狀之分布與對應之碎形維度值

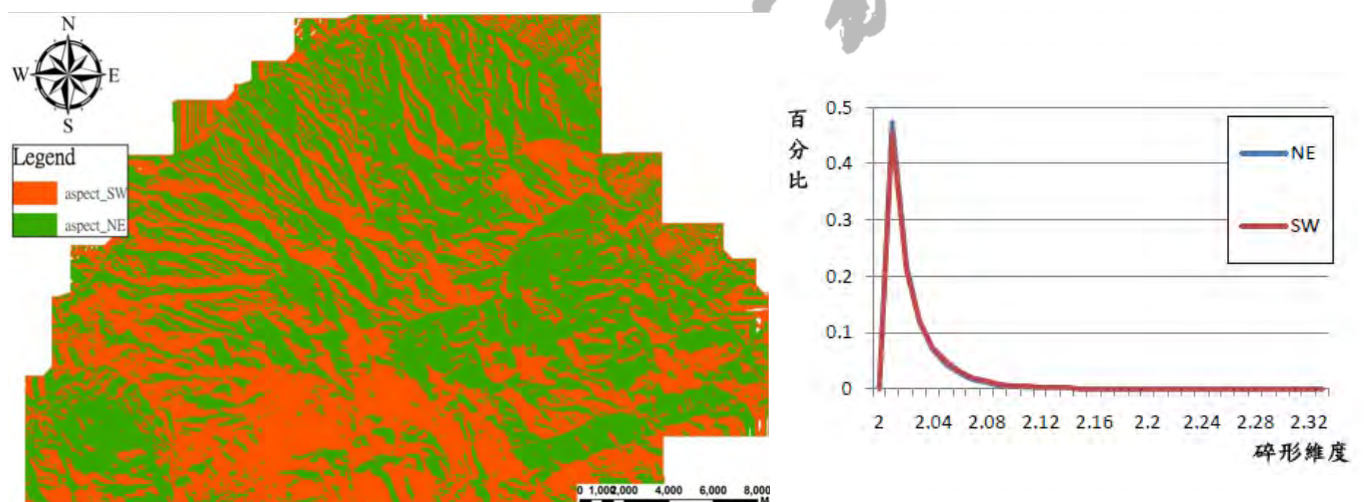


圖 4-29、坡向之分布與其碎形維度值。

(3) 區域構造

大屯火山區域之主要構造為金山斷層。本文將整區分為：斷層上、下盤與斷層主要影響之區域(圖 4-30)。斷層影響區域之界定，主要是參考陳文山等(2007)利用LiDAR分析之結果，其發現在金山斷層沿線具有較顯著之雁行裂隙，本文即將此區域認定為斷層主要影響之區域。由於產狀會影響碎形，因此本研究只探討

熔岩流之碎形維度。其結果發現三者碎形維度相似，僅斷層主要影響區域之值較大。但此並不是表示金山斷層已不活動，若參考大屯火山的噴發機制(Song *et al.*, 2000)，火山可能於斷層錯動後才為主要的噴發期，因此在地形的表現上較不顯著。而其上下盤在碎形維度尚則無顯著差異。

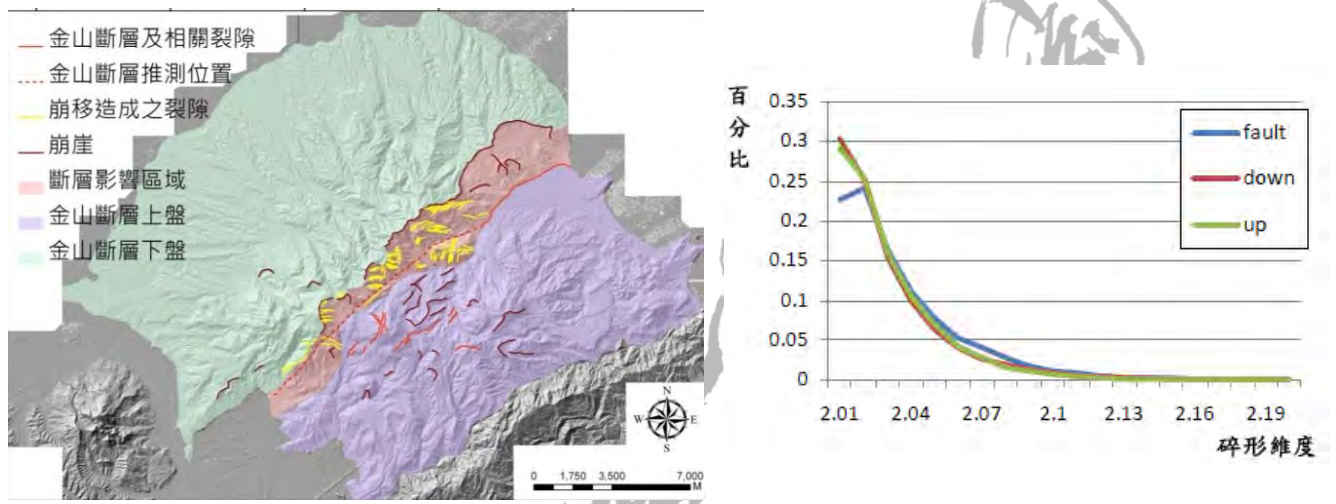


圖 4-30、構造分區與對應碎形維度值。

(4). 時間

在排除各項可能影響碎形的因素後，碎形維度的值便與受風化侵蝕的時間長短有關。而要想藉此建立每個熔岩流之噴發順序，首先需判定各熔岩流之範圍，再比較範圍內熔岩流表面之碎形維度大小即可獲得層序。瞭解熔岩流之噴發順序首先需要先劃分各熔岩流之範圍。參考前人已建立者(Lai *et al.*, 2010; Tasi *et al.*, 2010; 宋聖榮等，2007; 葉斌，2009; 陳文山，2007)，並依楊志成等(2004)所建立之火山地形判定準則加以檢驗，最後獲得各熔岩流之分布範圍(圖 4-31)。

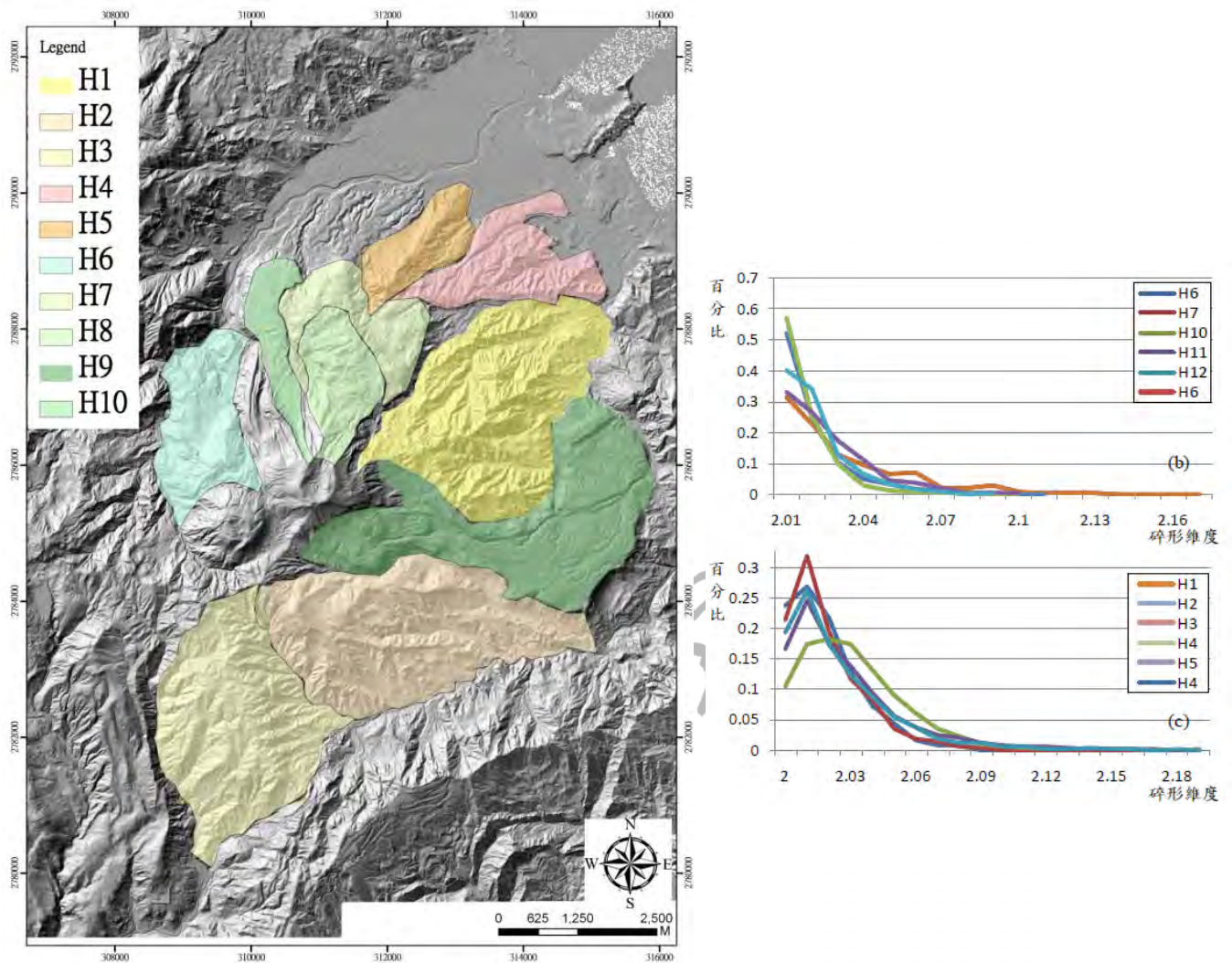


圖 4-31、熔岩流之分布圖。

(a) 各熔岩流位置以及噴發次序。(b)、(c)為利用三角柱頂面積法計算磺嘴火山亞群之碎形維度，其相對應之熔岩流位置列於(a)。(b)為第一期噴發，(c)為第二期，注意其縱軸座標值並不相同。

接著將各熔岩流碎形維度作圖，並判別層序。判斷的依據有以下二點：碎形維度值以及其集中趨勢。一個熔岩流自噴發後便開始遭受侵蝕，並隨著時間推進，表面的破碎程度便逐漸加大，因此其值會先由集中於碎形維度小的區間(如H10)，爾後該峰值逐漸下降，並因新增加高碎形維度之值而使其集中趨勢降低(如H10到H6過程)。不斷增加的高碎形維度值最終超過原本的峰值而成為新的峰值(如H6到H5的過程)，並重複上述之過程(如H5到H1)。

研究團隊利用上述之原則，依碎形維度建立磺嘴火山的層序，並依碎形之值將磺嘴山分為兩期噴發。第一期噴發(依序為H1到H5)碎形維度值主要集中在2.01以下，空間上分布於磺嘴火山亞群的最外圍，熔岩流體積較大，礦物組成以角閃石為主(Chen and Wu, 1971)，而因其分布均圍繞大尖後山，因此判定岩漿來源應為大尖後山。第二期噴發碎形維度多集中在2.02，且可依其位置及礦物組成再分為a、b兩期。較老之a期(H6)分布在大尖後山附近，礦物組成以輝石為主(Chen and Wu, 1971)，為大尖後山最後期之噴發，此後該火山發生陷落並於裂口中形成火山穹窿(dome)，而噴發中心則向北移到磺嘴山並形成b期噴發(依為H7到H10)，礦物組成以輝石為主並含有橄欖石(Chen and Wu, 1971)。

比較前人所建立之層序與分期(表 4-7)，本研究與前人利用野外、岩性以及疊置關係所得之分期結果相當一致。其中Lai *et al.* (2010)所認為之第三期噴發即為大尖後山形成火山穹窿之時的噴發，但由於不同火山地形所顯示之碎形維度不同，本文只探討熔岩流的部份，故未將該期噴發列入排序。

至於各熔岩流之間的關係，前人多以下述幾點辨別先後：第一，早期的噴發多會遺留在離火山最遠的外部，而後期之熔岩流則會疊於其上。第二，後期之熔岩流可能受到先期噴發者的影響而發生繞道或分流的情形(Lai *et al.*, 2010)。但這些判斷可能流於主觀而造成不同的結果(陳文山等人，2007)，此外若火山體保存不全，那麼離噴發中心遠近之判斷則可能很有問題，至於兩個熔岩流究竟是疊置關係還是繞道關係也可能造成截然不同之排序。

以磺嘴山之H9熔岩流與H1熔岩流之關係為例(圖 4-32)，若根據地形剖面則H1高程較高，依後期噴發會疊置於先噴發者上的原理，那麼理當要H9先於H1，但事實上該兩塊熔岩流之關係一般多被解釋為後噴發之H9受到H1阻擋而形成今日之形貌(Lai *et al.*, 2010; 陳文山等人，2007)。這樣的解釋之所以廣為接受正是因為H9的熔岩流外型之保存程度遠高於H1，但是若這兩個熔岩流噴發時間相近，導致熔岩流外型相似，無法用肉眼區別時，利用地形剖面之疊置關係所建立的層

序便會大不相同。

表 4-7、本研究與歷來磺嘴火山噴發層序比較

	本研究	Chen et al. (2007)*	Lai et al. (2010)	Chen and Wu (1971)**
1 st	H3, H4, H5, H1, H2	1 st 橘 H1 至 H5	1 st 黃 H1 to H5	S2 to S4
2 nd A	H6	2 nd 綠 H6	2 nd 藍 H6, H7	S5, S6
2 nd B	H11, H12, H7, H10	3 rd 深綠 H7 至 H12	3 rd 紅 H8	S13
			4 th 綠 H10 to H1	S8, S12

* Chen et al. (2007) 總共分為十三個層序，但這裡只討論磺嘴山包含到的四個部份。

** Chen and Wu (1971) 僅分熔岩流次序，並未對噴發進行分期。

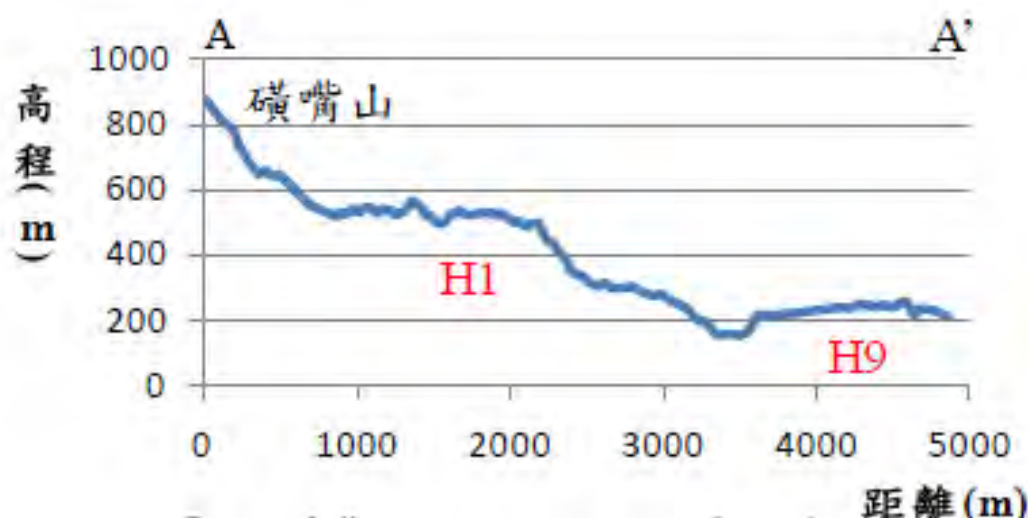


圖 4-32、磺嘴山剖面。

而這個例子事實上也反應了「越老的熔岩流表面會越破碎」這樣的假設，是一個普遍被接受且常被用來判定層序之原則，而本文利用碎形維度計算之結果，即是可以將「熔岩流保存完整度」之定性轉為定量化，並可以完全避開人為主觀之判斷。雖然定年與疊置關係各有其限制，導致在細部各熔岩流判定的順序上可能有所誤差，但對於大尺度之噴發期仍可以有一定程度表現。本文以火山外型保存最完整之磺嘴火山群為例，發現由碎形所得之結果與前人之噴發期完全相同，

而在各熔岩流的細部程序上又可以避開定年或疊置關係造成的可能誤差，以完全定量非人為的方式獲得層序，因此本文更進一步將本方法推廣到整個大屯火山群。

綜合上述的結果，大屯火山之火山層序如下：

(1). 七星火山亞群(圖 4-33a)

根據前頁所述，碎形維度值會受到火山產狀的影響，故在此依照Tsai(2010)屏除受到碎屑崩落以及火山碎屑影響的部分。七星山亞群的噴發可以分為兩期，第一期為C1、C2、C3、CK1、C4；第二期K1、S1、SM1、C5、C6、C7、B1、C8。首先，以七星山為噴發中心向東北噴發C1、C2、C3，岩性以兩輝—角閃石安山為主岩。後轉由鄰近的七股山噴發CK1，再由七星山噴發C4，岩性為紫蘇輝石—角閃石安山岩。進入第二期之後分別以竹篙山、小草山、紗帽山噴發K1、S1、SM1，岩性以兩輝—角閃石安山岩及角閃石—兩輝安山岩為主，而後七星山轉向西南繼續噴發C5、C6、C7，岩性為角閃石—紫蘇輝石安山岩。接著，由白雲山噴發B1，岩性為兩輝—角閃石安山岩，最後回到七星山噴發C8，岩性為紫蘇輝石—角閃石安山岩。

(2). 竹子火山亞群(圖 4-33b)

根據碎形維度竹子火山亞群的噴發可以分為兩期，岩性均為兩輝安山岩(Chen and Wu, 1971)。第一期噴發(依序為 Z1 到 Z4)體積較小，主要圍繞著嵩山火山群北側，故嵩山火山可能為岩漿之來源。第二期(依序為 Z5 到 Z9)體積較大，部份熔岩流流向西北，應此岩漿來源應為東南方之小觀音山。

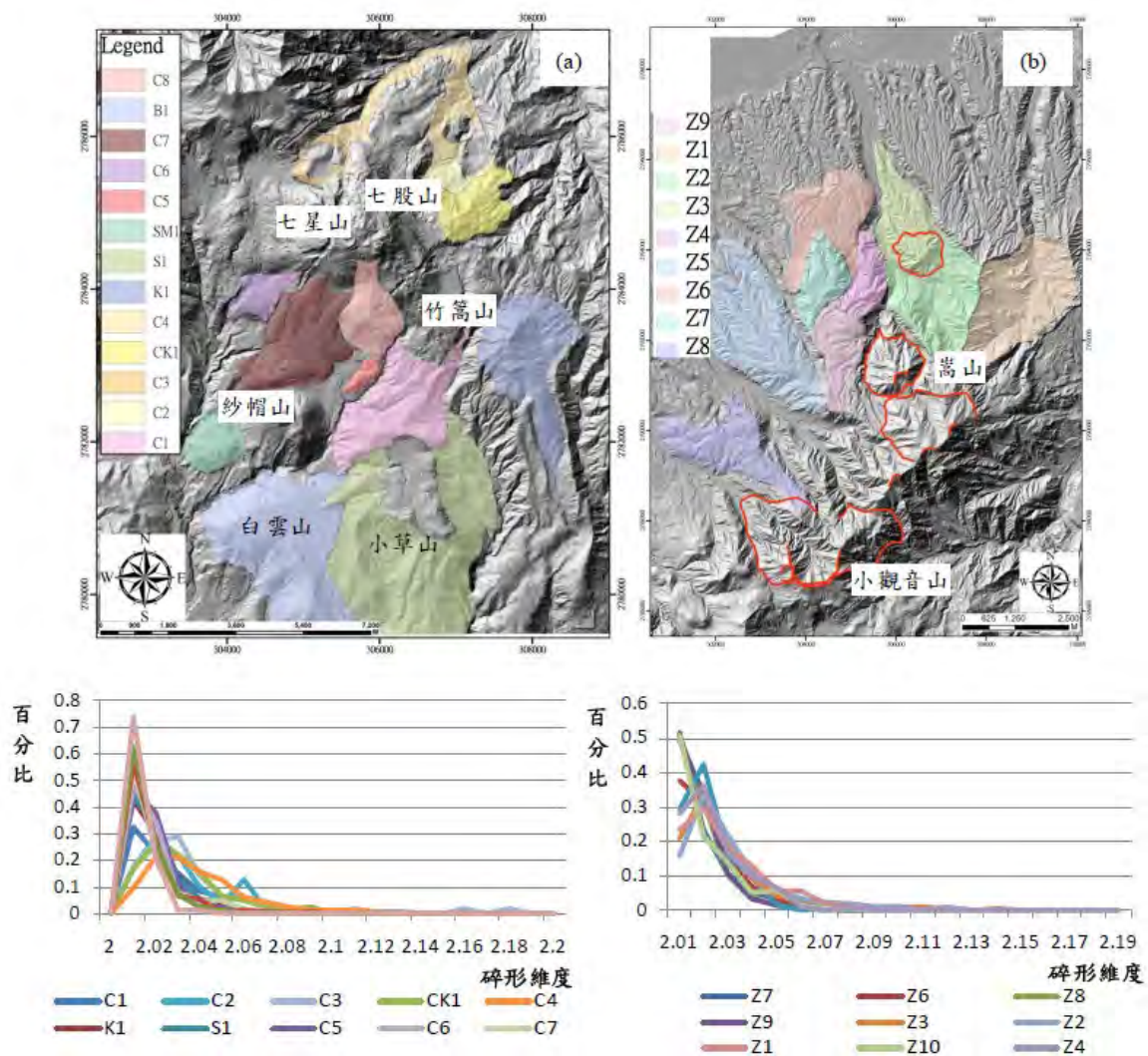


圖 4-33、七星山亞群與竹子山亞群之熔岩流分布與碎形維度。

(a) 七星山亞群之熔岩流分布與碎形維度。(b) 竹子山亞群之熔岩流分布與碎形維度。

(3). 大屯火山亞群(圖 4-34a)

本組將大屯火山亞群分成十二條熔岩流並提取熔岩流的碎形維度值，碎形維度值的分布結果用之前所述的判斷方式，將這十二條熔岩流依噴發順序命名為 D1 至 D12，從熔岩流的分布位置來看，本研究區域大致上呈現由東向西的噴發順序。

首先，前期的噴發中心以靠近金山斷層的大屯山為主，依序為熔岩流 D1、D2、D4、D5 與 D6 圍繞著大屯山呈現扇形的分布，岩性主要是兩輝一角閃石安山岩跟角閃石—兩輝安山岩兩種；在大屯山周圍的熔岩流噴發結束後，烘爐山開

始噴發熔岩流 D7，岩性屬於玄武岩質的岩漿；接著噴發中心逐漸向西移動，以向天山為中心噴發 D8、D10、D11、D12，岩性為兩輝—角閃石安山岩；而在 D8 跟 D10 噴發的期間，大屯山噴發 D9，為大屯火山亞群最後噴發的熔岩流。

(4). 湊子-丁火朽山亞群(圖 4-34b)

該亞群又依碎形可分為兩部分，湊子(Z2)、八斗山(Z1)率先噴發，岩性以角閃石安山岩為主。爾後丁火朽山噴發(依序為Z1到Z4)，噴發中心為丁火朽山，岩性為兩輝-角閃石安山岩。

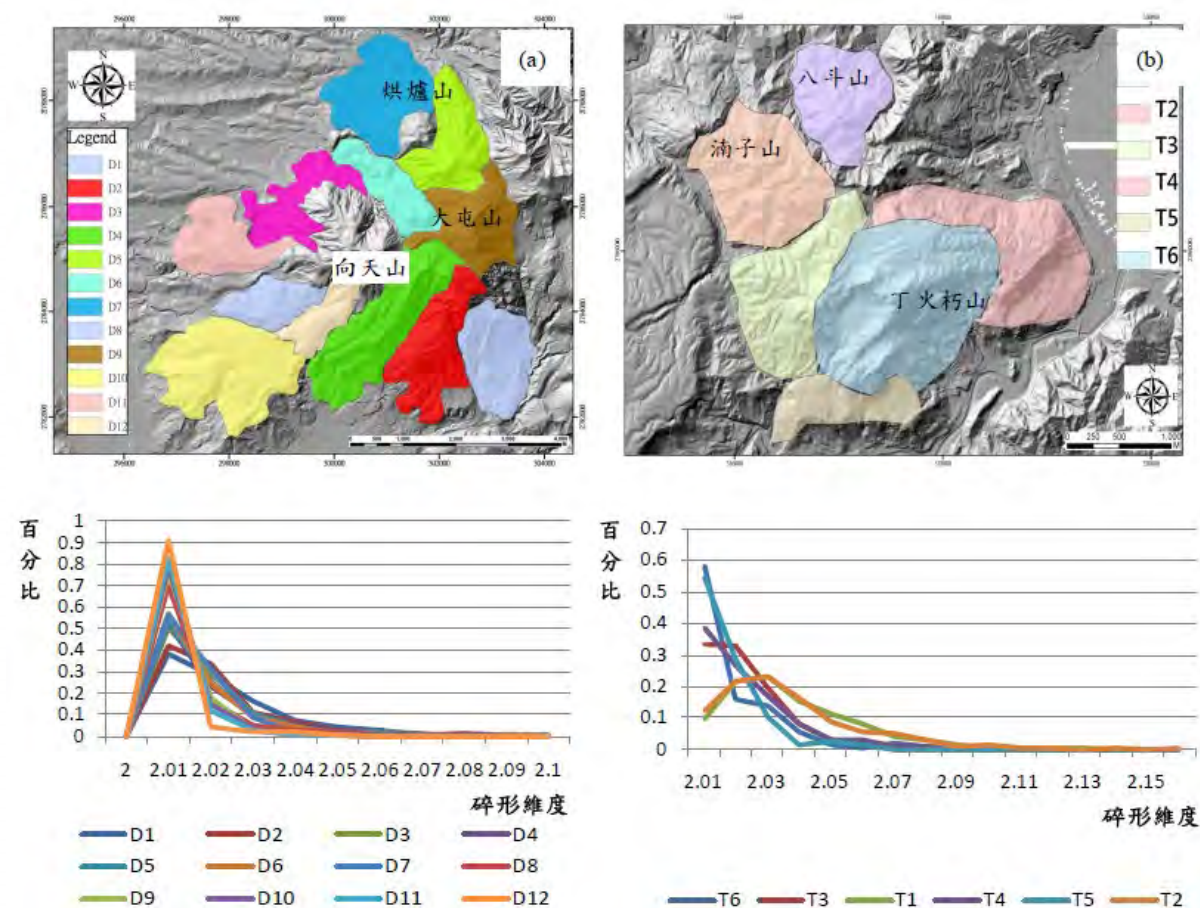
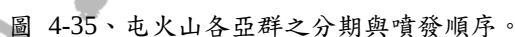


圖 4-34、大屯山亞群與湊子-丁火朽山之熔岩流分布與碎形維度。

(a)大屯山亞群之熔岩流分布與碎形維度。(b)湊子-丁火朽山之熔岩流分布與碎形維度。

根據碎形維度分布之特性，七星山亞群、磺嘴山亞群、竹子山亞群以及丁火朽山亞群均可分為兩期噴發，而大屯山亞群則無法再細分。由碎形維度大小可得知噴發順序依序為：丁火朽山第一期、磺嘴火山第一期、竹子山第一期、七星山第一期與丁火朽山第二期、竹子山第二期、七星山第二期、大屯山，最後是磺嘴山第二期噴發。與前人所建立之層序相比較(表 4-8)，與由定年所建立之層序大致相符，而和由野外關係及地形疊置關係所建立之層序有高度之相關。



相關研究	研究方法	各亞群火山層序(對應本研究之區域)
Chen and Wu (1971)	野外關係	早期(丁火朽 I 與磺嘴 I)，中期(竹子山與七星 I 與丁火朽 II)，晚期(七星 II 與大屯山與磺嘴 II)
Wang and Chen (1990)	核飛跡定年	湳子-丁火朽山，磺嘴山，大屯山，七星山
莊與陳(1989)	鉀氬定年	七星山下部，竹子山，磺嘴山，七星山上部
陳文山等(2007)	地形疊置關係	第一期(丁火朽 I)，第二期(磺嘴 I)，第三期(七星 I 丁火朽 II 與大屯山)，第四期(竹子山)，第五期(七星 II)，第六期(磺嘴 II)
本研究	碎形維度	丁火朽 I，磺嘴 I，竹子山 I，七星 I，丁火朽 II，竹子山 II，七星 II，大屯山，磺嘴 II

(五)、碎形幾何利用於火山爆裂口的研究

1、碎形幾何結果

(1) 盒子計數法結果

本研究比較爆裂口形成年代先後順序的前提假設為只考慮時間因素對於爆裂口外形之影響，年代越久遠的，所受侵蝕時間越長，爆裂口外形越趨破碎。碎形維度的高低提供物體形狀上的破碎程度比較，碎型維度值較大者其形狀越破碎。

承自上節之敘述，首先界定爆裂口和裂谷的差異：爆裂口設定上有較完整的橢圓狀外形，顯示其可能有爆發的現象；張裂帶(裂谷)則具有較平直的邊界，代表張裂開來的兩側崖壁，或是無法清楚分出爆裂口邊界的裂隙邊緣。爆裂口和裂谷成因和地質意義稍有不同，兩者將分開比較年代。

WFC1 具備極為完整之爆裂口外形。WFC2 的邊界則較 WFC1 不規則，但仍為爆裂口，且根據 1m DEM 的結果為 2 個小爆裂口之串連。WFC3 的邊界非常不規則，且是張裂帶裂隙分岔之處，歸為裂谷；WFC4 邊界平直，視為裂谷。WFC5 上半部為半橢圓之爆裂口，根據其分布於側邊之活躍噴氣孔，年代可能較偏年輕。DP 可視為 2 或 3 個小爆裂口同在的一谷地，有沉積物堆積，年代可能較老。WFC8 則不易判定，因為有一向北開口影響判斷，且同時具備似橢圓和平直邊界的特徵，原則上當作裂谷。小油坑有半橢圓形的特徵，為一大型爆裂口。

東側張裂帶只有 EFC3 為裂谷，其他 5 個皆為爆裂口。其中 EFC1 規模相較於其他爆裂口來得小很多，可能較不適合進行年代比較；EFC2 有溪流切穿，地形最容易被破壞，連帶影響比較結果。EFC4 為一大一小兩爆裂口，須先假設兩爆裂口同時形成才能視作一體。EFC5 為扁長形的完整爆裂口；EFC6 最接近東側張裂帶東北側的破碎帶，顯示這裡過去的活動可能較劇烈。

西側之結果由圖 4-36 與表 4-9 所示：

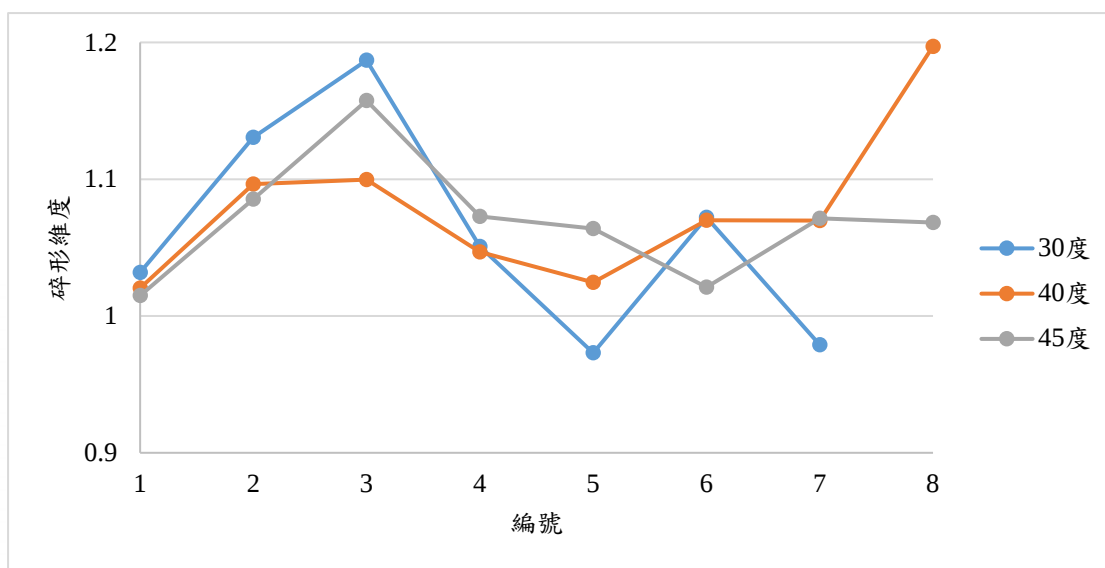


圖 4-36、西側張裂帶爆裂口三種坡度之碎形維度值比較圖。

表 4-9、西側張裂帶爆裂口對照表。

編號	名稱	定位	坡度 30	坡度 40	坡度 45	平均	備註
1	WFC1	爆裂口	1.0319	1.0204	1.0149	1.0224	金露
2	WFC2	爆裂口	1.1306	1.0964	1.0855	1.1042	
3	WFC3	裂谷	1.1869	1.0998	1.1574	1.1481	
4	WFC4	裂谷	1.0508	1.0467	1.0727	1.0567	
5	WFC5	爆裂口	0.9730	1.0245	1.0639	1.0205	
6	DP	爆裂口	1.0722	1.0700	1.0212	1.0545	鴨池
7	WFC8	裂谷	0.9789	1.0697	1.0714	1.0400	
8	SYK	爆裂口	x	1.1972	1.0685	1.1328	小油坑

西側爆裂口在各自三種坡度的碎形維度上普遍有滿大的差異，代表不同邊緣反映受侵蝕的情況有差異；反過來說，碎形維度值皆相近的如 WFC1，有較穩定的邊緣，很可能為受侵蝕時間較短的年輕爆裂口。

東側之結果由圖 4-37 與表 4-10 所示：

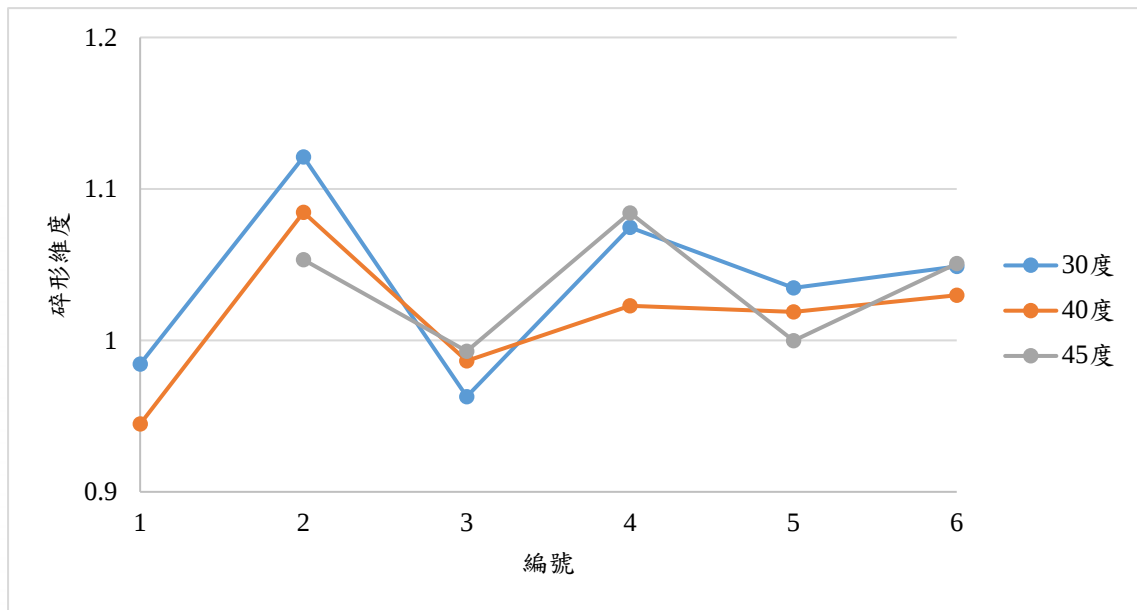


圖 4-37、東側張裂帶爆裂口三種坡度之碎形維度值比較圖。

表 4-10、東側張裂帶爆裂口名稱對照表

編號	名稱	定位	坡度 30	坡度 40	坡度 45	平均
1	EFC1	爆裂口	0.9844	0.9447	x	0.9646
2	EFC2	爆裂口	1.1211	1.0845	1.0532	1.0863
3	EFC3	裂谷	0.9629	0.9864	0.9929	0.9807
4	EFC4	爆裂口	1.0746	1.0227	1.0842	1.0605
5	EFC5	爆裂口	1.0347	1.0189	0.9997	1.0177
6	EFC6	爆裂口	1.0489	1.0297	1.0507	1.0431

東側爆裂口在各自三種坡度的碎形維度上之差異普遍較西側來得小，碎形維度值也普遍較低。這可能代表東側爆裂口整體較西側爆裂口形成來得晚。

由結果推論，坡度 30 度等值線位於爆裂口邊緣上的較外側，容易受到侵蝕崩塌影響結果。其中有幾個爆裂口沒有好的坡度 30 度外形，尤其是小油坑，受崩塌地形影響而使邊界嚴重扭曲。而規模最小的 EFC1 則沒有足夠的空間大小呈現坡度 45 度外形。不同爆裂口邊界有其適合之坡度大小來描述之，若單用一種

坡度指標來比較結果則較為不妥當，故採用三種坡度之碎形維度平均值進行比較。

綜合比較東西兩側張裂帶上爆裂口可能形成順序的排列為：WFC2 > EFC2 > EFC4 > DP > EFC6 > WFC1 > WFC5 > EFC5 > EFC1；裂谷可能形成順序的排列為：WFC3 > WFC4 > WFC8 > EFC3(圖 4-38)。此結果與地形上所繪製之坡度等值曲線的曲折程度變化一致：形狀呈現較橢圓狀的 EFC1、EFC5、WFC5、WFC1、EFC6 以及較平滑的 EFC3 裂隙邊緣，其年代應較年輕；而形狀較不規則的 WFC2、EFC2 爆裂口以及 WFC3 裂谷等則年代應相對較老。小油坑爆裂口邊緣坍塌現象嚴重，又其大小為其他爆裂口之兩倍多大，不適用此方法比較。

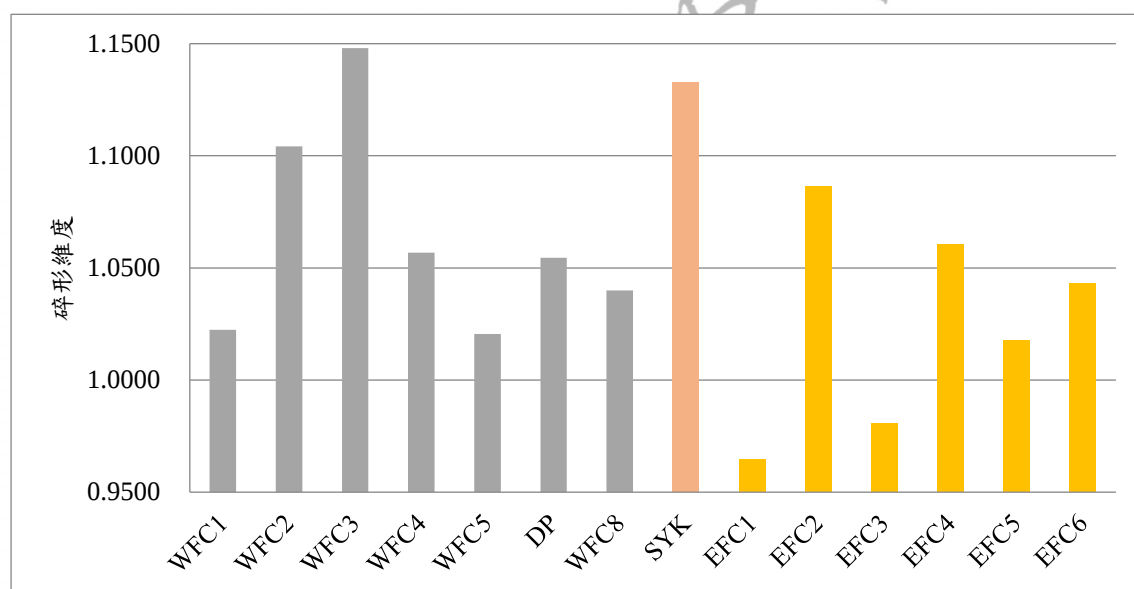


圖 4-38、整體平均碎形維度比較圖。

線性迴歸中 R^2 皆 > 0.99，最低為 EFC1 的 0.9968。

(2) 三角柱頂面積法(TPSA)結果

使用 2m 解析度的 DEM(圖 4-39)作圖範圍較廣，範圍由 4 張長寬 2048m 合併合成，涵蓋範圍約長寬為 4,096m。圖 4-39 上圖可看出顏色越趨於紅，碎形維度值越大，代表坡度、相對高度差越大。

2m DEM 在網格邊長 32m 的尺度下，碎形維度值大的出現在西側張裂帶的

北端，包括小油坑和鴨池等等；東側張裂帶則在東北端；其他則多位在溪谷。圖 4-39 下圖為疊加 R^2 值的結果， R^2 在 0.9 以下反黑顯示，剩下的為線性迴歸較好的部分。通常 R^2 值較高的多為碎形維度大的紅值，過濾掉不重要的區塊，由剩下的區塊觀察張裂裂隙走向的趨勢。西側張裂帶西南端向溪谷延伸；往北分為兩方向，一向小油坑，一通過鴨池向北接到小觀音山一側和北磺溪。東側張裂帶向西南沿松溪而下，形成 90 度急轉彎，至中山樓附近；向東北破碎帶增大，延伸到七股山南側。以上裂隙分布結果與 DEM 判釋與野外調查結果相符。

1m DEM 資料量大，須分區進行 TPSA 法。考量時間因素，僅進行重點的爆裂口區域，共分六區，每區長寬 1,024m (圖 4-40)。1m DEM 的結果 R^2 值高的資料更少，同樣是 R^2 在 0.9 以下反黑顯示，迅速篩掉不要的部分，留下重要之碎形維度值高的地方。

1m DEM 在網格邊長 16m 的尺度下，兩側張裂帶之裂隙更清楚顯示出來。與 2m DEM 不同的是 1m DEM 的碎形維度值較大的在西側西南端的部分，東側也偏向西南端中山樓的區域。使用尺度的不同，得出的碎形維度高值位置也會改變，反映當地的構造是接近較大尺度或較小尺度。結果顯示，西側張裂帶東北邊較西南邊有較大的構造尺度，可能是張裂規模較大、裂谷較寬等等；東側同樣是東北邊的破碎帶相較於西南邊構造尺度大。另值得一提的是在七星山西側坡體中間有一碎形維度值較大的區域，可能存在潛在的裂隙或通道，或是坡體垮塌所伴隨的裂隙擴大等等。

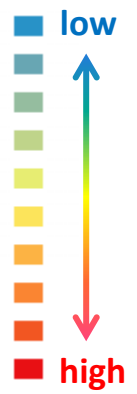
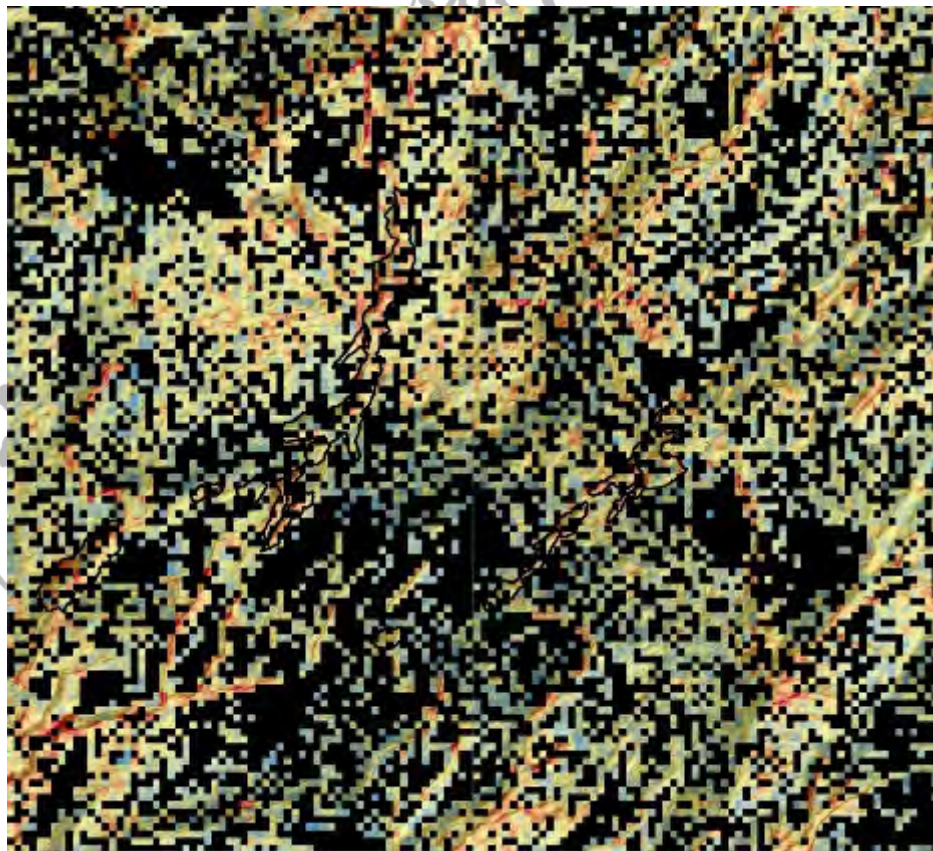
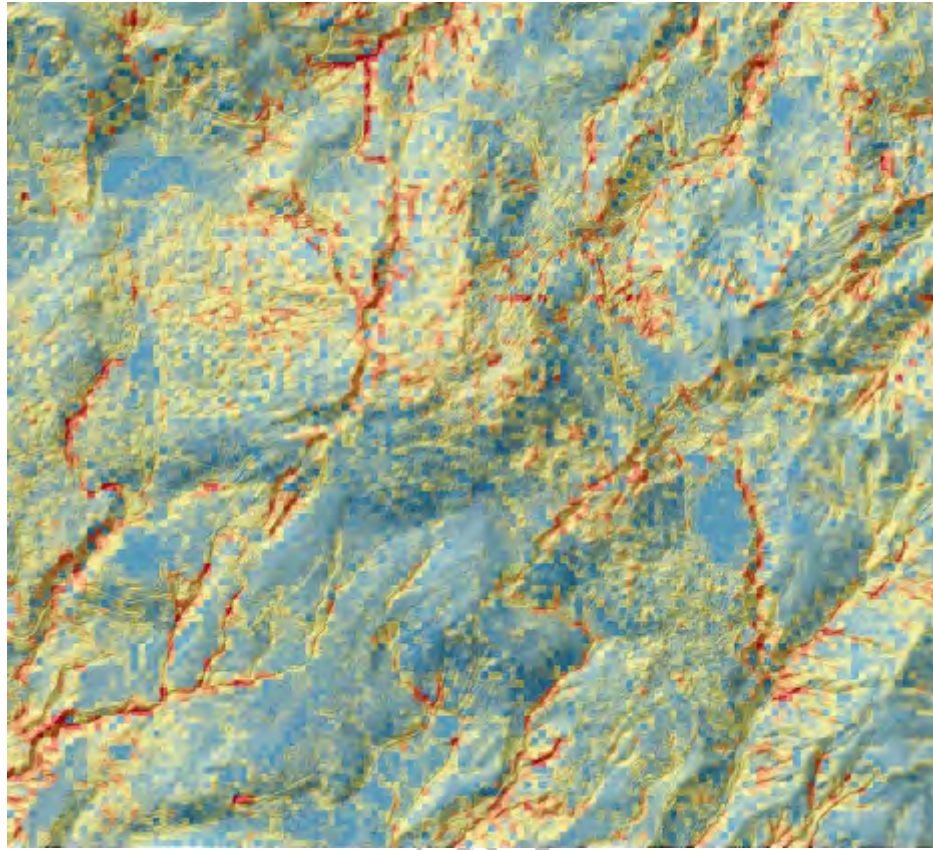


圖 4-39、TPSA 法之 2m 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。

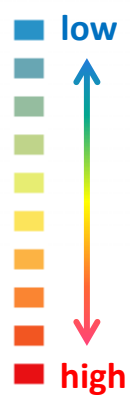
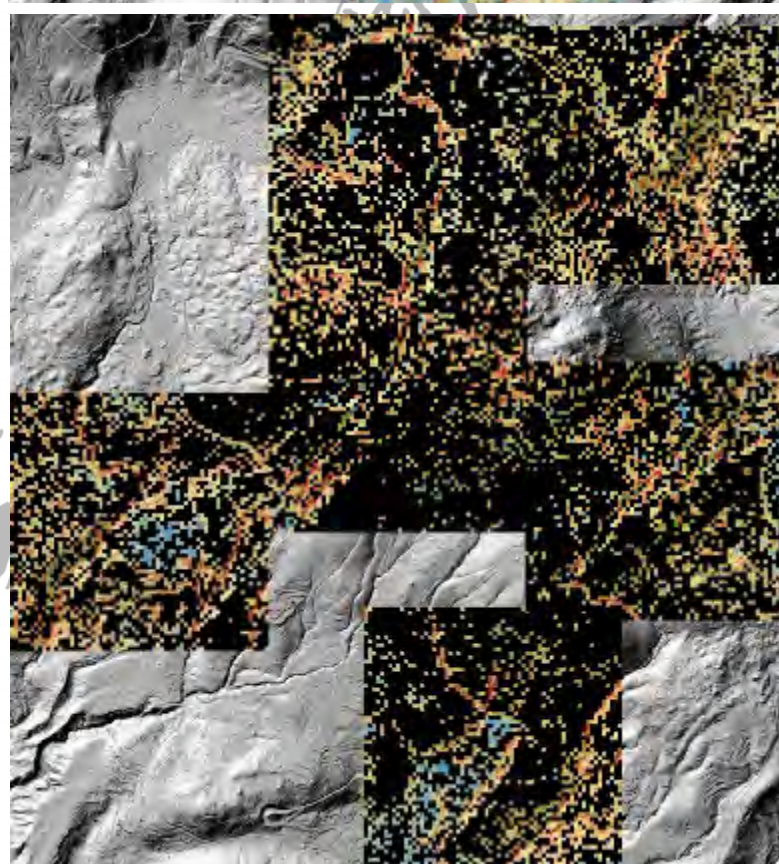
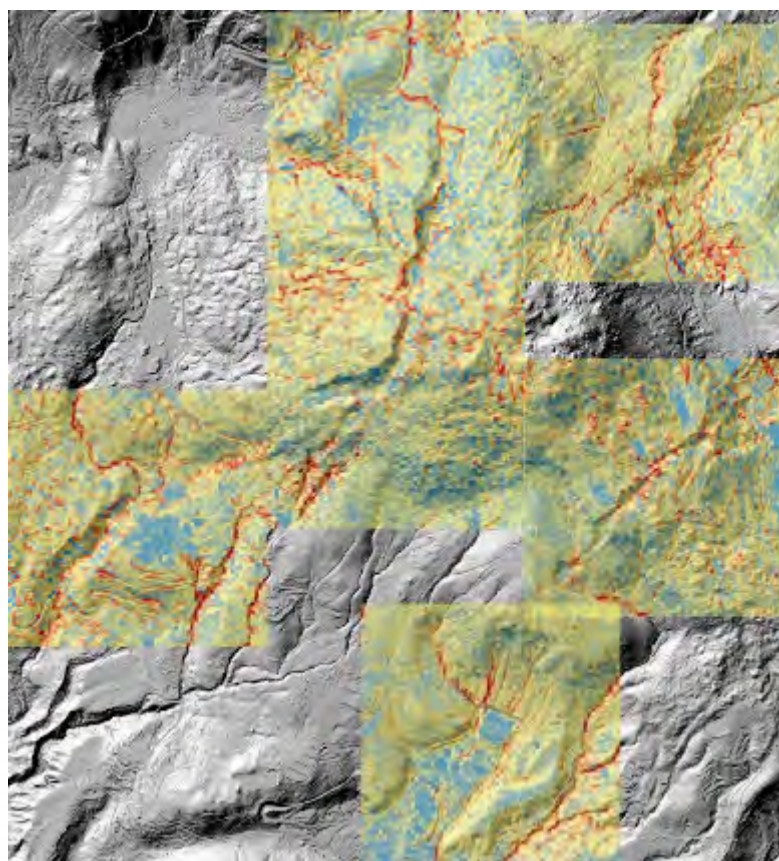


圖 4-40、TPSA 法之 1m 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。

(3)變異曲線法結果

變異曲線法的計算龐大，耗時較久，僅以 2m DEM(圖 4-41)作圖。網格尺度、涵蓋範圍、顏色分層設定等皆與 2m DEM 之 TPSA 法相同，可直接觀察比較。變異曲線法之碎形維度值越大，代表高程起伏頻率越大，換言之也反映其水流密度越大。

2m DEM 之變異曲線法結果與 TPSA 法截然不同，幾近相反的趨勢。變異曲線法碎形維度大的多位在地形平坦低地或溪流較多之區域，大多為 TPSA 法碎形維度小的位置，以竹子湖、冷水坑、中山樓一帶甚為明顯(圖 4-41)。將此現象解釋為流水匯集趨向之地表低處，還屬合理。另一方面，變異曲線法碎形維度小的分布於較連續完整之坡體上，坡度不能太小，且無太多水流切割之溝壑。最明顯即為七星山火山主體高程較高的區域邊緣，顯示高程超過約 700 至 800m 的坡體，較難出現 32m 尺度以上的溪溝。其中碎形維度稍大呈點狀分布的應和七星山坡體上散布著許多的火山岩塊(block)而產生地形起伏有關。

圖 4-41 下圖同為疊加 R^2 值的結果， R^2 在 0.90 以下反黑顯示，和 TPSA 法比較可發現變異曲線法之線性迴歸超乎預期的優良，而 R^2 值較差的幾乎皆是碎形維度大的平坦區域。七星山兩側張裂帶和爆裂口皆位在上述所提及高程較高之山體上，一方面可解釋說爆裂口相對外形保存較好的原因為受水流侵蝕程度較下游少，另一方面更可說明張裂帶和爆裂口等較大的構造絕對不會僅是單一水流侵蝕因素所能形成的。張裂帶中幾處中央平坦之爆裂口，其碎形維度值皆與周圍的大，代表確實可為沉積物匯集之地，與野外觀察與採樣地點一致。

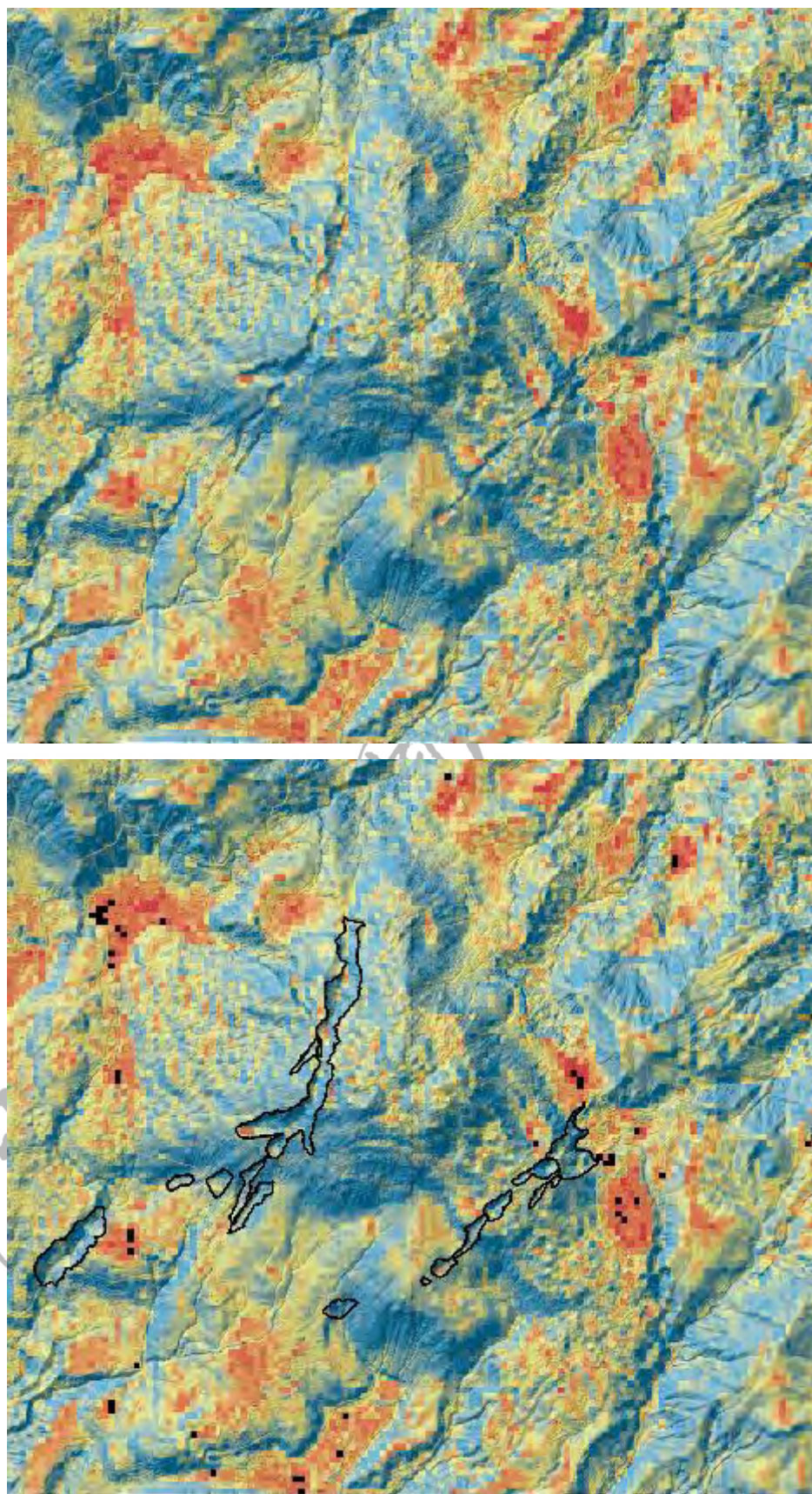


圖 4-41、變異曲線法之 2m 解析度碎形維度值與疊加 R^2 值結果。

(六)、小結

綜合上述地形分析可獲得以下的結果：1、大屯火山群的碎形維度值與金山斷層和氣候未有顯著關係。2、火山產狀會因為本身的性質等因素影響碎形維度值，其由小至大分別為火山泥流、熔岩流、火山碎屑流、火山穹窿、碎屑崩落。3、地表受風化等作用隨時間愈趨破碎，碎形維度可以定量此種破碎程度進而反映其相對年代。以此方法建立之火山層序可以避免定年及地形造成的誤判。4、由碎形維度獲得之大屯火山群噴發順序依次為：丁火朽山亞群、磺嘴山亞群、竹子山亞群、七星山亞群之第一期噴發，而後丁火朽山亞群、竹子山亞群、七星山亞群第二期噴發，爾後大屯山亞群噴發，最後是磺嘴山亞群第二期噴發。5、利用LiDAR-DEM在地形上，以小油坑為爆裂口邊界描繪的基準，將七星山西側及東側陷落區域判釋出張裂帶構造和爆裂口外形。七星山西側張裂帶中較完整的爆裂口為WFC1、WFC5和鴨池爆裂口；七星山東側張裂帶中較完整的爆裂口為EFC2、EFC4、EFC5、EFC6。張裂帶有向東北和西南方延伸的趨勢。6、碎形幾何的盒子計數法提供一維碎形維度，作為爆裂口邊界破碎程度的量化依據，用以比較相同侵蝕速率下時間因素造成的爆裂口邊界變化。結果顯示東西兩側張裂帶上爆裂口可能形成順序的排列為：WFC2 > EFC2 > EFC4 > DP > EFC6 > WFC1 > WFC5 > EFC5 > EFC1；裂谷可能形成順序的排列為：WFC3 > WFC4 > WFC8 > EFC3。7、碎形幾何的三角柱頂面積法提供二維碎形維度，可比較相對高度差的變化程度。結果顯示張裂帶的裂隙在2 m或1 m DEM下碎形維度皆相當大，反映出裂隙的東北—西南走向，並向下游延伸至東北或西南向的溪谷等。8、碎形幾何的變異曲線法提供二維碎形維度，可反映地形起伏變化的頻度和水系密度的變化。結果顯示七星山在高程超過700至800 m的坡體，較難出現32 m尺度以上的溪溝，代表張裂帶不為流水侵蝕所造成。在爆裂口中央低地的位置碎形維度較高，表示其為流水和沉積物匯集處。

二、岩芯鑽取與分析

(一)、鑽井場址

計畫規劃在七星山火山體東、西兩側各選擇四個爆裂口場址，每個爆裂口鑽取兩口各 10 公尺的岩芯，選擇的爆裂口分布如圖(圖 4-42)。



圖 4-42、本研究計畫規劃擬鑽探取芯的位置(星號為新的 S-1 鑽井場址)。

(二)、七星山火山體東側

本計畫第一年度於七星山東側張裂帶進行地質鑽探並鑽取岩芯之作業，透過旋轉式鑽取法(Rotarydrill)進行全取樣鑽探，取樣岩芯尺寸為國際岩芯規格 HQ，於 Site 1-Site 4 共計鑽取七口岩芯，實際鑽探場址如圖(圖 4-43)。岩芯深度如下表格所式(表 4-11)。

表 4-11、鑽井名稱與深度

鑽井位置名稱	深度
Site1	20m
Site 2-1	10m
Site 2-2	10m
Site 3-1	12m
Site 3-2	10m
Site 4-1	10m
Site 4-2	10m

原先規劃第一處鑽井場址為夢幻湖（設計為 S-1）。夢幻湖為生態保護區，其位於陽明山國家公園七星山東側山腰，海拔約 860 公尺，湖水面積因水量多寡差異約為 0.3-0.5 公頃，冬季水位較高，夏季有時湖水會乾涸。夢幻湖為特有種臺灣水韭唯一的野生棲地，故管理處基於鑽井於夢幻湖可能會對臺灣水韭唯一的棲地造成影響，建議不要在湖內鑽井。另外，劉聰桂教授在 1990 年(民國 79 年)曾在夢幻湖內鑽了 9 口深度不一(1-4.6 公尺) 的鑽井並取岩芯。本團隊遵從管理處的建議，夢幻湖內的岩芯採用劉教授的鑽探成果，同時也想了解爆裂口週遭的可能堆積物組成，故建議管理處把此鑽探場址移至保存最完整的爆裂口邊緣，連續鑽取一口 20 公尺的岩芯，發文取得管理處的同意後，把 S-1 鑽井場址移至 S-2 爆裂口鑽井場址的邊緣(如圖 4-43)。

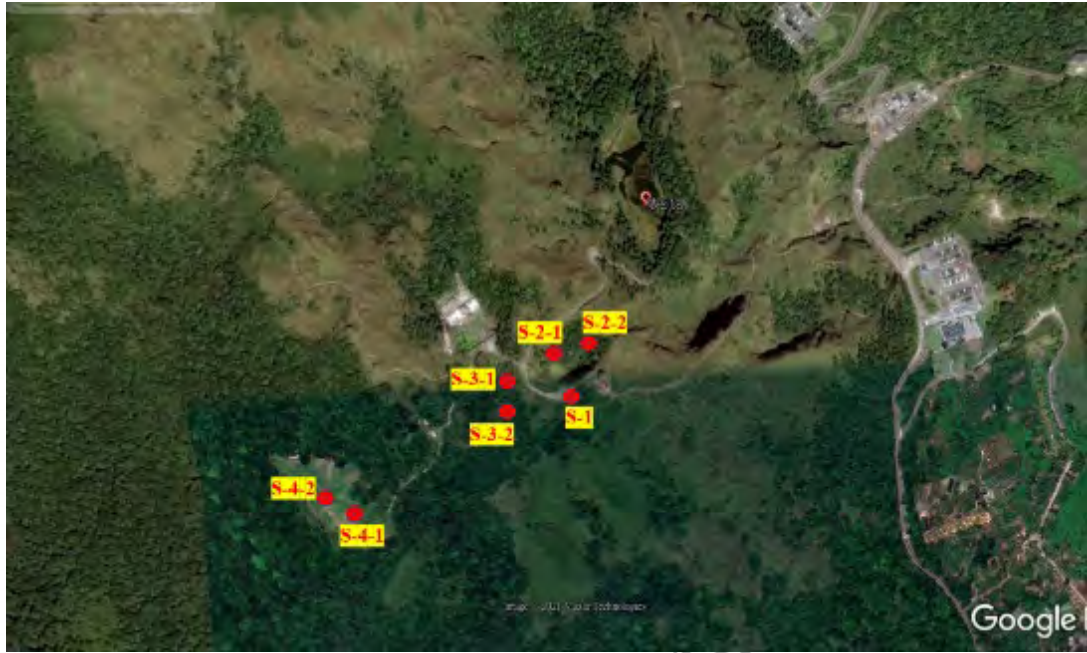


圖 4-43、東側鑽孔位置圖(底圖為 GOOGLE 衛星影像圖)。

S-2 鑽井場址之形狀較其他更為扁長，所在的高程為本區張裂帶之最高。步道旁有一觀景涼亭緊鄰 EFC5，觀察 EFC5 的凹陷地形，然而周圍高低落差大且坡度也陡，估計得使用到垂直吊掛的工具才可大達。

S-3 鑽井場址可分為上、下兩個凹地，上凹地較小其邊緣與下凹陷口重疊，下凹地呈現圓狀與上凹口有十幾公尺的落差，兩者陷落邊緣重疊，難以劃分開，故將二者合併為同一爆裂口，整體呈現似葫蘆狀外形。此凹陷口布滿箭竹等植物，宛若密林，又有地形上的落差，故此一凹陷口的鑽探在上凹地。

S-4 鑽井場址位於七星公園內，從地形上研判可能為一已填滿的爆裂口，為了解可能較老爆裂口的年代，故設計第四鑽井場址於此。

1、夢幻湖鑽井

劉聰桂(1990)在夢幻湖湖中堅和邊緣共有 9 口鑽井並取芯，其井位分布如圖 4-44。因湖底沉積物為較鬆軟且含水量高的沉積物，故其用薄管取樣以減少岩芯樣本的擾動和獲得連續的岩芯，並取樣至碰到沉積物下方之安山岩基盤為

止。其中，以位於夢幻湖中偏北的 9 號孔之深度最深約 4.6 公尺，湖的南側的深度不及 1 公尺(圖 4-45)。

由 9 號井鑽探岩芯的組成，可劃分為上下兩層:上層為深灰至黑色之泥炭層，下層為偶含少量碳片淡灰至灰白的砂質泥層。簡單描述如下：

(一)、上層(泥炭層):(自地表至地下約 1.5 公尺):湖內沉積層的表層顏色均為深灰至黑色，主要由湖中的植物所成的腐植質所構成，最大厚度約 1 公尺半。

(二)、砂質泥層(約自-1.5 公尺至-4.3 公尺)：主要由極細的黏土礦物(高嶺土)及少量砂粒大小的角閃石和斜長石所組成，依顏色與組織可再細分為 5 層。

(A) 白色泥層(-1.5 公尺至-1.75 公尺)：顏色近乎純白，與一般煤層底部的『底黏土層(under clay)』相似，是由於表層的腐植酸下滲使泥質沉積物受化學風化作用蝕變所生成，黏土礦物為高嶺土。

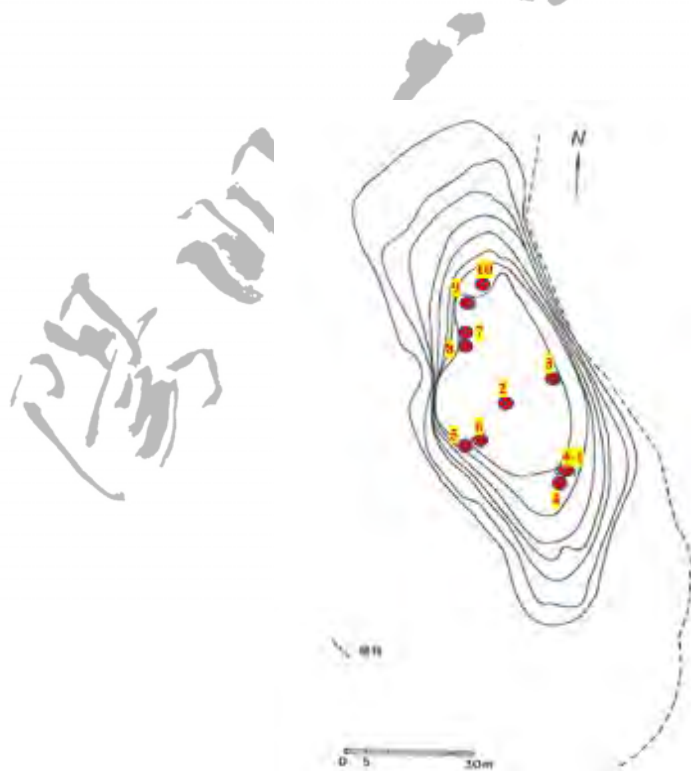


圖 4-44、1990 年度夢幻湖鑽井位置分布圖(劉聰桂，1990)。

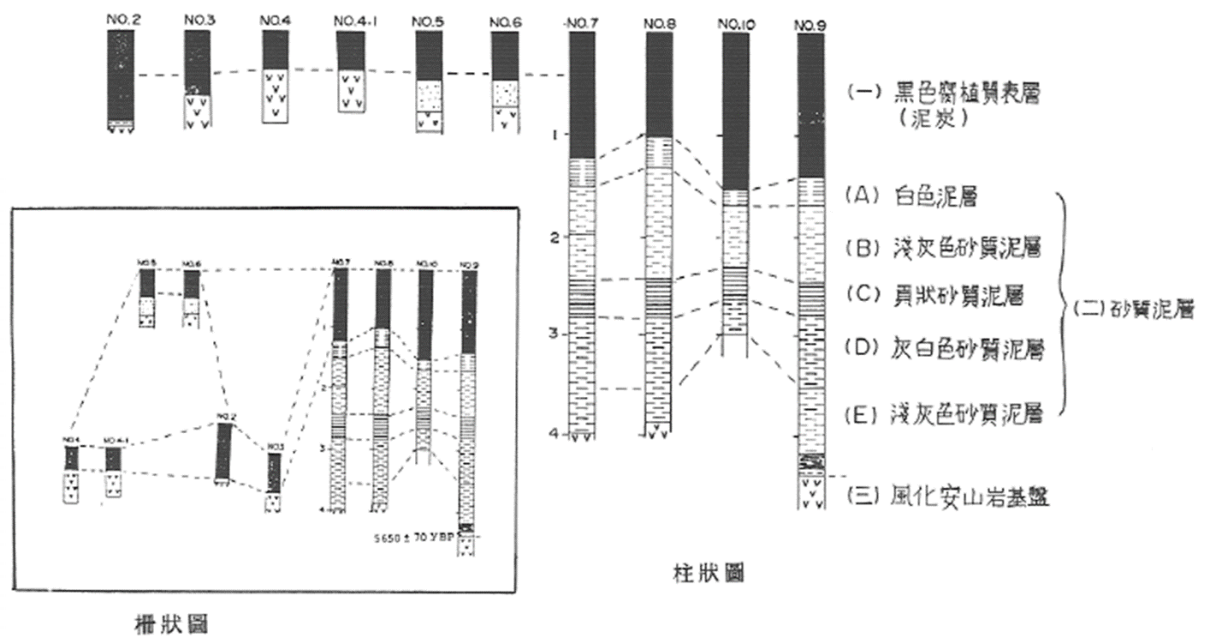


圖 4-45、1990 年度夢幻湖鑽井岩芯岩性柱狀圖(劉聰桂，1990)。

(B) 淺灰色砂質泥層(-1.75 公尺至-2.5 公尺)：主要含細粒之黏土，有少量較粗的斜長石顆粒。因其亦含少量的腐植碳片，使得顏色較(A)層為暗。

(C) 頁狀砂質泥層(-2.5 公尺至-3.0 公尺)：組成物質與(B)層相似，但含較大量的粗的斜長石顆粒且層理較明顯。

(D) 灰白色砂質泥層(-3.0 公尺至-4.0 公尺)：組成物質與(A)層相似，但顏色較淡、層理較不明顯。

(E) 淺灰色砂質泥層(-4.0 公尺至-4.3 公尺)：組成物質與(A)層相似，但在-4.3 公尺處含較多的碳物質而呈灰黑色。

(三)、風化的安山岩基盤(-4.3 公尺以下)：淺黃褐色，往下變為風化程度較低、外觀清楚的新鮮安山岩。

取自第 9 號鑽井岩芯八個碳物質樣本，從事碳十四年代的測定，其結果列於表 4-12(劉聰桂，1990)。由表 4-12 可確知，夢幻湖形成於距今約 5,600 年前，而由孢粉分析(黃增泉等,民國七十七年)可知，水韭於地下 4.0 公尺左右已開始存在。而其研究顯示夢幻湖底之安山岩基盤約於地下 4.3 公尺出現，故水韭在夢幻湖形成後不久即已出現，而其年代約為 5,000 年前。

另外，該報告中也提及七星山的火山噴發年代至少為 40 萬年前(莊,1984; 王,1989)，遠老於夢幻湖的形成年代，故夢幻湖應非以前所認為的火山口湖，亦非直接由火山活動岩漿或火山碎屑岩堵塞而成的火山堰塞湖。反之，最可能是由原有的一大約呈南北延長的狹長山谷，北端或南端因邊坡崩塌堵塞而成窪地、蓄水而成。由於該山崩發生之年代已久山崩地形早已破壞無遺，故由野外詳細勘查與鑽探資料亦無法確定是北端或南端被堰塞。不過,以南端地形較低、以及黃增泉等(民國七十七年)之研究報告所載：「....湖水 滲入....匯集於夢幻湖東南方之岩穴中再流出。其孔洞大小約 30 公分寬、5 公分高，流速估計約每小時流失 1 噸湖水左右」，這兩項資料判斷以南端被堰塞而蓄水的可能性較高(劉聰桂，1990)。但從最近的 LiDAR 影像分析、地形特徵和最新的定年結果(Belousov et al., 2010; Zellmer et al., 2015)，以及世界其他相似火山的噴發作用和所形成的地形，顯示夢幻湖可能如原先所認為的爆裂火山口，其後積水成湖。

夢幻湖所堆積的沉積物層序為：安山岩之上覆蓋含少量碳片淡灰至灰白色的砂質泥層，其後堆積深灰至黑色之泥炭層。從此一層序的堆積物研判，火山噴發形成火山口堆積成湖後，應還有零星的火山作用和熱液作用，搬運堆積火山碎屑顆粒和熱液換質產物堆積於夢幻湖火山口內，在距今 1,200 年以後可能就不再有

火山作用，噴出火山物質堆積在湖內，而是以植物生長和碎屑堆積於夢幻湖內，形成深灰至黑色之泥炭層。

表 4-12、夢幻湖 9 號鑽井岩芯八個碳物質樣本的碳十四年代測定結果(劉聰桂，1990)。

標本號碼	地表下深度 (公尺)	碳十四年代 (距今計年)*	經樹輪校正後之年代 (距今計年)	$\delta^{13}\text{C}(0/00)$ $\pm 0.1\ 0/00$
NTU-1285	-0.10~-0.20	510 $\pm$ 75	530 $\pm$ 75	-15.83
NTU-1294	-0.27~-0.33	605 $\pm$ 50	640; 600; 560; ± 50	-15.32
NTU-1286	-1.07~-1.17	1250 $\pm$ 50	1180 $\pm$ 50	-15.18
NTU-1293	-2.07~-2.17	3460 $\pm 500^{**}$	3800; 3710; ± 500	-20.39
NTU-1295	-3.07~-3.17	4000 ± 500	4510; 4490; 4450; ± 500	-17.37
NTU-1296	-3.42~-3.52	4270 ± 500	4860 $\pm$ 500	-17.85
NTU-1260	-4.4 ~-4.6	(A) 4900 $\pm$ 70 ***	5650 $\pm$ 70	-19.59
NTU-1261	-4.4 ~-4.6	(H) 4400 ± 100	4980 $\pm$ 100	-19.20

註：* 碳十四年代以西元1950年為"今"

** 標準偏差較大，因所含碳樣極少

*** (A) 洗除腐植酸後之殘餘固體碳樣

(H) 標本中洗滌出來的腐植酸

2、鑽井成果

2-1、S-1 鑽井

S-1 原先規劃鑽在夢幻湖內，但因其為水韭生態保護區，為免擾動其生態，獲得管理處的同意，把 S-1 鑽井場址移至本區火山爆裂口(S-2)保存最好的邊緣，目的是為了瞭解這些爆裂口的噴發產物是否堆積在爆裂口邊緣，以及爆裂口噴發前的岩盤特性。實際鑽井場址如圖 4-46。此場址直接鑽探且連續取岩芯 20 公尺，所獲得岩芯如圖 4-47~圖 4-51。



圖 4-46、S-1 鑽井場址照片圖。



圖 4-47、S-1 鑽井 0-4 公尺岩芯



圖 4-48、S-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。

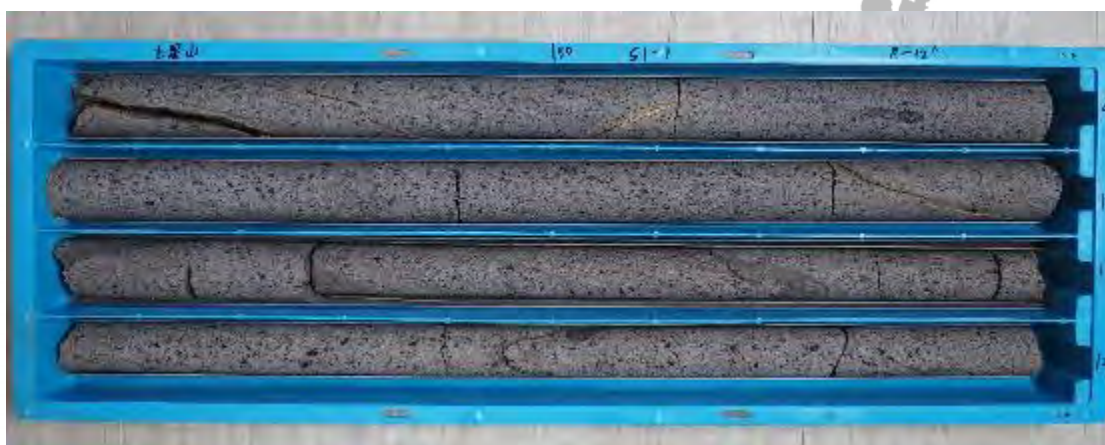


圖 4-49、S-1 鑽井 9-12 公尺岩芯。



圖 4-50、S-1 鑽井 13-16 公尺岩芯。



圖 4-51、S-1 鑽井 17-20 公尺岩芯。

2-2、S-2 鑽井

此鑽井場址坐落在觀景台下方保存最完整的爆裂口內(圖 4-52~圖 4-54)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-2-1 和 S-2-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，所獲得岩芯分別如圖 4-55~圖 4-57 和圖 4-58~圖 4-60。



圖 4-52、S-2 鑽井場址所搭建之吊架台。



圖 4-53、S-2 鑽井場址內的鑽井位置(從上方拍照)。



圖 4-54、S-2 鑽井場址內的鑽井位置。



圖 4-55、S-2-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-56、S-2-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。



圖 4-57、S-2-1 鑽井 9-10 公尺岩芯。



圖 4-58、S-2-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-59、S-2-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。



圖 4-60、S-2-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。

2-3、S-3 鑽井

此鑽井場址緊鄰 S-2 爆裂口的南方，爆裂口內稀疏長滿的箭竹(圖 4-61)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-3-1 和 S-3-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，所獲得岩芯分別如圖 4-62~圖 4-64 和圖 4-65~圖 4-67。



圖 4-61、S-3 鑽井場址內的鑽井位置。



圖 4-62、S-3-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-63、S-3-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。

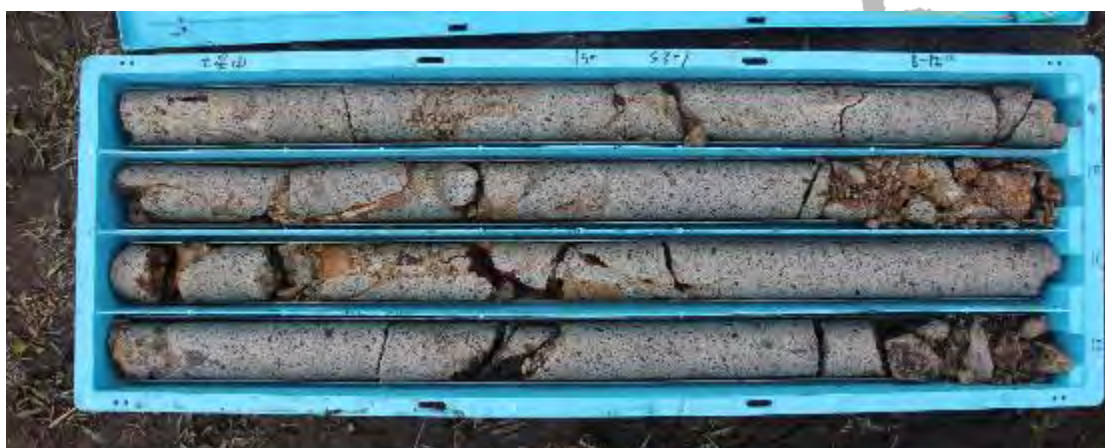


圖 4-64、S-3-1 鑽井 9-12 公尺岩芯。

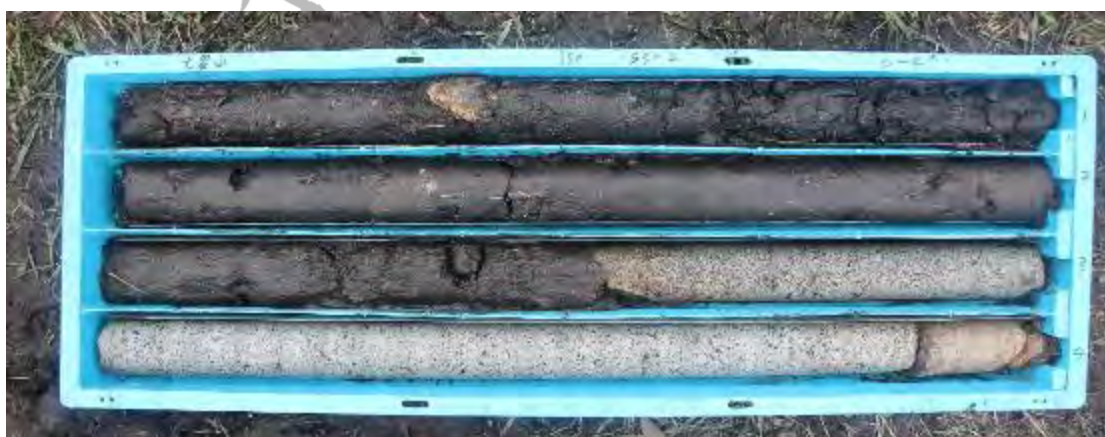


圖 4-65、S-3-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-66、S-3-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。



圖 4-67、S-3-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。

2-4、S-4 鑽井

此鑽井場址坐落於七星公園內，主要鑽於草地上圖 4-68 和圖 4-69)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-4-1 和 S-4-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，中間有空洞故無法獲得完整的岩芯，所獲得岩芯分別如圖 4-70~圖 4-72 和圖 4-74~圖 4-75。



圖 4-68、S-4-1 鑽井場址。



圖 4-69、S-4-2 鑽井場址。



圖 4-70、S-4-1 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-71、S-4-1 鑽井 5-8 公尺岩芯。



圖 4-72、S-4-1 鑽井 9-10 公尺岩芯。



圖 4-73、S-4-2 鑽井 0-4 公尺岩芯。



圖 4-74、S-4-2 鑽井 5-8 公尺岩芯。

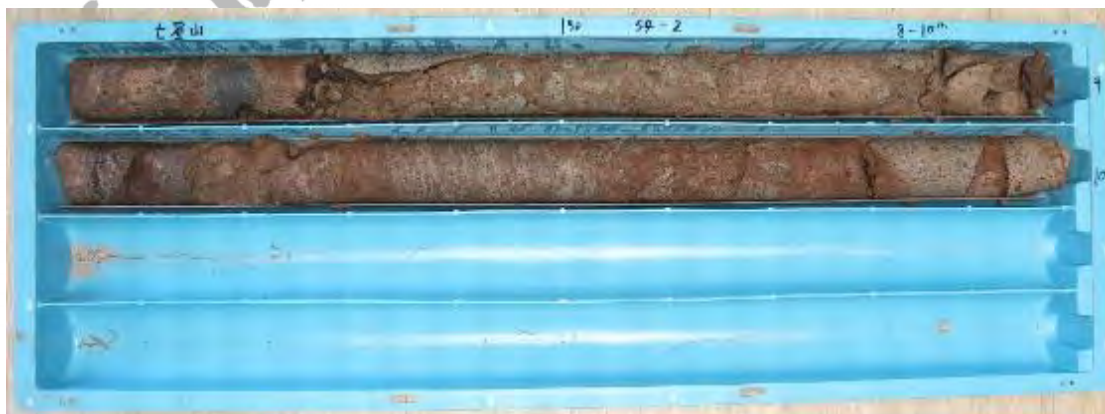


圖 4-75、S-4-2 鑽井 9-10 公尺岩芯。

3、岩心整備與採樣

本研究經地質鑽探取出岩芯後，需經過一系列整備工作，方能進行分析與取樣之工作，本章節將針對研究岩芯整備與取樣之流程進行簡述。本研究之岩芯整備與取樣流程如下：岩芯外管整備→多感測岩芯掃描儀分析→岩心切割剖半，剖半後分為(A)工作岩芯→岩芯拍攝→岩芯描述→岩芯取樣，以及(B)封存岩芯→岩芯拍攝→岩芯包裝封存(見圖 4-76)。

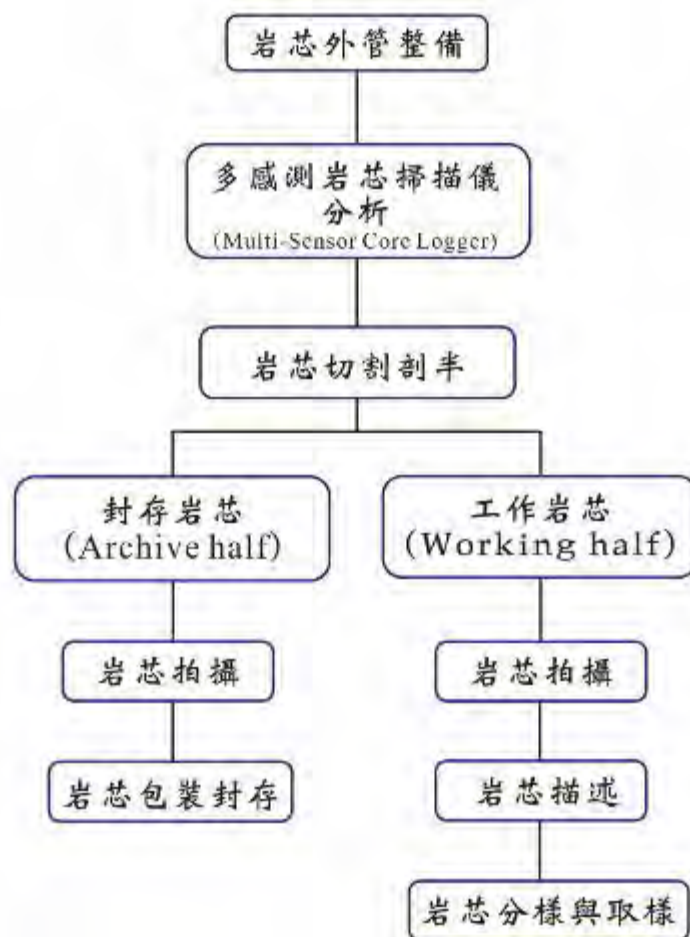


圖 4-76、岩芯整備與取樣流程圖。

3-1、岩芯外管整備

首先須先從岩芯箱中取出，退除岩芯的外層保鮮膜包覆(圖 4-77)，並將岩芯下方的塑膠半管進行清潔擦拭，清除泥沙髒污以便後續分析進行不污染儀器。

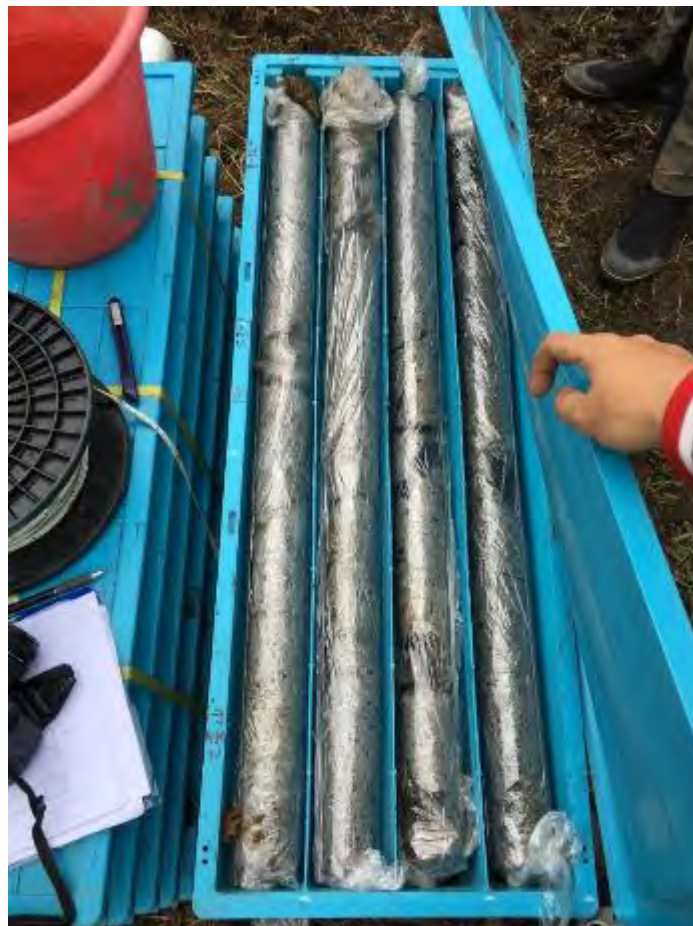


圖 4-77、退除岩芯的外層保鮮膜包覆。

3-2、多感測岩芯掃描儀分析

將岩芯送至國家實驗研究院臺灣海洋科技研究中心的地質實驗室(TORI)使用多感測岩芯掃描儀岩芯記錄器 (Multi-Sensor Core Logger) 進行掃描，分析岩芯的物理性參數如: 1. 統體密度、2. 孔隙率、3. 磁感率、4. 壓縮波 (P 波) 波速、5. 聲阻抗值、6. 聲衰減率、7. 電阻抗值、8. 可見光反射色，供後續分析使用(見圖 4-78&圖 4-79)。因岩芯主要是有機質沉積物，除了獲得磁感率、密度、. 孔隙率和電阻抗外，其他數據(P 波波速、聲阻抗值、聲衰減率、可見光反射色)無法獲得。另外，有機質沉積物的密度、. 孔隙率、電阻抗的意義較不大，就不在此呈現。



圖 4-78、海洋科學研究中心地質實驗室的 MSCL 研究倉。



圖 4-79、多感測岩芯掃描分析儀(MSCL)岩芯分析實景圖。

3-3、岩芯切割剖半

首先將待進行剖半切割的岩芯平放置於實驗桌的木製岩芯托架上，並於一旁準備好新的岩芯托片半管備用，以便乘裝剖半的岩芯。使用強化尼龍釣魚線(鬆軟沉積物)或手持線鋸(硬質沉積物)將岩芯一分為二(圖 4-80&圖 4-81)，剖半時需兩人一組，一人負責剖半一人負責抓緊岩芯。剖半完成後將一半的岩芯做為封存岩芯(Archive half)進行保存，另一半岩芯做為工作岩芯(working half)進行後續取樣與分樣工作。



圖 4-80、岩芯剖半操作示意圖，照片左側為新的岩芯托片半管。

操作人員正使用強化尼龍釣魚線進行岩芯剖半工作。



圖 4-81、若遇到膠結程度較好的沉積物，則使用手持線鉅進行岩芯剖半。

3-4、封存岩芯-拍攝與封存

剖半完成後，封存岩芯需先使用數位相機進行拍攝建檔，待拍攝完成後立刻使用保鮮膜將岩芯密封(圖 4-82)，避免岩芯發生氧化與變質，並送至恆溫冷藏岩芯庫存放。

3-5、工作岩芯-拍攝、岩芯描述與取樣分樣

剖半後的工作岩芯，首先需要使用刮刀將岩芯表面清理乾淨(圖 4-83)，清理完成之後，使用設位相機進行拍攝建檔；拍攝建檔完成後進行岩芯紀錄描述，描述項目與規格參照海洋科學中芯之標準岩芯描述表進行紀錄，紀錄項目包括：岩性、粒徑、淘選度、圓度、顏色、沉積構造、裂隙、岩屑概略組成等等。



圖 4-82、封存岩芯拍攝完畢後，立刻使用保鮮膜將其包覆，避免岩芯發生氧化。

紀錄完成後接續進行岩芯取樣工作，本研究分別於軟質沉積物以及塊狀安山岩的岩段進行取樣，軟質沉積物使用不鏽鋼製聶子與挖勺進行取樣的取樣密度為每 3 公分取一個樣本，每個取樣樣本的沉積物約採樣 $5 \times 1 \times 4 \text{ cm}^3$ (長 x 寬 x 高) 以便後續分析使用(圖 4-84)。取出之樣本，皆以乾淨的鋁箔紙包覆後裝進密封夾鏈袋，並給予樣本編號；最後採樣完成之後送進冰箱恆溫冷藏保存避免樣品變質。



圖 4-84、工作岩芯於拍攝以及岩芯描述紀錄之前須使用刮刀清潔岩芯表面，以便後續觀察。



圖 4-83、工作岩心使用鋼製聶與挖勺進行取樣，取樣後使用鋁箔紙包覆裝入夾鏈袋中密封。

4、岩芯描述

本章節將針對本研究各個鑽探地點所取樣之岩芯進行岩相組成描述，並配合岩芯柱狀圖與岩芯照片，陳述各鑽探地點隨深度之改變的岩石產狀變化。

4-1：S-1 鑽井

S-1 的鑽探深度為 20m，所鑽取出的岩芯顯示，岩石產狀隨深度遞增有產生變化(圖 4-85A)。概略上可以將本點位區分為 3 個部分，其中(1)地下 2.75m 至地下 20m 的岩石產狀為黃-紅-灰色的厚層熔岩流(massive lava flow)；這些熔岩流的表面可以見到 2 公分以上的角閃石、輝石斑晶，熔岩流於 10.5m 之後展示出不同的顏色間夾於其中，於岩芯上顯現有如流線理構造(lineation texture)的樣貌。(2)3.75 至 0.42m 則為淘選度差的砂做為基質，混夾著角狀至次圓狀，風化程度有所差異的黃色至灰色安山岩岩塊，岩塊的大小可由 2cm 至 15cm 不等(圖 4-85B & 圖 4-85C)。(3)0.42m 至 0m 則為黑色的土壤層(似 O 層)，本層內富含植根的殘塊以及部分新鮮植根(圖 4-85D)。

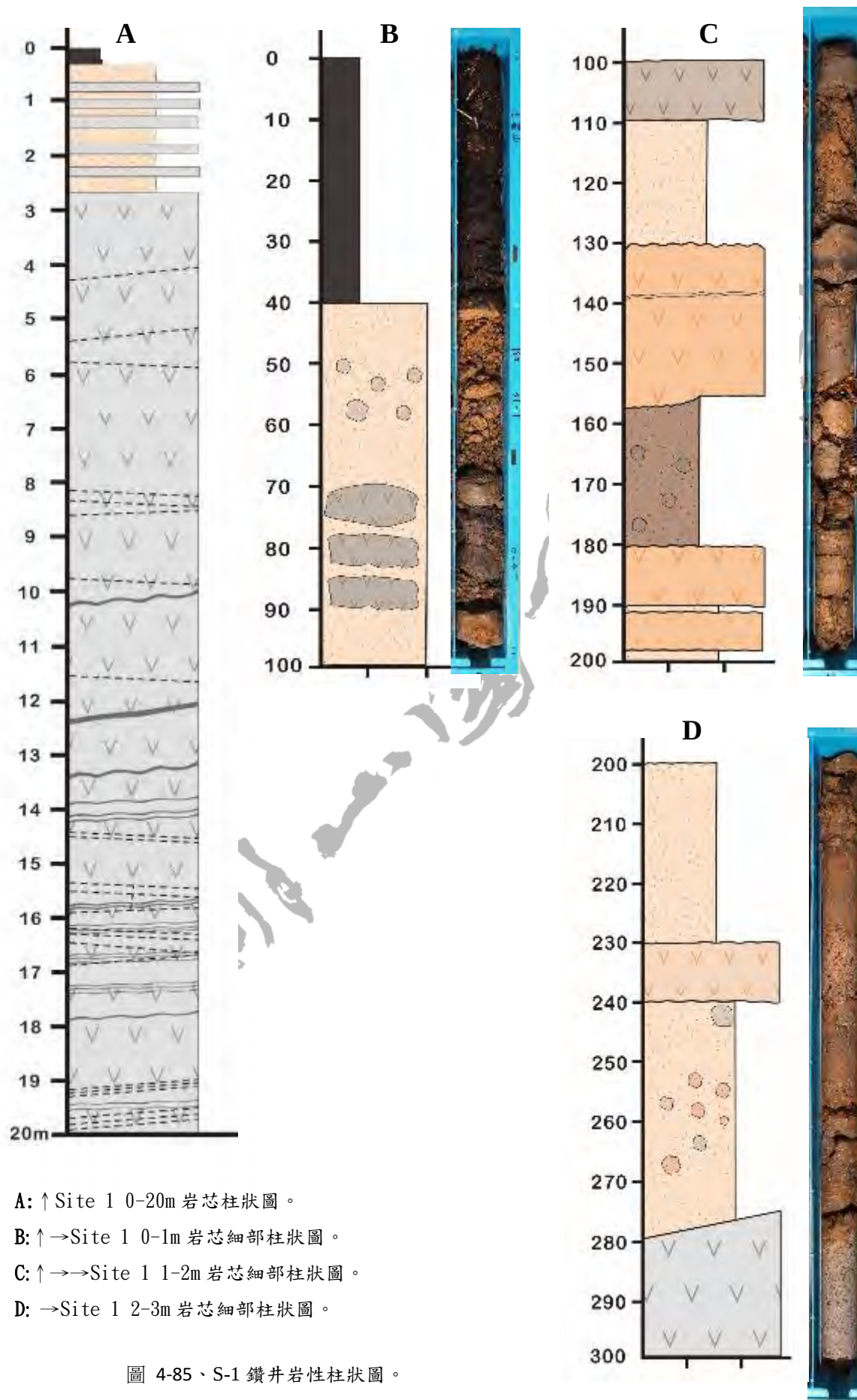


圖 4-85、S-1 鑽井岩性柱狀圖。

4-2、S-2-1 鑽井

Site 2-1 的鑽探深度為 10m，隨深度岩石產狀發生變化，其中 0-3m&5.35-8.0m 為砂質泥岩，其餘為熔岩流，詳細產狀描述與深度位置如後所述(圖 4-86A)。

0-1m 為黑色泥岩混夾植根碎屑(圖 4-86B)。1-1.7m 為 60cm 長的灰色熔岩流，表面可見角閃石與輝石班晶，部分區塊有風化的鐵黃色痕跡;其中於 1.2-1.3m & 1.5~1.6m 處有多組破裂面，這些破裂所產生的裂隙中填充有黑色泥岩(圖 4-86C)。1.7-3.2m 為黑色的砂質泥岩，其中 2.1&2.3&2.5m 處夾有砂至中礫的風化碎屑沉積物(圖 4-86D)。接續 3.2-5.35m 為灰色熔岩流，部分區域為輕微風化的淺黃色，本段的最頂部(3.2m)有較為明顯的風化痕跡，顏色呈現橘紅色(圖 4-86E)。全段表面皆可以見到輝石與角閃石的班晶。5.35-6.6m 為深黑色砂質泥岩，本段之中 5.53-5.57、5.65、6.37 & 6.44-6.52 處有砂粒徑等級之沉積物呈現平行層理的排列(圖 4-86F & 圖 4-86G)。6.6-7.0m 則為 40cm 長的灰色熔岩流，本段頂部 5cm 風化較為明顯呈現紅黃色，表面可見輝石與角閃石班晶。7.0-8.0m 則為深黑色的砂泥岩，其中 7.3-7.44 處有砂粒徑大小的沉積物呈現平行排列(圖 4-86H)。8.0m-10.0m 則為灰紅色的熔岩流。

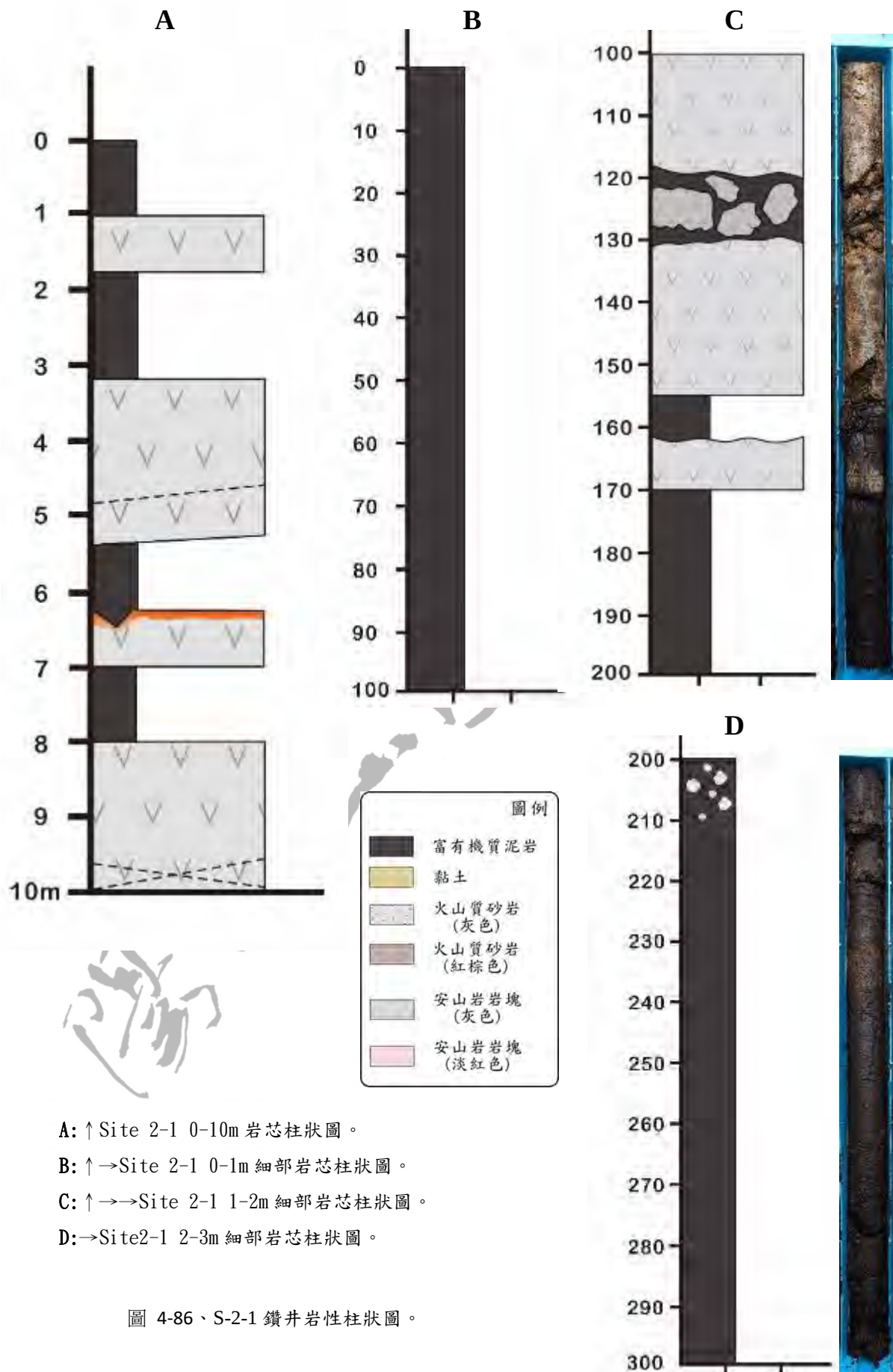
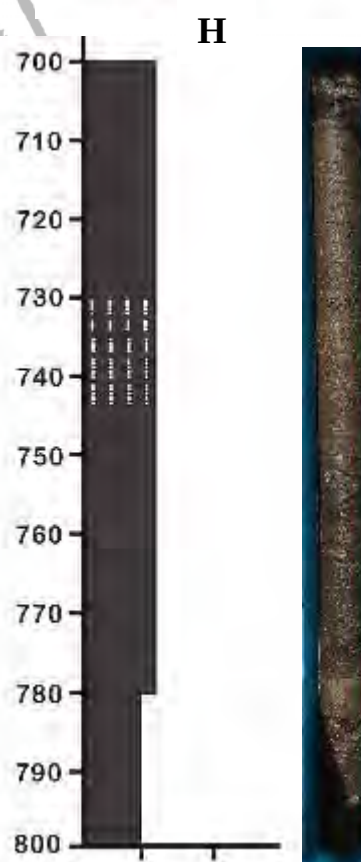
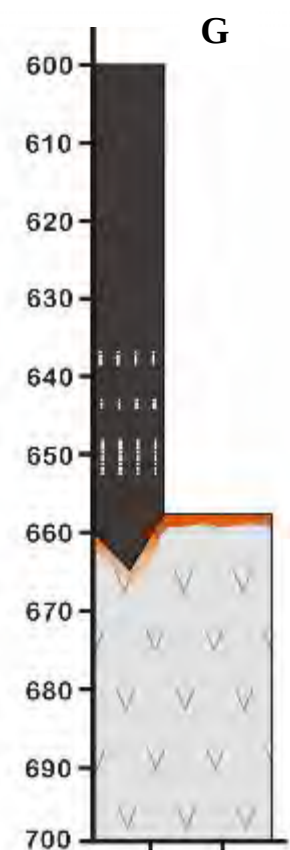
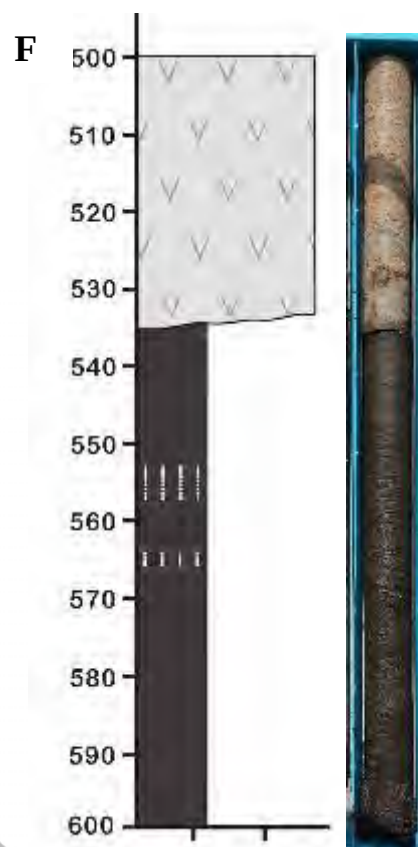
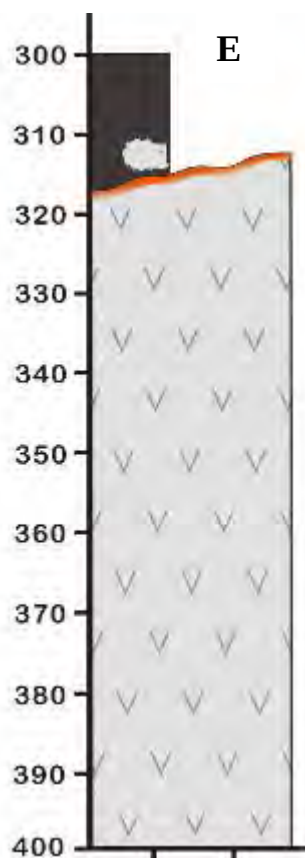


圖 4-86、S-2-1 鑽井岩性柱狀圖。



E: ↑ ↑ Site 2-1 3-4m 細部岩芯柱狀圖。

F: ↑ ↑ → Site 2-1 5-6m 細部岩芯柱狀圖。

G: ↑ Site 2-1 6-7m 細部岩芯柱狀圖。

H: ↑ → Site 2-1 7-8m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-86、S-2-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

4-3、S-2-2 鑽井

Site 2-2 的鑽探深度總深為 10m，其中 0-3.0m 主要為砂質泥岩，3.0-10.0m 為熔岩流，詳細產狀描述如後所述(圖 4-87A)。

0m-2.8m 為深黑色的砂質泥岩，其中位於 2m 處夾有約五公分大小的風化安山岩岩塊，1.44m-2.23m & 2.23-2.82m 處可以發現一些砂粒徑等級的石英顆粒沉積物(圖 4-87B)。3-4m 為灰色熔岩流，表面可見到角閃石與輝石斑晶，本段 3.45-3.7m 處有寬約 4 公分的裂隙填充有深黑色的砂質泥岩，並且周圍安山岩的接觸面呈現紅黃色的風化面(圖 4-87B)。4.0-4.35m 為深棕色的砂質泥岩，夾有細砂粒徑大小的石英碎屑(圖 4-87C)。

4.35-10m 主要為灰至淺紅黃色熔岩流，熔岩流表面可見輝石與角閃石斑晶；其中 4.75-4.84m、5.75-6.15m & 6.5-6.7m 夾有 9~40cm 不等的深棕色砂質泥岩和砂岩，5.75-6.15m & 6.5-6.7 兩處皆可見到砂至礫等級的安山岩岩屑與岩塊混夾於其中(圖 4-87C & 圖 4-87D)。7.12-9.2m 處則為黃紅色的凝灰質砂岩夾雜安山岩岩塊，岩塊有深棕色與灰色等顏色混雜於其中。其中 7.7-9m 處較為破碎，並且於 7.7-8.0m 處最為破碎，部分基質已經缺失僅留下安山岩岩塊。

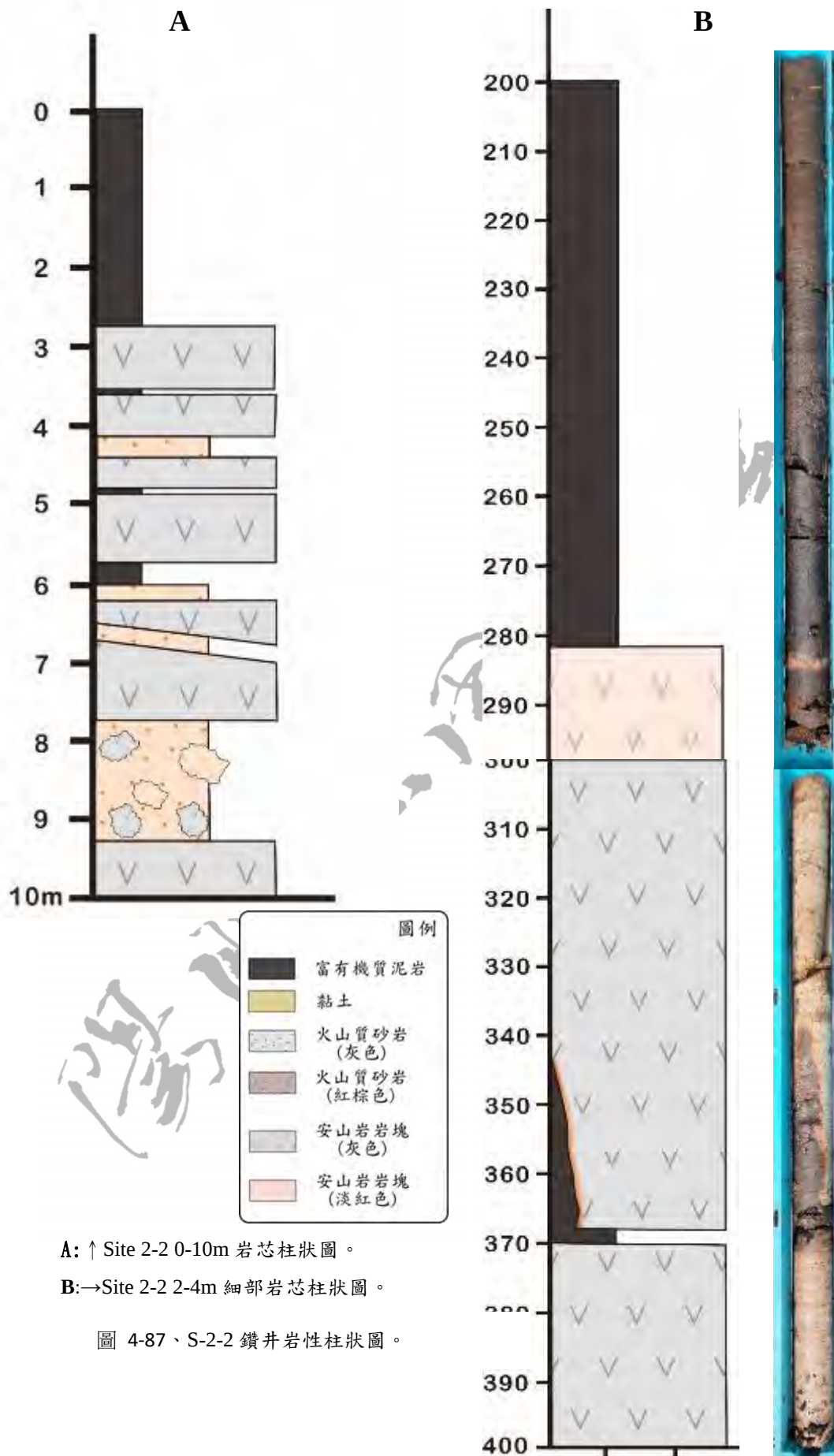
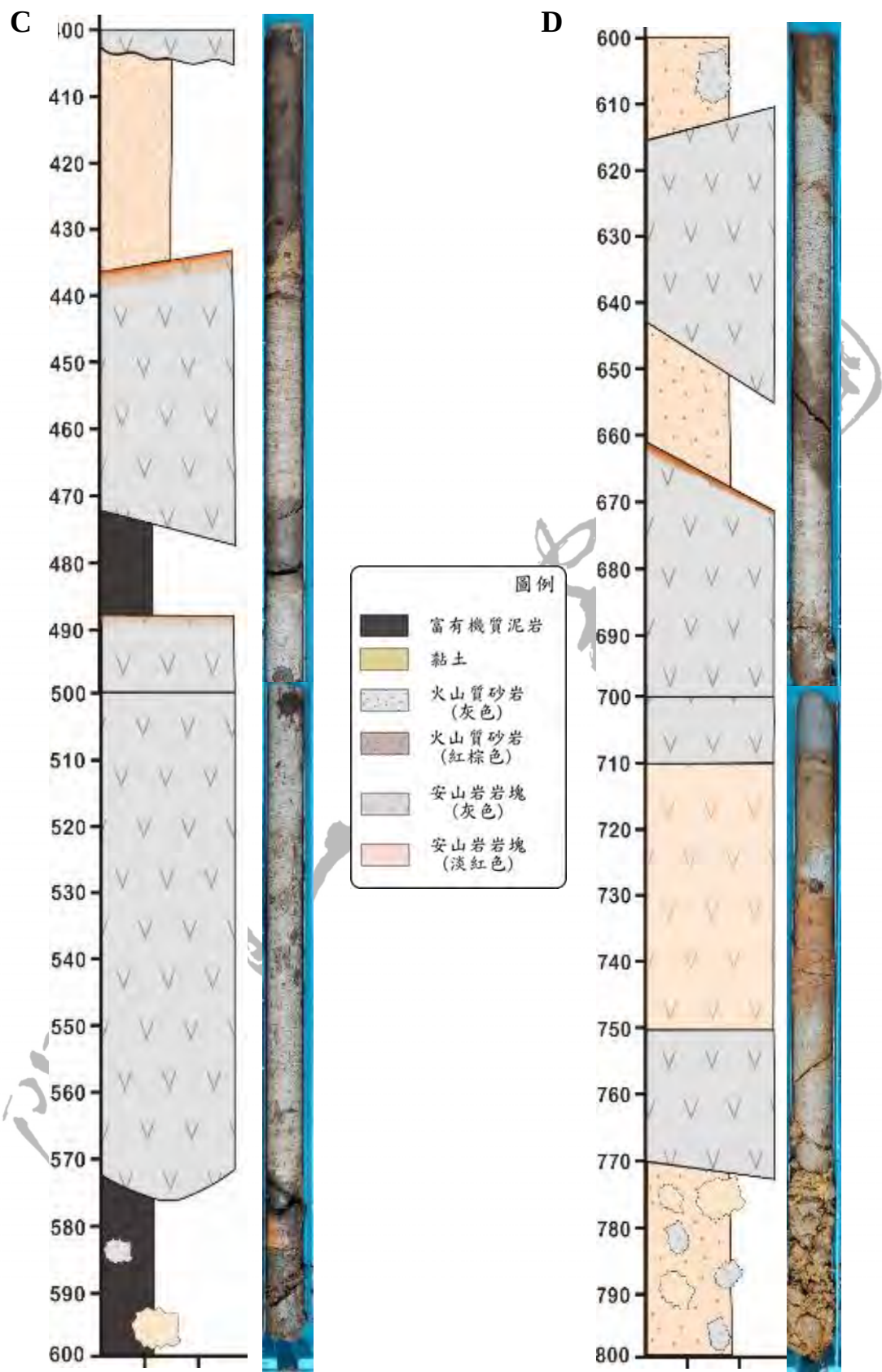


圖 4-87、S-2-2 鑽井岩性柱狀圖。



C: ↑Site 2-2 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

D: ↑→ Site 2-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

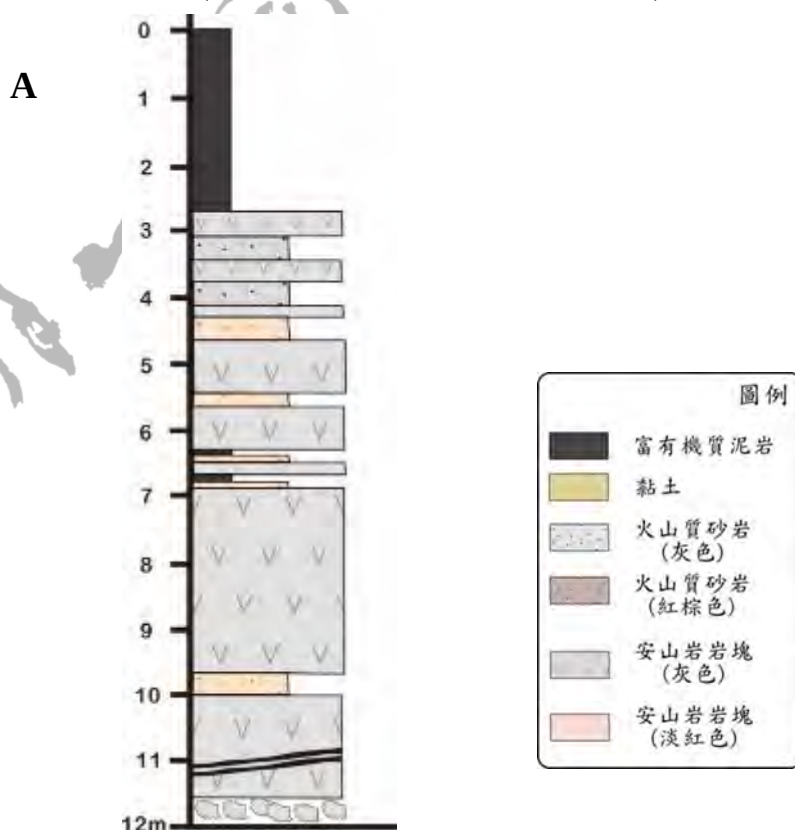
圖 4-87、S-2-2 鑽井岩性柱狀圖(續)。

4-4、S-3-1 鑽井

Site 3-1 的鑽探深度為 12m，概略來看可依照岩性分為三個部分，首先(1)0-2.9 米砂質泥岩，(2)2.9-4.8m 為凝灰質砂岩混夾安山岩岩塊，(3)4.8-12m 則為熔岩流，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-88A)。

0-2.8m 為深黑色的砂質泥岩，其中 0.75-0.8m 處含有較多砂粒徑大小的石英碎屑(圖 4-88B)，2-2.8m 中也可見到少量的石英質碎屑。2.8-4.8m 為橘至棕色的凝灰質砂岩夾雜風化程度不一的安山岩岩塊，其中於 3.3-3.55m & 4.4-4.7m 處夾有兩塊較大的安山岩岩塊(圖 4-88C & 圖 4-88D)。

4.8-12m 為灰色的熔岩流，於熔岩流表面可以看到角閃石與輝石的班晶。此段熔岩流較為破碎，可見破裂裂隙之中填充有棕色的砂粒徑等級沉積物。尤其於深度 9-11m 之間最為破碎，裂隙中填充物也較多；11.4-11.5m 處有一寬約五公分的裂隙則填充有深黑色的砂質泥岩(圖 4-88E、圖 4-88F、圖 4-88G)。



A: Site 3-1 0-12m 岩芯柱狀圖。

圖 4-88、S-3-1 鑽井岩性柱狀圖。

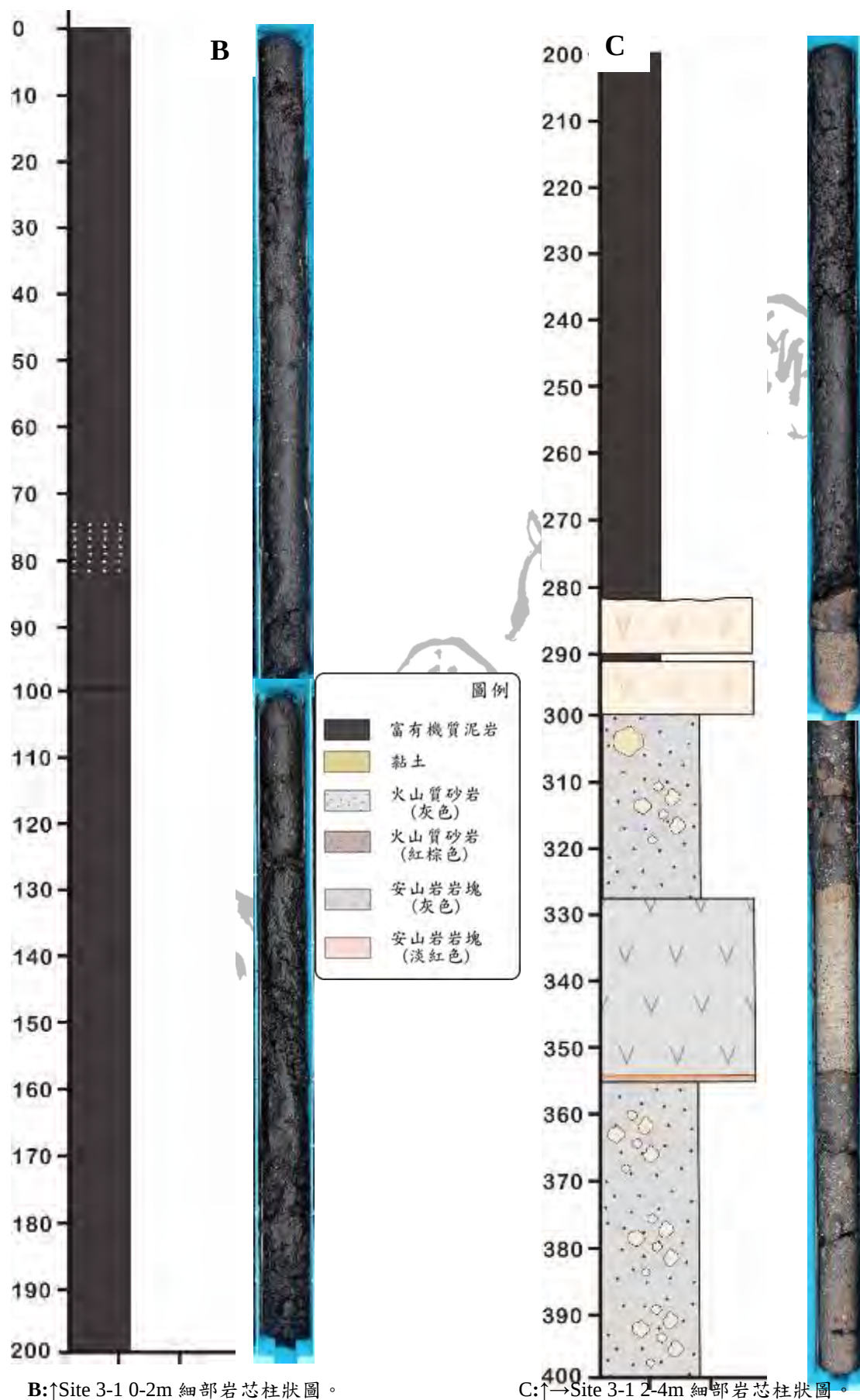


圖 4-88、S-3-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

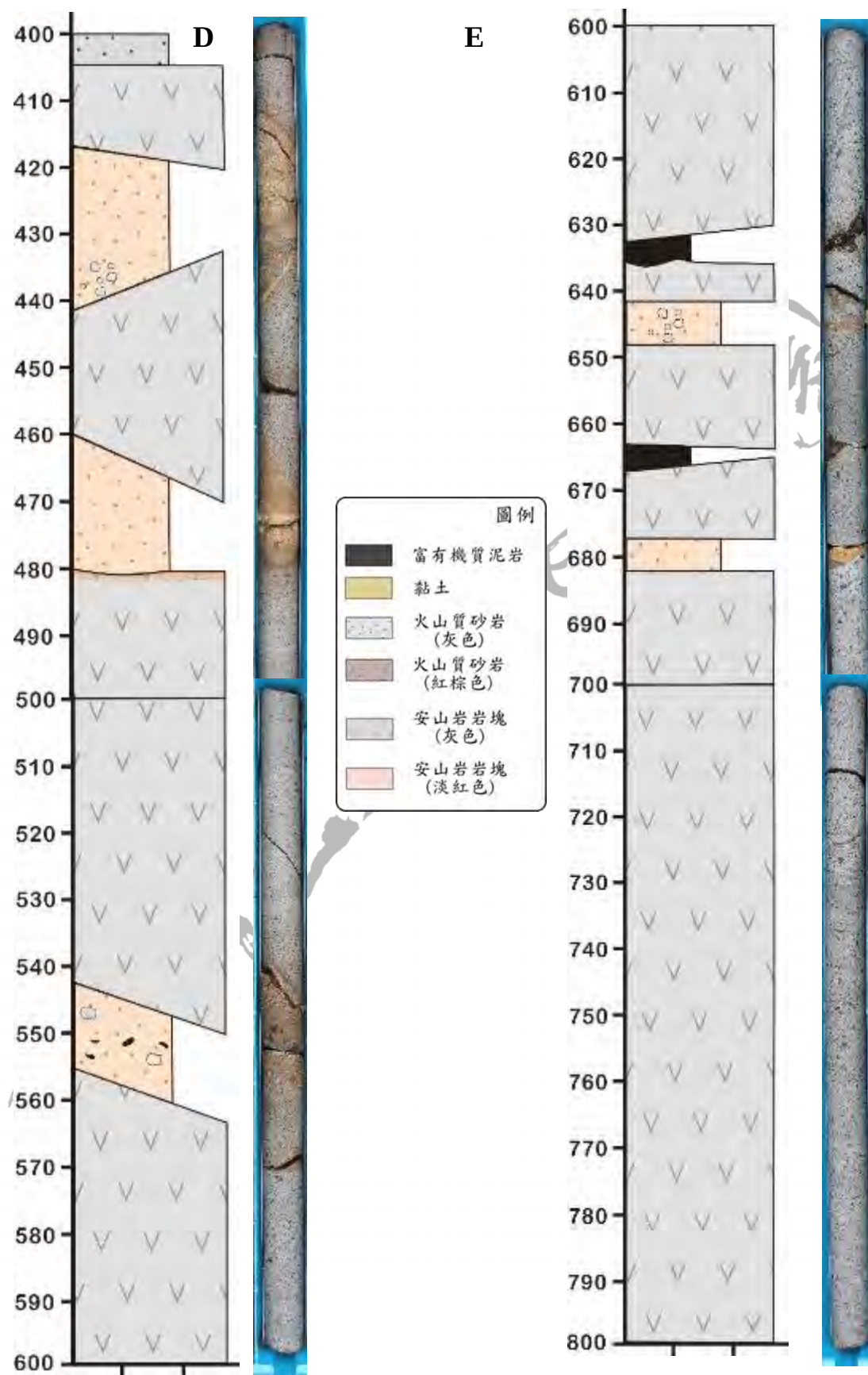
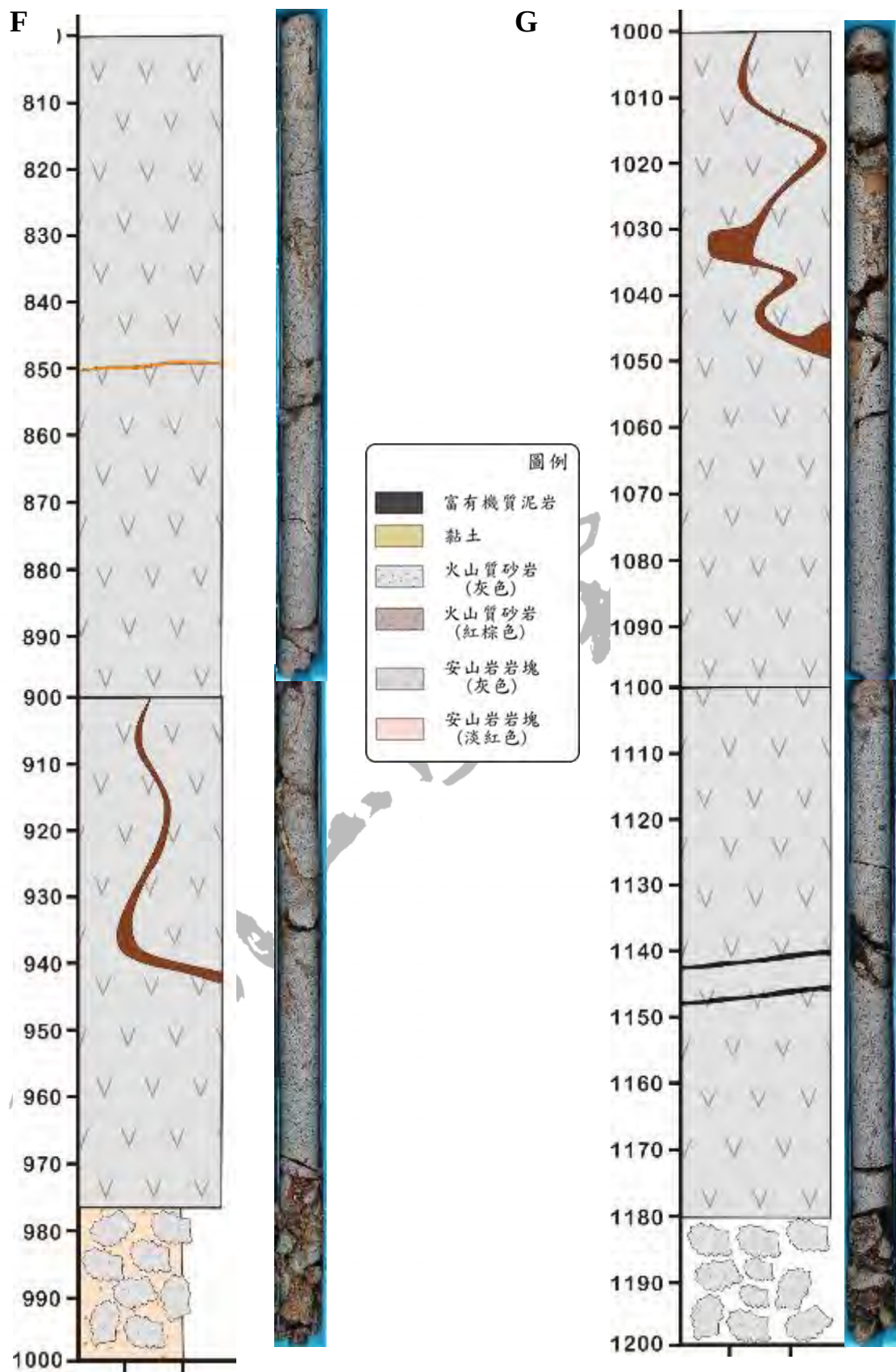


圖 4-88、S-3-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。



F: ↑ Site 3-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

G: ↑ → Site 3-1 10-12m 細部岩芯柱狀圖

圖 4-88、S-3-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

3-5、S-3-2 鑽井

Site3-2 的鑽探深度總深為 10m。0-2.8m & 4-5m 為砂質泥岩，2.8-4m & 7.8-10.0m 為熔岩流，5-7.8m 為凝灰質砂岩混夾安山岩岩塊，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-89A)。

0-2.8m 為深黑色的砂質泥岩，這些砂質泥岩中可發現少量的石英碎屑散佈於本段之中，0.4m 處有發現一直徑約四公分疑似為沉積岩的岩塊(圖 4-89B)。2.8-4m 則為灰色的熔岩流，熔岩流表面可見到輝石與角閃石班晶(圖 4-89C)。4-5m 為深黑色砂質泥岩，這些砂質泥岩之中可以見到少量的石英碎屑，並於 4.08-4.19m 處夾有一層厚約 9cm 的砂岩沉積物，並且於其中可見石英碎屑的含量較高(圖 4-89D)。

5-7.8m 處為棕至黃色的凝灰岩質砂岩，夾雜風化程度不一的灰色至黃橘色安山岩岩塊。這些安山岩岩塊呈現次圓狀，並且岩塊的粒徑最大可至 12cm；而填充於安山岩塊之間的凝灰岩質砂岩，詳細觀察可發現其中也夾有少量的石英碎屑(圖 4-89E)。

7.8-10.0m 為灰色的熔岩流，熔岩流表面可以見到輝石與角閃石的班晶。其中於本段之中的 8-9m 破裂較多，這些破裂的裂隙之中填有深黑色的泥質砂岩(圖 4-89F)。

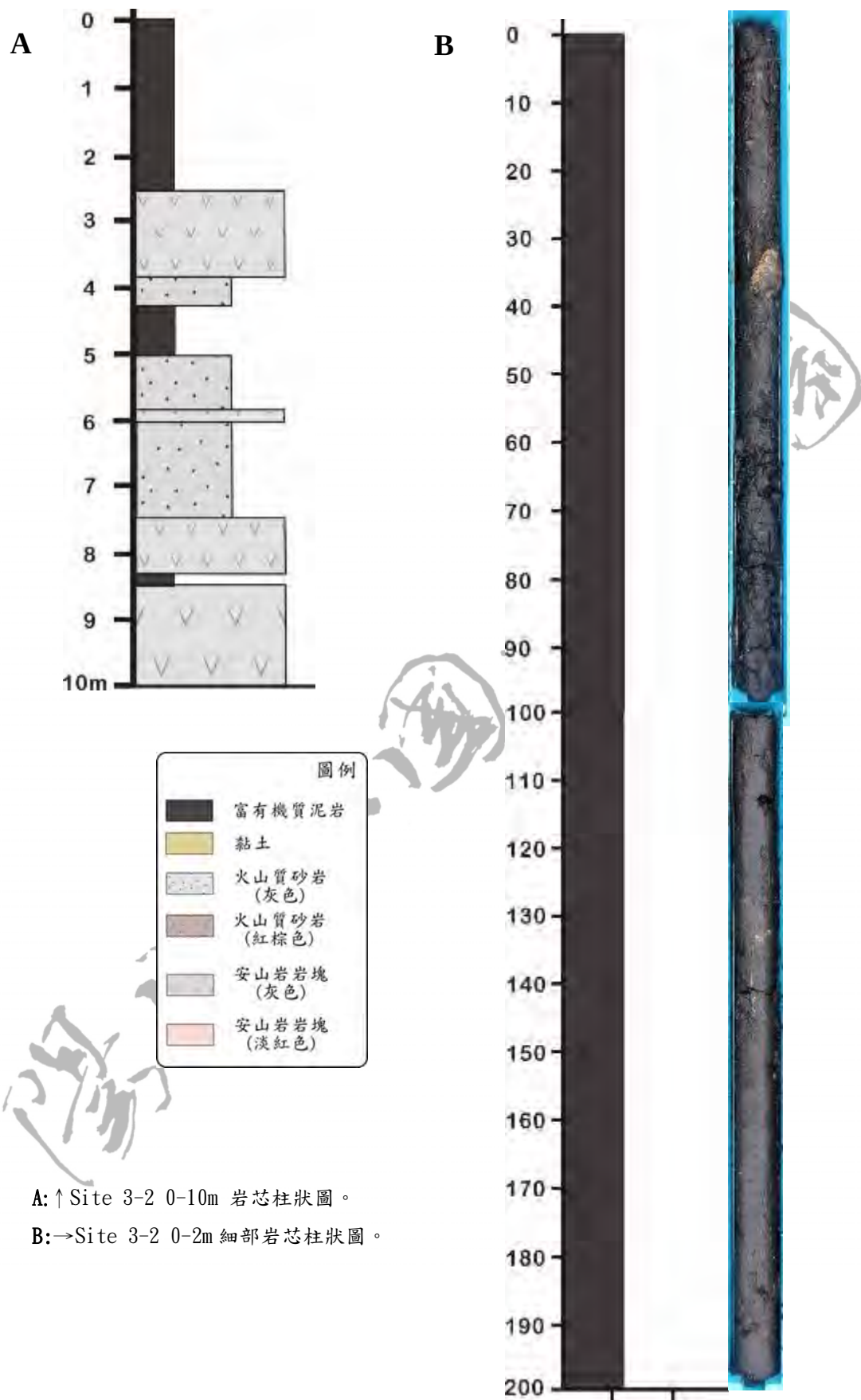


圖 4-89、S-3-2 鑽井岩性柱狀圖。

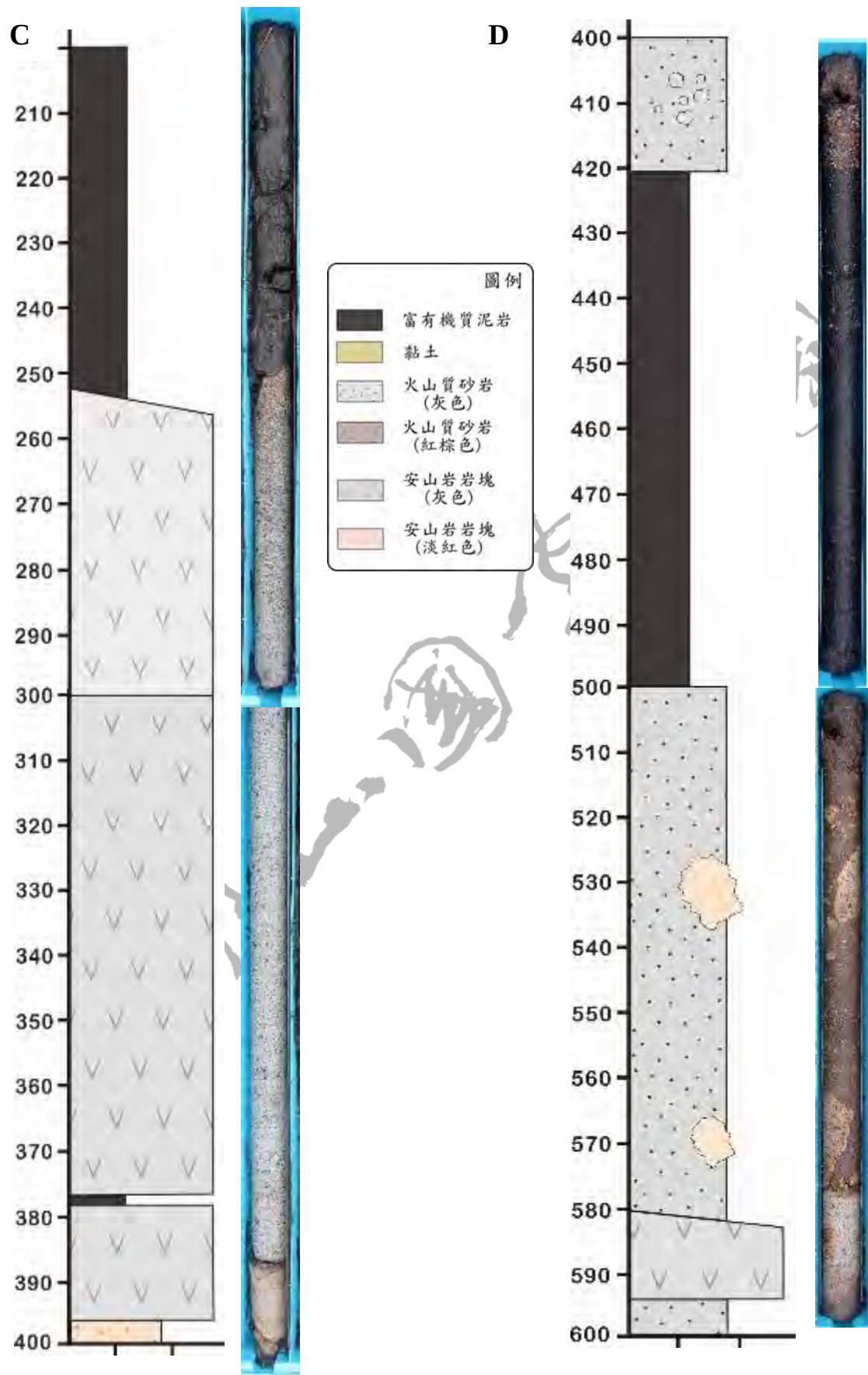
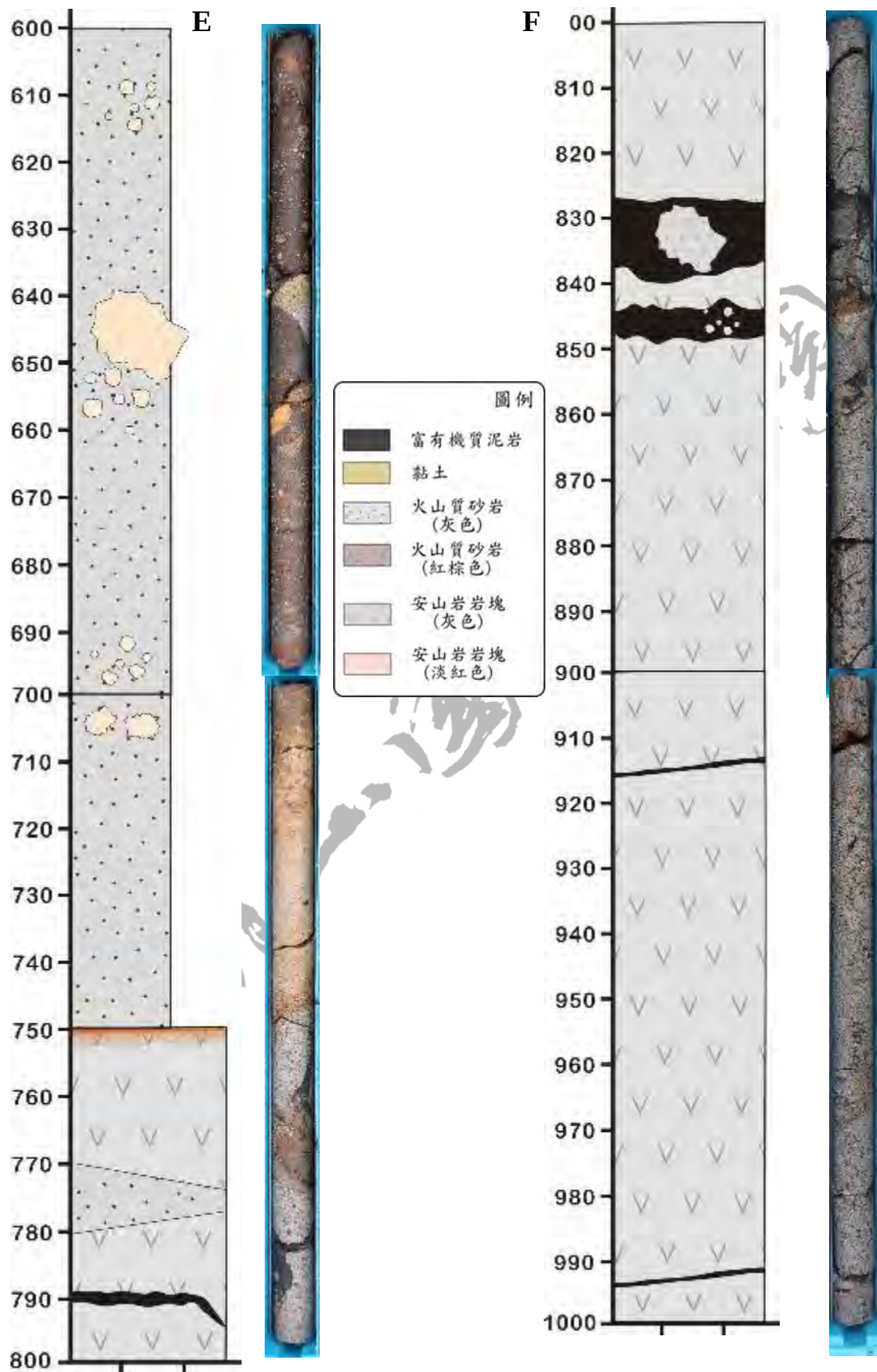


圖 4-89、S-3-2 鑽井岩性柱狀圖(續)。



E: ↑ Site 3-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

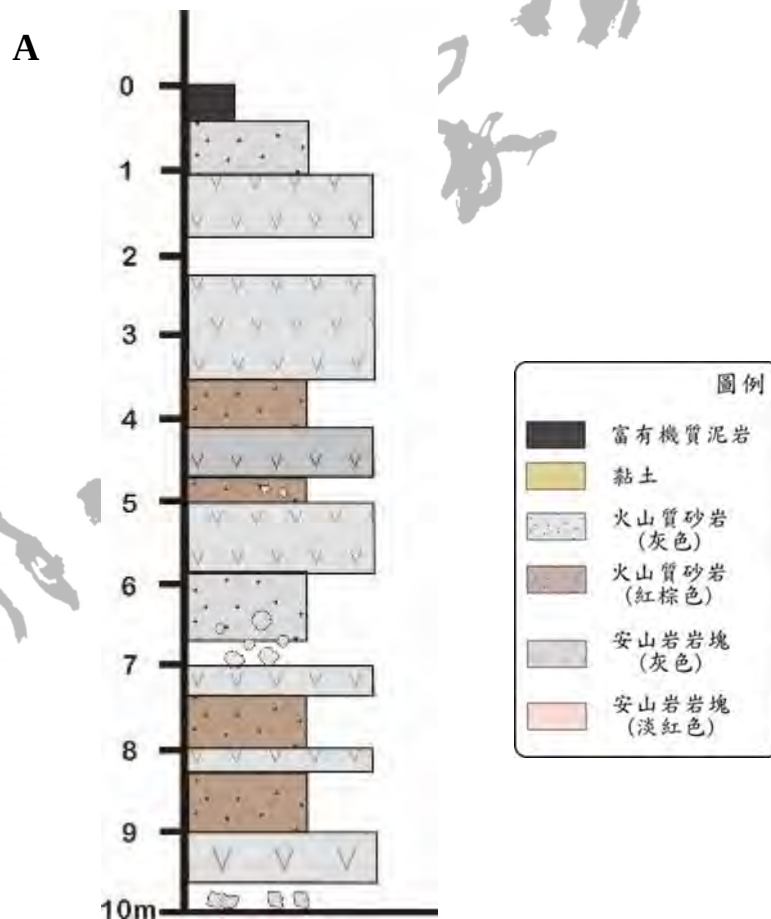
F: ↑→ Site 3-2 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-89、S-3-2 鑽井岩性柱狀圖(續)。

4-6、S-4-1 鑽井

Site4-1 的鑽探深度為 10m，於 1.7-2.3m 處有鑽探取樣失敗，故此深度缺失。
0-0.8m 為土壤化育層，0.8-10.0m 則為熔岩流，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-90A)。

0-0.4m 為深黑色的風化表土層(O 層)夾雜植根碎屑，0.4-0.8m 為黃色的風化層(A、B) (圖 4-90B)。0.8-10m 為灰色的熔岩流，熔岩流表面可見角閃石與輝石班晶。全段熔岩流都有裂隙，其中 2-5m 間的裂隙填充有黃棕色的沉積物，6-7.8m & 8.2-9m 最為破裂(圖 4-90C~圖 4-90F)。



A: ↑Site 4-1 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-90、S-4-1 鑽井岩性柱狀圖。

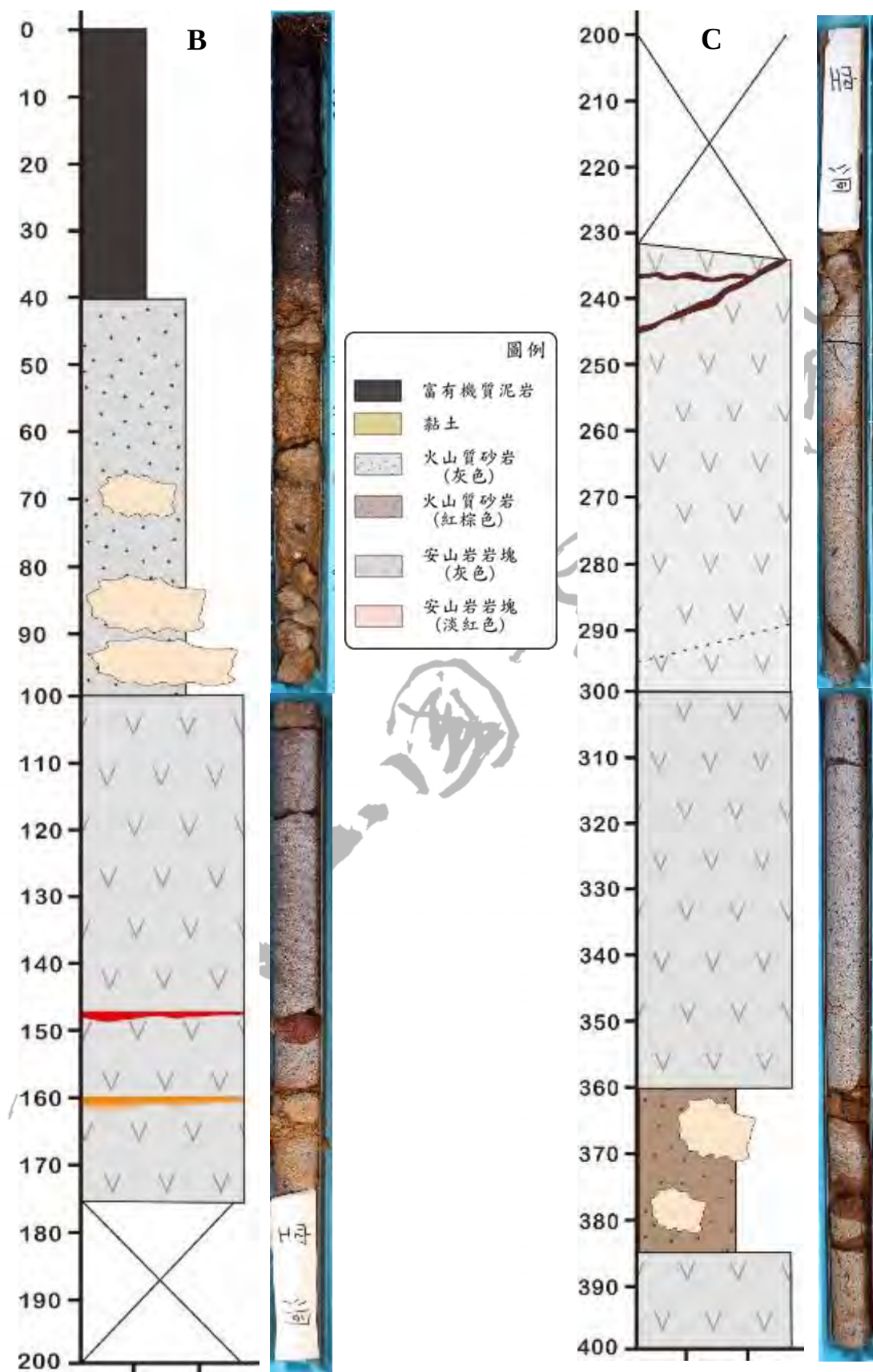
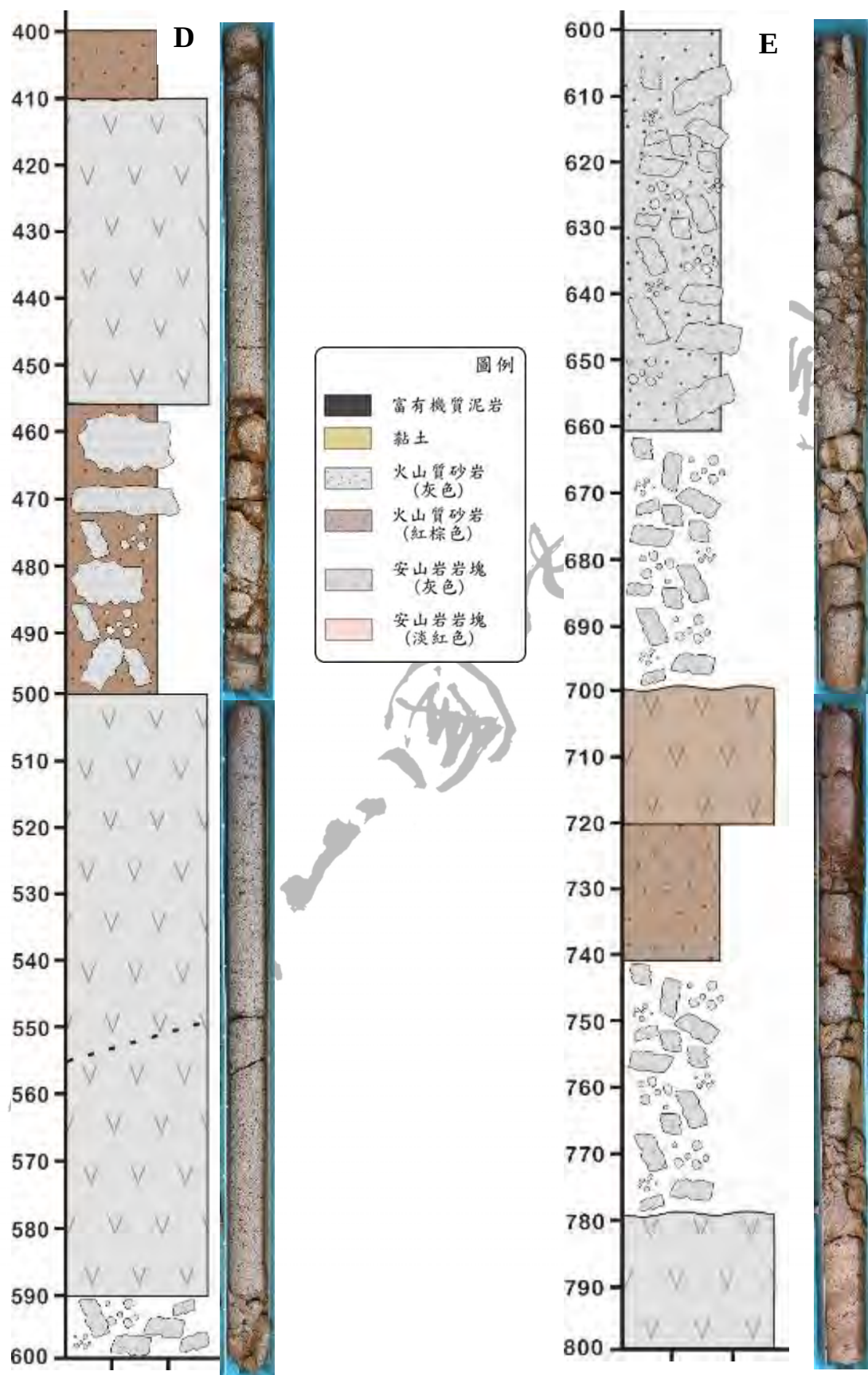


圖 4-90、S-4-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

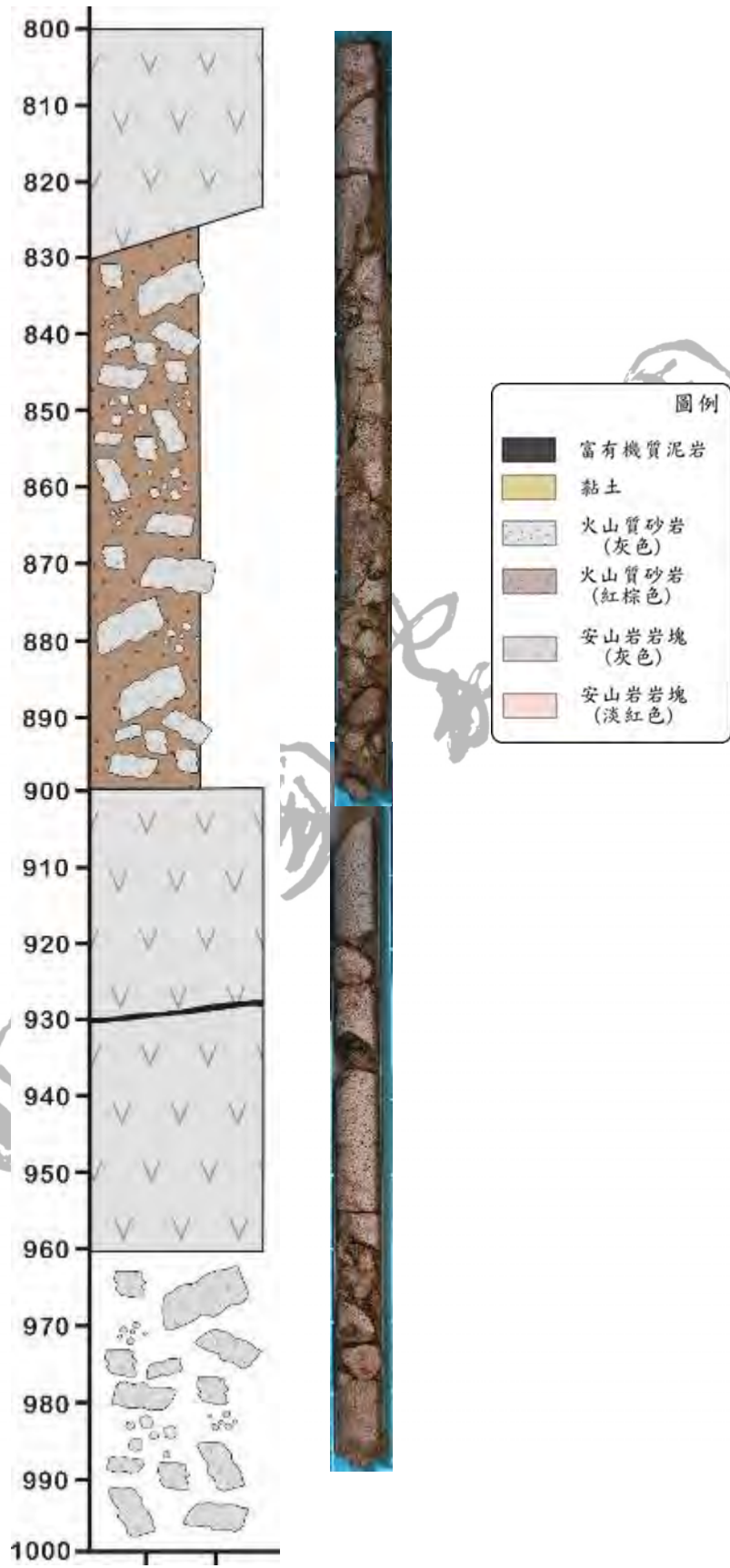


D: ↑ Site 4-1 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

E.5: ↑→ Site 4-1 6-8m 細部岩芯柱狀

圖 4-90、S-4-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

F



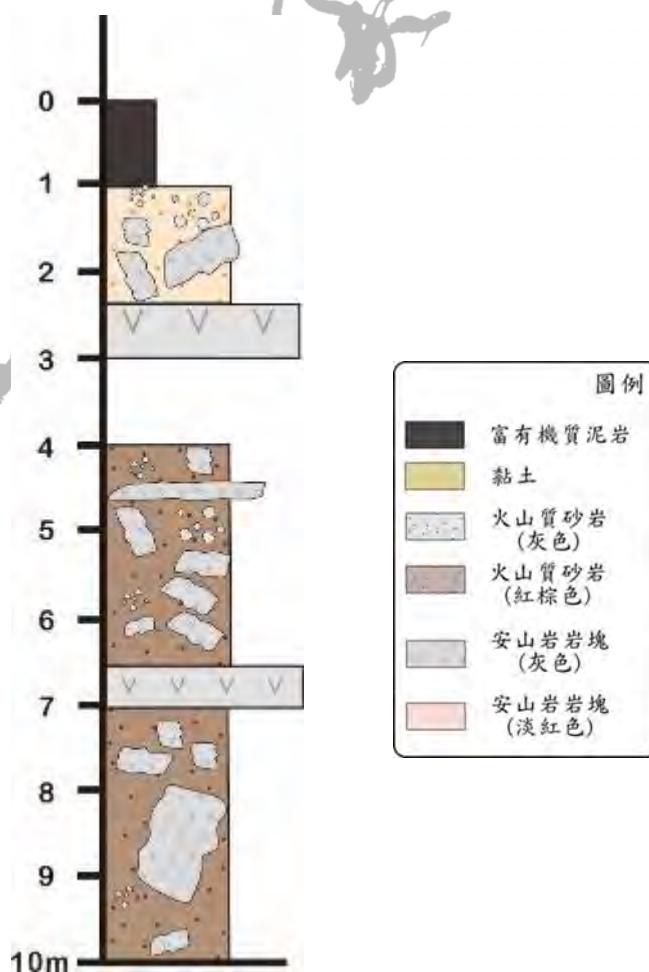
F: ↑ Site 4-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-90、S-4-1 鑽井岩性柱狀圖(續)。

4-7、S-4-2 鑽井

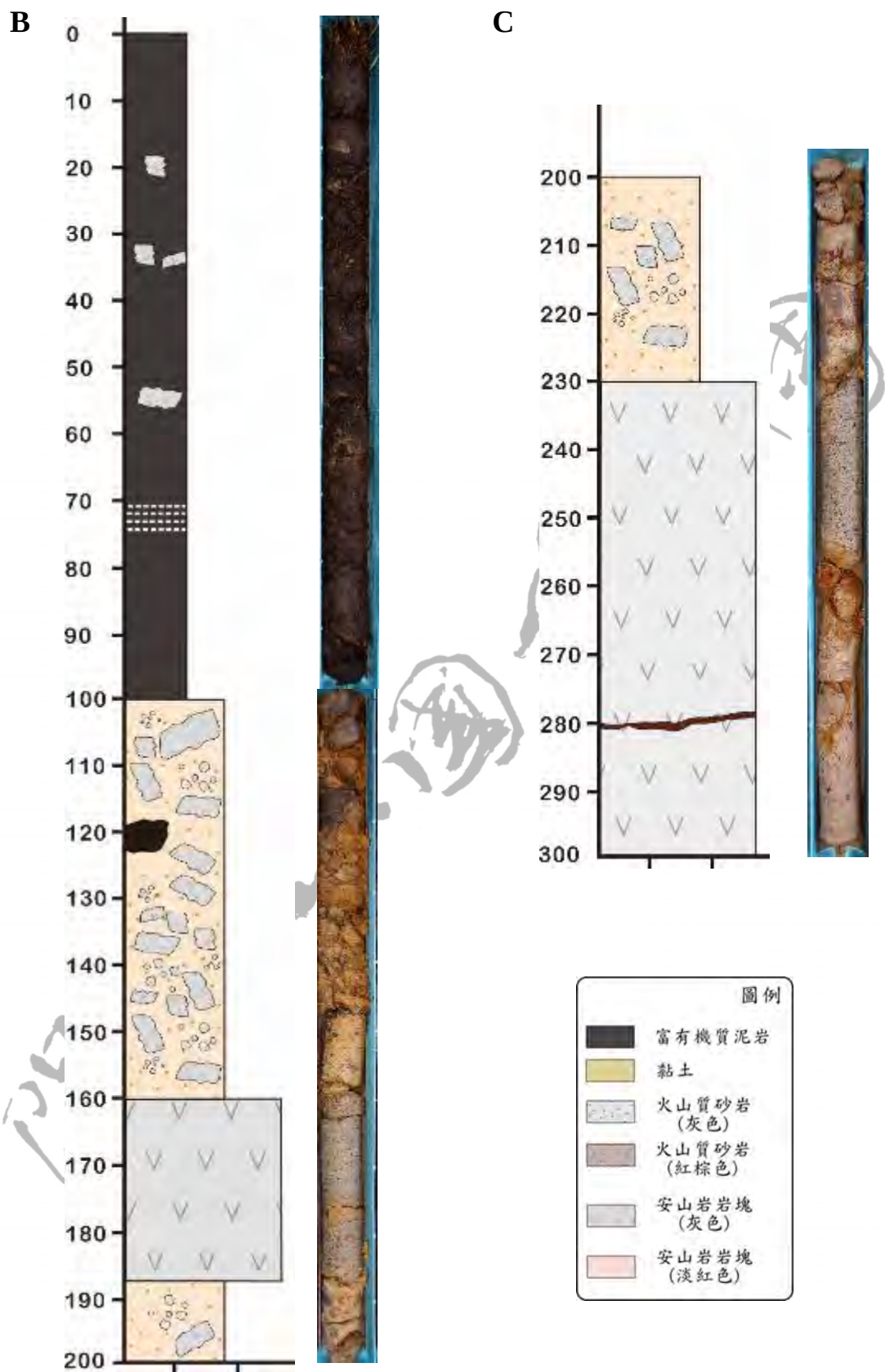
Site4-2 的鑽探深度為 10m，於 3.0-4.0m 處鑽探取樣失敗，故此深度暫無資料。0-1.6m 為表層風化層，2.3-3.0m 為熔岩流，1.6-2.3&4.0-10.0m 為凝灰質砂岩夾雜安山岩岩塊，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-91A)。

0-1.0m 為深黑色的表土層(O 層)，1.0-1.6 為黃色的風化層(B 層)(圖 4-91B)。1.6-2.3m 為黃色的凝灰質砂岩混夾灰色與紅色的安山岩岩塊。2.3-3.0m 則為灰色的熔岩流，表面可見輝石與角閃石晶體(圖 4-91C)。4.0-10.0m 為凝灰質砂岩夾雜安山岩岩塊，其中凝灰質砂岩多呈現紅棕色，僅於 5.85-9.85m 處呈現深棕色。此段中所夾雜的安山岩岩塊多為角狀，岩塊大小 2-30 公分皆有發現，岩塊顏色從黑色、灰色至紅色皆有發現(圖 4-91D&圖 4-91E)。



A: ↑ Site 4-2 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-91、S-4-2 鑽井岩性柱狀圖。



B: ↑ Site4-2 0-2m 細部岩芯柱狀圖。

C: ↑ → Site4-2 2-3m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-91、S-4-2 鑽井岩性柱狀圖(續)。

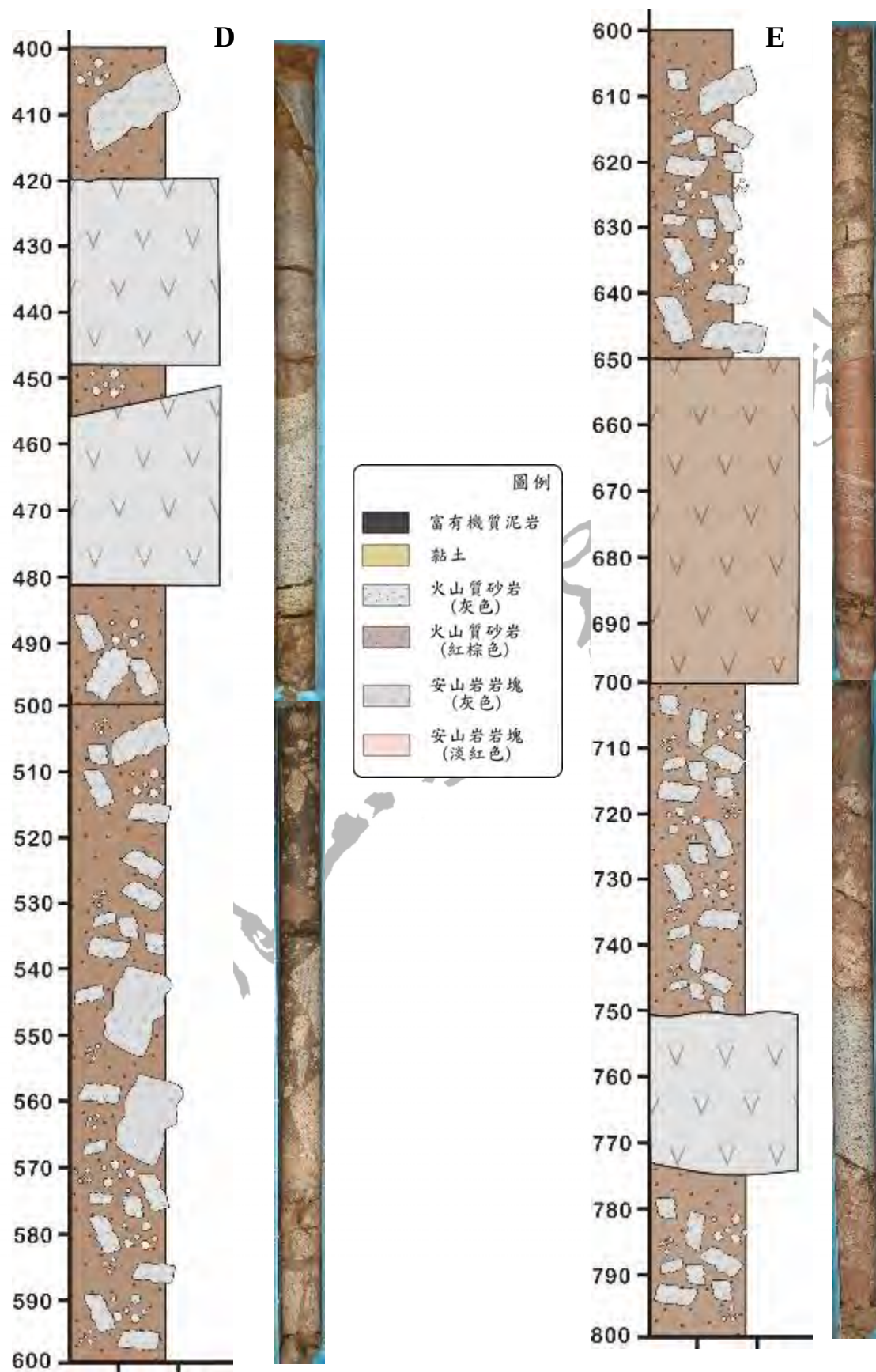


圖 4-91、S-4-2 鑽井岩性柱狀圖(續)。

5、岩芯磁感率分析結果

本研究為了探究位於七星山東側的張烈帶爆裂口是否有接收到周圍火山活動所噴發出的火山噴發物，特別挑選本次鑽取岩芯中，反應沉積環境較為安靜，能夠保存週邊環境訊號的深黑色砂質泥岩進行磁感率分析，用以探明是否在這些沉積物之中有紀錄到任何不尋常的活動事件。

本次所鑽探的 7 口岩芯之中，於 Site 1(0-1m)、Site 2-1(0-1、1.7-3.2、5.35-6.6、7-8m)、Site 2-2(0-3、4-4.4、5.8-6m)、Site 3-1(0-2.8m)、Site 3-2(0-2.55、4-5m)、Site 4-1(0-0.4m)、Site 4-2(0-1m)(詳見表 4-13)有鑽探到這些深黑色的砂質泥岩，本研究將這些砂質泥岩進行多感測岩心掃描儀分析，鑒於 Site 1(0-1m)、Site 4-1(0-0.4m)、Site 4-2(0-1m)可能為地表土壤化育層之中的 O 層，故不採用。Site 2-1、2-2、3-1、3-2 之岩芯磁感率數據列於(圖 4-92~圖 4-97)。

表 4-13、MSCL 磁感率送測岩芯深度表。

岩芯孔位	深度	MSCL 分析深度
Site1	0-4m	● 0-1m
Site2-1	0-4m	● 0-1m ● 1.7-3.2m
	4-8m	● 5.35-6.6m ● 7-8m
Site2-2	0-4m	● 0-3m
	4-8m	● 4-4.4m ● 5.8-6m
Site3-1	0-4m	● 0-2.8m
Site3-2	0-4m	● 0-2.55m
	4-8m	● 4-5m
Site4-1	0-4m	● 0-0.4m
Site4-2	0-4m	● 0-1m

● Site 2-1

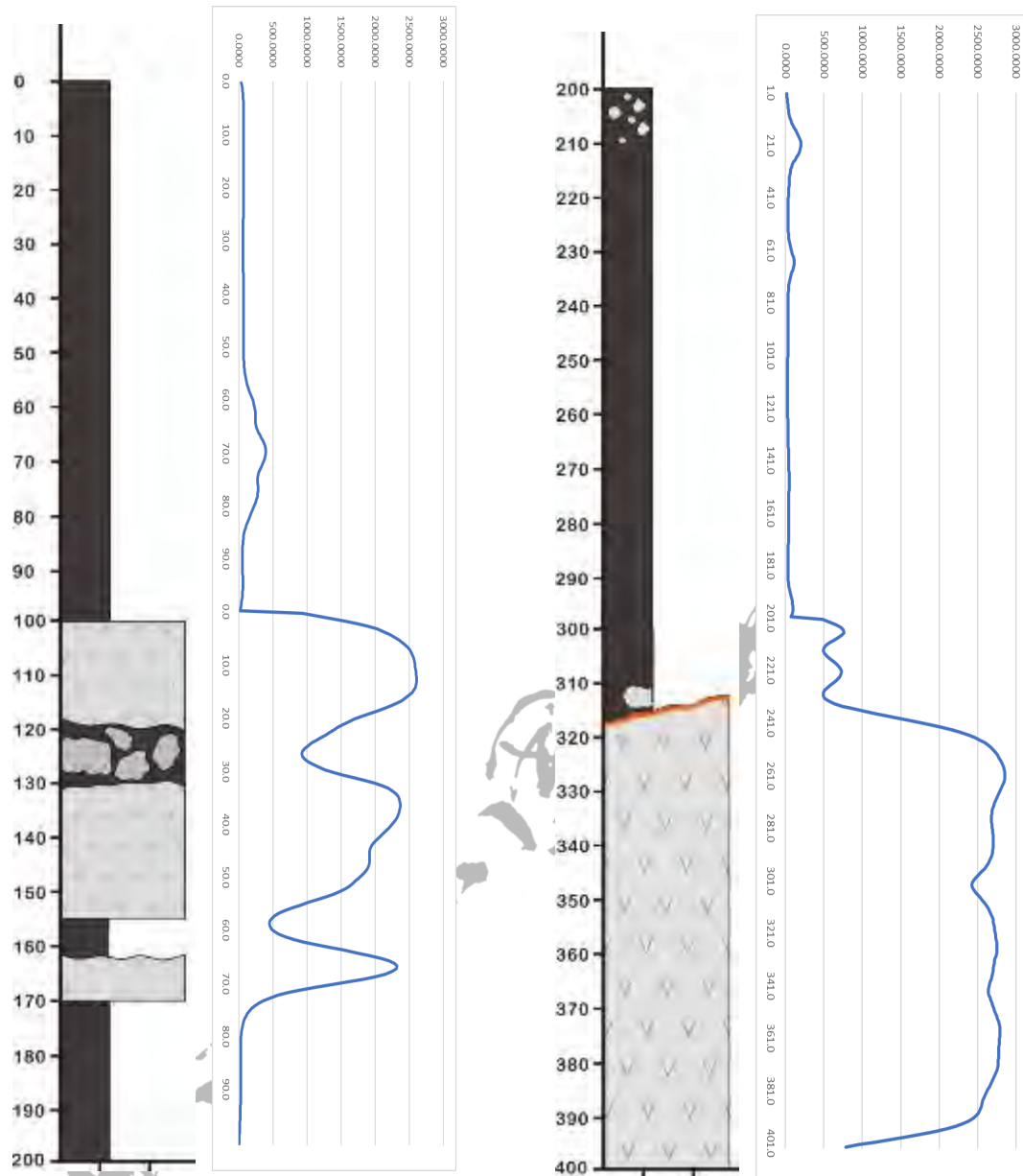


圖 4-92、Site 2-1 0-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

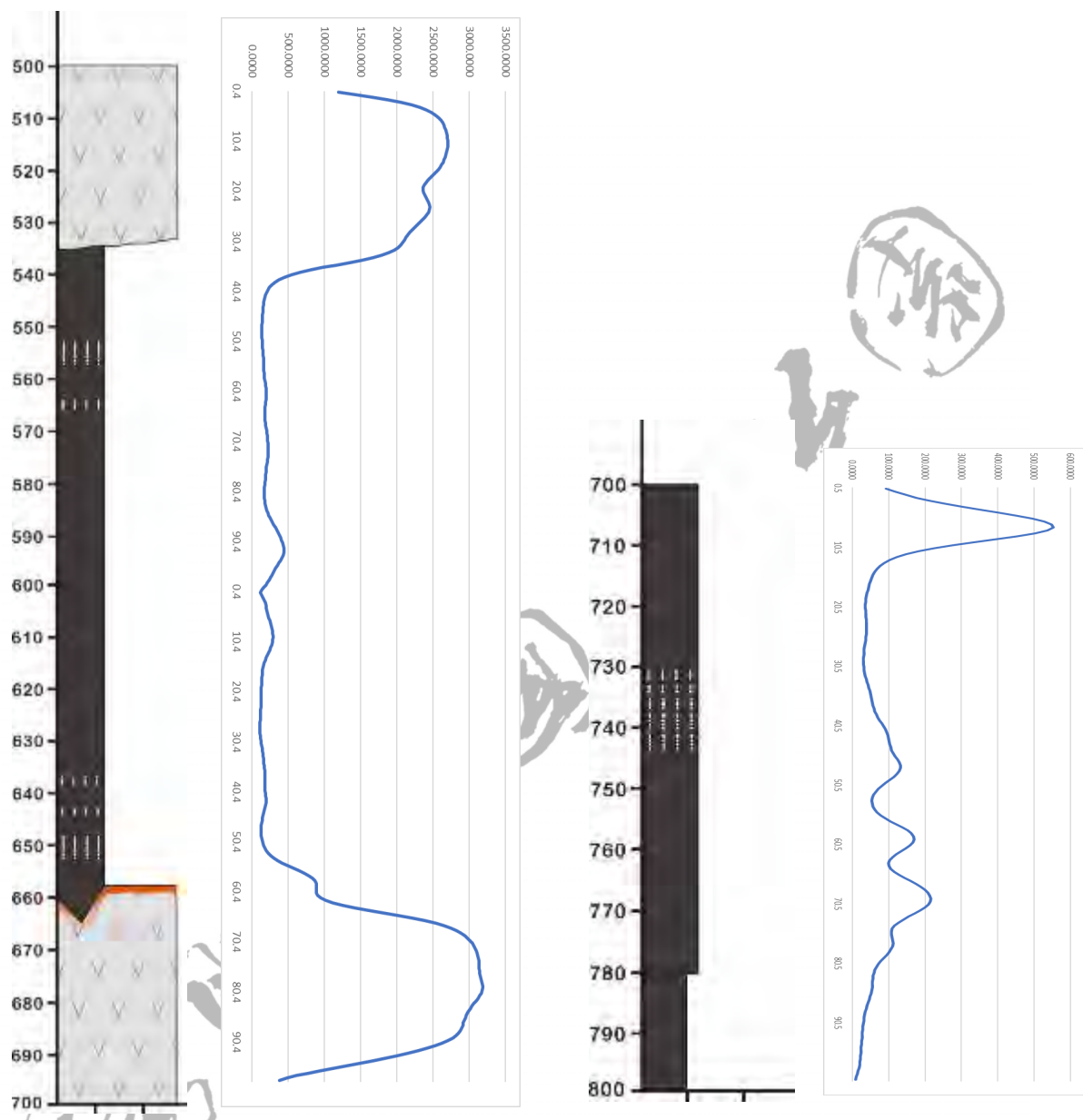


圖 4-93、Site 2-1 5-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。

● Site 2-2

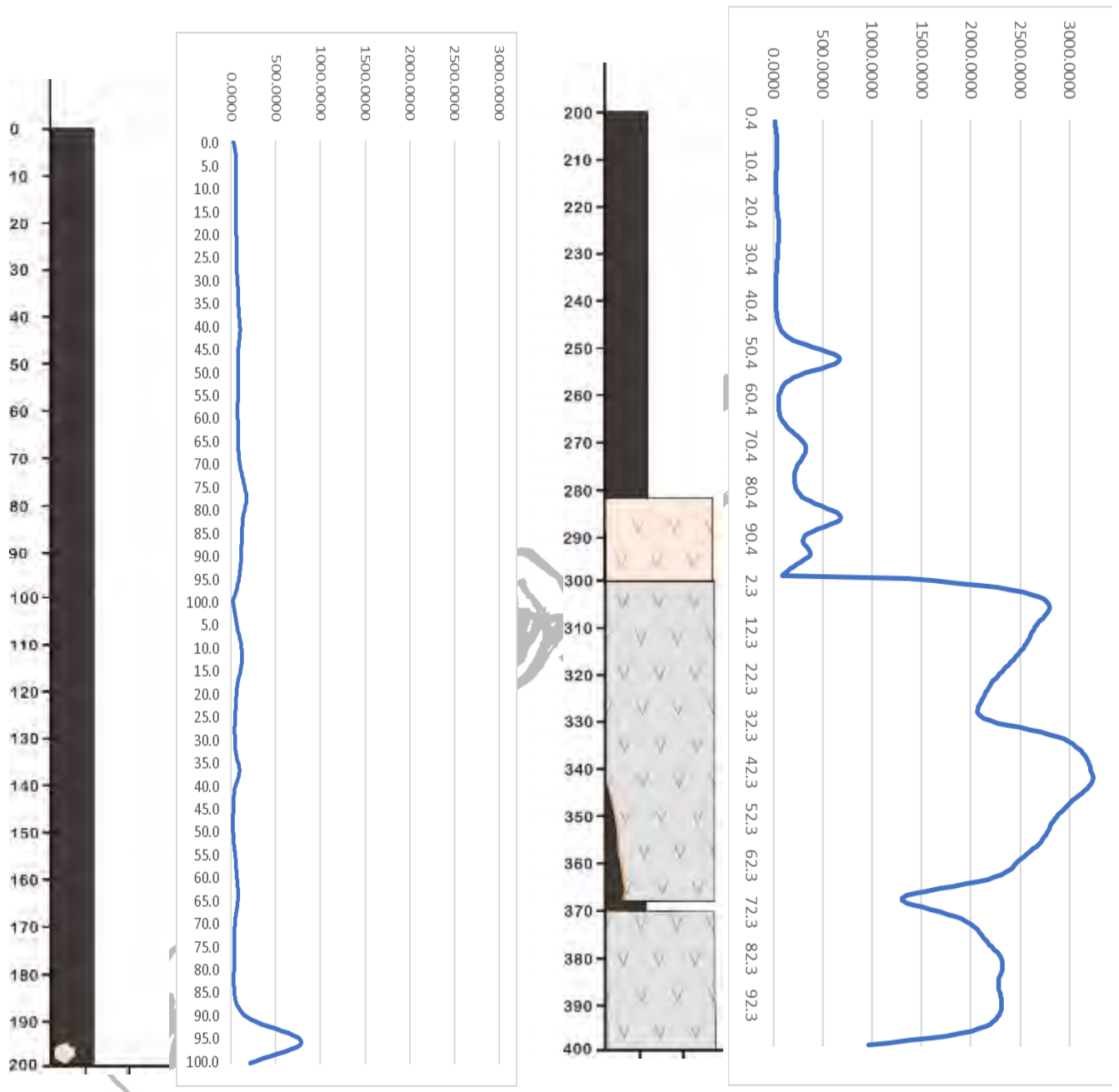


圖 4-94、Site 2-2 0-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

● Site 3-1

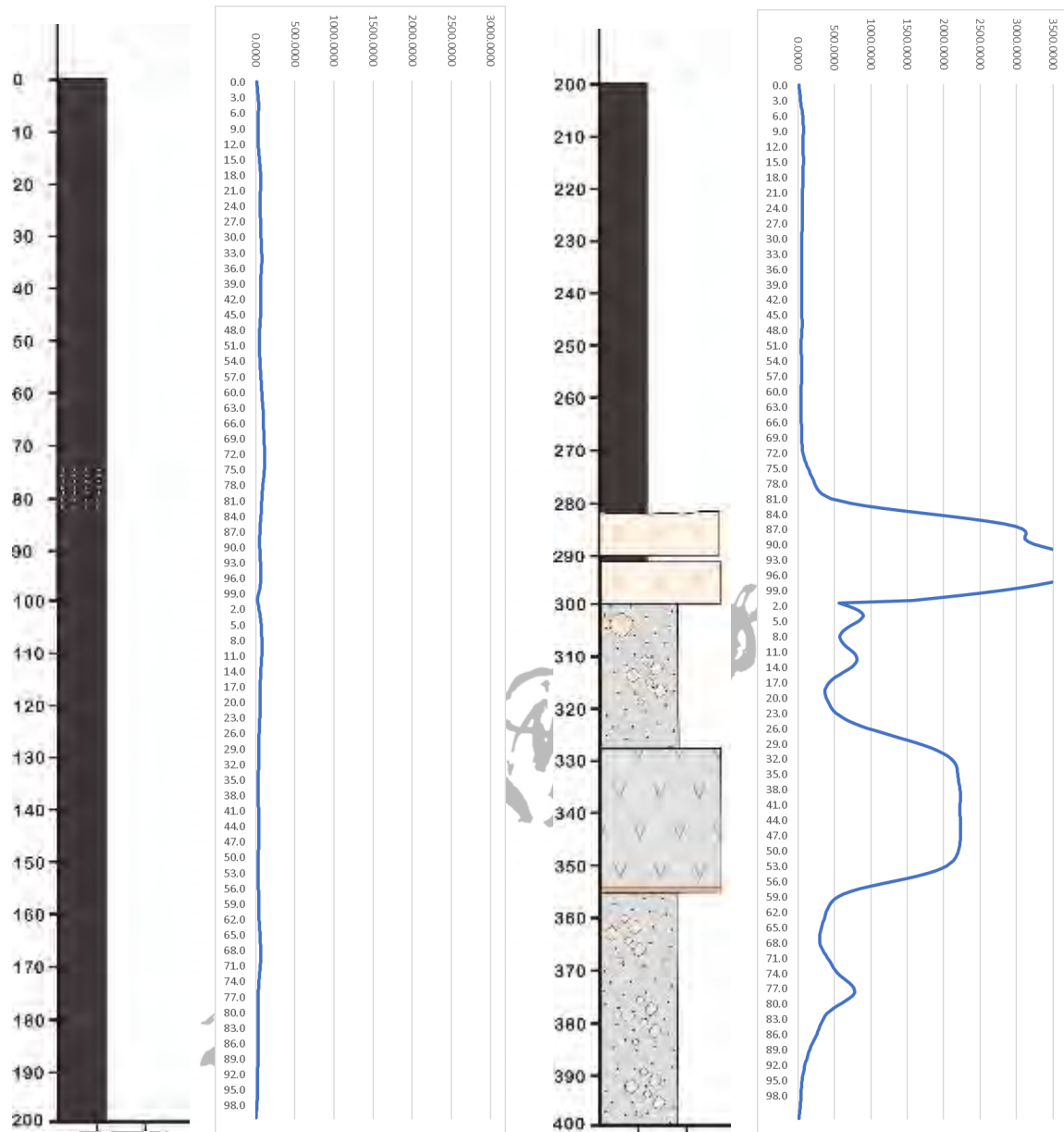


圖 4-95、Site 3-1 0-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

● Site 3-2

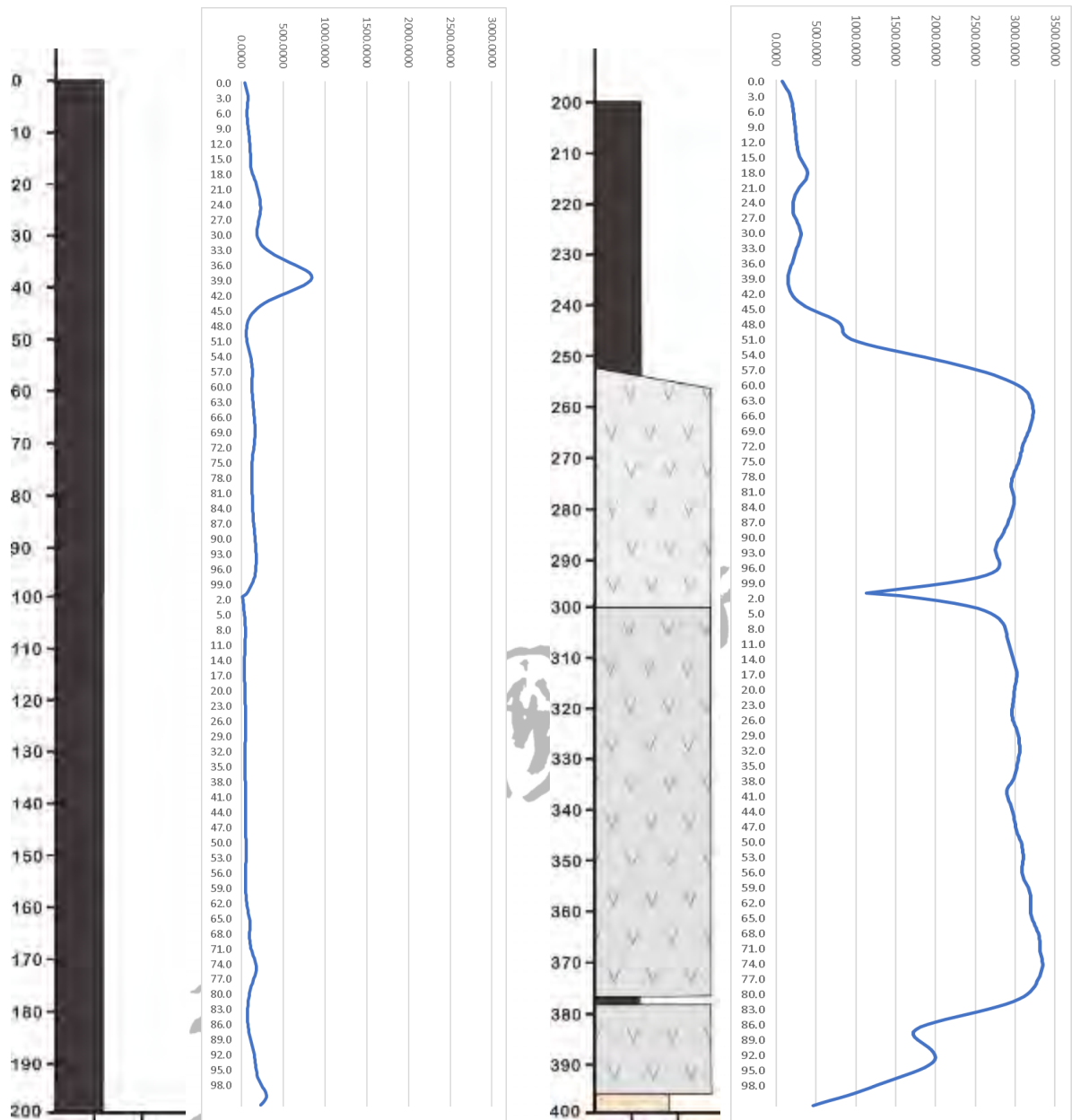


圖 4-96、Site 3-2 0-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。

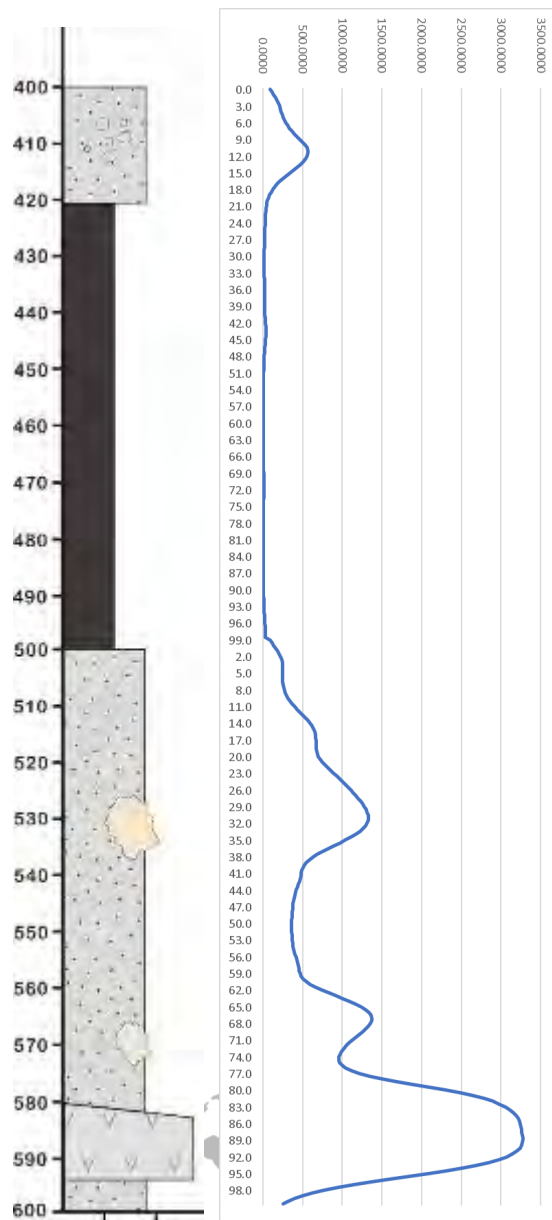


圖 4-97、Site 3-2 4-6m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。

磁感率的單位為 SI x 10⁻⁵。

6、岩芯火山岩岩象學分析

採鑽取岩芯中安山岩塊從事岩象學的分析，以了解這些火山爆裂口的基盤岩石種類。分析的結果列於表 4-14。

表 4-14、岩芯中安山岩塊岩象學的分析結果。

位置	深度	岩性
S 1	370cm	兩輝石角閃石安山岩
S 2-1	494cm	兩輝石角閃石安山岩
S 2-2	393cm	兩輝石角閃石安山岩
	700cm	紫蘇輝石安山岩
S 3-1	232cm	兩輝石角閃石安山岩
S 3-2	335cm	兩輝石角閃石安山岩
	715cm	兩輝石角閃石安山岩
S 4-1	300cm	兩輝石角閃石安山岩
S 4-2	262cm	兩輝石角閃石安山岩

● S-1-370cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成礦物為斜長石，角閃石略多於輝石。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。輝石 open nicol 呈現棕色，晶形與節理明確，可觀察到直輝石與斜輝石，多為直輝石，斜輝石較少且晶體小，其消光角約為 45 度。

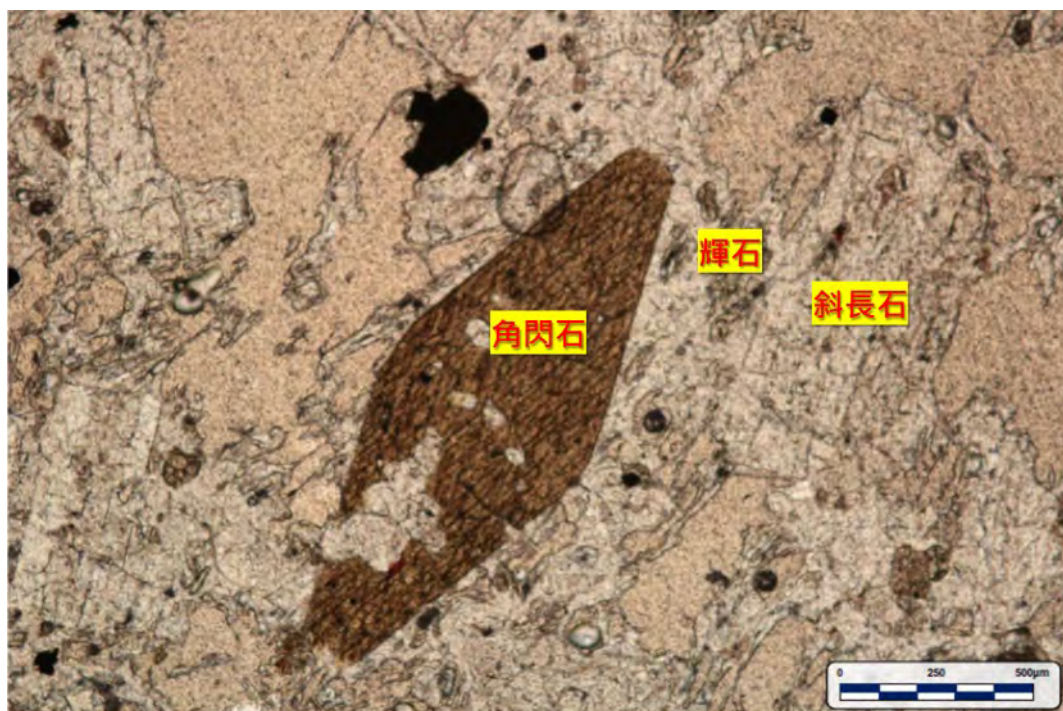


圖 4-98、S-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

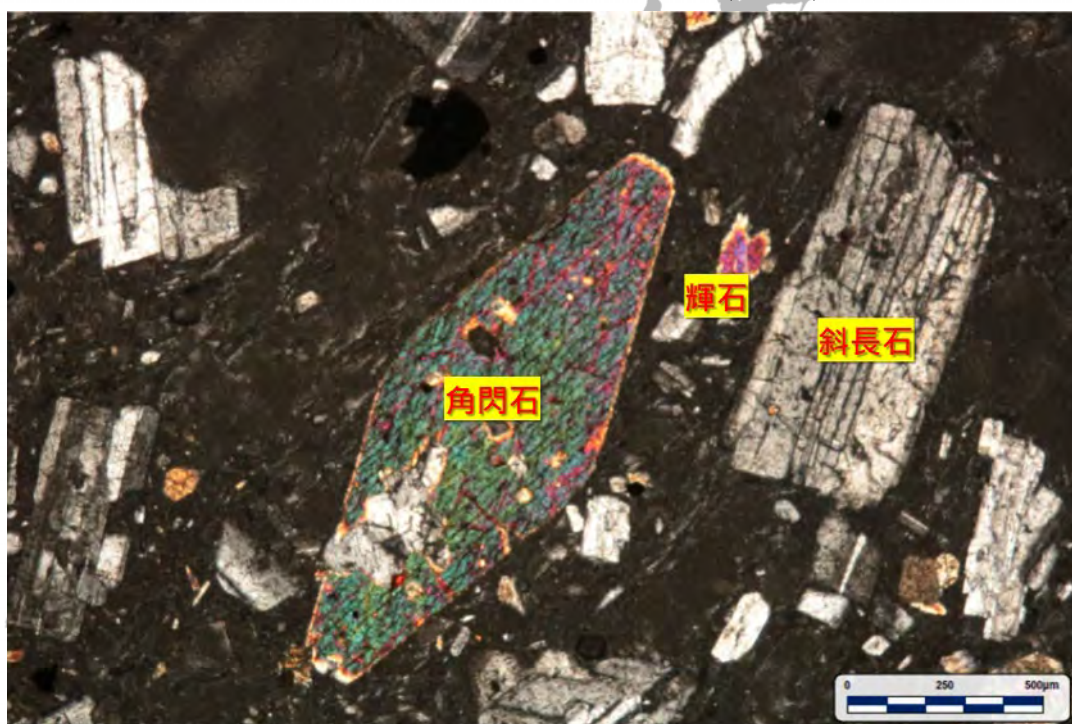


圖 4-99、S-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-2-1-494cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石數量相當稀少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石於 open 底下為棕色。輝石為直輝石較多斜輝石較少，並可見輝石內次生長斜長石與角閃石。 部分鐵鎂礦物風化

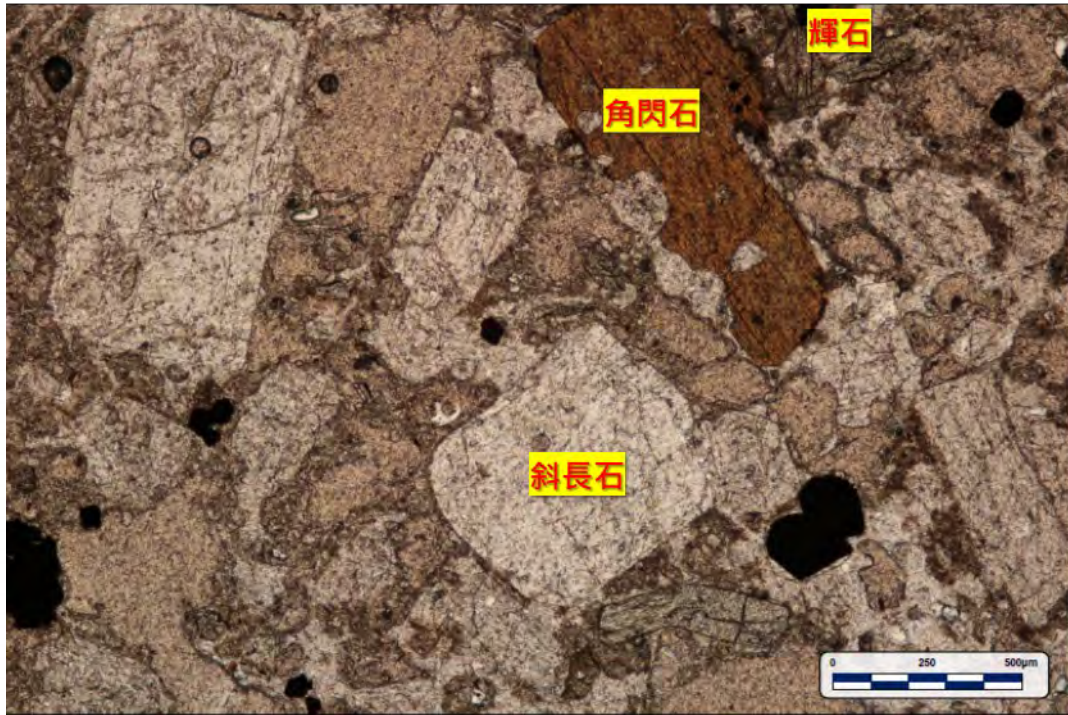


圖 4-100、S-2-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

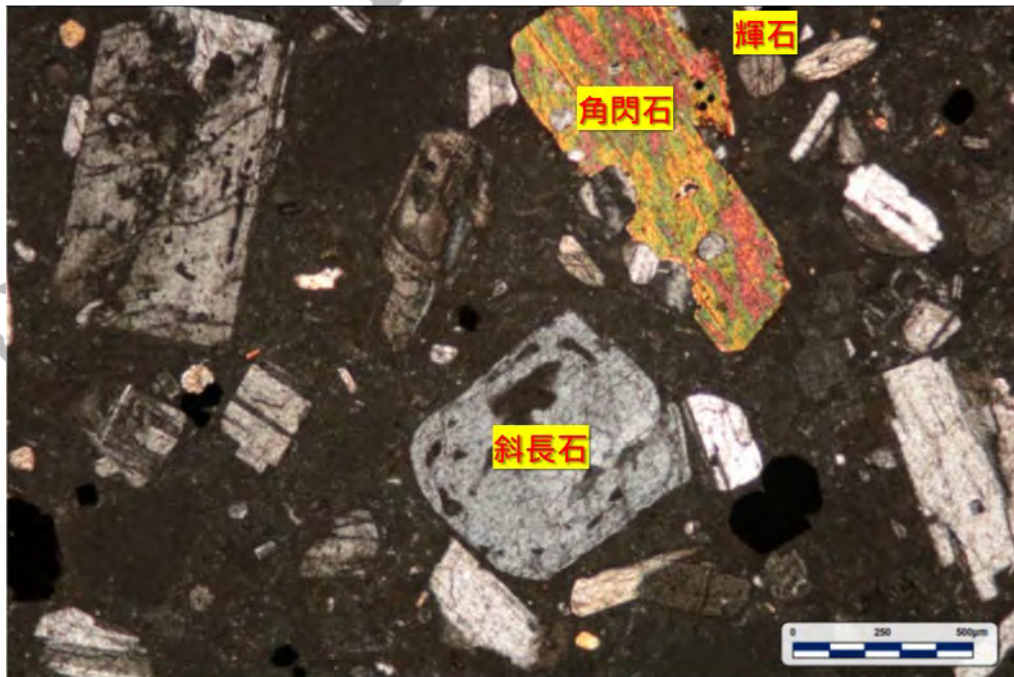


圖 4-101、S-2-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-2-2-393cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石數量相當稀少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石於 open 底下為棕色，多以聚晶或雙晶的方式生長。輝石為直輝石較多斜輝石較少，並可見輝石內次生長斜長石與角閃石。部分鐵鎂礦物風化，有捕獲岩富含重礦物。

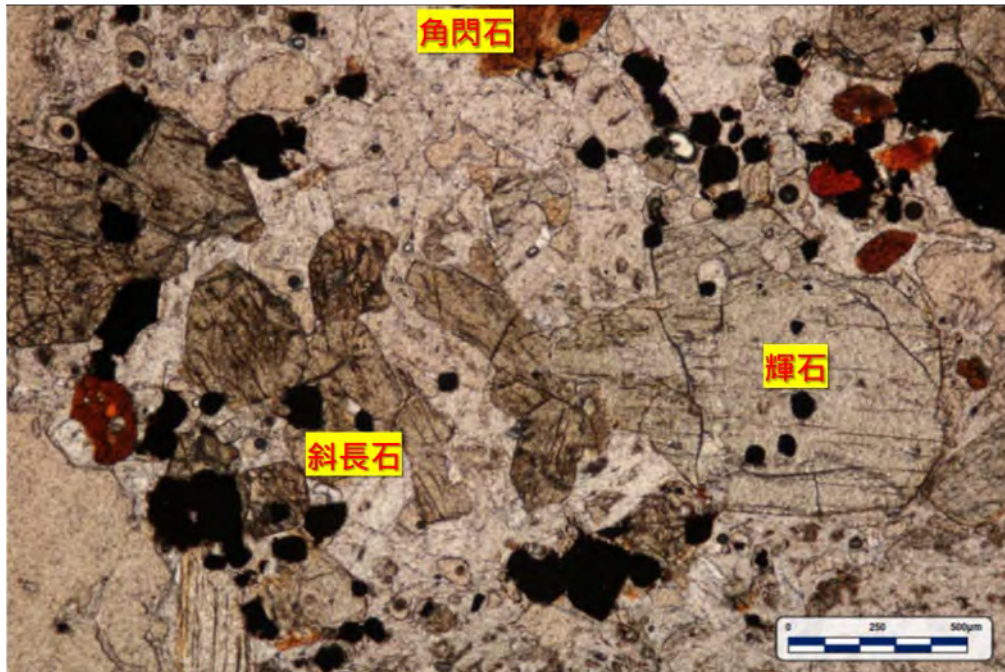


圖 4-102、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

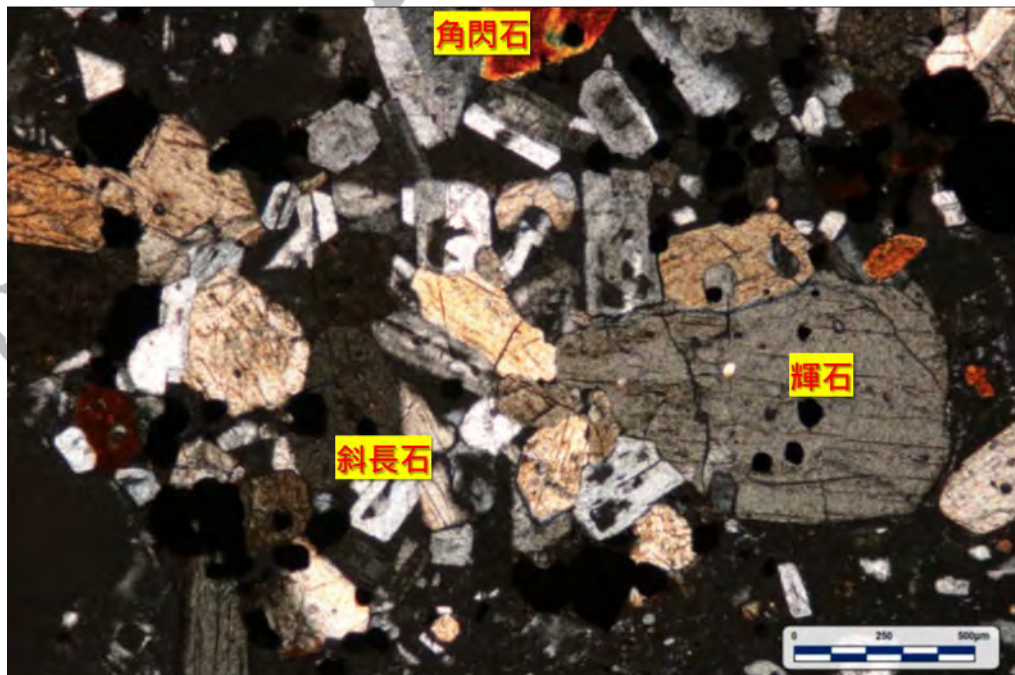


圖 4-103、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-2-2-700cm

紫蘇輝石安山岩(hypersthene andesite)

主要組成物為斜長石，輝石次之，無見到角閃石。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。輝石為斜消光，消光角約略 30 度，以此推測可能為紫蘇輝石。部分具有鐵鎂礦物(角閃石)的外型，內部卻被置換或呈現 decompose 的樣貌，但裡面所包裹的斜長石卻又很新鮮，可能代表角閃石形成時把先前形成的斜長石包起來，遇到周圍岩漿環境產生變化，含水礦物的角閃石無法穩定存在而熱氧化崩解。

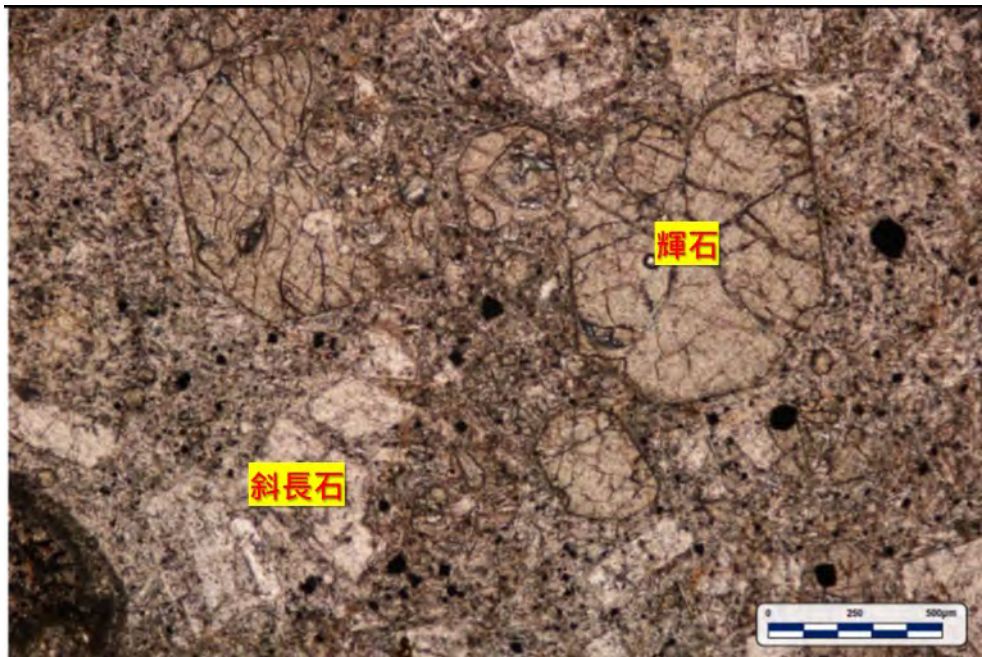


圖 4-104、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

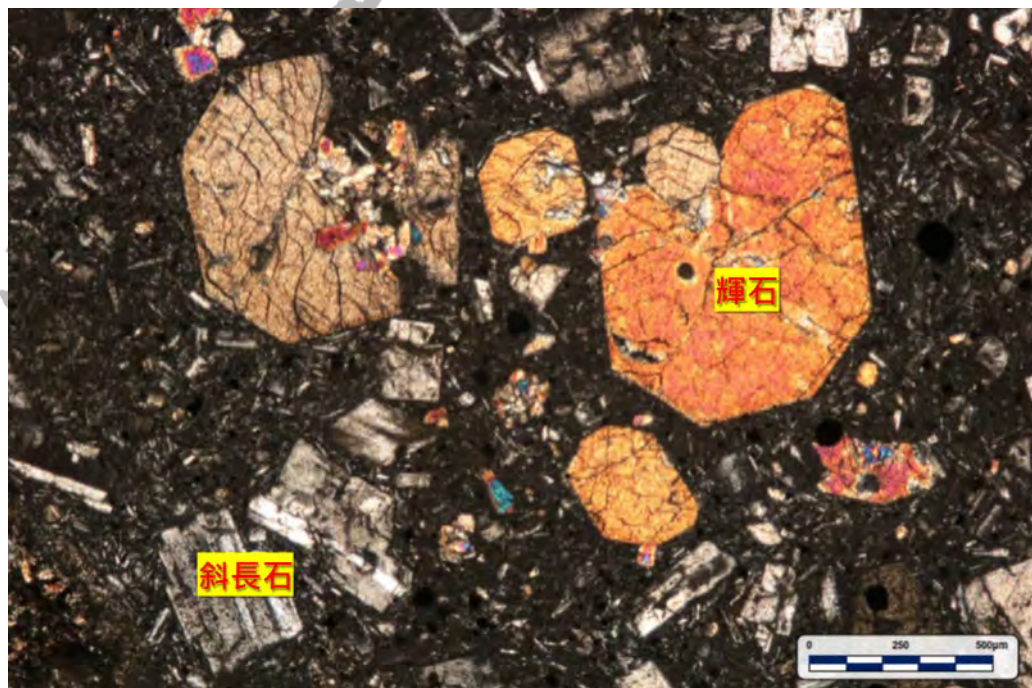


圖 4-105、S-2-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-3-1-232cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石數量相當稀少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石於 open 底下為棕色，多色性明顯。輝石為直輝石較多斜輝石較少，並可見輝石內次生長斜長石與角閃石。 部分鐵鎂礦物風化。

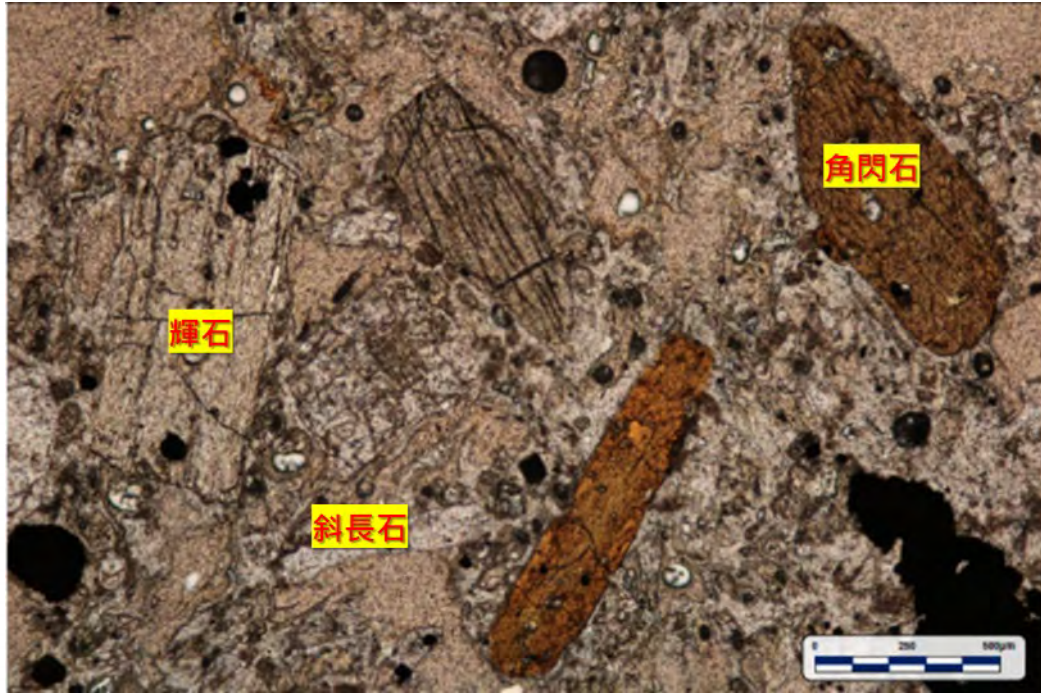


圖 4-106、S-3-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

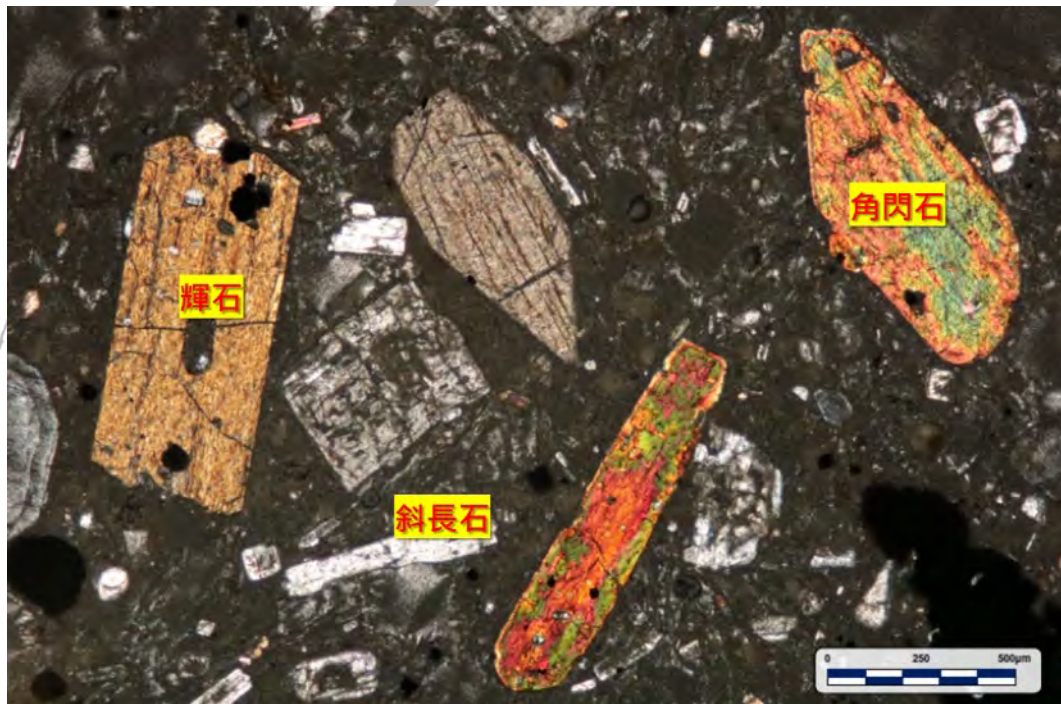


圖 4-107、S-3-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-3-2-335cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石數量相當稀少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石於 open 底下為棕色。輝石為直輝石較多斜輝石較少，並可見輝石內次生長斜長石與角閃石。

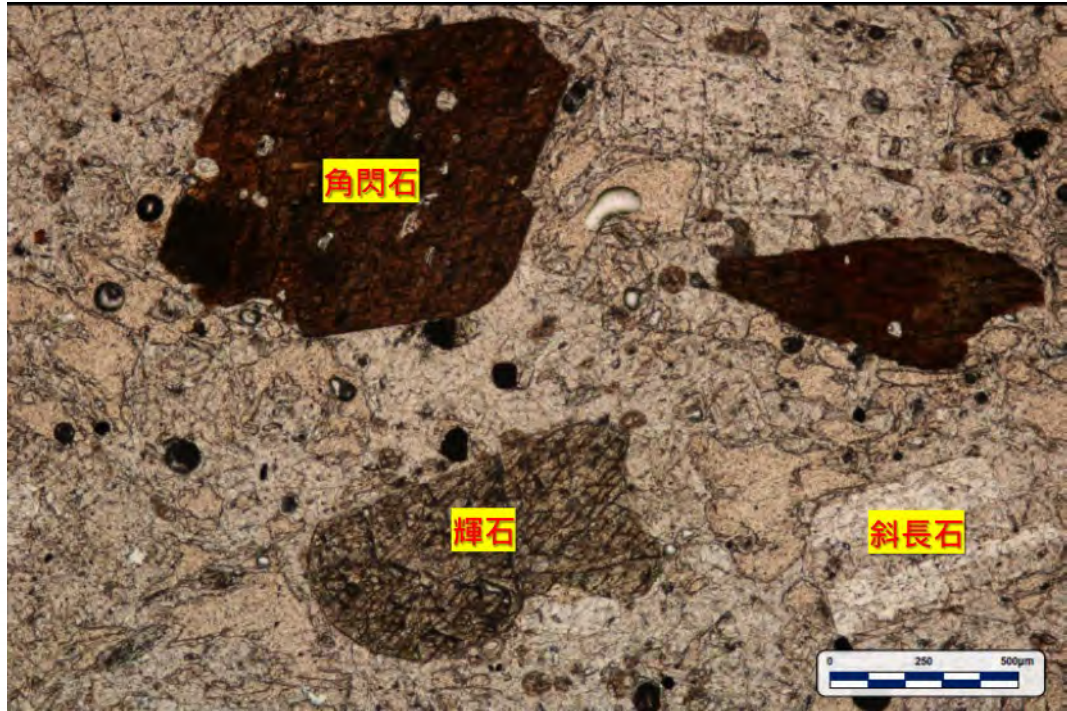


圖 4-108、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

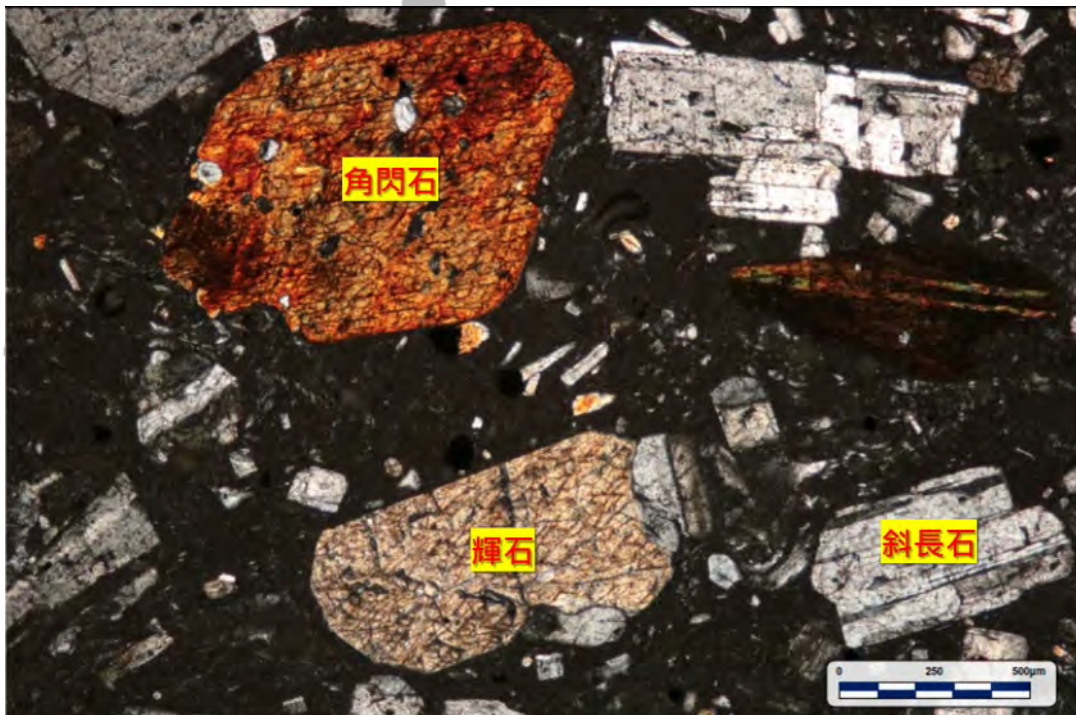


圖 4-109、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S3-2-715cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石數量相當稀少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石於 open 底下為棕色。輝石為直輝石較多斜輝石較少，並可見輝石內次生長斜長石與角閃石。

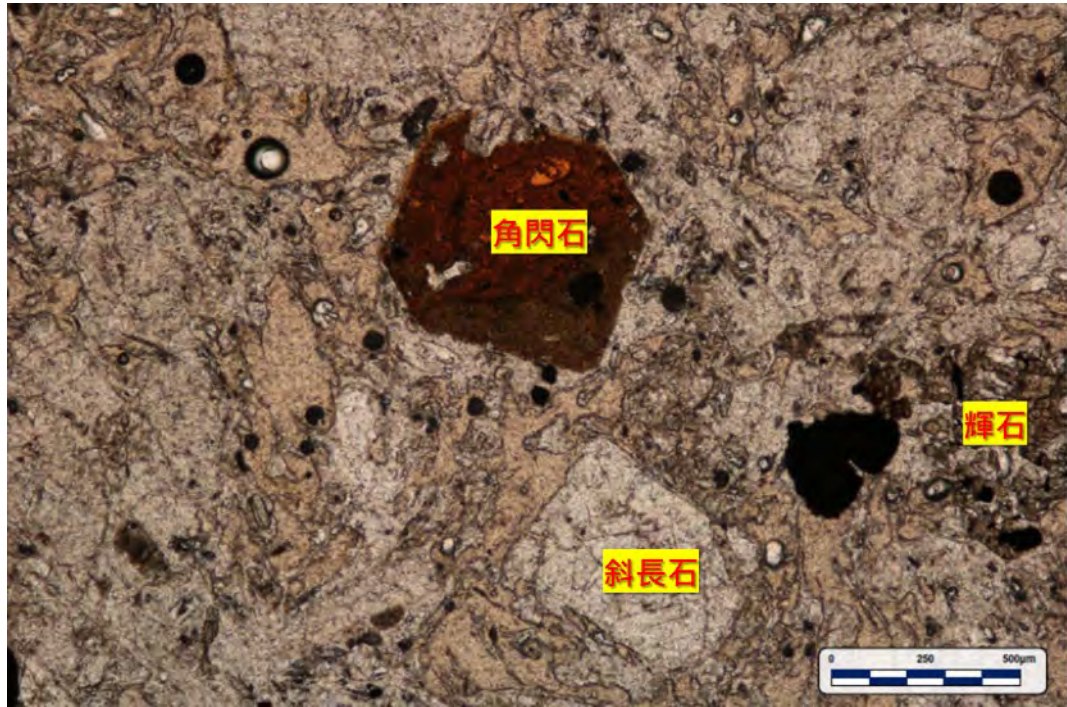


圖 4-110、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

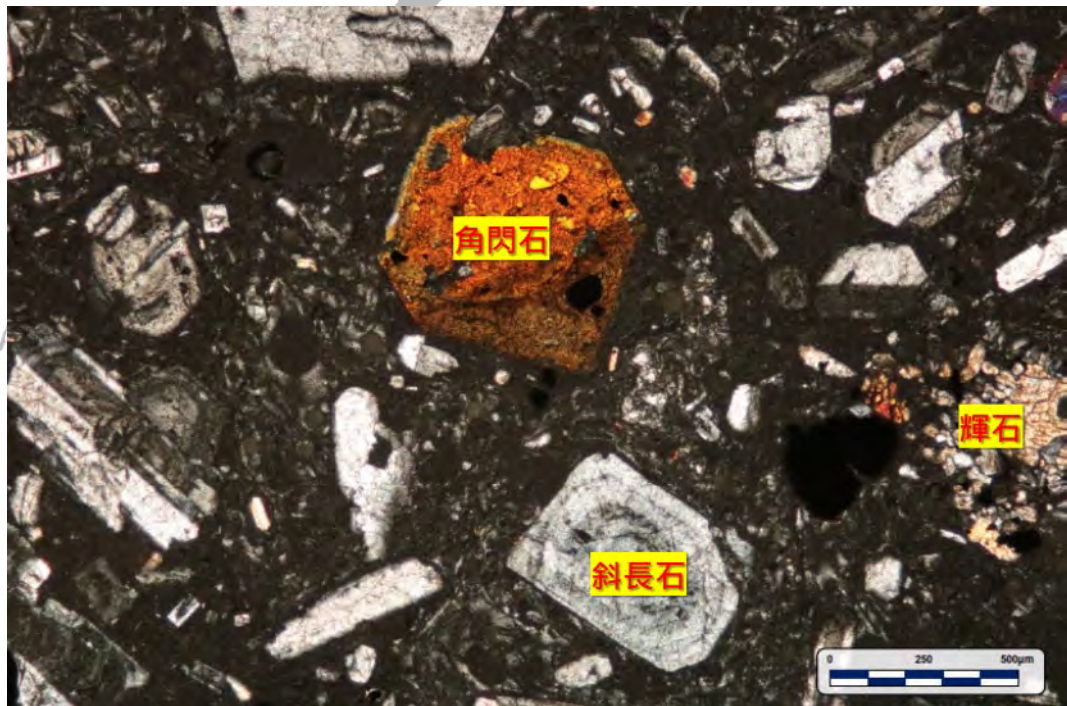


圖 4-111、S-3-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S-4-1-300cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石最少。斜長石多為 albite twin，少見 Zoning。角閃石可見雙晶，多色性明顯。輝石以直輝石為主，斜輝石較少，消光角約為 45 度，干涉色米黃。

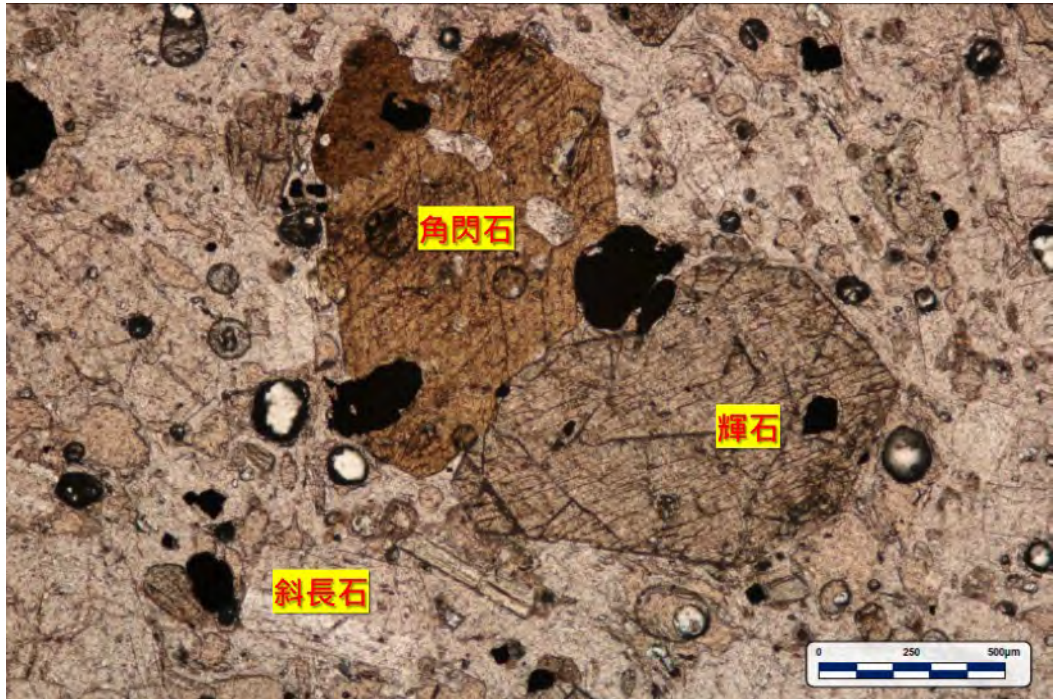


圖 4-112、S-4-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

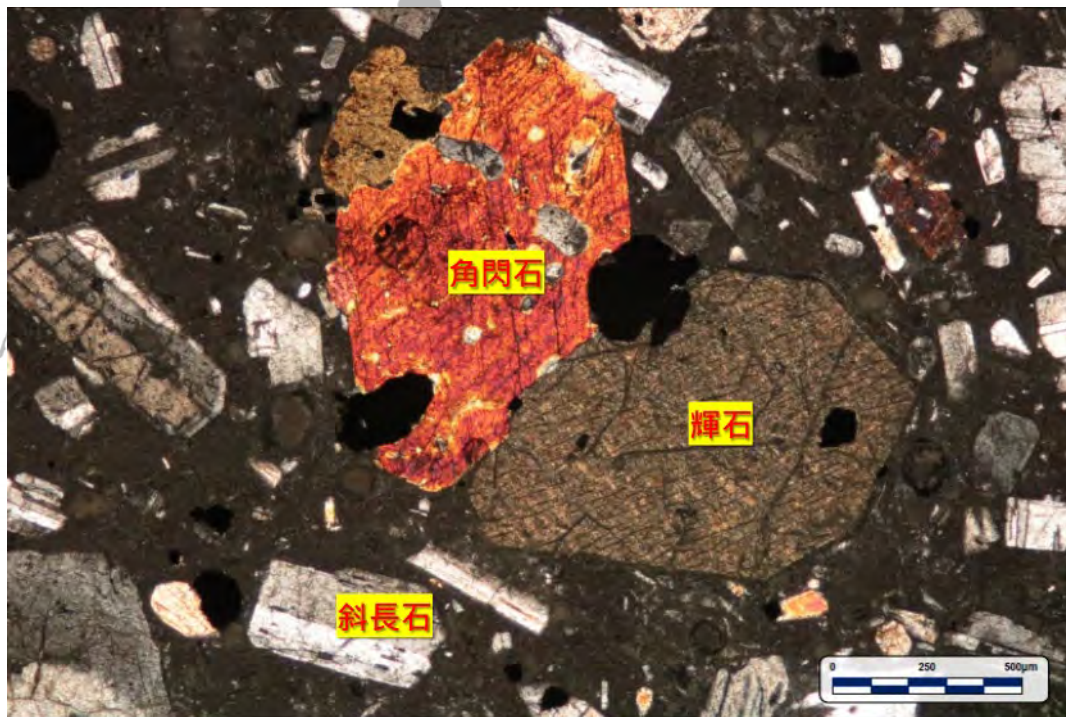


圖 4-113、S-4-1 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

● S4-2-262cm

兩輝石角閃石安山岩(two-pyroxene hornblende andesite)

主要組成物為斜長石，角閃石次之，輝石最少。斜長石多為 albite twin，少見 zoning。角閃石可見雙晶，多色性明顯。輝石以直輝石為主，斜輝石較少，消光角約為 45 度，干涉色米黃。

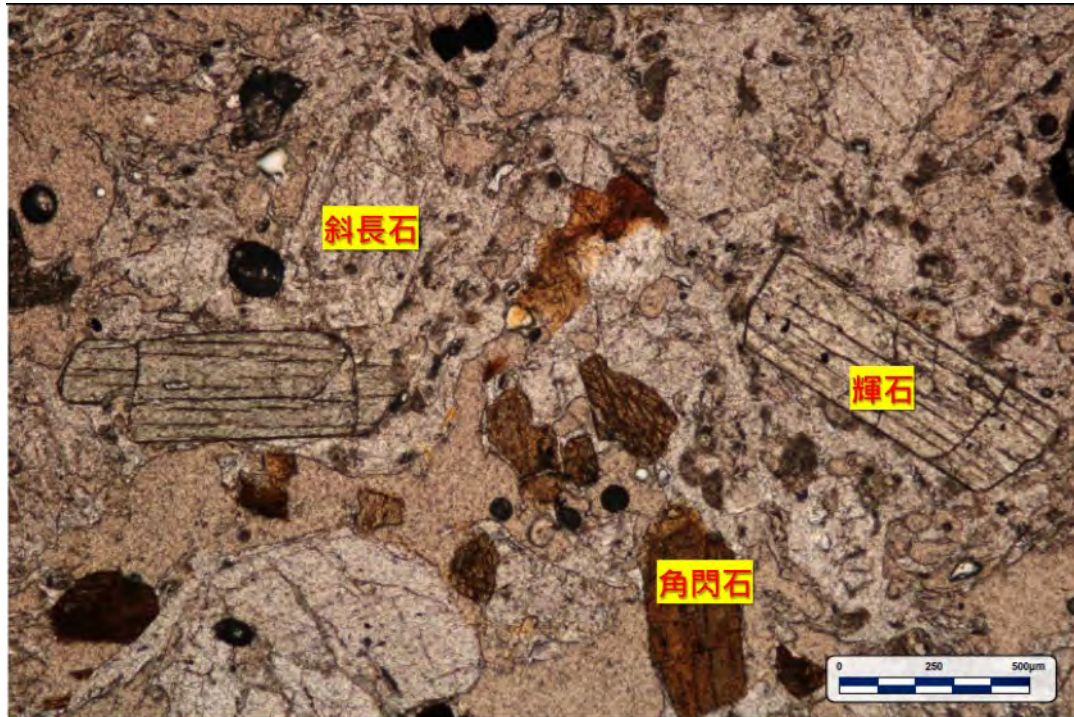


圖 4-114、S-4-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(單偏光)。

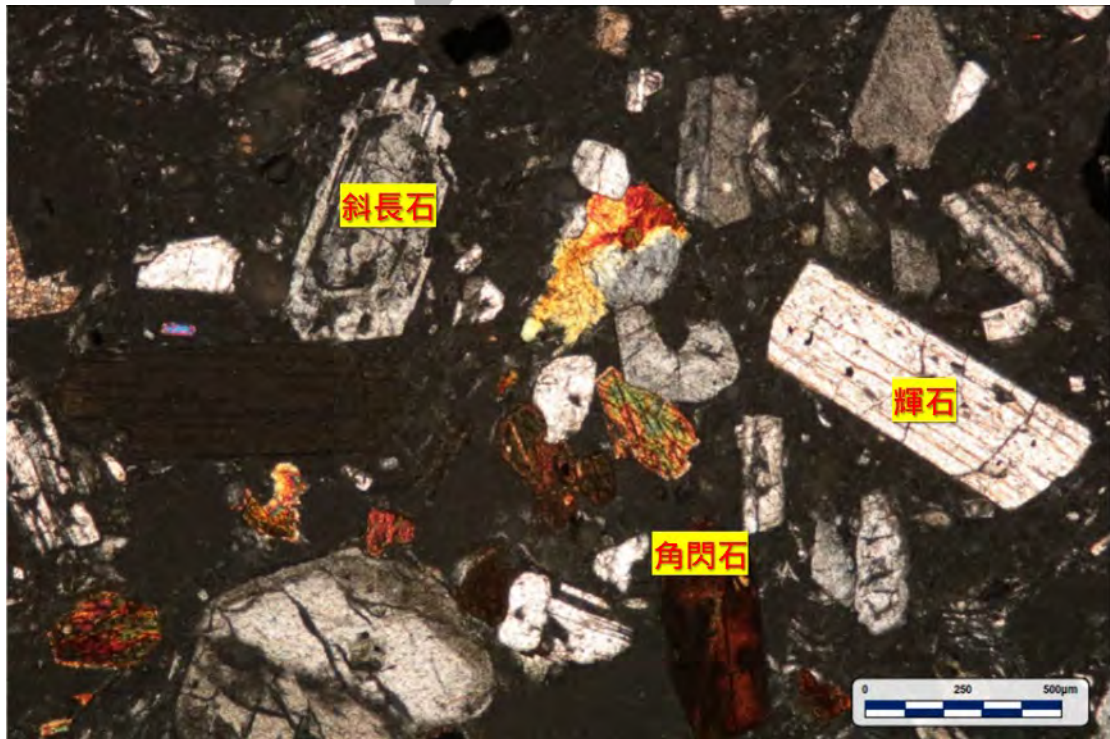


圖 4-115、S-4-2 鑽井火山岩顯微鏡下的照片(正交偏光)。

7、岩芯沉積物分析

本研究進行岩芯描述時觀察到部分深度的黑色泥質(有機物)沉積物之中夾有粗至細砂礫徑大小的岩屑以及礦物晶體，因此進行採樣並分析其組成的種類與特徵。由實體顯微鏡進行觀察分析之結果顯示，黑色沉積物之中夾有安山岩岩屑、角閃石(熱氧化與未風化)、輝石以及砂岩岩屑與石英晶體(皆大於 $125\mu\text{m}$)。鑒於鑽探地點位於大屯火山七星山地區，鮮少有前人研究探討火山沉積物之中的石英，因此本研究將於下列特別探討泥質沉積物之中所含的石英特徵。

本研究採樣之標準為挑選富含岩屑的黑色泥質沉積物(圖 4-106)，若見到疑似砂岩岩屑也將會進行採樣分析。S-2-1~S-4-2 共計採樣 29 個樣本進行實體顯微鏡觀察分析(詳見表 4-15)。

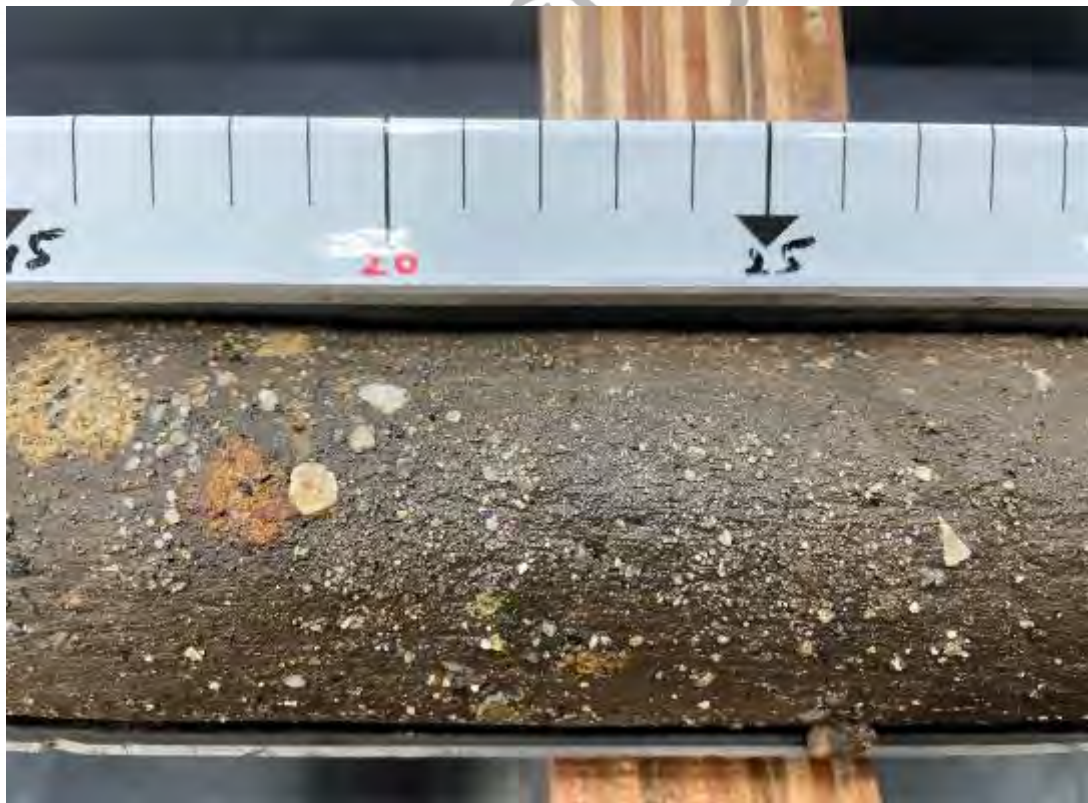


圖 4-116、本研究針對泥質沉積物中富含粗砂至細砂的岩屑進行採樣分析。

表 4-15、採樣位置與深度表。

孔位	深度	石英含量(百分比)	孔位	深度	石英含量(百分比)
S 2-1	631cm	15~20%	S3-2	415cm	1~3%
	636cm	10%		514cm	10~15%
	645cm	10~15%		535~538cm	10~15%
S 2-2	251cm	1~3%		558~559cm	5%
	663cm	10%		606cm	15~20%
	720cm	3%		612cm	15~20% (砂岩岩屑)
S 3-1	307cm	1~3%		660~664cm	15~20% (砂岩岩屑)
	320cm	1~3%		670cm	1~3%
	358cm	1~3%		687cm	1%
	379cm	1~3%		700cm	1%
	394cm	1~3%		770cm	1%
S 3-2	6cm	1~3%		785cm	1%
	9cm	1~3%	S4-1	33-35cm	10%
	14~21cm	1~3%	S4-2	47cm	1%
	71~74cm	1~3%			

大屯火山群七星山東側張裂帶的黑色泥質沉積物之中可以觀察到石英，各個位置及深度之石英含量呈現 1~20% 的含量百分比變化(圖 4-117)，其中於 S-2-2 與 S-3-2 的 550~660cm 之間含有較多的石英；較為特殊是於 S-3-2 孔位中 612cm、660cm 兩深度皆有發現砂岩岩屑(圖 4-118)。各個位置與深度所發現的石英，於外型上具有相當程度的差異，若依照沉積物顆粒之圓度(Roundness)與球度(sphericity)視覺估計圖表(圖 4-121、圖 4-122)，圓度分布於 0.1~0.5 之間，球度則分布於 0.3~0.9 之間，且於同一深度的沉積物之中可見到明顯的圓度與球度差異(圖 4-118~圖 4-120)。大屯火山群中的安山岩未含有石英顆粒，且這些顆粒並未成層和分布在一定的深度中，故推測這些石英顆粒可能是經由蒸氣噴發散布於山頂上後，再被侵蝕搬運堆積於爆裂口中。



圖 4-118、S-3-2 孔位中深度 612cm 所發現的砂岩岩屑。



圖 4-117、石英外型於圓度與球度呈現顯著的差異，本照片中石英取樣自 S-3-2 深度



圖 4-119、石英圓度差異明顯，本照片中石英取樣自 S-3-1 深度 394cm。

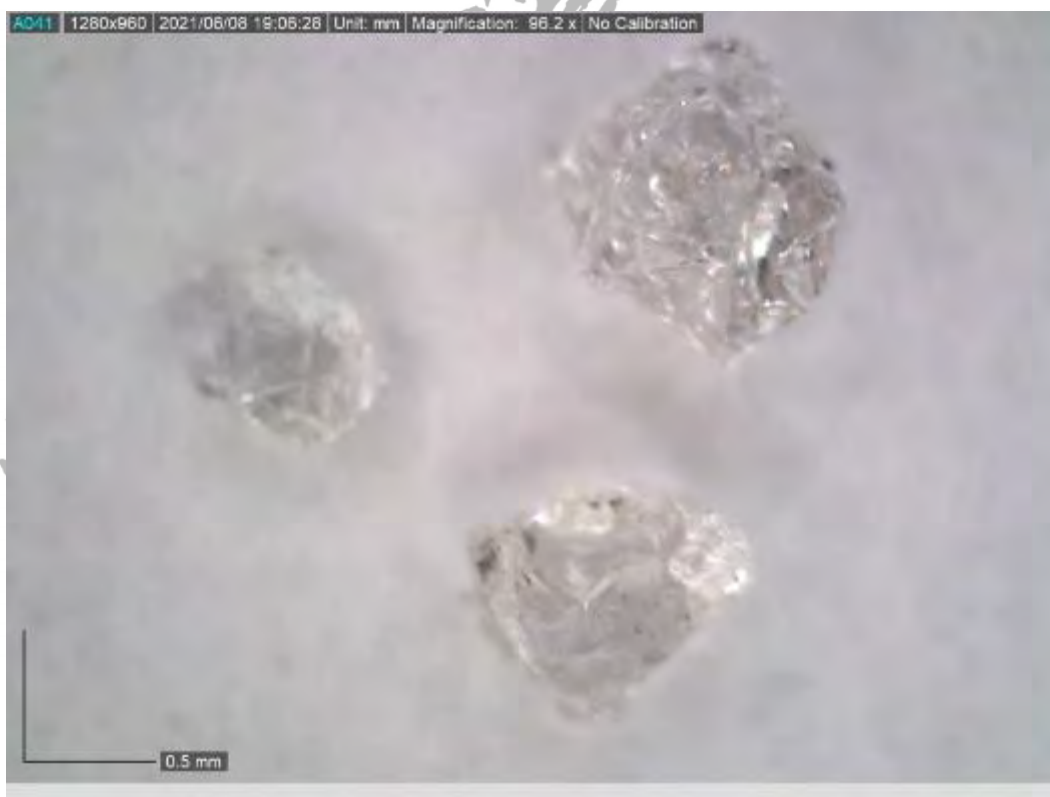


圖 4-120、可觀察到石英具有貝殼狀斷口，本照片中石英取樣自 S-3-2 深度 71cm。

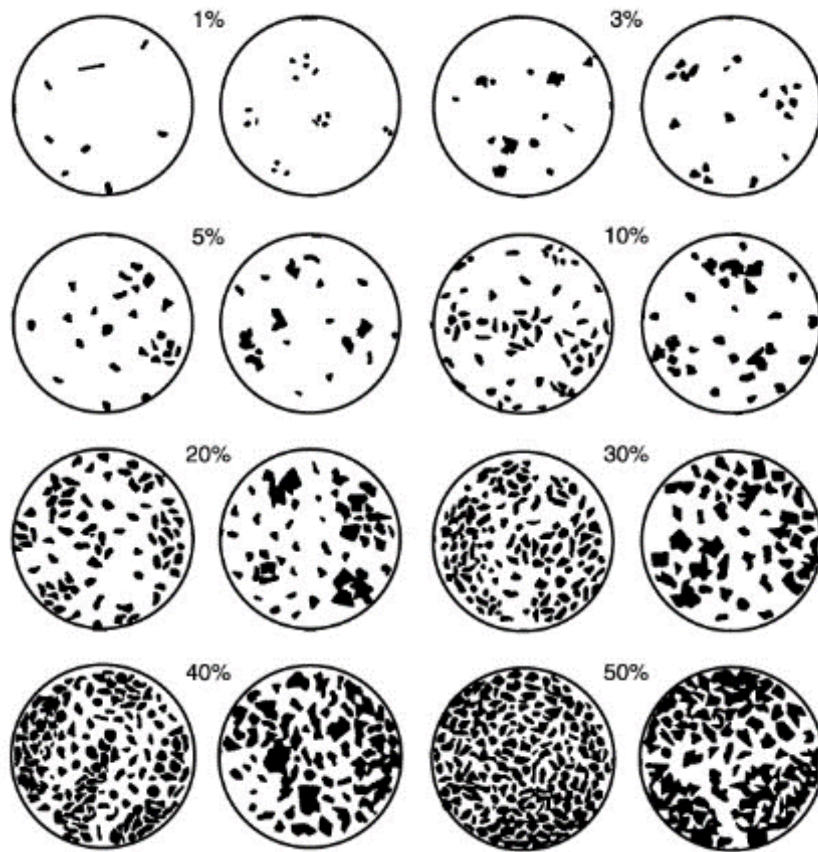


圖 4-121、百分比含量對比圖(after Terry and Chilingar, 1955)。

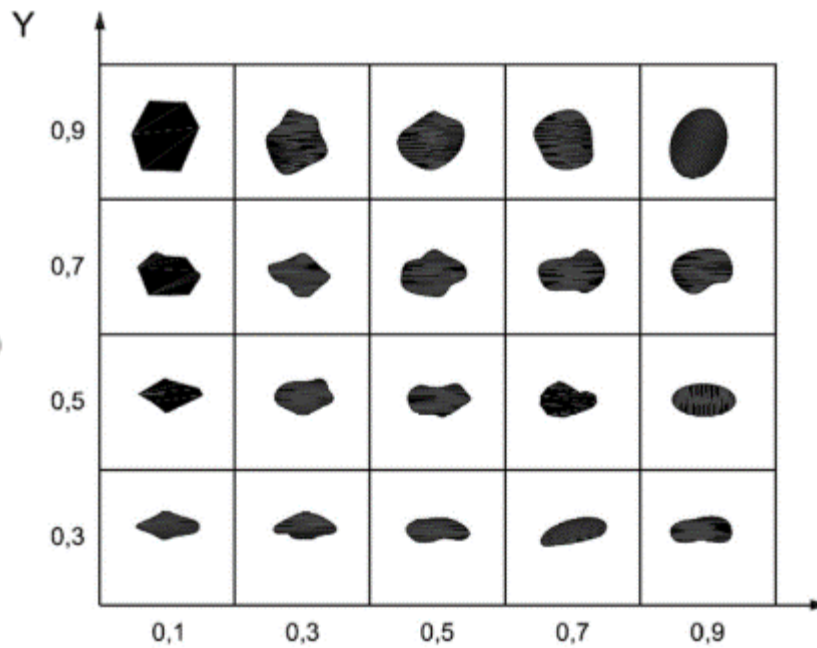


圖 4-122、圓度(Roundness)與球度(sphericity)視覺估計對比圖(Kurmbein and Sloss, 1963)。

8、岩芯定年結果

本次總共採了 12 個碳質樣本從事 C-14 的定年，結果如表 4-16 所列。年代介於距今 375 年到 3735 年之間。詳細的深度分布和年代的關係見圖 4-123 到圖 4-129。綜合上述夢幻湖和三個爆裂口的定年結果，顯示夢幻湖爆裂口形成的年代約為 5,600 年、S-2 爆裂口形成的年代約為 3,800 年、S-3 爆裂口形成的年代約為 1,800 年，S-4 爆裂口定年的年代相當年輕，介於 1,300~1,200 年之間，但此一爆裂口在地形上已被充填滿，且鑽探的岩芯主要含有大的岩塊堆積物，推測可能還未鑽至爆裂口的最底部。

表 4-16、東側 12 個碳質樣 C-14 的定年結果。



國立台灣大學地質科學系加速器質譜實驗室
The NTUAMS Lab
 Department of Geosciences, National Taiwan University
 106 台北市羅斯福路四段 1 號
 No.1, Sec.4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan
 Tel: +886-2-33662929 Fax: +886-2-23636095

AMS ¹⁴C Dating Report

Date: 08/02/2021
 Reporter: Hong-Chun Li

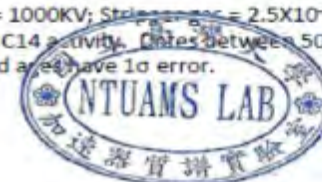
Dear 宋聖榮教授:

The results of your AMS ¹⁴C dating samples are below:

Lab Code	Sample ID	C12 current (A)	pMC (%)	error (±)	Δ14C (‰)	error (±)	¹⁴ C Age (year BP)	error (±)	Calendric age (year BP)	error (±)
NTUAMS-7134	S-02-1-2021	4.55E-06	96.81	0.75	-31.9	0.2	260	62	375	120
NTUAMS-7135	S-02-1-305306	3.56E-06	76.94	0.64	-230.6	1.9	2106	67	2070	140
NTUAMS-7136	S-02-1-780781	8.82E-06	64.94	0.51	-350.6	2.8	3468	63	3735	150
NTUAMS-7137	S-02-2-580581	4.57E-06	67.79	0.56	-322.1	2.7	3123	67	3320	155
NTUAMS-7138	S-01-3536	6.35E-06	81.65	0.63	-183.5	1.4	1628	62	1510	125
NTUAMS-7139	S-03-1-3031	8.81E-06	89.53	0.67	-104.7	0.8	888	60	810	110
NTUAMS-7140	S-03-1-150151	2.86E-06	92.12	0.79	-78.8	0.7	659	69	620	85
NTUAMS-7141-1	S-03-1-367368	7.13E-06	80.33	0.64	-196.7	1.6	1759	64	1685	140
NTUAMS-7142s	S-03-2-250251	1.73E-06	91.93	0.86	-80.7	0.8	676	75	635	100
NTUAMS-7143	S-03-2-490491	6.90E-06	86.34	0.67	-136.6	1.1	1180	62	1080	115
NTUAMS-7144	S-04-1-2021	5.34E-06	86.17	0.68	-138.3	1.1	1195	64	1125	145
NTUAMS-7145	S-04-2-9091	8.19E-06	85.21	0.66	-147.9	1.1	1285	62	1185	115

Instrument: The AMS model: HVE 1.0MV Tandatron Model 4110 BO. Settings for C3+ mode: Termination Voltage = 1000KV; Stripping gas = 2.5X10⁻² mbar; Cs temperature = 95°C; All slits are open; GIC gas pressure = 10.4mbar. Transmission rate: ~20%. pMC = % of modern C14 activity. Dates between 50,000 and 1 BP were calibrated using the calibration curve IntCal13. All ratio measurements have 2σ uncertainty. The calibrated ages have 1σ error.
 BP: Before Present. The present is AD 1950 in the C-14 dating method.

李紅春 教授



七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-1)

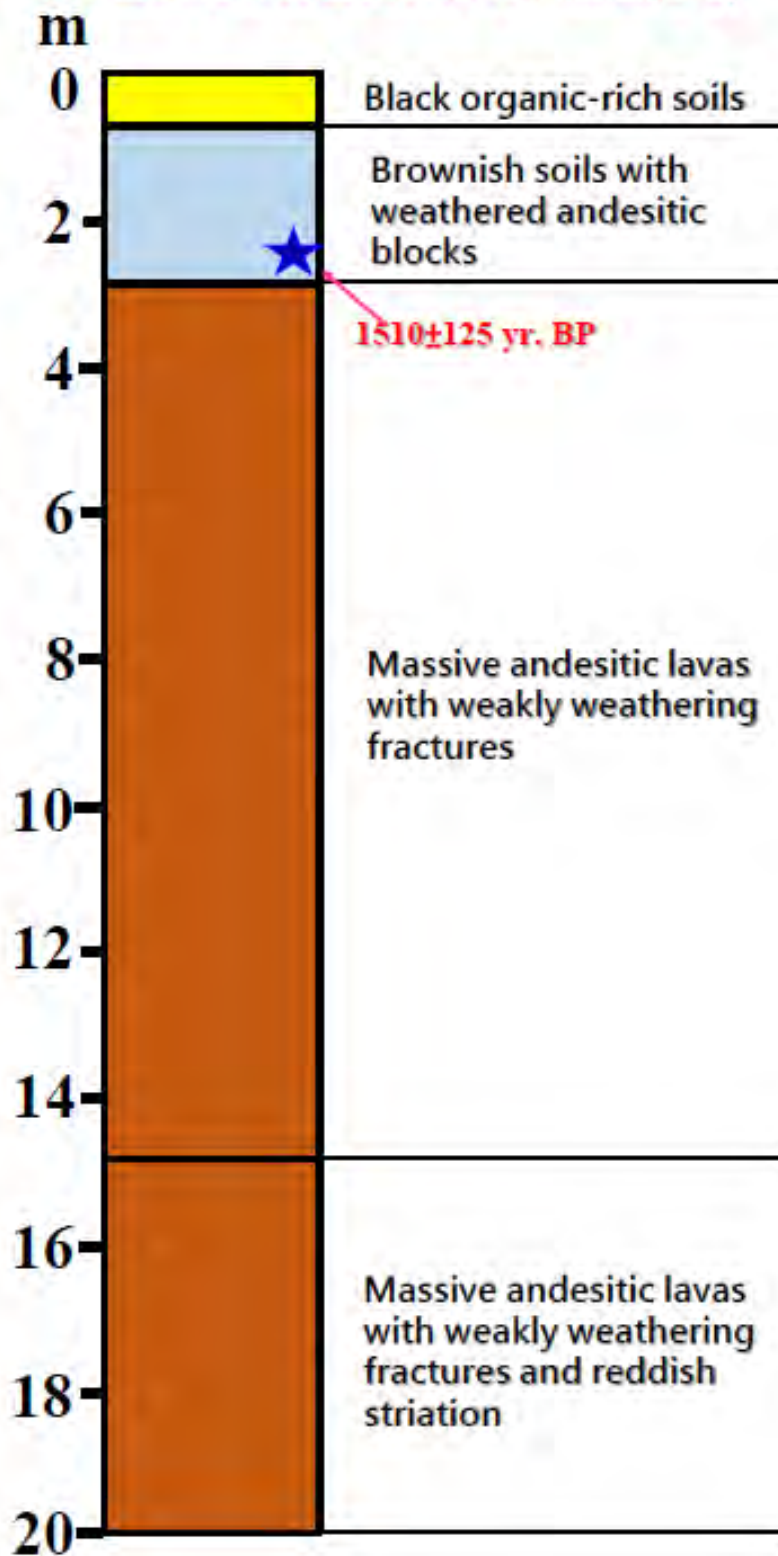


圖 4-123、S-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-2-1)

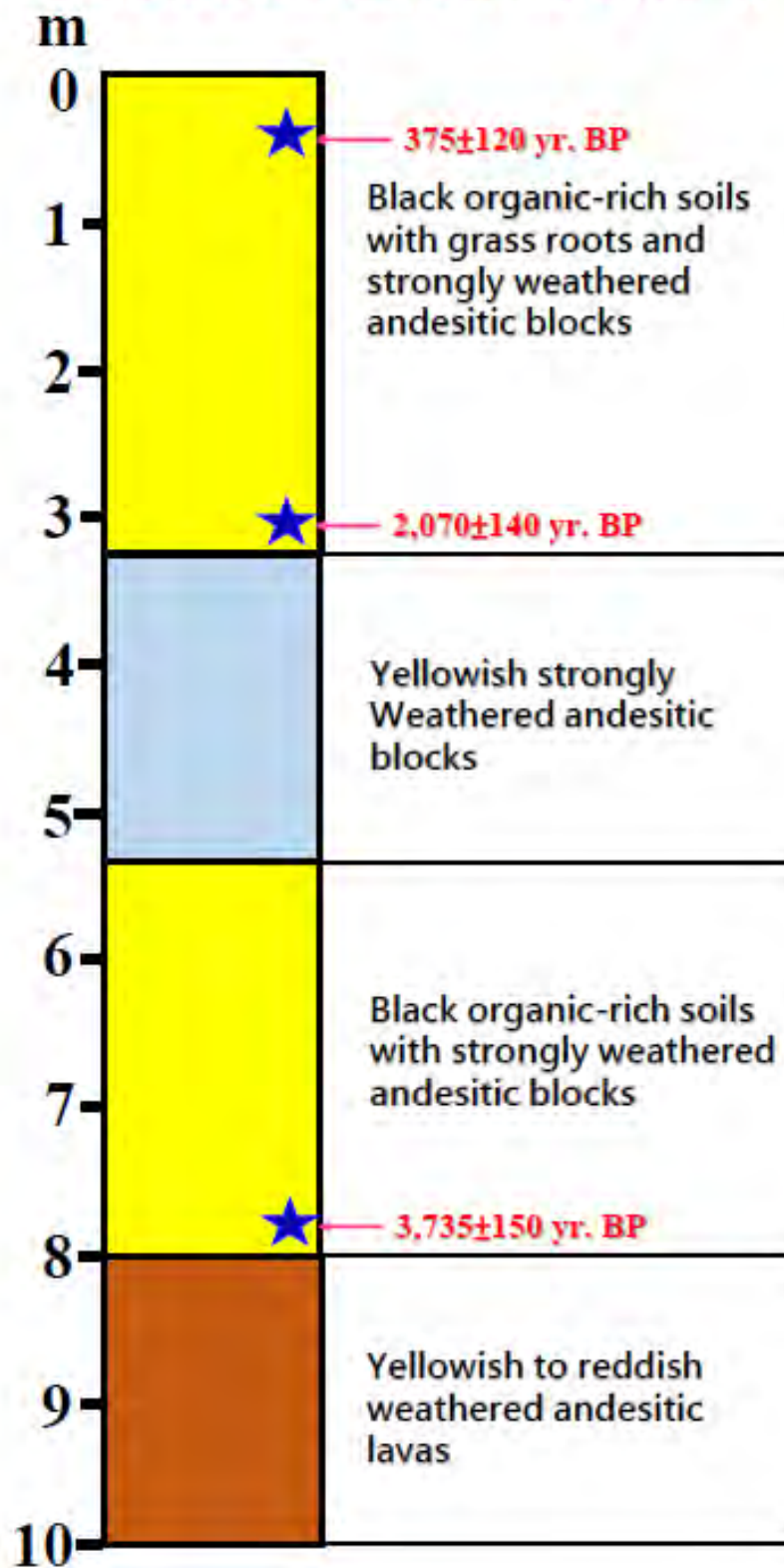


圖 4-124、S-2-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-2-2)

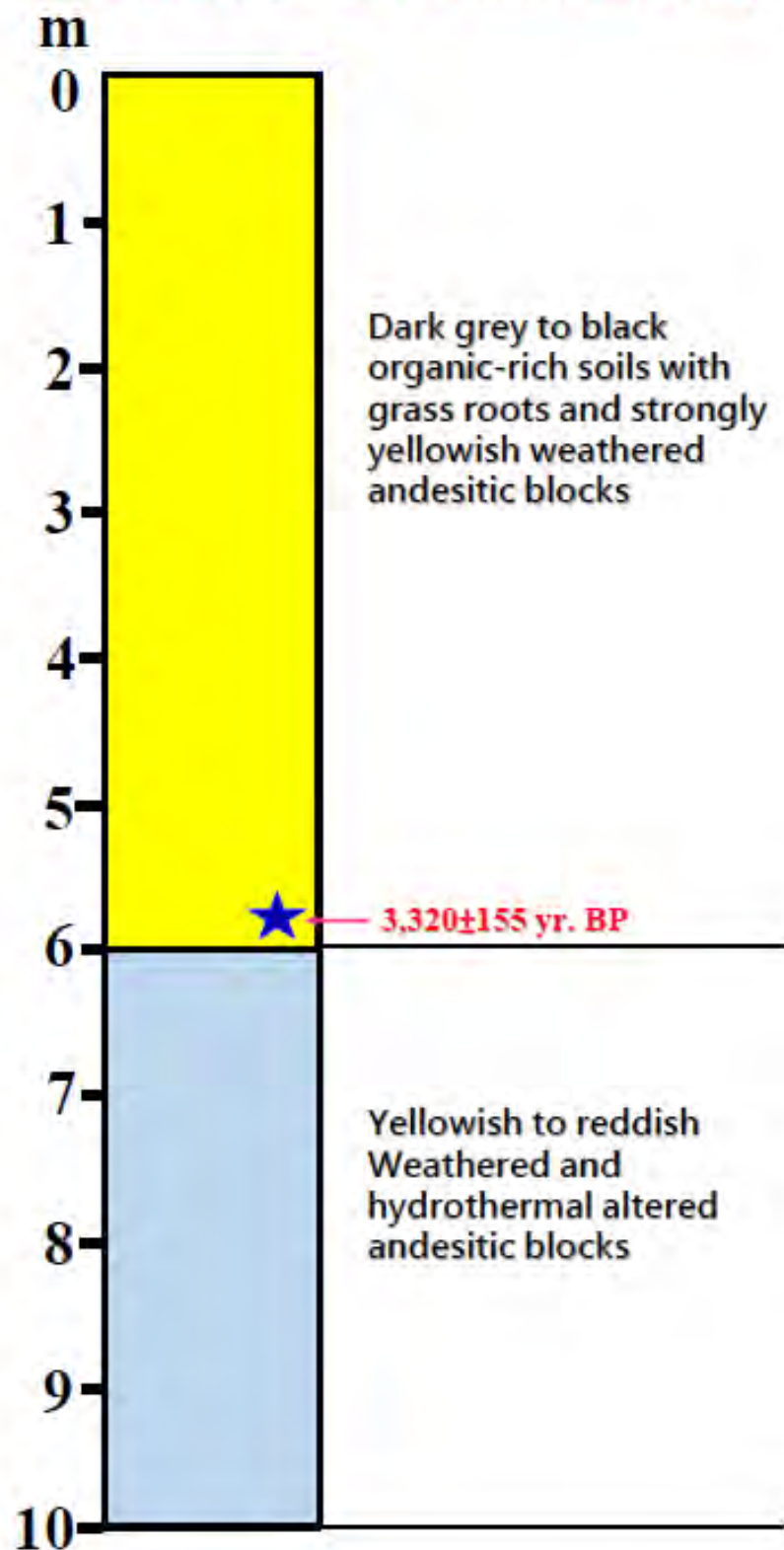


圖 4-125、S-2-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-3-1)

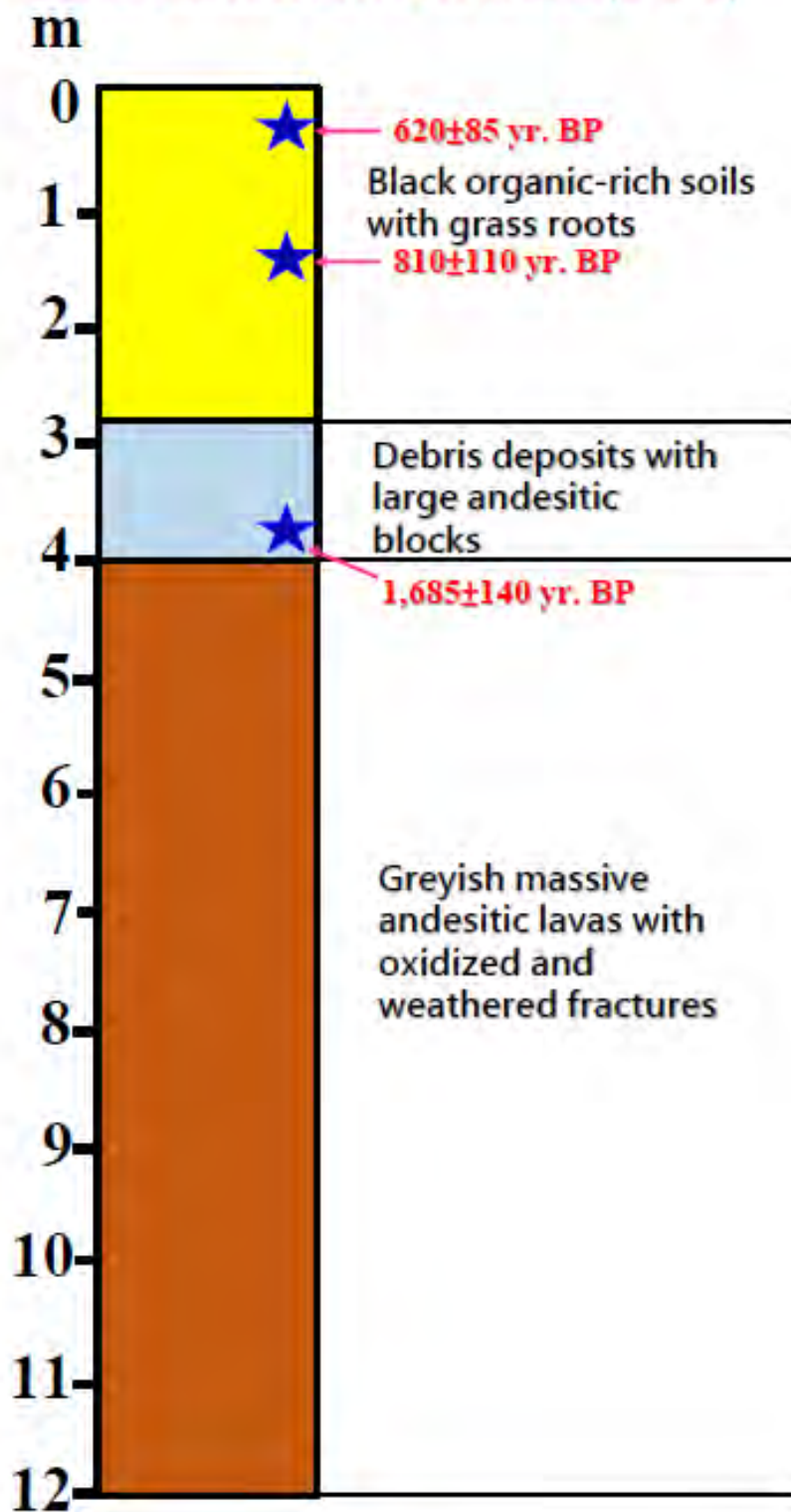


圖 4-126、S-3-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-3-2)

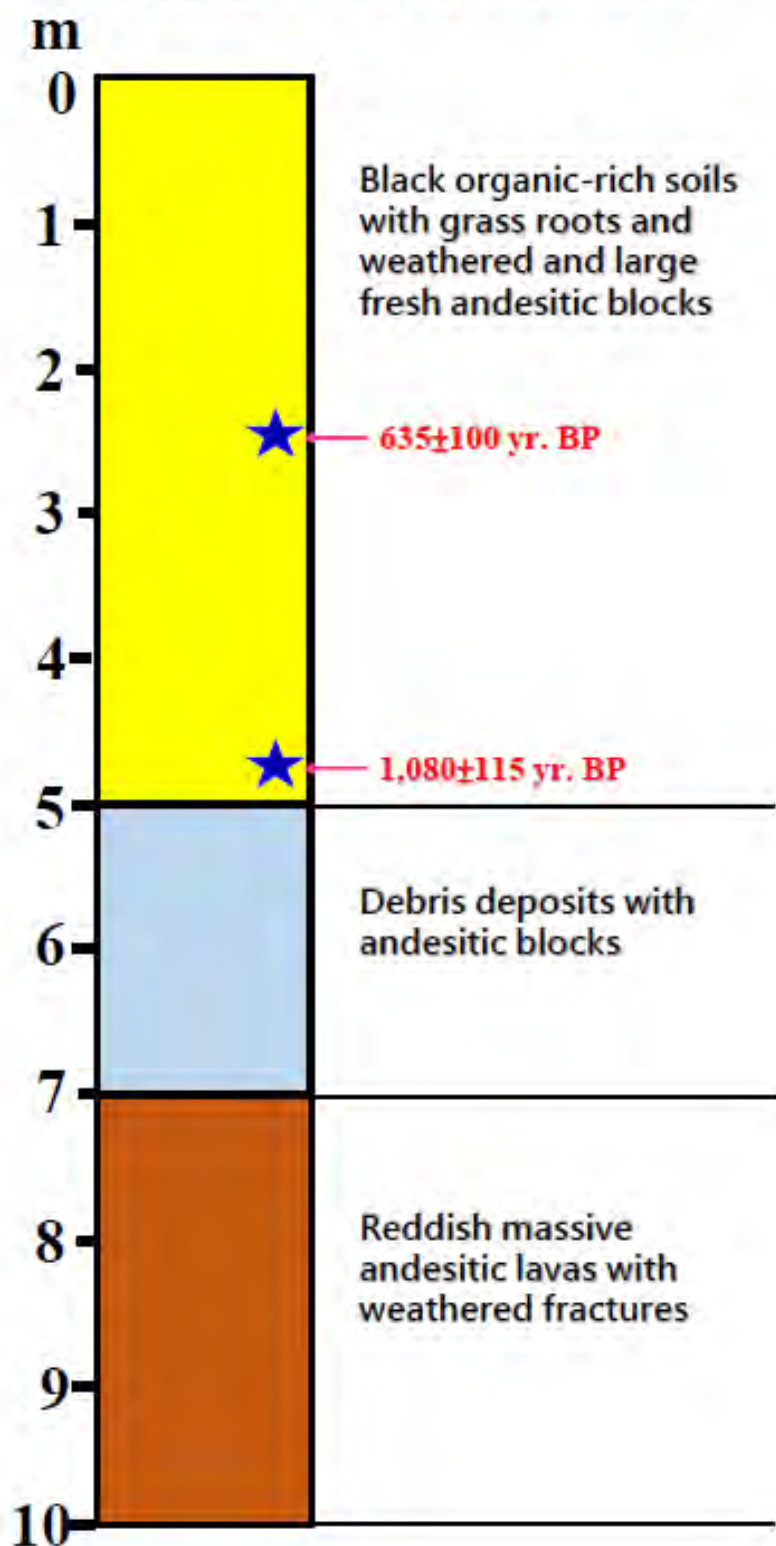


圖 4-127、S-3-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-4-1)

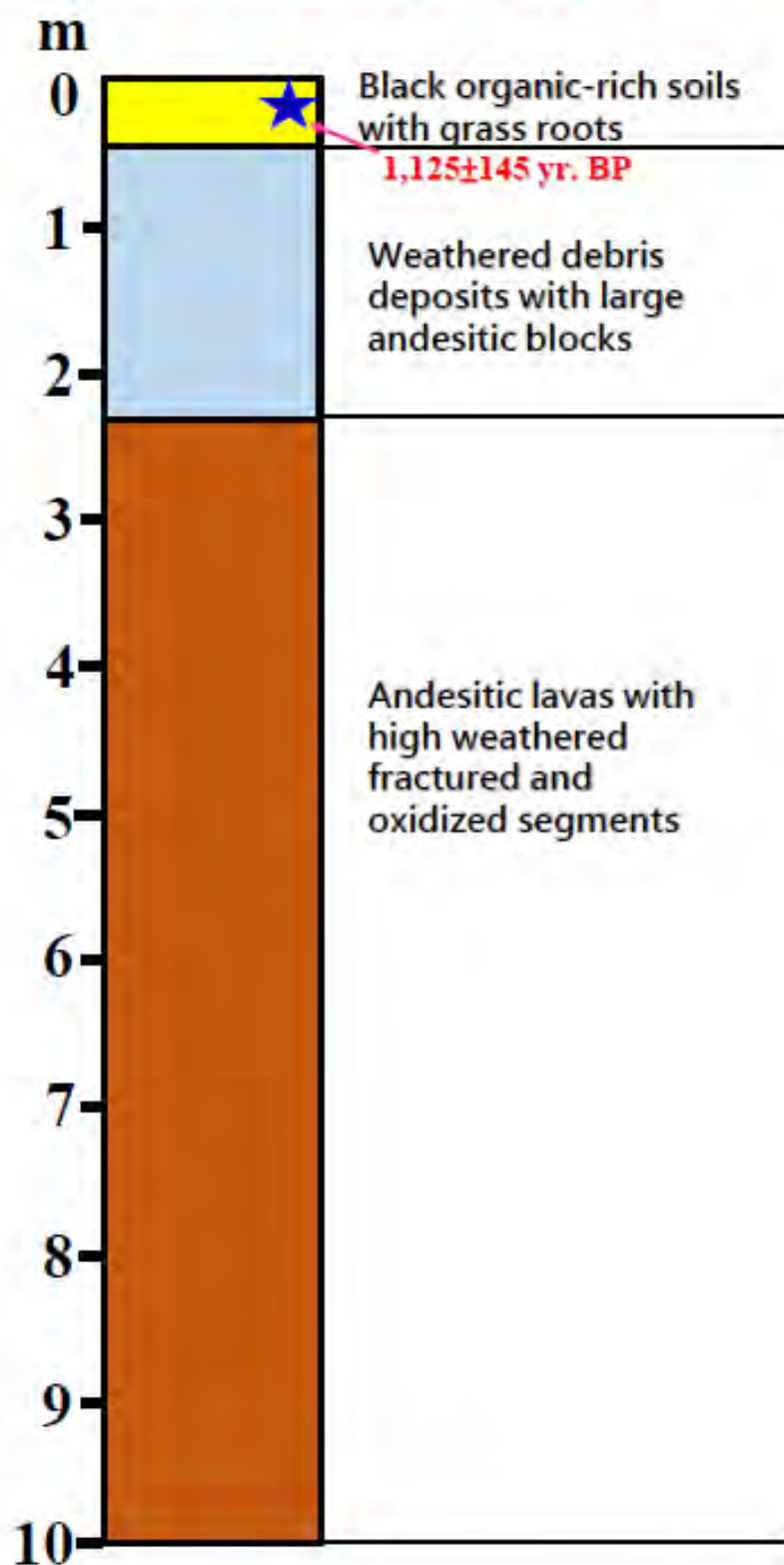


圖 4-128、S-4-1 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山東翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-4-2)

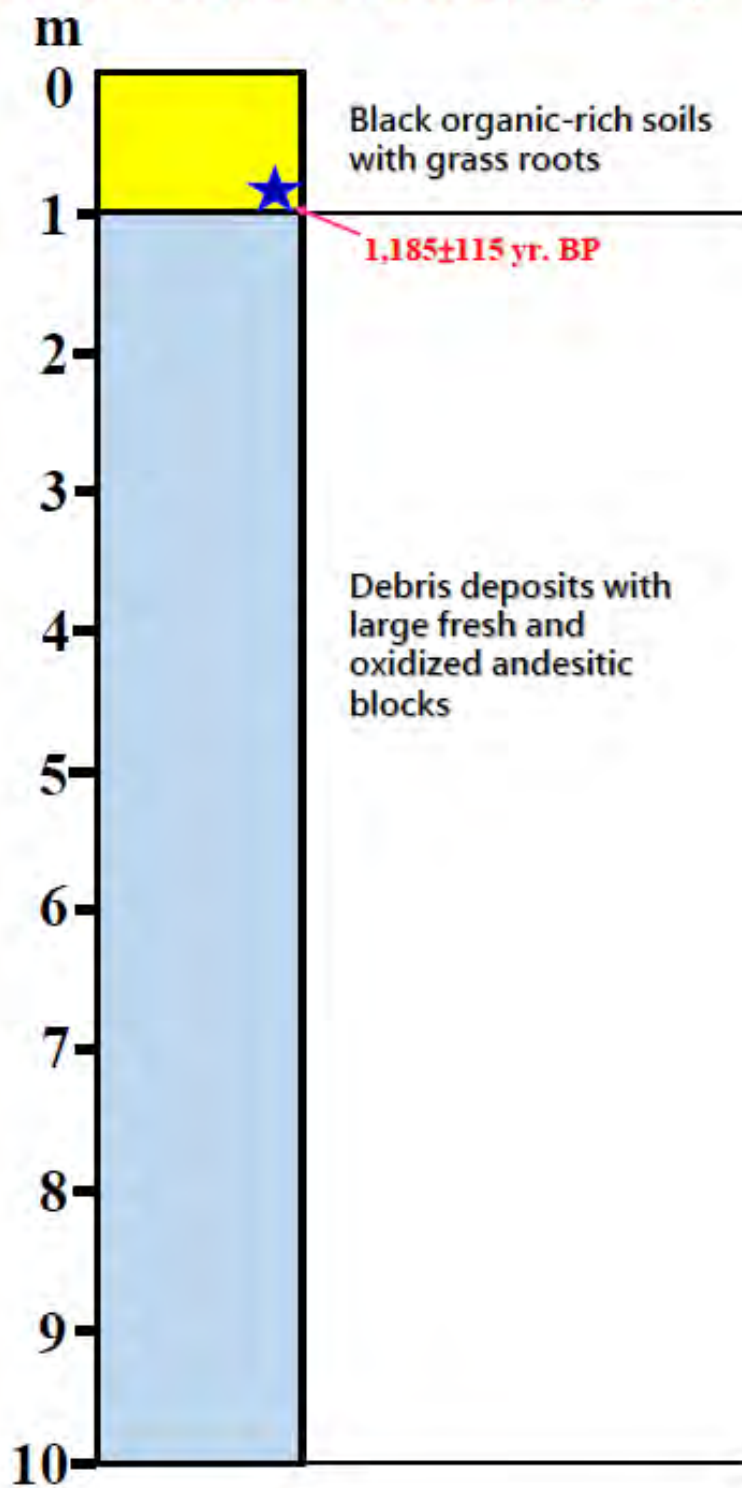


圖 4-129、S-4-2 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

(三)、七星山火山體西側

1、鑽井位置與分布

本計畫第二年度於七星山西側張裂帶進行地質鑽探以及岩芯取樣之作業，透過旋轉式鑽取法(Rotary drill)進行全取樣鑽探，取樣岩芯尺寸為國際岩芯規格HQ，預計於 Site 5－Site 8 共計鑽取八口岩芯(圖 4-130)，岩芯深度如下表格所式(表 4-17)。本年度從四月中進場鑽探，完成金露天宮(Site 8)的鑽探後，恰巧碰到 COVID-19 的疫情，而不得不暫緩鑽探。

表 4-17、鑽井名稱與深度(*:預計鑽探深度)

鑽井位置名稱	深度	鑽井位置名稱	深度
Site 5-1	10m*	Site 7-1	10m*
Site 5-2	10m*	Site 7-2	10m*
Site 6-1	10m*	Site 8-1	10m
Site 6-2	10m*	Site 8-2	21m

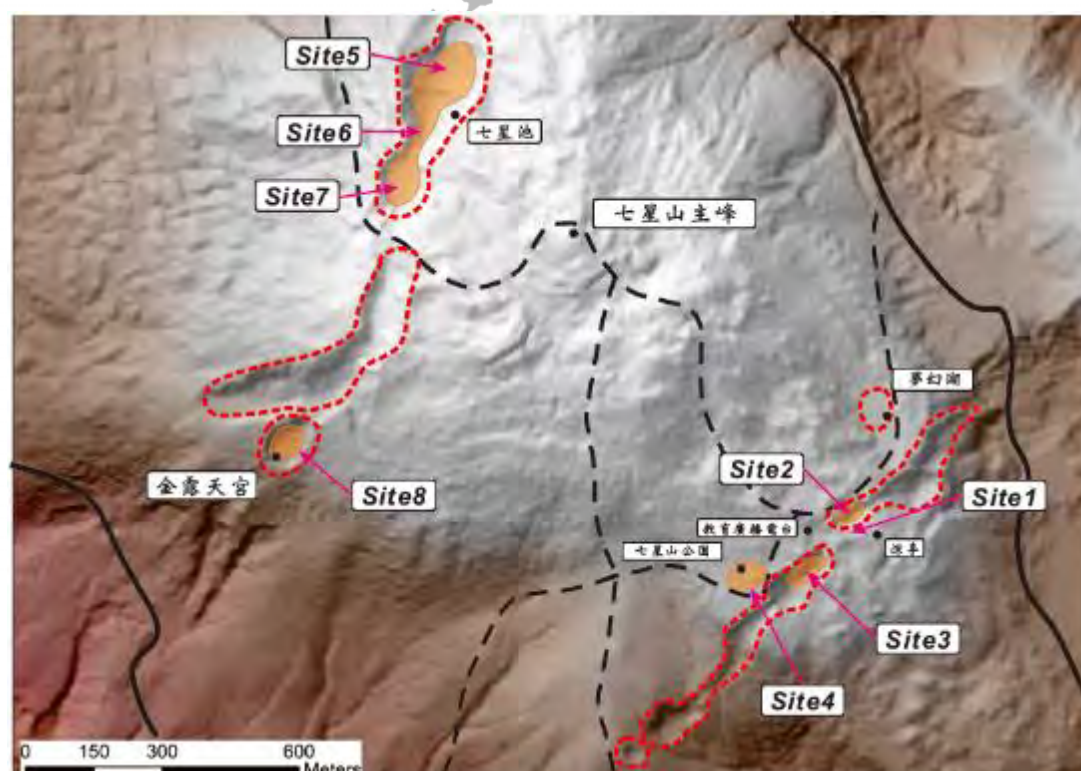


圖 4-130、西側鑽孔位置圖。

2、鑽井成果

2-1、S-5 鑽井

此鑽井場址坐落在七星池(舊名鴨池)的上池的爆裂口內(圖 4-52)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-5-1 和 S-5-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，所獲得岩芯分別如圖 4-55~圖 4-573 和圖 4-58~圖 4-60。



圖 4-131、S-5 鑽井場址照片圖。



圖 4-132、S-5-1 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-133、S-5-1 6-10 m 岩芯實拍圖。



圖 4-134、S-5-2 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-135、S-5-2 6-10 m 岩芯實拍圖。

2-2、S-6 鑽井

此鑽井場址坐落在七星池(舊名鴨池)的中池的爆裂口內(圖 4-52)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-6-1 和 S-6-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，所獲得岩芯分別如圖 4-55~圖 4-578 和圖 4-58~圖 4-60。



圖 4-136、S-6 鑽井場址照片圖。



圖 4-137、S-6-1 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-138、S-6-1 6-10 m 岩芯實拍圖。



圖 4-139、S-6-2 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-140、S-6-2 0-5 m 岩芯實拍圖。

2-3、S-7 鑽井

此鑽井場址坐落在七星池(舊名鴨池)的下池的爆裂口內(圖 4-52)，共鑽了兩口個 10 公尺的岩芯，編號為 S-7-1 和 S-7-2。此場址連續取岩芯各 10 公尺，所獲得岩芯分別如圖 4-55~圖 4-57 和圖 4-58~圖 4-145。



圖 4-141、S-7 鑽井場址照片圖。



圖 4-142、S-7-1 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-143、S-7-1 6-10 m 岩芯實拍圖。



圖 4-144、S-7-2 0-5 m 岩芯實拍圖。



圖 4-145、S-7-2 6-10 m 岩芯實拍圖。

2-4、S-8 鑽井

此鑽井場址坐落在七星山南麓的金露天宮爆裂口內(圖 4-52)，共鑽了兩口岩芯，第一口鑽了 10 公尺編號為 S-8-1，第二口鑽至 10 公尺時還未鑽至基盤岩，故加深至小鑽機的極限 21 公尺，編號為 S-8-2。所獲得岩芯分別如圖 4-55~圖 4-579 和圖 4-58~圖 4-155。



圖 4-146、S-8 鑽井場址照片圖。



圖 4-147、S-8-1 0-4m 岩芯實拍圖。



圖 4-148、S-8-1 4-8m 岩芯實拍圖。

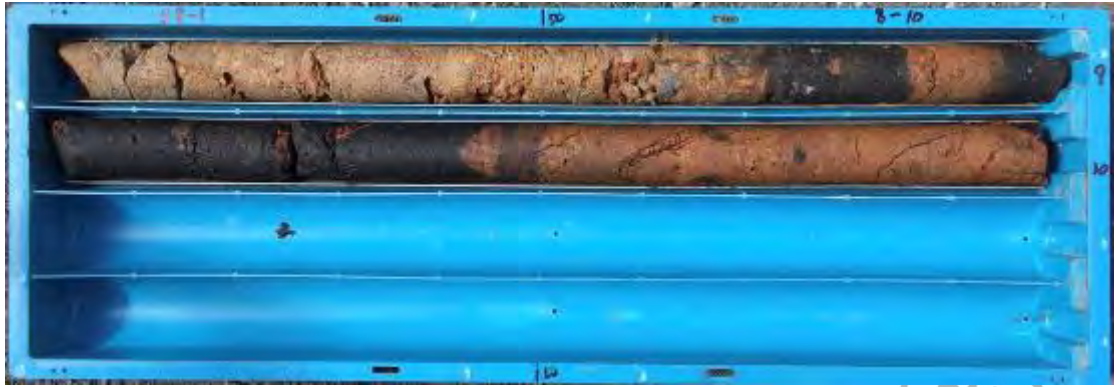


圖 4-150、S-8-1 8-10m 岩芯實拍圖。



圖 4-149、S-8-2 0-4m 岩芯實拍圖。



圖 4-151、S-8-2 4-8m 岩芯實拍圖。



圖 4-155、S-8-2 8-12m 岩芯實拍圖。



圖 4-154、S-8-2 12-16m 岩芯實拍圖。



圖 4-153、S-8-2 16-20m 岩芯實拍圖。



圖 4-152、S-8-2 20-21m 岩芯實拍圖。

3、岩芯描述

針對各個鑽探地點所取樣之岩芯進行岩相組成文字描述，並配合岩芯柱狀圖與岩芯照片，展示各鑽探地點隨深度之改變的岩石產狀變化。

3-1、Site5-1

Site5-1 的鑽探取芯深度為 10m，根據鑽取出的岩芯，本點位的岩石產狀有隨深度遞增發生變化(圖 4-156)。0-3.8m 的岩石產狀特徵以含有機質的棕色至黑色泥岩，偶夾灰色至棕黃色之新鮮至風化的安山岩塊，透過肉眼初判可見輝石斑晶(圖 4 157&圖 4 158)。此段岩石產狀特徵反應的沉積環境可能為較封閉的凹地(安靜沉積環境)或沼澤，偶爾接收到來自周圍邊坡崩落的安山岩岩塊。

3.8m 至 10m 則以淘淘選度差的火山質砂岩，偶夾灰色至棕黃色風化程度不均的安山岩塊為主要產狀特徵(圖 4-158~ 圖 4-161)，是為火山泥流的堆積物。基於火山質砂岩間夾的塊狀安山岩與其下伏之火山質砂岩的接觸面無顯現任何反應熱之構造特徵(ex: baking texture)，且接觸面多為不平整等原因，故將其判定為安山岩塊，而非熔岩流層。

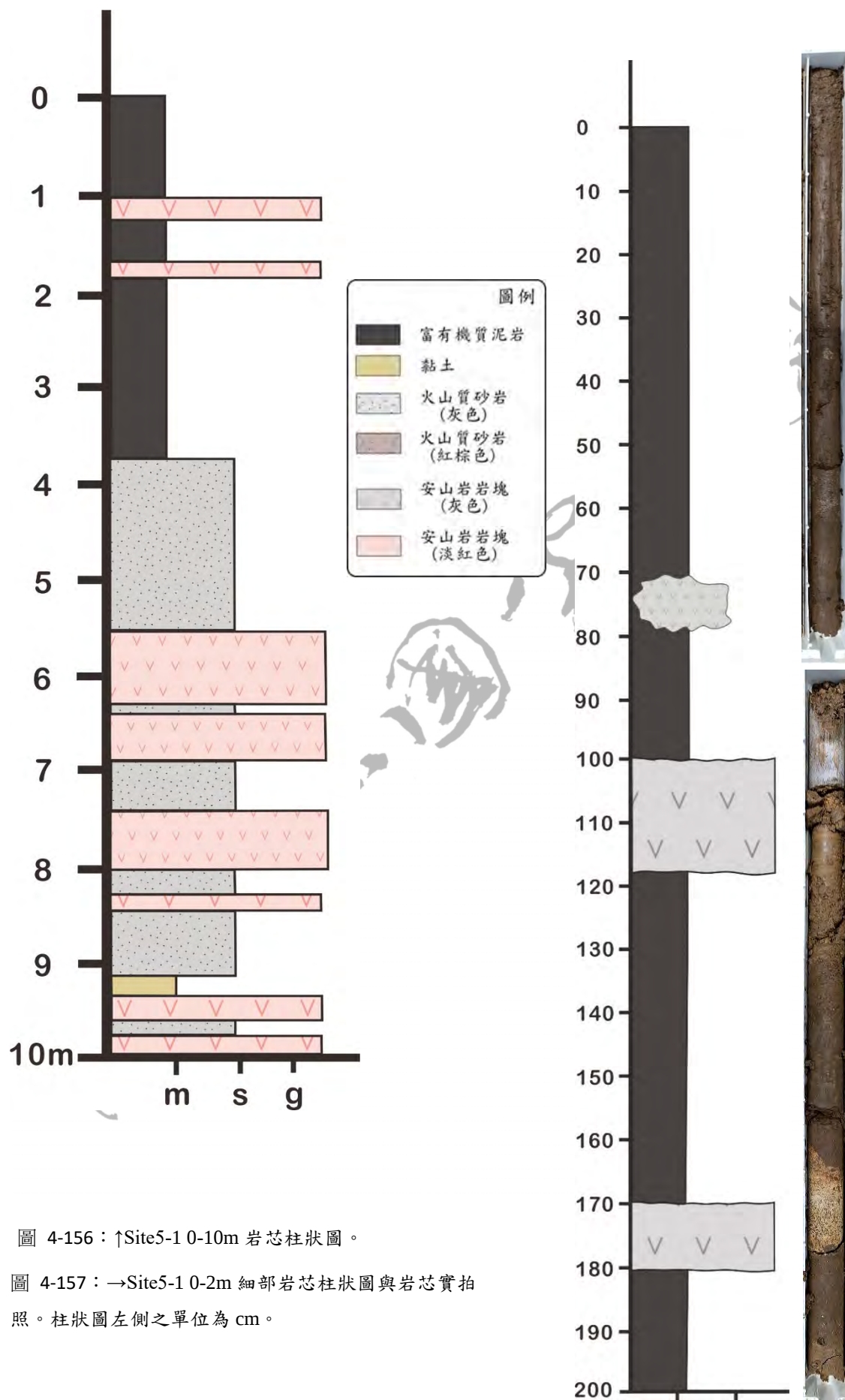


圖 4-156：↑Site5-1 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-157：→Site5-1 0-2m 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 cm。

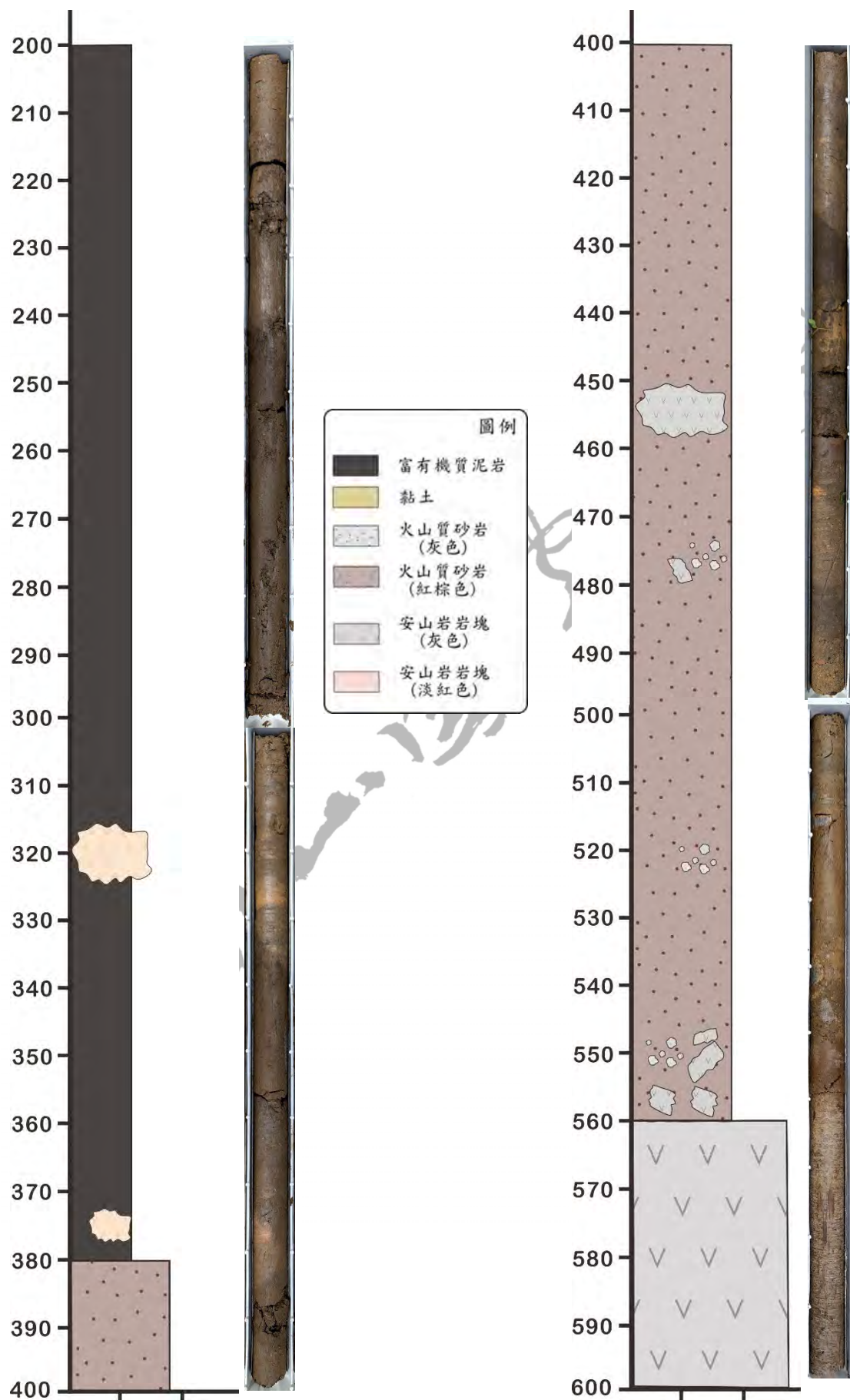


圖 4-158：↑Site5-1 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-159↑→ Site5-1 2-6m 細部岩芯柱狀圖。

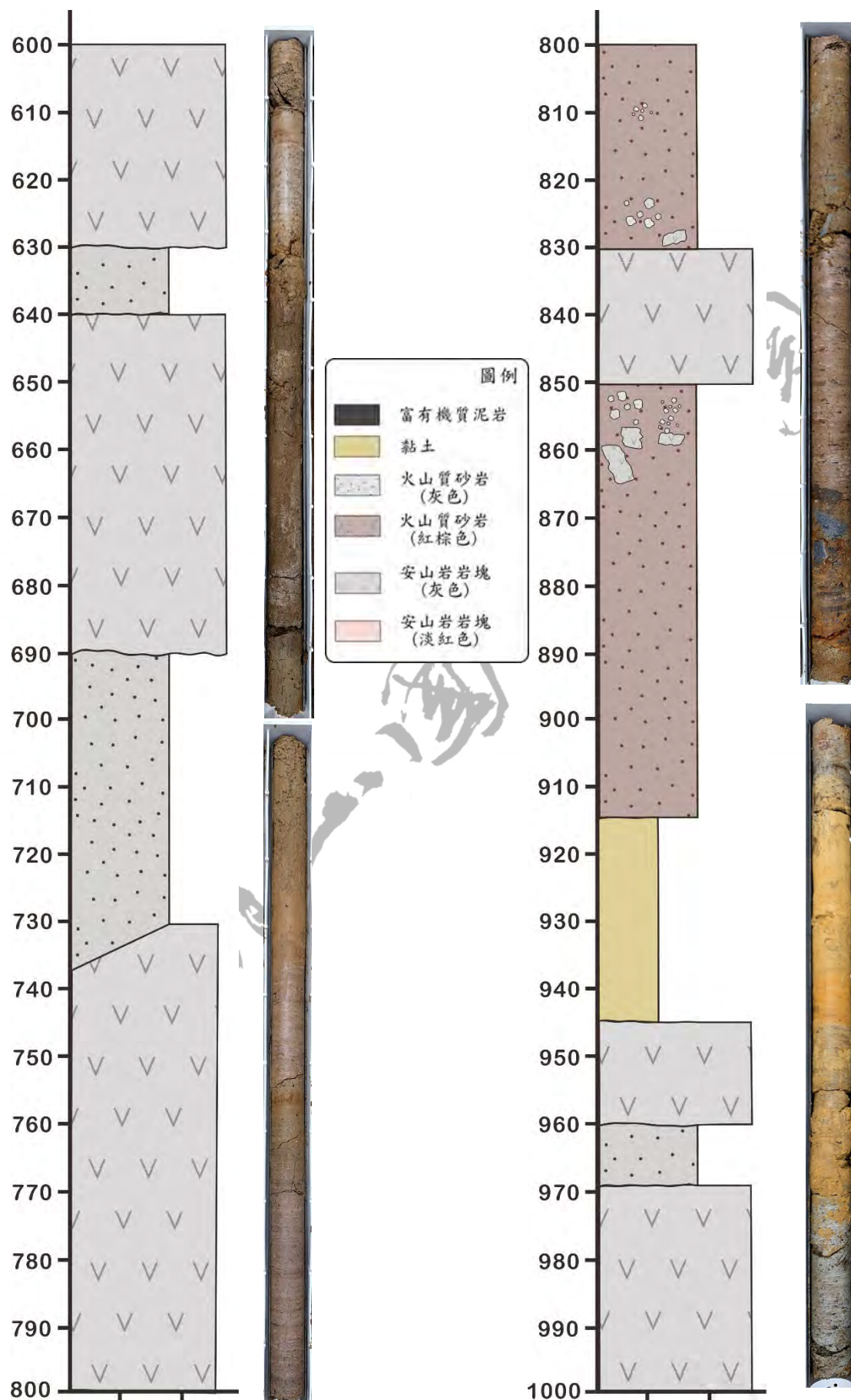


圖 4-160：↑Site5-1 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-161：↑→ Site5-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-2、Site5-2

Site5-2 的鑽探深度為 10m，隨深度岩石產狀發生變化，其中 0-4.2m 為泥岩，4.2-10m 為火山質砂岩偶夾安山岩岩塊，詳細產狀描述與深度位置如後所述(圖 4-522)。

0-4.2m 為黑色泥岩偶夾火山角礫岩岩屑(圖 4-163&圖 4-164&圖 4-165)。其中 2.55-2.68 夾的灰色熔岩流岩塊，約長 15 公分，表面可見輝石斑晶。

4.2-10m 為火山質砂質偶夾大小不一的安山岩岩塊。火山質砂岩的淘選度差，顏色變化從棕黃色至淺黃色不等，其中 4.2-7.0m 之火山質砂岩為棕黃色(圖 4-165&圖 4-166)，7.0-10.0m 之火山質砂岩為淺黃色(圖 4-166&圖 4-527)。4.2-10.0m 之中偶夾的安山岩顏色呈現灰、棕黃、紅不等，表面可見有輝石斑晶，岩塊礫徑從 1cm 至 50cm 不等；其中礫徑大於 10cm 的岩塊分佈於 4.2-4.55m&8.0-8.5m&8.58-8.72m(圖 4-165&圖 4-166&圖 4-167)，各深度所見之安山岩岩塊風化程度不一。8.58-8.72m 的安山岩岩塊呈現紅色，可能為熱氧化作用所造成。

根據上述的產狀特徵，0-4.2 指示為較封閉的凹地(安靜沉積環境)或沼澤，偶爾接收到來自周圍邊坡崩落的安山岩岩塊。4.2-10.0m 則顯示為火山泥流堆積物。

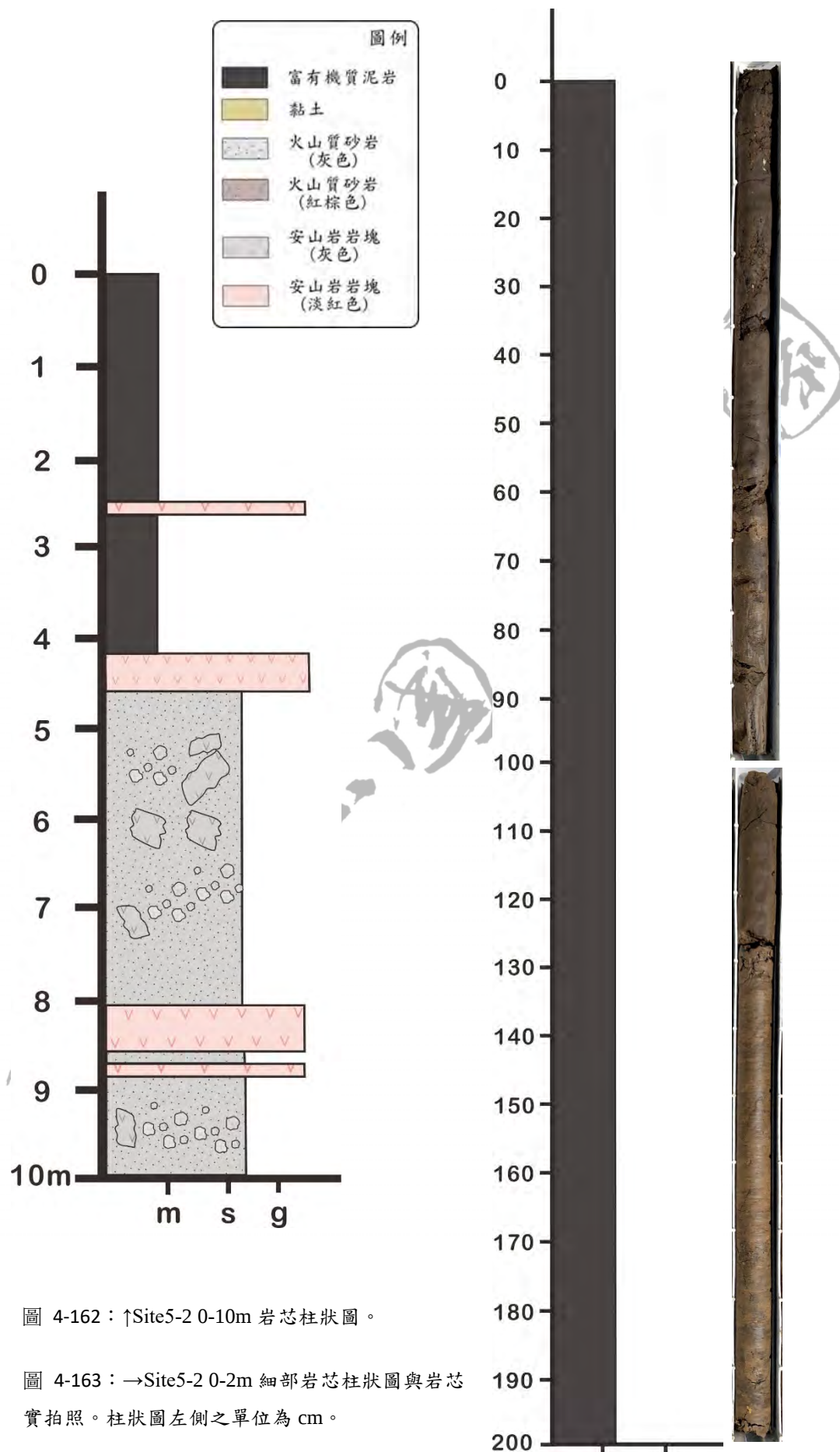


圖 4-162：↑Site5-2 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-163：→Site5-2 0-2m 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 cm。

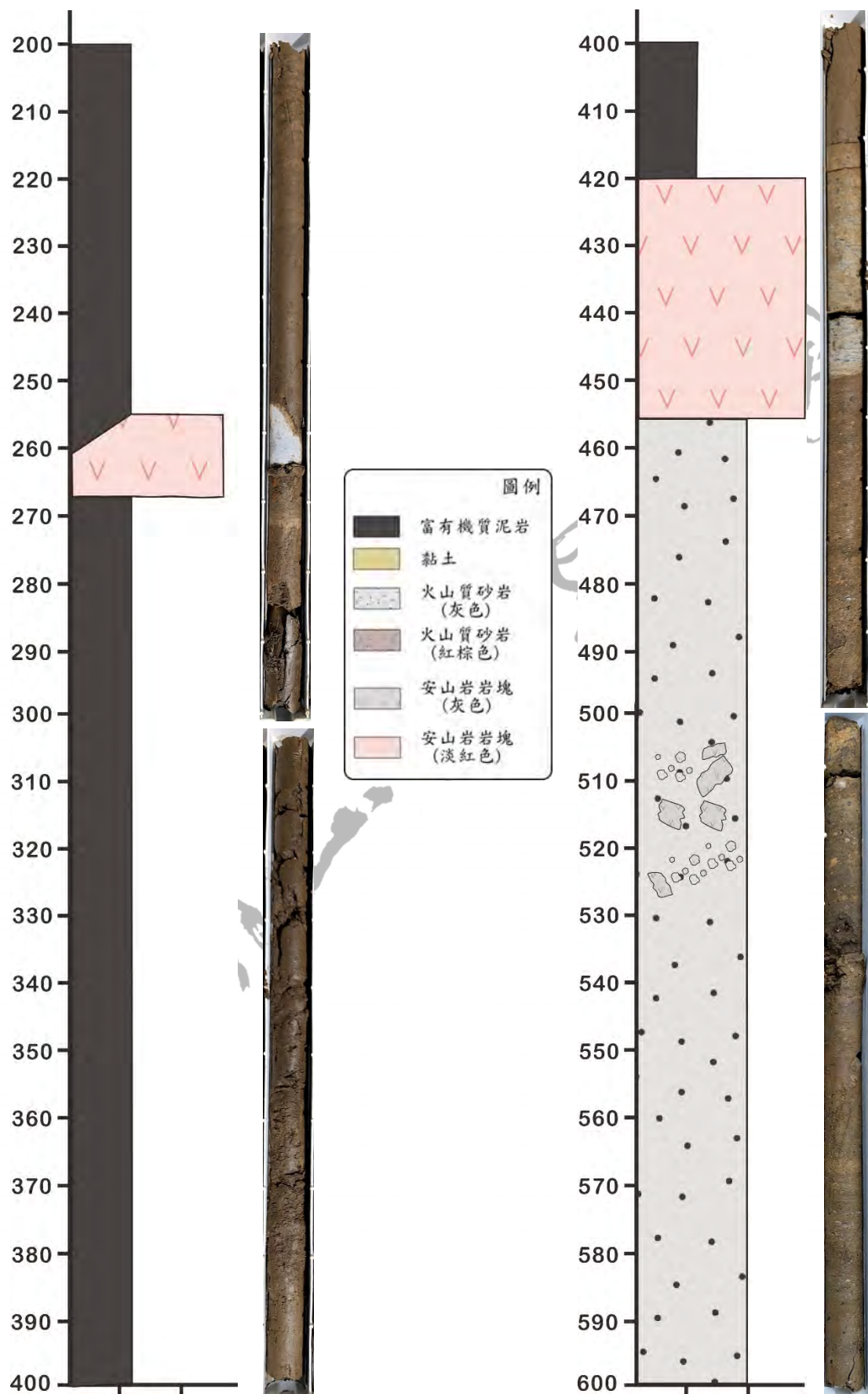


圖 4-164：↑Site5-2 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-165：↑→ Site5-2 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

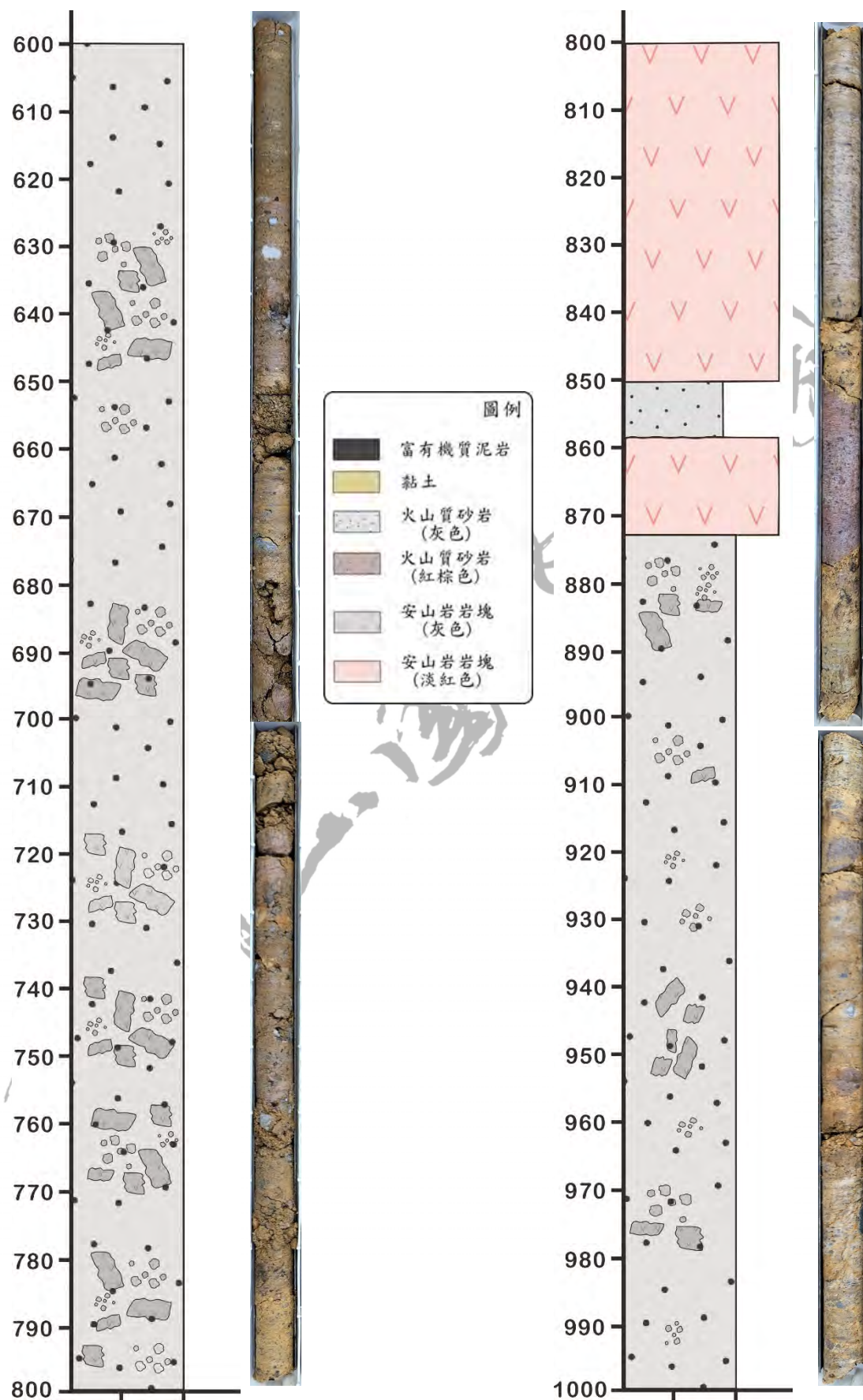


圖 4-166：↑Site5-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-167：↑→ Site5-2 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-3、Site6-1

Site6-1 的鑽探深度總深為 10m，其中 0-7.35m 主要為泥岩偶夾安山岩岩塊，7.35-10.0m 為火山質砂岩偶夾安山岩塊，詳細產狀描述如後所述(圖 4-168)。

0m-7.35m 為富含有機質的深黑色泥岩偶夾大小不一的安山岩岩塊。本段位於 1.4m-1.6m & 2.7-2.8m & 3.7-3.8m & 4.1-4.2m 處可以發現 10-20cm 的安山岩岩塊，顏色均為灰色，表面可見輝石斑晶(圖 4-169 & 圖 4-170)。

7.35-10.0m 為火山質砂岩偶夾安山岩岩塊(圖 4-172 & 圖 4-173)。火山質砂岩淘選度差，偶夾大小不均的安山岩岩塊，岩塊表面可見到角閃石與輝石斑晶。此段之中所夾的岩塊大小普遍大於 20 公分，顏色多呈現棕黃至黃色，風化程度較高。8.8-9.3m 處之安山岩岩塊顏色為紅色，指示為受到熱氧化作用的影響。

根據上述的產狀特徵，0-7.35 指示為較封閉的凹地(安靜沉積環境)或沼澤，偶爾接收到來自周圍邊坡崩落的安山岩岩塊。7.35-10.0m 則顯示為火山泥流堆積物。

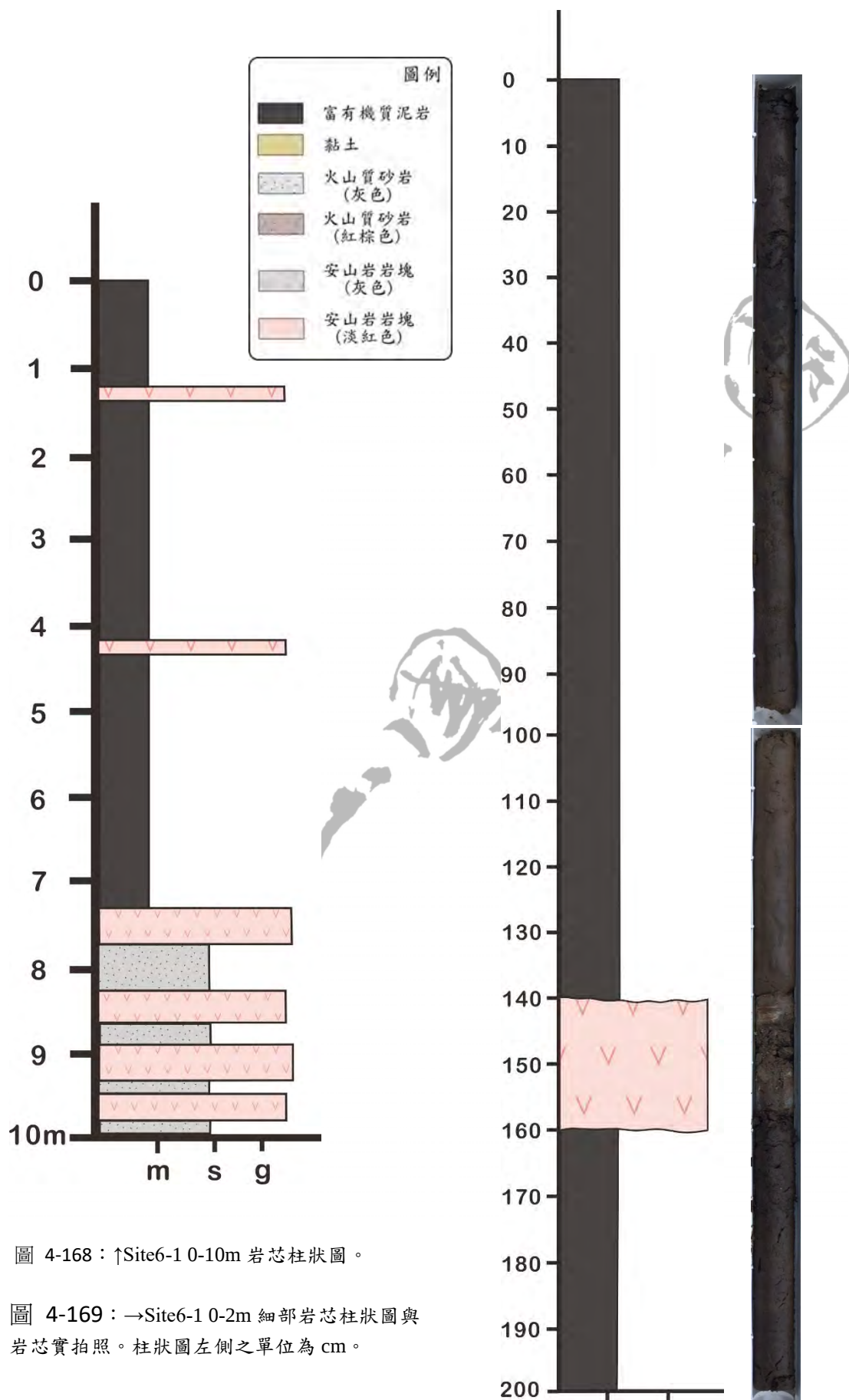


圖 4-168：↑Site6-1 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-169：→Site6-1 0-2m 細部岩芯柱狀圖與岩芯實拍照。柱狀圖左側之單位為 cm。

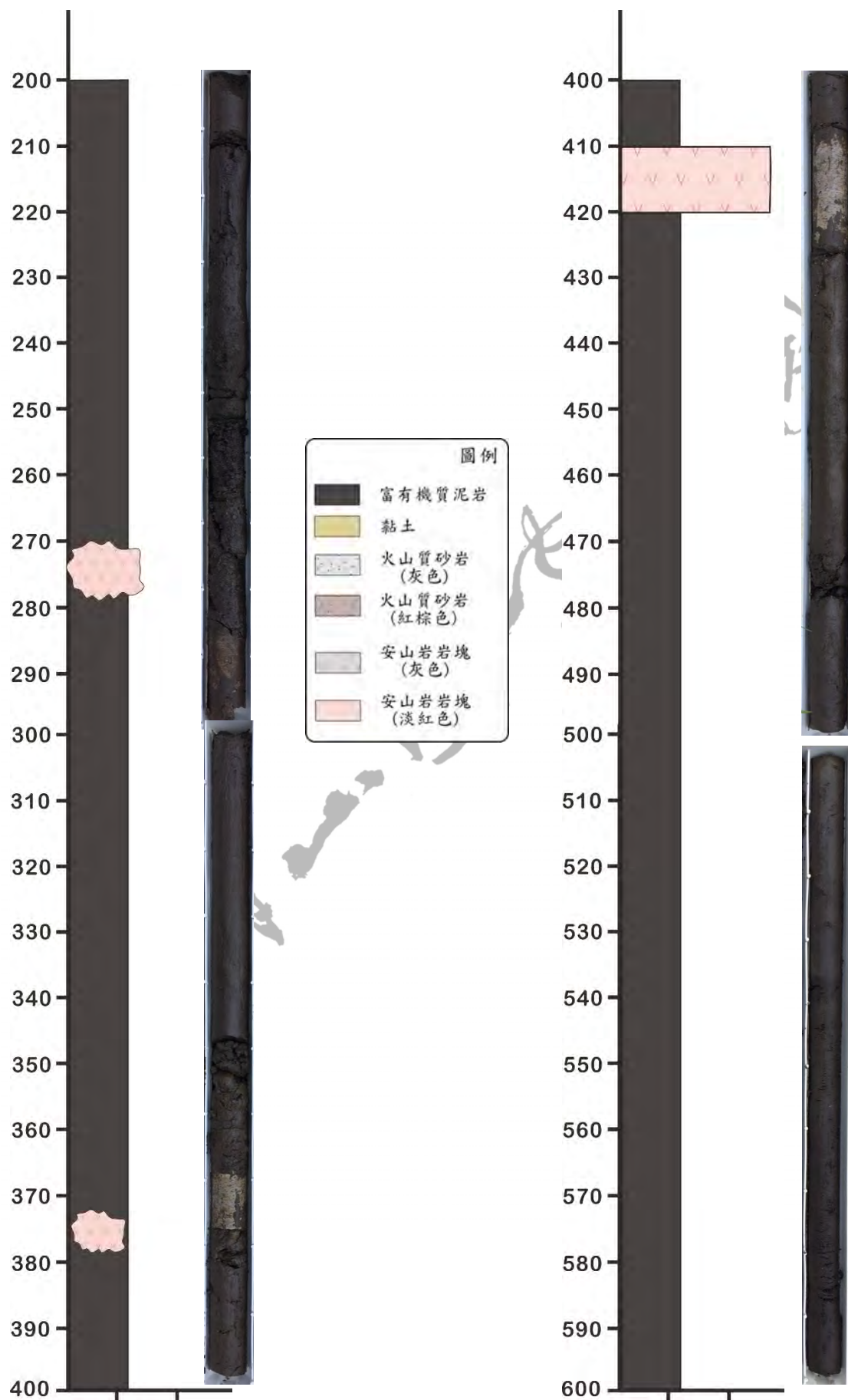


圖 4-170：↑Site6-1 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-171：↑→ Site6-1 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

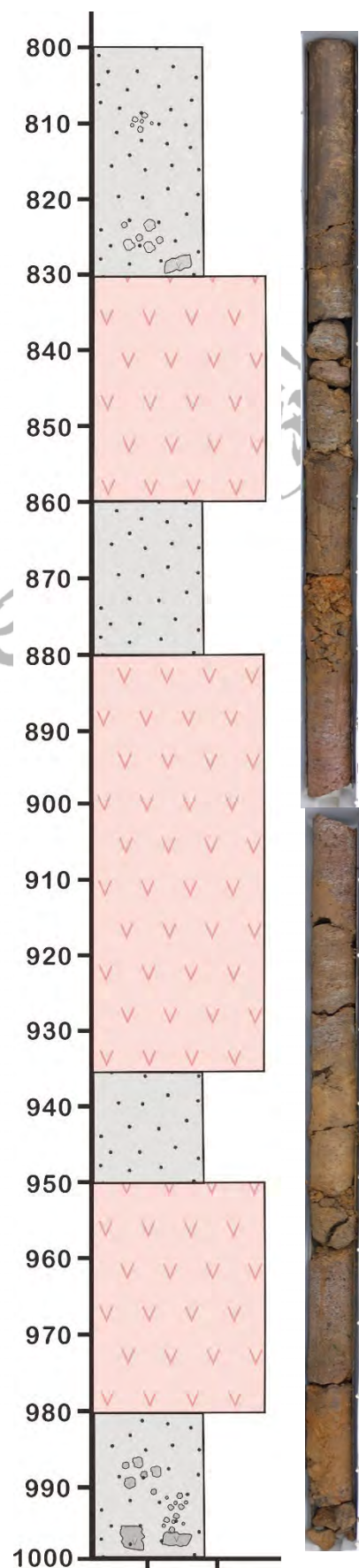
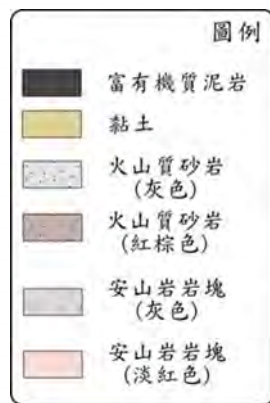


圖 4-172：↑Site6-1 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-173：↑→ Site6-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-4、Site6-2

Site6-2 的鑽探深度為 10m，概略來看如同 Site6-1 可依照岩相分為兩段，首先(1)0-7.58m 為泥岩偶夾安山岩岩塊，(2)7.58-10.0m 為火山質砂岩混夾安山岩岩塊，岩相產狀變化、細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-174)。

0-7.58m 為含有機質的深黑色泥岩，偶夾大小不均的安山岩岩塊(圖 4-175~圖 4-178)。其中 4.7-4.8m&6.8-7.0m 處夾有大魚 10cm 的安山岩岩塊，在 1-2m 處則夾有粗砂至礫大小的安山岩碎屑。

7.58-10.0m 則為淘選度差的火山質砂岩偶夾安山岩岩塊(圖 4-178~圖 4-179)。火山質砂岩顏色多為淺黃色，所夾的安山岩岩塊多為灰色且表面可見輝石斑晶。較為特殊之處則為於 8.2m 處可以見到一層近 5cm 的泥岩層。

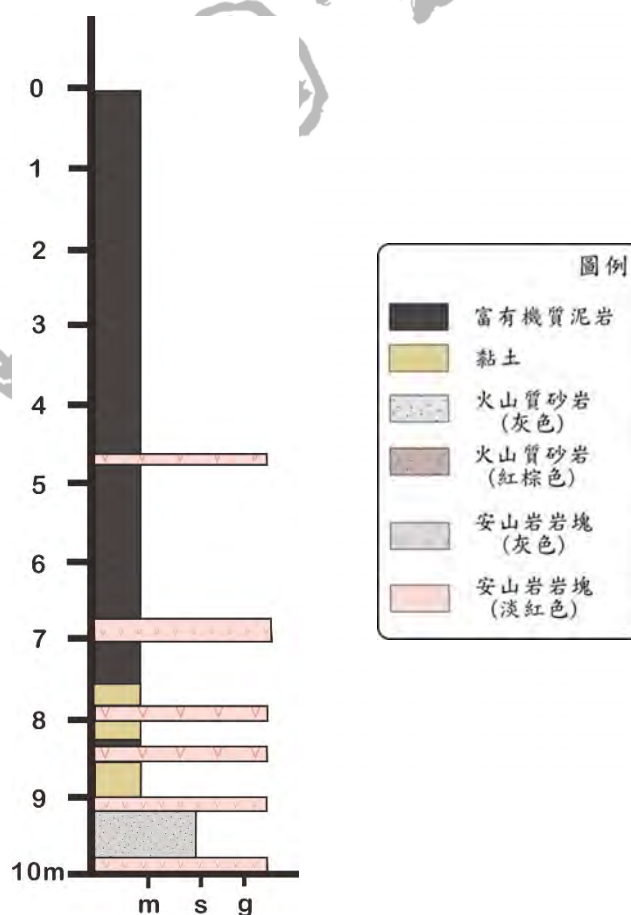


圖 4-174： Site6-2 0-10m 岩芯柱狀圖。

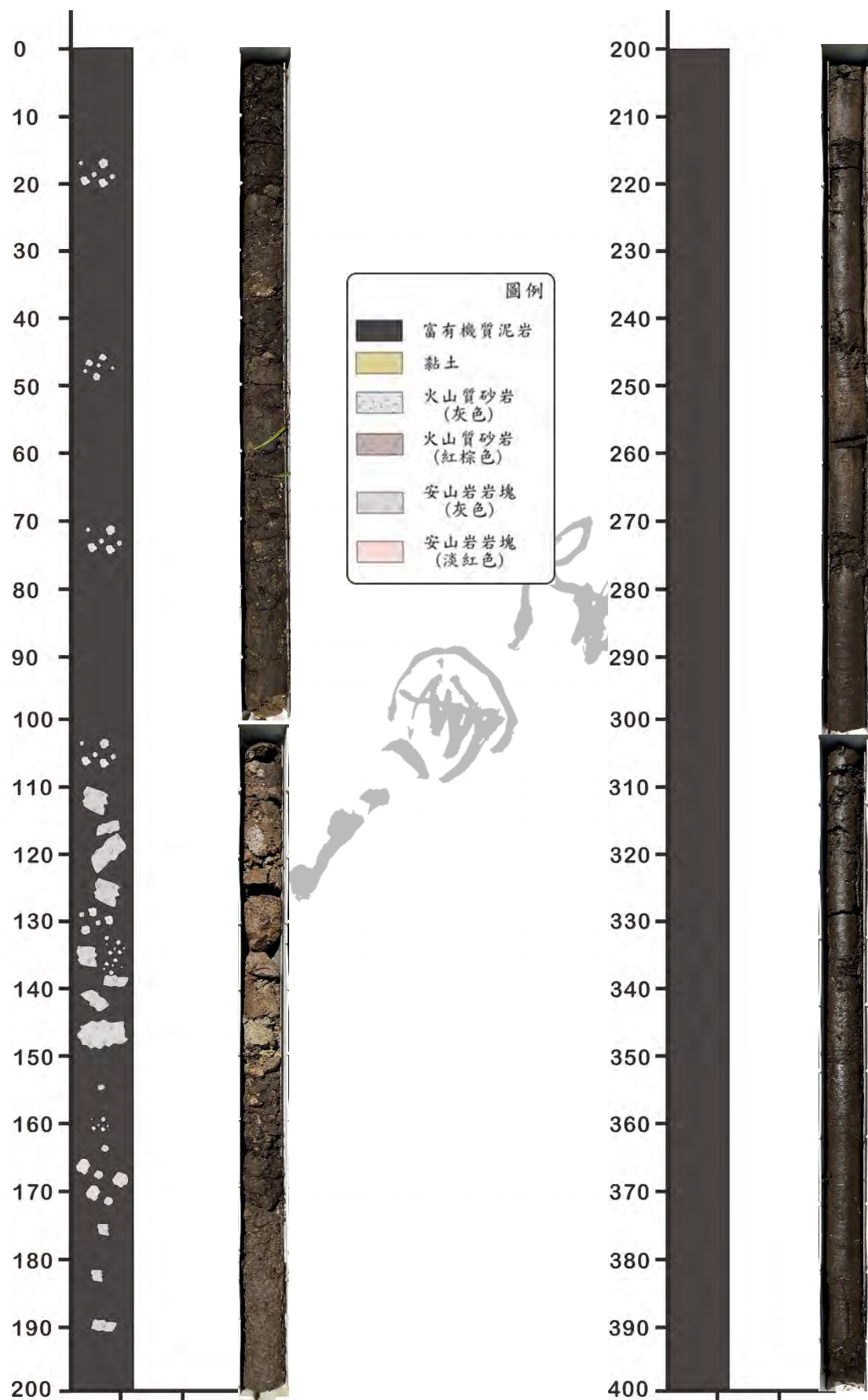


圖 4-175：↑Site6-2 0-2m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-176：↑→Site6-2 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

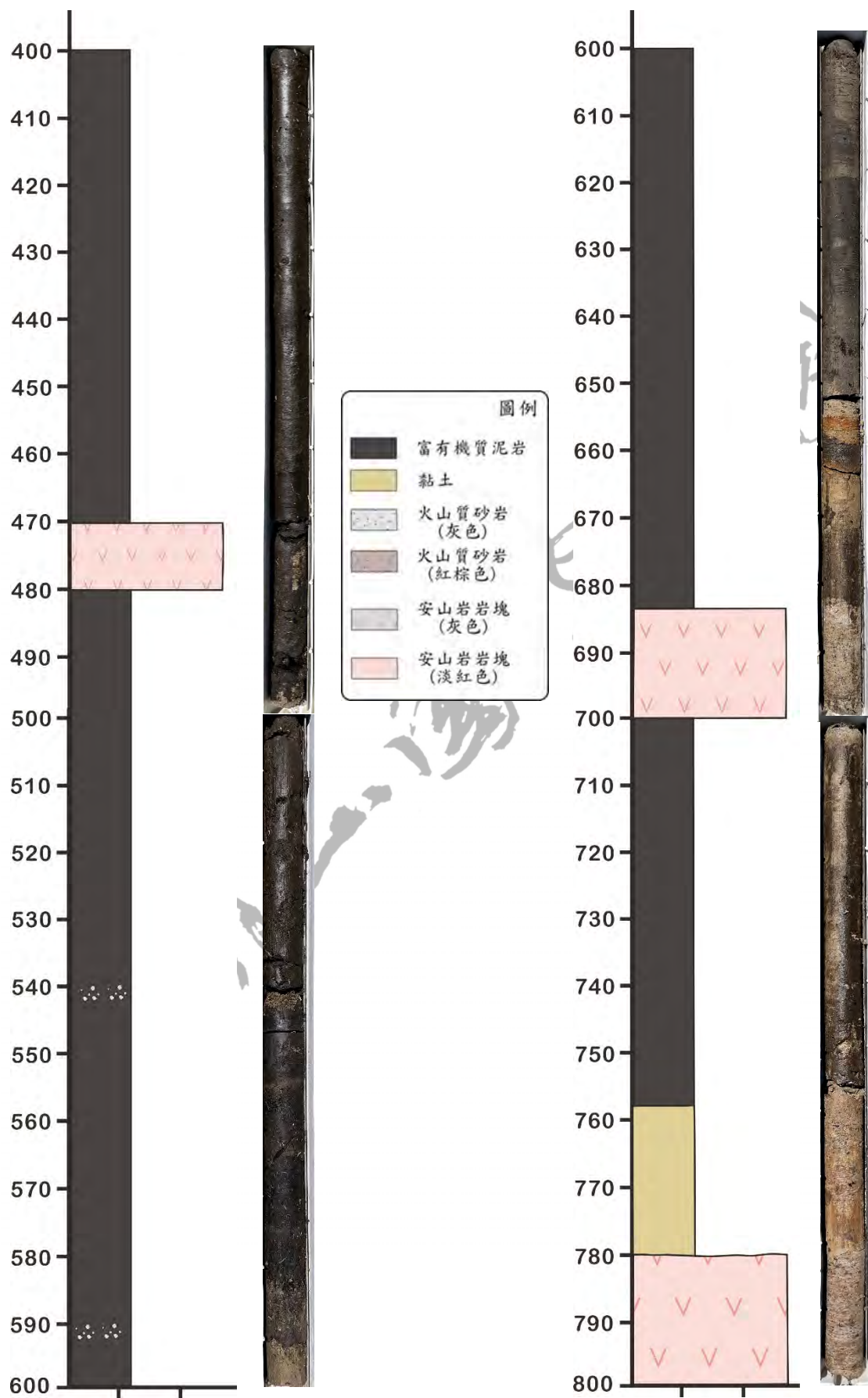


圖 4-177：↑Site6-2 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-178：↑→Site6-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

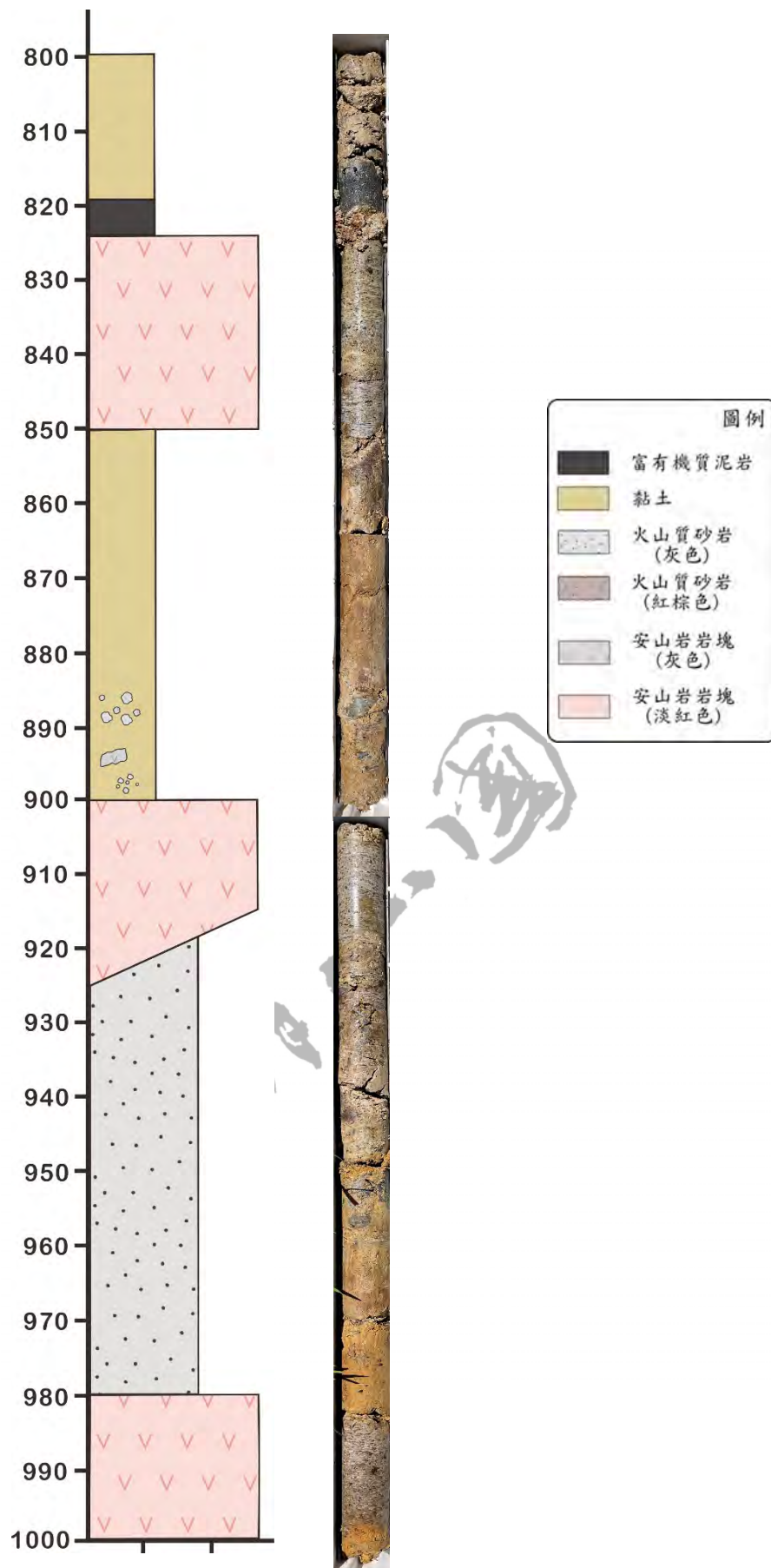


圖 4-179：↑Site6-2 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-5、Site7-1

Site7-1 的鑽探深度總深為 10m。0-7.0m 為泥岩，7.0-10.0m 為火山質砂岩偶夾安山岩塊，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-180)。

0-7.0m 為含有機質的黑色至淺灰色泥岩(圖 4-181~圖 4-184)，深度 5.35-5.5m 處夾有 15cm 厚的灰色安山岩岩塊，表面可見輝石斑晶；5.4&5.9m 處可見粗砂至礫石大小的火山岩岩屑夾於泥岩之中。本段泥岩從 5.55m 處開始由深黑色轉為淺灰色，反應此深度之後泥岩之中的有機碳含量減少。

7.0m-10.0m 為棕色至黃色淘選度差的火山質砂岩(圖 4-184~圖 4-185)，偶夾粒徑大小不均，顏色不同的安山岩岩塊為主要的產狀特徵。其中安山岩岩塊可見深灰色、灰色、紅色，且於本井位的 8.0-9.0m 處最為富集。

根據上述的產狀特徵，0-7.0 可能為一個比較封閉的凹地(安靜沉積環境)或沼澤，偶爾接收凹地周圍邊坡所崩落的安山岩岩塊。7.0-10.0m 則顯示為不同濃度的火山泥流崩積物。

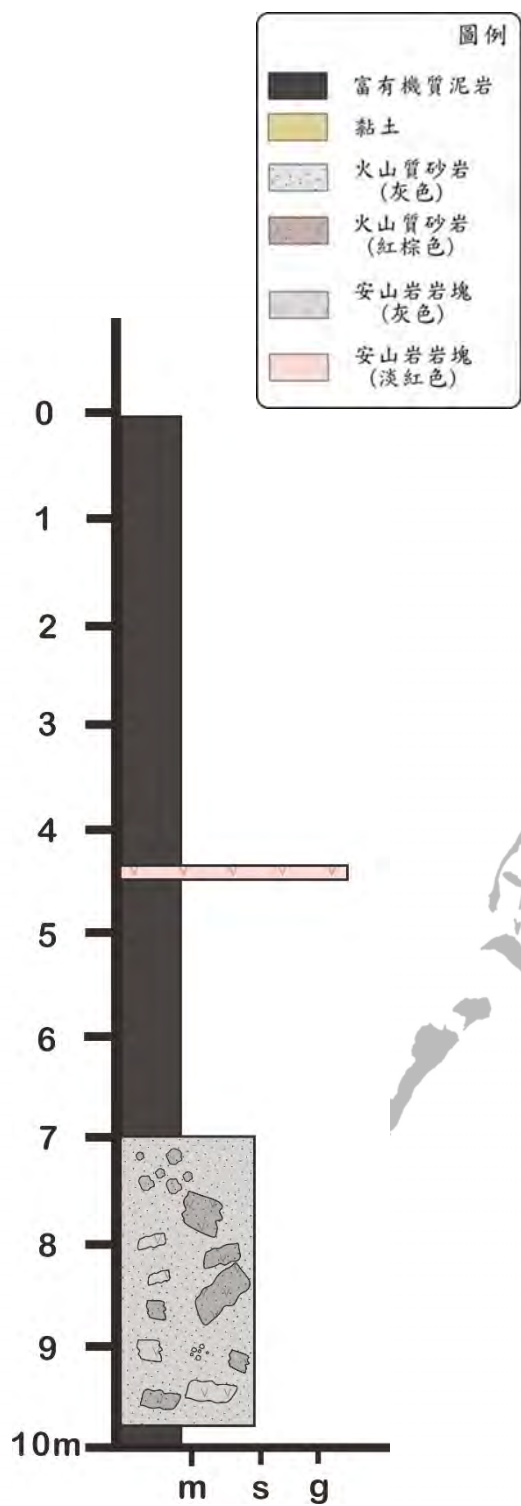
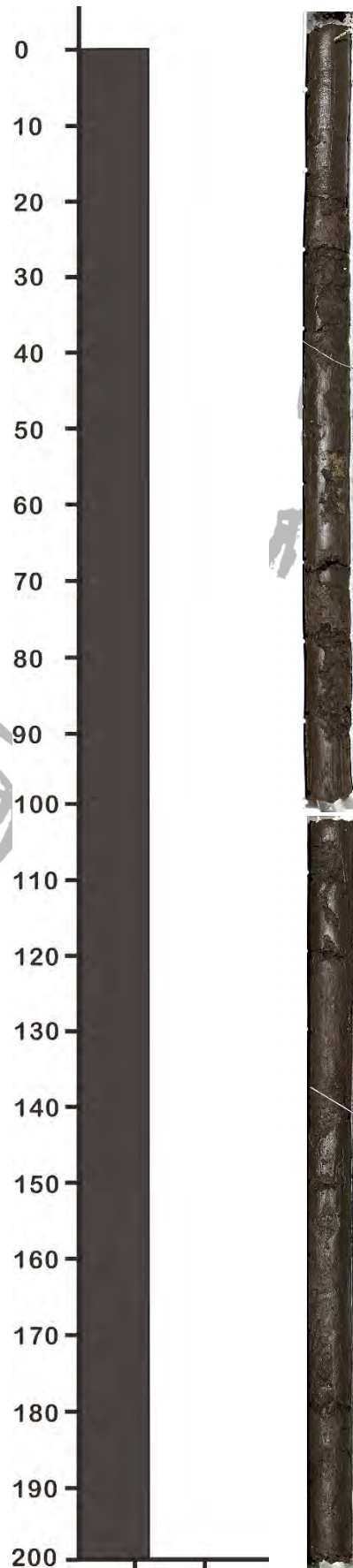


圖 4-180：↑Site7-1 0-10m 岩芯柱狀圖。

圖 4-181：→Site7-1 0-2m 細部岩芯柱狀圖。



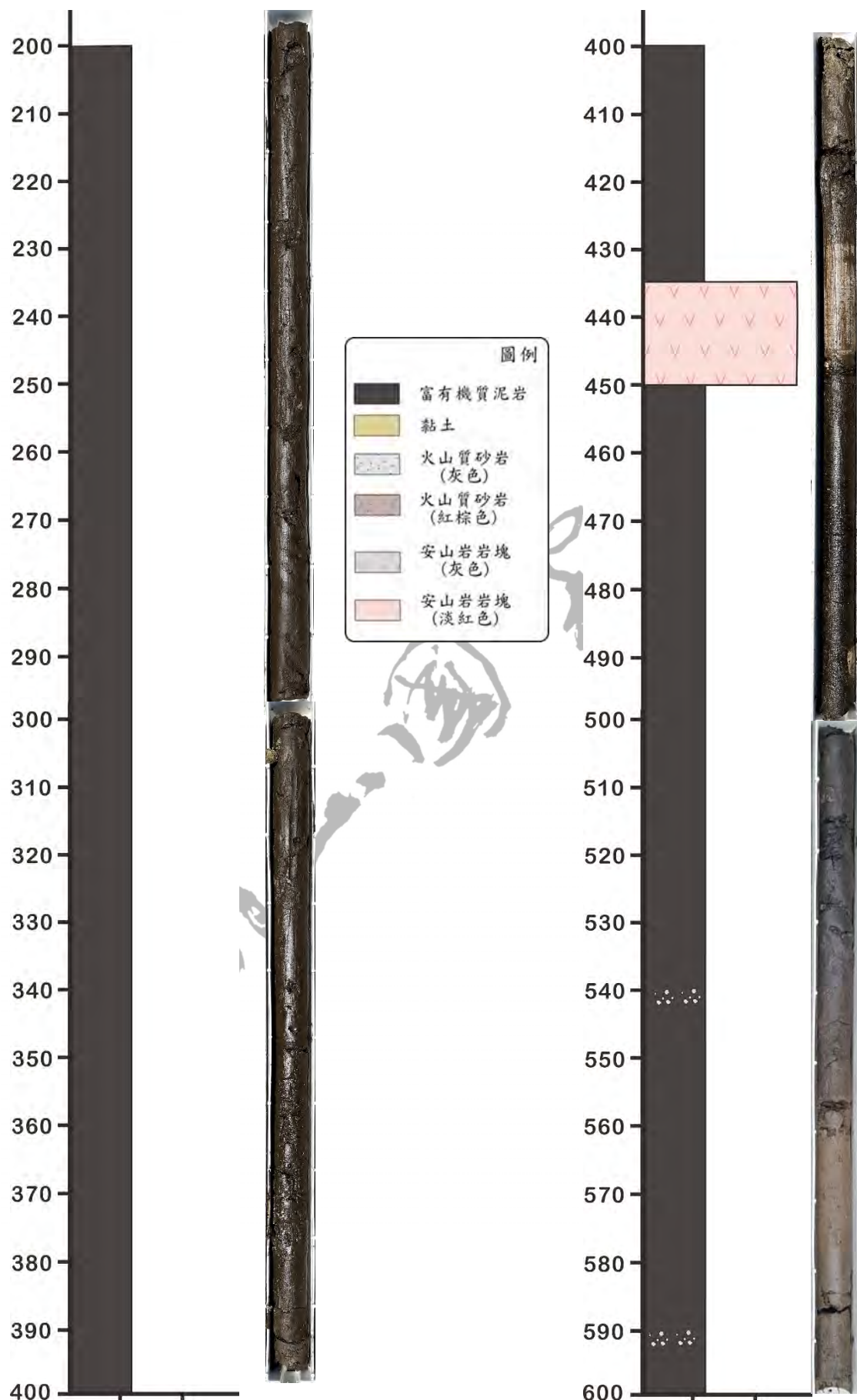


圖 4-182：↑Site7-1 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-183：→Site7-1 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

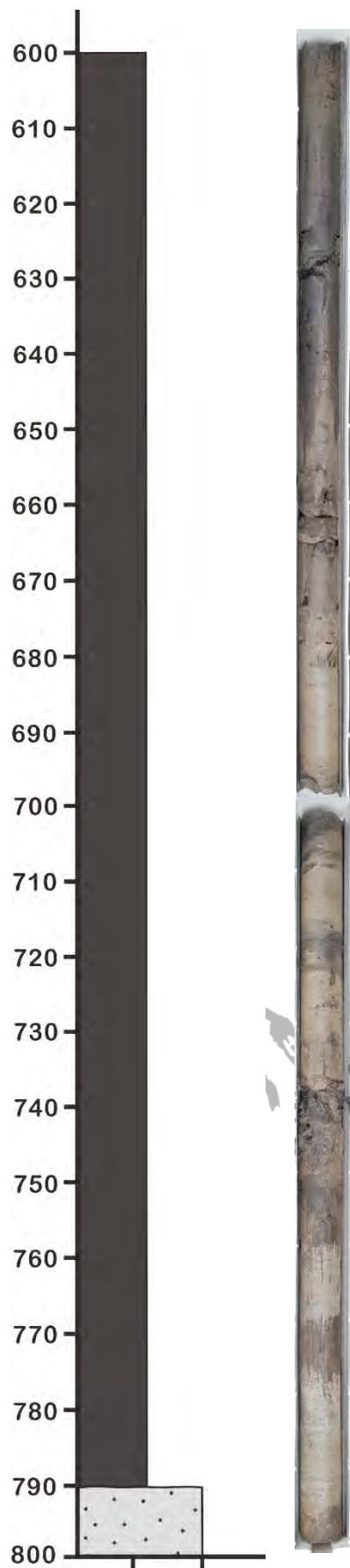


圖 4-184：↑Site7-1 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

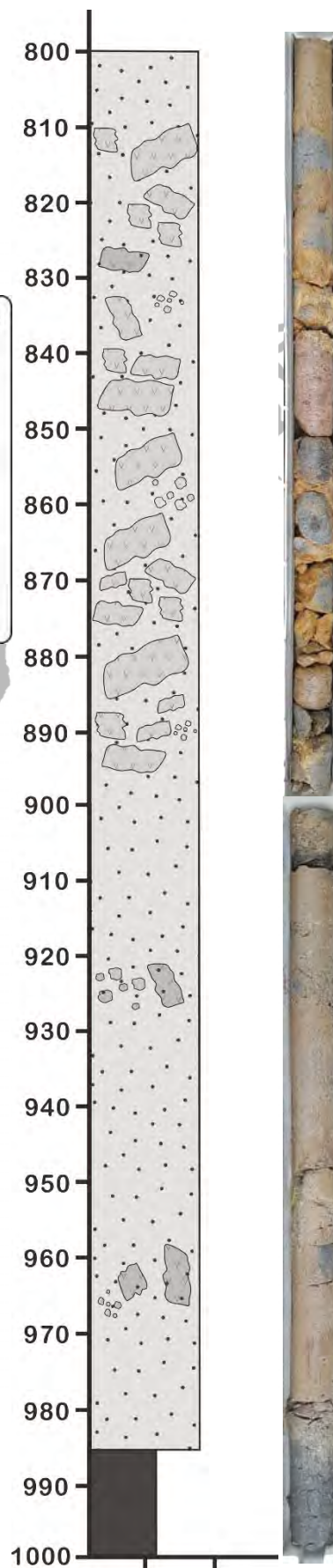
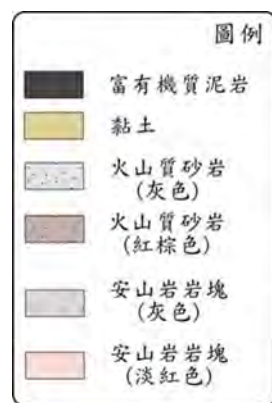


圖 4-185：→Site7-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-6、Site7-2

Site7-2 的總鑽探深度為 10m，全段多以泥岩為主，僅於 7.4-8.0m&9.1-9.6m 為火山質砂岩偶夾安山岩岩塊(圖 4-186)。

0-10.0m 為棕色至深黑色的泥岩(圖 4-187~圖 4-191)，於 7.4-8.0m&9.1-9.6m 偶夾淘選度差的火山質砂岩以及大小不一的安山岩岩塊。其中 7.4-8.0M 處所夾的安山岩岩塊礫徑大小不超過 5cm，多為未嚴重風化可見輝石斑晶的安山岩岩塊。9.1-9.6m 處則以 9.1-9.4m 為受到輕微風化的黃色安山岩，下伏 20 公分厚的火山質砂岩與安山岩塊。整體而言，本井位之岩相與其它井位相比，變化較為單調。

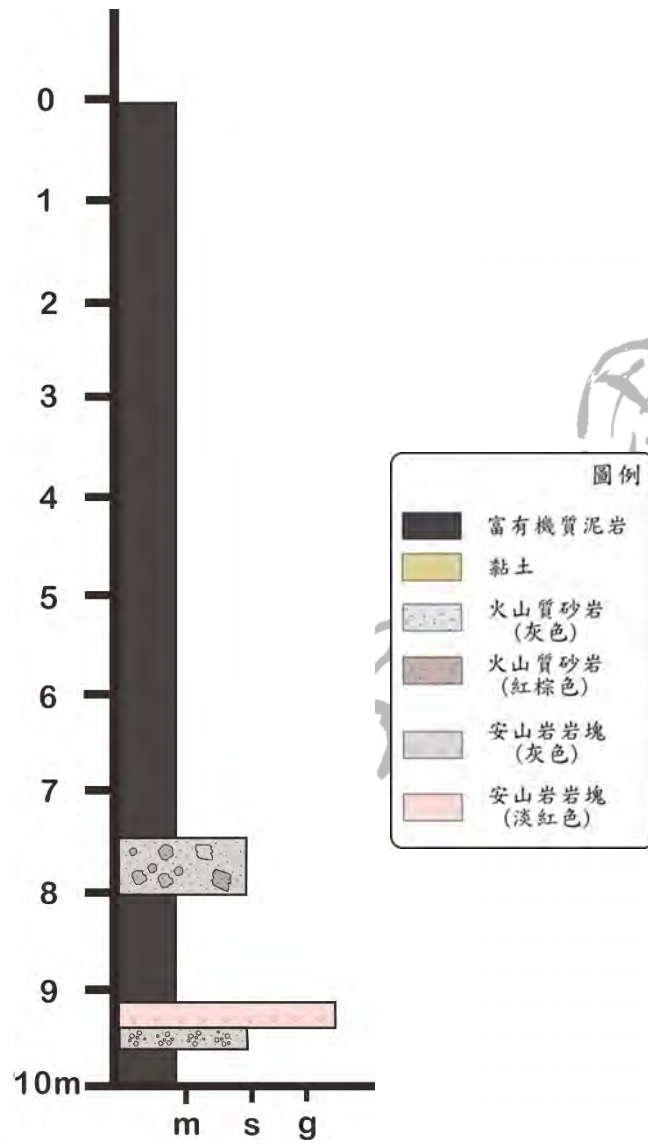


圖 4-186 : ↑Site7-2 0-10m 岩芯柱狀圖。

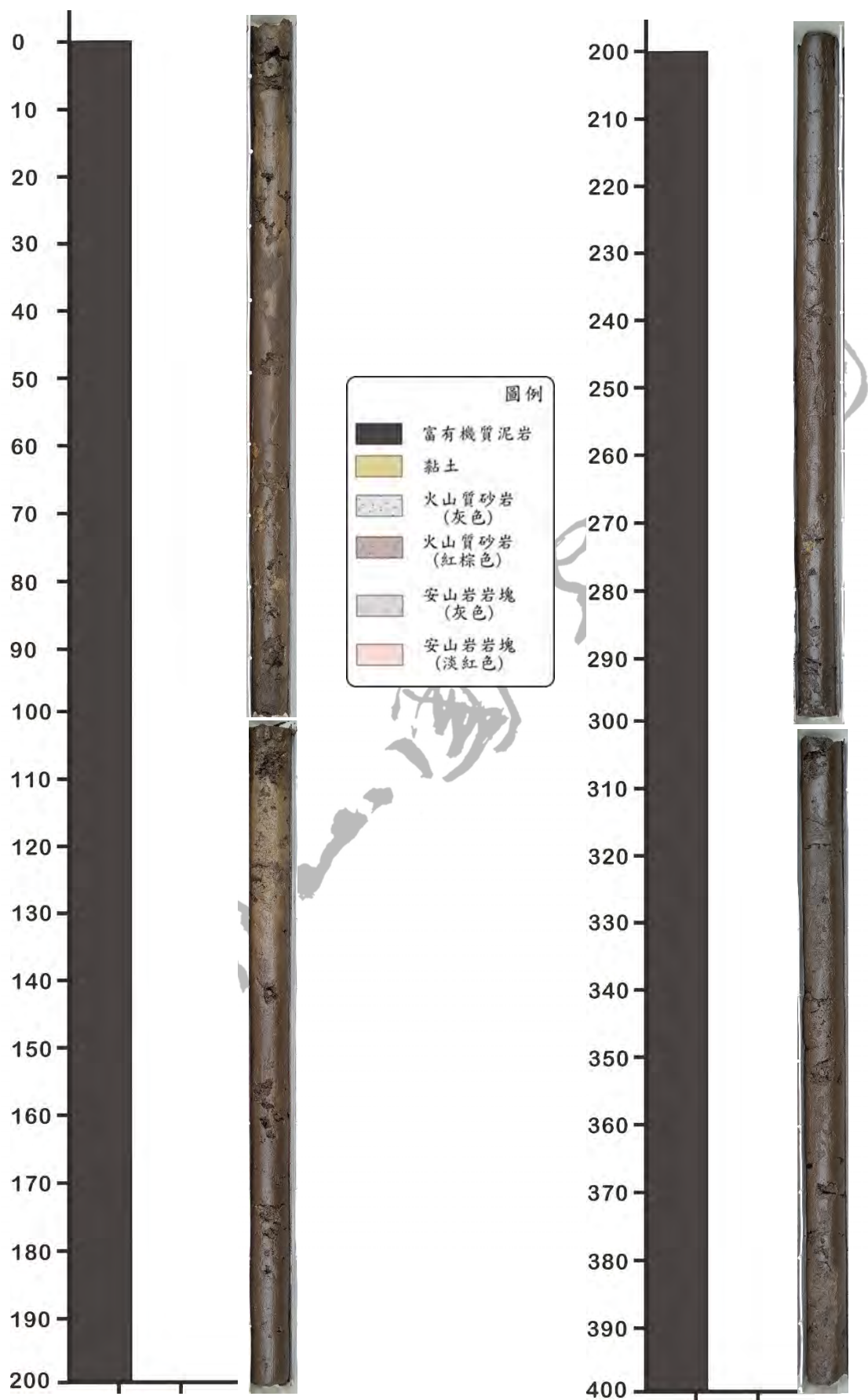


圖 4-187：↑Site7-2 0-2m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-188：↑→Site7-2 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

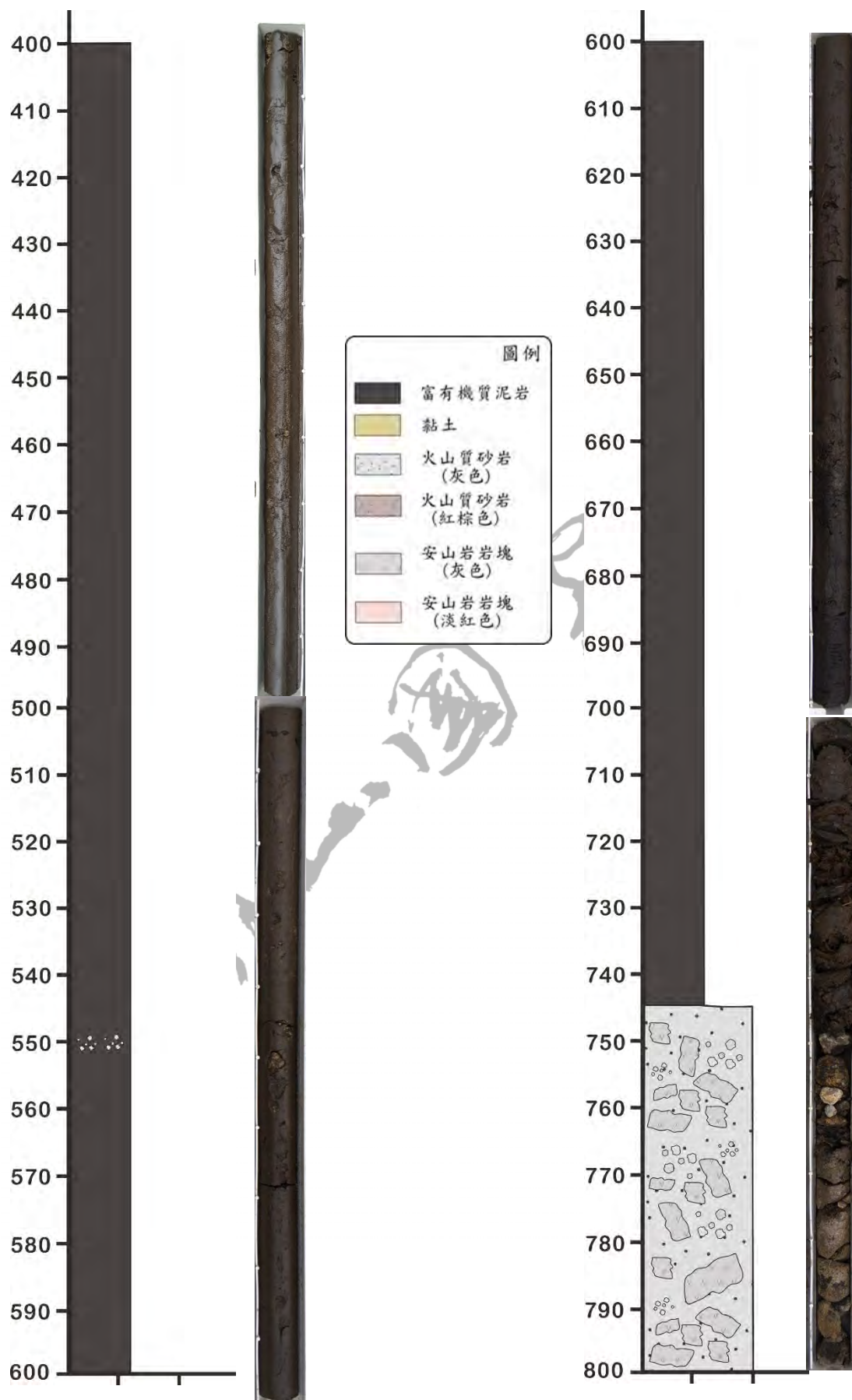


圖 4-189：↑Site7-2 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-190：↑→Site7-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

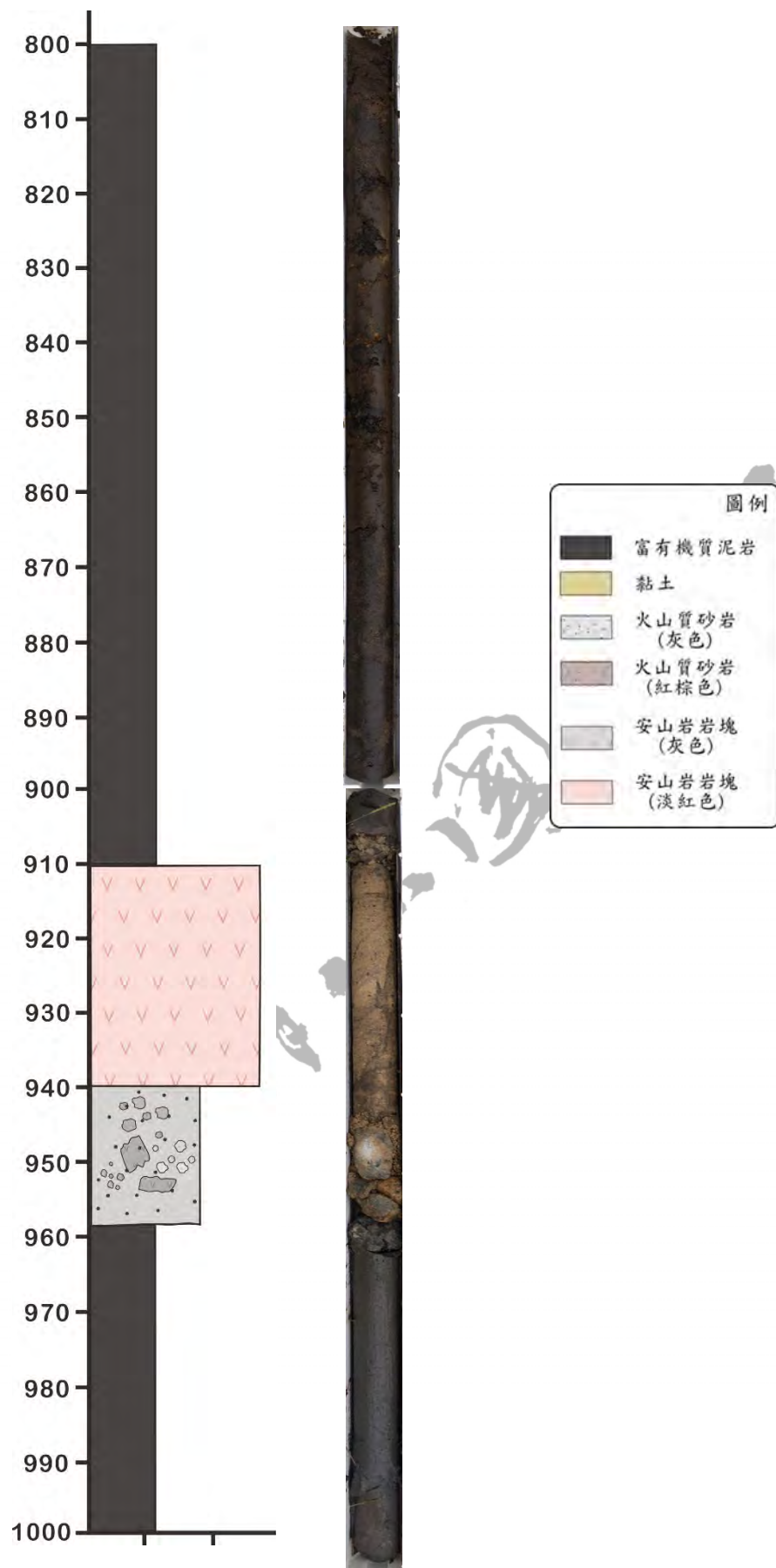


圖 4-191：↑Site7-2 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-7、Site8-1

Site8-1 的鑽探深度為 10m，於本井位之中可見兩個不同的岩相，分別為(1)泥岩:分佈於 0-2.2m&6.9-7.3m&8.7-9.45m，(2)火山質砂岩偶夾安山岩塊:分佈於 2.2-6.9m&7.3-8.7m&9.45-10.0m，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-192)。

0-2.2m&6.9-7.3m&8.7-9.45m 為深黑色的泥岩，並未見混夾有火山質砂於其(圖 4-192~圖 4-196)中。火山質砂岩偶夾安山岩塊則分佈於 2.2-6.9m&7.3-8.7m&9.45-10.0m 之中，其中砂岩呈現淘選度差、基質支持的產狀特徵。所夾有之安山岩岩塊除 8.0-8.7m 處礫徑有超過 10 公分者，其它深度所見之間夾安山岩塊礫徑皆小於五公分(圖 4-192~圖 4-196)。本段較為特殊之處為 9.7-9.8m 處可見火山質差岩間夾泥岩岩塊於其中(圖 4-1956)。

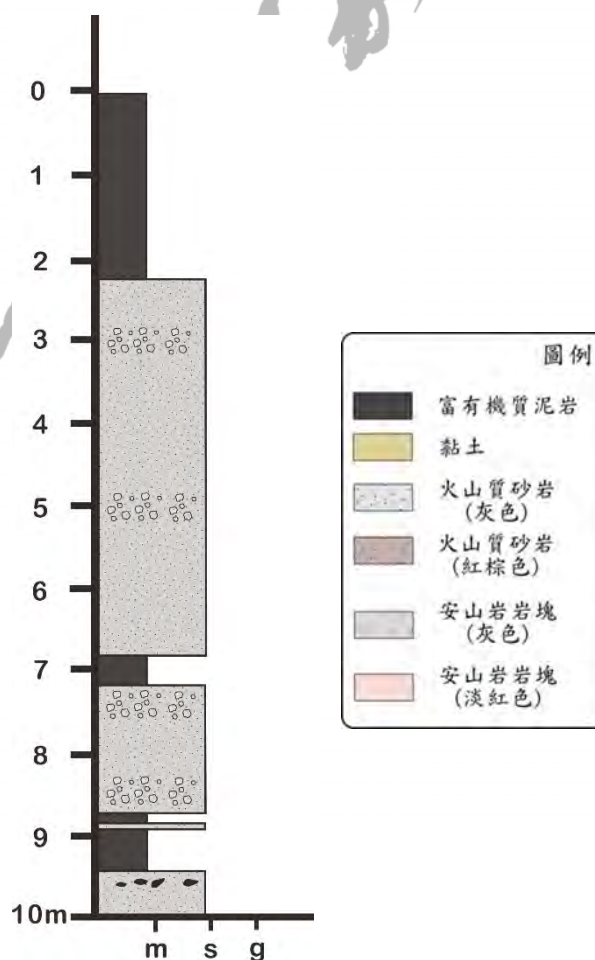


圖 4-192：↑Site8-1 0-10m 岩芯柱狀圖。

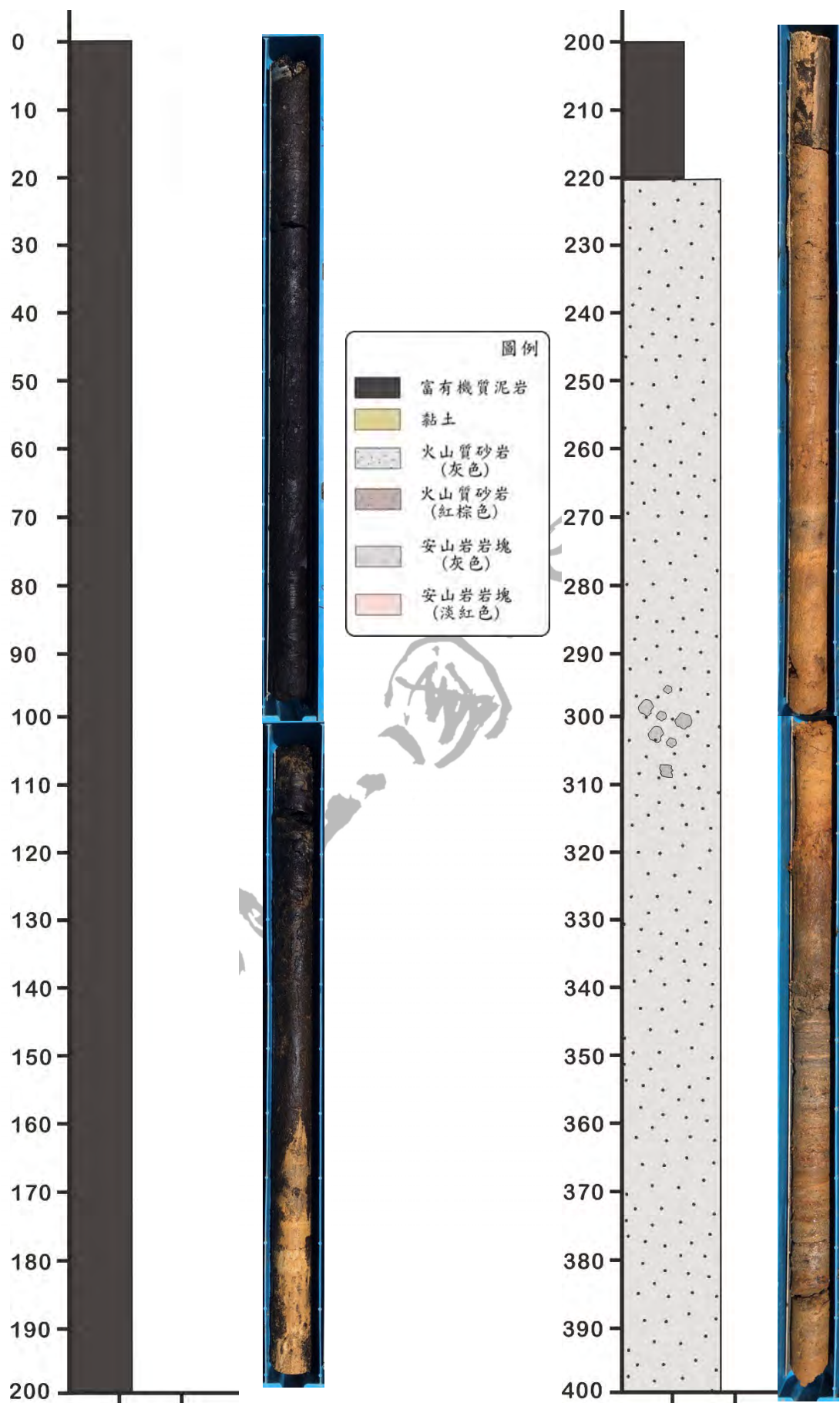


圖 4-193：↑Site8-1 0-2m 細部岩芯柱狀圖

圖 4-194：↑→Site8-1 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

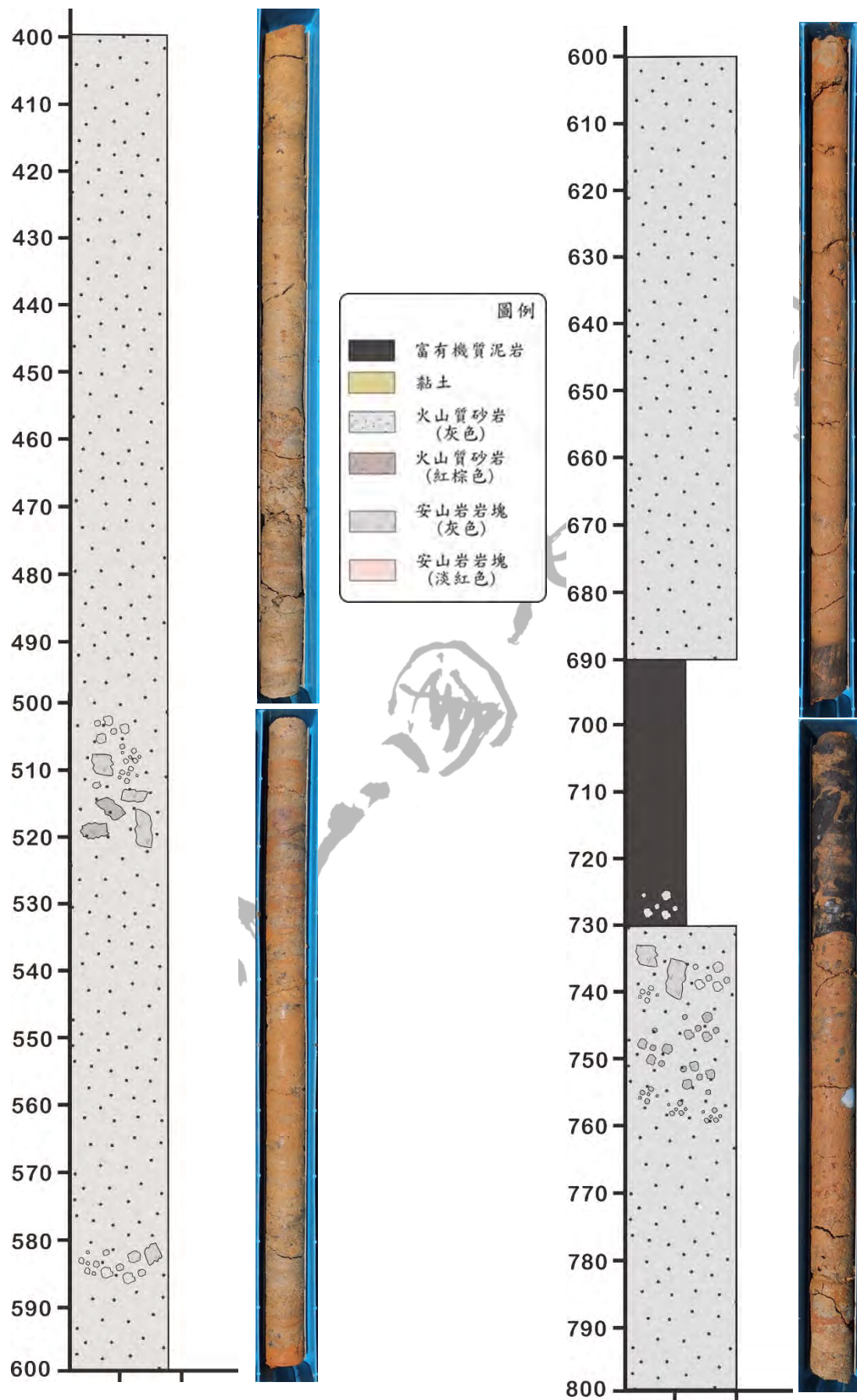


圖 4-195：↑Site8-1 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-196：↑Site8-1 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

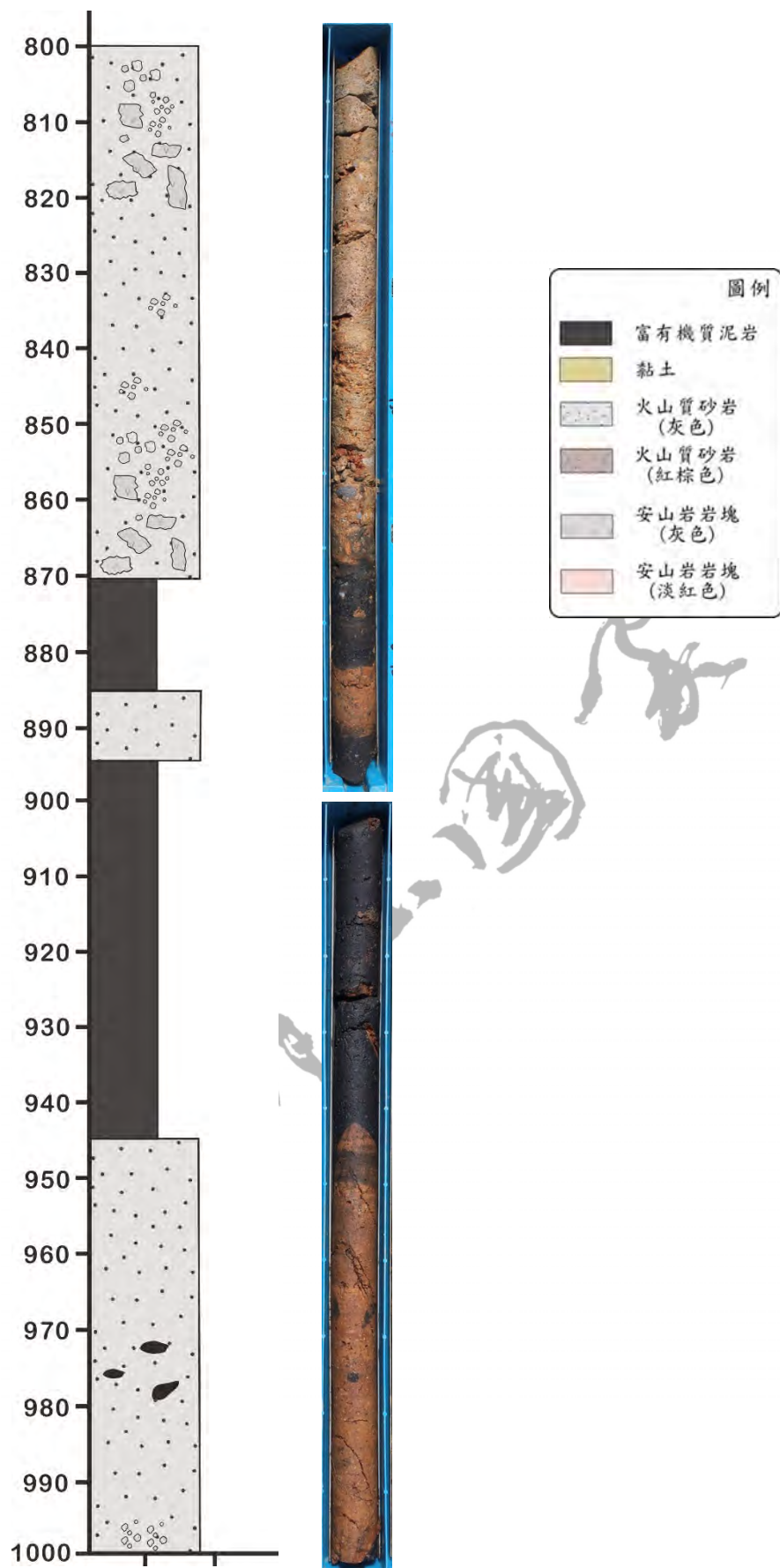


圖 4-197：↑Site8-1 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

3-8、Site8-2

Site8-2 的鑽探深度為本年度鑽探計畫之中深度最深的井位，其鑽探總深度為 21m。本井位之岩芯顯示，可劃分為三個不同的岩相，分別為(1)泥岩、(2)棕至黃色火山質砂岩偶夾安山岩塊、(3)黑色火山質砂岩偶夾安山岩塊，產狀細節描述與深度位置於後詳述(圖 4-198)。

(1)深黑色富含有機質的泥岩分佈於 0-1.2m&4.65-5.7m&7.5-18m 之岩段，並混夾有火山質砂以及安山岩塊於岩段之中(圖 4-199~圖 4-208)。(2)棕至黃色火山質砂岩偶夾安山岩塊則分佈於 1.2-4.65m&5.7-7.5m 岩段之中，火山質砂岩呈現淘選度差、基質支持的產狀特徵；夾有之安山岩岩塊少見礫徑有超過 5 公分者(圖 4-199~圖 4-207)。1.2-3.6m 之間的火山質砂岩顏色由淺黃轉至棕黃(3)黑色火山質砂岩偶夾安山岩塊分佈於 18-20m 之間，其淘選度為中等至差，並於 20.3-20.6m 處夾有超過 30 公分大的安山岩岩塊(圖 4-208~圖 4-209)，其餘深度安山岩岩塊大小不均，並呈現次角狀至次圓狀的外型。

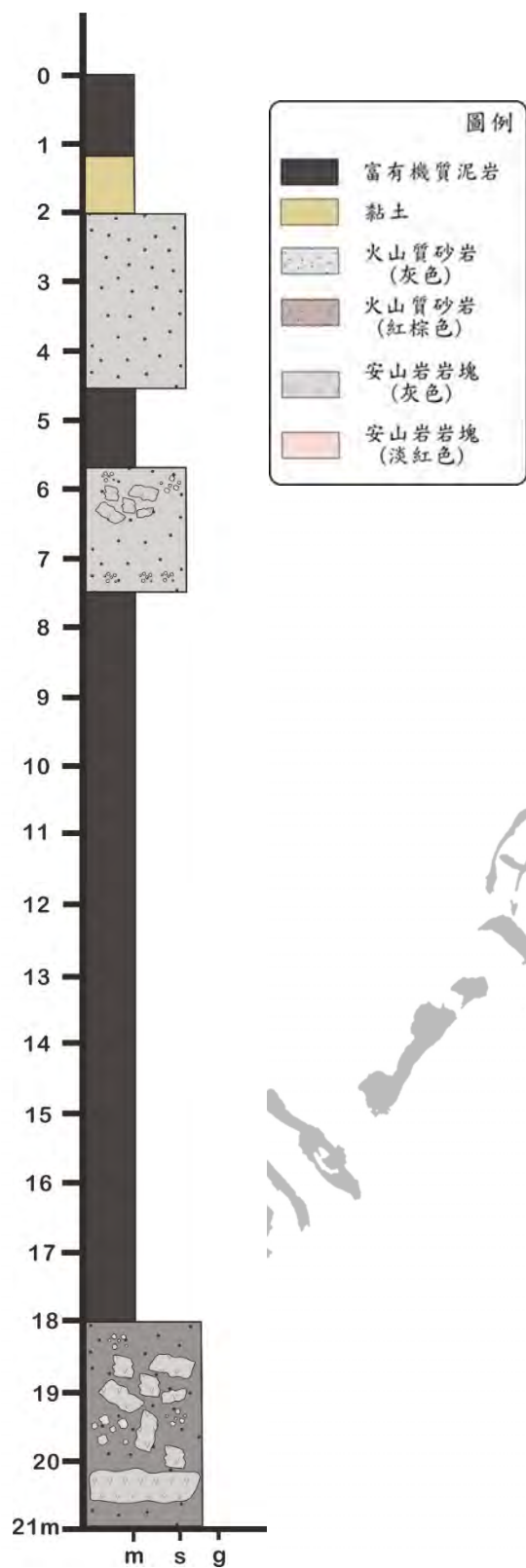


圖 4-198：↑Site8-2 0-21m 岩芯柱狀圖。

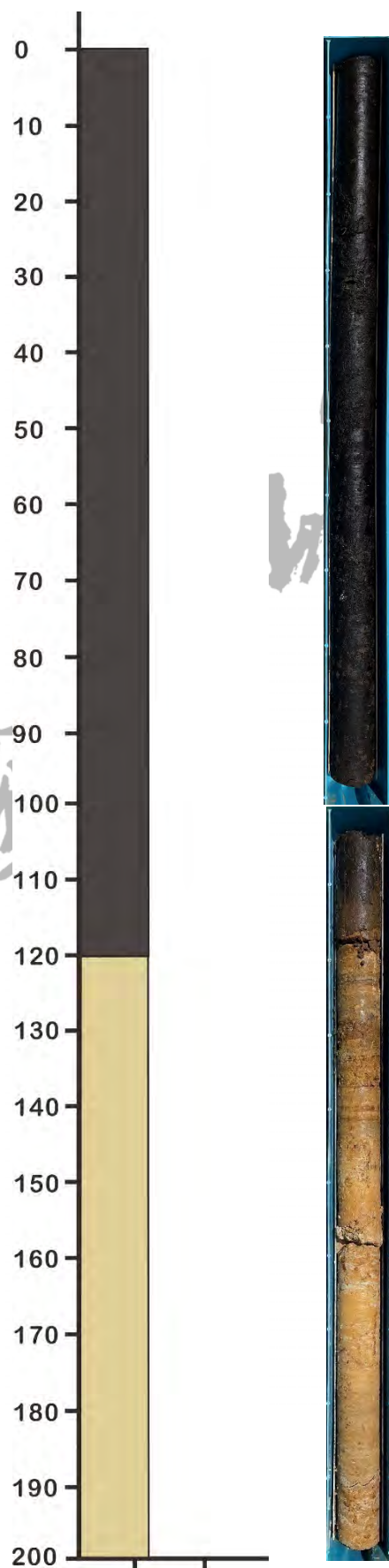


圖 4-199：↑→Site8-2 0-2m 細部岩芯柱狀圖。

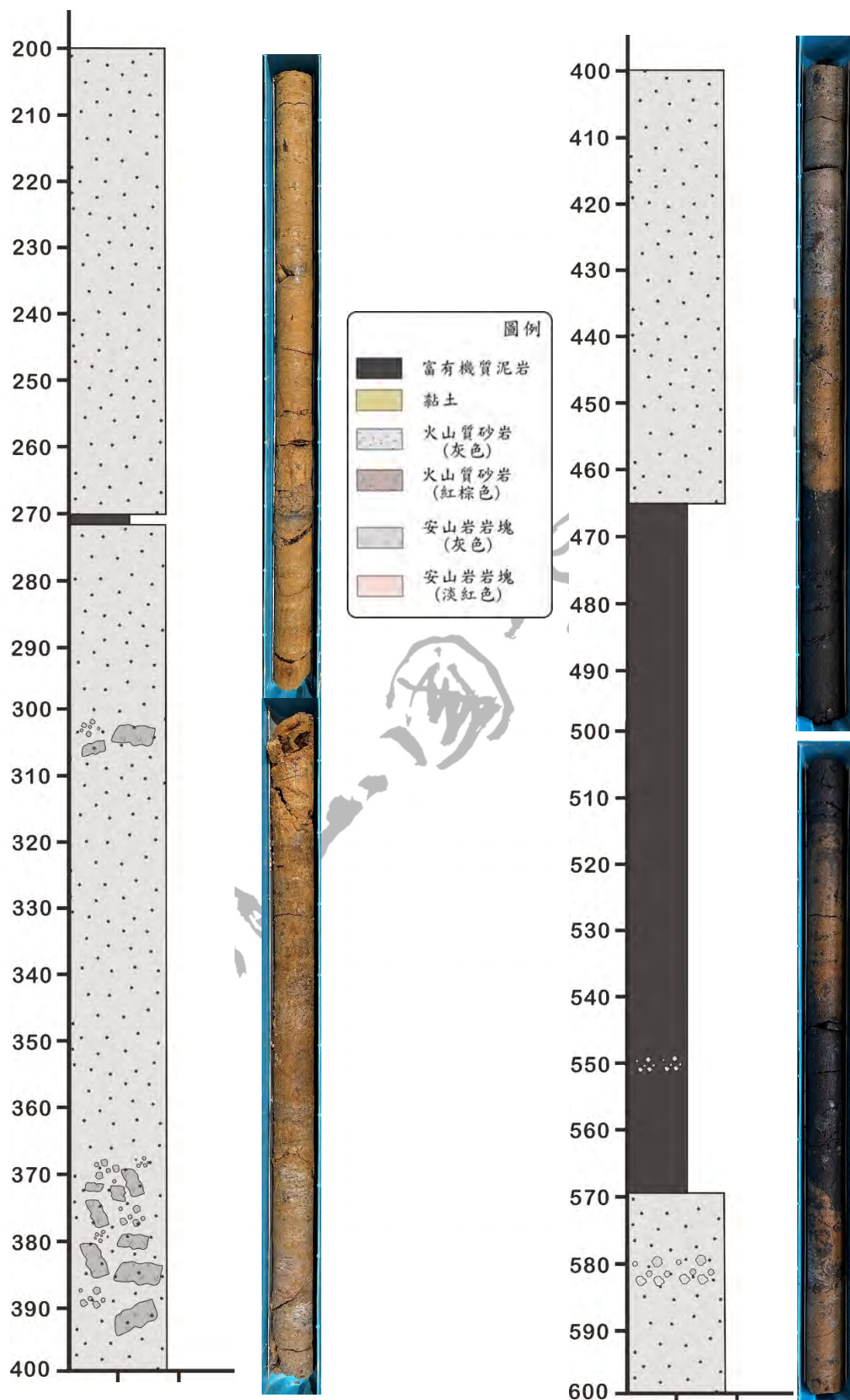


圖 4-200：↑Site8-2 2-4m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-201：↑→Site8-2 4-6m 細部岩芯柱狀圖。

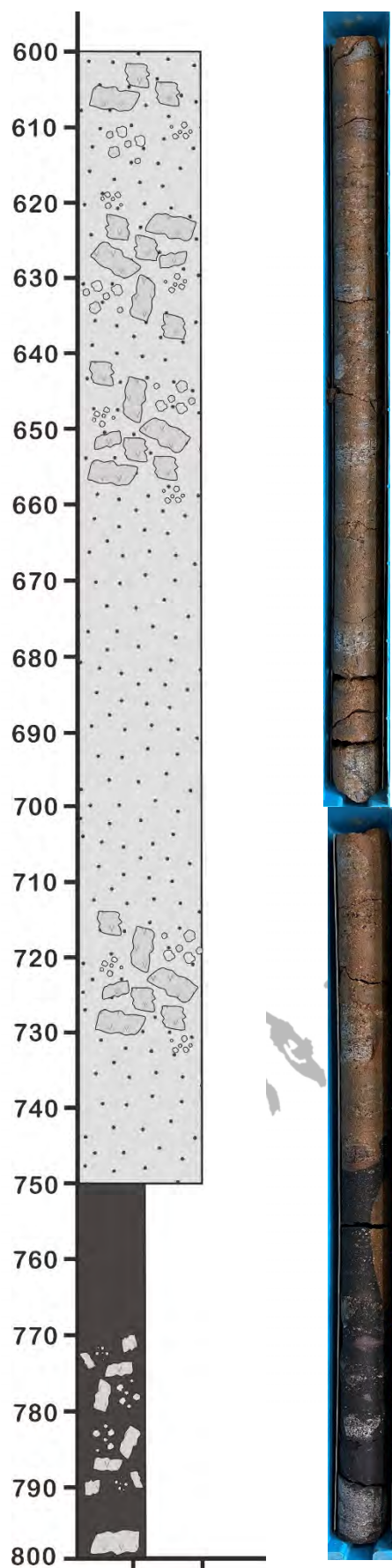


圖 4-203：↑ Site8-2 6-8m 細部岩芯柱狀圖。

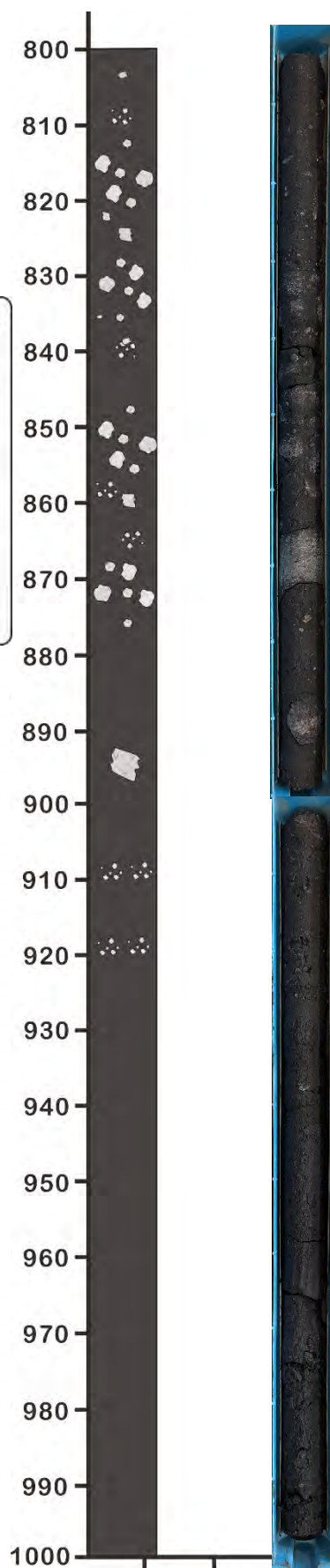


圖 4-202：↑→ Site8-2 8-10m 細部岩芯柱狀圖。

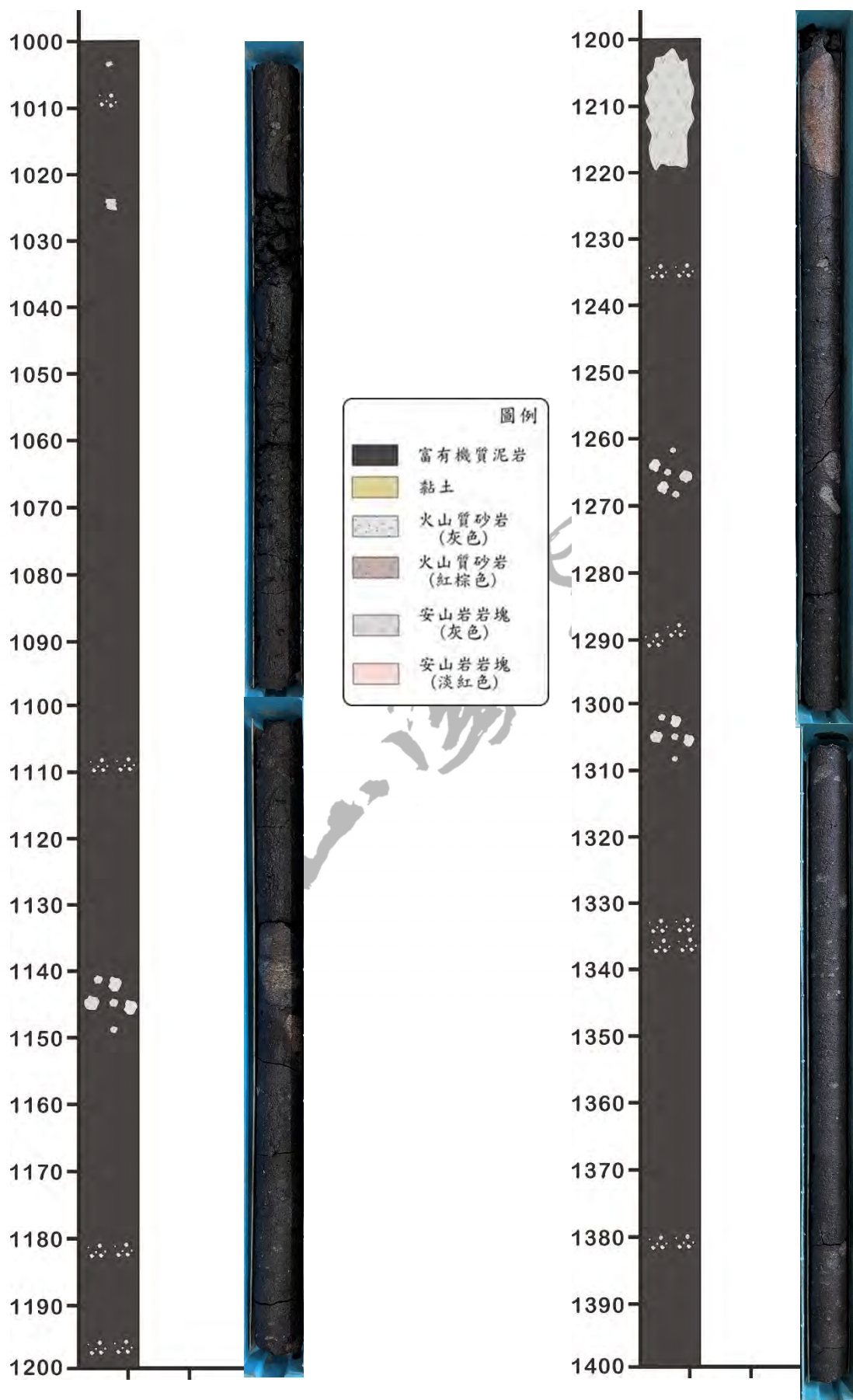


圖 4-204：↑Site8-2 10-12m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-205：↑→Site8-2 12-14m 細部岩芯柱狀圖。



圖 4-206：↑Site8-2 14-16m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-207：↑→Site8-2 16-18m 細部岩芯柱狀圖。

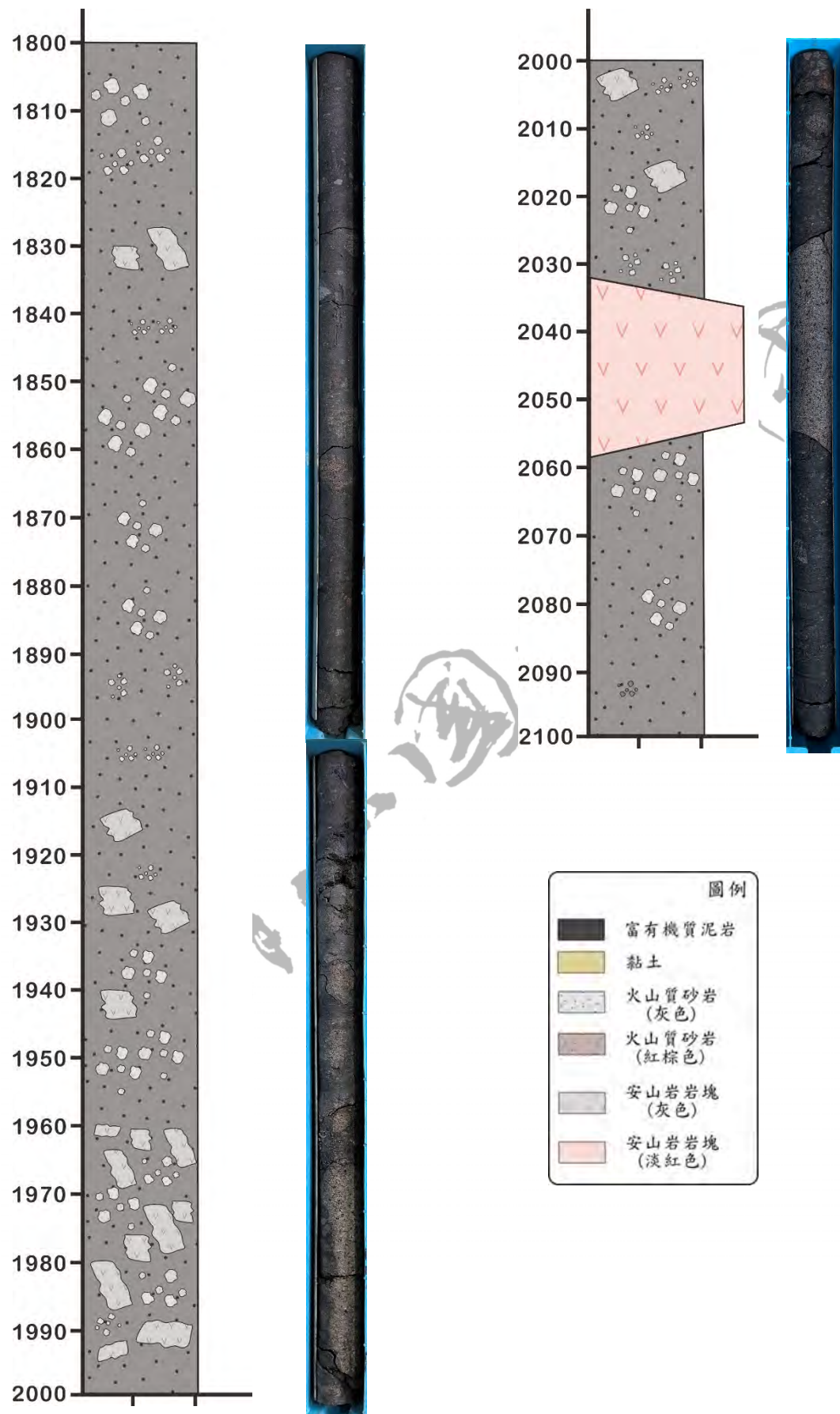


圖 4-208：↑Site8-2 18-20m 細部岩芯柱狀圖。

圖 4-209：↑→Site8-2 20-21m 細部岩芯柱狀圖。

4、岩芯沉積物分析

為進一步探究七星山東側的張烈帶爆裂口之中的沉積物是否有紀錄都週圍的地質活動紀錄，因此使用 MSCL 多重感測分析儀，針對本年度計畫各站位之岩芯進行磁感率(Magnetic Susceptibility)、密度(Density)、孔隙率(Fractional porosity)、電阻率(Resistivity)四項物理參數的分析，希望藉由儀器敏感精準的檢測能力，補足肉眼觀察可能造成的疏漏之處，以探明岩芯之中所紀錄到的地質活動事件訊號。

本年度計畫所進行的鑽探 8 口岩芯，基於岩芯觀察之結果已知 8 口岩芯皆有鑽探到泥岩與火山質砂岩夾安山岩岩塊等岩相，未見到熔岩流層。因此本年度將岩芯全段進行 MSCL 分析，分析井位與深度如下表(表 4-18)所述：

表 4-18、MSCL 分析深度表

井位	深度	MSCL 分析深度
Site5-1	0-10m	0-10m
Site5-2	0-10m	0-10m
Site6-1	0-10m	0-10m
Site6-2	0-10m	0-10m
Site7-1	0-10m	0-10m
Site7-2	0-10m	0-10m
Site8-1	0-10m	0-10m
Site8-2	0-21m	0-21m

4-1、岩芯磁感率

磁感率的強弱受控於各岩段之岩芯中，所含的磁性與鐵鎂礦物量多寡為主要的影響原因。縱觀本研究各岩芯的分析結果，泥岩與部分火山質砂岩的磁感率數值較低，約介於 $0 \sim 200 \text{ SI} \times 10^{-5}$ (如：圖 4-210、圖 4-212、圖 4-216、圖 4-217)；若遇夾雜較為新鮮的安山岩塊，磁感率則大於 $500 \text{ SI} \times 10^{-5}$ (如圖 4-210、圖 4-211、圖 4-214)。

值得進步一探討的是部分泥岩岩段仍具有超過 $500 \text{ SI} \times 10^{-5}$ 的數值，但於岩芯觀察的過程中並未發現其夾有明顯的安山岩塊，如：Site5-1 的 0.55m & 3.3-3.5m 處(圖 4-210)、Site6-1 的 2.0-2.1m & 3.2-3.3m&4.7-4.9m & 7.0-7.3m 處圖 4-216 & 圖 4-217)、Site6-2 的 7.4-7.5m 處(圖 4-220)、Site7-1 的 3.0-3.1m & 3.8-3.9m & 6.9-7.0m 處圖 4-222 & 圖 4-223)、Site7-2 的 0.6-0.8m & 6.6-6.75m 處圖 4-225 & 圖 4-226)、Site8-1 的 1.4-1.6m&8.3m 處圖 4-228 & 圖 4-230)、Site8-2 的 1.2-1.3m & 5.1-5.2m 處需要進一步的進行沉積物分析，確認是否夾有細小的火山碎屑物或有火山灰富集。

同時本研究也觀察到部分夾雜安山岩塊岩段處，如：Site 5-1 3.2m & Site6-1 7.4-7.7m & Site 8-1 9.1-9.4m 處(圖 4-210 & 圖 4-217 & 圖 4-228)，磁感率數並未超過 500；可能的原因為安山岩岩塊受到風化作用影響，導致其含有的磁性與鐵鎂礦物減少而致使磁感率數值降低，需進一步檢視其風化狀態。

Site5-1、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

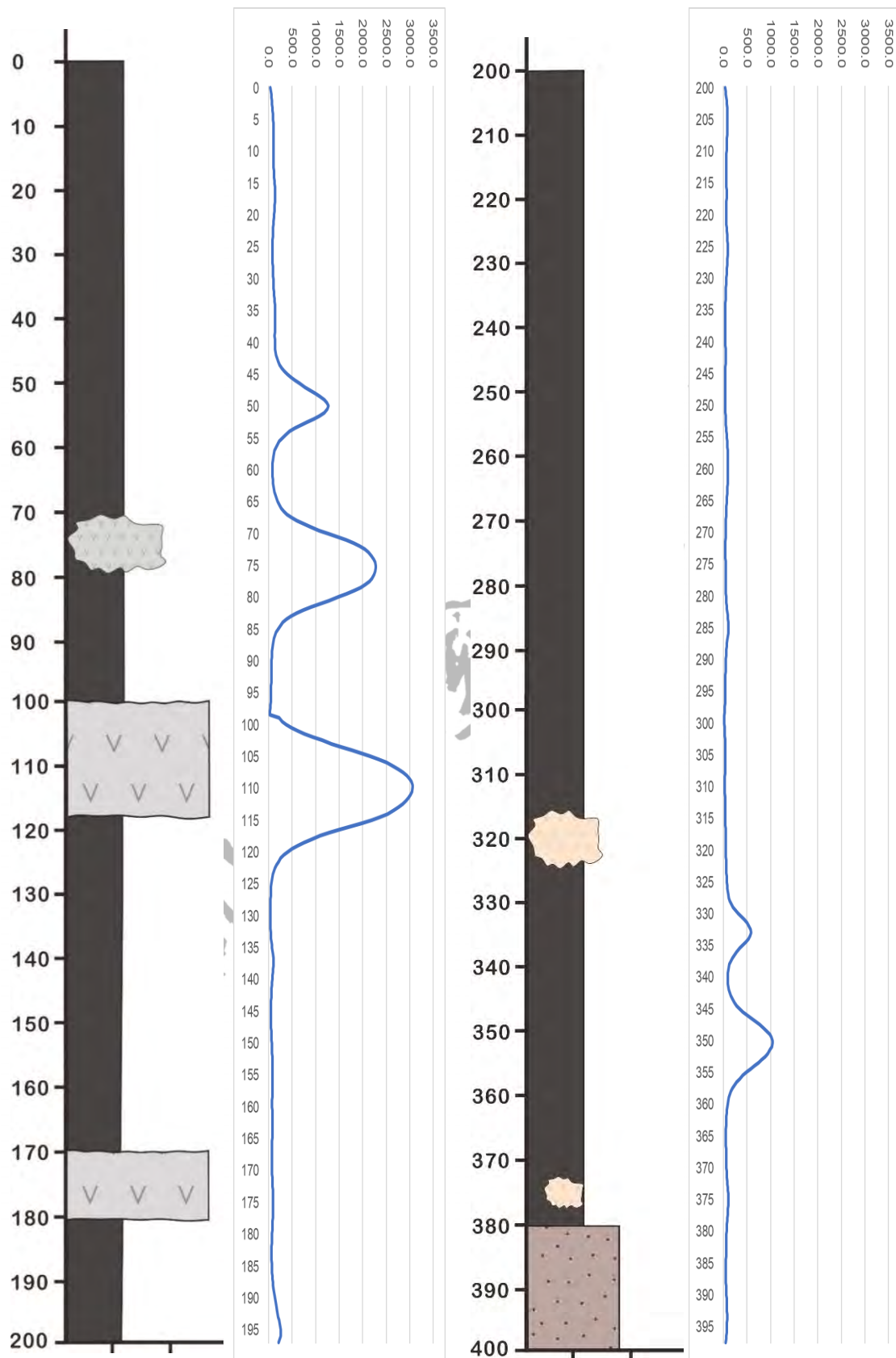


圖 4-210： Site5-1 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

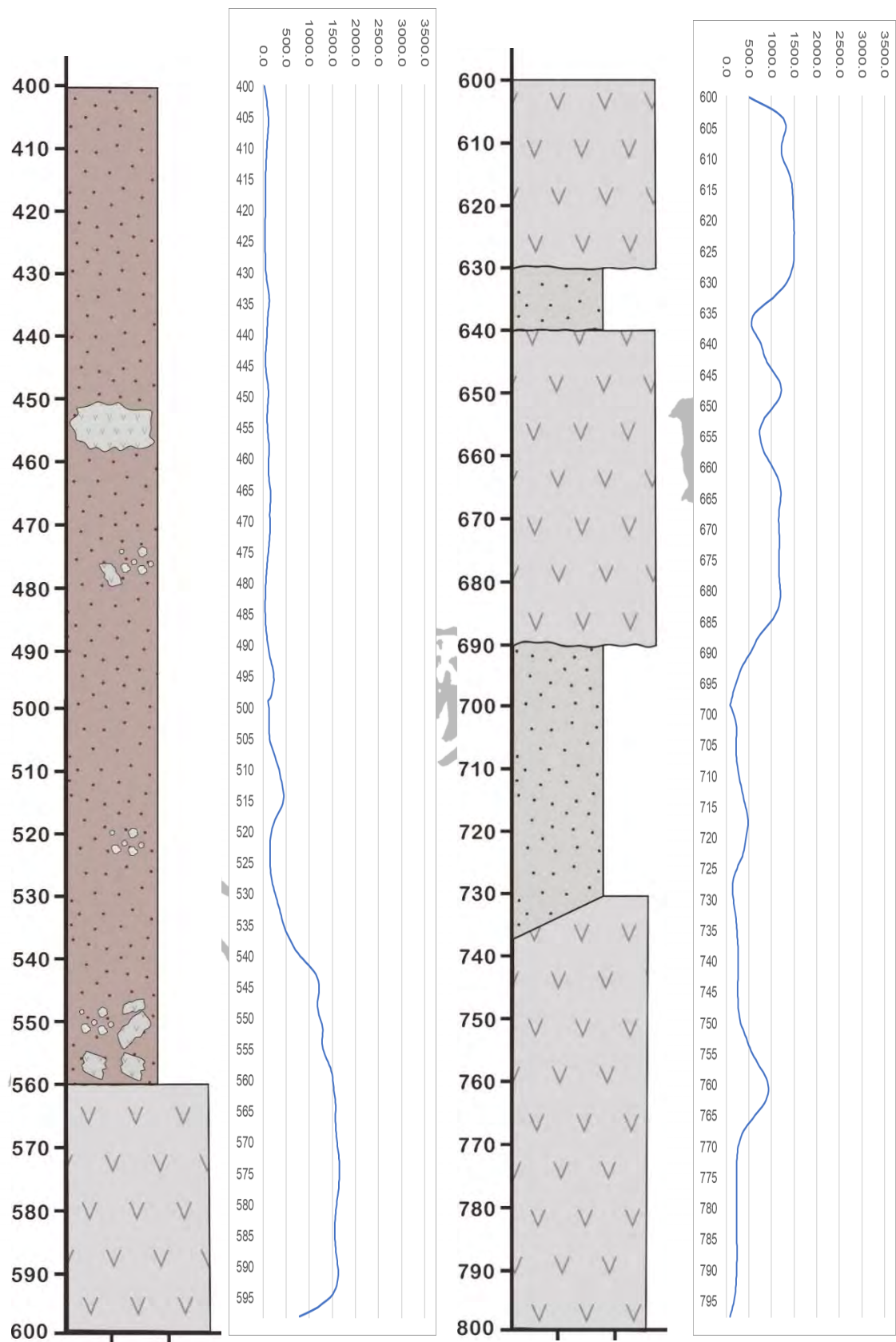


圖 4-211：Site5-1 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

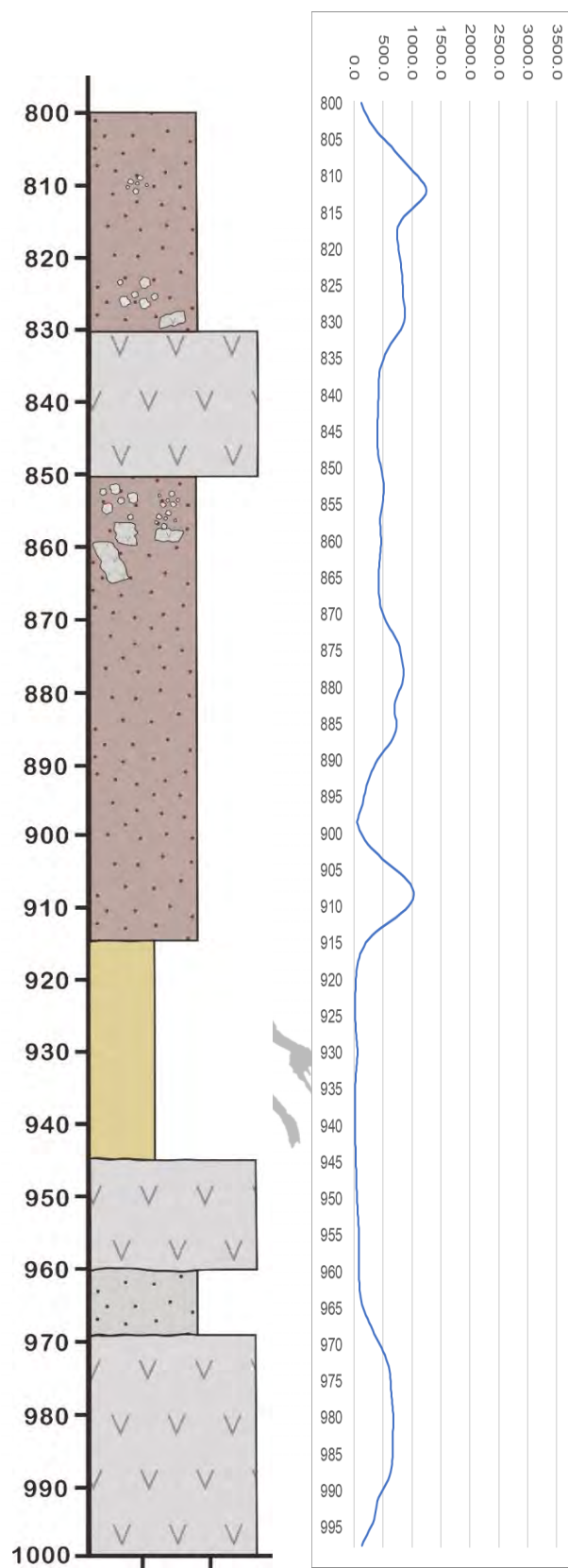


圖 4-212： Site5-1 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

Site5-2、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

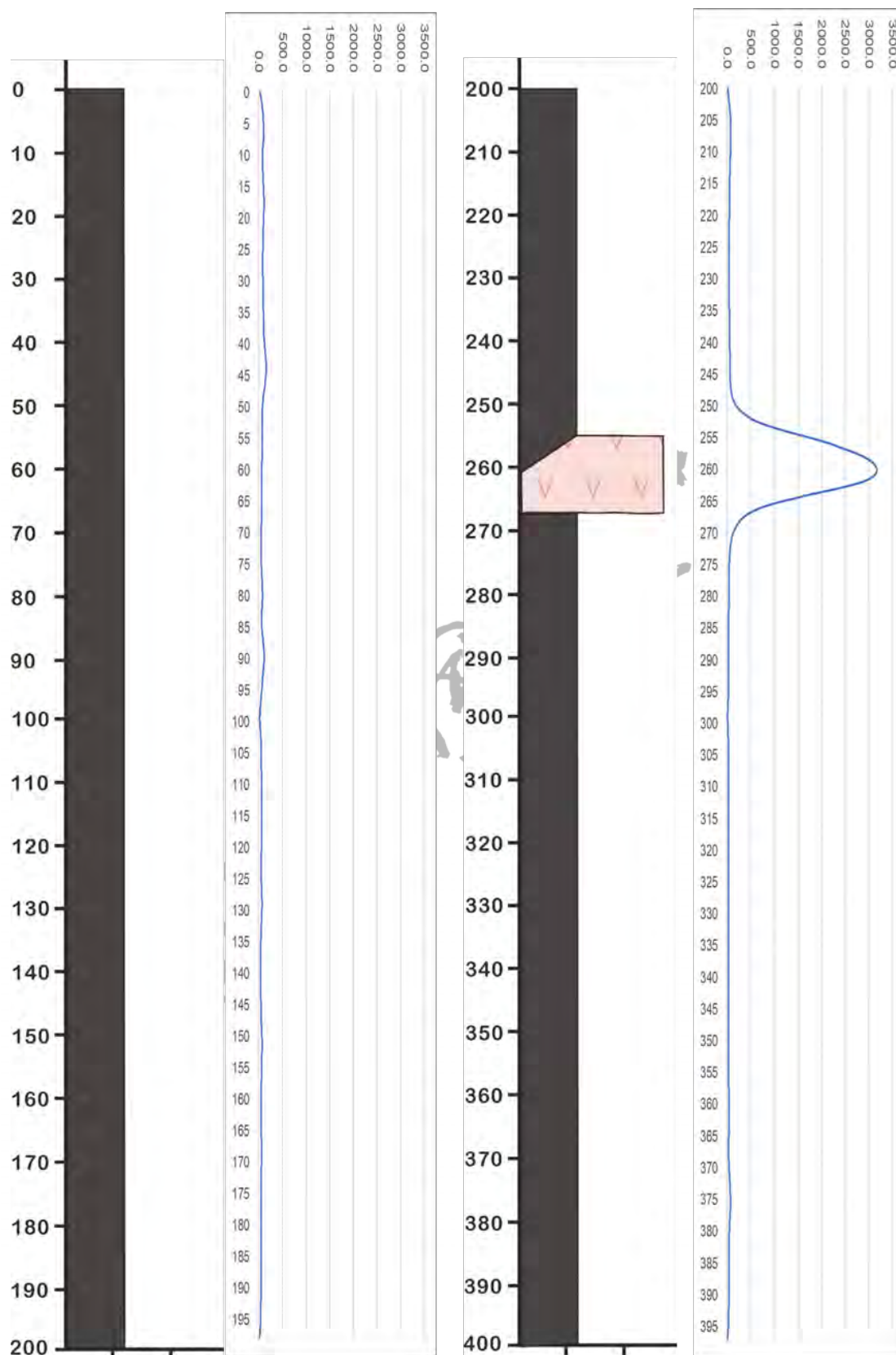


圖 4-213：Site5-2 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

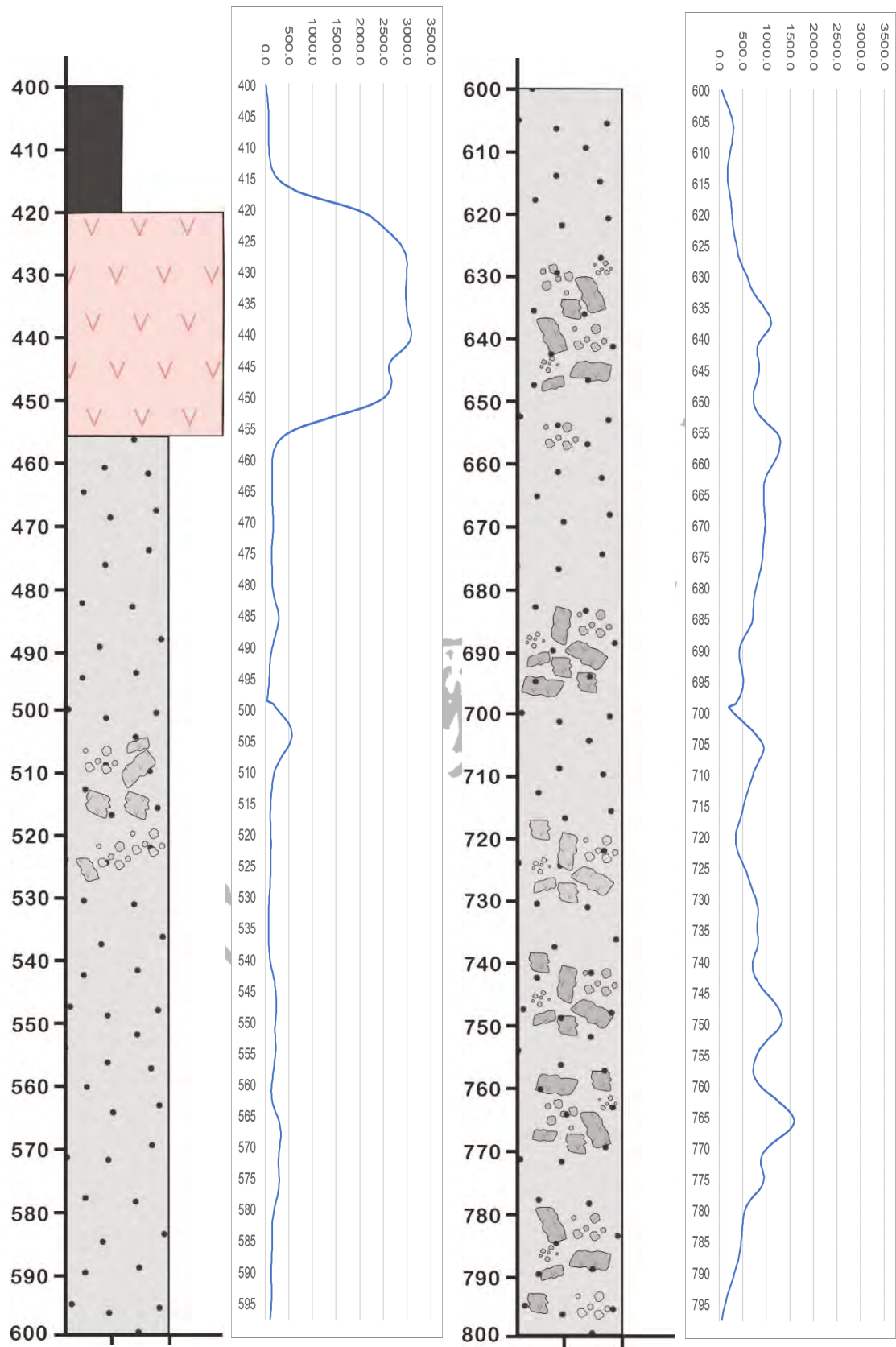


圖 4-214：Site5-2 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$

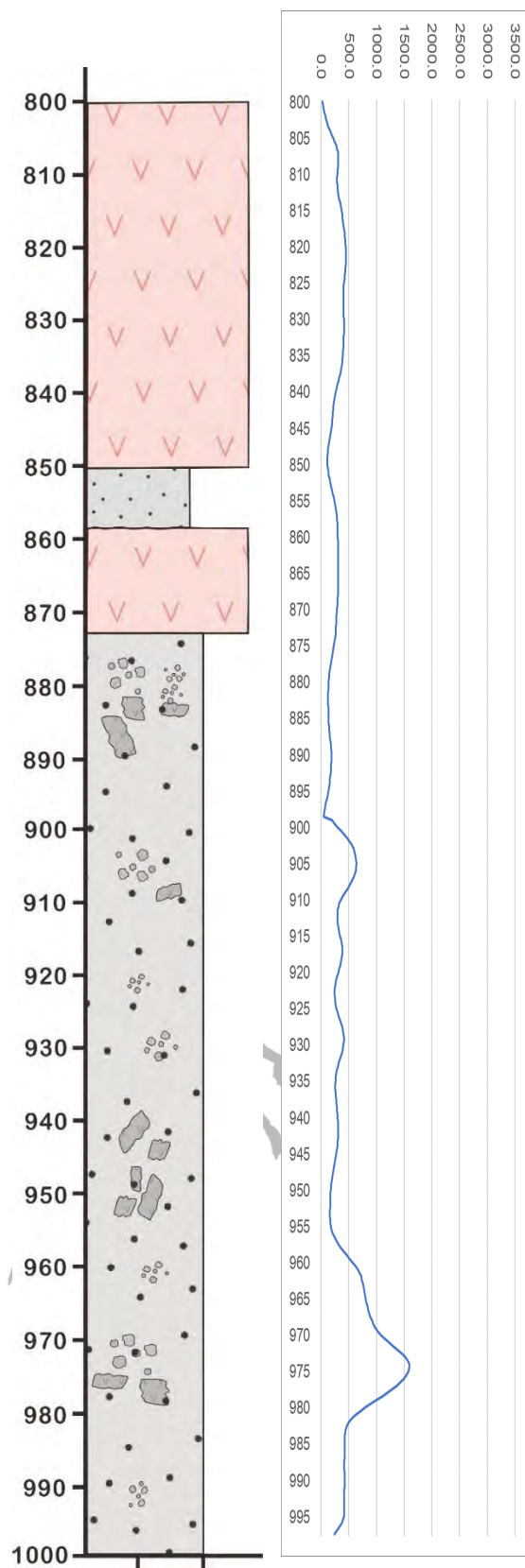


圖 4-215：Site5-2 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

Site6-1、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

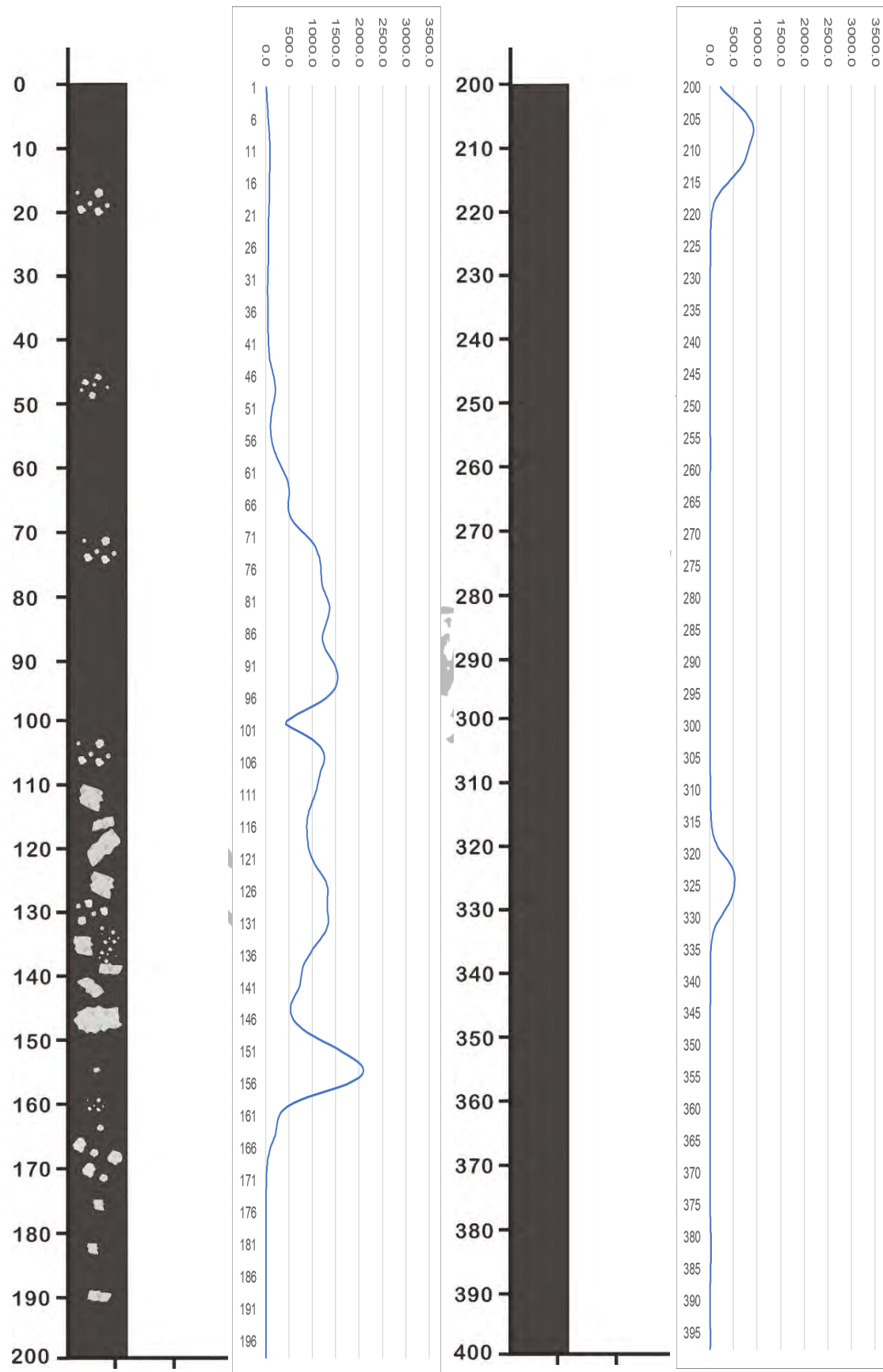


圖 4-216： Site6-1 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

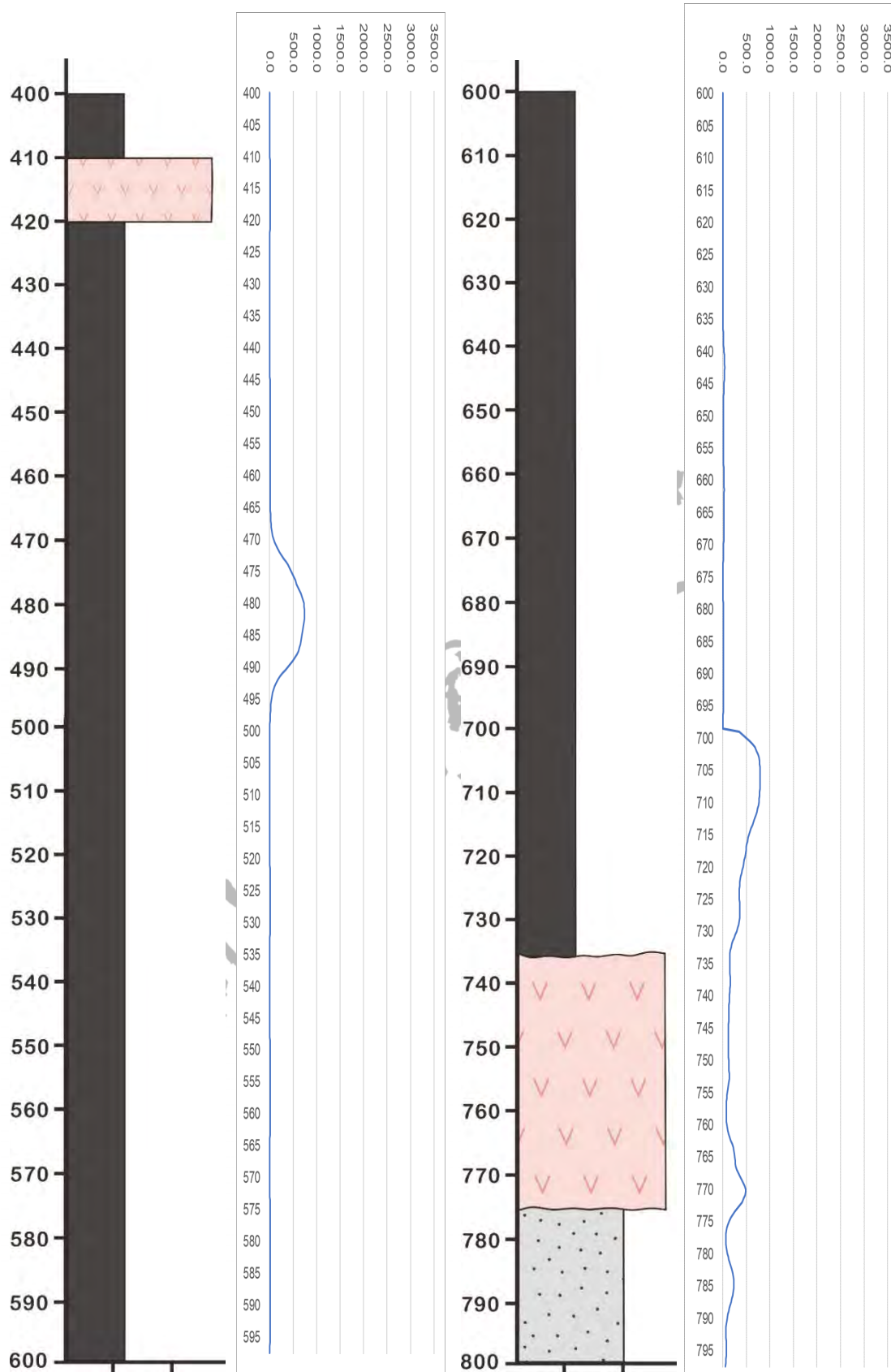


圖 4-217：Site6-1 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 SI x 10⁻⁵。

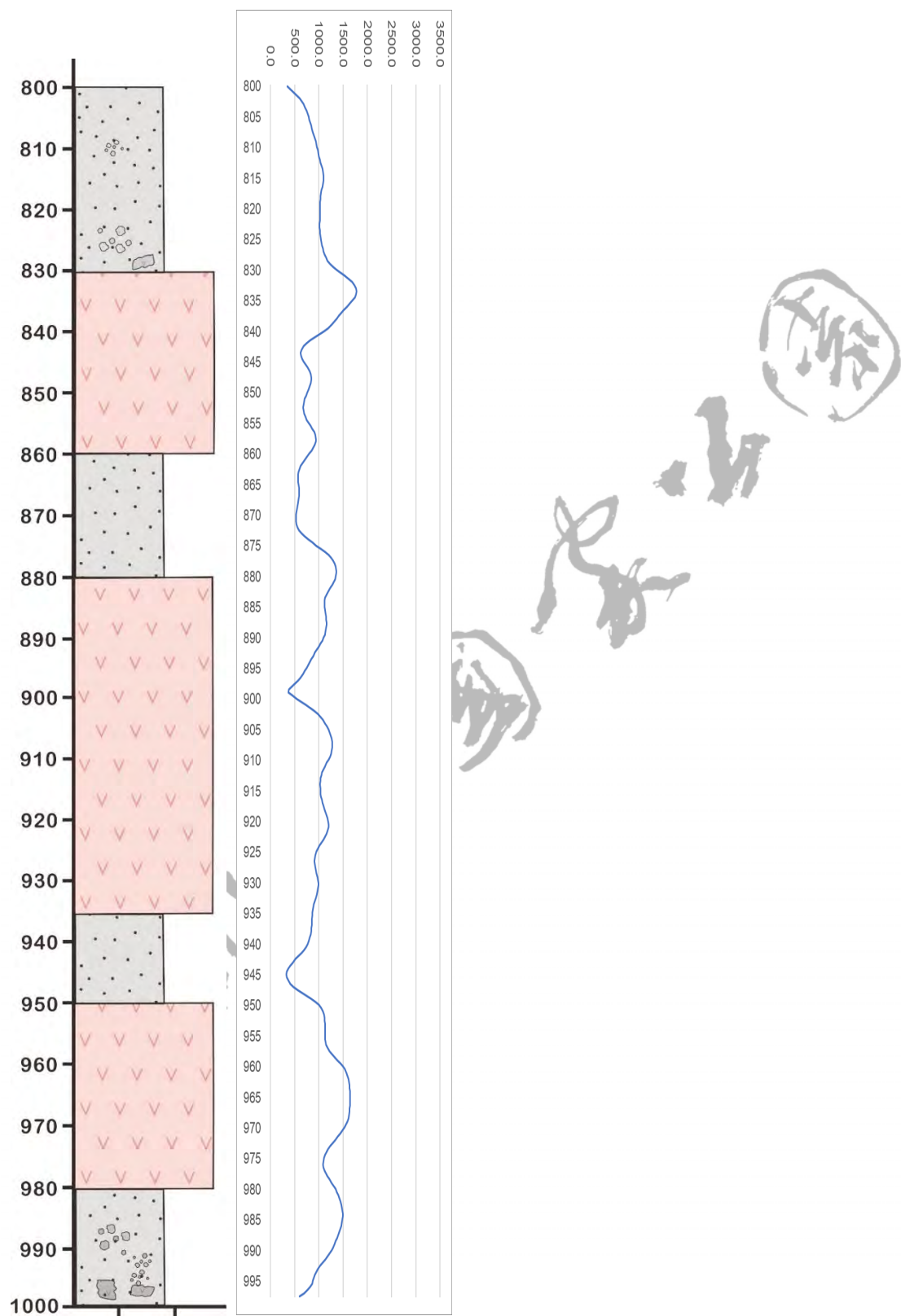


圖 4-218：Site6-1 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。

Site6-2、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

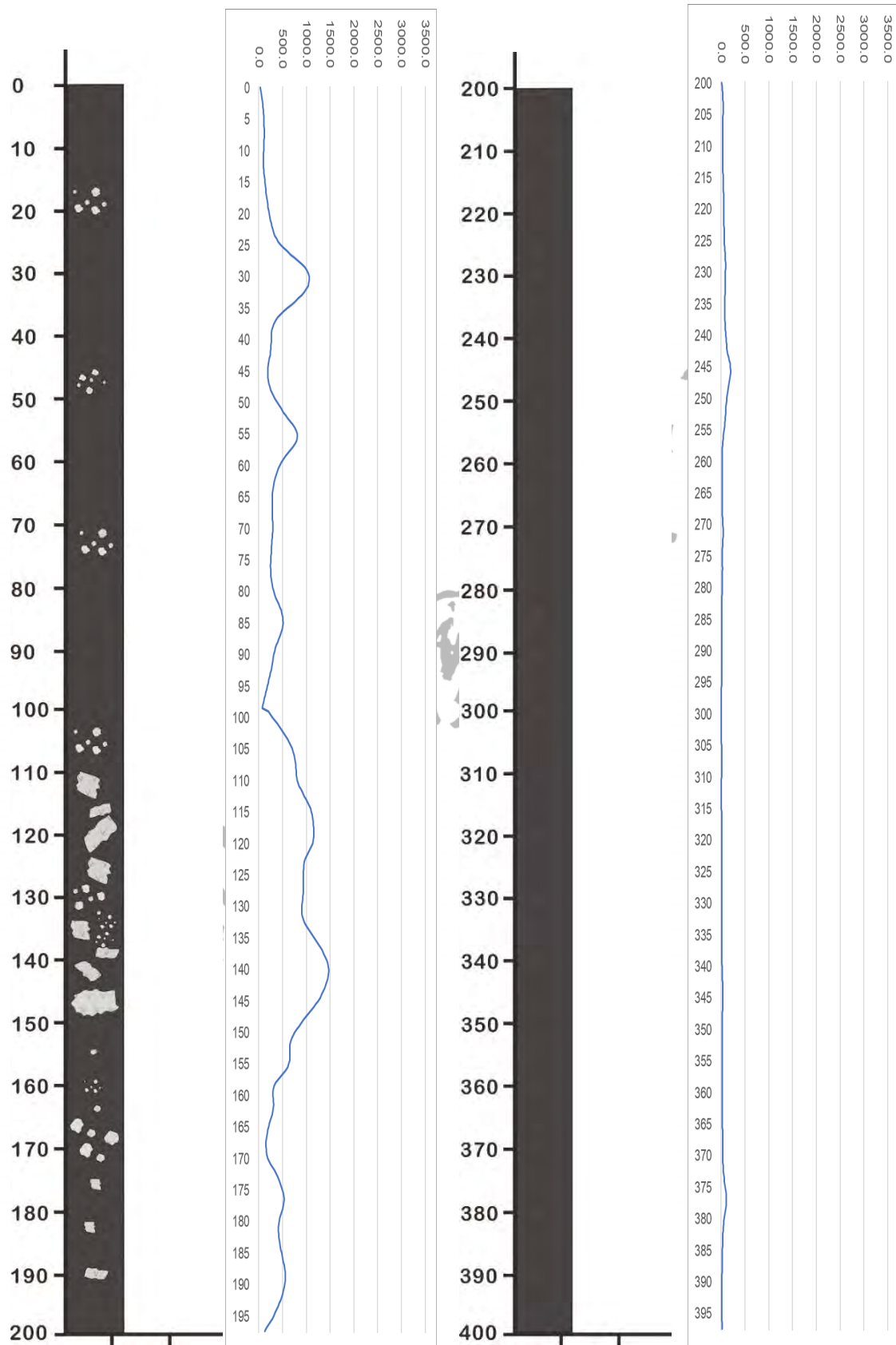


圖 4-219：Site6-2 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

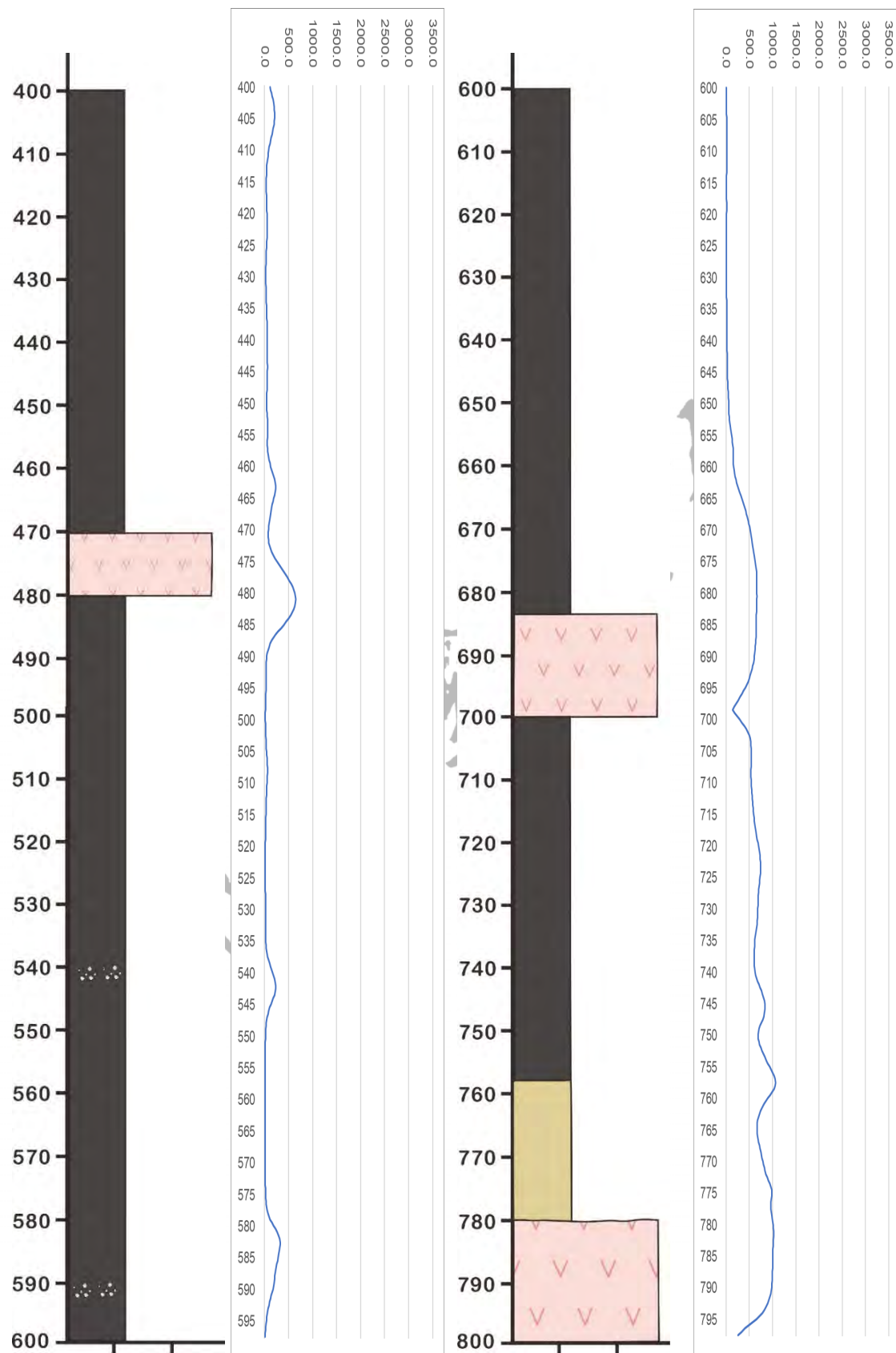


圖 4-220： Site6-2 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

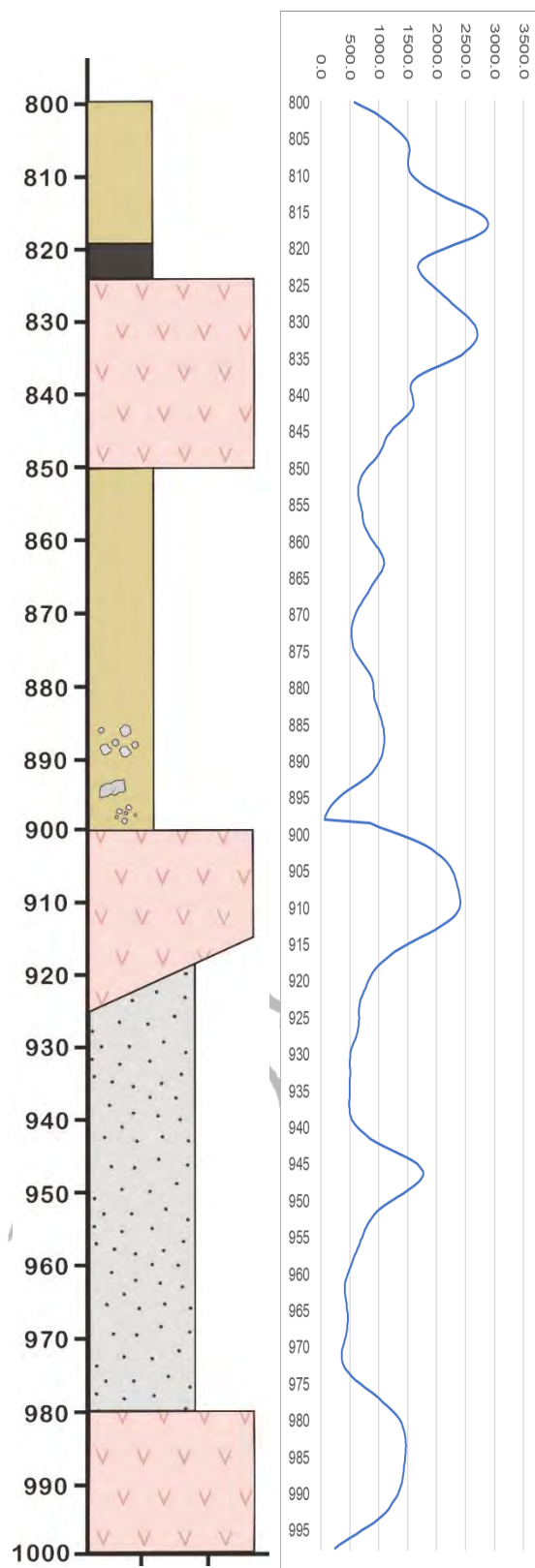


圖 4-221：Site6-2 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 SI x 10⁻⁵。

Site7-1、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

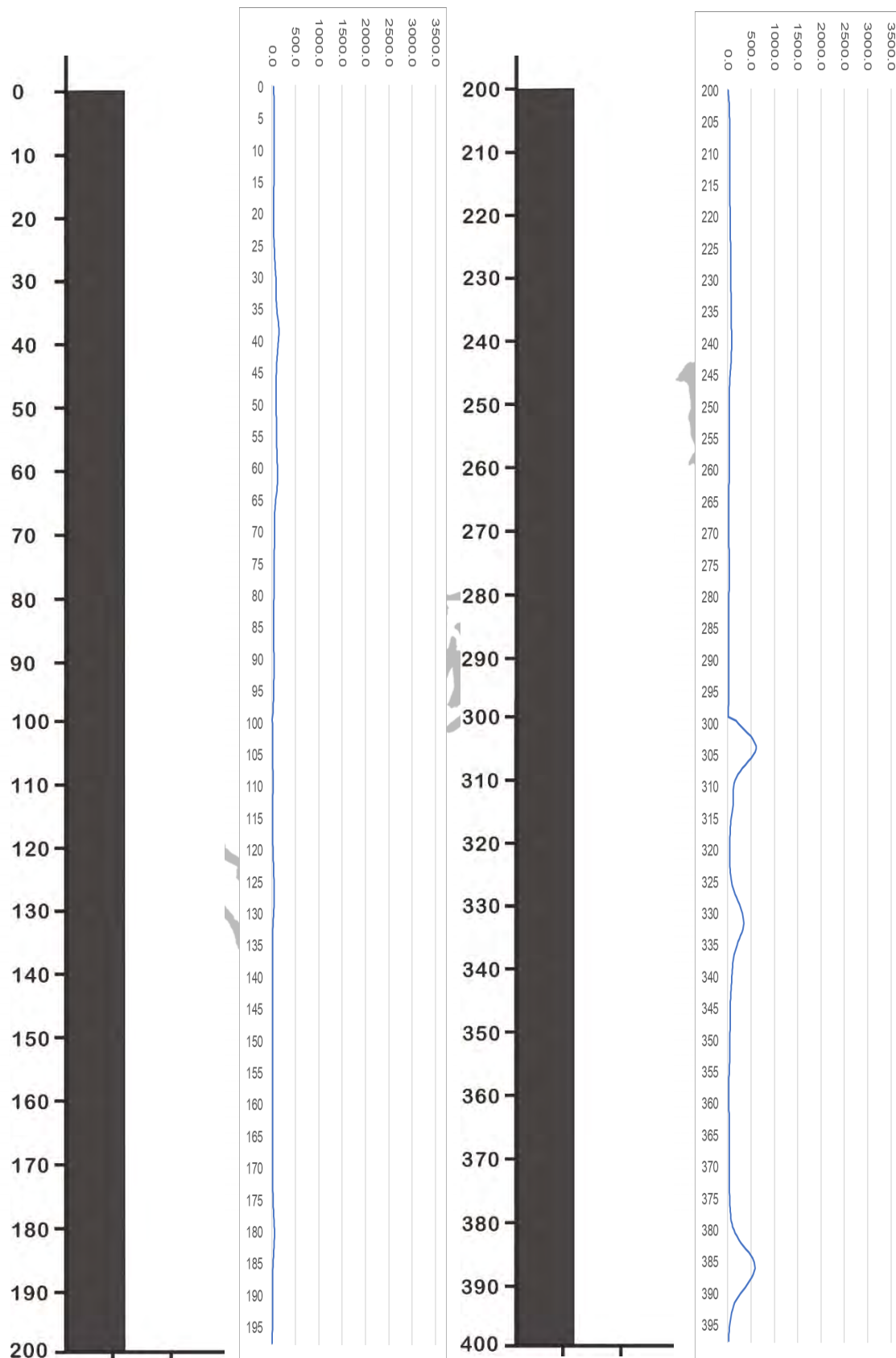


圖 4-222：Site7-1 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

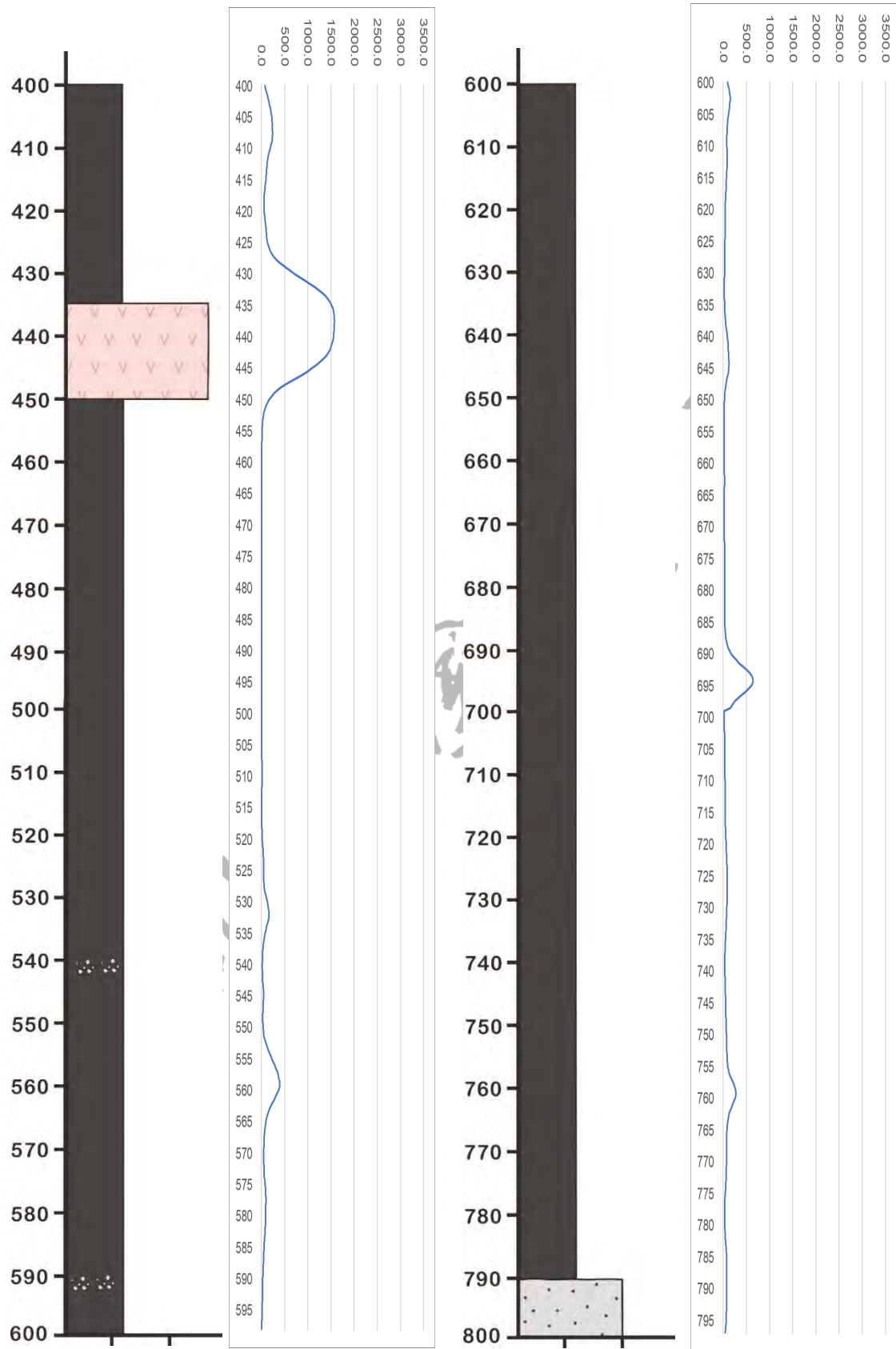


圖 4-223：Site7-1 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

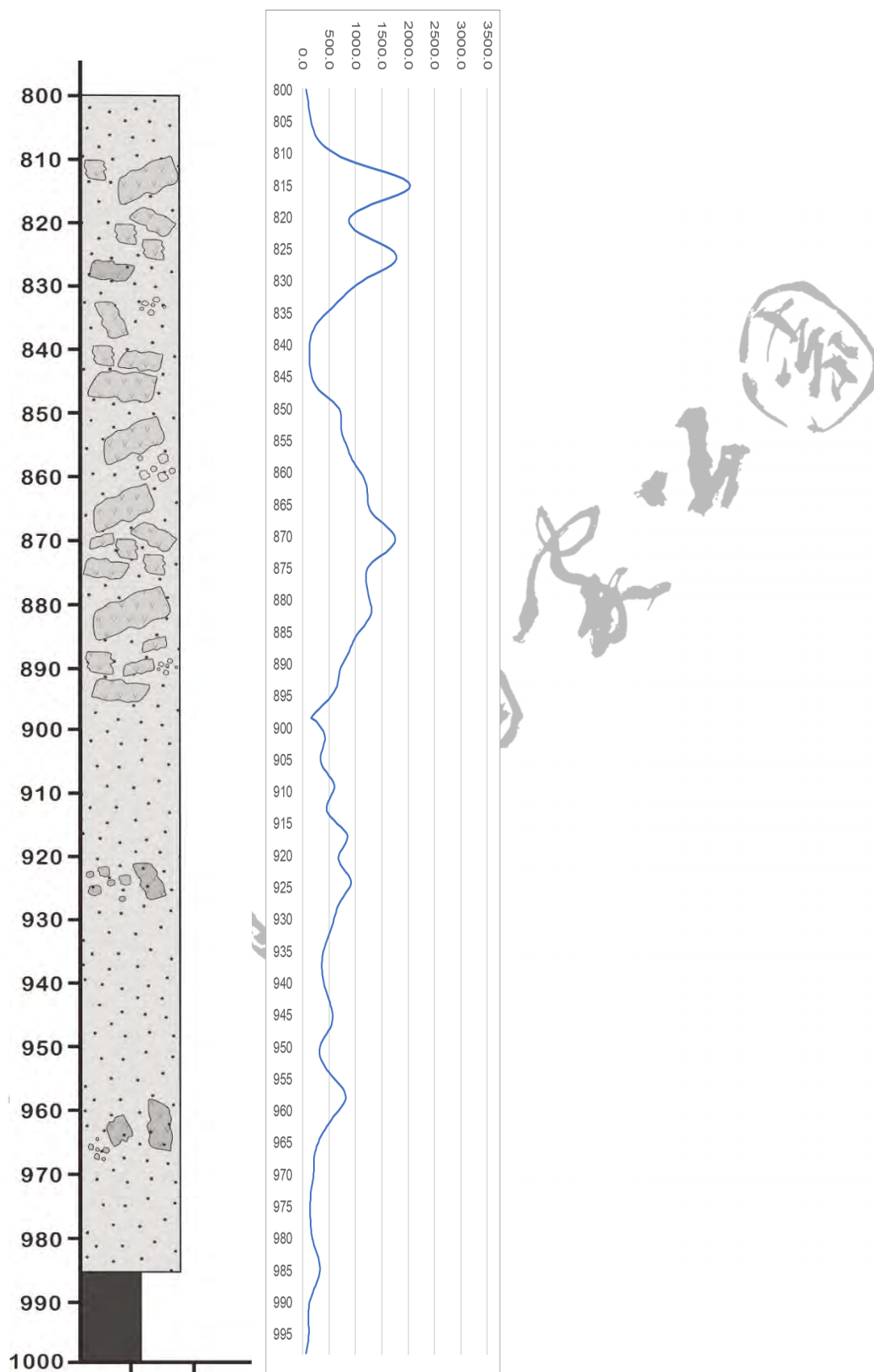


圖 4-224： Site7-1 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

Site7-2、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

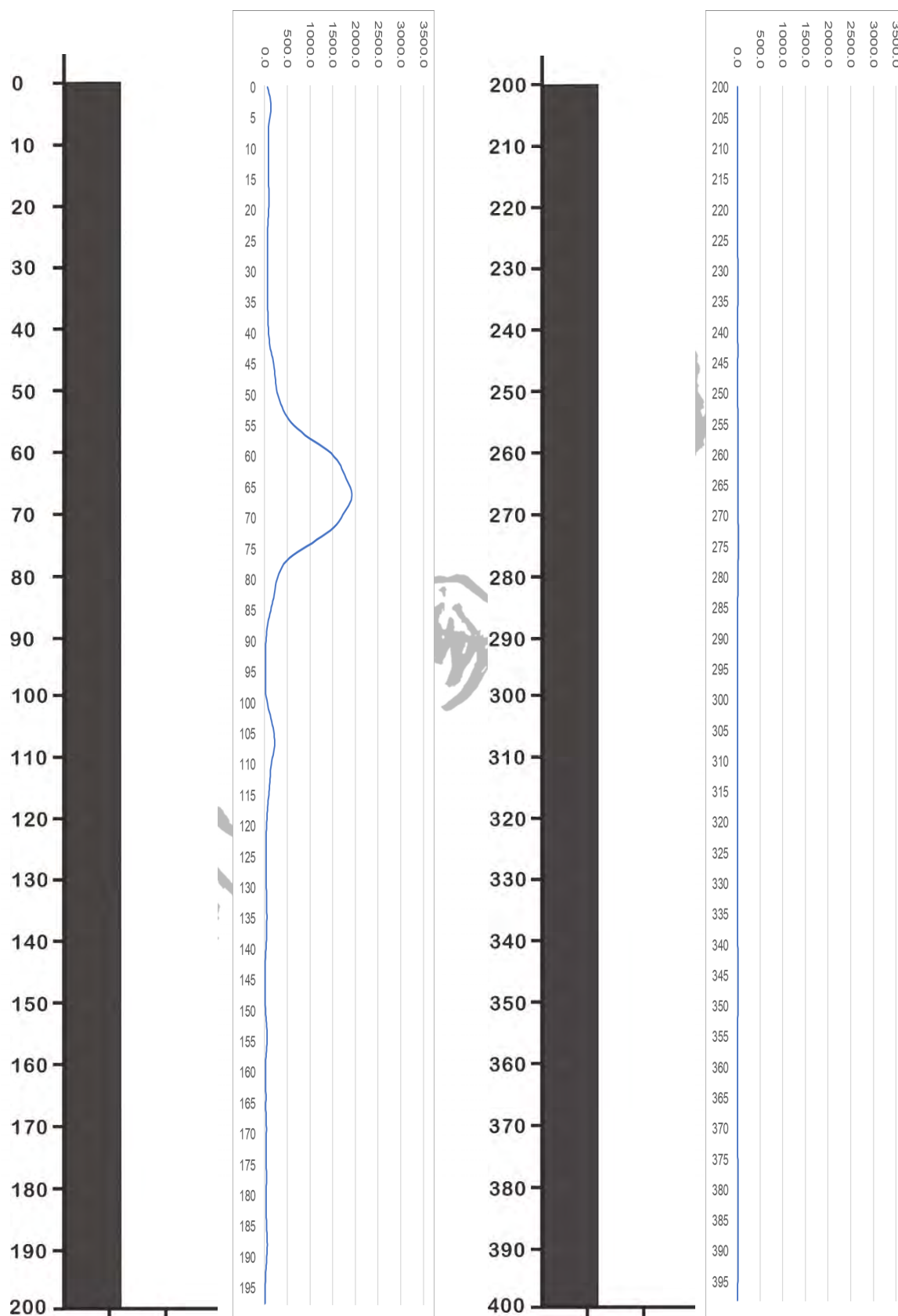


圖 4-225： Site7-2 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

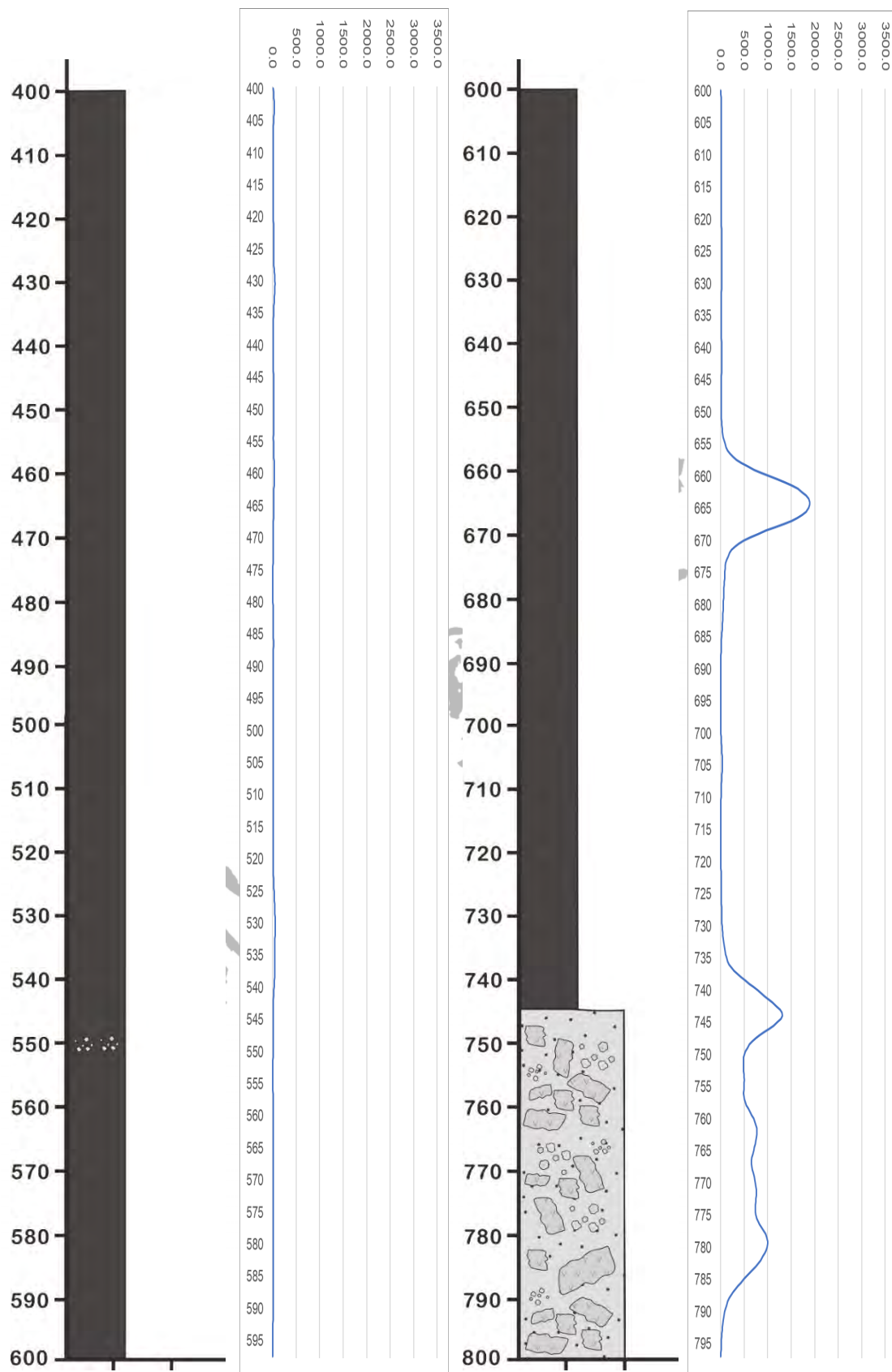


圖 4-226 Site7-2 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

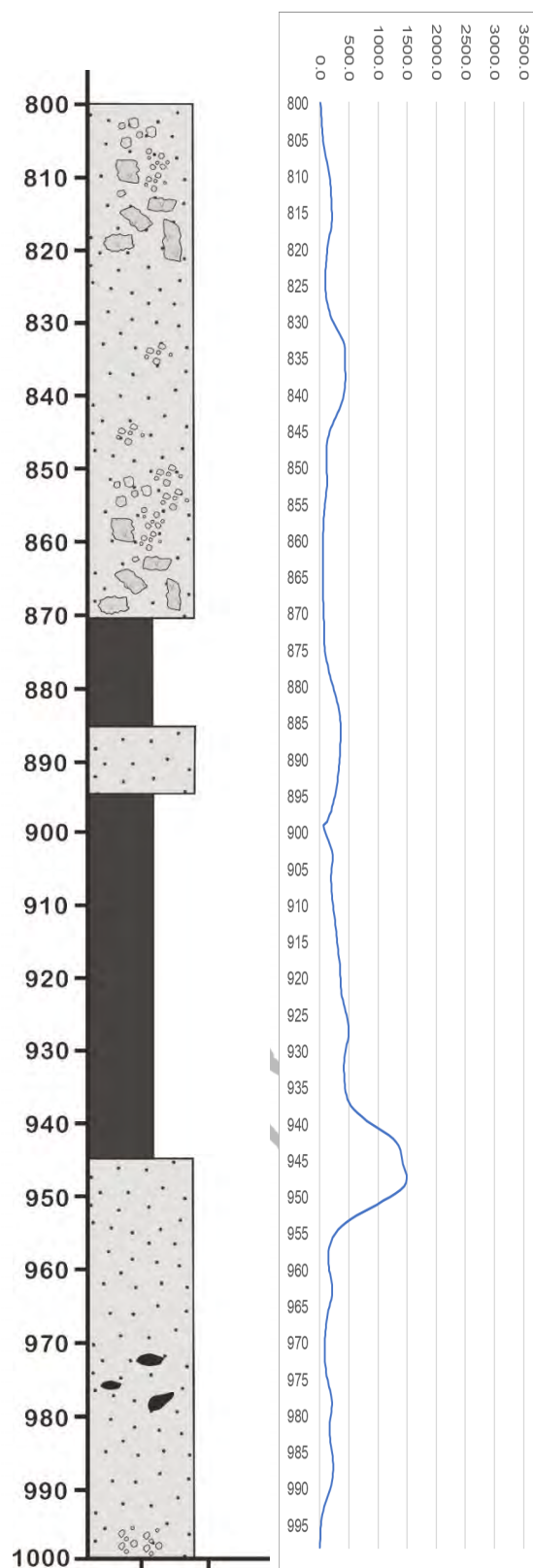


圖 4-227： Site7-2 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

Site8-1、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

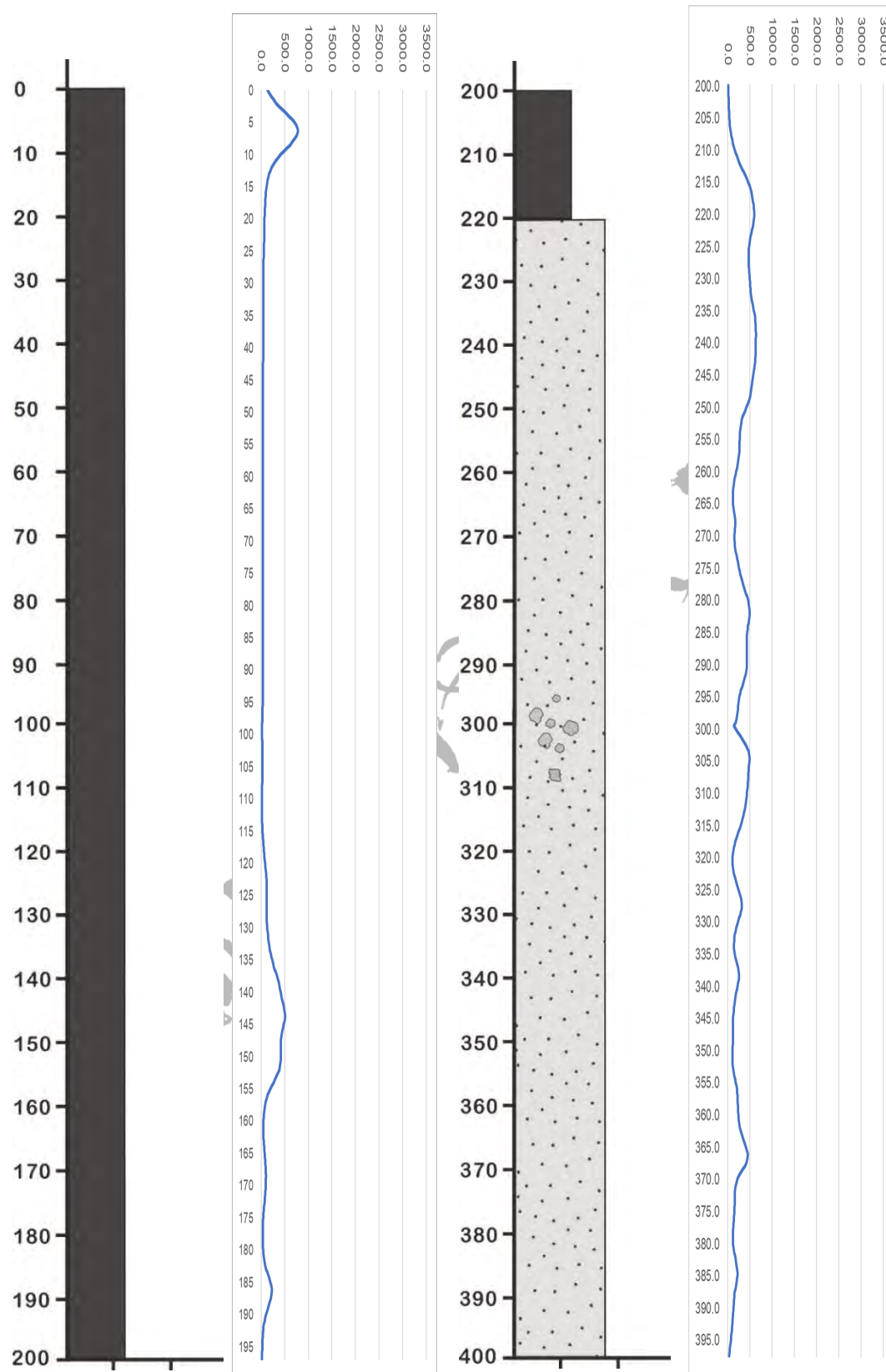


圖 4-228：Site8-1 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

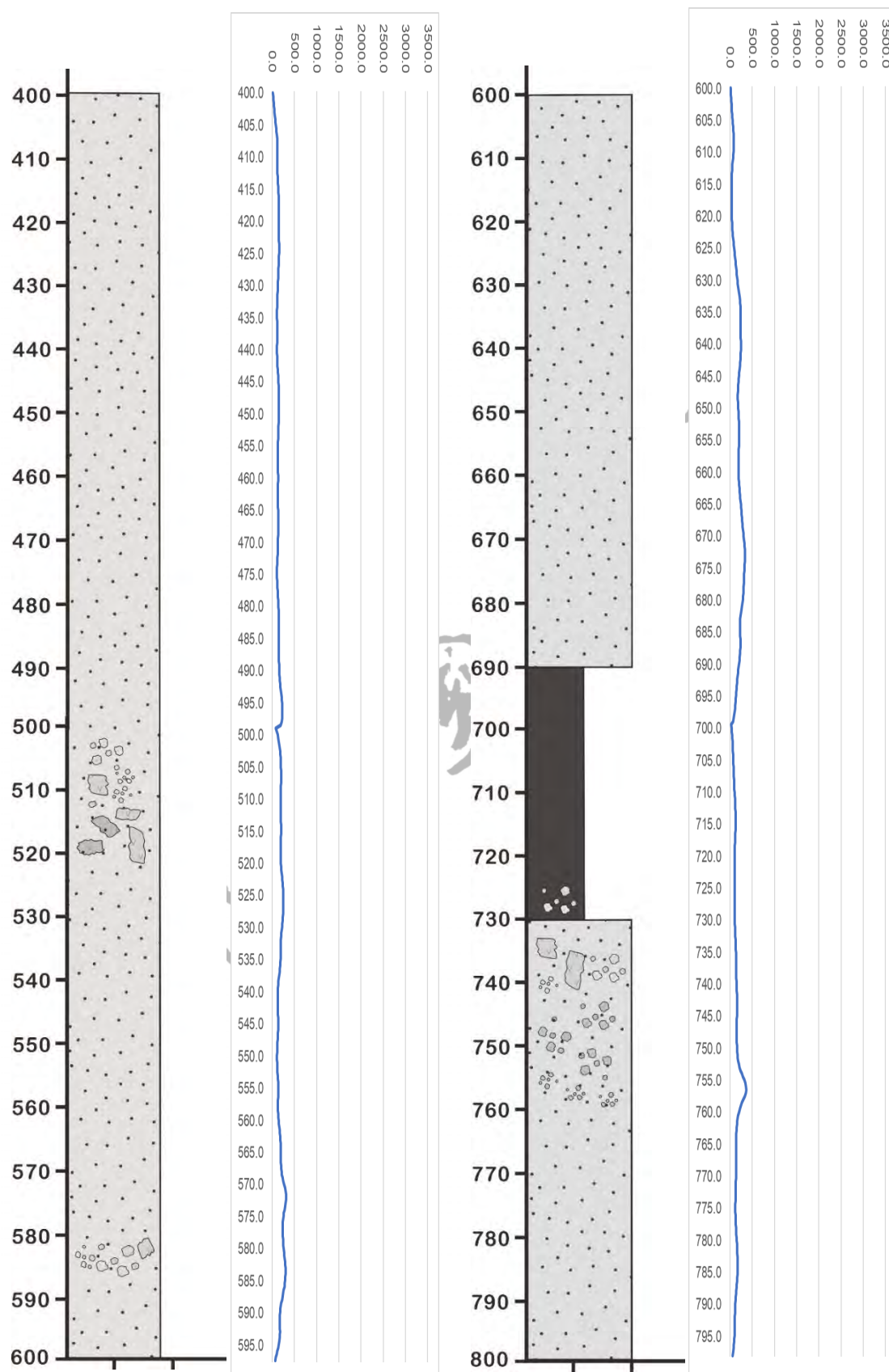


圖 4-229：Site8-1 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

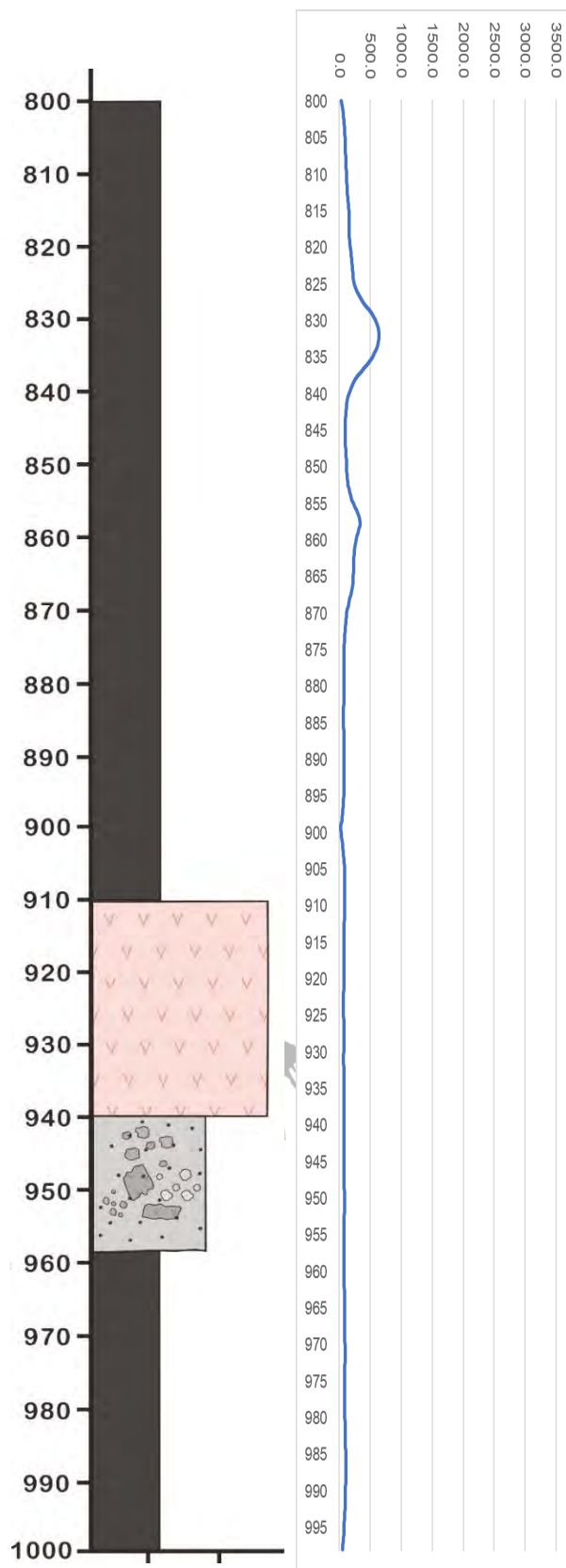


圖 4-230 Site8-1 8-10m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

Site8-2、磁感率 Magnetic Susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-5}$)

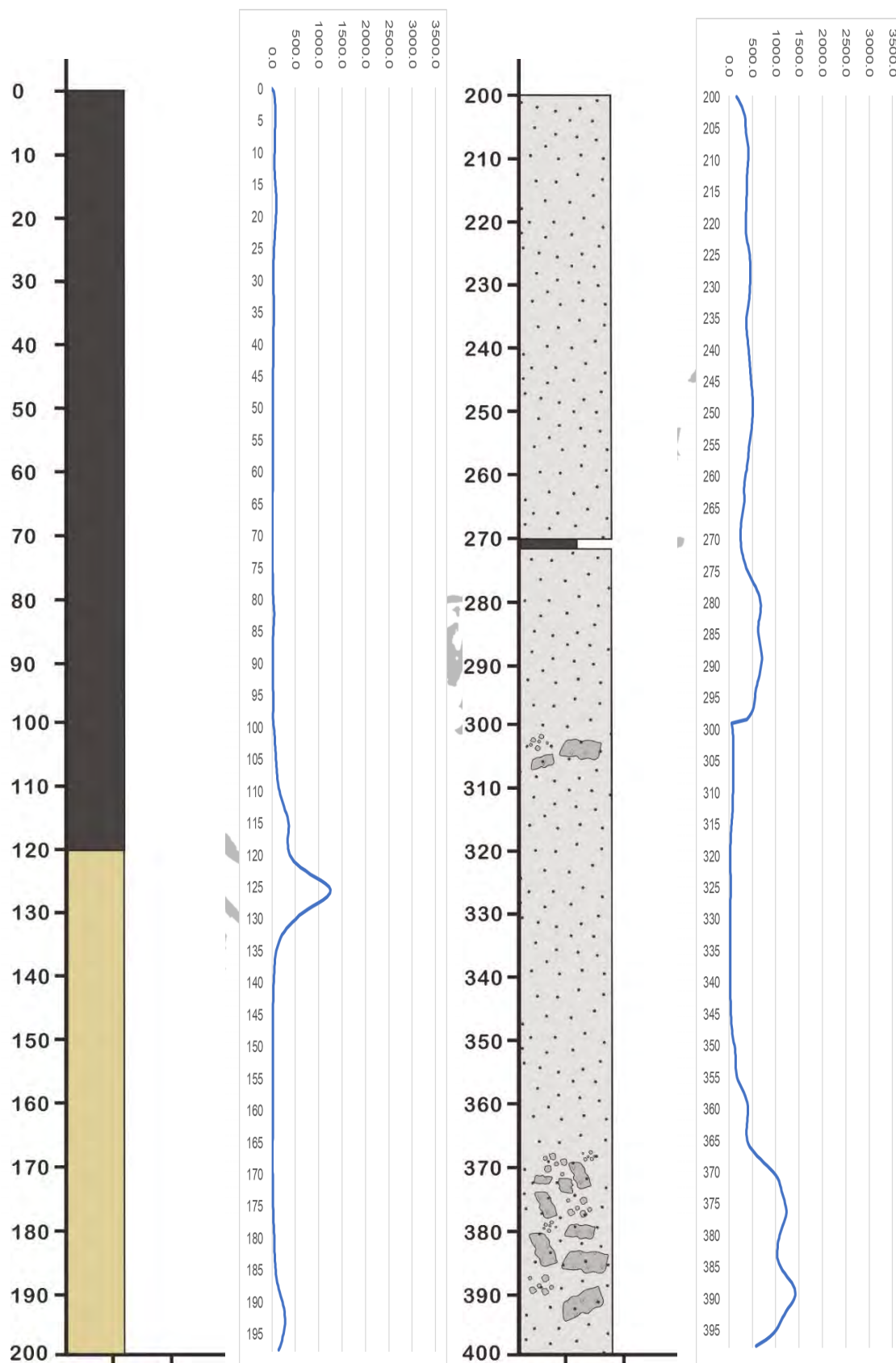


圖 4-231：Site8-2 0-2m & 2-4m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

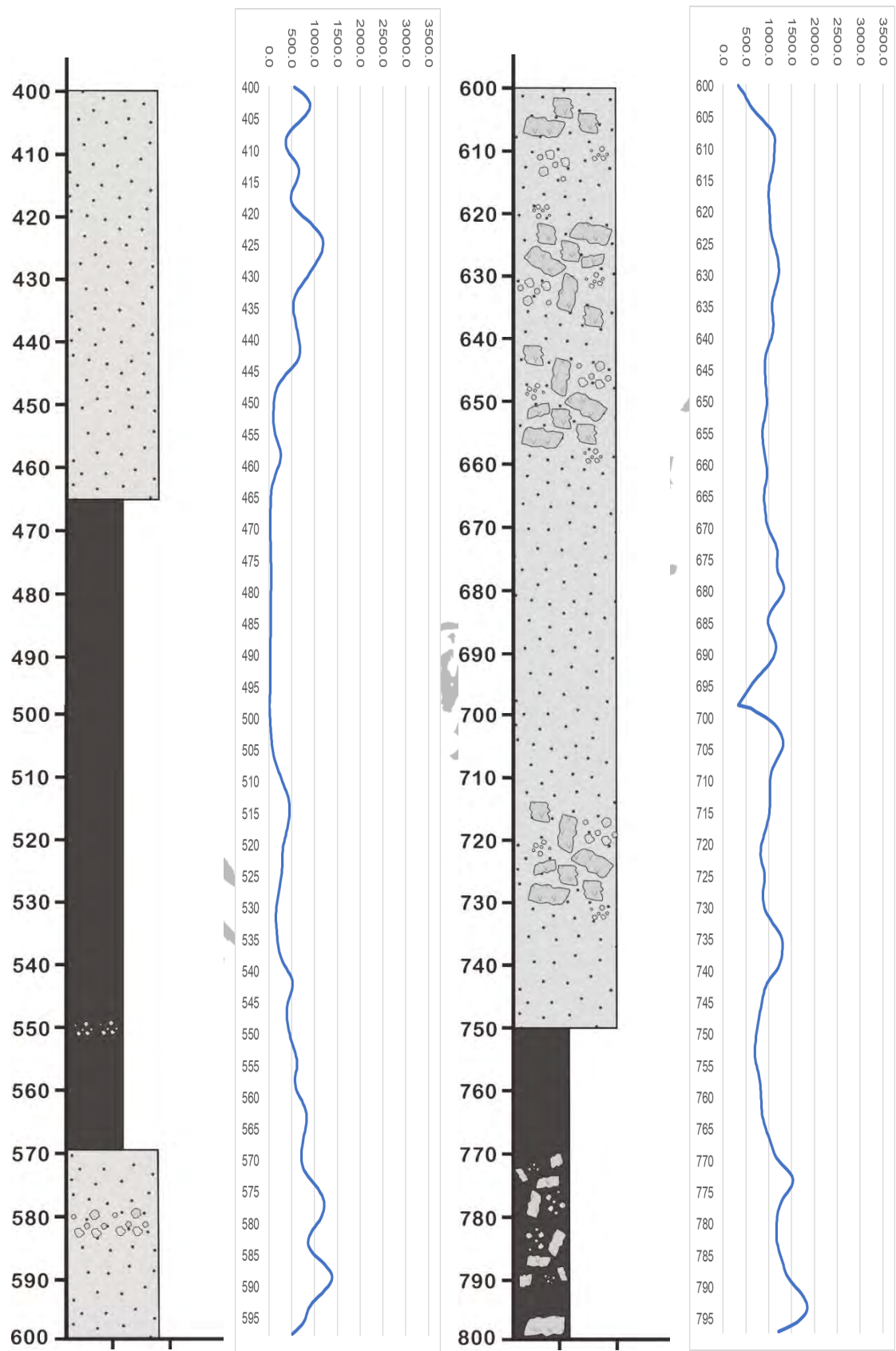


圖 4-232： Site8-2 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

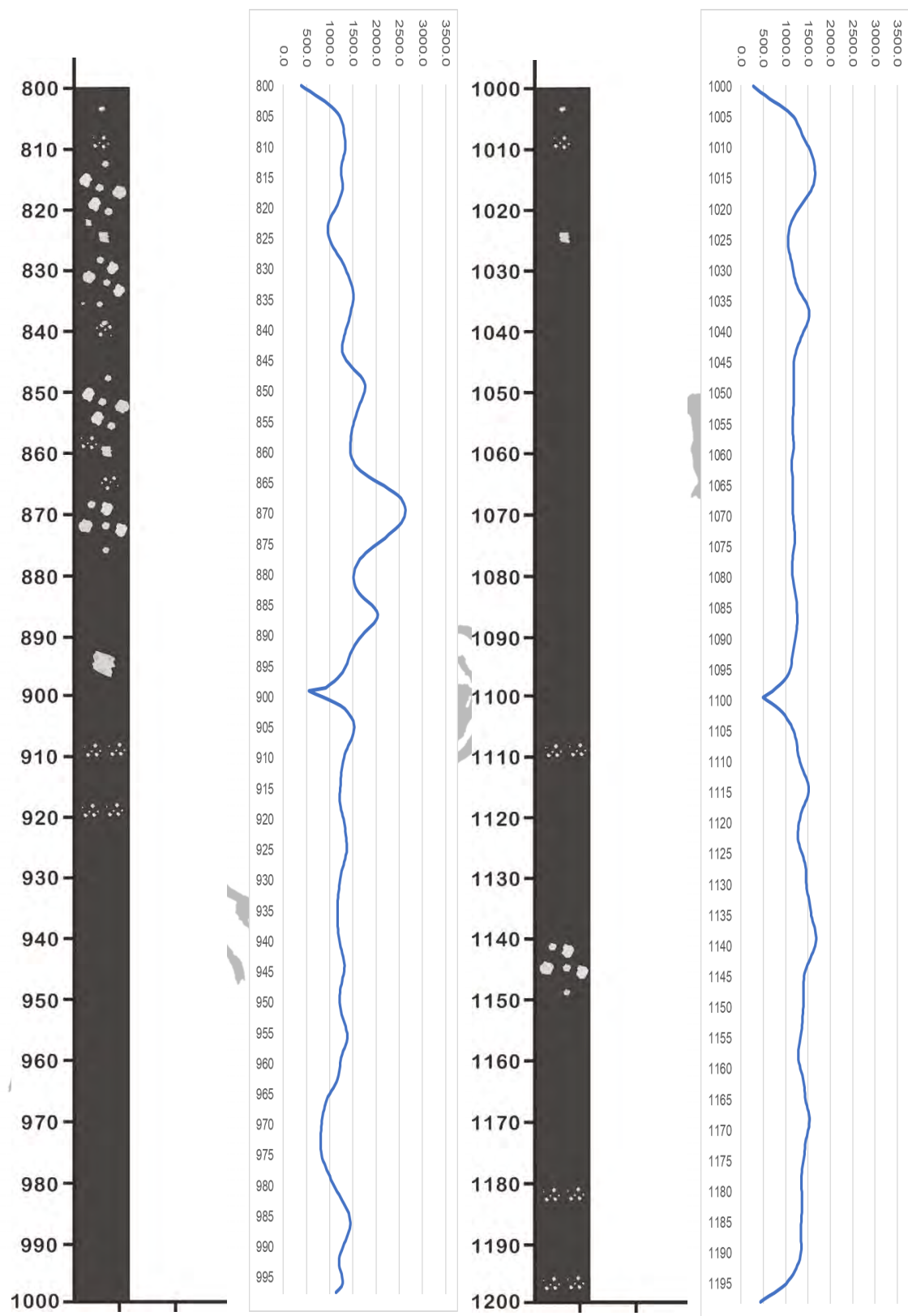


圖 4-233： Site8-2 8-10m & 10-12m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

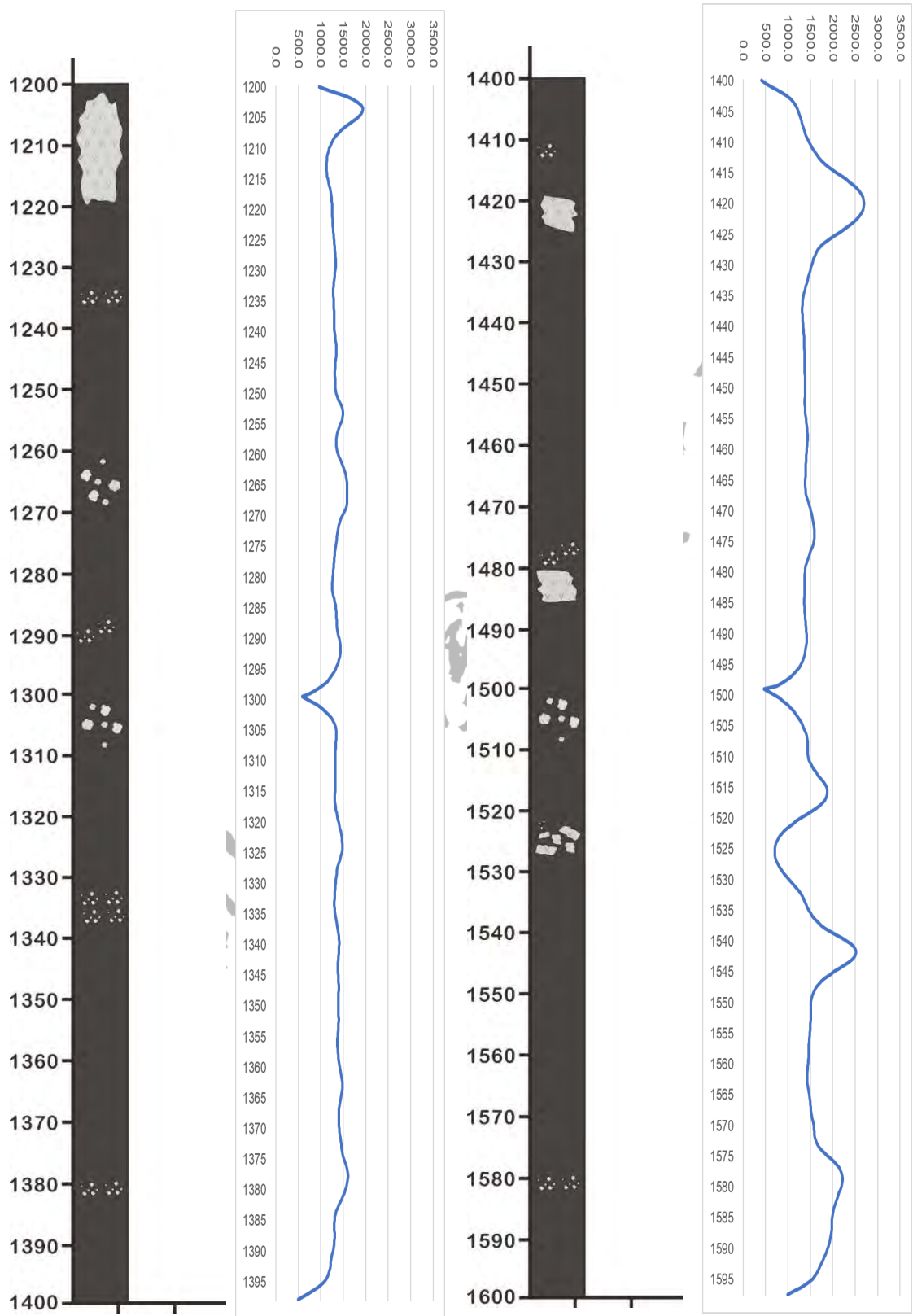


圖 4-234：Site8-2 12-14m & 14-16m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

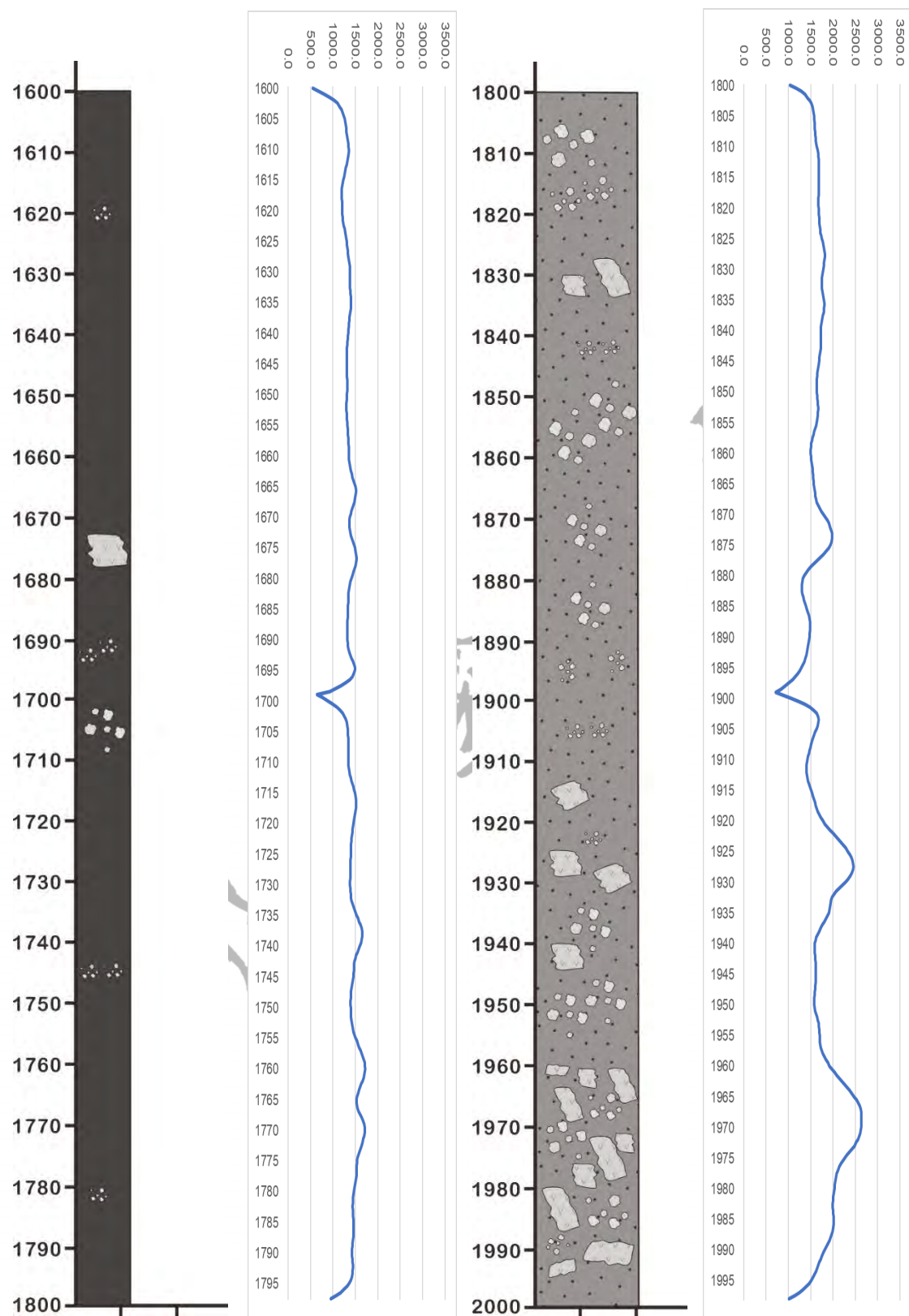


圖 4-235：Site8-2 16-18m & 18-20m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $\text{SI} \times 10^{-5}$ 。

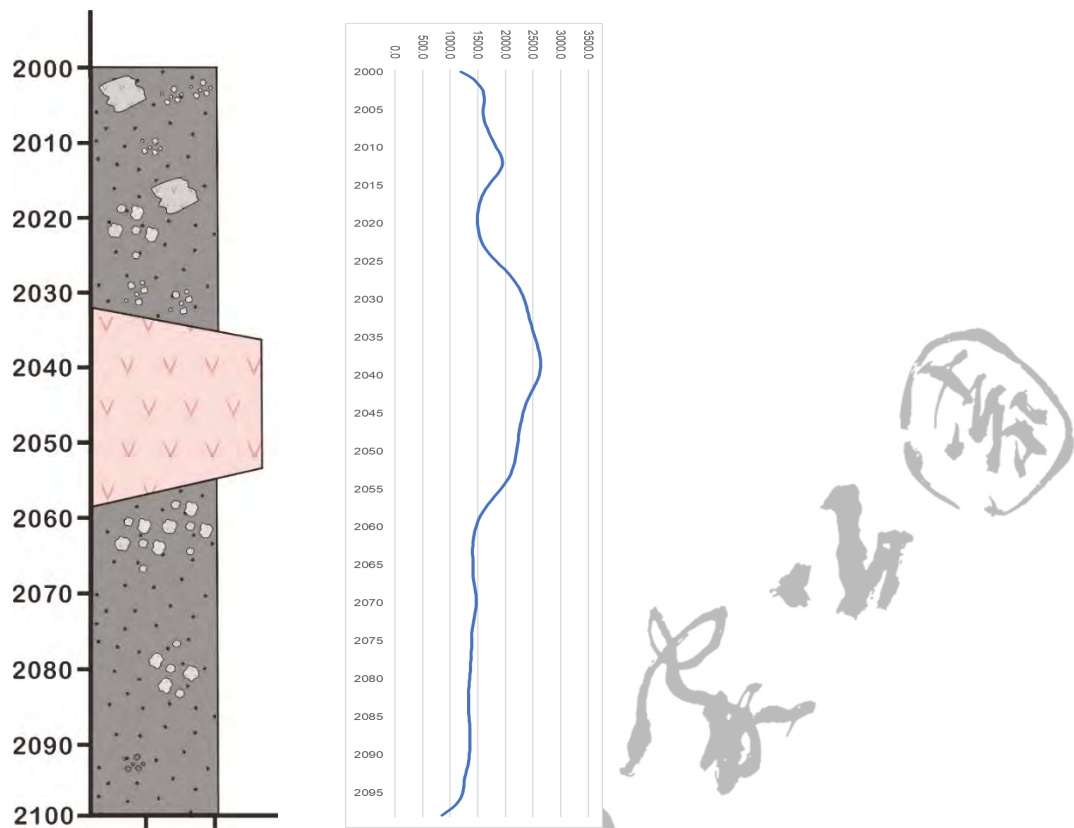


圖 4-236： Site8-2 20-21m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。磁感率的單位為 $SI \times 10^{-5}$ 。

4-2、孔隙率

安山岩岩塊的孔隙率明顯低於泥岩與火山質砂岩。若火山質砂岩夾雜安山岩岩塊則顯現顯著跳動的孔隙率變化，並無明顯的規律性可供判識。泥岩則有相對穩定的孔隙率，但本研究也觀察到部分岩段中的泥岩，展現較高或低的孔隙率。較高的孔隙率可能反應該岩段夾有薄層的粉沙岩或夾有細小的火山岩岩屑等粒徑較大的沉積物，使該岩段的孔隙率數值較高。較低的孔隙率反映該岩段較為緊密，可能反應沉積速率較慢所造成。

Site5-1

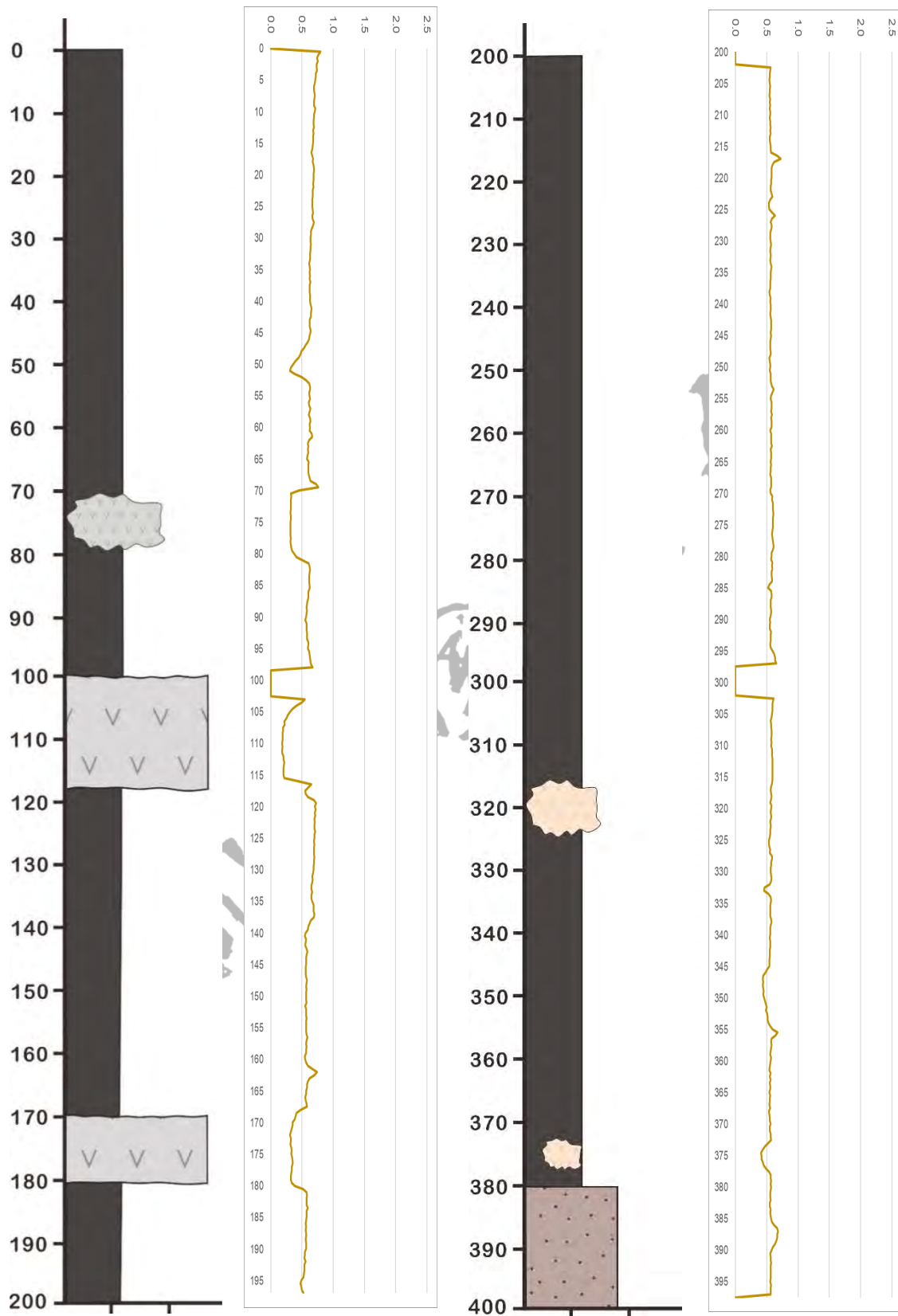


圖 4-237： Site5-1 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

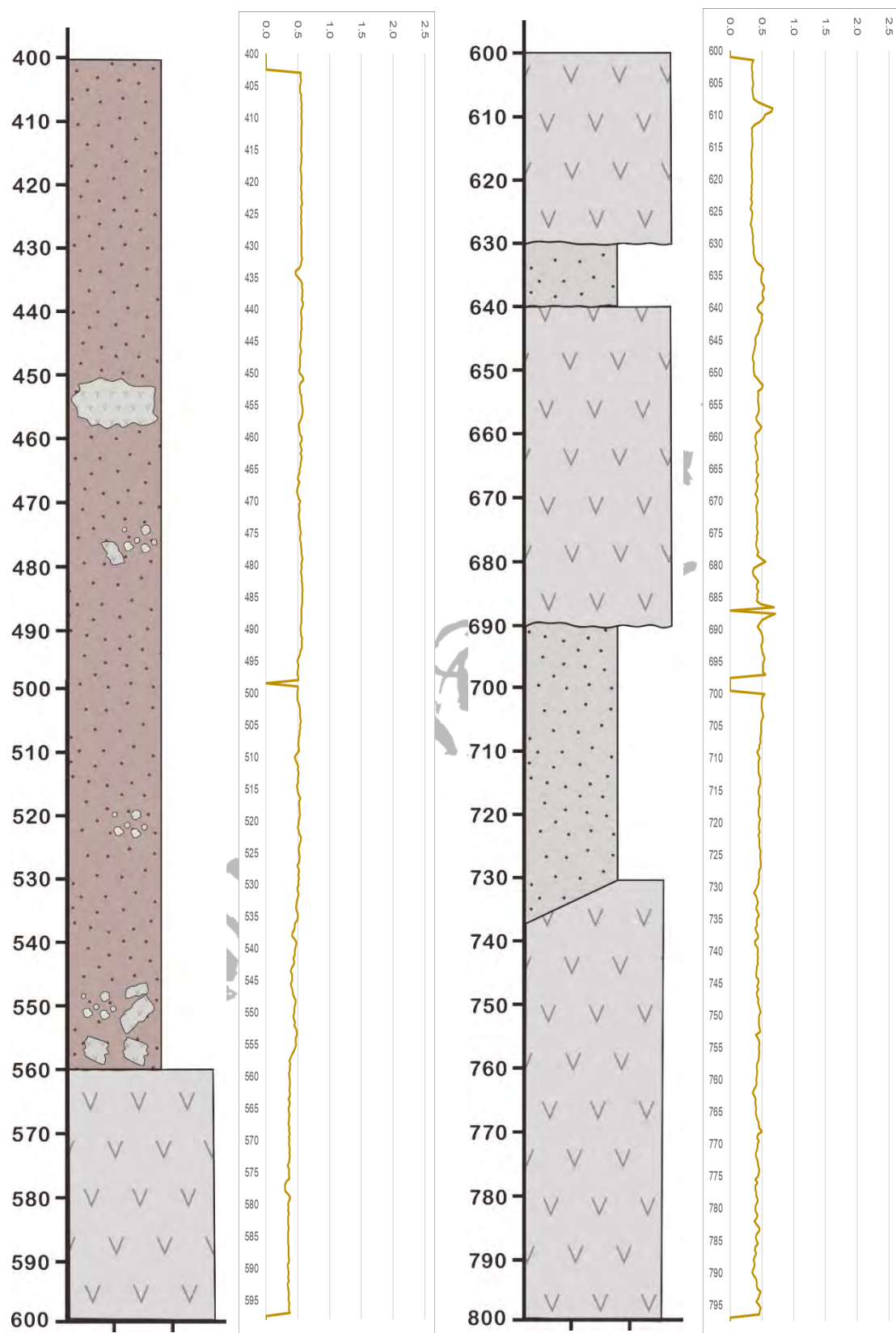


圖 4-238：Site5-1 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

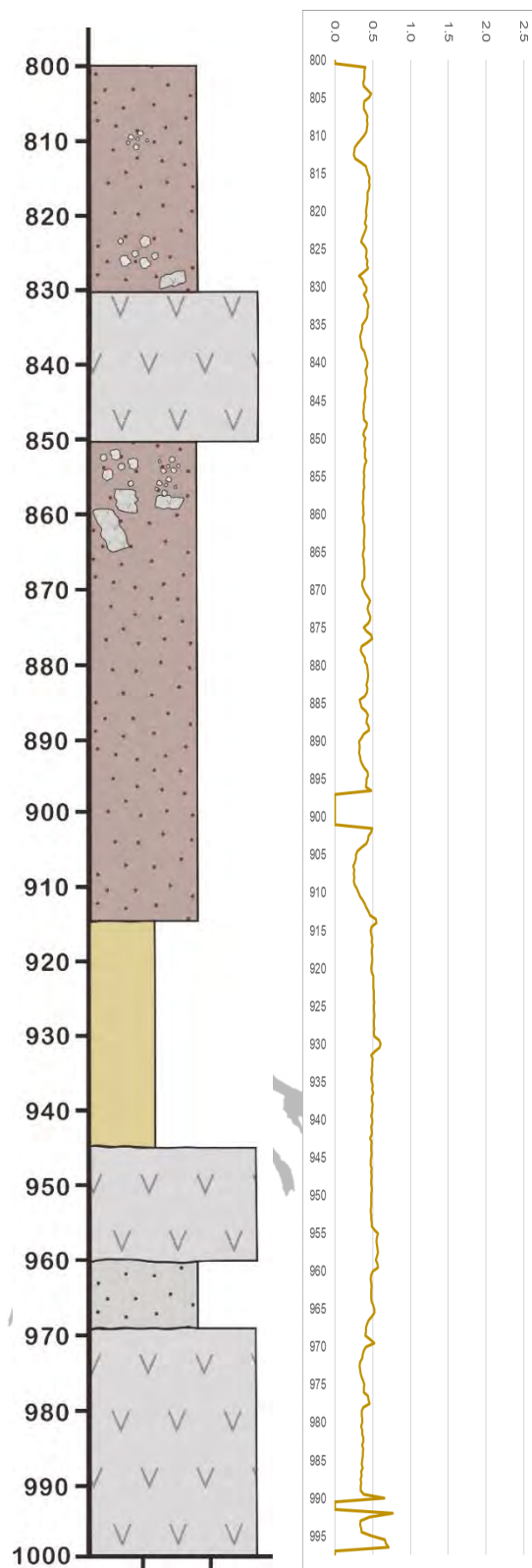


圖 4-239：Site5-1 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site5-2

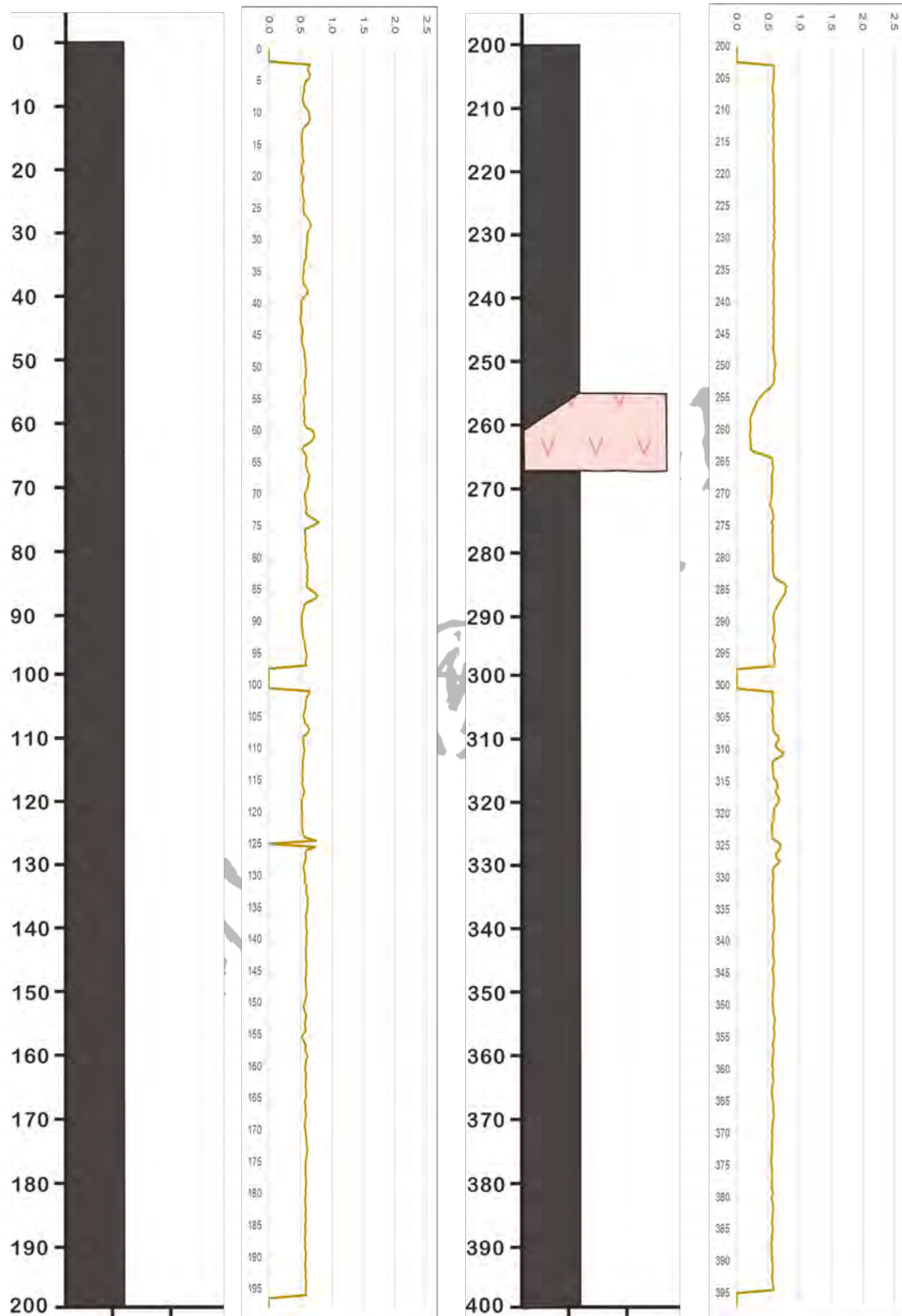


圖 4-240：Site5-2 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

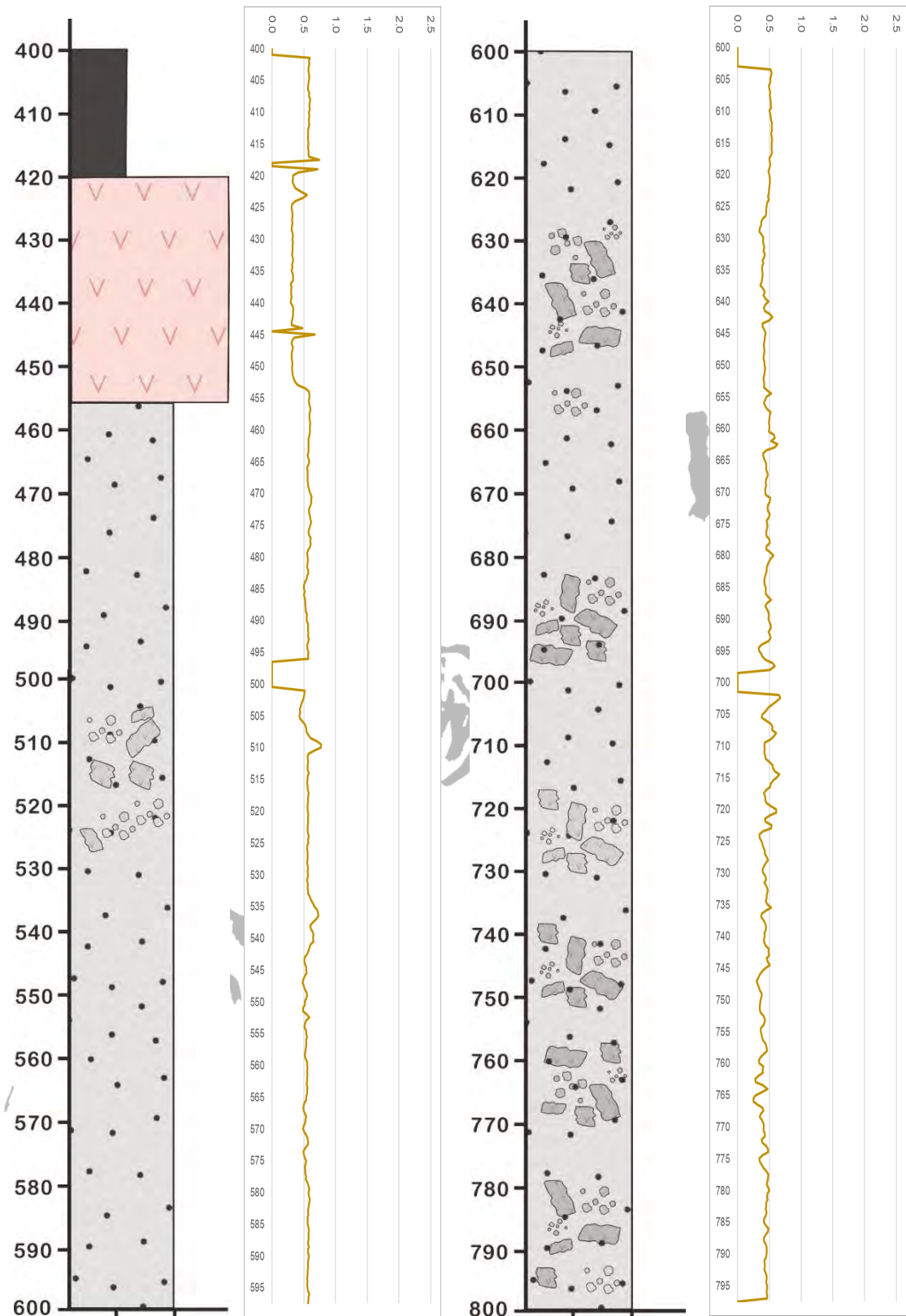


圖 4-241：Site5-2 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

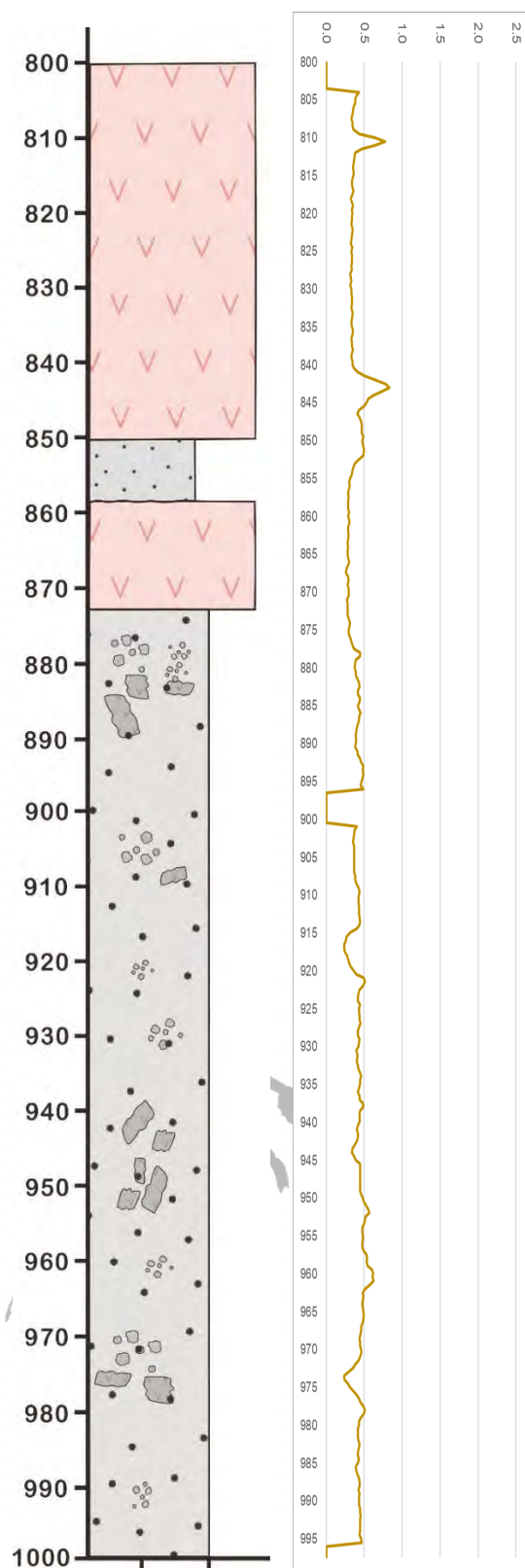


圖 4-242：Site5-2 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site6-1

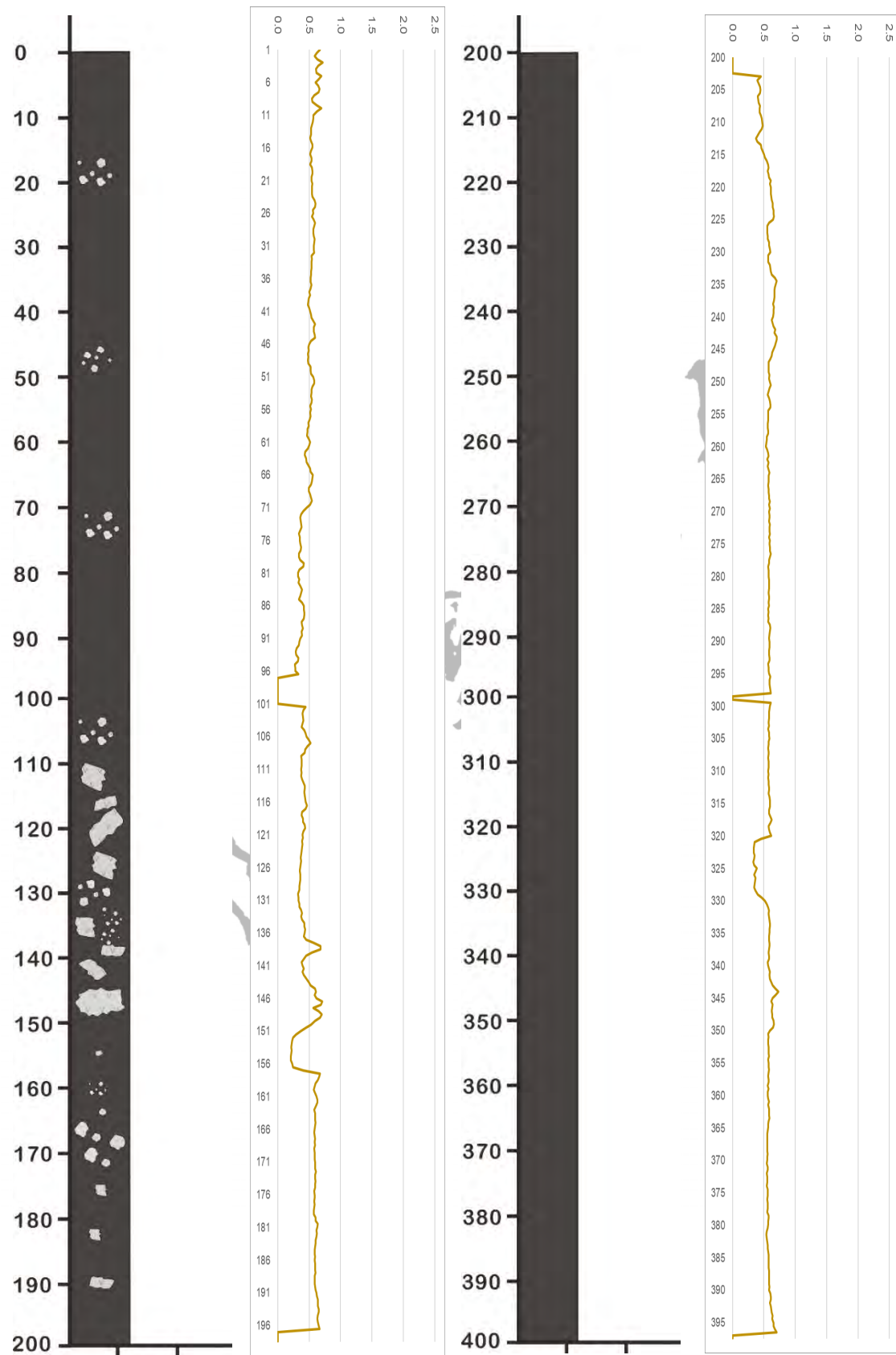


圖 4-243：Site6-1 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

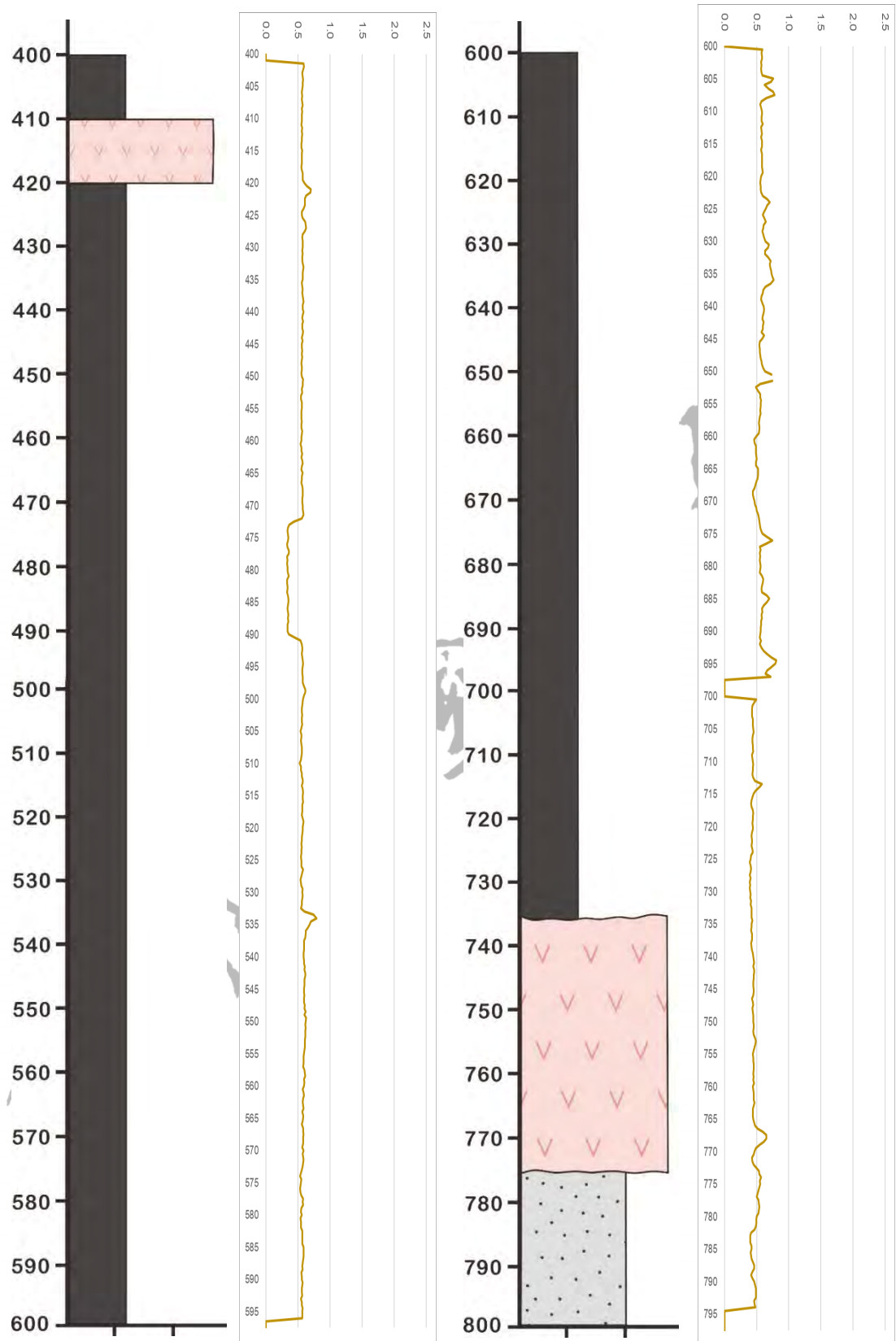


圖 4-244：Site6-1 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

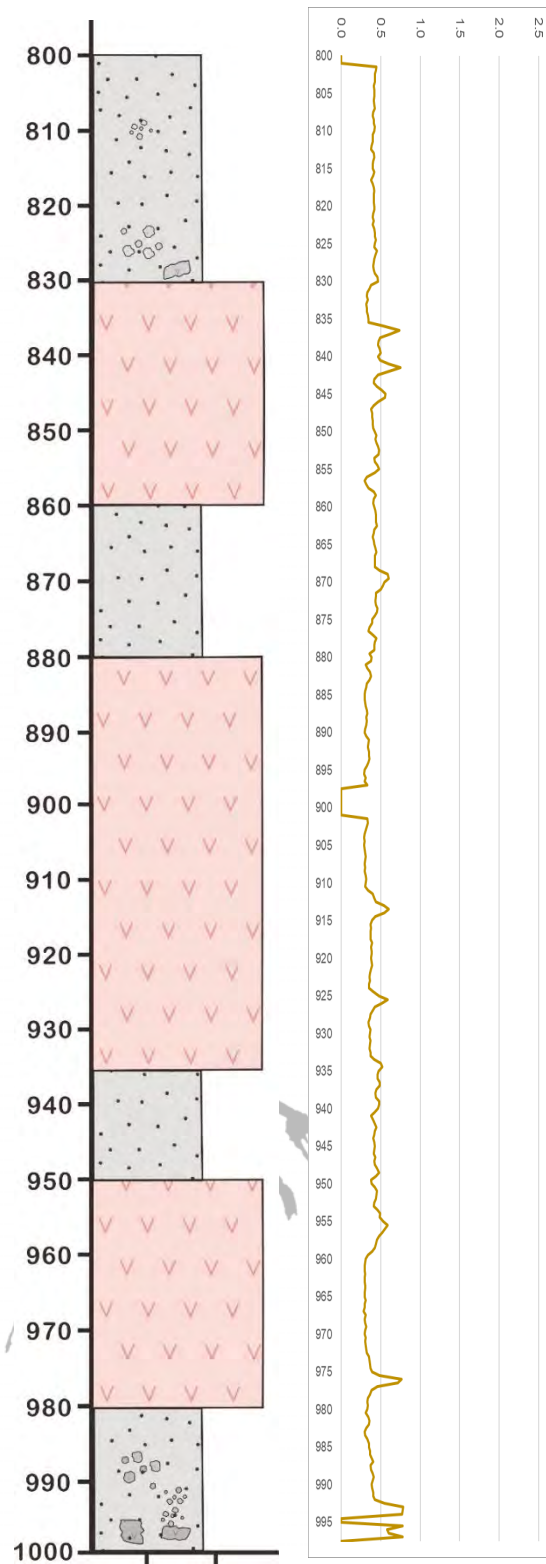


圖 4-245：Site6-1 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Ste6-2

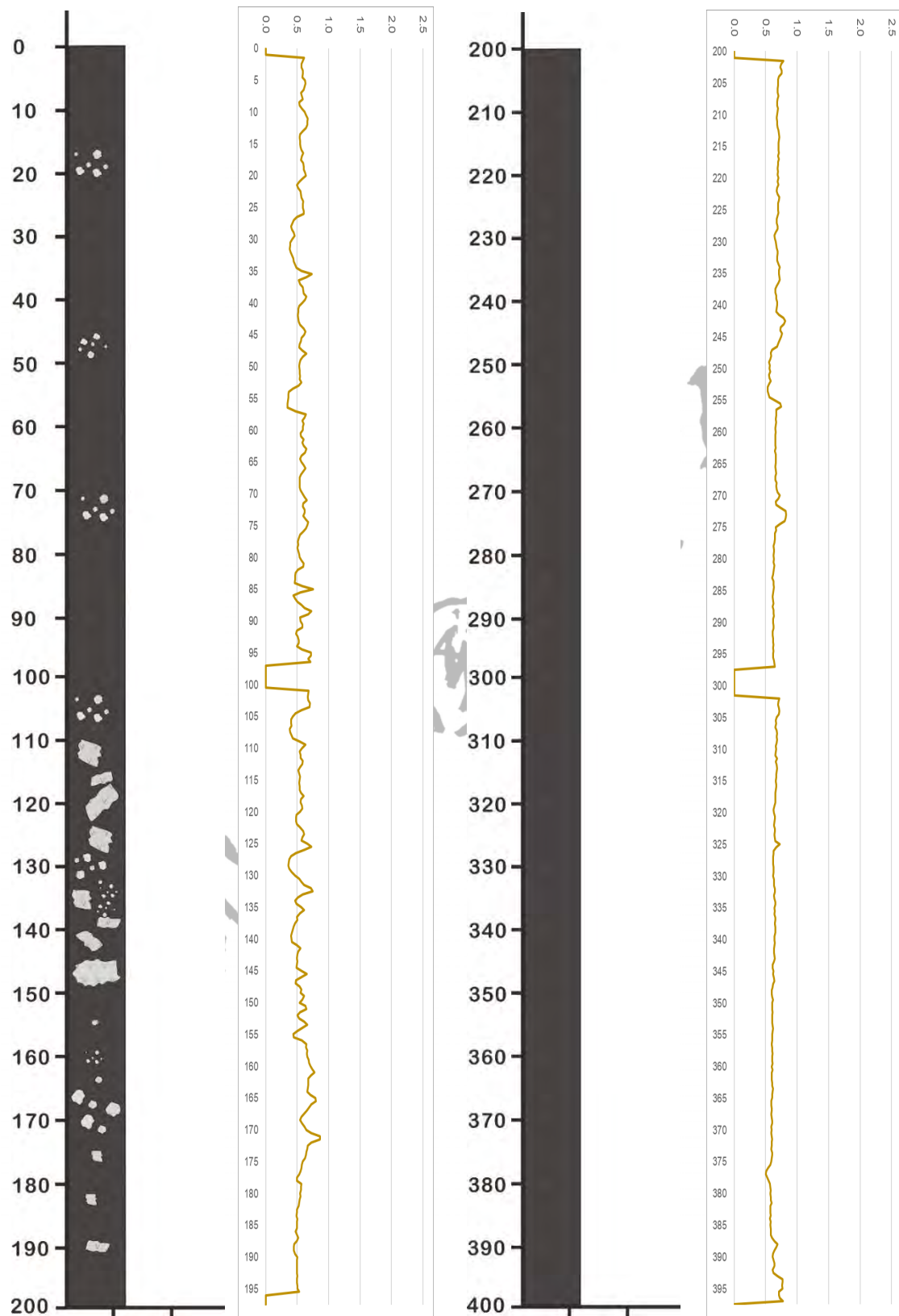


圖 4-246：Site6-2 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

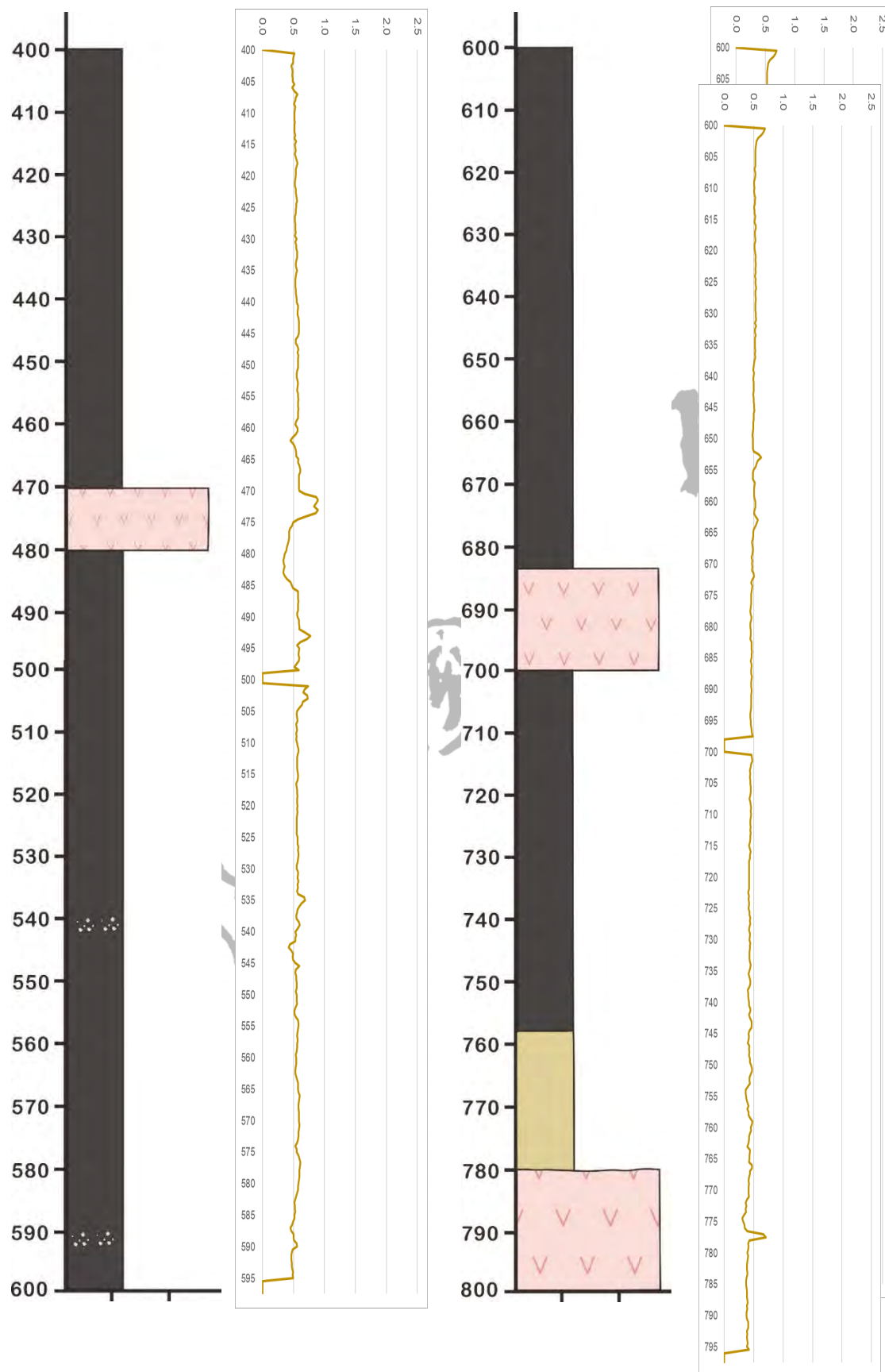


圖 4-247：Site6-2 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

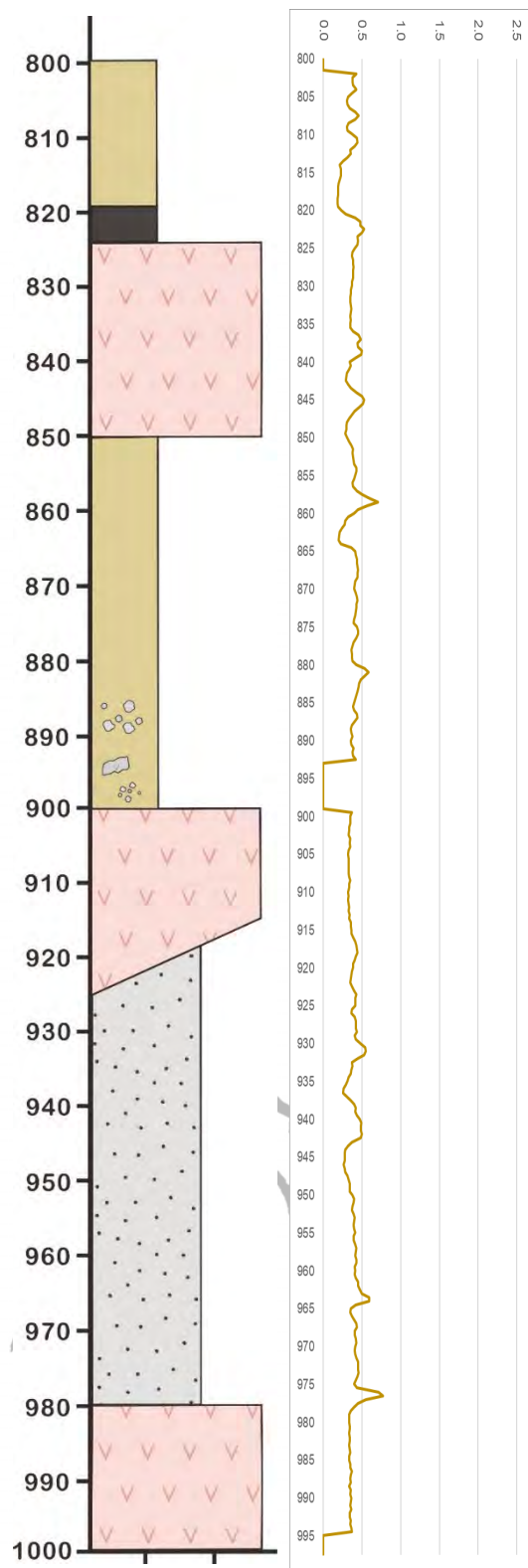


圖 4-248：Site6-2 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site7-1

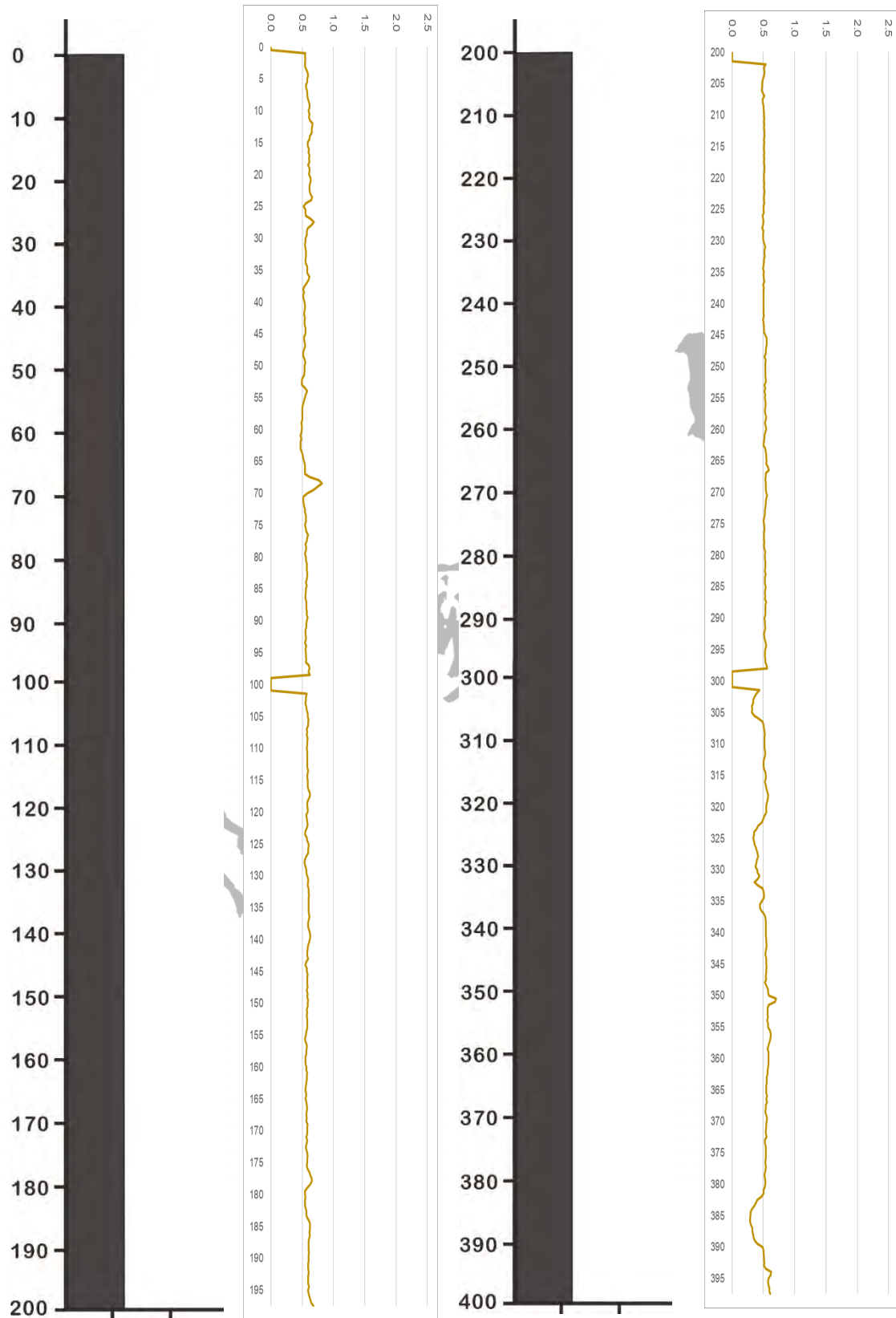


圖 4-249：Site7-1 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

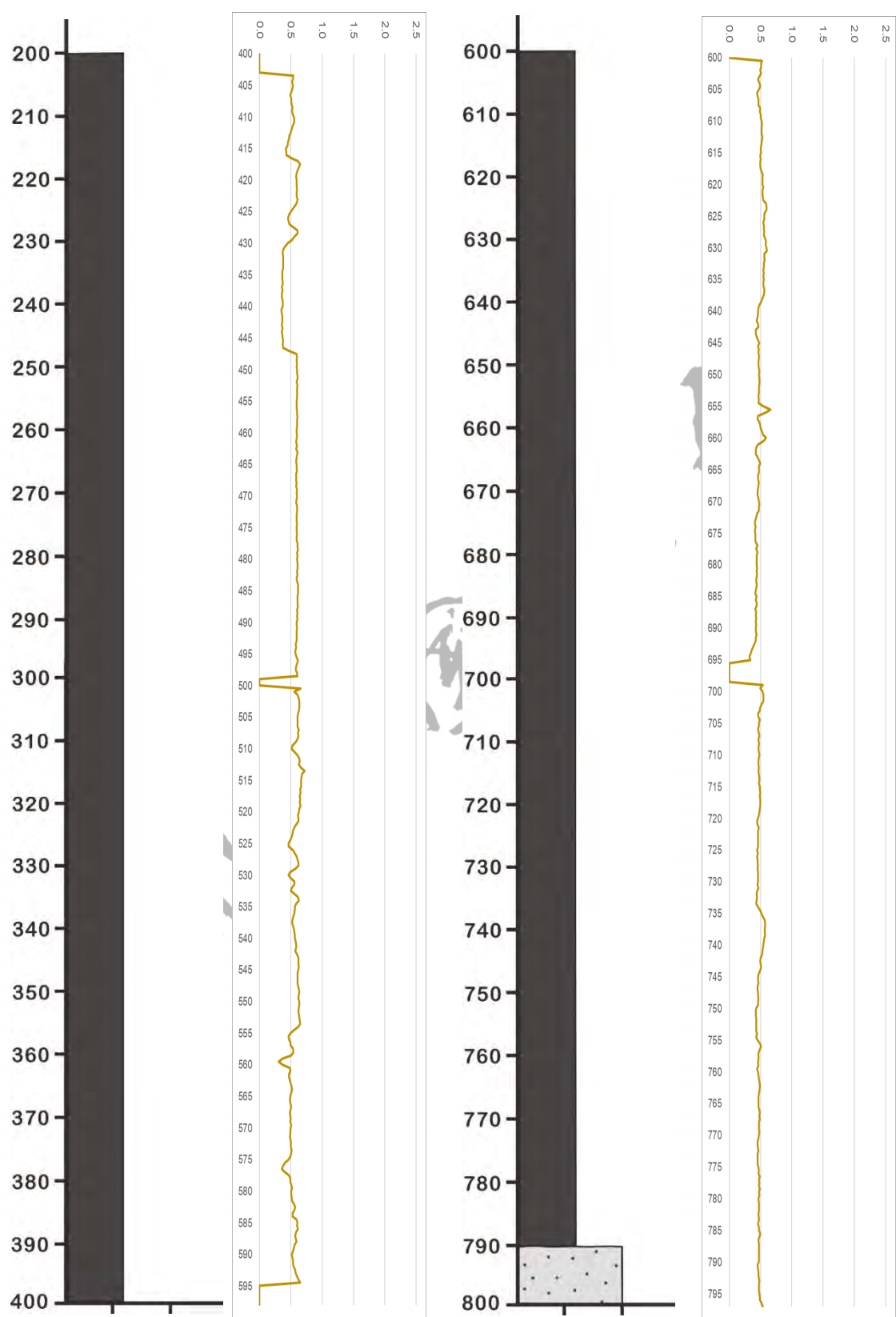


圖 4-250：Site7-1 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

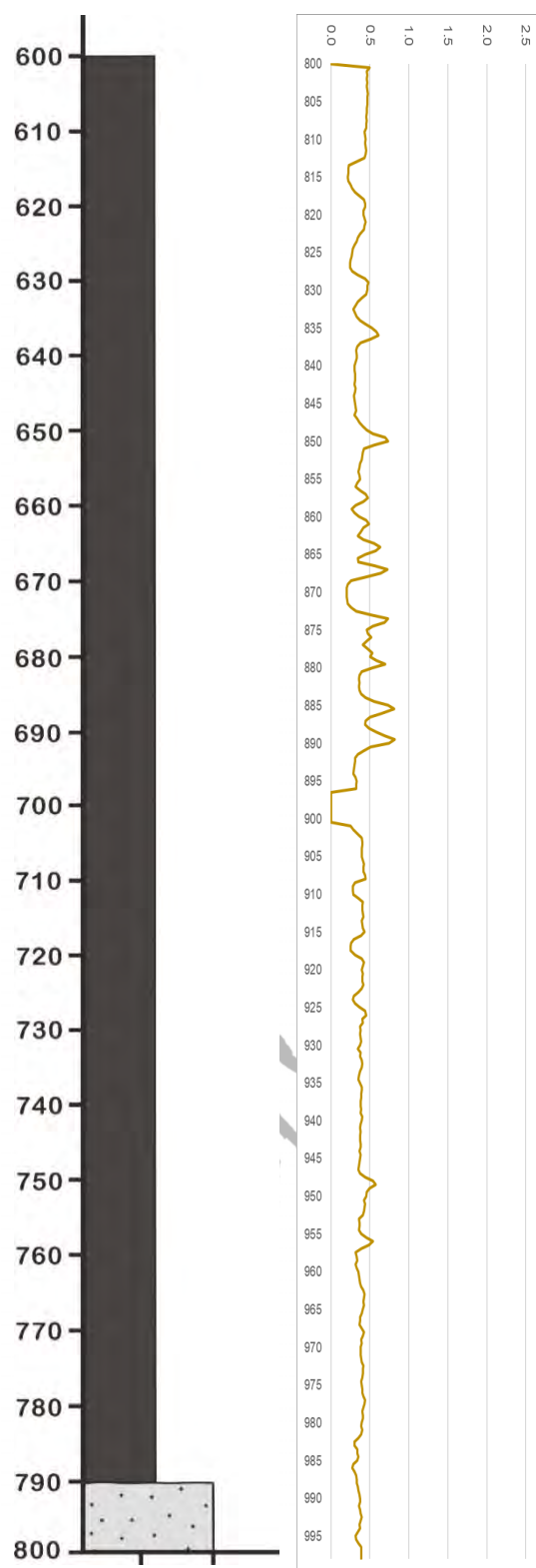


圖 4-251：Site7-1 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site7-2

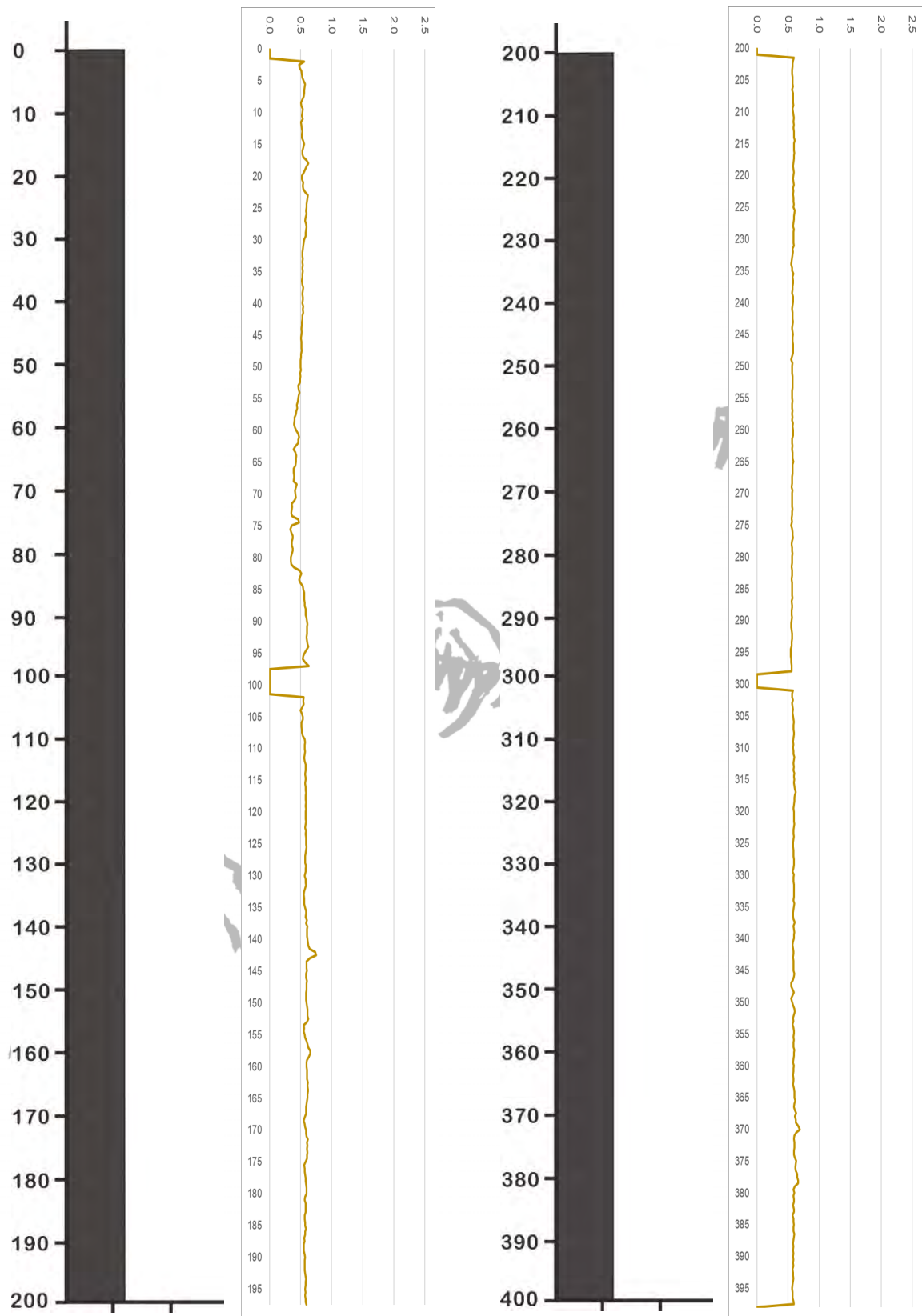


圖 4-252：Site7-2 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

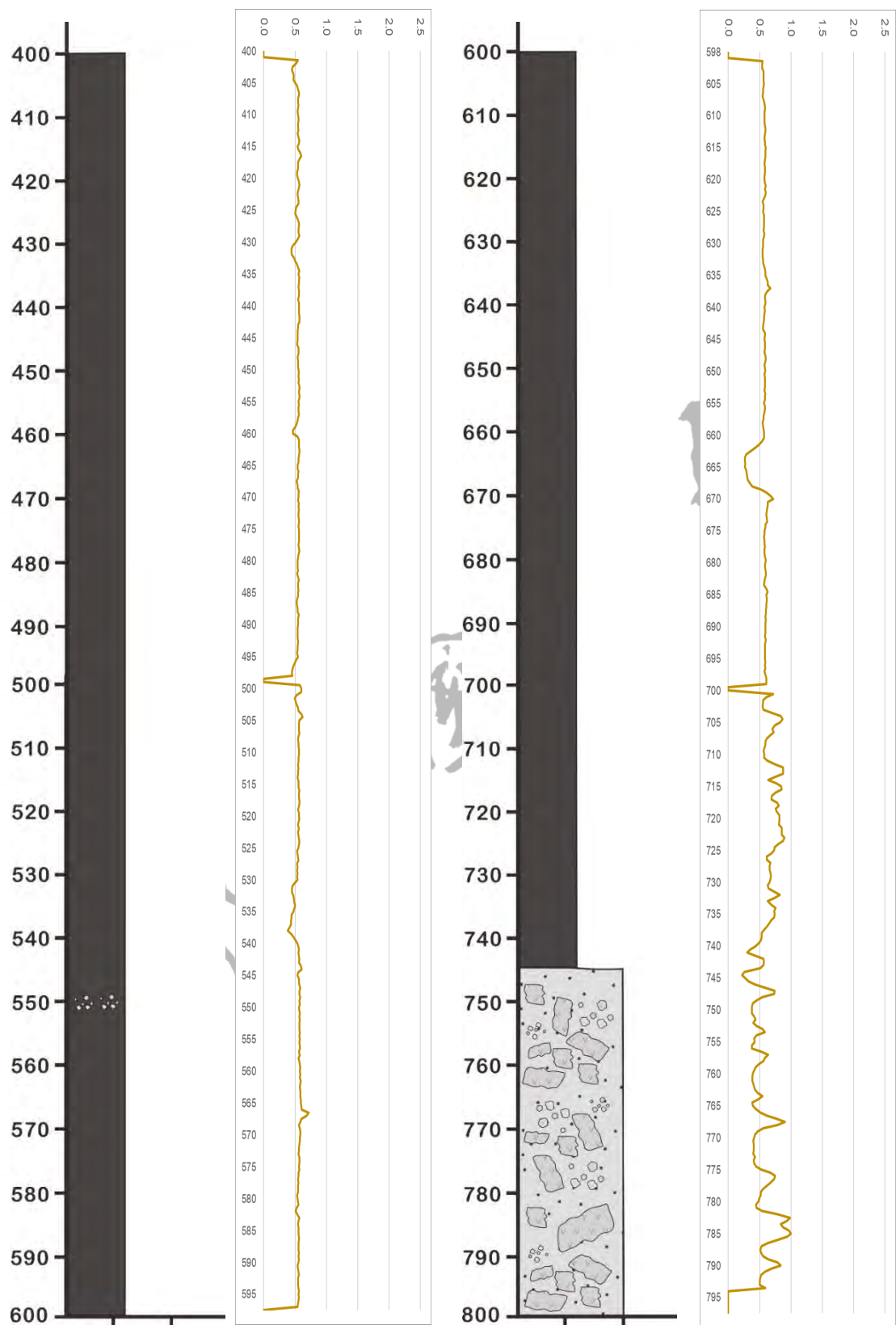


圖 4-253：Site7-2 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

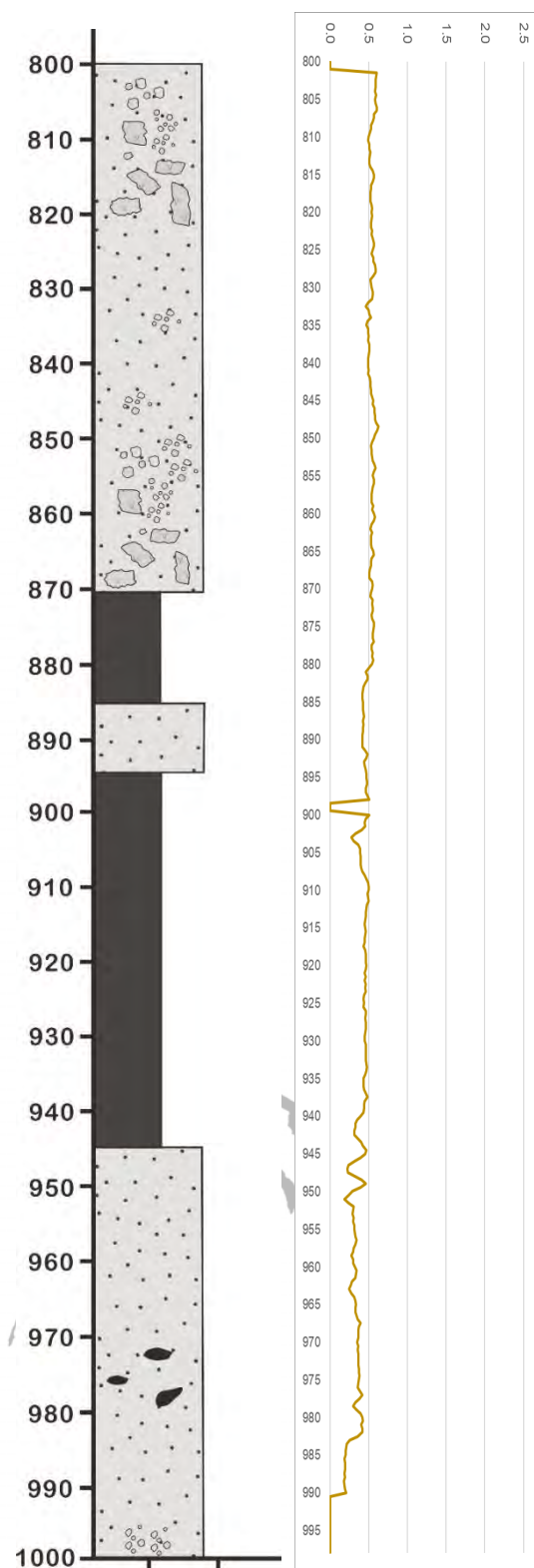


圖 4-254：Site7-2 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site8-1

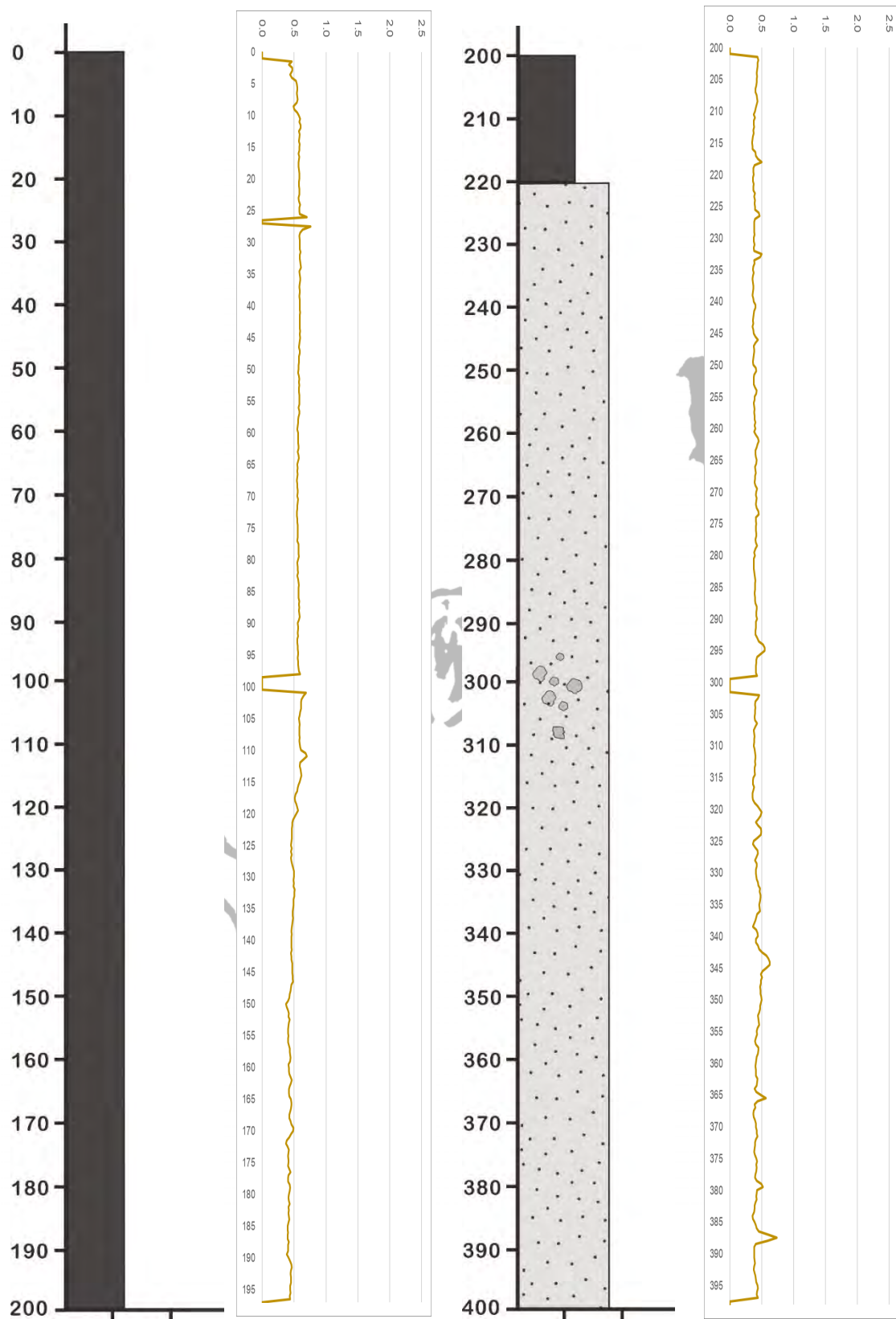


圖 4-255： Site8-1 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

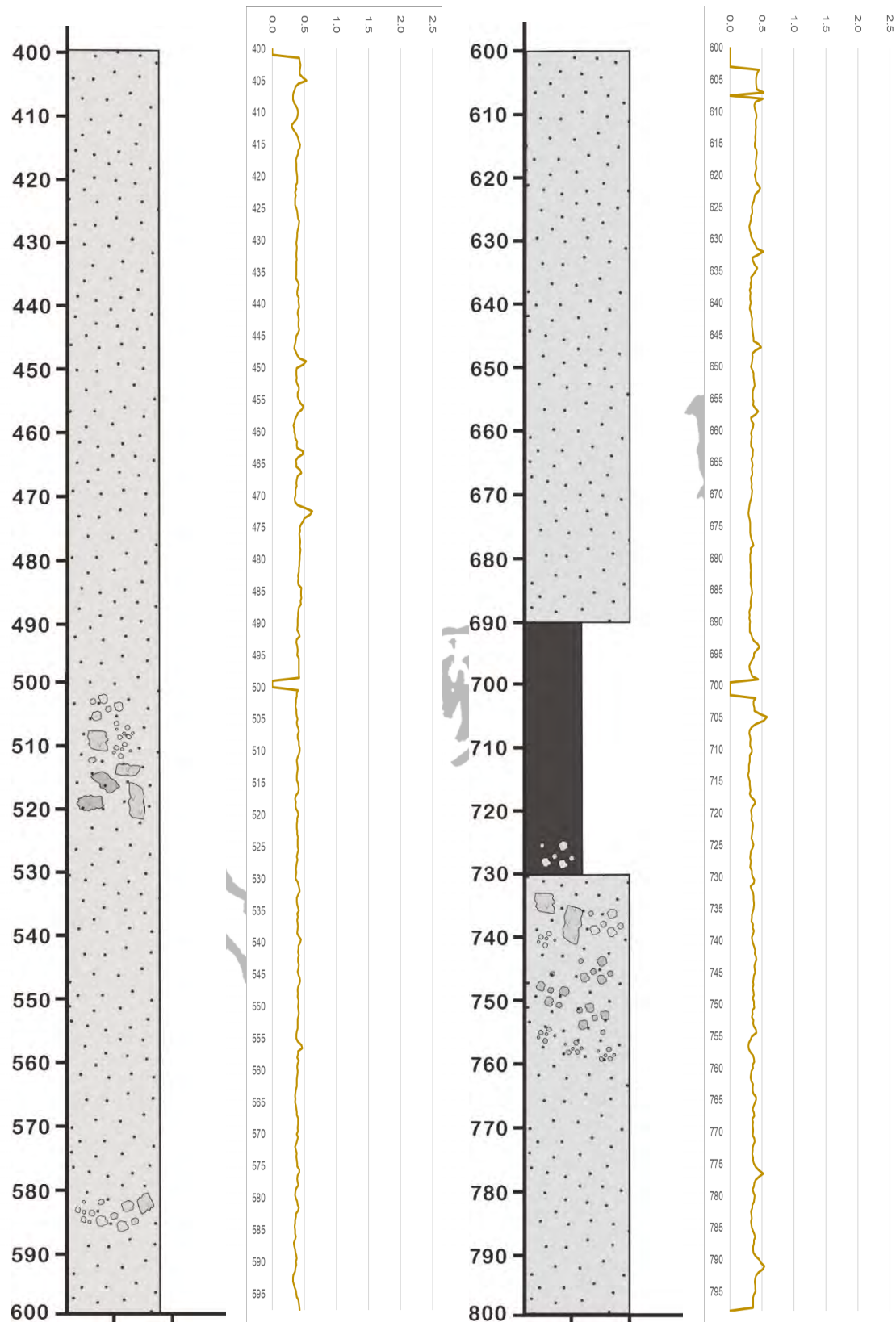


圖 4-256： Site8-1 4-6m & 6-8m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

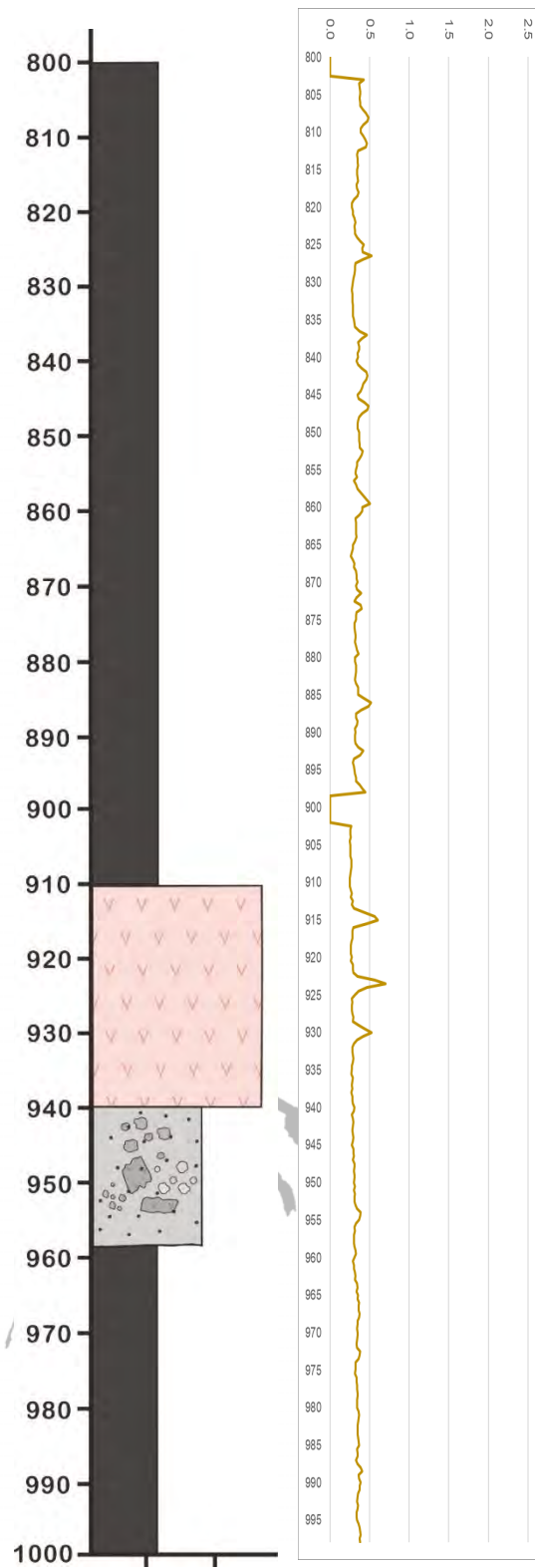


圖 4-257：Site8-1 8-10m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

Site8-2

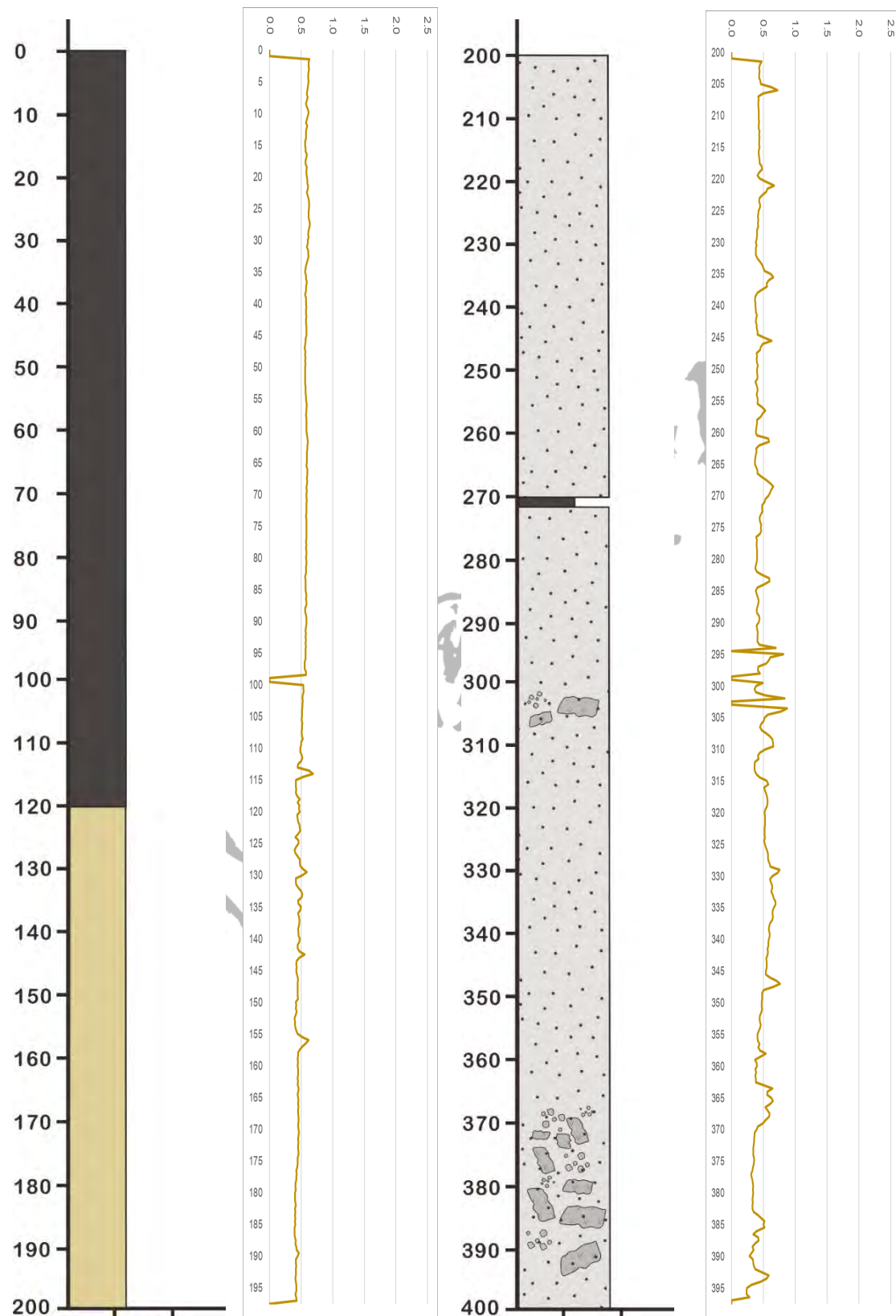


圖 4-258：Site8-2 0-2m & 2-4m 岩芯孔隙率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

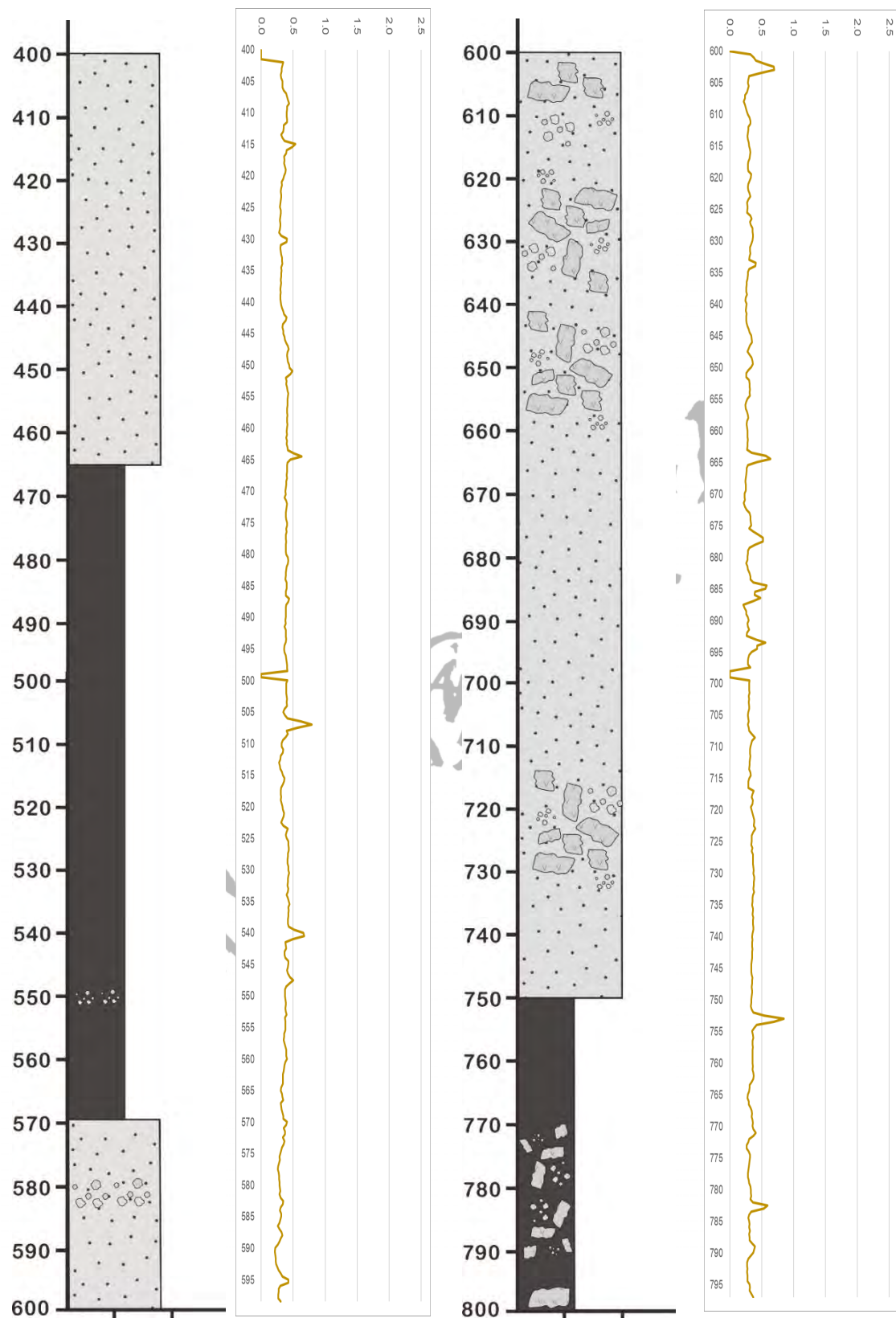


圖 4-259：Site8-2 4-6m & 6-8m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

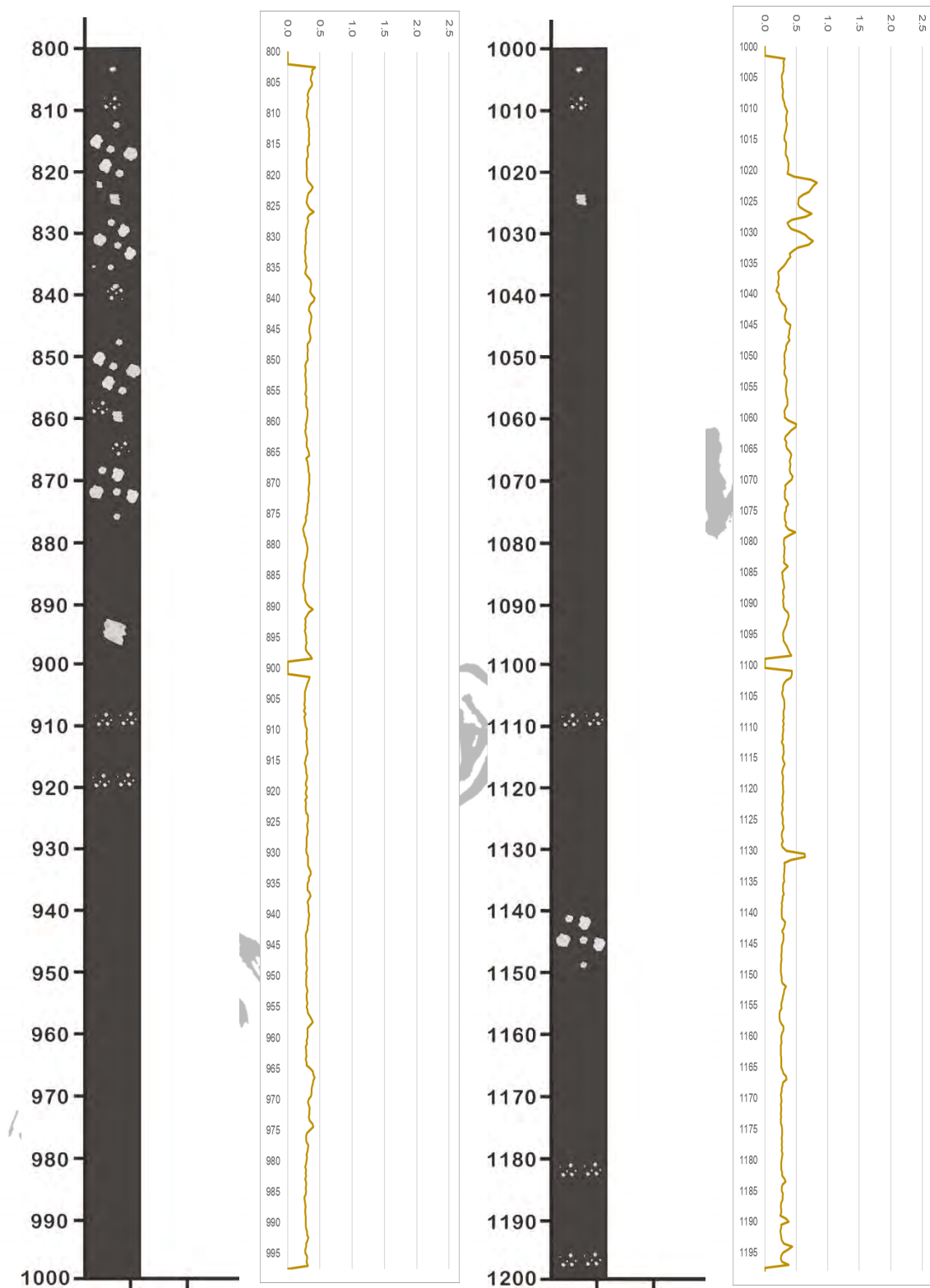


圖 4-260：Site8-2 8-10m & 10-12m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

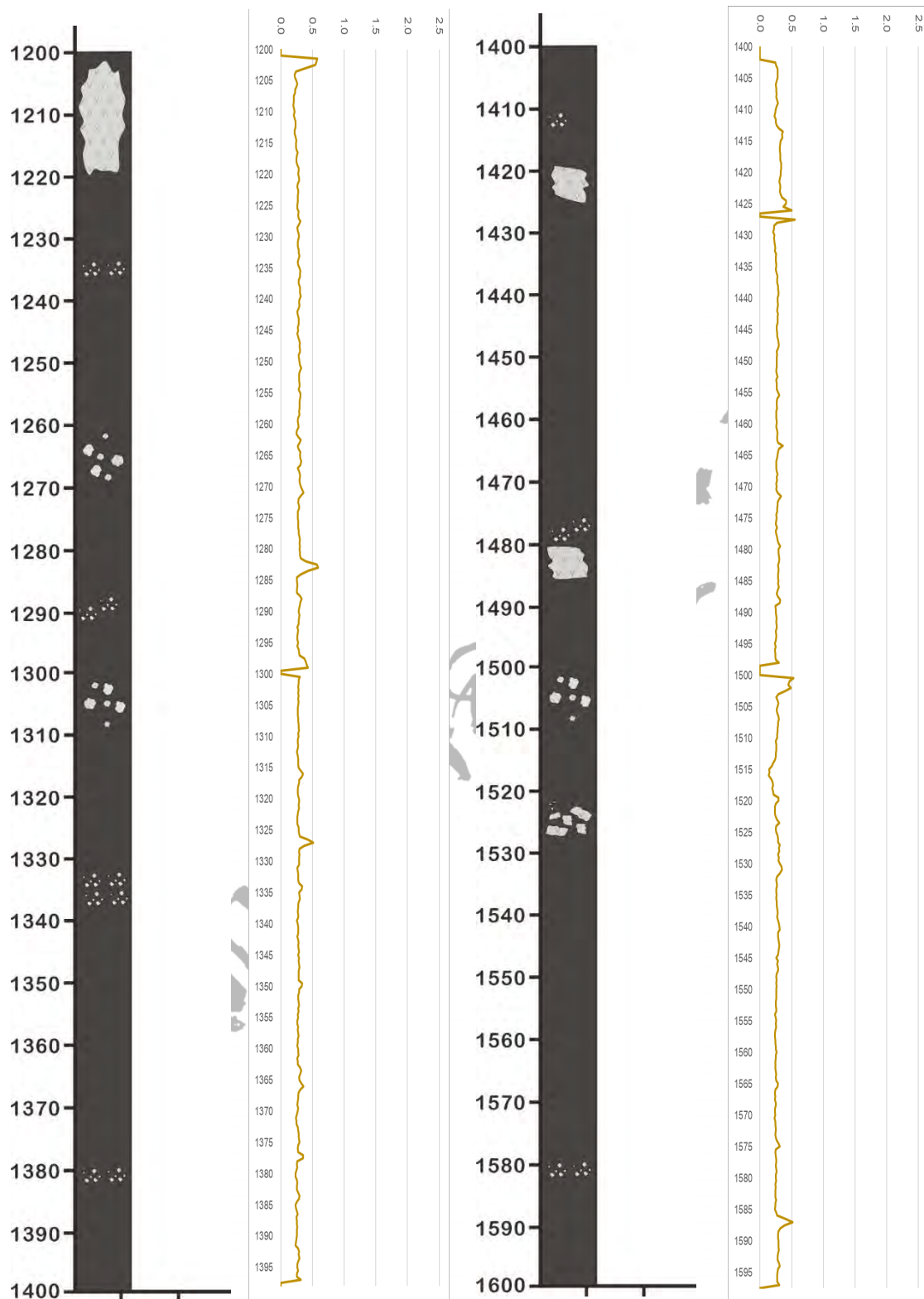


圖 4-261：Site8-2 12-14m & 14-16m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

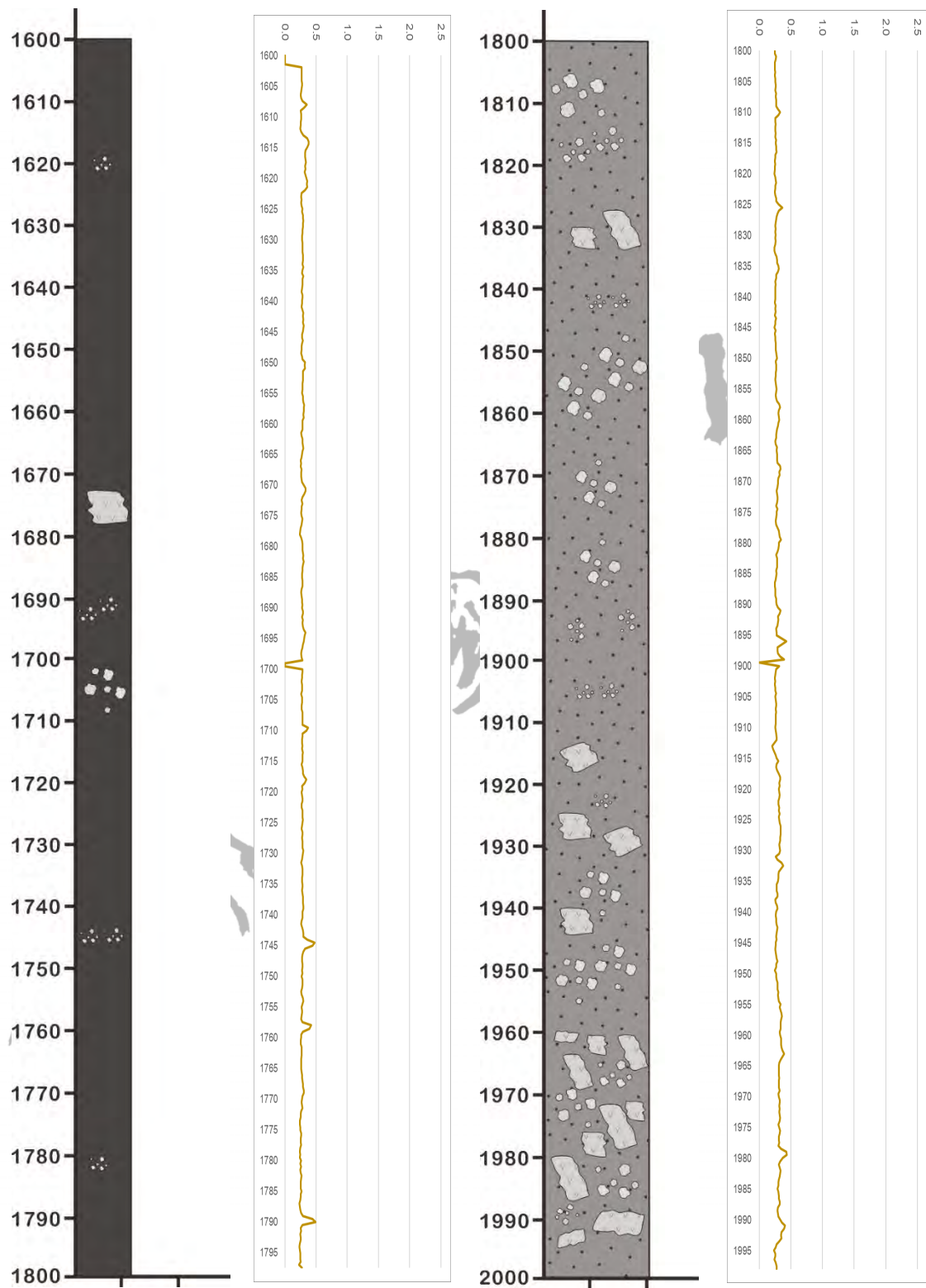


圖 4-262 : Site8-2 16-18m & 18-20m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

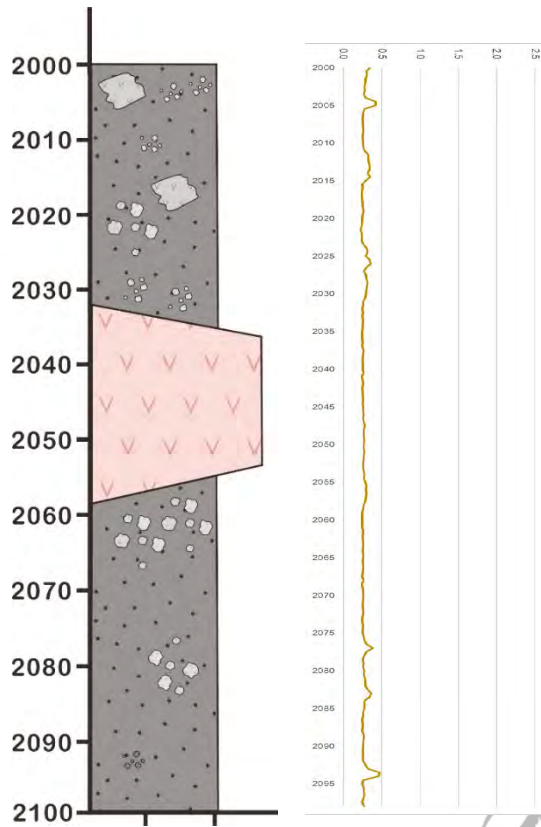


圖 4-263：Site8-2 20-21m 岩芯磁感率與岩芯柱狀圖。孔隙率單位為%。

4-3、密度

同一個站位的岩芯，就相對密度而言，展現泥岩的密度略比火山質砂岩低，火山質砂岩又略比安山岩低的趨勢。但整合所有點位之岩芯進行比較，各點位之岩芯中同岩性的密度差異似乎又有所變化。如 Site5-1 的泥岩低於 2.0，但 Site6-2 6-8m 的泥岩密度卻約為 2.0，兩者展現明顯的差異。

Site5-1

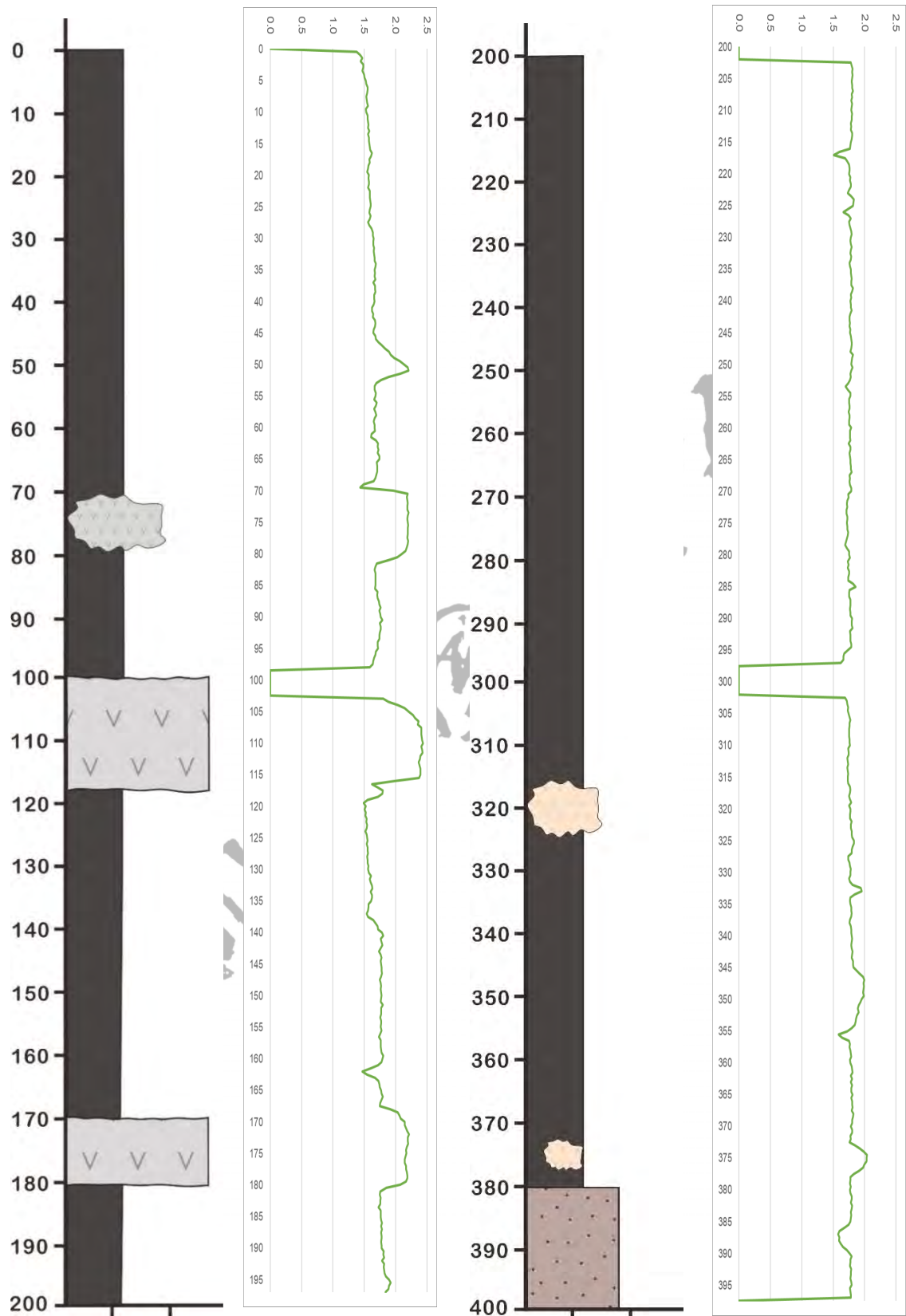


圖 4-264： Site5-1 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

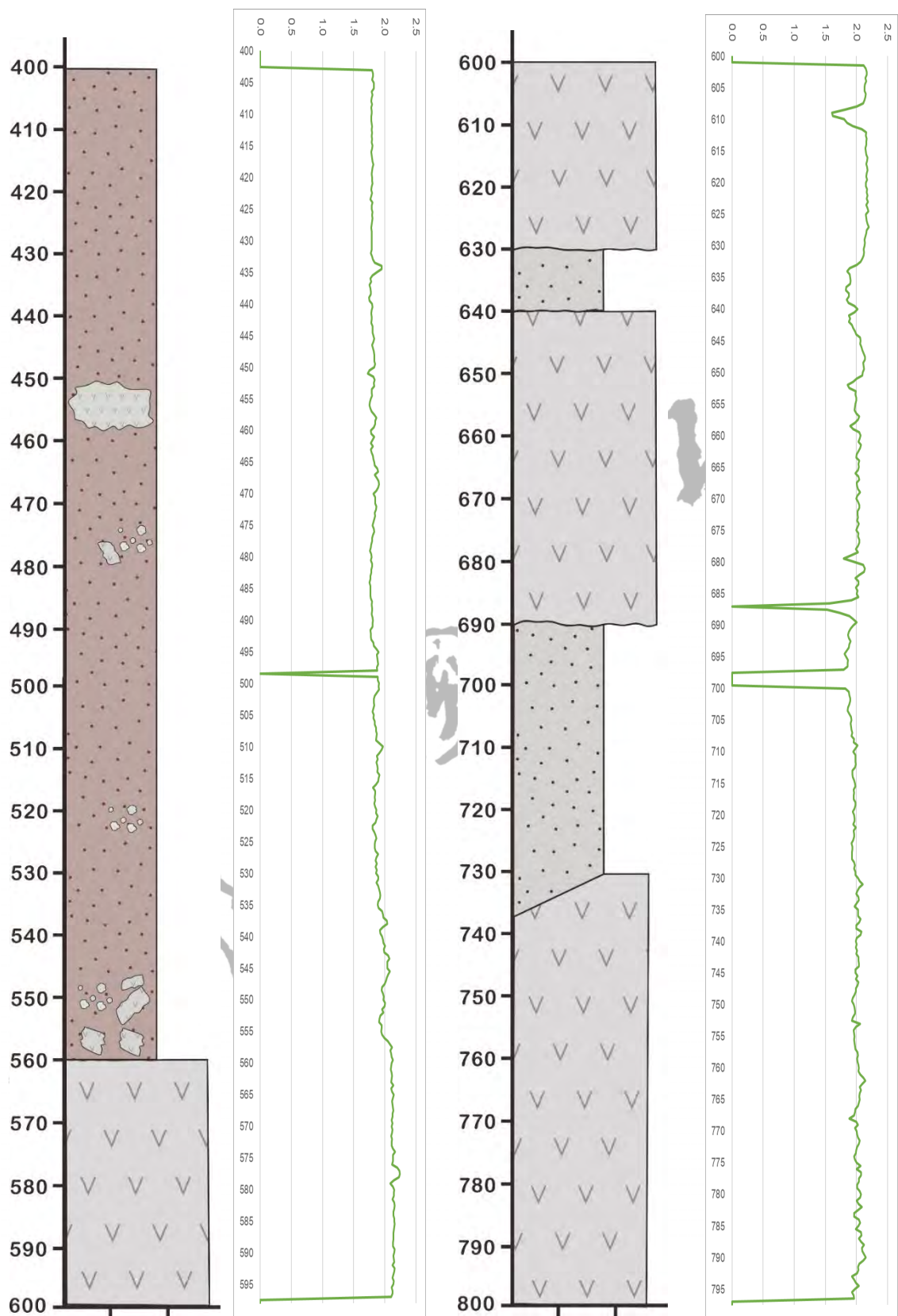


圖 4-265：Site5-1 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

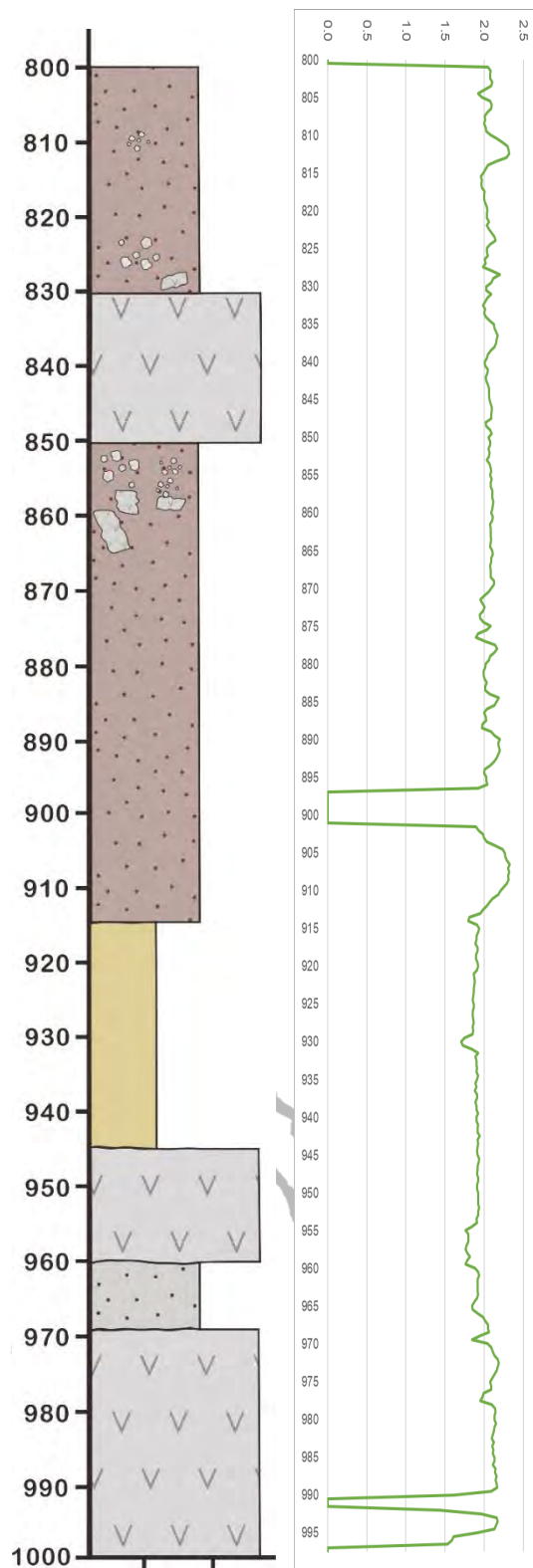


圖 4-266：Site5-1 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site5-2

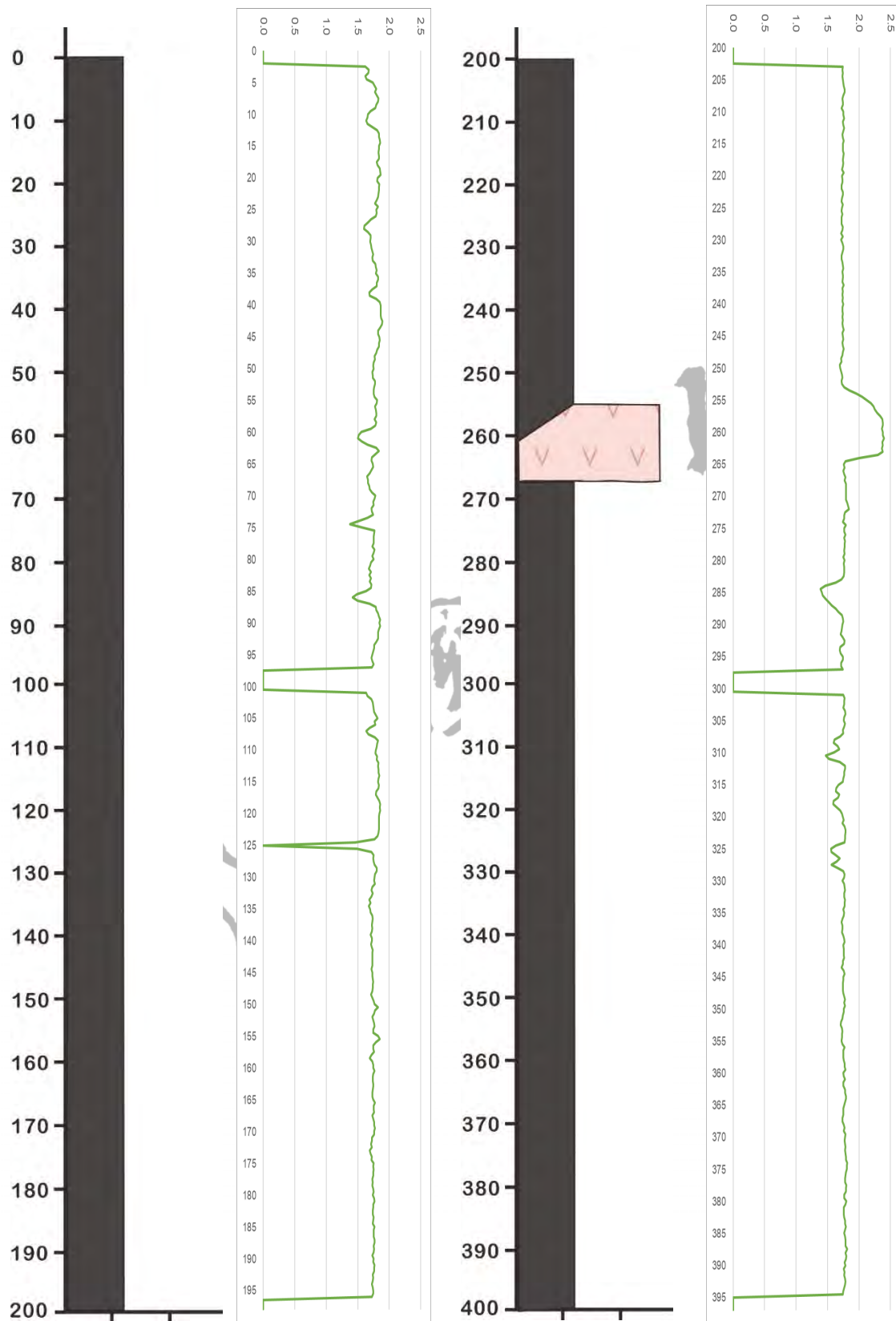


圖 4-267：Site5-2 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

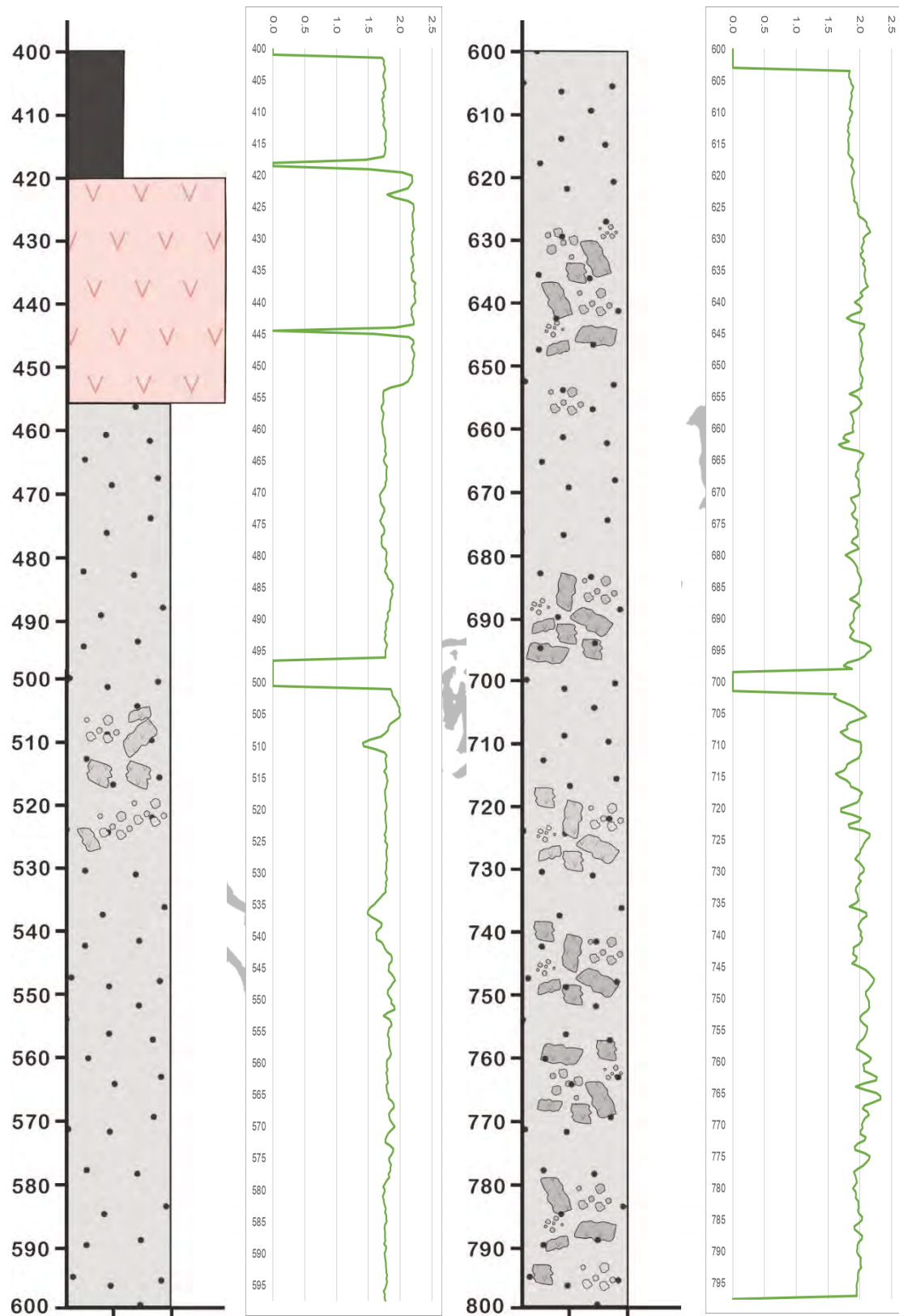


圖 4-268： Site5-2 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

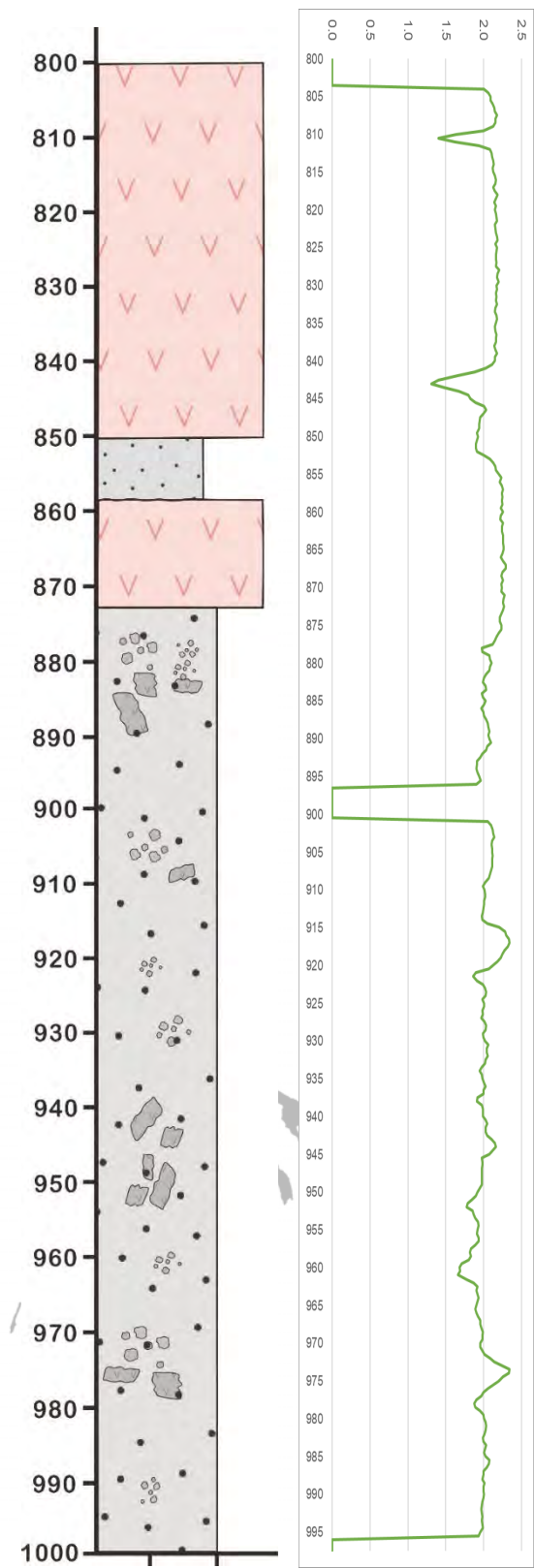


圖 4-269：Site5-2 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

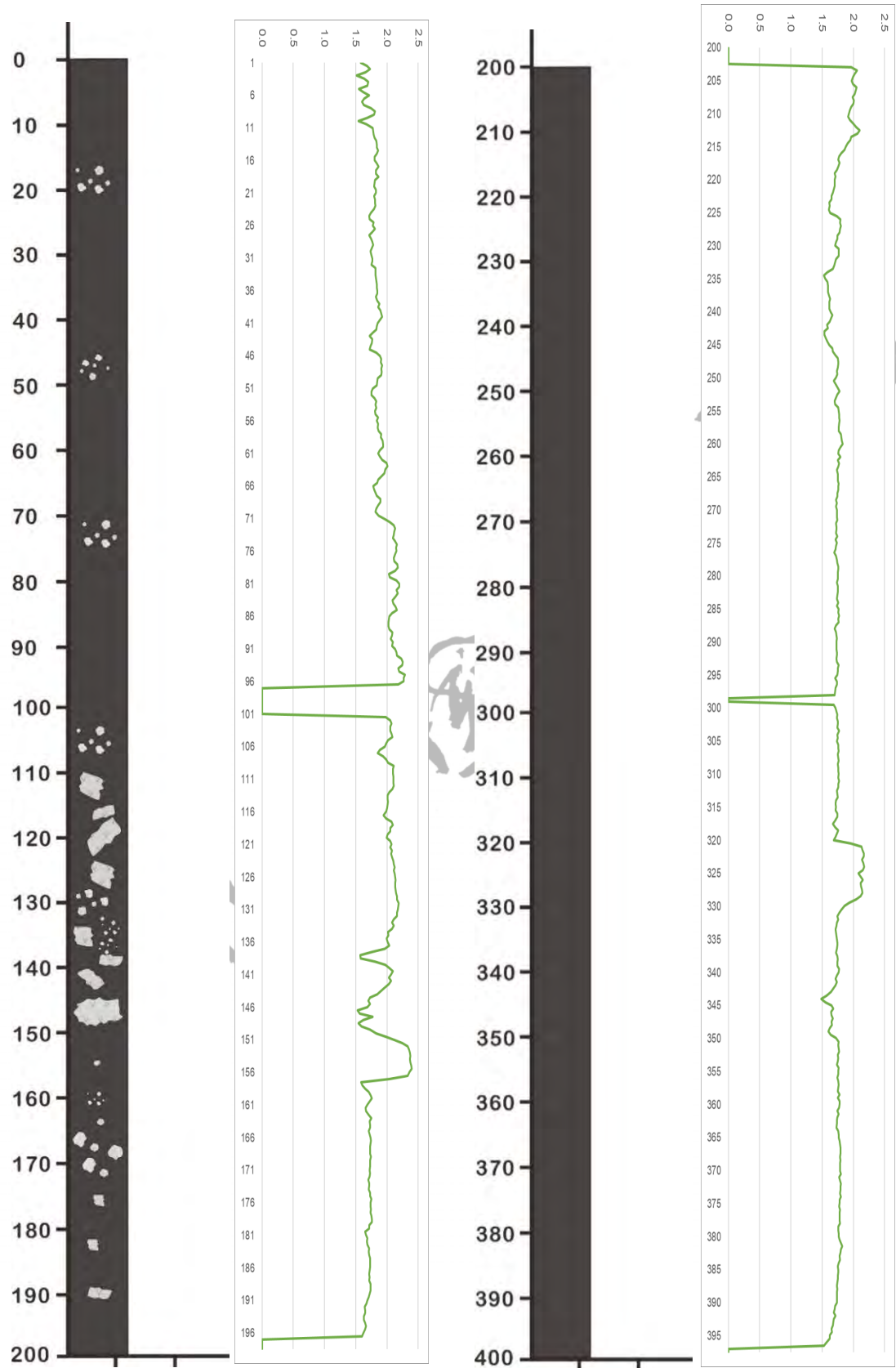


圖 4-270： Site6-1 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site6-1

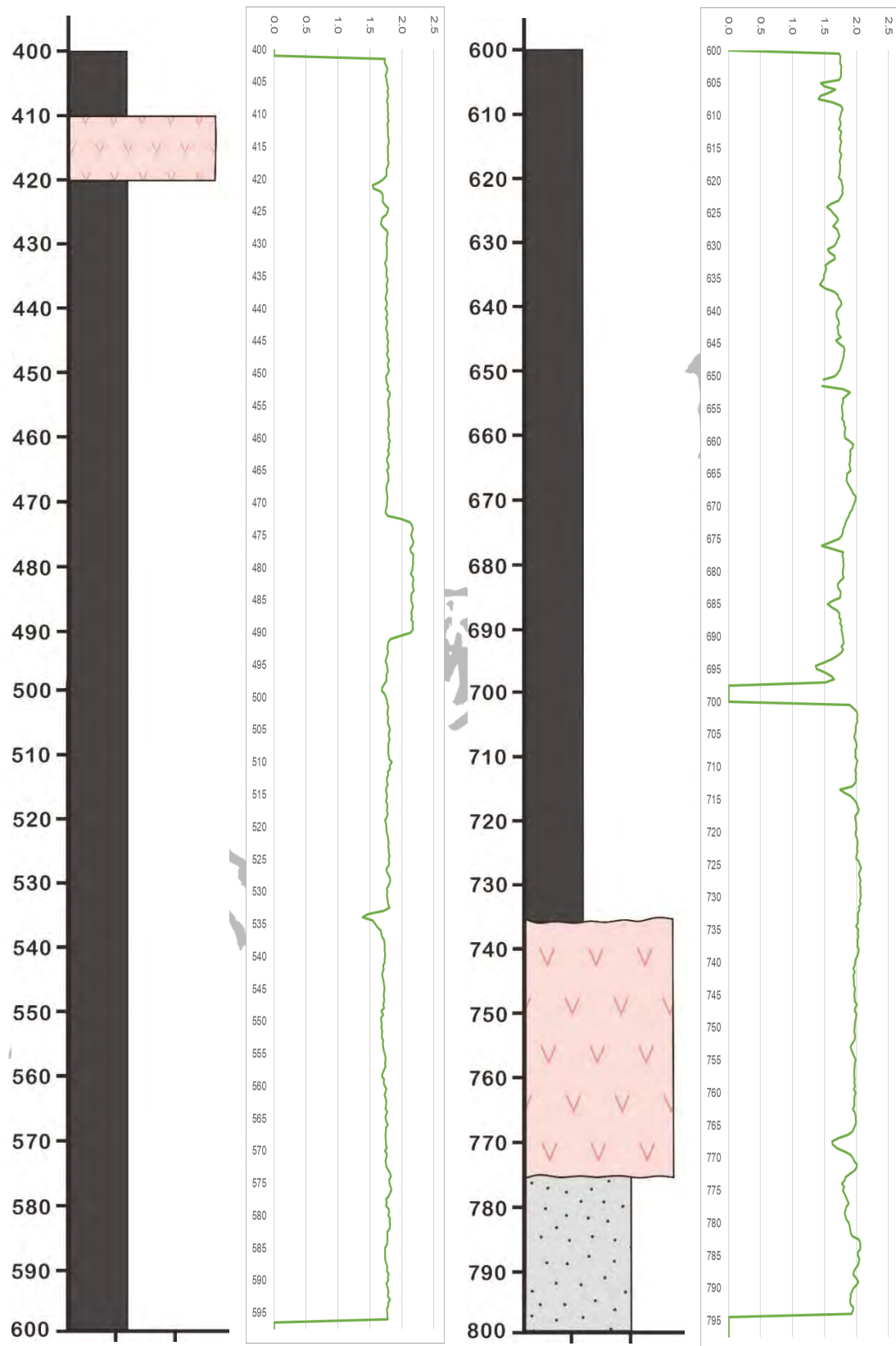


圖 4-271：Site6-1 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

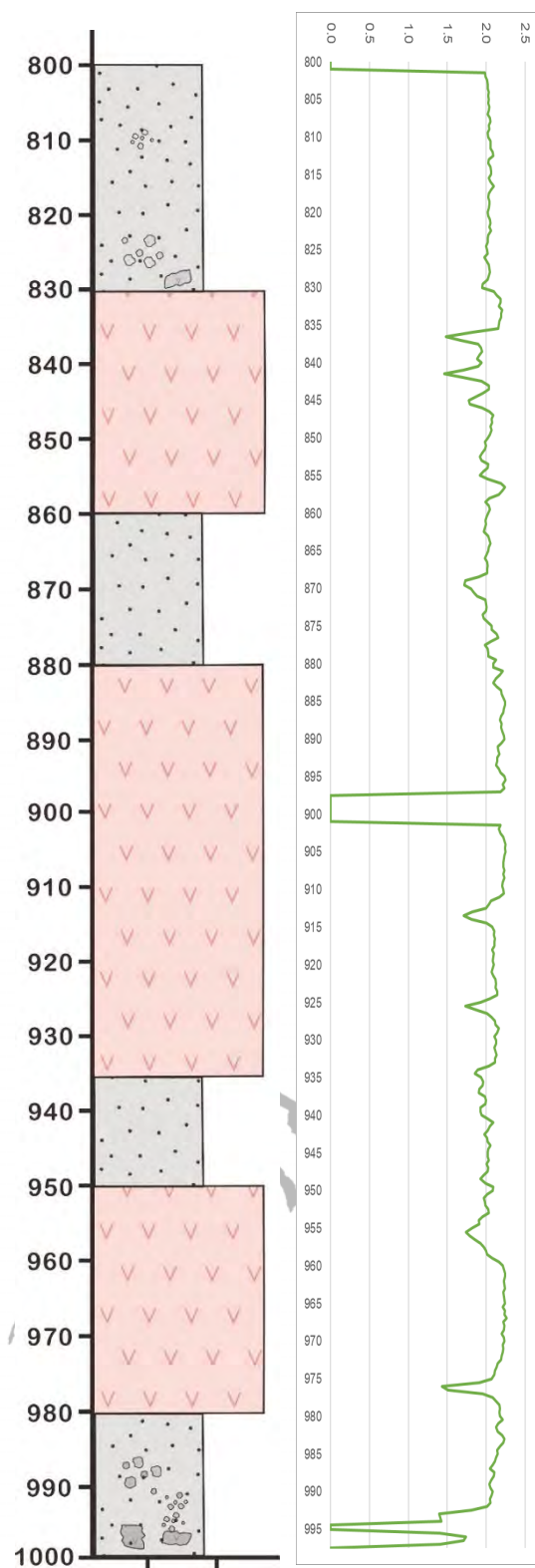


圖 4-272：Site6-1 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Ste6-2

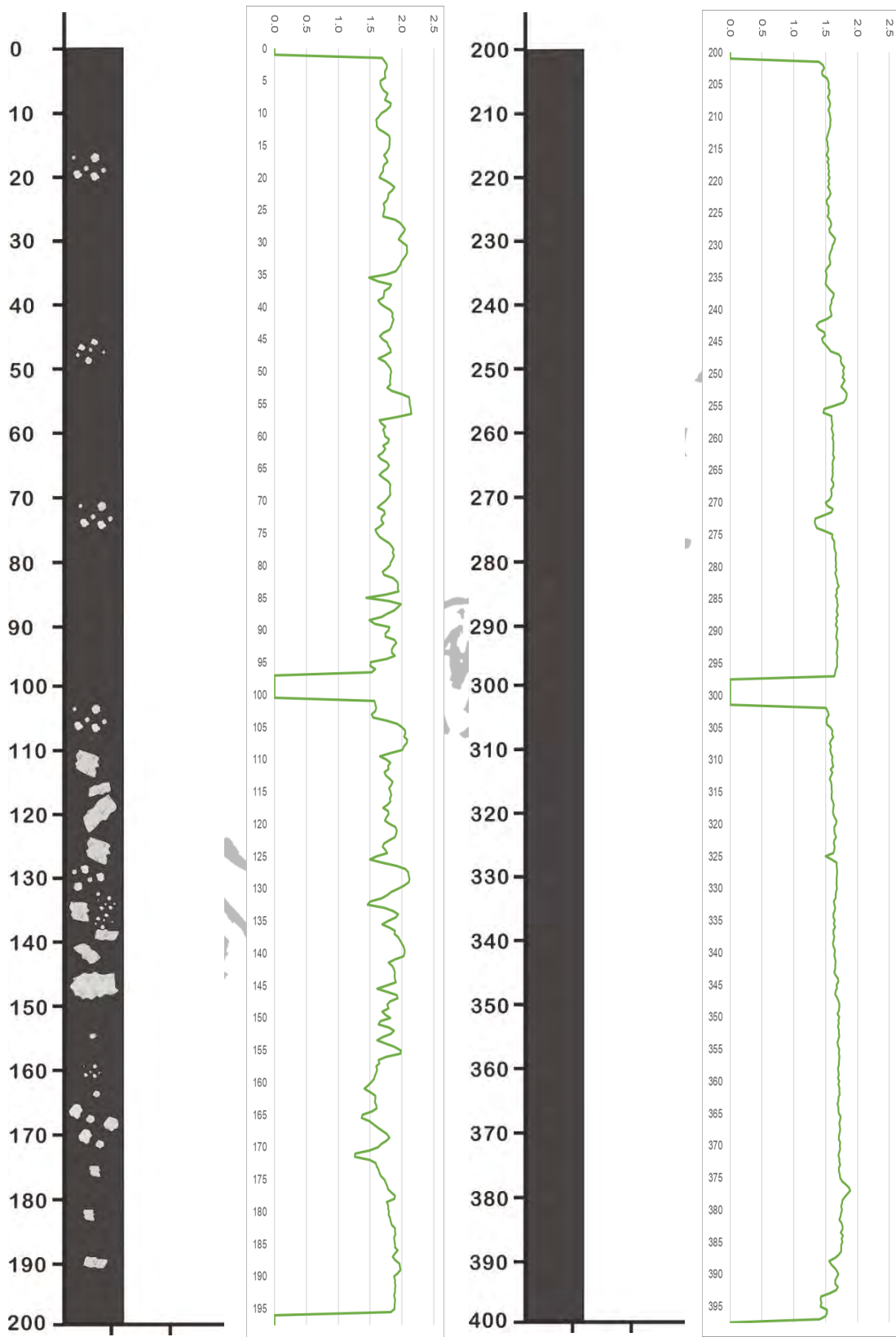


圖 4-273：Site6-2 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

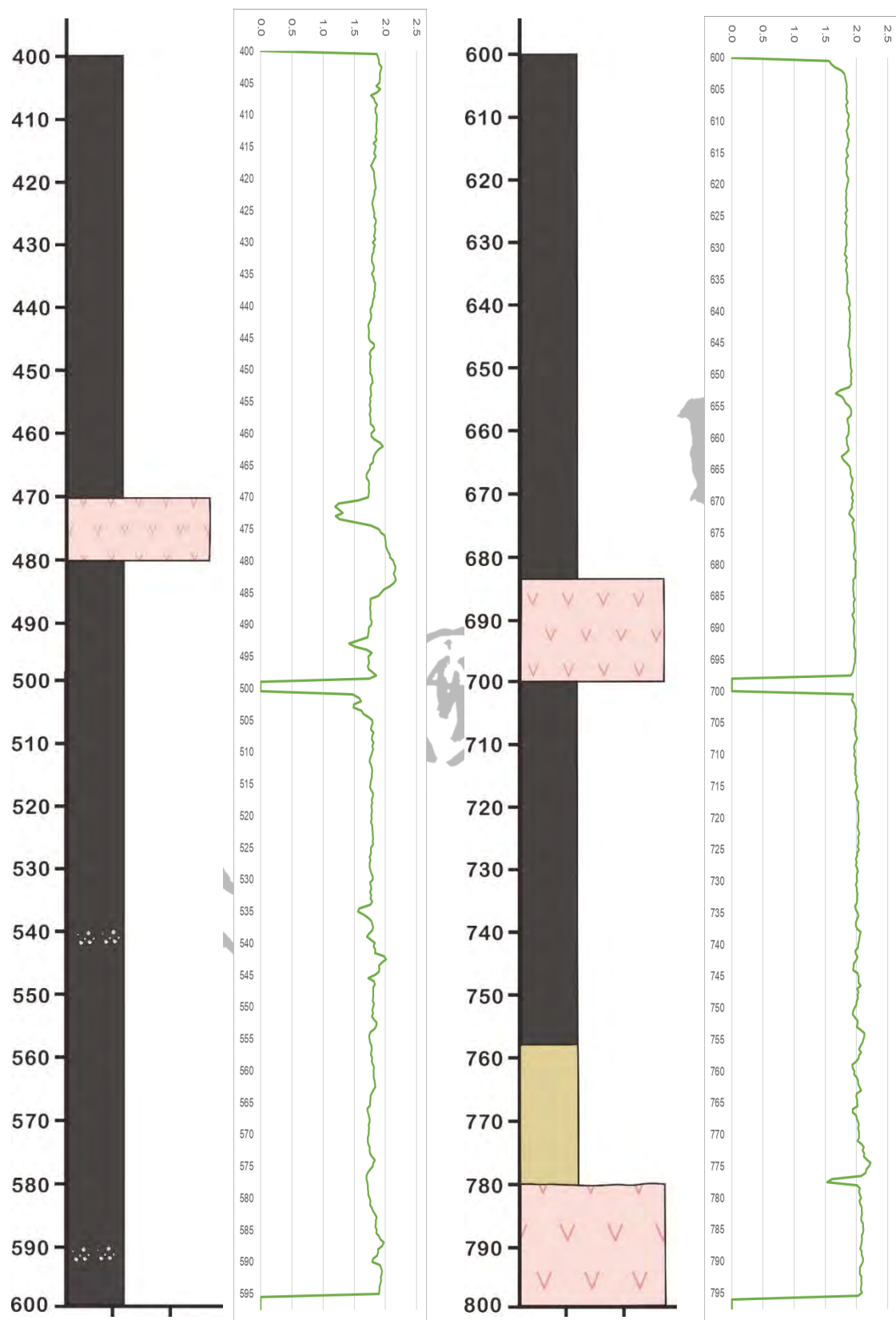


圖 4-274：Site6-2 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

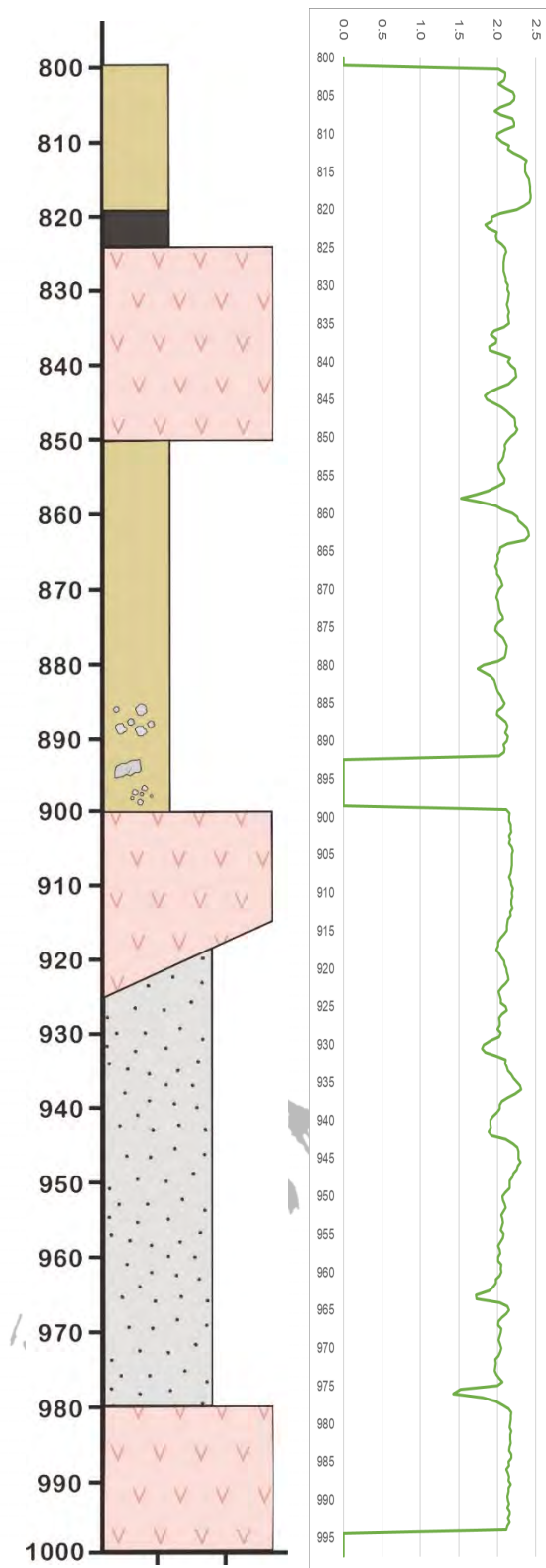


圖 4-275：Site6-2 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site7-1

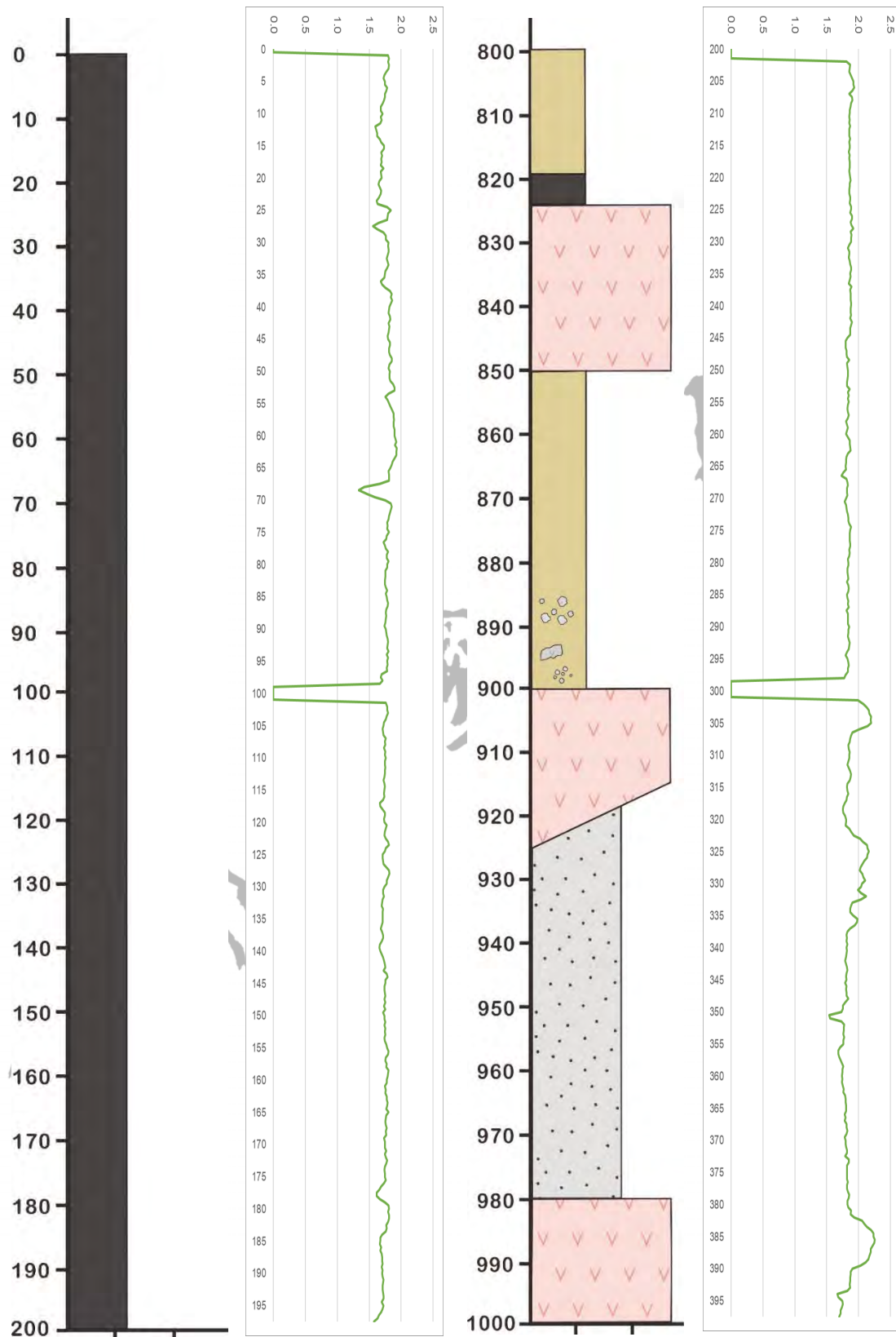


圖 4-276：Site7-1 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

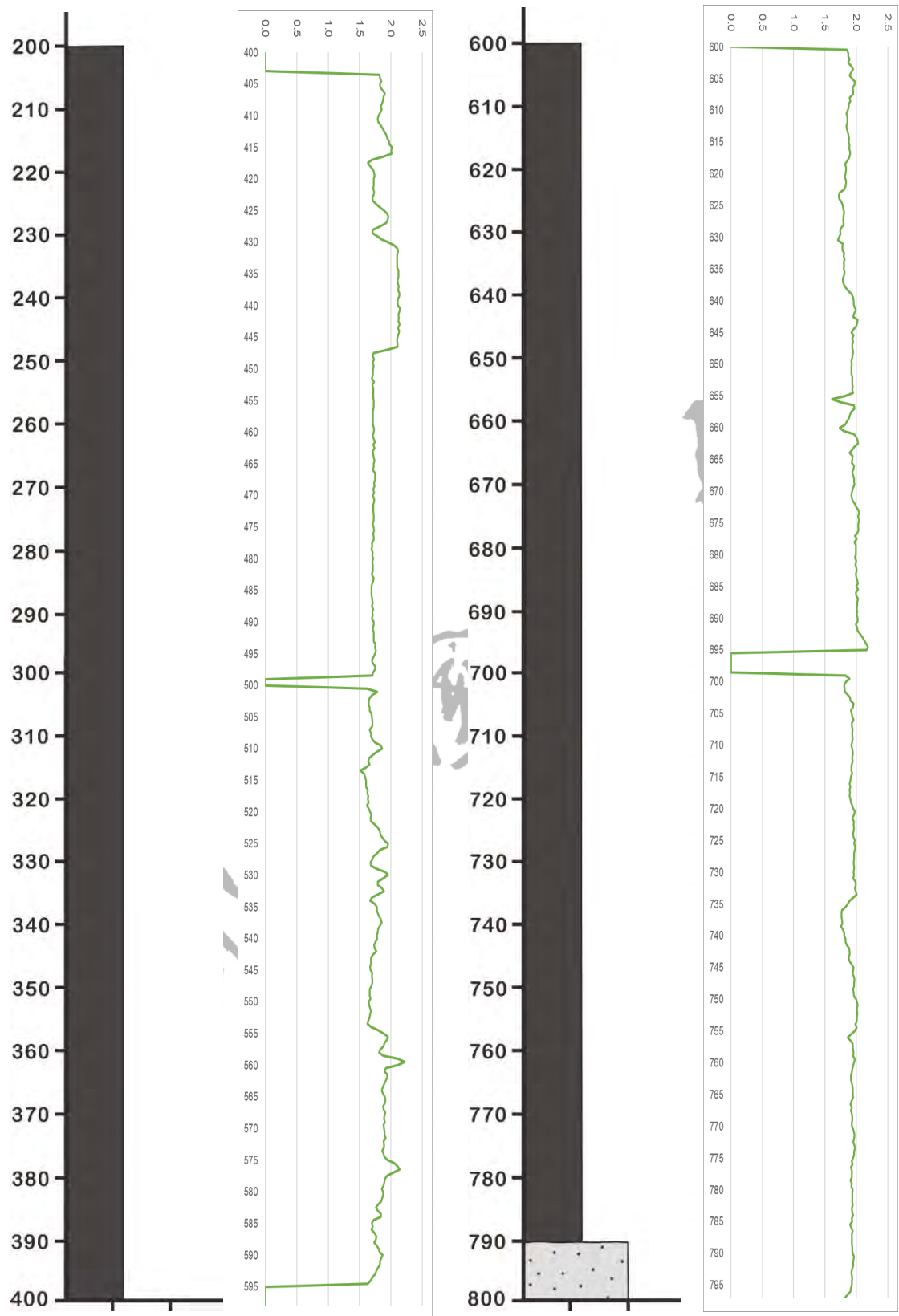


圖 4-277： Site7-1 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

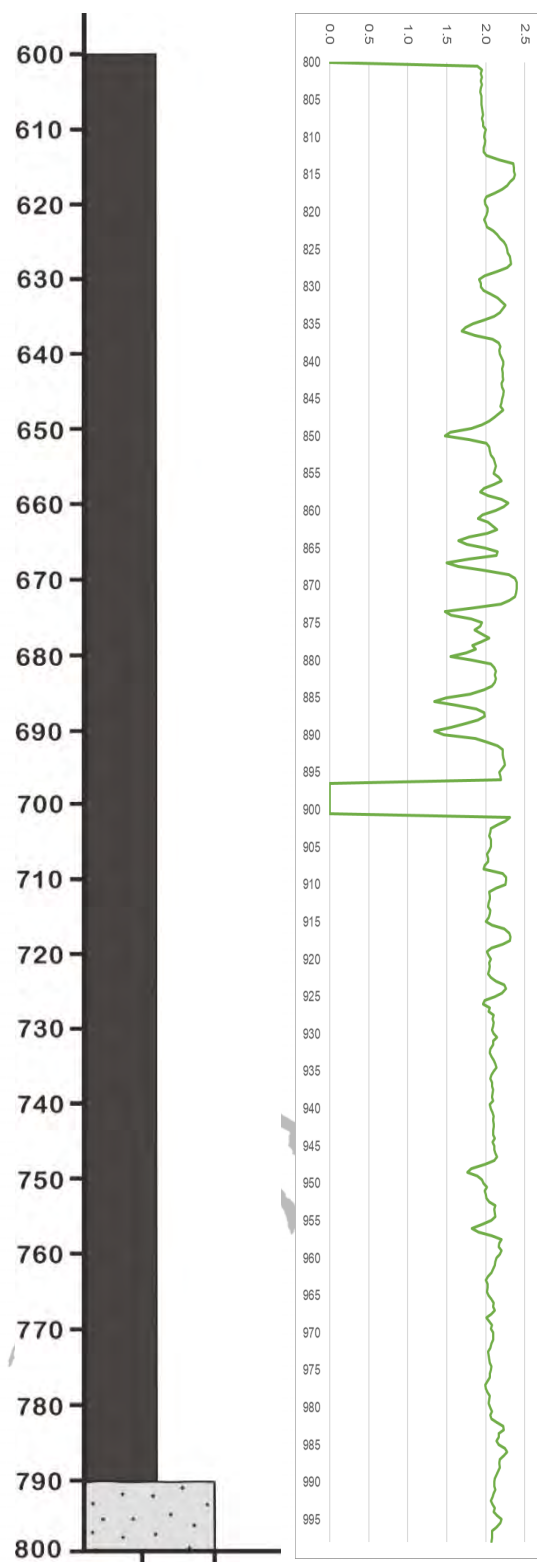


圖 4-278：Site7-1 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site7-2

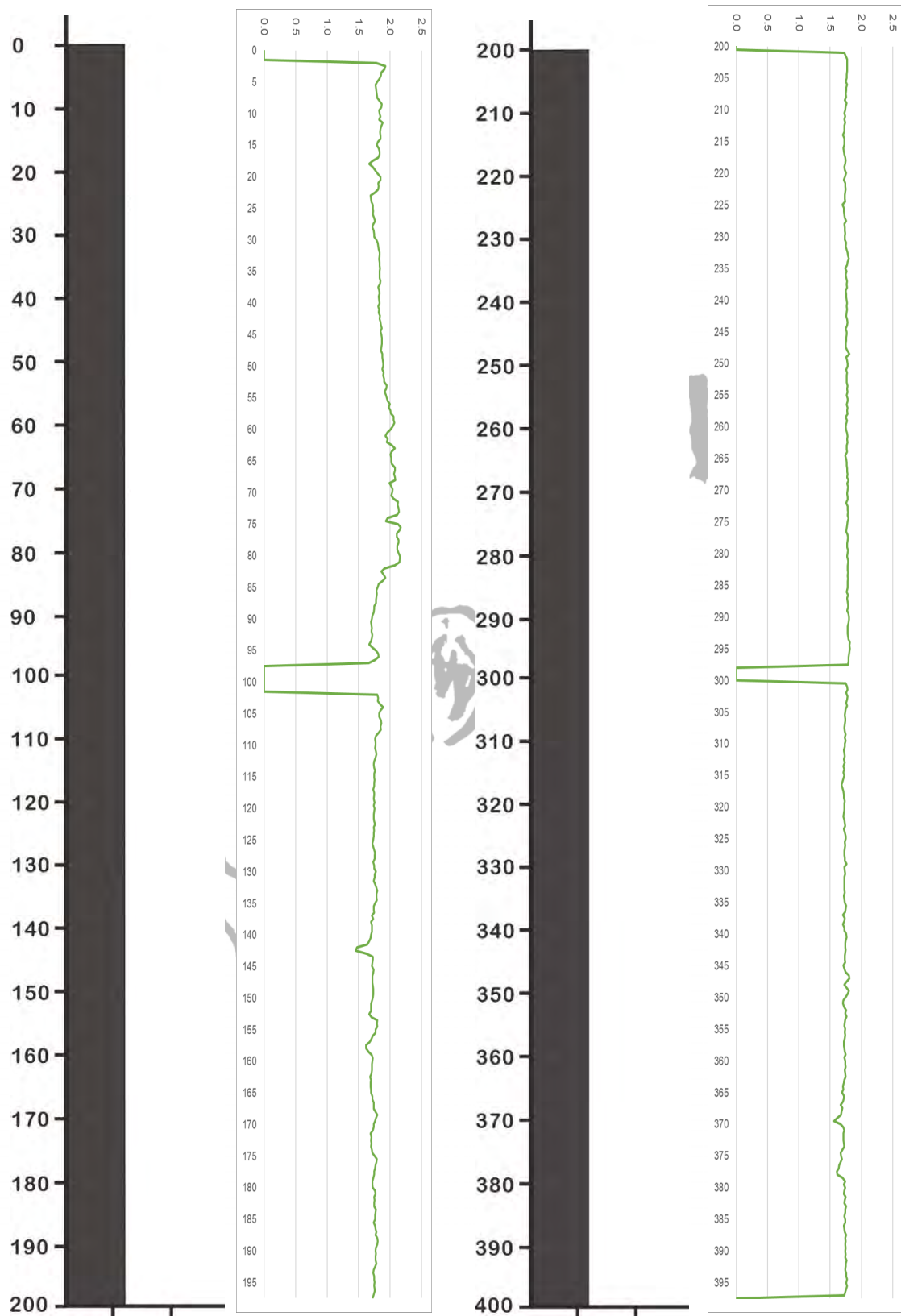


圖 4-279：Site7-2 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

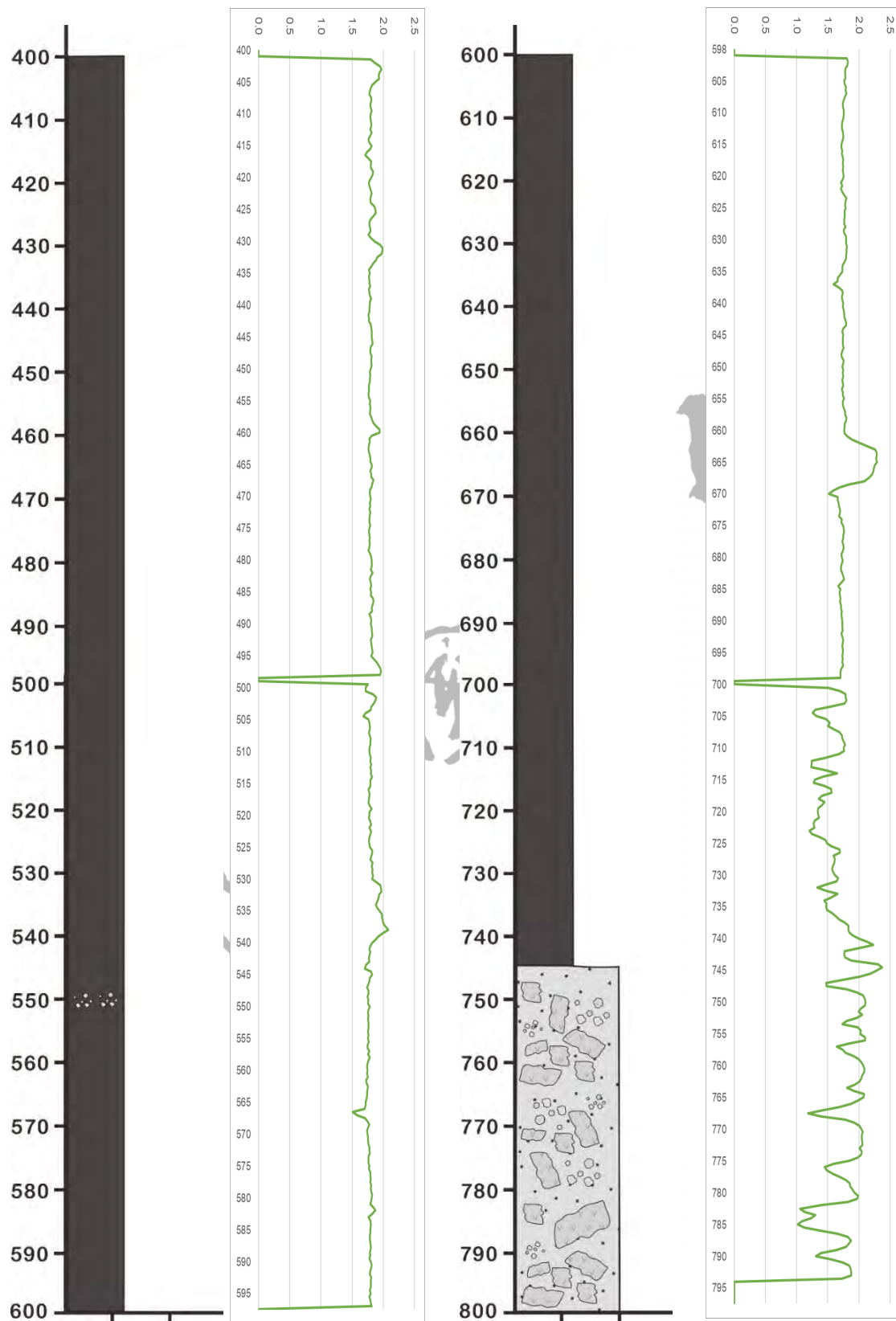


圖 4-280：Site7-2 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

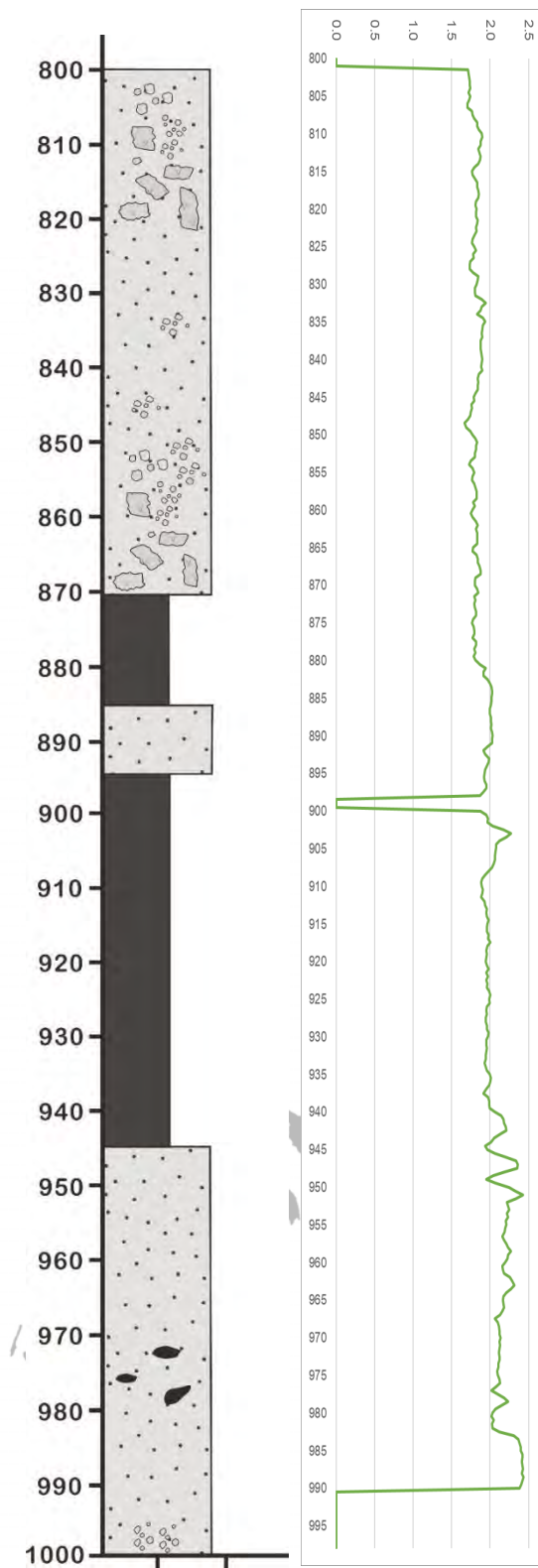


圖 4-281：Site7-2 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site8-1

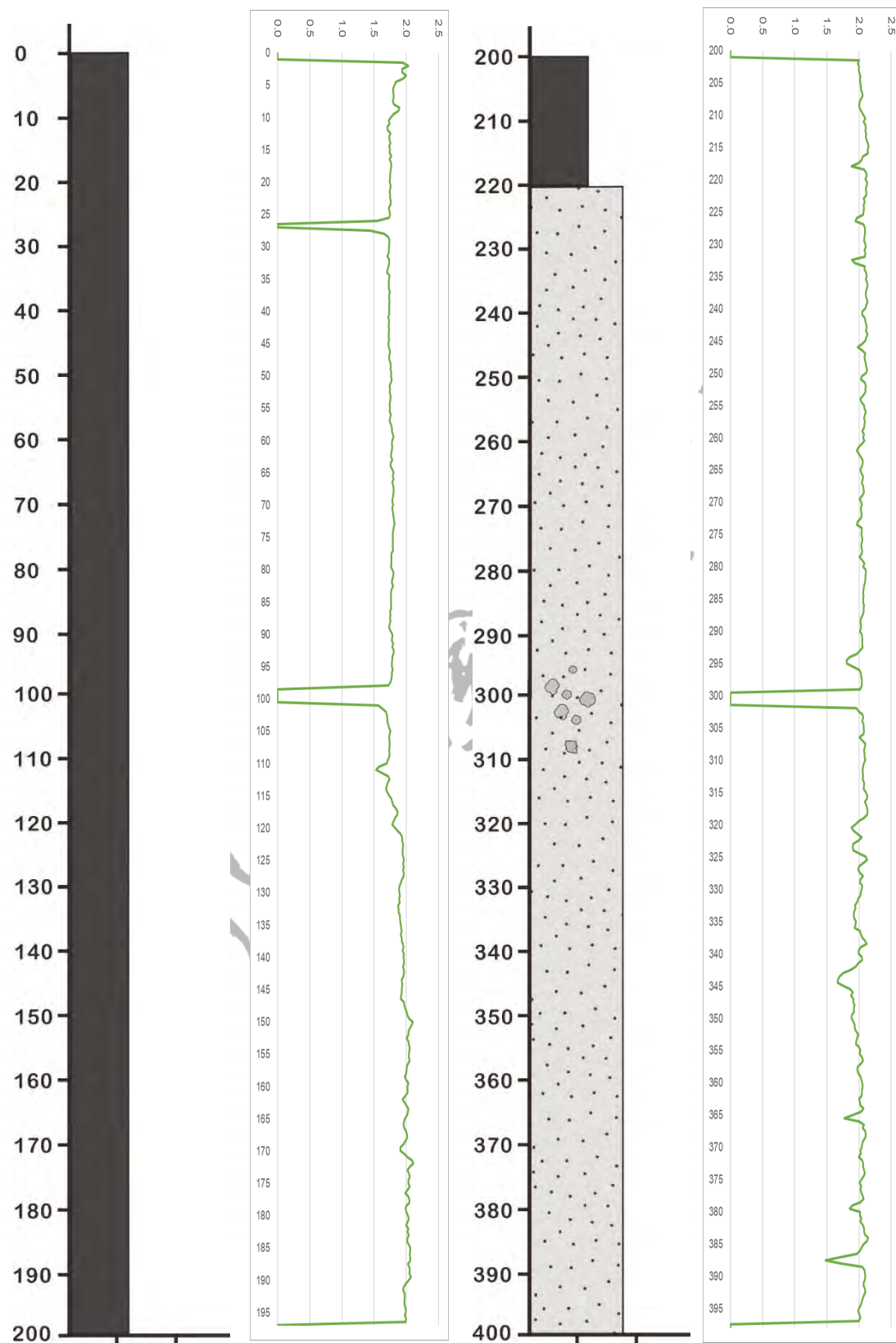


圖 4-282： Site8-1 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

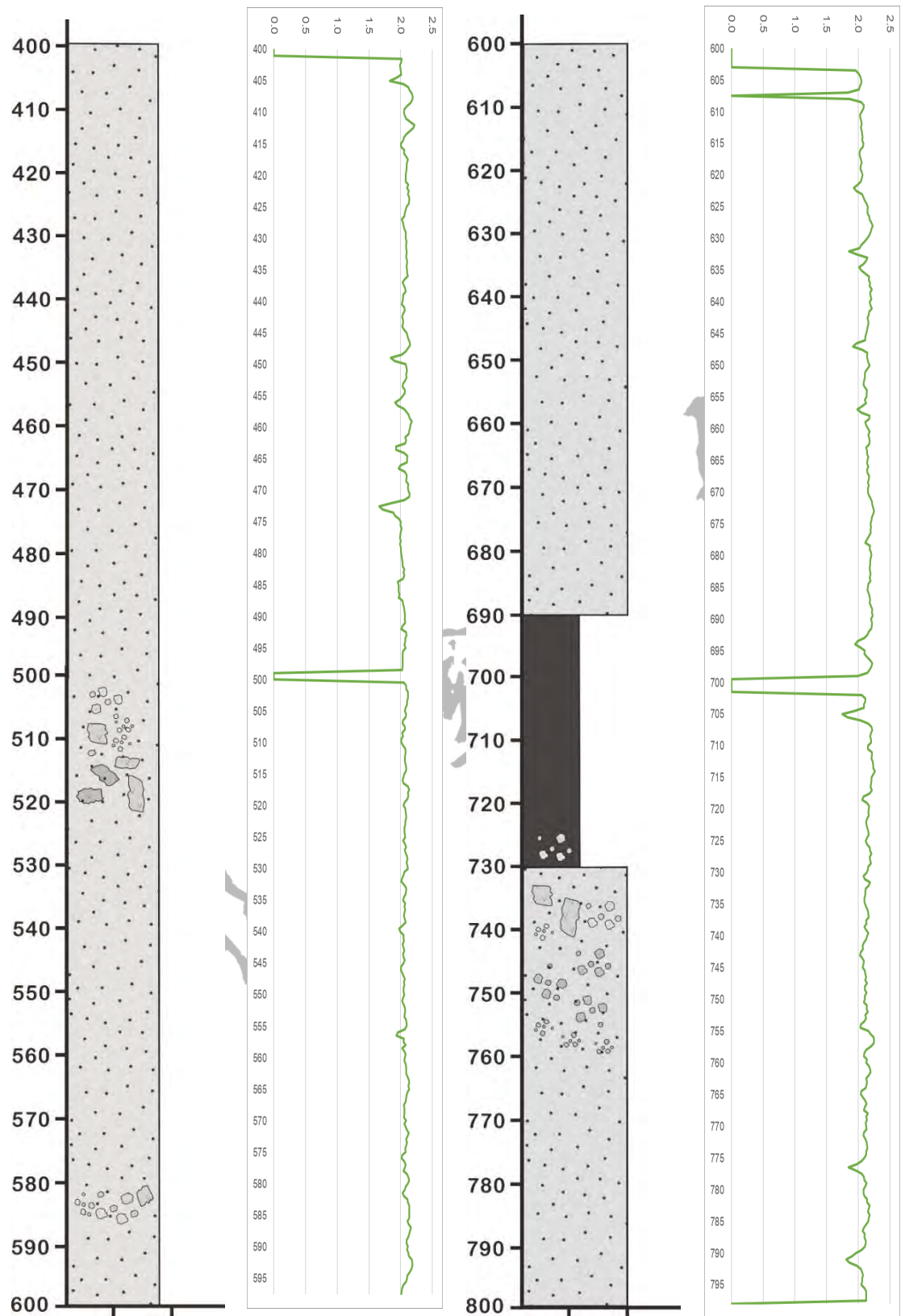


圖 4-283：Site8-1 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

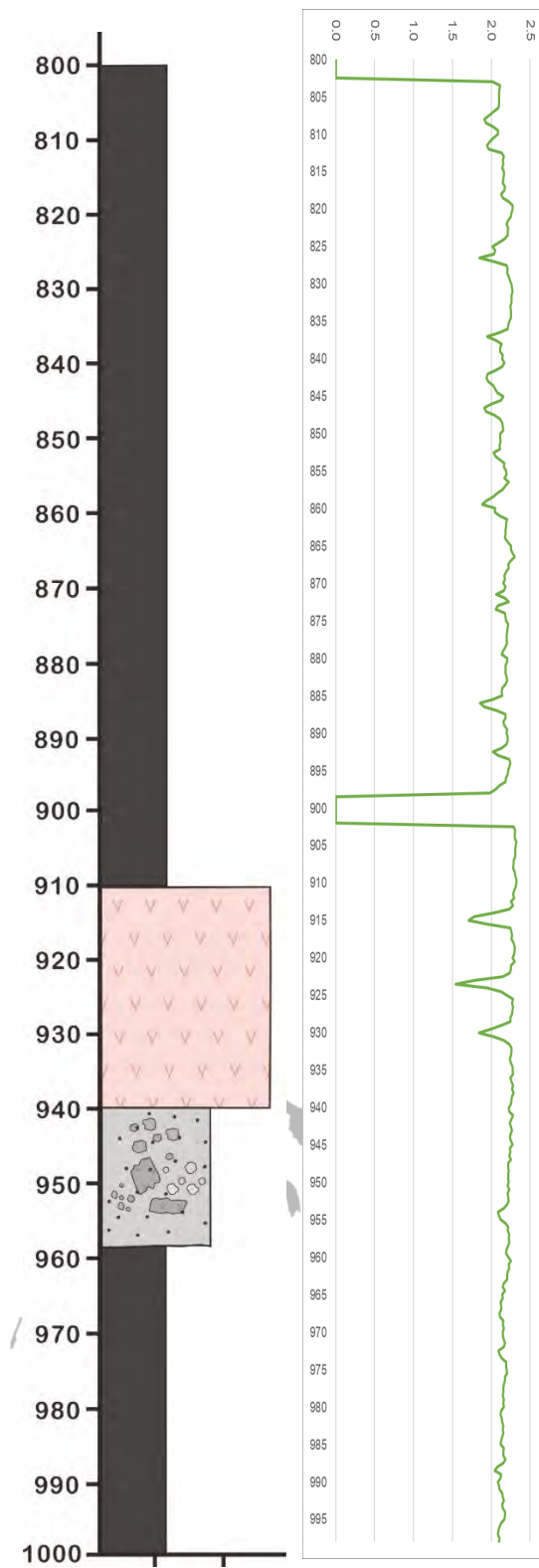


圖 4-284： Site8-1 8-10m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

Site8-2

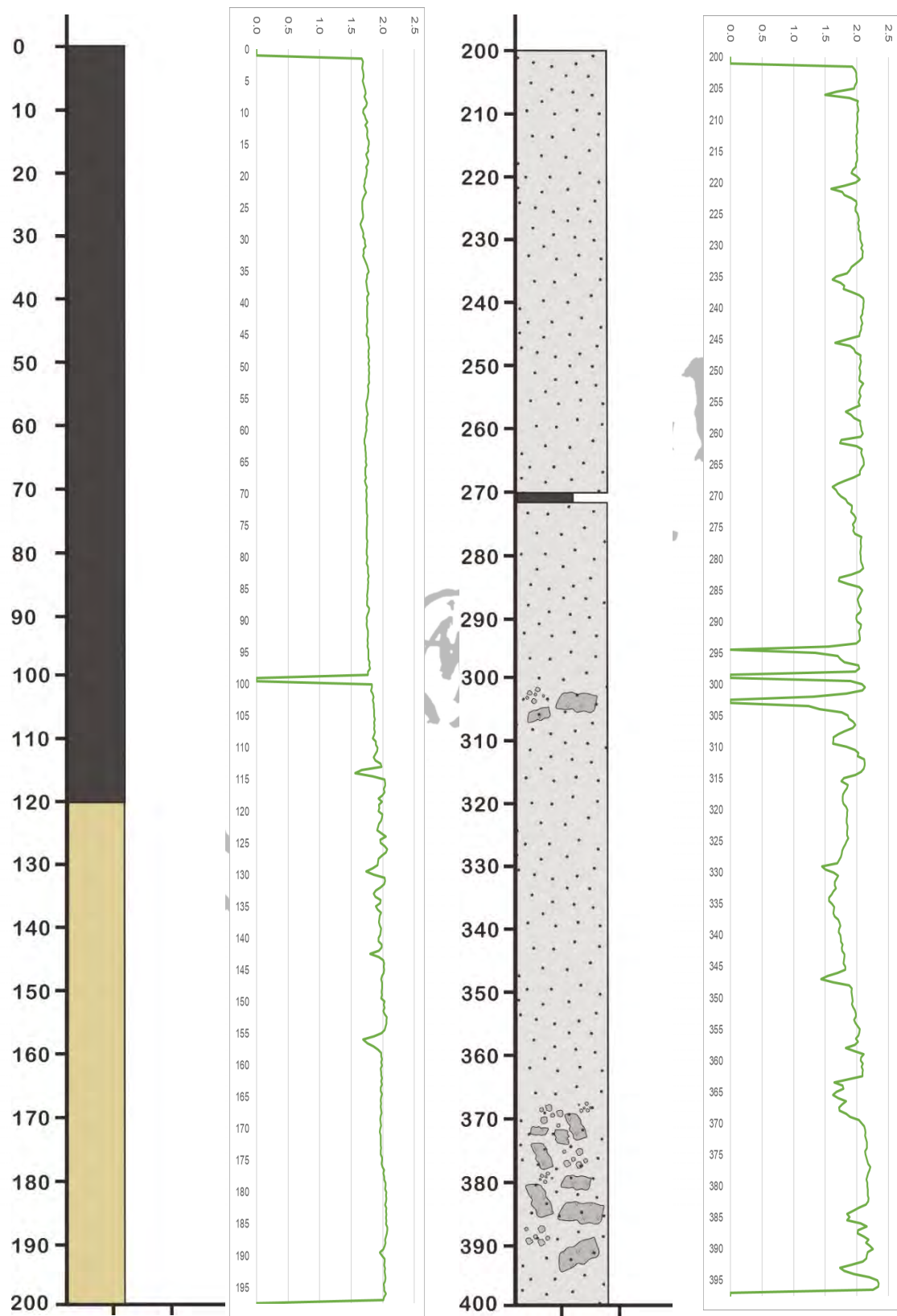


圖 4-285： Site8-2 0-2m & 2-4m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

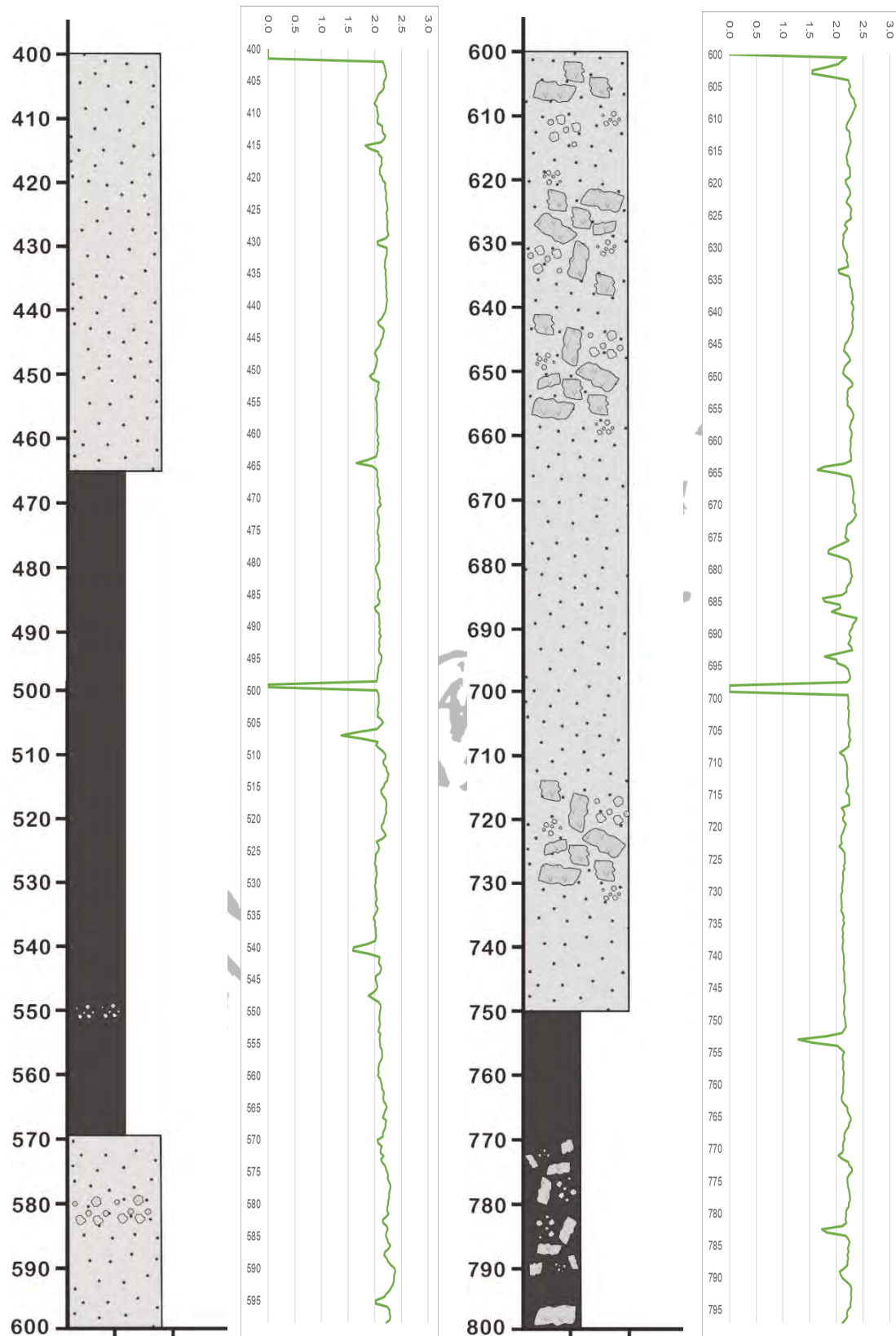


圖 4-286：Site8-2 4-6m & 6-8m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

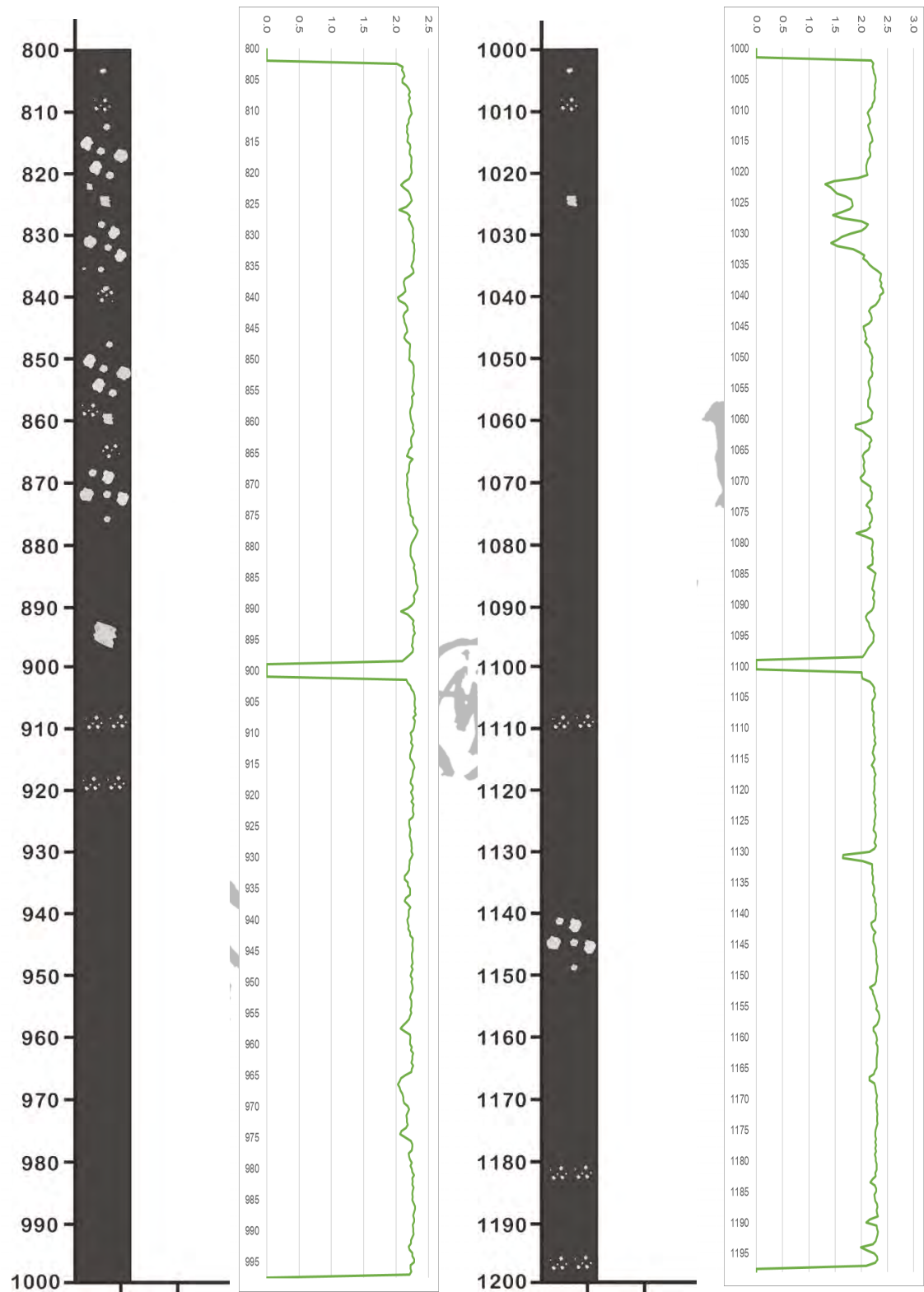


圖 4-287：Site8-2 8-10m & 10-12m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

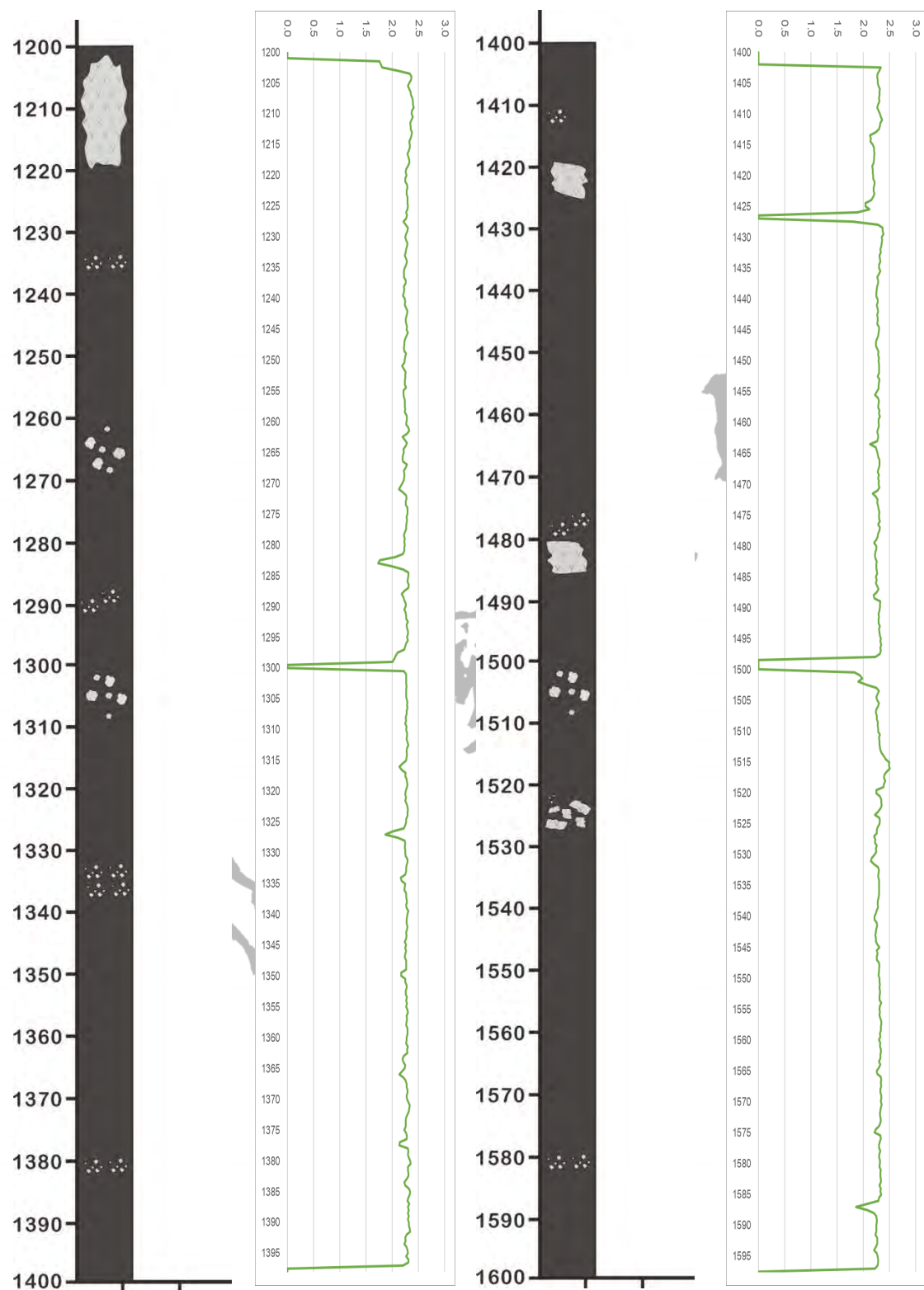


圖 4-288：Site8-2 12-14m & 14-16m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

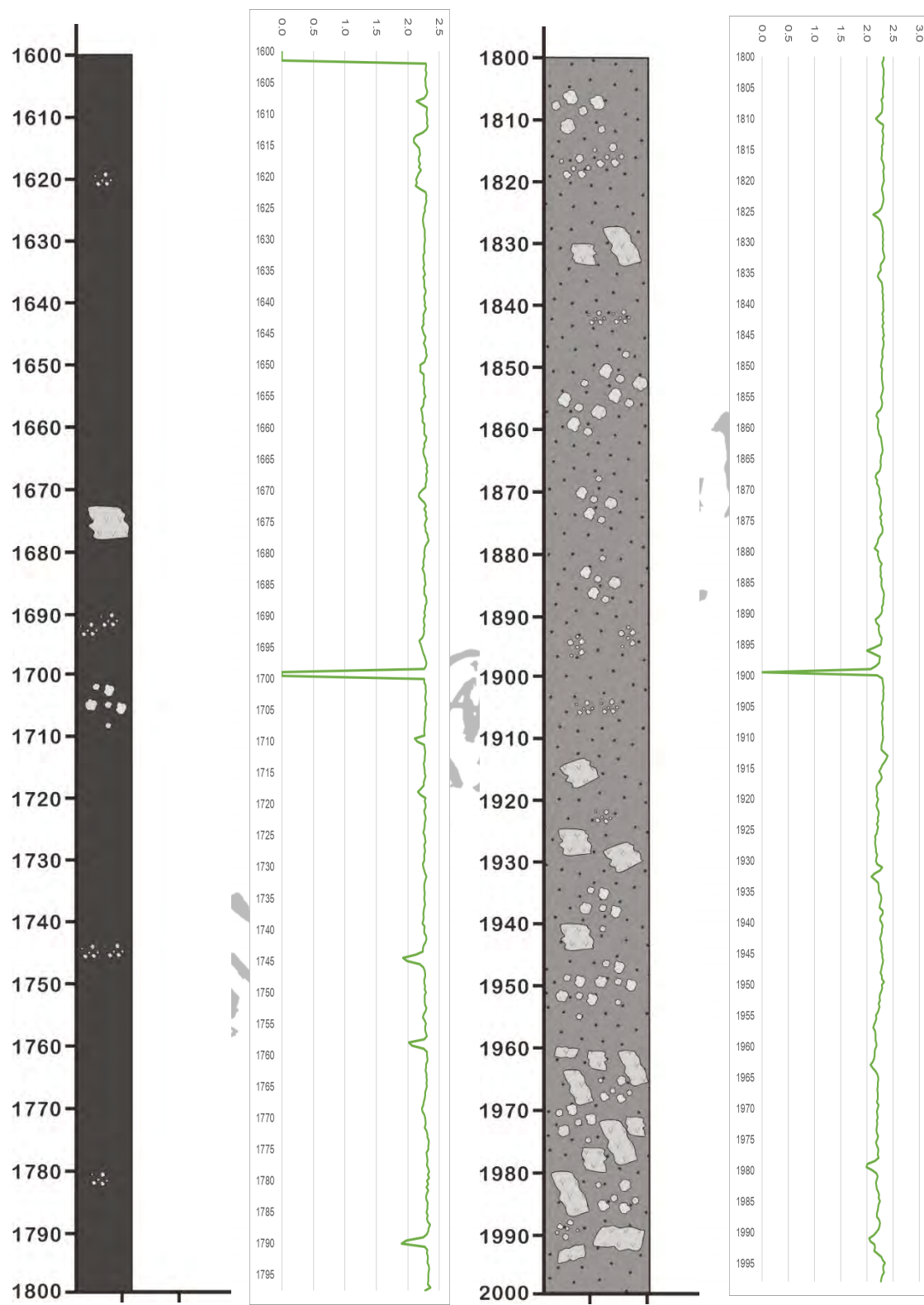


圖 4-289：Site8-2 16-18m & 18-20m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

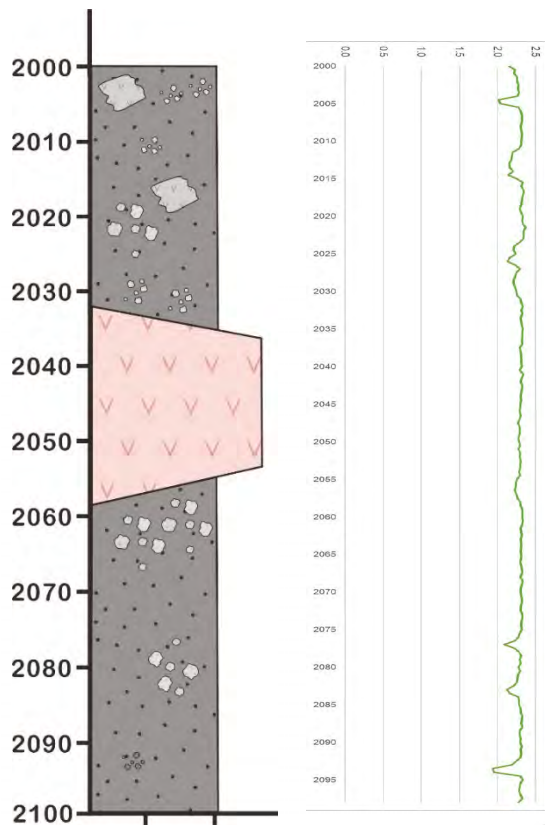


圖 4-290：Site8-2 20-21m 岩芯密度與岩芯柱狀圖。密度單位為(g/cc)。

5、岩芯定年結果

本次總共採了 12 個碳質樣本從事 C-14 的定年，有一個樣本沒有分析出年代結果，其他樣本的年代結果如表 4-19 所列，年代介於距今 1230 年到 7435 年之間。因鑽井結果都未鑽到爆裂口下部噴發產物，所獲得的定年結果應該都是下限，也就是爆裂口形成的年代都會比最老的年代還要老。詳細的深度分布和年代的關係見圖 4-291 到圖 4-294。綜合上述的定年結果，顯示 S-5 爆裂口形成的年代應老於 3,240 年、S-6 爆裂口形成的年代應老於 3,405 年，S-7 爆裂口定年的年代應老於 2,775 年，S-8 爆裂口定年的年代應老於 7,435 年。

表 4-19、西側 11 個碳質樣 C-14 的定年結果。



國立台灣大學地質科學系加速器質譜實驗室

The NTUAMS Lab

Department of Geosciences, National Taiwan University

106 台北市羅斯福路四段 1 號

No.1, Sec.4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan

Tel: +886-2-33662929

Fax: +886-2-23636095

AMS ^{14}C Dating Report

Date: 19/10/2021

Reporter: Hong-Chun Li

Dear 宋聖榮教授:

The results of your AMS ^{14}C dating samples are below:

Lab Code	Sample ID	C12 current (A)	pMC (%)	error (±)	D14C (‰)	error (±)	^{14}C Age (year BP)	error (±)	Calendric age (year BP)	error (±)
NTUAMS-7577	S5-1-275	1.53E-05	75.84	0.47	-241.6	1.5	2221	50	2230	115
NTUAMS-7578-1	S5-2-600	1.41E-05	68.53	0.43	-314.7	2.0	3036	51	3240	130
NTUAMS-7579-1	S6-1-250	1.54E-05	85.58	0.52	-144.2	0.9	1251	49	1230	55
NTUAMS-7580-1	S6-2-570	1.32E-05	67.35	0.42	-326.5	2.0	3175	50	3405	80
NTUAMS-7581-1	S7-1-540	9.65E-06	72.19	0.46	-278.1	1.8	2617	51	2775	80
NTUAMS-7582-1	S7-2-220	1.31E-05	83.89	0.52	-161.1	1.0	1411	49	1330	60
NTUAMS-7583s	S7-2-985	1.22E-06	44.27	0.59	-557.3	7.5	6545	108	7435	180
NTUAMS-7584b	S8-1-110	1.45E-05	82.53	0.50	-174.7	1.1	1542	49	1440	95
NTUAMS-7586	S8-2-090	1.29E-05	71.04	0.45	-289.6	1.8	2747	51	2855	100
NTUAMS-7587b	S8-2-1050	1.75E-06	61.50	0.49	-385.0	3.0	3905	63	4300	150
NTUAMS-7588	S8-2-2100	1.04E-05	58.39	0.39	-416.1	2.8	4322	54	4935	115

Instrument: The AMS model: HVE 1.0MV Tandetron Model 4110 BO. Settings for C3+ mode: Termination Voltage = 1000KV; Sample pressure = 2.5×10^{-2} mbar; Cs temperature = 95°C; All slits are open; GIC gas pressure = 8.9 mbar. Transmission rate: ~20%. pMC = % of modern C14 activity. Dates between 50,000 and 1 BP were calibrated using the calibration curve IntCal13. All ratio measurements have 2σ uncertainty. The calibrated ages have 1σ error.
BP: Before Present. The present is AD 1950 in the C-14 dating method.

李紅春 教授



七星山西翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-5)

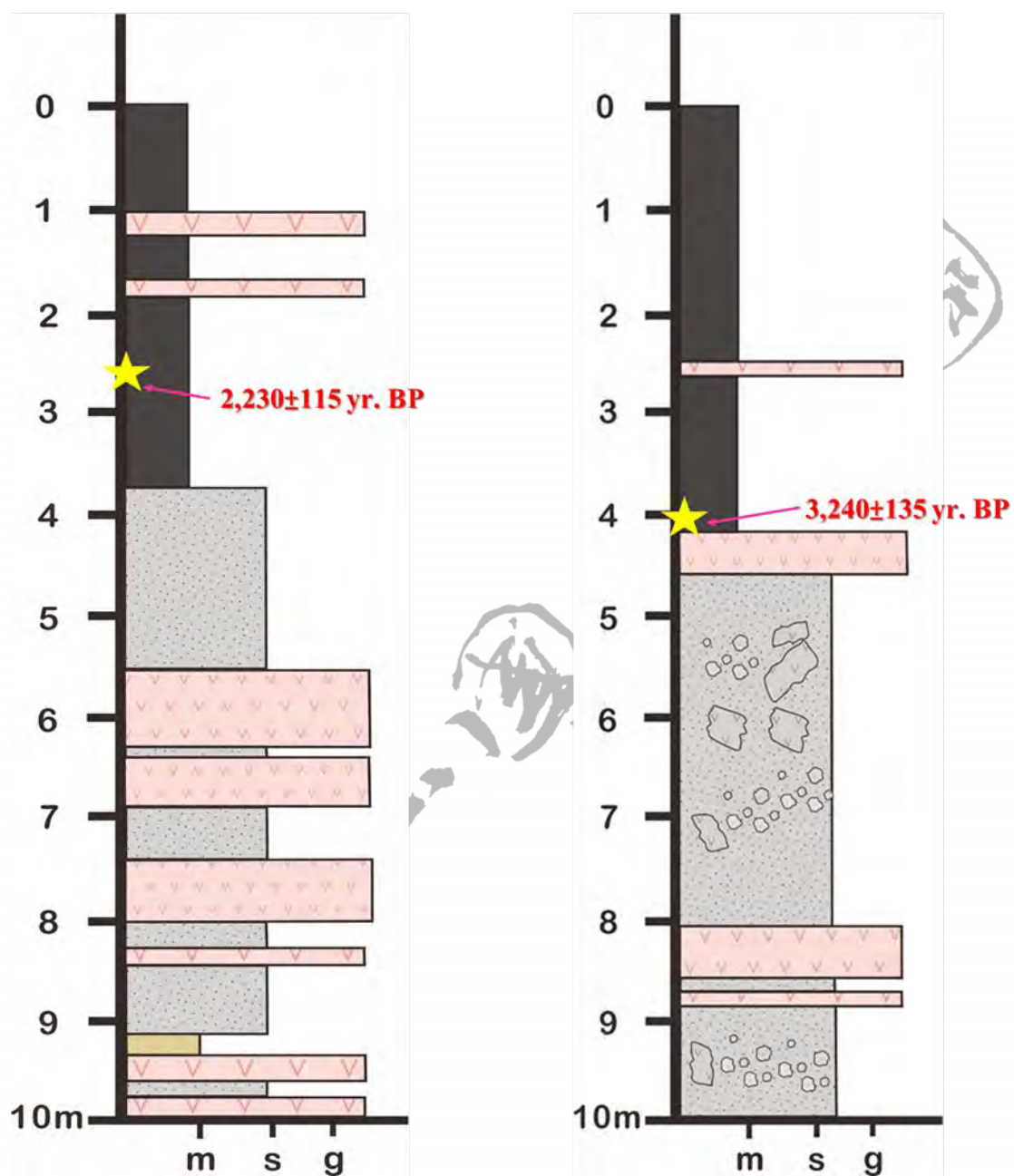


圖 4-291、S-5 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山西翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-6)

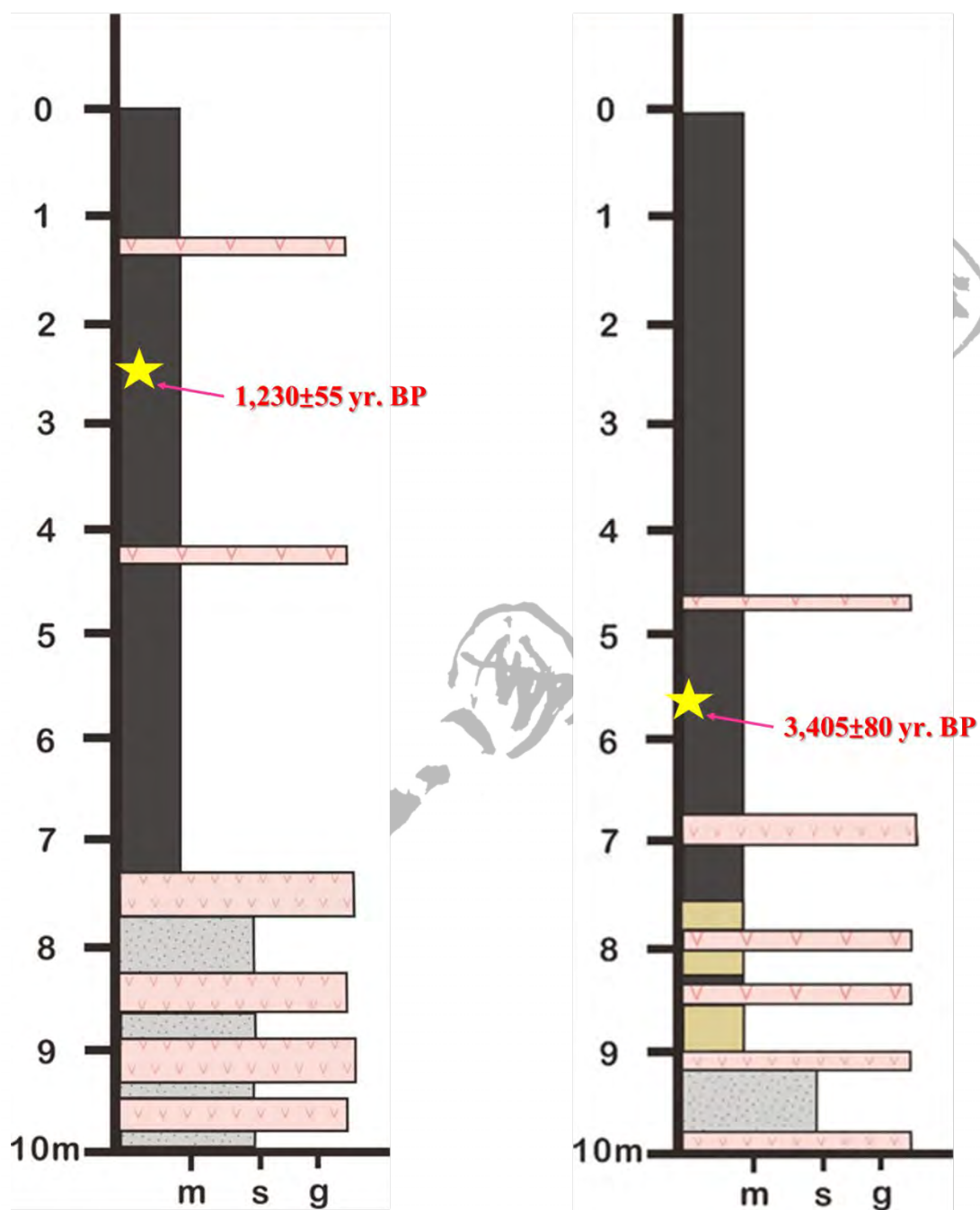


圖 4-292、S-6 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山西翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-7)

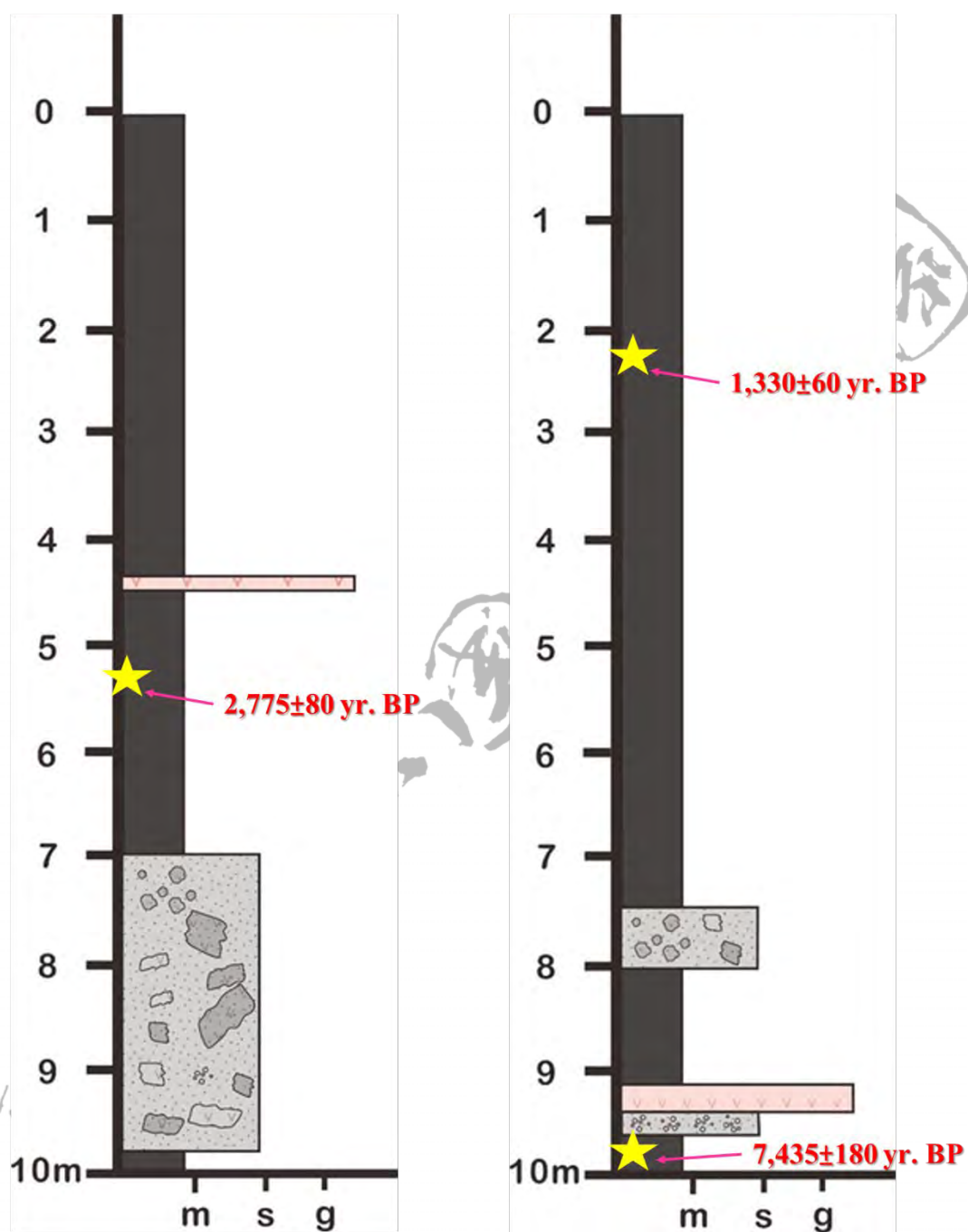


圖 4-293、S-7 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

七星山西翼爆裂口鑽井岩性柱狀圖(S-8)

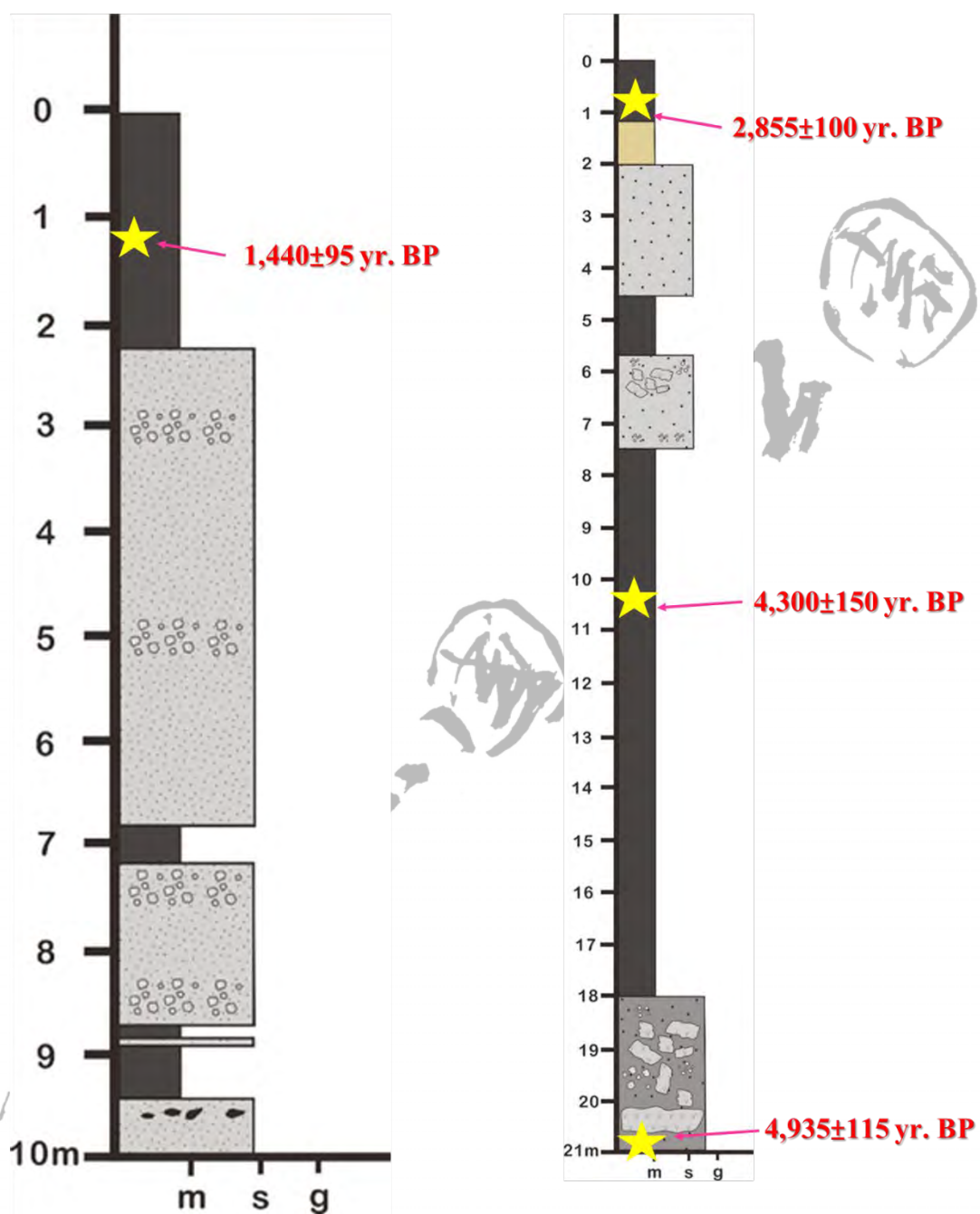


圖 4-294、S-8 鑽井岩芯所採碳質樣本深度和年代。

整合爆裂口鑽井岩芯的座標、鑽井深度、基盤出露深度、沉積組成分析和定年結果於表 4-20。

表 4-20、爆裂口鑽井結果

	東經	北緯	深度	基盤深度(m)	組成	形成年代(yrbp)	備註
S-1	306362	2784173	20	0.4	有機物+安山岩	未知	
S-2-1	306403	2784215	10	8.0	有機物+泥岩+安山岩含石英	3,800 年	
S-2-2	306405	2784227	10	9.2	有機物+泥岩+安山岩含石英	3,800 年	
S-3-1	306332	2784152	12	4.8	有機物+砂泥岩+安山岩含石英	1,800 年	
S-3-2	306332	2784167	10	7.8	有機物+砂泥岩+安山岩含石英	1,800 年	
S-4-1	306178	2784040	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	未知	
S-4-2	306149	2784046	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	未知	
S-5-1	305487	2785117	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	
S-5-2	305477	2785115	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	
S-6-1	305500	2785176	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	
S-6-2	305513	2785185	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	
S-7-1	305533	2785241	10	未達基盤	有機物+砂岩+安山岩	>7,400 年	
S-7-2	305516	2785259	10	未達基盤	有機物+砂岩+安山岩	>7,400 年	
S-8-1	305146	2784338	10	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	
S-8-2	305155	2784332	21	未達基盤	有機物+砂泥岩+安山岩	>7,400 年	

(四)、爆裂口成因

1、 爆裂口形成機制

在大屯火山群中，地表出露多個火山爆裂口，如硫磺谷、龍鳳谷、小油坑、大油坑、向天池和磺嘴池，以及穿過七星山體東西兩條張裂帶中的爆裂口等，這些爆裂口大都位於山頂且地形保持相當完整，顯示可能屬於大屯火山群較年輕噴發所形成的。其中，硫磺谷地形保持完整且坐落在爆裂口中的堆積物產狀也可直接觀察，以判定其噴發機制和堆積過程。

硫磺谷內有個凸狀小山包，堆積的火山爆發的產物，包括有角礫狀的灰黑色泥岩和頁岩塊、石英顆粒、受熱水換質的石英岩塊和矽化產物，以及由黏土礦物的顆粒所組成(圖 4-295)，並無新鮮或風化的安山岩塊存在其中，岩體呈塊狀無層理，表面受硫化氫或二氧化硫的氣體作用成灰黑色的硫化物。從這些產狀如呈角礫狀無層理和沒有任何沉積構造的特徵，可以推論這些岩塊鮮少受到水力的搬運磨損作用，可能是直接由爆破作用所形成之碎屑顆粒堆積在爆裂口內的產物；且其中又沒有新鮮的火山玻璃、浮石和火山岩，表示堆積在硫磺谷內的爆發產物與岩漿的噴發無關，可能不是岩漿直接噴發的產物。整合這些觀察和證據指向硫磺谷的火山爆裂口可能是由蒸氣噴發作用所形成的。

Belousov et al.(2010)在紗帽山東南側附近溪谷發現兩處可能代表古湖泊環境的層狀沉積物，可能是火山噴發過程中所形成的堰塞湖。在露頭剖面可辨識出至少四層火山灰和數層火山泥流和碎屑堆積物等。由泥層中的有機物之碳十四定年所夾的火山灰沉積年代約落在 6,000~17,000BP。其結論認為大屯火山群數座火山在 13,000~23,000BP 仍有火山噴發活動。在夾於湖泊沉積物中的火山灰層，主要組成角礫狀的安山岩屑，並未發現有新鮮的火山玻璃或浮石顆粒，故判定這些火山灰層可能是蒸氣噴發所形成的，並推測最年輕的一次噴發是發生在七星山 6,000BP 左右的蒸氣噴發事件。



圖 4-295、堆積於硫磺谷內的蒸氣噴發產物。

林毓潔(2013)分析大屯火山群山頂的土壤樣本，其組成礦物中除了含有輝石、角閃石、斜長石、鐵礦類之外，還有大量的石英顆粒被發現，比例很高約占 30 % 以上。大屯火山群表層土壤中之石英，進一步以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察其表面特徵構造和 X- ray 粉末繞射儀分析其礦物相，並進一步配合固態離子源質譜儀 (TIMS) 分析其鋁同位素值，了解石英顆粒來自於地下深處的沉積基盤岩。從上述土壤樣本中的石英顆粒分布，因大屯火山群的安山岩成分不含石英晶體，又由鋁同位素分析發現石英礦物可能來自於地底下基盤的沉積岩，故推論石英是經由蒸氣爆發的機制從地底下帶至地表、堆積而後風化成土壤(林毓潔，2013)。

2014 年日本御嶽火山(Ontake Volcano)在 9 月 27 日 11 時 52 分（日本時間）發生火山蒸氣型爆發事件(Kaneko et al., 2014)，至 10 月 8 日為止已造成 55 人死亡，是日本自雲仙岳(Unzen Volcano)1991 年熔岩崩塌以來首起致命的火山噴發。Sano et al. (2015)提出此次蒸氣型火山噴發的機制，顯示當岩漿侵入地下深處解壓造成火山氣體的上升，侵入地下熱水系統慢慢累積氣體壓力於火山管道，直到壓力超過上覆岩石所能承受的應力而發生蒸氣爆發作用，並形成數個爆裂口（圖 4-296）。另外，紐西蘭 Tarawera Rift 在 1886 年發生罕見的巨大玄武岩普林尼式火山噴發，短短六小時內形成的 17 公里長的裂隙。本次噴發主要以蒸氣噴發為主，噴發產物多是被炸裂出來的老火山岩，沿著裂隙多處在一段時間內同時發生蒸氣噴發，結束後再也沒有噴發，但留下許多噴泉。沿著裂隙底可觀察到玄武岩岩脈出露，可推論本次噴發是基性熔岩沿著古流紋岩爆裂口通道上升途中遇到地下水、地熱場的水、湖泊導致的。

綜合上述，整合地形分析，以及穿越七星山東、西兩側的爆裂口年代和沉積物組成分析，顯示爆裂口可能是由發生於七星山火山體的蒸氣式噴發所形成的。

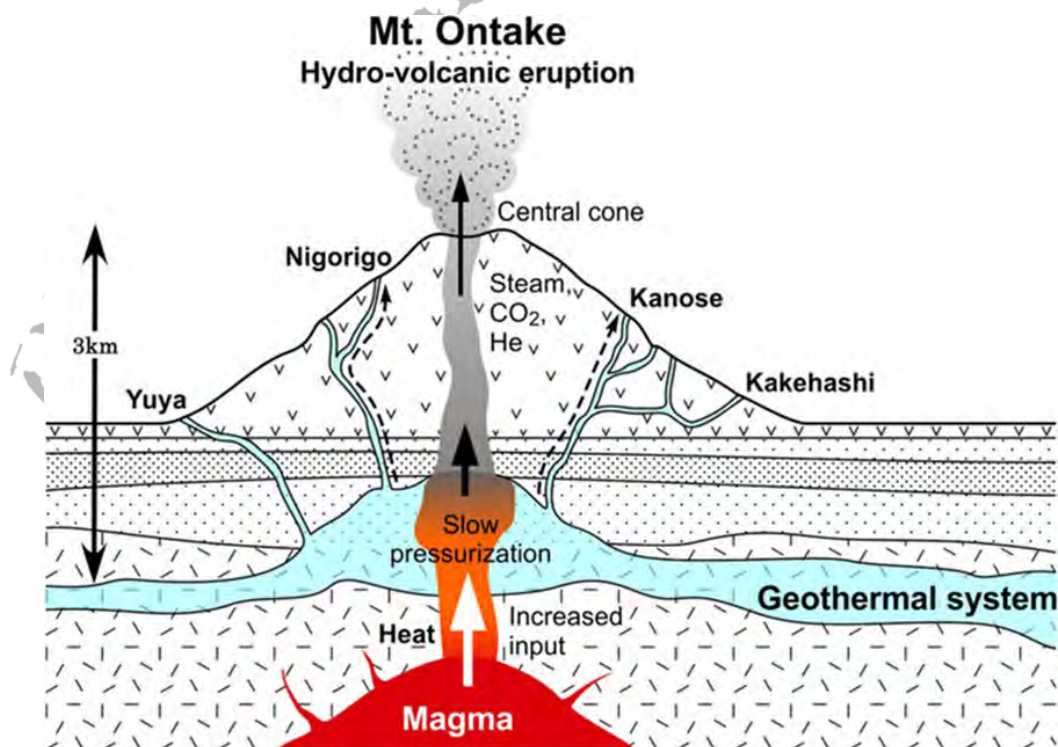


圖 4-296、2014 年日本御嶽火山發生蒸氣型爆發事件的模式圖(Sano et al., 2015)。

2、 蒸氣噴發的模式

蒸氣型噴發(phreatic eruption)是火山噴發的一種，其作用只牽涉火山氣體和地表水的噴出，未有岩漿物質噴出地表。Stix and de Moor (2018)研究蒸氣型火山噴發，歸納此型火山噴發主要可分為兩大類：第一類為岩漿侵入火山地下深處，高溫解壓的火山氣體從岩漿離溶上升侵入具有黏土(矽質)覆蓋層(clay cap)的火山地熱系統累積氣體壓力，當累積的壓力超過上覆岩石的強度就發生蒸氣型噴發(圖 4-297)。第二類為岩漿侵入火山地下深處，岩漿體結晶釋放出大量高溫的火山氣體侵入火山口湖底部，導致湖底受壓水層的氯化累積增加氣體壓力而噴發(圖 4-298)。野外調查和分析大屯火山群的地質特性和噴發產物，顯示大屯火山群的蒸氣噴發類型與第一類型的噴發模式相似；也就是說，大屯火山群發生蒸氣噴發的條件，是地下有岩漿侵入釋放高溫的火山流體進入火山體地下淺處具有黏土蓋層的熱水儲集層系統，增加氣體的累積達飽和後噴發形成一系列的爆裂火山口和產物。

比較上述兩種類型的蒸氣噴發與和日本御嶽火山 2014 年的蒸氣噴發，顯示發生蒸氣型噴發作用的條件包括有：(1)深部岩漿侵入提供熱源並解壓釋放大量的火山流體(氣體)上升進入火山底部的熱水儲集層；(2)熱水儲集層上方具有不透氣層的熱水換質黏土(矽質)覆蓋層可累積氣體壓力；(3)累積的氣體達到飽和、壓力超過上覆岩體的強度。

野外調查和分析大屯火山群的地質特性和噴發產物，顯示大屯火山群的蒸氣噴發類型與第一類型的噴發模式相似；也就是說，大屯火山群發生蒸氣噴發的條件，是地下有岩漿侵入釋放高溫的火山流體進入火山體地下淺處具有黏土蓋層的熱水儲集層系統，增加氣體的累積達飽和後噴發形成一系列的爆裂火山口和產物。

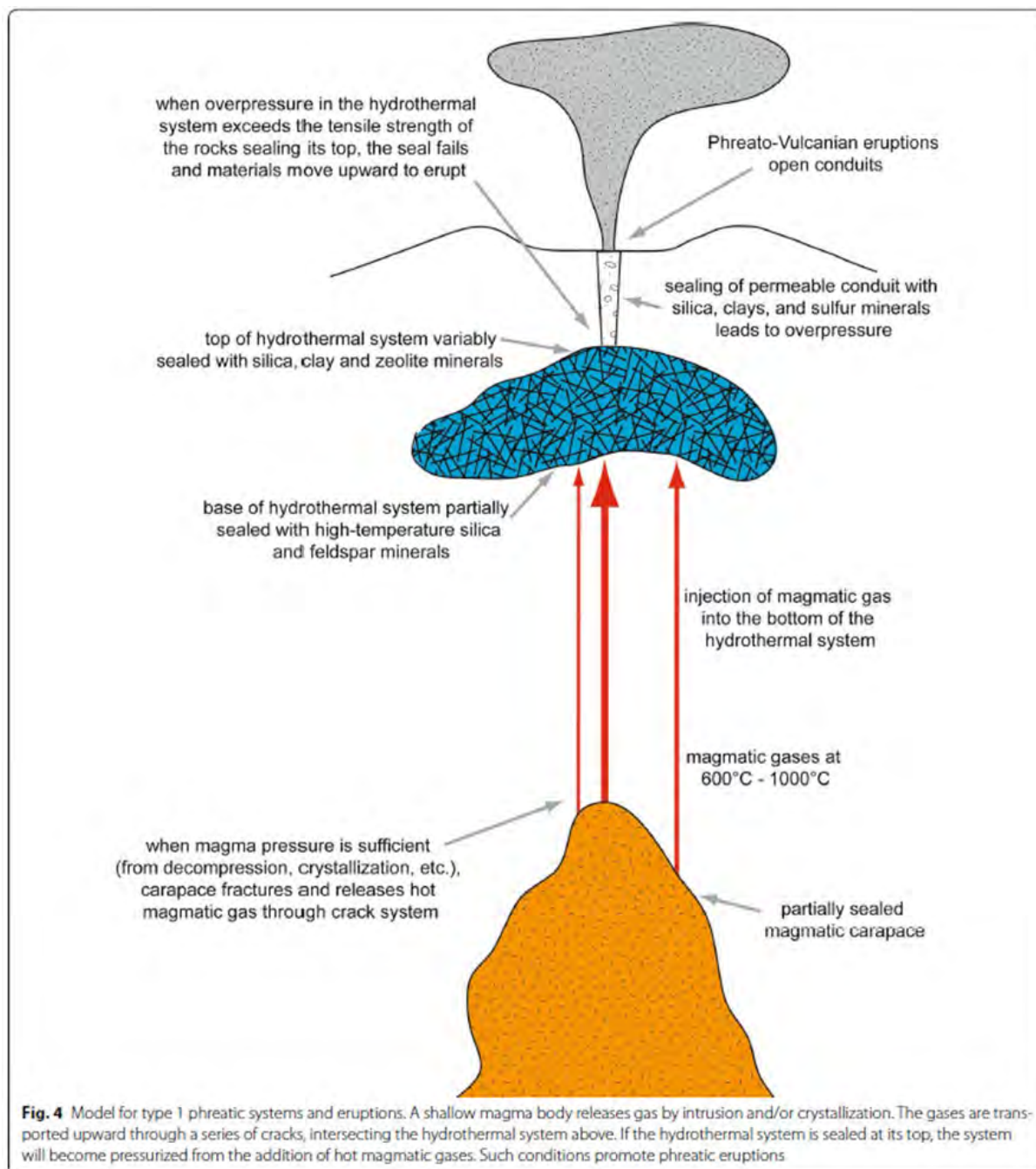


圖 4-297、第一類型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。

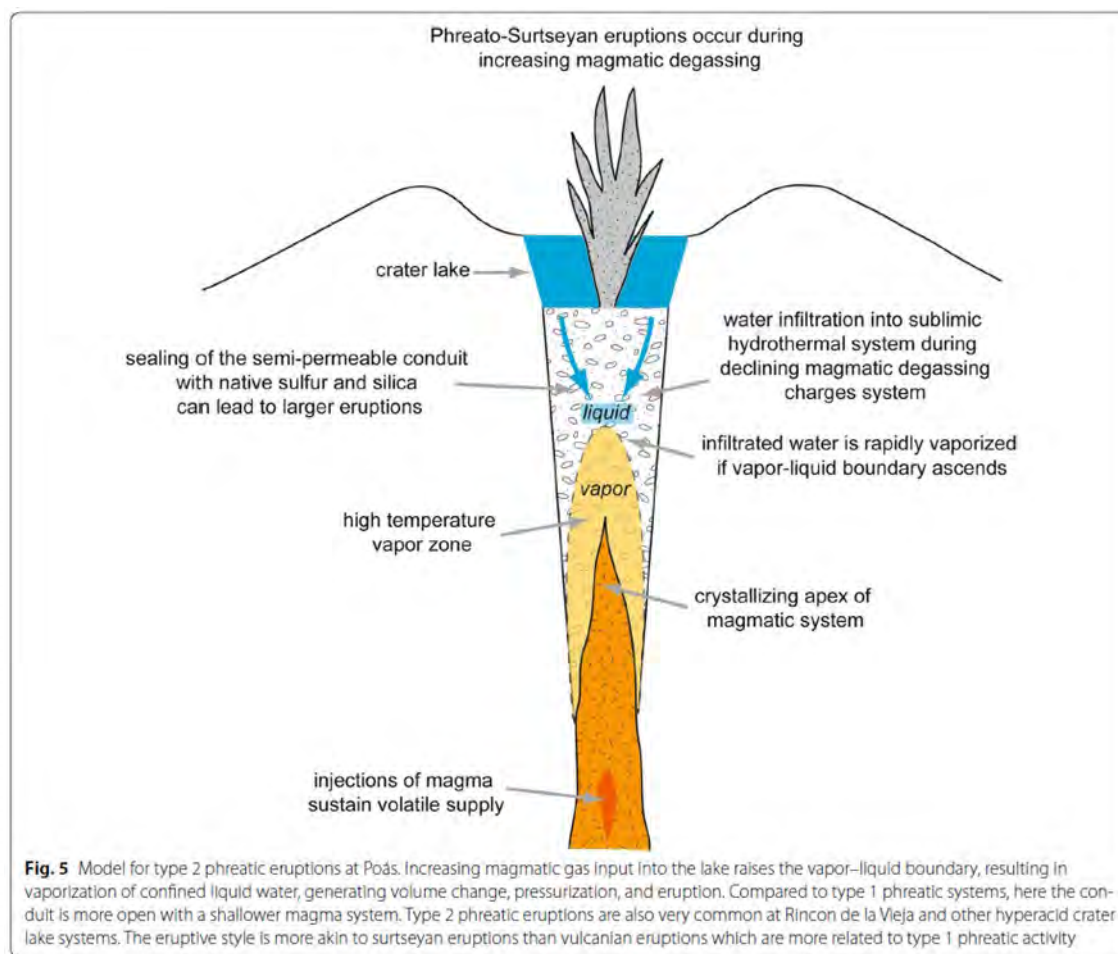


圖 4-298、第二類型的蒸氣噴發模式(Stix and de Moor, 2018)。

3、爆裂口形成年代

大屯火山群後期的噴發作用如上所述，主要是以蒸氣噴發作用為主，沒有岩漿物質噴發出地表，故難找到新鮮的火山岩來從事絕對定年分析。但可以利用相伴蒸氣噴發產物的沉積相中物質，如有機物質從事 C-14 的定年，來推測研究蒸氣噴發事件的年代。

表 4-21 為整理大屯火山群過去已發表和本研究計畫的 C-14 定年分析工作，其產狀包括有岩屑火山灰堆積物層、爆裂口中相對最老(開始沉積的堆積物)的堆積物、可能引發岩屑崩落的堆積物等，從表中可知大屯火山群最年輕蒸氣噴發事件最少有 6 次，年代介於 16,215BP 和 1,685BP 之間。

表 4-21、大屯火山群最年輕蒸氣噴發事件的可能定年結果

項目	產狀	C-14 年代(BP)	平均	資料來源
1	火山灰(1)	15,850~16,580	16,215	Belousova et al., 2010
2	火山灰(4)	13,290~13,640	13,465	Belousova et al., 2010
3	岩屑崩落堆積物	6,010~6,080	6,045	Belousova et al., 2010
4	夢幻湖爆裂口內有機物	5,650±70	5,650	劉聰桂, 1990
5	爆裂口內有機物	3,735±150	3,735	本研究
6	爆裂口內有機物	1,685±140	1,685	本研究

4、爆裂口的火山地質隱示

前一節提到形成蒸氣型噴發作用的條件包括有：熱源提供和上湧、不透氣層的黏土層、和氣體累積達飽和等。熱源可能由岩漿上升提供，在大屯火山群最晚期的岩漿活動發生於紗帽山的熔岩穹窿，年代約為 $1,370 \pm 11$ BP，而發生於七星山兩側的爆裂口年代可能年輕於 10,000 年，和紗帽山的岩漿活動年代相近。另外，七星山東西兩側的裂谷爆裂口的分布走向為北偏東約 5 度和北偏東約 30 度，兩者向南延伸交會於紗帽山熔岩穹窿(圖 4-299)，故本研究主張其為提供熱源引發蒸氣噴發形成爆裂口。

從地表有廣泛的熱水換質帶的分布、地熱鑽井探測結果和地球物理探勘(包括微震觀測和大地電磁調查)等，大屯火山群地下應有廣泛的熱水換質帶分布形成儲集層，提供適當的環境累積來自地下上升的流體蒸氣，若達到飽和就有可能發生蒸氣噴發。

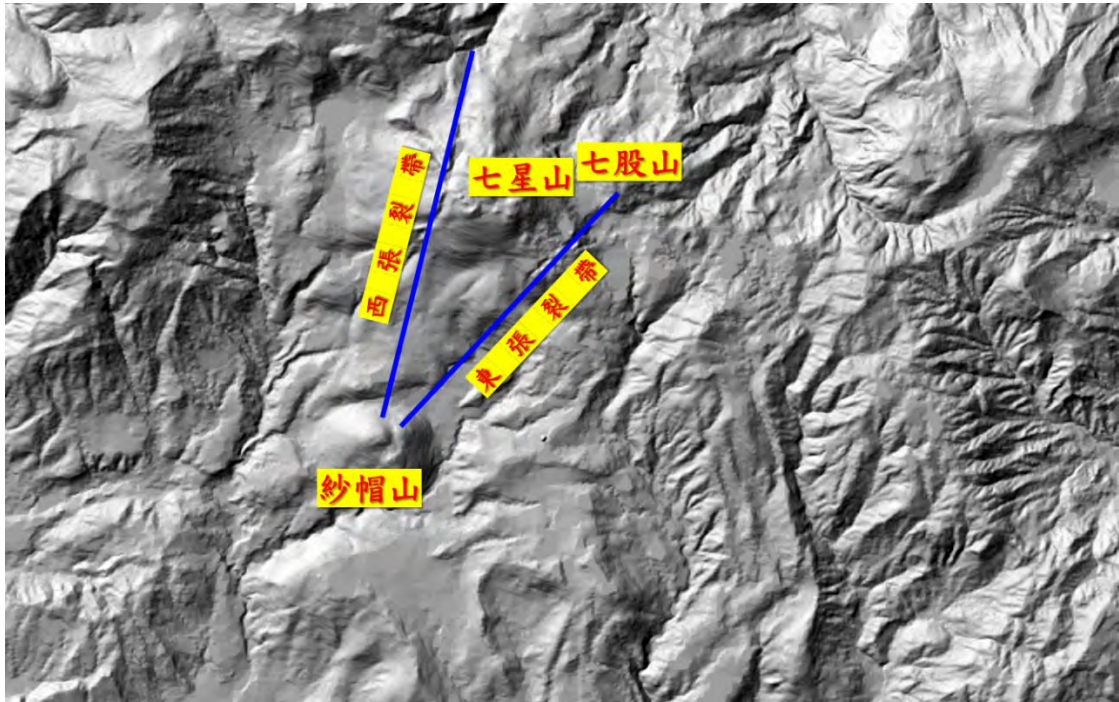


圖 4-299、七星山東、西兩側張裂帶的分布和方位。

日本學者 Kagiya & Morita(2008)研究日本火山的噴發特性和週期，把日本的活火山分為兩種型態：岩漿噴發 (magmatic explosion) 和熱液噴發 (hydrothermal explosion)，前者以櫻島火山為代表，噴發週期短且以岩漿噴出為主。後者以位於別府附近的火山為主，兩次以岩漿噴出的活動之間距相當長，但中間夾雜多次的蒸氣噴發活動並伴隨有活躍的熱水作用——溫泉。整合七星火山亞群的噴發特徵和噴發歷史，符合日本的熱液噴發型態的火山種類，也就是兩次岩漿大噴發的中間夾有無數次的蒸氣噴發。七星山火山亞群依據最近的定年資料，顯示其主要噴發可分為兩期，分別為 20-30 萬年左右和 2 萬年左右(未發表資料)，2 萬年後可能有最少有 6 次的蒸氣噴發(圖 4-300)。

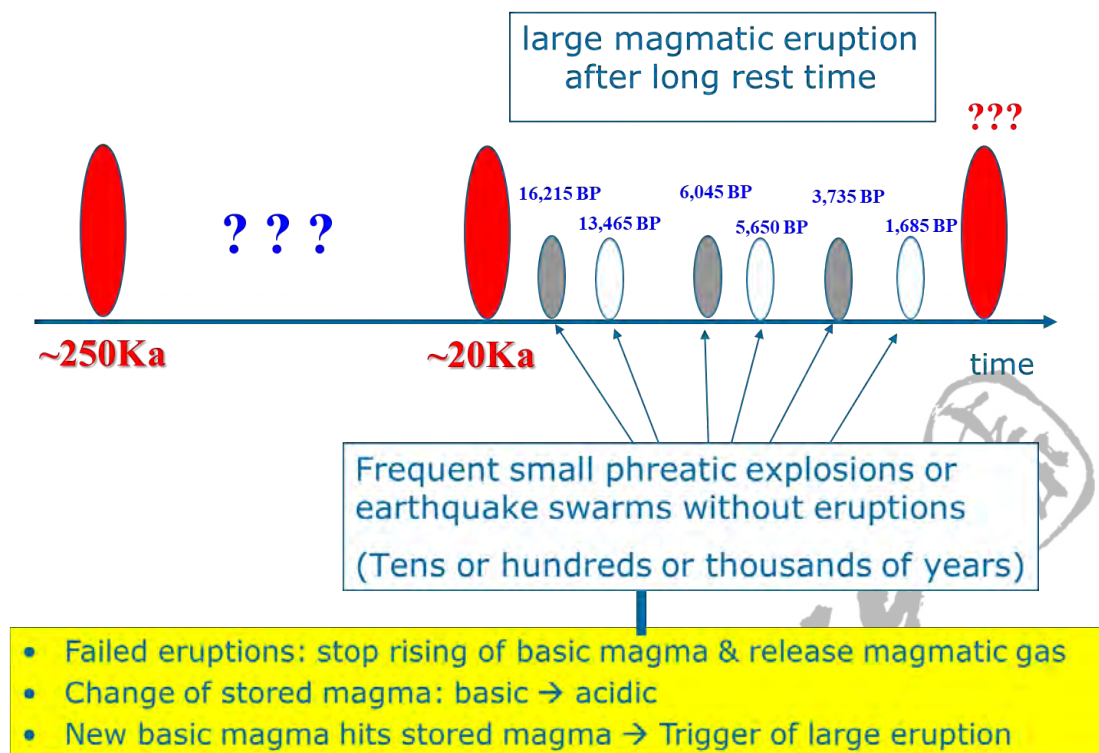


圖 4-300、七星山火山亞群可能的岩漿噴發和蒸氣噴發年代分布。

(五)、小結

綜合爆裂口鑽井岩芯的分析可獲得以下結果：1、東側的夢幻湖形成於距今約5,600年前、S-2爆裂口形成的年代約為3,800年、S-3爆裂口形成的年代約為1,800年。西側爆發口都未鑽獲底部，噴發形成年代可能都老於7,400年前。2、七星山張裂帶爆發口內的沉積物大都以黑色碳物質為主，偶夾灰色泥質物、石英顆粒和安山岩塊，但西側爆裂口內缺少石英顆粒的分布。3、爆裂口是由發生於七星山火山體的蒸氣式噴發所形成的。主要是因為大量的火山蒸氣累積於七星山火山地底下，而後累積的氣體壓力超過上覆岩層的應力而噴發，把地表炸成一低窪的凹地而成。4、七星山蒸氣型噴發屬於地下有熱液儲集層、累積氣體壓力後噴發所形成。5、七星山蒸氣型噴發的熱源來自於紗帽山熔岩穹窿。七星山火山亞群的火山噴發型態屬於熱液噴發型。

三、世界火山蒸氣噴發形成爆裂口的案例

在世界上蒸氣噴發有名的案例，包括(1)美國長谷陷落口的伊尼奧火山(Long Valley Caldera 的 Inyo Craters)；(2)紐西蘭的塔拉威拉裂谷(Tarawera Rift)的蒸氣噴發與爆裂口；(3)日本的御嶽火山(Mt. Ontake)火山，且這些案例的研究資料相對比較多，尤其是 2014 年噴發的日本的御嶽火山。故本計畫裡選擇這三個蒸氣噴發形成火山爆裂口的案例，做為與大屯火山群蒸氣噴發所形成的爆裂口相比較。

(一)伊尼奧火山(Inyo Craters) (Long Valley Caldera，美國加州)

Long Valley 火山區位於美國西岸內華達山脈東側的 Basin and Range 省區，一個由岩石圈張裂變薄而形成的南北向盆地與山脈相互平行的地形，日前仍是活躍的區域性的橫移伸張地帶(Bailey, 1989; Bursik et al., 2003)。此區變成張裂環境之前，曾經因 Farallon 板塊東隱沒至北美板塊之下形成擠壓環境，造成地殼增厚，直到中新世 Farallon 板塊與中洋脊全然隱沒至北美板塊之下才終止此區的隱沒作用，形成現今的 San Andreas 轉移斷層帶（圖 4-301）(Dickinson, 1981)。不同於北臺灣由弧陸碰撞後失去支撐而垮山造成的岩石圈張裂、軟流圈上升，此區擠壓環境轉為張裂環境的原因仍然不明確，但並非因軟流圈上升。

Long Valley Caldera 為 32 公里長、18 公里寬、910 公尺深的火山陷落口，形成於七十六萬年前的一次巨大流紋岩質噴發，本次噴發產生廣蓋美國西岸的 Bishop Tuff（凝灰岩），同時，被淘空的岩漿庫無法繼續支撐上方的岩層，因而造成了兩、三公里深的塌陷。陷落後十萬年內仍有流紋岩噴發，在陷落口中央形成熔岩丘，接著順時鐘環繞熔岩丘發生間隔大約十萬年的幾次流紋岩噴發（圖 4-302）(Hildreth, 2004; Mastin, 1991)。較近期的噴發皆發生於陷落口西側外圍，從二十萬年前至近期有多次石英安山岩、流紋英安岩與部分玄武岩的噴發，形成 Mammoth Mountain 熔岩丘與 Mono-Inyo 火山鏈。透過地球化學分析，發現陷落口內的噴發岩漿來源與 Bishop Tuff 一樣為 Long Valley 岩漿庫，但是陷落西側外

圍的噴發岩漿來源卻皆是完全不相關的獨立小岩漿庫。

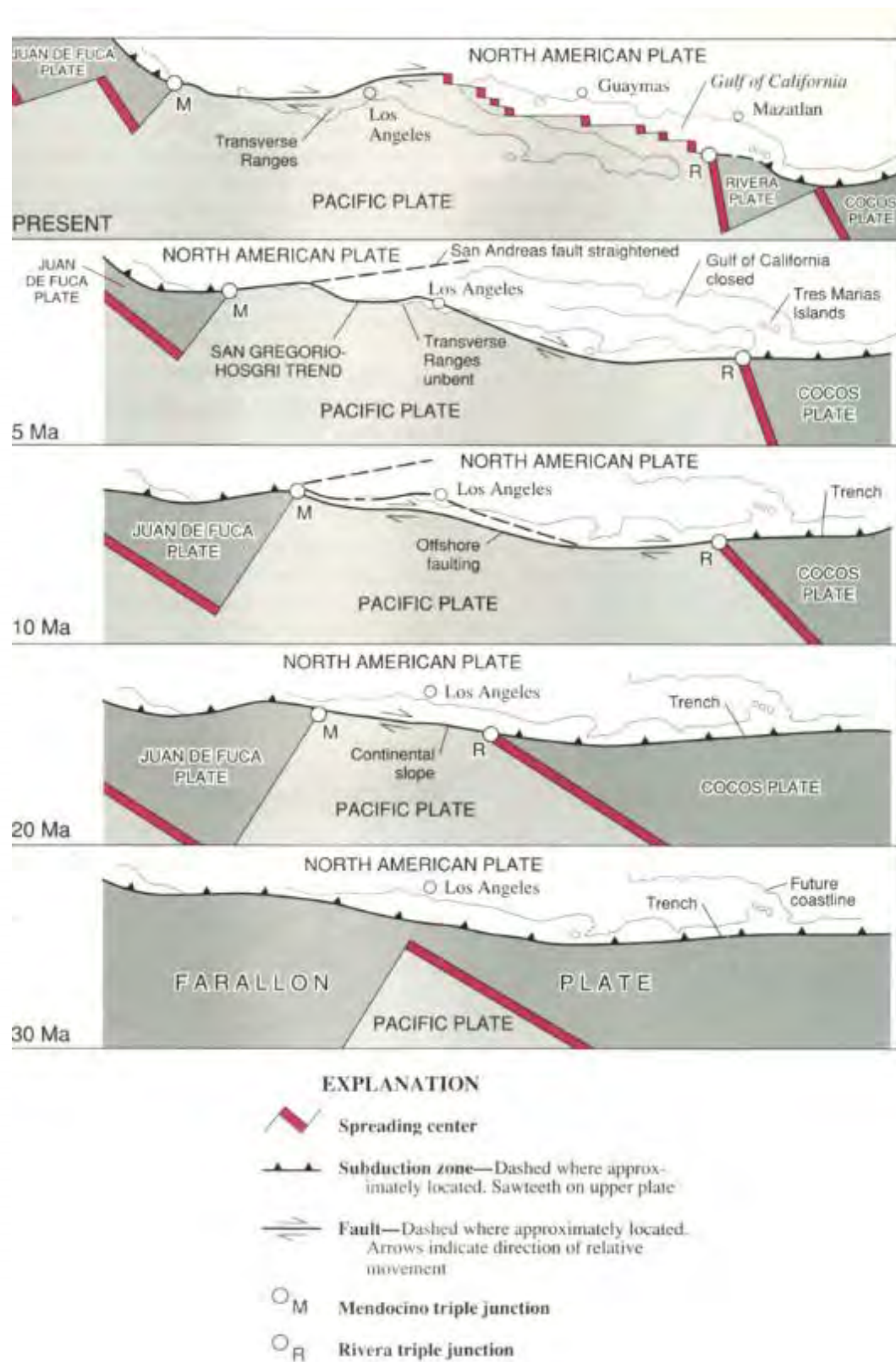


圖 4-301、San Andreas 斷層系統的板塊演化(Dickinson, 1981)。

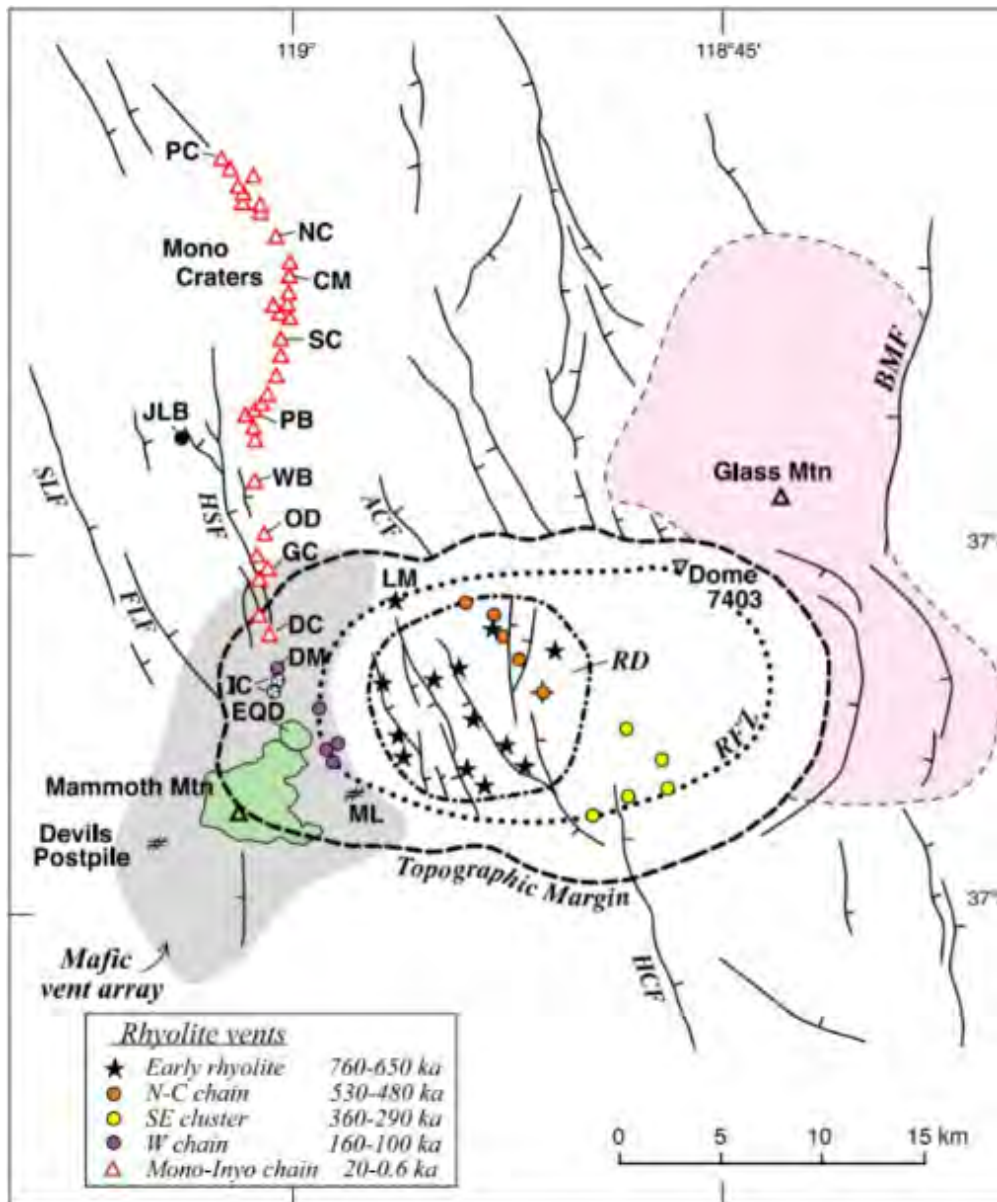


圖 4-302、流紋岩爆裂口分布與形成年代（RFZ 是火山陷落口邊界）。

CM = Crater Mtn; DC = Deadman Creek dome; DM = Deer Mtn dome; EQD = Earthquake dome; GC = Glass Creek dome; IC = Inyo Craters (phreatic); JLB = June Lake basalt vent; LM = Lookout Mtn; ML = Mammoth Lakes downtown; NC = North Coulee; OD = Obsidian Dome; PB = Punch Bowl; PC = Panum Crater; SC = South Coulee; WB = Wilson Butte; ACF = Alpers Canyon fault; BMF = Black Mountain fault; FLF = Fern Lake fault; HCF = Hilton Creek fault; HSF = Hartley Springs fault; SLF = Silver Lake fault。圖片來源：Hildredth et al. (2004)。

欲討論的 Inyo Craters 位於南北向的 Mono-Inyo 火山鏈中、此區的岩漿活動可分為四十至六萬年前與四萬至一千三百年前的玄武岩與安山岩、十萬至六千年前間的石英安山岩與流紋安山岩、四萬至六百年前的 Mono Craters 流紋岩、五千至五百年前的 Inyo Craters 流紋岩（圖 4-303）。Mono-Inyo 火山鏈的岩漿供應為沿著南北向斷層系統 Hartley Springs Fault(圖 4-302 中的 HSF)形成的岩脈，透過地球化分析得知岩漿來源為獨立的 Mono 岩漿庫，並非 Long Valley 岩漿庫。

Inyo Craters 上次噴發是六百年前，同時發生蒸氣與岩漿蒸氣噴發，由岩漿沿著 Inyo 岩脈南移途中遇地下水並快速加熱汽化造成的。Inyo Craters 爆裂口位置附近有許多舊爆裂口的痕跡，其中 South Crater 可能沿著舊的玄武岩爆裂口噴發、表示這附近在歷史中發生多次噴發。

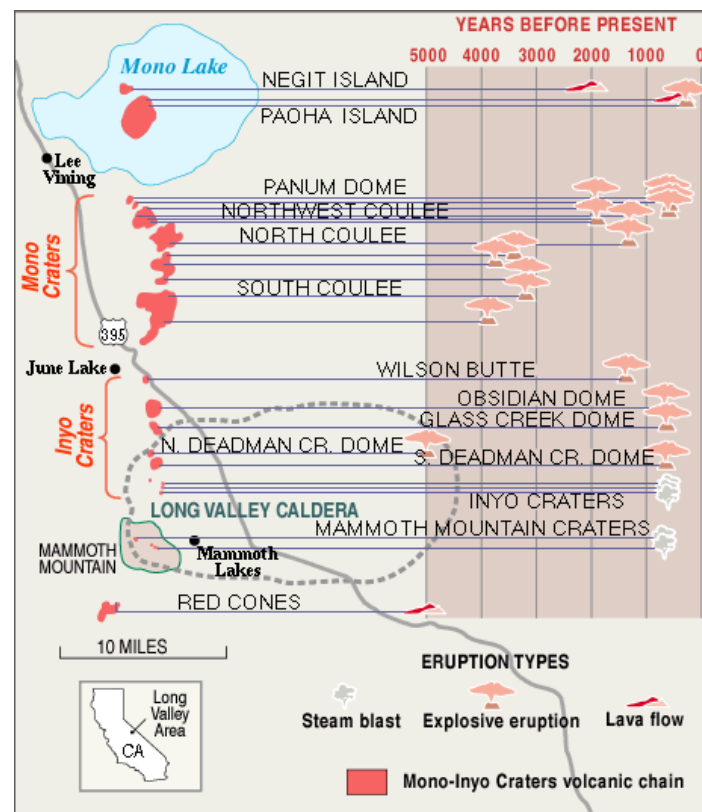


圖 4-303、Mono-Inyo 火山鏈近五千年的噴發事件。

圖片來源： U.S. Geological Survey Fact Sheet 073-97。

(二) 塔拉威拉裂谷(Tarawera Rift)（陶波火山帶，紐西蘭）

Tarawera 火山群屬於陶波火山帶（Taupo Volcanic Zone）的一部分、也就是從兩百萬年前在紐西蘭開始有火山活動的 Kermadec-Tonga 隱沒帶最南端的弧後張裂帶（圖 4-304）(Acocella et al., 2003; Wilson & Rowland, 2016)。Tarawera 火山群位於更新世塌陷的 Haroharo 火山陷落口中，並落在東北-西南向的爆裂口線形排列上，此線形排列與張裂相關的斷層帶方向一致，且與底下基性岩漿侵入岩體分布相似，推測此區火山熔岩源自於這裡，主要為流紋岩噴發，偶而發生玄武岩噴發，火山活動從一萬七千年前持續至現今。

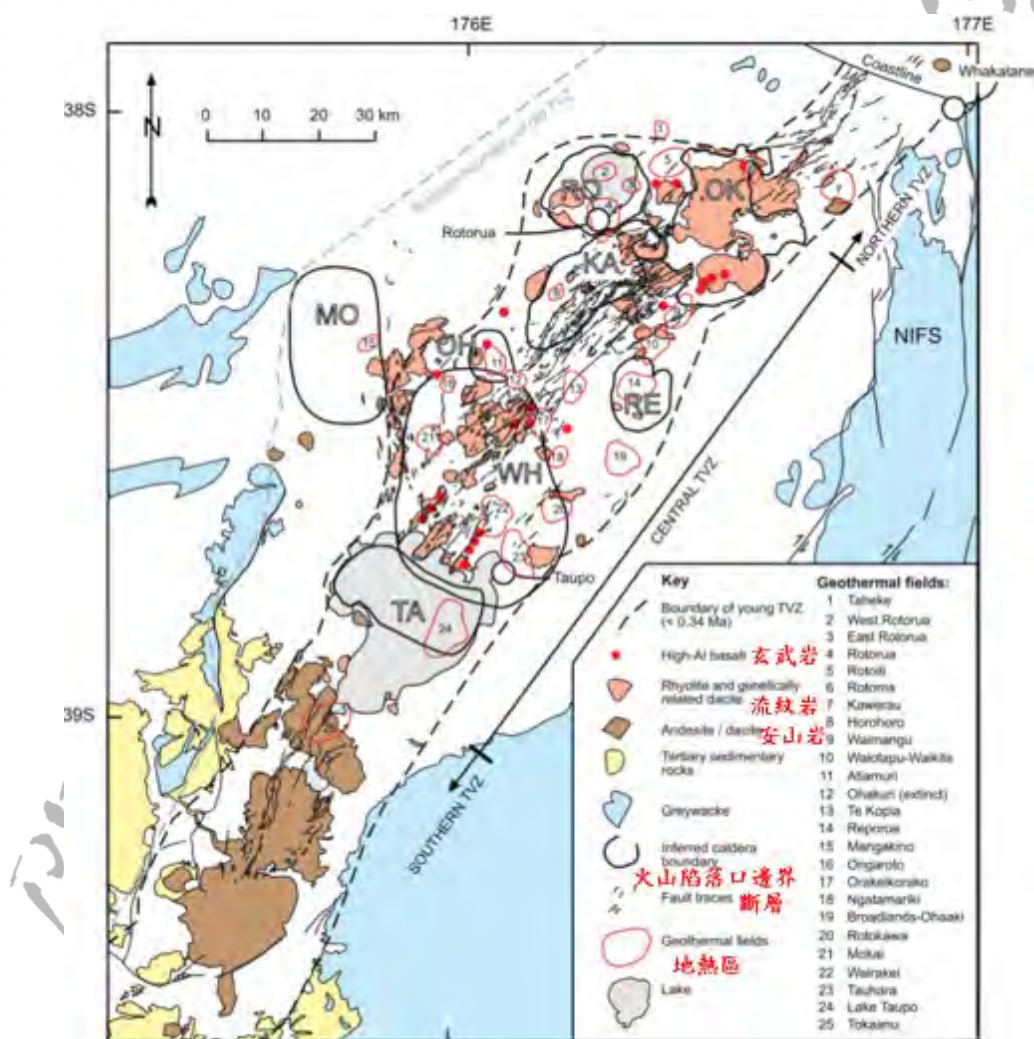
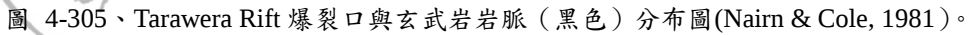


圖 4-304、陶波火山帶火山陷落口、噴發產物、斷層、地熱場等分布。

火山中心： KA – Kapenga、MO – Mangakino、OH – Ohakuri、OK – Okataina、RE – Reporoa、RO – Rotorua、TA – Taupo、WH – Whakamaru。Tarawera 屬於 Okataina 火山中心(Wilson & Rowland, 2016)。



(三)御嶽火山(Mt. Ontake)、日本

御嶽火山(Mt. Ontake)，又稱木曾御嶽山或御嶽，是位於日本本州長野縣木曾郡木曾町、王瀧村和岐阜縣下呂市、高山市邊界的複式火山(層狀火山)(圖 4-306)，為山麓原野廣大的獨立峰。現為日本 47 個監控的活火山之一。御嶽山標高 3,067 公尺，在日本第十四高的山、標高僅次於富士山。



圖 4-306、御嶽火山的位置圖。

地體構造上御嶽火山位於三個板塊(歐亞板塊、北美板塊和菲律賓海板塊，圖 4-307a)的交會處，屬於火山島弧系統的產物，但岩漿的形成可能牽涉到菲律賓海板塊隱入歐亞板塊、和太平洋海洋板塊隱入北美海板塊有關(圖 4-307b)。

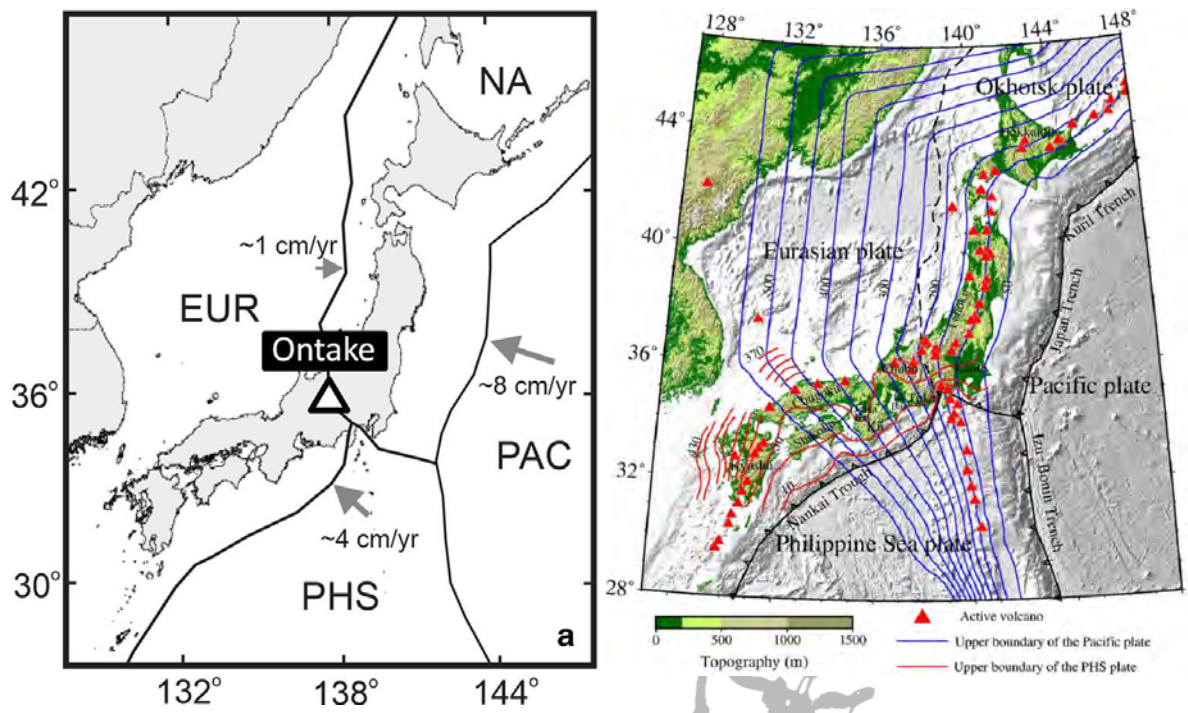


圖 4-307、日本週遭的地體構造。

(a) 日本週遭的地體構造，包括有四個板塊：歐亞板塊(EUR)、北美板塊(NA)、太平洋板塊(PAC)和菲律賓海板塊(PHS)等。(b) 菲律賓海板塊隱沒入歐亞板塊和太平洋板塊隱沒入北美板塊的深度分布圖(Wang et al., 2017)。

御嶽火山是一座玄武岩質至流紋岩質的層狀火山，其火山活動史可分為兩期：前期約為 78 萬年至 39 萬年，後期為 10 萬年至今。在過去的 1 萬年間總共發生的四次岩漿噴發和多次的蒸氣噴發。依據過去的火山噴發紀錄，御嶽火山在 18 世紀到 1979 年之間並無任何的噴發紀錄，但在 1979、1991、2007 和 2014 年總共發生四次的蒸氣噴發，其中以 1979 年和 2014 年這兩次的噴發較大，造成人員的傷亡。

(1)、1979 年的蒸氣噴發

1979 年御嶽火山在其東南邊發生蒸氣噴發，在海拔 2700-2900 公尺形成了一系列西北-東南的七個爆裂口，約分布於 500 公尺的範圍內(圖 4-308)。大部分的爆裂口直徑都小於 30 公尺、但最大的爆裂口直徑約為 80 公尺寬。此次噴發主

要發生在兩個爆裂口(爆裂口 A 和爆裂口 F)，其中以爆裂口 A(最大的爆裂口)為主要的噴發口。噴發的火山灰主要往東分布，圖 8 顯示厚度等厚分布圖，近爆裂口的最大厚度可達 50 公分厚，而往東方漸降低厚度(Kusakabe et al., 1982)，顯示當時噴發的風向為西風。

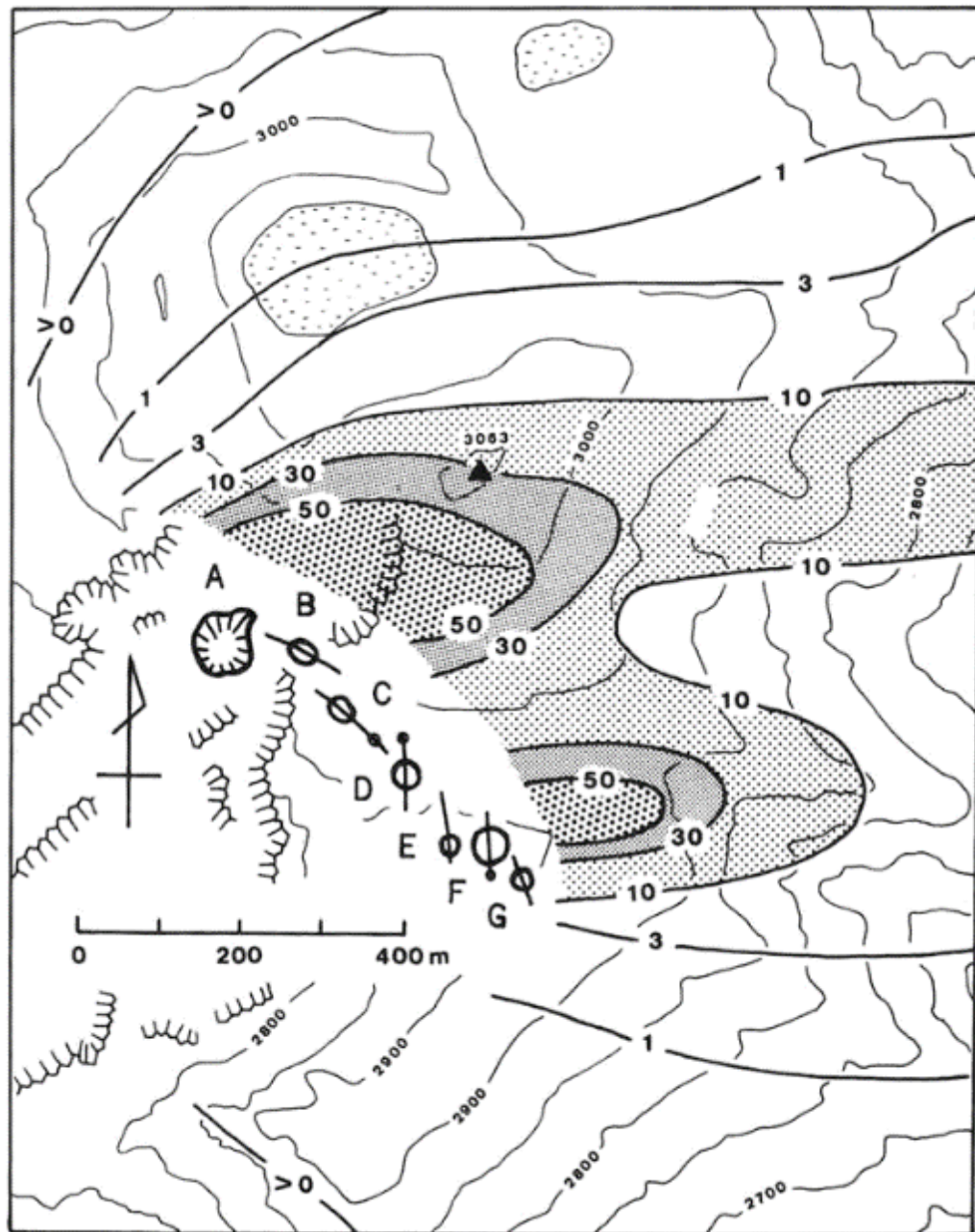


圖 4-308、1979 年御嶽火山所形成的爆裂口(A-G)和火山灰分布等厚圖(數字部分)(Kusakabe et al., 1982)。

噴發產物(火山灰)的分析顯示沒有新鮮的岩漿物質(玻璃質 juvenile materials)的發現，主要含熱液換質的岩塊，中間含有的換質礦物包括蒙脫石(smectite)、禾樂石(halloysite (7Å))和高嶺土(kaolinite)等(Ossaka et al., 1983; Soya et al., 1980)。這些黏土礦物都是低溫的產物，可能是長時間沒火山活動在地表淺處熱液換質的結果。另外，岩塊中的黃鐵礦(pyrite)、硬石膏(anhydrite)和自然硫(native Sulfur)之硫同位素分析顯示，這些礦物的形成是經由火山氣體中的二氧化硫(SO₂)和爆裂口內儲集層含泥質物的反應所形成(Kusakabe et al., 1982)。另外，硬石膏的氧同位素分析顯示含泥質物儲集層的溫度介於 110~185°C(Kusakabe et al., 1982)。

(2)、1991 年和 2007 年的蒸氣噴發

在 1991 年和 2007 年沿著 1979 年所形成的爆裂口，發生兩次小的蒸氣噴發，因為太小各種火山監測裝置和系統都沒有偵測到(日本氣象廳在山頂周邊設有觀測火山活動的地震儀、空氣振動測量儀、傾斜儀、火山氣體監測器、GPS 觀測裝置、監視鏡頭等設備)。但利用全球衛星導航系統(Global navigation satellite system GNSS)資料解析地形變形(Ground deformation)，顯示在御嶽火山下深度約 3 公里處有大約 $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩漿量侵入，其中約 $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 沿著一條開放的斷層帶侵入，另外的 $0.32 \times 10^6 \text{ m}^3$ 量侵入淺處(Takagi and Onizawa, 2016)。

(3)、2014 年的蒸氣噴發

2014 年 9 月 27 日 11 時 52 分日本御嶽火山發生火山蒸氣型爆發事件(Kaneko et al., 2016)，造成 55 人死亡，是日本自雲仙岳(Unzen Volcano)1991 年熔岩崩塌以來首起致命的火山噴發，也是自 1902 年致使約 150 人死亡的鳥島火山(Torishima volcano)噴發以來，第二次世界大戰之後死亡人數最多的火山噴發。是因為御嶽火山噴發前火山性地震呈明顯減少趨勢且地殼變動也未發現明顯變化，導致警戒失調造成遊客傷亡。

2014 年的蒸氣噴發事件主要發生在 1979 年爆裂口西南邊、形成數個爆裂口沿西北-東南方向分布約 800 公尺(圖 4-309)(Oikawa et al. 2016)，當天開始噴發高度最高可達 7.8 公里，然後慢慢降低到 2 公里高(Sato et al. 2016)，噴發的火山灰因風向往東分布，形成火山碎屑流堆積分布在御嶽火山山頂上和爆裂口附近(圖 4-310、圖 4-311)，其後形成含灰色泥的熱水由爆裂口往外溢出，直到 2015 年 7 月才結束，整個噴發演變過程如圖 4-312 (Oikawa et al., 2016)。2014 年的蒸氣噴發總共噴出的火山灰總量約為 $0.7\text{--}1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Maeno et al. 2016)。

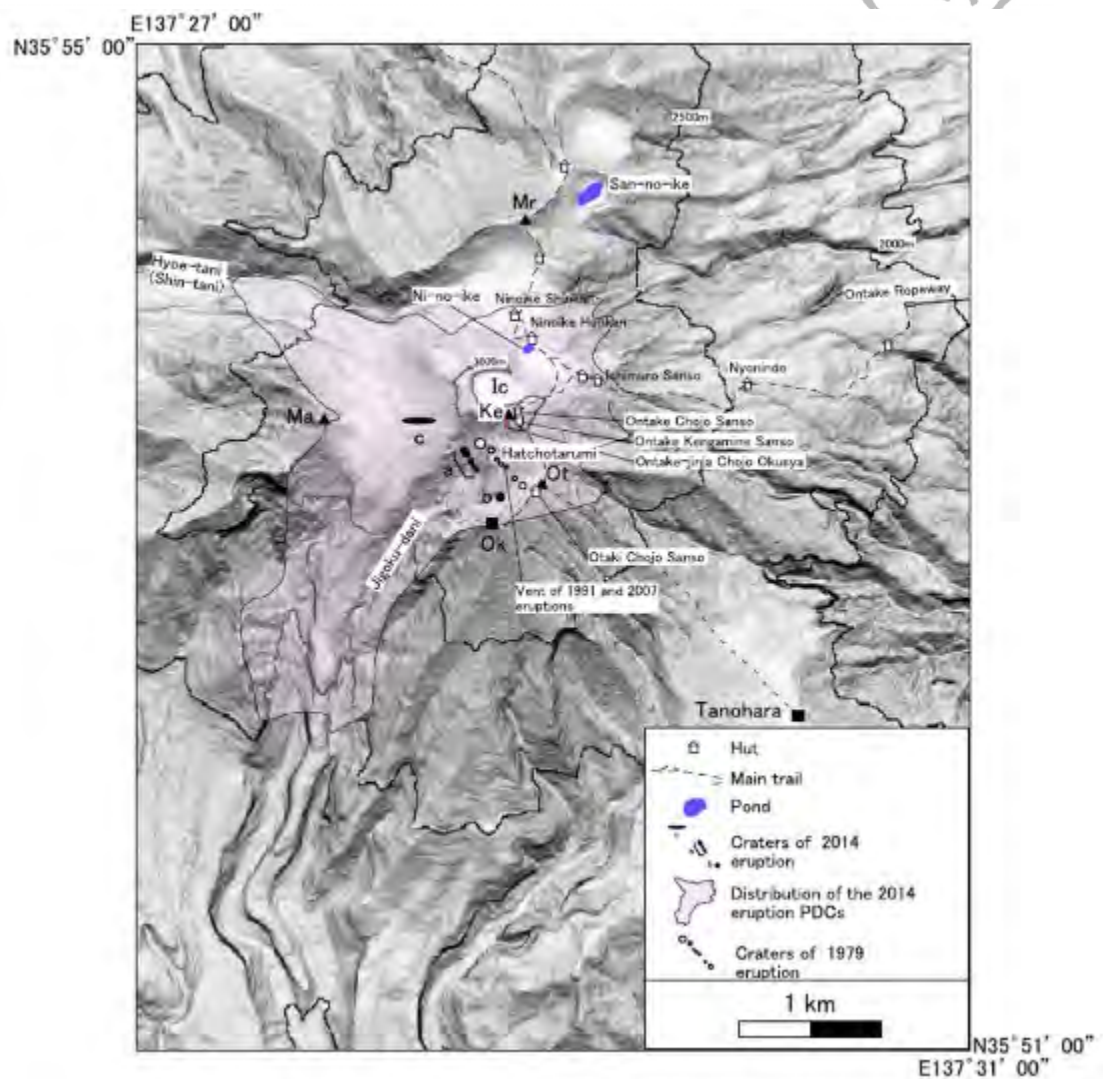


圖 4-309、御嶽火山 2014 年噴發的爆裂口和火山碎屑流堆積物的分布圖(Oikawa et al., 2016)。

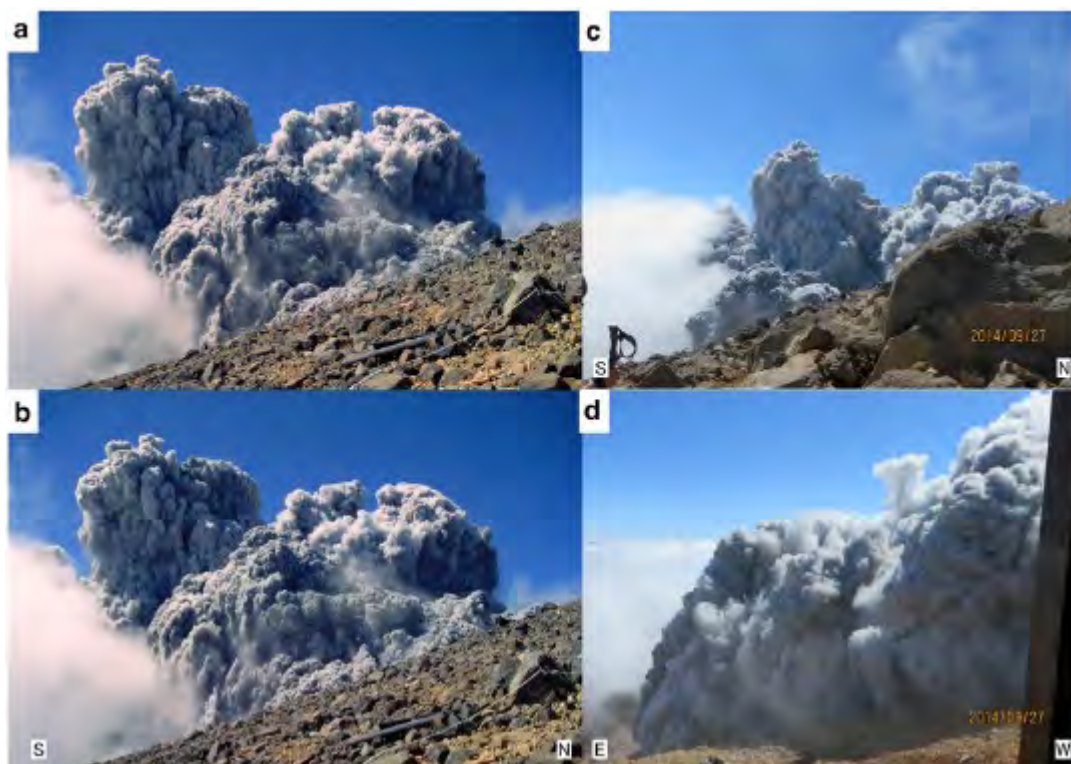


圖 4-310、御嶽火山 2014 年的火山碎屑流噴發(Oikawa et al., 2016)。

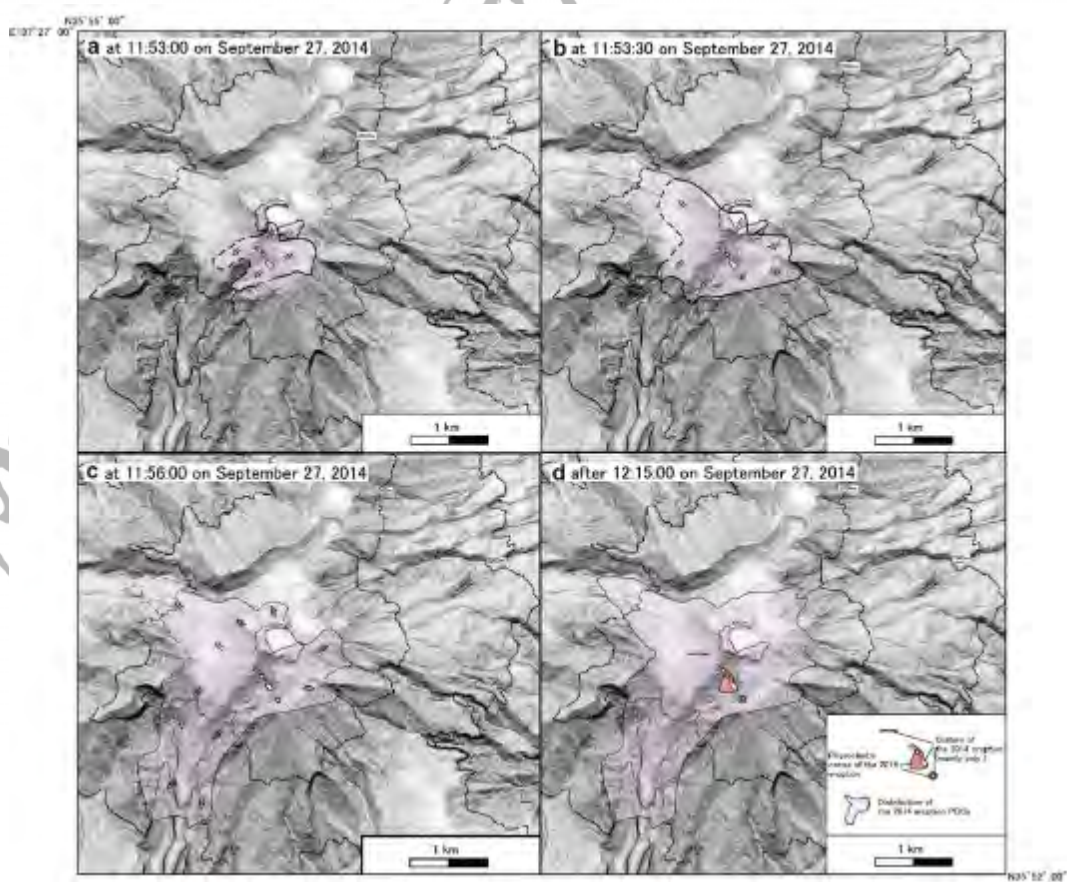


圖 4-311、御嶽火山 2014 年的火山碎屑流堆積物分布圖(Oikawa et al., 2016)。

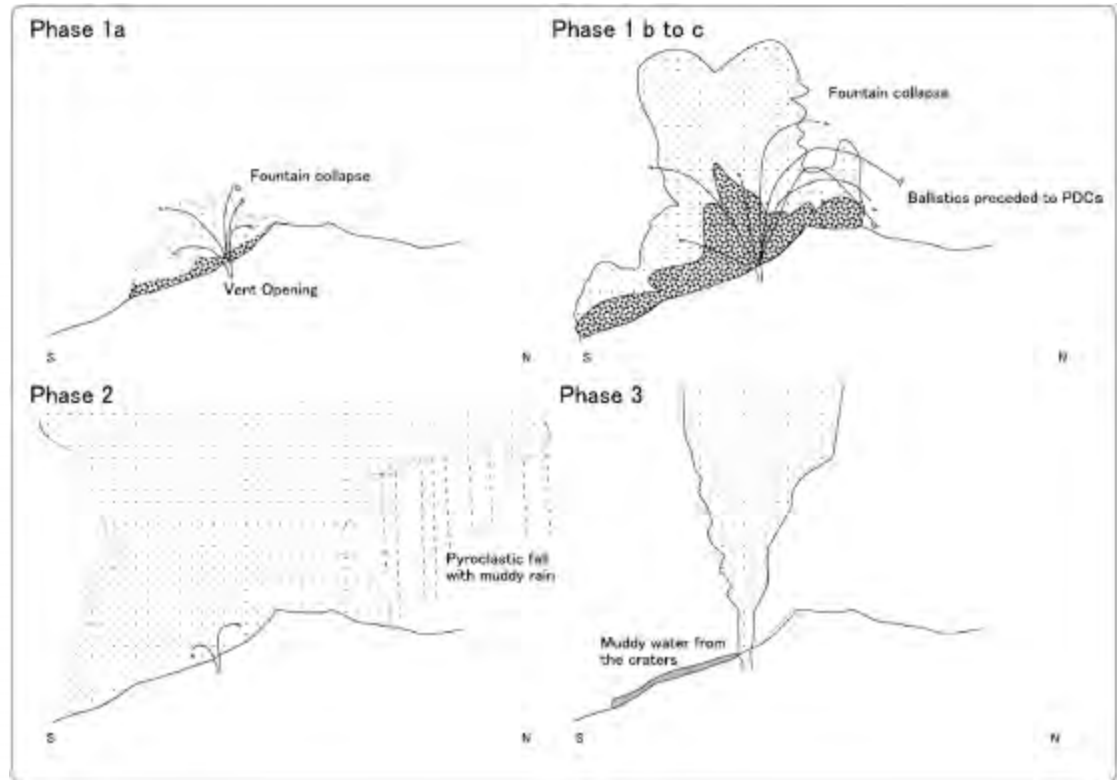


圖 4-312、御嶽火山 2014 年的噴發演變過程(Oikawa et al., 2016)。

火山灰組成研究顯示，大部分的顆粒都是由熱液換質的岩屑所組成，部分換質較不嚴重的顆粒含有火成礦物，如斜長石、正輝石、鈦鐵礦和正長石等，但無新鮮的火山玻璃在其中，為典型的蒸氣噴發產物。熱液換質礦物包括有二氧化矽礦物、高嶺土、蒙脫石、葉蠟石(pyrophyllite)、白雲母(muscovite)、明礬石(alunite)、硬石膏(anhydrite)、石膏(gypsum)、黃鐵礦(pyrite)、鉀長石、鈉長石(albite)和金紅石(rutile)等。從這些換質礦物的組成研究，顯示這些換質礦物可能生成淺於深度 2 公里內。另外，黃鐵礦、硫化物和自然硫的硫同位素研究，建議熱液換質的溫度介於 270~281°C(Maruoka et al., 2016)。

綜合上述的研究結果，御嶽火山 2014 年的蒸氣噴發機制如圖 4-313 所示(Ogawa et al., 2016)。

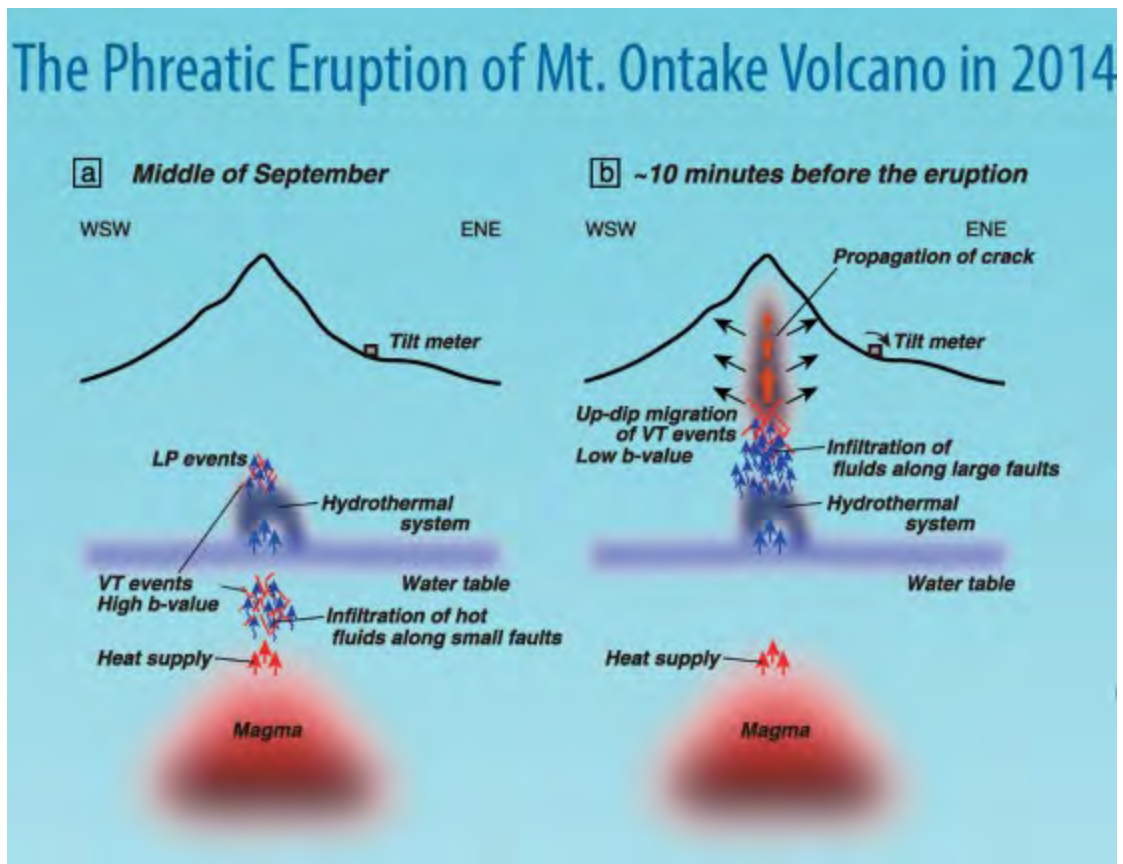


圖 4-313、御嶽火山 2014 年蒸氣噴發的噴發機制模式(Ogawa et al., 2016)。

(四)Inyo Craters、Tarawera Rift、Mt. Ontake 與七星山亞群爆裂口比較

比較七星山亞群、Inyo Craters、Tarawera Rift 與 Mt. Ontake 的爆裂口(表 4-22)，可發現以下共通點：(1)皆形成於張裂環境；(2)皆由地底下沿著斷層或裂隙形成的岩脈或岩漿侵入為熱源；(3)都有地下水、湖泊、地熱場的熱液等水源。Inyo Craters (圖 4-314)、Tarawera Rift(圖 4-315)和 Mt. Ontake(圖 4-316)的爆裂口都是沿著裂隙排列且附近有地熱區，這兩點都與大七星山亞群爆裂口相似。



圖 4-314、伊尼奧火山口(Inyo Craters)。

圖片來源：<https://www.fs.usda.gov/recarea/inyo/recarea/?recid=20410>



圖 4-315 塔拉威拉裂谷(Tarawera Rift)。

圖片來源：<https://www.scoop.co.nz/stories/SC1412/S00018/taupo-hosts-international-conference-on-volcanoes.htm?from-mobile=bottom-link-01>



圖 4-316、Mt. Ontake。

圖片來源 Google 圖板：<https://www.google.com.tw/maps/place/>

表 4-22、Inyo Craters、Tarawera Rift、Mt. Ontake 與七星山亞群爆裂口的比較

	七星山亞群	Mt. Ontake	Inyo Craters	Tarawera Rift
構造環境	後碰撞張裂 或火山島弧	火山島弧	不確定	弧後張裂
歷史噴發 紀錄	無，但地震 和噴氣活躍	1979、1991、2007 和 2014 年發生四 次蒸氣噴發	地震活躍、 1350 年形成	非常活躍的火 山活動，1886 年形成爆裂口
外界水來 源	熱液(?)	熱液	地下水	熱液
熱源	岩漿穹窿湧 出(?)	岩漿侵入	岩脈侵入地 下淺處	基性岩漿補充 酸性岩漿庫引 發岩脈侵入
形成機制	沿斷層帶噴 發形成多個 爆裂口	沿斷層帶噴發形成 多個爆裂口	沿區域斷層 帶噴發形成 單個爆裂口	沿主要斷層帶 噴發形成多個 爆裂口
爆裂口位 置	七星山亞群 火山體東西 兩側	御嶽火山南側	位於 Long Valley Caldera 內	切過 Tarawera Rift 陷落口長 約 17 公里

(五)小結

大屯火山群蒸氣噴發與世界上有名蒸氣噴發案例，包括(1)美國的伊尼奧火山口；(2)紐西蘭的塔拉威拉裂谷；(3)日本的御嶽火山之比較，可獲得 這些蒸氣噴發皆形成於張裂環境、可能皆由地底下沿著斷層或裂隙形成的岩脈或岩漿侵入為熱源、和都有地下水、湖泊、熱液等為水源。



第五章、結論與建議

一、結論

本研究係針對陽明山國家公園區內七星山東西兩側張裂帶爆裂口，進行爆裂口地形分析及爆裂口岩石與沉積物的研究兩個面向，以對於張裂帶與爆裂口之分布範圍、面積與地形特徵有所了解，此外，透過爆裂口之噴發形式與噴發物，進一步運用碎形維度分析張裂帶與爆裂口的形成年代以及其與爆裂口之關係，並透過對大屯火山群後期蒸氣噴發的特性和規模大小，初探蒸氣型火山噴發可能性及張裂帶與爆裂口於大屯火山群之可能形成機制和火山學意義。

針對爆裂口地形分析及岩石沉積物之研究歸納出下列結論：

(一)確立七星山張裂帶構造之分布趨勢，其爆裂口保留完整外形，

顯示形成的年代相當年輕：

- 1、本計畫利用光達數值高程模型(LiDAR-DEM)在地形上，以小油坑為爆裂口邊界描繪的基準，將七星山西側及東側陷落區域判釋出張裂帶構造和爆裂口外形。七星山西側張裂帶中較完整的爆裂口為WFC1、WFC5和鴨池爆裂口；七星山東側張裂帶中較完整的爆裂口為EFC2、EFC4、EFC5、EFC6。張裂帶有向東北和西南方延伸的趨勢。
- 2、碎形幾何的盒子計數法提供一維碎形維度，作為爆裂口邊界破碎程度的量化依據，用以比較相同侵蝕速率下時間因素造成的爆裂口邊界變化。結果顯示東西兩側張裂帶上爆裂口可能形成順序的排列為：WFC2 > EFC2 > EFC4 > DP > EFC6 > WFC1 > WFC5 > EFC5 > EFC1；裂谷可能形成順序的排列為：WFC3 > WFC4 > WFC8 > EFC3。

(二)建立大屯火山群之噴發順序：

由碎形維度獲得之大屯火山群噴發順序依次為：丁火朽山亞群、磺嘴山亞

群、竹子山亞群、七星山亞群之第一期噴發，而後丁火朽山亞群、竹子山亞群、七星山亞群第二期噴發，爾後大屯山亞群噴發，最後是磺嘴山亞群第二期噴發。

(三)碎形維度分析可有效地獲得過去火山活動形成之地形特徵:

- 1、研究顯示大屯火山群地形的碎形維度值與金山斷層和氣候(風化侵蝕作用)未有顯著關係。
- 2、火山產狀會因為本身的性質等因素影響碎形維度值，其由小至大分別為火山泥流、熔岩流、火山碎屑流、火山穹窿、碎屑崩落。
- 3、地表受風化等作用隨時間愈趨破碎，碎形維度可以定量此種破碎程度進而反映其相對年代。以此方法建立之火山層序可以避免定年及地形造成的誤判。
- 4、碎形幾何的三角柱頂面積法提供二維碎形維度，可比較相對高度差的變化程度。結果顯示張裂帶的裂隙在2 m或1 m DEM下碎形維度皆相當大，反映出裂隙的東北—西南走向，並向下游延伸至東北或西南向的溪谷等。
- 5、碎形幾何的變異曲線法提供二維碎形維度，可反映地形起伏變化的頻度和水系密度的變化。結果顯示七星山在高程超過700至800 m的坡體，較難出現32 m尺度以上的溪溝，代表張裂帶不為流水侵蝕所造成。在爆裂口中央低地的位置碎形維度較高，表示其為流水和沉積物匯集處。

(四)了解爆裂口可能形成的年代與特性:

- 1、由定年資料顯示夢幻湖形成於距今約5,600年前、S-2爆裂口形成的年代約為3,800年、S-3爆裂口形成的年代約為1,800年。
- 2、七星山東側張裂帶其他三個爆裂口的沉積物都是以黑色碳物質為主，偶夾灰色泥質物、石英顆粒和安山岩塊。
- 3、七星山西側張裂帶爆發口內的沉積物以黑色碳物質夾灰色泥質沉積物，並含有安山岩塊但未發現有石英顆粒。七星山西側爆發口之鑽井都未鑽獲底部，

故噴發形成年代可能都老於7,400年前。

- 4、整體而言，七星山東側的爆裂口形成年代較西側年輕，與地形碎形幾何分析所獲得的結果一致。

(五)七星山蒸氣型火山噴發之初探與國際案例之比較:

- 1、分布於七星山兩側的爆裂口可能是由蒸氣式噴發所形成的。此種蒸氣型噴發屬於地下有熱液儲集層、累積氣體壓力後噴發形成，其熱源可能來自於紗帽山熔岩穹窿的岩漿活動。
- 2、七星山火山亞群的火山噴發型態屬於熱液噴發型。
- 3、比較日本Mt. Ontake、美國Inyo Craters與紐西蘭Tarawera Rift可發現以下共通點：(1)皆形成於張裂環境；(2)可能皆由地底下沿著斷層或裂隙形成的岩脈或岩漿侵入為熱源；(3)都有地下水、湖泊、熱液等水源。
- 4、綜合比較，七星山亞群爆裂口的地質和形成機制和Mt.Ontake 較為相似，可做為後續研究與觀測之參考。

二、建議

本研究初探了七星山張裂帶構造之爆裂口及蒸氣型噴發特性，未來仍建議針對未知領域持續進行研究與監測，並可將研究成果轉換為科普資訊，加強與民眾宣導活火山及蒸氣噴發之相關資訊。中長期建議跨部會建立蒸氣噴發預警機制與防災體系，以減低災害與保障民眾安全。

(一)短期可行建議

1、建議宣導蒸氣型火山噴發之研究成果，並納入火山科普教育

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：經濟部中央地質調查所、科技部

蒸氣型火山噴發型態對於大屯火山群屬於較新的科學概念與災害類型，建議轉譯為科普知識，融入國家公園原有的火山教育內容並加以宣導，讓民眾進一步了解，過去大屯火山群除了熔岩流、碎屑流及火山泥流等較為人知的火山活動外，還曾發生與國際類似的蒸氣型火山噴發證據與事件，以提升民眾的火山知識與防災意識。

(二)中、長期可行建議

1、本研究初窺了過去可能的蒸氣噴發事件，建議可再進行爆裂口之鑽探研究，特別是 S2 爆裂口北側的爆裂口，和加深鑽探西側爆裂口，以深入了解七星山蒸氣噴發週期與頻率

主辦單位：陽明山國家公園管理處

協辦單位：經濟部中央地質調查所、科技部

(1)七星山東側S2爆裂口北側有一完整、深度較深、植被較少的爆裂口，可能形成年代更年輕。建議未來若有機會應該前往鑽探，以了解形成的年代和發生頻率。

(2)七星山西側爆裂口加深至21公尺後都未鑽獲底部，顯示其形成應有一定的年

代。為了解七星山蒸氣噴發週期和頻率，建議未來若有機會應該再前往鑽探，以了解形成的年代，並進一步了解七星山蒸氣噴發爆裂口的幾何形態和深度。

2、為預防與減低七星山蒸氣噴發事件之影響，建議調查與研究蒸氣噴發之噴出物分布與可能發生的地點，作為未來設立監測站、預警機制、防災體系與逃生演練等火山防災之基礎

主辦單位：經濟部中央地質調查所、科技部

協辦單位：陽明山國家公園管理處

- (1)火山地下熱液儲集層對於蒸氣噴發和所形成的爆裂口位置息息相關，為了解大屯火山群未來蒸氣噴發可能的區域，建議應該廣泛調查地下可能的儲集層位置，以及地表的裂隙構造分布，作為火山防災的基礎。
- (2)對於各爆裂口蒸氣噴出物的可能分布從事調查研究，以了解這些噴出物可能的影響範圍和可能的噴發規模，作為火山防災的基礎。

3、除了蒸氣噴發事件，建議再進行有系統的熔岩流定年工作，以了解大屯火山群完整的岩漿活動史

主辦單位：科技部、經濟部中央地質調查所

協辦單位：陽明山國家公園管理處

蒸氣噴發的熱源與岩漿活動息息相關，為了解大屯火山群過去的岩漿噴發頻率，建議應有系統地對於分布於大屯火山群內的各層熔岩流採樣定年，以了解大屯火山群的岩漿活動史。

4、大屯火山群內蒸氣噴發可能的地點設立監測站，以即時觀測火山蒸氣噴發活動

主辦單位：科技部、經濟部中央地質調查所

協辦單位：陽明山國家公園管理處

建議在大屯火山群內蒸氣噴發可能的地點設立監測站，以即時觀測火山蒸氣噴發活動，達到預警之目的。

5、建立跨部會蒸氣噴發的預警機制和防災體系，並定期進行防災逃生演練

主辦單位：科技部、內政部消防署

協辦單位：中央氣象局、臺北市政府、新北市政府、陽明山國家公園管理處

(1)建議跨部會相關單位整合建立蒸氣噴發的預警機制和防災體系。

(2)定期舉辦蒸氣噴發可能造成災害的避難和逃生演練。建議洽請內政部消防署、臺北市政府和新北市政府消防局施行。

6、抽取少量地熱能以減緩火山蒸氣噴發熱水儲集層之熱能累積

主辦單位：科技部、經濟部中央地質調查所

協辦單位：臺北市政府、新北市政府、陽明山國家公園管理處

藉由火山熱能的抽取利用，減緩火山流體和熱能的累積速率達飽和程度，以爭取更多的時間發展對火山預測和防範災害技術。由科技部或經濟部中央地質調查所評估辦理。

參考文獻

日文:

大島十郎(1904), 臺灣北部大屯山附近の地質。地質學雜誌, 第三卷。

出口雄三(1912), 大屯火山彙地質調查報文。臺灣總督府民政部殖產局; 及地質學雜誌, 第 24 卷。

大江二郎、小笠原美津(1932), 縮尺五萬分之一地質圖及說明書—大屯山圖幅。臺灣總督府民政部殖產局, 第 653 號。

中文:

顏滄波、陳培源 (1953), 五萬分之一臺灣地質圖說明書: 大屯山幅。臺灣地質調查所彙刊, 第 5 號, 中文 12 頁, 英文 9 頁。

陳培源、楊昭男 (1985), 大屯火山群及北部濱海地質簡介。臺灣省政府教育廳科學教育資料叢書, 第 132 頁。

何春蓀 (1986), 比例尺五十萬分之一臺灣地質圖。經濟部中央地質調查所出版。

黃鑑水 (1988), 五萬分之一臺灣地質圖及說明書圖幅第 4 號: 台北。經濟部中央地質調查所, 共 46 頁。

王文祥 (1989), 臺灣北部大屯火山群之火山地質及核分裂飛跡定年研究。國立臺灣大學地質研究所碩士論文, 共 154 頁。

莊文星、陳汝勤 (1989), 臺灣北部火山岩之定年與地球化學研究。經濟部中央地質調查所彙刊, 第 5 號, 第 31-66 頁。

陳正宏(1990), 臺灣之火成岩。經濟部地質調查所出版, 共 137 頁。

劉聰桂(1990), 夢幻湖及附近窪地之剖面分析及定年研究。陽明山國家公園管理處委辦 (報告編號 G0011)。

咎大偉(1992), 臺灣地形之碎形幾何特性及其代表之地形意義。國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共 103 頁。

葉寶安(1994), 臺灣北部大屯火山區地形之碎形幾何特性及其地質意義。國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共 92 頁。

葉寶安和李錫堤(1994), 臺灣海岸線的碎形幾何特性。地質, 第 14 卷, 第 2 期, 第 167-182 頁。

曹恕中(1994), 大屯火山群火山岩的鉀氫年代分析。經濟部中央地質調查所彙刊, 第 9 號, 第 137-154 頁。

趙培文(1995), 臺灣地形之碎形特性與地形模擬。國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共 100 頁。

張志三(1996), 漫談碎形。牛頓出版社。

- 李淑芬 (1996)，大屯火山群七星火山亞群熔岩層序之研究。國立臺灣大學地質研究所碩士論文，共 136 頁。
- 陳彥傑和宋國城(1999)，以碎形為基礎的臺灣地形分區。環境與世界，第三期，第 1-15 頁。
- 陳文山、楊志成、楊小青、劉進金 (2003)，從火山地形探討大屯火山群的地層層序與構造。經濟部中央地質調查彙刊，第 16 號，第 1-25 頁。
- 楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏 (2003)，大屯火山群火山氣體成份與來源之探討。國家公園學報，第 13 卷，第 1 期，第 127-156 頁。
- 林伯航(2004)，應用碎形分析河川棲地分布之時空特性。國立中央大學土木工程研究所碩士論文，共 106 頁。
- 鄧屬予、李錫堤、劉平妹、宋聖榮、曹恕中、劉桓吉、彭志雄 (2004)，臺北堰塞湖考證。國立臺灣大學理學院地理學系地理學報，第 36 期，第 77-100 頁。
- 楊志成、劉進金、黃明哲、陳文山(2004) 利用數值地形分析探討大屯火山群火山地形，航測及遙測學刊，第九卷，第二期，第 1-8 頁。
- 宋聖榮 (2005)，陽明山溫泉、地熱資源與利用調查。陽明山公園管理處委託研究報告 (報告編號：G0039)。
- 張秉良、白志達、洪漢淨、徐德斌、盤曉東(2005)，吉林龍崗火山碎屑分形研究。地震地質，第 27 卷，第 3 期，第 462-469 頁。
- 詹瑜璋、李建成、鄭鼎躍、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城(2005)，大台北地區特殊地質災害調查與監測：高精度空載雷射掃描 (LIDAR)地形測製與構造地形分析 (1/3)。經濟部中央地質調查所報告第 94-06 號 (委辦計畫編號：5226902000-04-94-04)。
- 宋聖榮 (2006)，臺灣的火山。臺灣地理百科：77。遠足文化出版，共 208 頁。
- 陳培源 (2006)，臺灣大屯火山群地區地質圖之製作緣由。地質，第 25 卷，第 3 期，第 5-8 頁。
- 陳中華、林朝宗 (2006)，從關渡一號岩芯中火山灰來推斷大屯火山群近期噴發。第十一屆「臺灣之第四紀」研討會論文集，第 82-83 頁。
- 廖思善(2006)，動手玩碎形。科學天地：84。臺北市：天下遠見，共 254 頁。
- 黃怡靜 (2007)，臺灣本島地質分區之地形碎形特性研究。國立成功大學資源工程學系碩士論文，共 126 頁。
- 陳文山、楊志成、楊小青、劉進金、詹瑜璋、謝凱旋、謝有忠 (2007)，從 LiDAR 的 2 公尺 x 2 公尺數值模擬地形分析大屯火山群的火山地形。經濟部中央

- 地質調查彙刊，第 20 號，第 101-128 頁。
- 鄧屬予 (2007)，臺灣第四紀大地構造。經濟部中央地質調查所特刊，第 18 號，第 1-24 頁。
- 林詠忠 (2008)，北臺灣磺嘴山火山亞群之層序和地球化學特徵。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 142 頁。
- 莊文星、陳汝勤 (2008)，北臺灣火山地形多樣性之探討。經濟部中央地質調查所彙刊，第 21 號，第 107-142 頁。
- 徐偉城(2008)，LIDAR 與環境調查／監測／災害防救應用。國土資訊系統通訊季刊，第 61 期，第 69-79 頁。
- 葉斌 (2009)，臺灣北部竹子山火山亞群的火山地質與層序研究。國立臺灣大學地質科學系碩士論文，共 84 頁。
- 地調所 (2012) 山腳斷層條帶地質圖：
<https://faultnew.moeacgs.gov.tw/About/FaultMore/0f0ba96791b44c849d9515ef3df9fd7c>
- 林毓潔(2013) 大屯火山群土壤之石英來源：國立臺灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，83 頁。
- 謝有忠、陳奕中、邱禎龍(2014)，三維視覺化地圖於構造地形精準呈現。地質，第 33 卷，第 4 期，第 44-53 頁。
- 宋聖榮、盧乙嘉、劉佳玫、張竝瑜 (2015)，臺灣地熱能源發展的現況、展望與困境。石油季刊，第 51 期，第 1 卷，第 61-82 頁。
- 陳文山 (2015)《山腳斷層》科學發展第 515 期，2015-11-01。
- 廖陳侃(2018) 大屯火山群七星山地區年輕爆裂口之研究。國立臺灣大學地質研究所碩士論文，共 279 頁。

英文：

- Acocella, V., Spinks, K., Cole, J.W., Nicol, A.,(2003) Oblique back arc rifting of Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Tectonics* 22, 1045.
- Bailey, R.A., 1(989) Geologic map of Long Valley caldera, MonoInyo Craters volcanic chain, and vicinity, eastern California. U.S. Geol. Surv. Map I-1933, scale 1 : 62,500; pamphlet. Bailey, R.A., 2004. Eruptive history and chemical evolution of the precaldern and postcaldern basalt-dacite sequences, Long Valley, California : implications for magma sources, current magmatic unrest, and future volcanism. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1692, 76 pp.
- Belousov, A., Belousova, M., Chen, C. H. and Zellmer, G. F. (2010). Deposits,

- character and timing of recent eruptions and large-scale collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: hazard-related issues. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191, 205-221.
- Bruno, B.C., G.J. Taylor, S. K. Rowland, and P. G. Lucey (1992) Lava flows are fractals, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 305-308.
- Burrough, P. A. (1981) Fractal dimensions of landscapes and other environmental data, *Nature*, 294, 240-242.
- Bursik, M., Renshaw, C., McCalpin, J., Berry, M. (2003) A volcanotectonic cascade : activation of range front faulting and eruptions by dike intrusion, Mono Basin-Long Valley, California. *J. Geophys. Res.* 108 (B8) (ECV 10 : 1-14) .
- Chen, C. H. and Wu, Y. J. (1971). Volcanic geology of the Tatun geothermal area, northern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, 14, 5-20.
- Chen, C. H. (1975). Petrological and chemical study of volcanic rocks from Tatun Volcanic Group. *Proceedings of the Geological Society of China*, 18, 59-72.
- Chen, C. H. (1978). Petrochemistry and origin of Pleistocene volcanic rocks from northern Taiwan. *Bulletin of Volcanology*, 41(4), 513-528.
- Chen, C. H. and Lin, S. B. (2002). Eruptions younger than 20 Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Songshan Formation in Taipei Basin. *Western Pacific Earth Sciences*, 2(2), 191-204
- Cheng, Y. C., Lee, P. J., and Lee, T. Y. (1999) Self-similarity dimensions of the Taiwan Island landscape. *Computers and Geosciences*, 25, 1043-1050.
- Clarke, K. C. (1986) Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers and Geosciences*, 12(5), 713-722.
- Dickinson, W.R. (1981) Plate tectonics and the continental margin of California. In: W.G. Ernst (Editor), *The Geotectonic Development of California*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.. pp. 1-28.
- Feder, J. (1988) *Fractal*. New York, Plenum Press, 283 p.
- Hildreth, W. (2004) Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters : several contiguous but discrete systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 3-4, 169-198.
- Ikehata K, Maruoka T (2016) Sulfur isotopic characteristics of volcanic products from the September 2014 Mount Ontake eruption, Japan. *Earth Planet Space* 68(116):1-7

- Juang, W. S. (1993) Diversity and origin of quaternary basaltic magma series in northern Taiwan. *Bulletin of the National Museum of Natural Science*, 4, 125-166.
- Juang, W. S., and Bellon, H. (1984) The potassium-argon dating of andesites from Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, 27, 86-100.
- Kagiyama & Morita (2008) First steps in understanding caldera forming eruptions: *Jour. Disaster Res.* 3, 270-275.
- Kaneko, T., Maeno, F. and Nakada, S. (2016) 2014 Mount Ontake eruption: characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations. *Earth, Planets and Space* (2016) 68:72, DOI 10.1186/s40623-016-0452-y.
- Koch, H. von. (1904) "Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire." *Archiv für Matemat., Astron. och Fys.* 1, 681-702.
- Ku, T. L., Teng, T. L., Wu, F. T., Li, Y. H., Wang, N. D., and Yao, T. H. (1959). *Geology of Tatun Volcano Group and its adjacent area, Taiwan*. Graduation Thesis, Department of Geology, National Taiwan University.
- Kusakabe M, Mizutani Y, Kometani M (1982) A preliminary stable isotope study of volcanic ashes discharged by the 1979 eruption of Ontake volcano, Nagano, Japan. *Bull Volcanol* 45(3):203–209
- Lin, C.H. (2016). Evidence for a magma reservoir beneath the Taipei metropolis of Taiwan from both S-wave shadows and P-wave delays. *Scientific Reports*, 6, 39500
- Lai, Y. M., Lin Y. J., Song S. R., Tsai Y. W., Hsieh Y. C., and Lo W. (2010) Topography and Volcanology of the Huangtsuishan Volcano Subgroup, Northern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(3), 599-609.
- Lifton, N.A., and Chase, C.G. (1992) Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California. *Geomorphology*, 5: 77-114.
- Mandelbrot, B. B. (1967) How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 155, 636-638.
- Mandelbrot, B. B. (1977) *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 365 p.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and

- Company, San Francisco, 468 p.
- Maeno F, Nakada S, Oikawa T, Yoshimoto M, Komori J, Isuizuka Y, Takeshita Y, Shimano T, Kaneko T, Nagai M (2016) Reconstruction of a phreatic eruption on 27 September 2014 at Ontake volcano, central Japan, based on proximal pyroclastic density current and fallout deposits. *Earth Planet Space* 68(82):1–20
- Mastin, L.G. (1991) The roles of magma and groundwater in the phreatic eruptions at Inyo Craters, Long Valley caldera, California. *Bull. Volcanol.* 53, 579 – 596.
- Nairn, I.A., Cole, J.W. (1981) Basalt dikes in the 1886 Tarawera Rift. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 24 : 5-6, 585-592
- Ogawa, Y. and Furuya, M. and Nishitani, N. (2016) Cover page in Special issue “The phreatic eruption of Mt. Ontake volcano in 2014”. *Earth Planet Space* 68(79).
- Oikawa T, Yoshimoto M, Nakada S, Maeno F, Komori J, Shimano T, Takeshita Y, Ishizuka Y, Ishimine Y. (2016) Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake volcano from recorded images and interviews. *Earth Planet Space* 68(79):1–13
- Ossaka J, T O, Sakai H, Hirabayashi J (1983) Geochemical study on the volcanic activity of kiso-ontake volcano, after the 1979 eruption. *Bull Volcanol Soc Japan* 28:59–74 (in Japanese with English abstract)
- Pyle, D.M. and Elliott, J.R. (2006) Quantitative morphology, recent evolution, and future activity of the Kameni Islands volcano, Santorini, Greece. *Geosphere* 2, 253–268; doi: 10.1130/GES00028.1.
- Renslow, M.(2001)Development of a bare ground DEM and canopy layer in NW forestlands using high performance LiDAR, In ESRI International User Conference. San Diego, California: ESRI, 12p.
- Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L.& Fischer, T.P. (2015) Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption: *Scientific Reports* 5, | DOI: 10.1038/srep13069
- Song, S.R., Yang, T.Y., Yeh, Y.H., Tsao, S., Lo, H.J. (2000) The Tatun Volcano Group is active or extinct ? *J. Geol. Soc. China*, 43, 521-534.
- Song, S. R., Chen, T. M., Tsao, S., Chen, H. F., and Liu, H. C. (2007a). Lahars in and around the Taipei basin: Implications for the activity of the Shanchiao fault. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(3), 277-286.
- Soya T, Kondo Y, Shimosaka Y (1980) Mt. ontake-san 1979 eruption. *Chisitsu news*

306:6–13 (in Japanese)

- Stix, J. and de Moor, J.M. (2018) Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing: Earth, Planets and Space 70/83, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0855-z>.
- Sung, Q. C., Chen, Y. C. and Chao, P. C. (1998) Spatial variation of fractal parameters and its geological implications. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9(4), 655-672.
- Suppe, John (1981). *Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan*. *Memoir of the Geological Society of China (Taiwan)*, 4, 67-89.
- Suppe, John (1984). Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Geological Society of China Memoir*, 6, 131-146.
- Szakacs, A. (1994). Redefining active volcanoes: a discussion. *Bulletin of Volcanology*, 56, 3221-325.
- Takarada S, Oikawa T, Furukawa R, Hoshizumi H, Itoh J, Geshi N, Miyagi I (2016) Estimation of total discharged mass from the phreatic eruption of Ontake volcano, central Japan, on September 27, 2014. *Earth Planet Space* 68(1):1–9. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0511-4>
- Teng, L. S. (1996). Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. *Geology*, 24, 949-952.
- Teng, L. S., C. H. Chen, T. K. Liu, W. S. Juang, and J. C. Chen (1992) Plate kinematic model for late Cenozoic arc magmatism in northern Taiwan. *Geol. Soc. China*, 35, 1-18.
- Tsai, Y. W., Song, S. R., Chen, H. F., Li, S. F., Lo, C. H., Lo, W., and Tsao, S. (2010). Volcanic stratigraphy and potential hazards of the Chihsingshan Volcano Subgroup in the Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(3), 587-598.
- Tsao, S., Song, S. R. and Lee, C. Y. (2001). Geological implications of lahar deposits in Taipei Basin. *Western Pacific Earth Sciences*, 1(2), 199-212.
- Turcotte, D. L. (1997) *Fractal and chaos in geology and geophysics*. Cambridge, New York, Second edition.
- U.S. Geological Survey Fact Sheet 073-97: <https://sierra.sitehost.iu.edu/papers/2010/jarosinski.html>
- Wang, K. L., S. L. Chung, C. H. Chen, R. Shinjo, T. F. Yang, and C. H. Chen, 1999:

- Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 308, 363-376, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00111-0.
- Wang, K. L., S. L. Chung, C. H. Chen, and C. H. Chen (2002) Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the northern Taiwan volcanic zone. *Chem. Geol.*, 182, 513-528, doi: 10.1016/S0009-2541(01)00338-2.
- Wang, K. L., S. L. Chung, S. Y. O'Reilly, S. S. Sun, R. Shinjo, and C. H. Chen (2004) Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region. *J. Petrol.*, 45, 975-1011, doi: 10.1093/petrology/egh001.
- Wang, W.H. and Chen, C.H. (1991) The volcanology and fission track age dating of pyroclastic deposits in Tatun Volcano Group. *Acta Geologica Taiwanica* 28, 1-30.
- Wang, Z., Zhao, D., Liu, X., Chen, C. and Li, X. (2017) P and S wave attenuation tomography of the Japan subduction zone. *Geochem. Geophys. Geosys.* 18, doi:10.1002/2017GC006800.
- Wilson, C.J.N, Rowland, J.V. (2016) The volcanic, magmatic and tectonic setting of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, reviewed from a geothermal perspective. *Geothermics*, 59, 168-187.
- Xu, T., Moore, I. D. and Gallant, J. C. (1993) Fractals, fractal dimension and landscapes: a review. *Geomorphology*, 3, 245-262,.
- Yang, T.F., Sano, Y., and Song, S. R. (1999) $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of fumeroles and bubbling gases of hot springs in Tatun Volcanic Group, North Taiwan. *Nuovo Cimento-Societa Italiana di Fisica Sezione C*, 22, 281-286.
- Yang, T.F. (2000). The helium isotopic ratios of fumaroles from Tatun Volcano Group of Yangmingshan National Park, N. Taiwan. *Journal of National Park*, 10(1), 73-94. (中文)
- Zellmer, G.F., Rubin, K.H., Miller, C.A., Shellnut, J.G., Belousov, A. and Belousova, M. (2015). Resolving discordant U–Th–Ra ages: constraints on petrogenetic processes of recent effusive eruptions at Tatun Volcano Group, northern Taiwan. In: Caricchi L. & Blundy J. D. (eds) *Chemical, Physical and Temporal Evolution of Magmatic Systems*. Geological Society, London, Special Publications 422, 175-188.

海
東
人
物
志
卷
之
一
一
海
東
人
物
志
卷
之
一

附錄一：期初審查意見回覆表

委員一	
1. 本研究案針對七星山東、西側可能的爆裂口之形成年代與機制進行研究，服務建議書目標明確，方法科學合乎邏輯。	1. 謝謝委員的肯定
2. 由於爆裂口的構造與幾何分析相當重要，建議能就本區過去之地物探測資料進行整理與分析，並列入研究報告中。	2. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議盡量收集本研究區域的地球物理資料，並統合整理併入報告中。
3. 建議服務團隊能提出較明確的交付項目，例如數位的 3DLiDAR 點雲資料及分析，或是無人機的正射影像。	3. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
4. 碳十四定年易受汙染，建議同時進行碳十三環境同位素分析，以提供比對資料。	4. 謝謝委員的建議，若分析費用不高、經費允許下將從事此一工作。
5. 建議服務建議書中部分為原理方法，請加以補充，另外簡寫部分 (Ex: Itrax、XRD、SEM-EDX))請附中文翻譯。	5. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議，在未來的報告中將納入此項建議。
委員二	
1. 本研究以根據地形研究及鑽採樣品分析，綜合研判大屯火山的形成年代及噴發形式等，投標團隊在此領域具有豐富的實際經驗，工作設計構想完善。	1. 謝謝委員的肯定
2. 研究計畫提列七星山東、西側分析執行，建議有預備計畫，在取得第一年研究成果時必要情況下，據以修改第二年計畫。	2. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
3. 碳 14 定年對 rework 的有機碳如何區分？	3. 研究區域位於七星山山頂處，週圍未有沉積岩層的出露，理論上應無有機碳 rework 的問題。另外，若經費允許下可分析有機碳的 C-13 同位素加以區分。
4. 建議審慎選擇採樣點，以取得重要及可靠的資料。	4. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
委員三	
1. 植被現象與噴發是否有相關聯訊息？	1. 謝謝委員的提醒。是的，所以世界其他地方有以觀察植被的變化當作監測火山的一種指標。另外，火山噴

	發時會把植物包含在噴發產物中，提供當作定年的材料。
2. 不同噴發點所造成影響範圍去作分析。	2. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
委員四	
1. 關於岩芯採集，本計畫是否透過岩芯來印證蒸氣型火山噴發之證據以及可能發生之頻度？	1. 是的，本計畫的鑽井結果可提供分布在七星山兩側火山爆裂口的成因和形成年代。
1. 查 105-106 年執行地調所委託調查之大屯火山地區岩石定年研究案已利用 LiDAR 地形模型進行七星山張裂帶爆裂口之地形、特徵進行分析。本計畫提出此項工作是否有更新、更進一步的分析與產出？	2. 『105-106 年地調所委託調查之大屯火山地區岩石定年研究』一案，主要是從事紗帽山熔岩丘的定年以驗證 Zellmer et al., 2015 所訂出的 1370 年的活動。對於七星山張裂帶爆裂口之地形和特徵只是初步的研究。本計畫將深入對於這些火山口進行進一步的定量分析工作
2. 服務建議書內容較簡，缺乏詳細之操作方式、計畫期程、團隊組成等，請補充說明。	3. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議，在未來的報告中將納入此項建議。請見 p.41 甘梯圖。
委員五	
1. 本案未來將藉由 LiDAR 了解爆裂口、張裂帶分布狀況，而本案僅就七星山東西 2 側了解現況。未來蒐集 LiDAR 資訊是否以全園區作分析，配合現地調查協助管理處了解其它爆裂口及張裂帶及其屬性，以臻完善。	1. 謝謝委員的提醒，若經費和時間允許下，儘量完成委員的建議工作。
委員六	
1. 火山地質研究因年代久遠需藉事後推測進行求證，文獻回顧相當重要，應選擇適合國外案例與大屯火山作比較分析。	1. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議。
2. 岩芯鑽探工作邀標書有 13 處，服務建議書只有 2 處，是否各處有其它地點總數為 13 處？請再補充說明。	2. 岩芯鑽探工作七星山東西側各 4 個點，每個地點鑽 2 處岩芯，總計 16 處岩芯。實際作為還須獲得管理處的同意。

甘梯圖（Gantt Chart）

月次	第1-2月	第3-4月	第5-6月	第7-8月	第9-10月	第11-12月	第13-14月	第15-16月	第17-18月	第19-20月	第21-21月	備註
資料蒐集												
火山地形分析												
野外火山地質調查												
第1次期中報告												
鑽井取芯												
第2次期中報告												
岩芯分析												
第3次期中報告												
分析資料彙整												
期末報告												
預定進度 (累積數)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

附錄二、第一次期中審查意見回覆表

張竝瑜教授	
1. 請團隊能列出與過去研究之增加的結果及與先前研究差異。	1. 謝謝委員的建議。除了夢幻湖外，過去並未有研究團隊(除了本團隊外)對於爆裂口形成機制和年代的研究。另外，本團隊過去的研究是用人為方式鑽取短岩芯(短於 2-3 公尺)。此次是規劃鑽取較長岩芯(等於或長於 10 公尺)，以了解爆裂口形成的可能年代。。
2. 圖 1-4 中缺比例尺及指北,請團隊加以修改。	2. 謝謝委員的提醒。已補上。
3. 圖 2-2 範圍,請於圖 1-4 中標出。	3. 謝謝委員的提醒，兩圖的比例相當、涵蓋範圍不同，無法於標出，請見諒。
6. 報告書 p17,文中 2 處的"case",請轉成中文"案例"。	4. 謝謝委員的提醒。已修正。
7. 由於預計岩芯取自於構造帶上的池塘,請注意 C^{14} 樣本是否會因地下水污染,必須進行相關之地球化學校正。	5. (a)謝謝委員的提醒，本計畫希望用夾帶於有機物作為分析年代材料，因爆裂口形成後沉積物進入，而爆裂口形成年代及沉積物累積年代差異從地質學上而言為可容許，如在向天池分析沉積的有機物就可得出很好的年代變化。少量材料以 AMS- C^{14} 方式可得不錯的結果，Lahar 因為難以切開且整體混在一起難以分析。依據劉聰桂教授指出在泥沉積物中受地下水影響小可忽略，本團隊以後會再仔細評估。(b) 會與 C^{14} 定年實驗室的專家討論，並遵從委員的建議加以修正。
8. 部分資料取自廖陳侃(2018)論文,文獻中漏列,請加以修正。	6. 謝謝委員的提醒。已補上。
9. 地形碎形維度分析,對於蒸氣噴發、熔岩流、構造的敏感度是否一致?(p59 最後一行:本研究之後將鎖定氣候、構造、岩性加以分析並將之排除,但似乎沒有針對噴氣口?)	7. 謝謝委員的意見。地形碎形維度分析本就是假設形成的蒸氣噴發機制一致所進行的分析。岩性和構造確實會對碎形維度有所影響，但從前人的研究中顯示影響不大(尤其是年輕的地形)。
10. 蒸氣噴發沉積物與因土石流或水流沉積的沉積物結構與沉積構造如何分辨?請概述於後續報告中。(口頭報告以加入但書面報告仍待	8. 謝謝委員的意見。此區別將待鑽探完畢進一步的分析後再加以陳述。

補充)	
11. 岩芯的三維拍照似乎沒有作,可否考量進行岩芯三維高解析度(4k 或 8k)拍照存檔?	9. 謝謝委員的建議。岩心可用 4k 畫質進行拍攝,並在海科中心以 Core-scanner 進行平面掃描,3D 拍攝會破壞岩石結構。
12. 如何確定七星山 Crater 爆裂口的 heat source?科學方法為何?	10. 謝謝委員的意見。熱源可用裂隙系統作判斷,並以各種資料累積量進行分析,七星山張裂帶交錯點為紗帽山,以 LiDAR 來看可見更細微地表 lava dome(火山熔岩穹窿)。
13. 除鑽探外,可否取爆裂口附近 1 公尺內的岩芯(可用手鑽除去上層 20 公分的土壤層)。	11. 謝謝委員的意見。鑽探本就已包含上部的土壤層。若有需要會遵從委員的建議。
翁榮南博士	
1. 本研究對地形分析瞭解張裂帶及爆裂口分布取得成果值得肯定。	1. 謝謝委員的肯定
2. 研究幾何分析技術成功應用到熔岩相對發生時間可供其他研究配合瞭解噴發時序。	2. 謝謝委員的建議。碎形維度方式可分析爆裂口如夢幻湖年代較老,早期分析礪嘴山年代為 30 萬年前,送國外分析可近至 5 至 9 萬年前,因岩石分析本身有一定難度,以 Ar-Ar 定年分析技術進行可以定年至幾千年,如分析龐貝及長白山等。遵從委員的建議會與其他定年研究相對比。
3. 下半年鑽探採集岩芯及分析時間緊湊,請加強管理進度,注意工安。	3. 謝謝委員的提醒。會加強進度管控和安全。
4. 面天山向天池鑽井岩芯建議將其列入方法,與本研究鑽井樣品一併討論。	4. 謝謝委員的建議,後續工作會整體考量。
李錦發博士	
1. 報告中 40 頁討論 Fractal 作各種推論是否與實際放射性定年比較?	1. 謝謝委員的意見。過去針對火山岩定年代較不準確,通常為 30 萬年 $\pm$ 5 萬年,較難以比對,因此以碎形維度分析資料加以輔助。
2. 鴨池有無花粉研究資料?。	2. 謝謝委員的意見。過去有淺處的花粉資料,深處則無。未來會要請有興趣的學者從事分析工作。
3. 火山岩定年,是否代表大屯火山群的噴發?	3. 謝謝委員的意見。火山岩定年只代表大屯火山群某一期噴發的年代,並不能代表全部。
4. 空拍目的為何?	4. 謝謝委員的意見。本案空拍目的主

	要作為後續解說用途。
郭欽慧教授	
1. 第一次期中報告內容紮實,主要以 LiDar 影像做爆裂谷分析,希望藉由維度差異訂出爆發的順序,期末報告會輔以岩芯的定年,進一步確定七星山左右(東西)蒸氣爆裂的年代與機制,以第一次期中而言 LiDar 影像分析 6 公尺與 1 公尺工作量非常大,能在第一次期中報告呈現如此完整實屬不易。	1. 謝謝委員的肯定與鼓勵。
2. 報告中有些不夠精準之處,如 p33 缺 WFC1 至 WFC8 位置圖,沒有 W05。p54 第 7 行(式 3-3-16 至 3-3-37)應為(式 3-4-16 至 3-4-37)。IP57 圖 4-15 應為 4-23。p63 圖 4-31 中 A-A 剖面見圖六,文中無圖六。	2. 謝謝委員的提醒。已修正補上。
葉超然主任	
1. 小油坑管理站需要本案相關資料作環境教育使用。	1. 謝謝主任的建議,將提供各項所需資料。
2. ”面天池”請改為向天池。	2. 謝謝主任的提醒,修正為向天池。
3. 為避免積水建議在 4-8 月雨水少時進行鴨池鑽探工作,另外鴨池無既有路徑芒草較高。	3. 謝謝委員的提醒,遵從委員的建議。
4. 另外張裂帶未置可否套疊既有步道位置,供本處對於公共安全防範及參考。	4. 謝謝主任的建議,後續收集完步道資料後,將套跌入圖中。
張順發秘書	
1. p27 夢幻湖判釋依據原因參考為何?請補充。	1. 謝謝委員的意見,將補充於後續的報告中(見 81 頁)。
2. 報告 p33 東側受溪流,而溪操小油坑位置下方也曾發生過崩塌,2 側受土石流堆積是否影響範圍判斷?	2. 小油坑受兩側崩落的堆積和侵蝕持續進行,會受土石流影響其地形,但範圍判定應影響不大。
3. 報告書 p32 p33 藍色點位之噴氣孔位置及 p34 溫泉位置是否相同?判斷為目視或其它方式而得?噴氣孔資料可讓本處基礎資料更完整。	3. 謝謝委員的意見和提醒,兩者的位置是相同的,為野外調查所得,但時有時無。
華予菁課長	
1. 日本御嶽火山 103 年無預警蒸氣型噴發,請教本處園區噴氣孔數量、岩	1. 謝謝委員的意見,遵從委員的建議,盡量收集相關噴氣孔、岩芯年代及

芯年代及蒸氣噴發特徵，可作為本處預警應變、火山教育及經營管理參考，應有學術上論述。	蒸氣噴發特徵等資料，作為後續預警應變、火山教育及經營管理等的參考。
楊金臻副處長	
1. 依據向天池鑽井資料顯示向天池底部有熱液換質作用？一般認為熱液換質多分布在金山斷層東南側一帶？	1. 有關面天山底部熱液換質問題，如同西側爆裂帶底部有熱源持續影響其風化，如果沒有爆裂口將持續於內部進行熱液換質，依據傳統觀察山腳斷層以西確實較少有熱液換質帶，僅有在一些沉積物中可發現，根據面天山向天池所採集岩芯分析有黏土成分，判定地底下有岩漿池，因只要有熱源就會持續熱液換質作用。

附錄三、第二次期中審查意見回覆表

李錦發組長	
1. 缺現地照片與空拍照片，無法見爆裂口等相關影像，僅文字敘述無法理解。	1. 報告中爆裂口有 LiDAR 影像、地形正射影像和地形圖等，後續已有空照圖補上。
2. 審查意見回復過於制式化，諸如「謝謝委員提醒」建議、肯定等。	2. 後續回覆將避免使用過多委員的建議。
3. 有關四、碎形幾何與五、岩芯分析章節部分所引用文獻均無列於參考文獻當中？Why?	3. 遺漏已補上，請見參考文獻。
14. 圖中標示諸如爆裂口位置等字過於小、與底圖對比也不清楚，讀取有點困難。	4. 標示的文字是隨著位置圖比例尺呈現，且要標示在正確位置，所以文字有點小，請委員見諒。
15. p16 Belou 與 Belosey 是否為同一人？	5. P16 無 Belou 與 Belosey 的人名，只有把(Belousov et al., 2010) typo 為;(Belosev et al., 2010)，已改正。
16. p13 第四行「崁腳斷層為一規模較大之逆掩斷層」？有金山斷層大嗎？	6. 無從比較且非本報告重點，故把”規模較大”此一形容詞拿掉。
17. p81 中間和邊緣。	7.已修改”中監”為”中間”。
18. p108 至 p115 五、岩芯分析，結論中未提及相關分析成果。	8.因本期中報告只完成鑽井還未進行岩芯分析，故在結論中未提及。
19. 請按 p9 預期成果做結論與建議之敘述。	9. 預期結果是在書寫計畫書時的期望，成果不見得會與當初設想一樣。但後續呈現方式會盡量依據委員的要求書寫。
林正洪 特聘研究員兼副所長	
1. 建議報告中加入有關石英研究之結果，可提供重要參考價值。	1. 大屯山頂上土壤層中的石英研究，非本計畫的工作內容。而其成果為林毓潔研究生的論文，若委員有興趣可參考該論文。本計畫會分析岩芯中的石英顆粒，呈現在報告中。
2. 部分圖表有待加強解析度，此外參考文獻有改善空間。	2. 原始圖檔檔案大無法匯入報告中，只能降低解析度才能匯入。 遺漏的參考文獻已補上。
3. 東西張裂帶之年代比較，是否有其他佐證進行比較？	3. 後續只能藉由鑽取岩芯的定年作為佐證。
4. 爆裂口的形成，可能無法用隕石撞擊做解釋，故基本上同意是蒸氣爆發所形成。	4. 謝謝委員同意本報告的論點。
5. 夢幻湖形成距今約 5600 年，是否與 Belousov et al.(2010) 依火山灰定年	5. 年代相接近且都為蒸氣噴發的產物，是有此可能，但很難論證。

~6000 年有關？	
6. 總整而言，計畫進行可期待第二年分析之結果來加強。	6. 研究群也期待第二年有更好的結果已了解這些爆裂口的成因和形成年代。
張竝瑜 教授	
1. 圖 4-1 與圖 4-8，圖 4-9 與圖 4-2 為相同的圖，請適度整合，另請於圖說中說明 SYK,DP 等代表意義，並於圖中加入 WFC1~WFC5 位置 W02 請說明代表何意義(P21~P22)	1. 雖圖 4-1&圖 4-8、圖 4-2&圖 4-9 有相似，但引用陳述的內容和強調重點不同。另考慮讀者看報告的順暢，故予以保留。SYK 和 DP 分別代表小油坑和鴨池(目前已更名為七星池)。WFC1~WFC5 位置在圖 4-8 已有標示。W02 為沒有閉合、呈現長條形的谷地，在 P33 有描述。
2. p27 第二段與第三段文字敘述有多重疊，請適度整合，另 8 處爆裂口位置及說明請逐一列出。(第二段中敘述)..表 1-1 應為表 4-1)。	2. p27 第二段為七星山西側爆裂口的描述，第三段為七星山東側爆裂口的介紹，文字敘述並無重疊問題。各爆裂口位置、大小和標高已在圖 4-8 和表 4-1 中列出呈現，另文中(P27)也對其特性做概略性的描述。第二段中敘述的表 1-1 已改為表 4-1。
3. p29 表 4-1：DP 請註明由 WFC6 及 7 合併，並註明爆裂口中心座標。	3. DP 並不是 WFC6 及 7 合併而成，而是獨立的命名(延續過去研究者的名稱—鴨池)。對於鴨池爆裂口的描述請見 P31 和圖 4-10。
4. p33 中提到 W0-2、W0-4 及 W0-1~W0-5，請問與前文中的 8 處爆裂口(WFC1...)的關係為何？	4. W0-1~W0-5 為沒有閉合、呈現長條形的谷地，而與爆裂口相區別。兩者的關係從紐西蘭 Tarawera Rift 1886 年的蒸氣噴發所形成的地形來看，前者為張裂帶的地形，後者為爆裂口。
5. p61 中各岩性產狀在碎形維度上似乎無法分別？	5. 是的，故本研究假設的碎形維度只與時間風化作用有關。
6. p65 越老熔岩流表面越破碎，請引述理論出處來源。	6. 請參考前人的研究成果(Bruno et al., 1992; 1994; Pyle and Elliott, 2006; 葉寶安, 1994; 葉寶安和李錫堤, 1994)。
7. p65 圖 4-32 解析度請調整。	7. 已增高解析度。
8. p79 圖 5-1：鑽井編號請適度參考列入所屬爆裂口(WFC、EFC)	8. 後續完成鑽探會加入編號。
9. p82 圖 5-4 請放大垂直深度標示，並標註 C-14 dating 的位置。	9. 此圖為原報告的圖，後續綜合討論時會考慮重劃採樣鑽井岩芯圖。
10. p105 電阻值受孔系水影響甚大，保存時是否冷凍保存甚為重要，請注	10. 岩芯送至高雄 TORI 冷藏庫中保存。

意岩芯保存狀況。	
11. 請整理 phreatic eruption 的可能產生地質構造與國外比較表請列入期末報告中(結論第 13 點)	11. 已依委員意見在第三次其中報告中呈現。
12. 期末報告中鑽探的分析資料部分尚未取得或進一步分析，建議後續計畫可列入工作項目，並引進配合團隊以有效運用資料。	12. 遵從委員德建議，已邀集其他團隊從是古環境的分析。
13. 結論中活動性評估僅列入夢幻湖 5600 年，但這部分爭議可否整理過去說法及證據，作出可能推斷。	13. 過去只有劉聰桂教授的研究，並未 有其他團隊對於夢幻湖的成因說法。
14. p123”七星山 高程超過 7000-800m...不為流水侵蝕”，但侵蝕力與流量、坡度集水面積居有關，因此依碎形維度判斷，其根據假設應斟酌。	14. 這是引用過去的研究成果(葉寶安, 1994; 葉寶安和李錫堤, 1994)。
15. 參考文獻請統一格式。	15. 已修正。
郭欽慧教授	
1. 這是期中進度報告，目前是以鑽井為主要內容，目前分析仍在進行中，希望能在期末有更具體結論與報告，這計畫主要目的之一是要確定爆裂口內沉積物的特徵，但是這些噴氣口都非常年輕，其沉積物的特徵，但是這些噴氣口都非常年輕，其沉積物會更年輕，建議加強這些沉積物對爆裂口型態與爆發的連結。	1. 遵從委員的建議，獲得岩芯鑽取和分析後，會討論沉積物對於噴發紀錄的意義。
3. 爆裂口主要為蒸氣噴發，所以要有實質物證，建議石英研究應該是很重要的證物，希望能有真正的結果。	2. 謝謝委員的提醒，石英顆粒是本研究計畫的重點之一。
翁榮南兼任副教授	
1. 本研究針對七星山東西側張裂帶爆裂口進行地形地質地化分析，期中報告取得大量資料，並作初步解釋，成果值得肯定。	1. 謝謝委原的肯定。
2. 本期完成七星山東側岩心鑽探取得研芯，本報告提出擬分析項目，建議審慎規劃取得分析計畫以取得足夠且有意義的數據。	2. 鑽取的岩芯會先從事與本計畫研究目的相關的分析，其後會邀集對於岩芯有興趣的學者(研究古氣候相關的學者)參與岩芯分析。
3. 根據碳 14 定年法爆裂口年代有其限制性及不確定性，期望可以提出東西	3. 謝謝委員的提醒，遵從委員的建議採集有意義的有機質從事 C-14 的定

兩側爆裂口的年代先後。	年。
4. 本研究規劃東西側個鑽探 4 個點，各點的沉積受到地形影響甚大，在資料解釋上很難相對比。	4. 爆裂口形成的年代可能不一樣、且各自獨立有沉積環境和沉積物來原，無法像沉積岩般的從事對比工作。但對於古氣候的研究，若有年代資料，也許有機會做對比工作。
5. 本次採樣是否可供下次西側採樣參考。	5. 東側鑽井採樣的經驗會做為西側鑽井的參考和修正。
陳彥伯主任	
1. 本處有 3D 導覽圖資可運用，也有七星山空拍圖。	1. 謝謝陳主任的提供訊息，後續請陽管處提供。
華予菁課長	
1. s1 鑽井替換為代表夢幻湖的點位，後續結果未達預期可補充於報告書中	1.S1 的鑽探結果有它的意義，顯示基盤岩的地形，提供目前 S2 和 S3 確實是爆裂口，且安山岩的岩性可作為後續基盤岩的對比。
2. 簡報資料世界其他蒸氣噴發爆裂口資料表格補充至報告書。	2. 遵從課長的建議，已在第三次期中報告中補充。
3. 美國 Inyro crayer 600 年前蒸氣與岩漿同時噴發的推斷是用岩芯分析得出或是文獻說明？	3. 是歷史紀錄和從樹輪來判定。
張順發秘書	
1. 美國 Inyro crayer 600 年前蒸氣與岩漿同時噴發的推斷是用岩芯分析得出或是文獻說明？	1. 是歷史紀錄和從樹輪來判定。
2. 結論建議再做歸納，尤其是針對後續作為可納入建議內容。	2. 遵從祕書的建議，在第三次期中報告或期末報告中納入建議內容。
楊金臻副處長	
1. 劉聰桂以碳 14 定年在 5000 年，上面熔岩流年代為何？七星山 2 萬年左右	1. 夢幻湖 5600 年左右形成，但其底部的安山岩未有定年資料。不過七星山最上層的熔岩流的年代約為 2 萬年左右。
2. 本案七星山岩芯熔岩流部分預計作定年分析？	2. 本計畫的經費未編列從事安山岩的定年工作。不過前人的定年工作顯示七星山最上層的熔岩流的年代約為 2 萬年左右。
劉培東處長(主席)	
1. 張裂帶的圖運用到小油坑站解說	1. 遵從處長的建議。
2. 岩芯未來可作展示及對照實際深度的解說運用。	2. 遵從處長的建議。

附錄四、第三次期中報告修正意見對照表

委員審查意見	原報告 頁次	修正情形說明	修正報告 頁次	備註
李錦發組長： 1.大地構造中僅提及金山斷層與崁腳斷層，此兩者均屬擠壓性斷層構造，與本研究張裂帶機制上不一樣，山腳斷層屬於正斷層張裂系統，其對台北盆地與大屯火山均可能有影響。 2.建議由北到南切過東西兩側張裂帶，多切幾條剖面看地形變化 3.圖 5-3/ 5-4 不清楚(諸多圖表、圖例不清楚，圖例顏色相近致無法區分。 4.過多論述討論碎形幾何理論 (p49-p88)，這些理論僅能作為輔證。地質問題須靠地質解決。如何證明利用碎形幾何理論推出來的結果是對的？	P23 P81-84 P92-93 P49-P88	是的,張裂帶是屬於正斷層系統,但目前未有定論此二張裂帶是否屬於山腳斷層的系統。本報告只是簡單陳述地質背景，且已加入山腳斷層的描述。 遵照委員的建議，待取得較高解析圖檔後繪製之，將於期末報告補充之。 這兩圖是引用劉聰桂教授在 1990 年的報告原圖,已是最清楚的狀態。為尊重原作者故引用原圖，但圖 4-44(原圖 5-3)已把鑽井位置重畫。 同意委員的看法，但碎形幾何理論有一些前提，所獲得的結論與前提假設有關係，且地質所獲得的結論並不是絕對解，沒有對錯的問題，而是最可能的解(結論)。若後	P23 P93 P49-P89	

5.P,75 越老的熔岩流越破碎？有無考慮熱液作用影響？	P75	續有更多的的證據，如定年，來進一步的驗證。	P75	
6.p.15 表下第4行岩流最可達？倒數第四行103 年日本時間？最下一行致使約？ p.30 地2行古氣候地專家？結論第8 之水細密度。	P15、P30	無。因假設前提為熔岩流形成後只受到風化作用的影響所獲得的分析結果。每一熔岩流是否受到熱液作用影響不可知，若考慮其作用，則無法進行分析研究工作。筆誤,已修正完畢。「日本時間」指的是日本當地時間。	P15、P30	
7.結論過多由碎形維度來推求(1.2.3.4.6.7.8.)，而9與10 出自劉聰桂 1990 年。	P190	本研究報告的前半部是地形研究，且主要使用的方法是碎形幾何分析法，故有較多結論。結論9 是整合劉聰桂(1990)和本研究的成果。結論10 刪除(P.193)。	P192	
林正洪 特聘研究員兼副所長：				
1 這份報告第六章主要介紹世界各地的蒸氣爆炸實例，是否可以考慮移到報告的前幾章進行說明較為恰當。	P174-187	已移到第四章結果與討論	P175-191	
2.報告中的第七章題	P190	因本次報告是期中	P192	

目是結論與建議，但是報告內容似乎沒有具體建議事項。是否要補充說明，還是修改第七章題目。 3.第三章 p109 提到岩心分析結果，包括密度、孔隙率、電阻等等物理量，因為沒有使用所以沒有陳列在報告中。是否建議適度加入附錄中以便未來其他研究參考的可能性。	P190	報告，擬在完成計畫後給予整體的建議。 遵照委員的建議，整合東、西張裂帶岩芯後，在期末報告中再放入附錄中。		
張竝瑜 教授: 1.p.20 中紅色圈不僅為爆裂口，與 p.19 中所述不同，請更正圖 1-4 中之敘述與標示。 2.p.25 中，圖 2-2 中所圈繪之兩個紅色區域，意義未見說明，請於下方圖說中說明其代表之區域意義。 3.p.27 中，倒數第三段:應為圖 2.2，最後一段敘述”圓形凹地，前人推論這些爆裂口...”，請說明何以這些圓形凹地即為爆裂口。 4.p.109，最後一句:”電阻抗意義不大，就不在此呈現...”。然而一般井測，電阻均為重要物理資料，建議仍應包括可能之物理資料以協助岩芯判釋分層。 5.p.116-p.137 中的岩性柱狀圖，並未依照標準	P19-P20 P25 P27 P109 P116-137	已重新標示 已補充於圖 2-2 的說明中 請參閱 Belousov et al., 2010 和 Tsai et al., 2010 這兩篇文章。 因為岩芯中主要的組成含大量的有機物質，故其電阻率的岩石物理意義不大。 無所謂的標準岩芯柱狀圖，在地質的	P20 P26 P28 P110 P116-137 P162-168	

岩心柱狀圖方式繪製，亦缺乏圖例，以及粒徑指標，其中整合、不整合之標示亦不一致，請加以修正。		報告中或文獻中，每位作者的呈現方式不一。P116-137只是把鑽獲的岩芯照片描繪成圖檔，因圖面壅擠故於文中做詳細的描述，綜合的岩芯柱狀圖加上定年結果呈現於p162-168。另外，圖中並無整合、不整合的繪製，而是接觸面相當變化大的呈現。		
6.報告書中，所有地圖均未見交互標示其相關位置，以至於難以參照交互比對實際位置，請參酌加以修正圖中表示方式，盡量列出各圖在地理中相對位置，以提供相互比對參照。	P20、 P25、 P31-32 P42、 P44、 P46、 P48 P85- 86、P88	此一問題很模糊，若是 LiDAR 地形圖，因其是 1m 的 DEM，牽涉到機密問題無法標示。	P96 P162	
7.p.160 之岩芯樣本碳十四定年結果，就過去劉聰桂教授之定年，在同一深度位置共有三個定年年代，而本報告中僅取最老之定年年代約 5600yrBP，為何不取其平均值？	P160	依據定年資料解釋，沉積物堆積年代一定晚於爆裂口形成的年代，且各處堆積的時間可能有所不同，故應取最老的年代較接近爆裂口形成的年代。	P161	
8.本研究定年年代與夢幻湖過去定年年代有些差異，夢幻湖基盤以上沉積物底部定年	P191	雖然夢幻湖在 5600 年後即無噴發紀錄，但其他爆		

為 4.4-4.6 米處為 4800-5600yrBP，顯示其可能至少在 4800 年前之後即無噴發活動，但其他位置之定年資料則顯示更為年輕的年代，然而，更為年輕的年代僅能代表接受沉積物開始供應的時間，這與附近水系發育、風化層發育、侵蝕與堆積有關，不能完全代表爆裂口形成之年代，敘述上可能須加以論證，並小心敘述。		裂口噴發形成的年代可以更年輕；如目前研究的 S-2 爆裂口，圓形爆裂口地形保持相當完整，深度也相當深，顯示其為較晚年代所形成。		
郭欽慧 主任： 1.本期研究報告主要是針對七星山東側張裂帶爆裂口進行鑽井工作與岩芯分析，目前已取得豐富資料值得肯定團隊的付出，更期待西側鑽井分析結果。 2.報告中提到經與世界上類似火山比較後發現本區與 Mt Ontake 較為相似，在 Mt Ontake 模式中提到當熱液(hot fluid)沿著斷層上升時會經過一個含水層，當通過含水層之 water table，產生向上遷移 VT，不知道研究區中有無這方面資訊以資對應？ 3.報告中提到鑽井中發現不同樣態石英顆粒，尤其是 S-2 與 S-3，並認為與蒸氣噴發(phreatic eruption)相關，這是相當重要發現，但是其他爆裂口鑽	P174 P120、P123	謝謝委員的肯定。 蒸氣噴發模式中熱液上升儲存於淺處的熱液儲集層中，達到飽和後發生噴發作用。在大屯火山群的蒸氣噴發目前只是模式的建立，還未有實際的數據收集，尚需後續的研究驗證。 石英顆粒在大屯火山群山頂地表的土壤有廣泛的發現，但夢幻湖無岩芯供研究。另 S-1 鑽井	P181 P156~P160	

井資料中目前並無石英報告，有其他蒸氣噴發證據？		只獲得很淺的地表有機物質的堆積物，S-4 鑽井可能已被充填，且淺處主要為火山泥流堆積物，故無石英顆粒的發現。		
翁榮南兼任副教授 1. 本研究至今依規畫完成七星山東側張裂帶鑽探取樣，岩芯整理描述及部分分析工作，西側張裂帶鑽探取樣進度落後，請加緊執行，是否可如期完成，或需提出因應做法。 2. 鑽探所取得的岩芯和資料甚為可貴，請妥善整理資料，並請整合解釋，提出主要發現。 3. 岩 芯 段 上 下 (top/bottom) 是否有註記，避免日後倒置。 4. 圖中的文字標記請用明顯的顏色 (如 p91 圖 5-2 不易看出井位)。 5. 圖文中對於鑽探場址，岩芯編碼代號請統一 (例如 site 1, site1, S1, S-1)。 6. P115 對 S-1 岩芯的描述應該是 2.75m (not 3.75m) 到 20m 為火成	P31 P89-170、p190 P96-107 P116-137 P170-173 P91 等 P90 及 P91 等 P115	謝謝委員的提醒，雖受 COVID-19 的影響，本團隊會敦促鑽井公司加速鑽井工作。 遵照委員的建議，會對鑽取的岩芯和分析資料整合，配合過去已發表的結果，做最可能的解釋並建立模式。 謝謝委員的提醒，會注意岩芯上下註記的問題。 因此圖為引用劉聰桂教授的原圖，謝謝委員的提醒並遵照辦理。 謝謝委員的提醒並遵照辦理。	P31 P90~P174 P96~P108 P93 P96~P161	

岩。(根據 p116 岩芯柱狀圖) 7.P145 表 5-14 岩性一欄 應為兩輝石角閃石安山岩。	P145	已修正	P116 P146	
華予菁課長： 1.本案為委託研究案，章節、體例、應遵循內政部委託報告。 2.全文圖片或表格，來源如為本計畫繪製或製表，應標示清楚。	P20、 P31-32 P36 P38 P40 P42 P44 P46 P48 P70 P71-73 P75 P77-79 P81-P91 P116、 P118-119 P116-P173	已修正如課長所建議(全文)。 遵照課長的建議。	P20 P31-32 P36 P38 P40 P42 P44 P46 P48 P70-73 P75 P77-79 P81-92 P116-174	整本報告格式 未標示者為本文所繪製
*第一章 緒論 (1)P13 等全文多處”我們”所指可能為管理處、人們、本計畫或研究團隊。請適度調整用語。 (2)P16 台灣改臺灣，分佈改分布 (全文同)。 (3)P17 火山活「耀」改為活「躍」，「克」不容緩改「刻」不容緩。	P13 P16 P17	已修正。 已修正。 已修正。	P13-18 (全文) P17	

(4)P18 圖 1-2 改「會」自，應為改「繪」自。	P18	已修正。	P18	
(5)P19「 堰塞湖」改「堰塞湖」。	P19	已修正。	P19	
(6)P20 圖 1-4 七星「火」山改為七星山。	P20	已修正。	P20	
(7)本章應針對計畫範圍—七星山東、西張裂帶爆裂口進行說明。並附計畫範圍圖(類似圖 2-2)。	補在 P28 第三章研究方法	已修正。如 P. 圖 1-4。	P20	
第二章 地質背景與前人研究				
(1)P23 提及大屯火山群主要的兩個斷層構造包括金山斷層及崁腳斷層，請補一張斷層位置圖。	P23	圖 1-2 即有此兩斷層的分布圖(P.18)。	P18	
(2)P26 蒸「汽」改蒸「氣」，用字請一致。(全文同)	P23	已修正。	全文。	
第三章 研究方法				
請依研究流程之結構，調整標題標號，並分別描述研究方法。	P28	已參照課長的意見修正。	P28	請見第三章的修正。
第四章 研究成果(請分節敘述)				
(1)原第四章 火山爆裂口地形分析、第五章 岩芯鑽取與分析 涉及研究成果、第六章 世界火山蒸氣噴發形成爆裂口 於此分節敘述-第一節火山爆裂口地形分析、第二節岩芯鑽取與分析、第三節世界火山蒸氣噴發形成爆	P174	已參照課長的意見修正。	P31-191	請見第四章的修正。

裂口案例，並於每個章節末段，應能提出研究成果小節。				
(2)原第七章 P174 世界火山蒸氣噴發形成爆裂口的”例子”改為”案例”，第 1 段請簡要說明以美國加州 Inyo Crater、紐西蘭陶波火山帶、日本御嶽火山等案例與七星山亞群爆裂口做比較的原因。	P174-175 P177	參照課長的意見修正。	P175	
(3)內文、圖表提及地名或專有名詞時部分僅以英文標示，建議能盡量以中譯名(英名)方式呈現。例如:P174 長谷火山口 (Long Valley Caldera)。	P177	參照課長的意見修正。	P175-191	
(4)P174、175、177 等提到岩漿儲庫，是否統一為岩漿庫？	P178	已修正。	P175-178	
(5)P177 圖 6 3 火山鍊應為 火山鏈， 另圖片來源： U.S.Geological Survey Fact Sheet 073-97，於參考文獻中未見本資料來源，請補充。	P179	已修正。	P178	
(6)P178 圖 6 4 圖例是英文，請於圖例中以中文標示重要的火山陷落口、噴發產物、斷層、地熱場。	P180	已修正。	P178	
(7)P179 圖 6-5 圖片來源 (Nairn & Cole, 2012)，但參考文獻中 Nairn, I.A., Cole, J.W. 只有 1981 而無 2012。	P180	已修正。	P179	
(8)P180 三、Mt. Ontake (御嶽火山)，改	P181	已修正。	P181	

為案例的一致寫法 Mt. Ontake (御嶽火山， 日本)				
(9)P180 圖 6-6 御嶽山 的位置圖，地圖必須以 文字標示出必要的地 理位置及名稱。	P181	已修正。	P181	
(10)P181 圖 6-7 缺圖片 來源。	P182	已修正。	P182	
(11)P181 起探討 1979- 2014 等歷次蒸氣噴發， 文字段落標題請加標 號(一)~(三)。	P43、 P47、 P94、 P183、 P186	已修正。	P182-184	
(12)P182 圖 6-8 請標 示 A-G 為爆裂口分布 位置。	P187	原圖已有 A-G 爆 裂口的標示。	P183	
(13)P43、47、94、183、 186 熱水換質改成熱 液換質，一致性。	P188	已修正。	全文	
(14)P187 圖 6-13 缺圖 片來源。		已修正。	P188	
(15)P188 圖 6-14 及 6- 16 圖說補上中文名稱， 圖片來源是 USDA 網 頁或 GNS Science 期 刊，請標示清楚。	P189	已修正。	P189	
(16)P189 七星山亞群 外界水來源及熱源描 述有問號，是否待確 認?		只是初步的描述， 需要未來更多資料 的驗證。	P190	
*第四章~第六章內容 包含研究分析理論成 果探討等等 請分別歸入 第三章研 究方法及第四章 研究 結果，例如:火山爆裂 口地形分析 (P31-36)	P31-36 P49-68	(a) 部分參照課長 的意見修正。 (b) 碎形幾何理論 雖涉及研究方法或理論，但其是 地形分析需交代的 理論基礎，為研究 結果的一部分，讓	P31-36 P49-67	

碎形幾何理論(P49-68) 涉及研究分析方法或理論調整到第三章研究方法第一節。岩芯鑽取與分析 P89 之後涉及研究及分析方法調整到第三章研究方法第二節。		讀者易於閱讀，故不適於調整到第三章研究方法。 (c) P89 牽涉到的岩芯鑽取與分析是一步一步的工作步驟和成果，不易拆開描述。		
*第七章結論與建議改為第五章 (1)結論與建議 P190 ，體例未參考研究報告體例，建議事項請請歸納主題、分項探討，並提出短中長程建議事項。	P190	建議項目將在完成計畫後在提出具體建議。	P192	
陳宏豪技士： 1.P31 及 P38 圖 4-1 及圖 4-8 可否放大，圖說文字顏色應注意不予背景顏色相近便於辨別。 2.圖 4-9 色塊與圖示不符？圖 5-2 紅色字體太小應放大，並用管理處圖資。	P31 、 P38 P40	(a) 因版面的限制已達最大的版面。 (b) 在 WORD 版中顏色沒問題，但印出後的顏色配色走樣，故請參考電子版。 (a) 在 WORD 版中顏色沒問題，但印出後的顏色配色走樣，故請參考電子版。 (b) 此圖為鑽井公司報告所用，因目前無管理處圖資，故暫用 GOOGLE 圖標示，待有了管理處圖資後在取代之。 不知問題所在。	P31 P38 P40 P46	

1 標示為原則，將主要地點進行標示。 4.報告書空照圖解析度不佳如圖 4-44、圖 4-12、圖 4-13、圖 5-2，可採用本處航拍圖。	P44 P46 P48 P91	因檔案輸出影印的顏色與原數位檔差異太大，造成解析度的不佳。請參考 WORD 檔。	P48 P92	
張順發副處長： 1.補金山斷層及崁腳斷層位置圖(p23)。 2.研究方法第四章、火山爆裂口地形分析工作應更新工作進度。 3.第六章，3 個火山爆裂口案例，是否把大屯火山群修正為七星山亞群更適當？ 4.補充說明部分：p177 圖 6-3 來源為期刊或網頁？請標出處，p174 圖 6-5 未見於參考文獻，p181 圖 1-7，板塊數改為阿拉伯數字，板塊敘述說明應將英文簡寫進行標註與圖示一致以便於閱讀。p178 圖 6-4，補充圖例說明及中文名稱。p180 圖 6-6 補充必要的地理位置標示及圖例。p182 圖 6-8A 到 G 爆裂口要敘明。圖 6-14 及圖 6-15 補充 Inyo Craters 中文名稱及照片來源。 5.附錄一補充會議記錄(p200)	P23 P31 P174 P174 P177 P178 P180 P181 P182 P200	圖 1-2 即有此兩斷層的分布位置圖。 火山爆裂口地形分析工作在第二次期中報告已完成。 遵照副處長的意見修正。 已修正。 遵照副處長的意見修正，待管理處給	P18 P31-89 P190 P175 P178 P179 P181 P182 P183	

		予電子檔後在期末 報告中加入。		
--	--	--------------------	--	--

國立中央大學圖書館

陽明山國家公園管理處
109-110 年度「七星山張裂帶爆裂口之研究」委託研究案
期末報告修正意見對照表

綜合意見	原報告頁次	修正情形說明	修正報告 頁次	備註
林正洪 特聘研究員兼副所長： 1. 七星山東、西兩裂縫構造是一次形成或多次呢？ 2. 紗帽山是否為最年輕的噴發形成？根據顏滄波教授推斷紗帽山是大屯火山群最後噴發之產物。 3. 蒸氣型火山噴發之模式提供良好參考依據，值得肯定。 4. 最後一次噴發(lava flow)可能發生在2萬年左右，是否存在更後期的活動？ 5. 這研究報告提供許多重要參考資料，雖然已完成預期的目標，但		從定年資料來看，是多次造成的。 從 Zellmer (2015) 的定年，紗帽山是最年輕的熔岩流。從地形研判也可能是。但在馬槽上方有一小規模的熔岩穹窿，可能更年輕，但沒有任何資料。 謝謝委員的肯定。 有可能，紗帽山和馬槽上方小規模的熔岩穹窿。 認同委員的看法。		

值應用。 4.根據本處研究報告(劉聰桂,1990):「…認為夢幻湖應非以前所認為的火山口湖,亦非直接由火山活動岩漿或火山碎屑岩堵塞而成的火山堰塞湖。」是否適合將劉聰桂(1990)列為最年輕蒸氣噴發事件之一?或有更關鍵的證據? 5.經濟部中央地質調查所目前在本處園區內列了5個地熱探勘的開發熱點(依優先順序為C1-C5),其中C1為馬槽地區,C2為紗帽山至硫磺谷,依據地調所結論,鑽探目標為黏土蓋層(clay cap)下方的熱水儲集層。而本研究結果認為園區內火山蒸氣型噴發屬於第一型,即黏土蓋層(clay cap)下方	P.96-100	劉聰桂(1990)當時還未認定大屯火山群為一活火山,故只認為是火山體側邊的窪地。但從地形和鑽探結果顯示,與目前計畫地形分析和鑽探結果相似,故推測其也應是一座火山爆裂口。 地熱開發和蒸氣噴發的儲集層防患並不衝突。一座活火山發生火山噴發和附屬的各種地質作用,是一種自然的力量和現象,非人力所能消除的。另外,以目前的科技亦不能控管和掌握,了解其何時發生?噴發規模大小為何等?但也不能束手旁觀任其發生,造成不可預期的災害。大屯火山群後期的噴發主要是以蒸氣型噴發為主,會發生此種噴發行為是火山氣體	P.98-102	
---	-----------------	---	-----------------	--

的熱水儲集層為潛在蓄積溫壓能量的致災因子(熱點)，應更加關注與預防。前述地熱開發與本處防災兩者角度來看，似乎是衝突的。之後本處將面臨外界地熱探勘相關案件，有關探勘風險的部分，是否可建議本處應如何因應？		累積在地底具有不透氣層黏土蓋層的儲集層中，當其累積達到飽和後、壓力大於岩石強度就會發生此類型的噴發作用。以現今的科技無法避免此一作用的發生，但可藉由火山熱能的抽取利用，減緩火山流體和熱能的累積速率達飽和程度，以換取更多的時間，等待世界火山科學界發展更進步和有效的監測和預防方法，以減低大屯火山噴發對臺北周遭的危害。		
華予菁 課長:				
1.計畫摘要目前僅就研究目標項目進行說明，請補充研究結果結論及建議。	P.15~16	遵照課長的建議，補充摘要內容。	P.15-18	
2.結論的部分列點方式過於瑣碎，請就本案研究之限制與各工作項目的結論整體描述。	P.333	結論為本研究計畫所獲得的結果，以條列式顯現具體且明確成果，讓讀本報告的相關人員易獲得具體成果概念，建議保留此等格式。	P.336	

3.建議 (1)應針對實際經營管理的部分，管理處建議應以短中長程方向來執行。 (2)目前蒸氣型火山噴發呈現無預警的型態，對於其噴發之地點、規模與時間尚未完全了解。而日本御嶽火山噴發之前已布設許多監測站，這些監測站之功能是否有發生效果？亦或僅對於岩漿庫進行監測？關於本研究之限制建議未來可由跨部會相關科技計畫來補足未知領域。 (3)原則上國家公園的角色主要為防災教育，目前本研究的學術研究成果較為艱深，建議後續轉換成科普知識、火山	P.335	建議部分已採短集中常成兩部分書寫，因為中長期較難區分時間長短，所以歸為中長期辦理。 如課長所述，日本御嶽火山在2014年未有蒸氣型火山噴發時即有布設許多監測站，但都未準確預測此一2014年的蒸氣噴發事件。故國際火山學會目前針對蒸氣噴發的型態在從事相關技術研究和發展。認同課長的建議應協調相關部會，建立跨部會合作從事科技計畫來研究和開發技術此一蒸氣噴發領域的監測和防災。 遵照課長的建議，共同合作把本研究的成果轉換為一般民眾較能理解通俗的內容。	P.338	
--	--------------	--	--------------	--

教育，以利本處後續宣導應用。 (4)配合國家能源政策，倘未來地熱開發點位為蒸氣型噴發熱點，對國家公園有致災性因子及相關影響。如何因應為妥？		如張育仁技士問題五所回達的內容，以防災的觀點開發地熱。國家公園對於在地熱探勘和開發過程中應確實要求開單未做好各種安全措施，並建立相關預警和疏散計畫。		
張順發 副處長： 1. 西側鑽探沒有石英，是因為沒有鑽到底部，或是用東側鑽探資料性質相同，推測也是蒸汽噴發？ 2. 碎形維度可以判斷形成順序，是否有代表的		西側爆裂口推測是蒸氣噴發，並不是由石英有無來判定，而是從其地形、位置、鑽探結果和機制，並參考國外其他例子，如美國長谷陷落口的伊尼奧火山、紐西蘭的塔拉威拉裂谷的爆裂口和日本的御嶽火山等來判定。西側未發現石英可能與造成石英分布的蒸氣噴發產物分布有關。 碎形維度判定發生形成順序是在很多假設之下，如相同		

特別意涵？如果有，未來是否可以針對此特別意涵進行監測？ 3. 目前針對碎形維度跟鑽探做了分析，岩心 MSCL 分析（磁感率、密度、孔隙率、電阻率）結果對於地質活動之紀錄有初步結論嗎？還是僅資料呈現？ 4. 若大屯火山的蒸氣型噴發屬於第 1 類，國外案例是否有監測項目可提供我們參考借鏡？本報告建議章節應討論相關建議執行監測項		岩性、相同形狀、成因相同和風化侵蝕速率相同前提下所獲得的結果。故較難作為監測的依據。 碎形維度的結果是供參考判定爆裂口可能形成的先後順序，確定的形成順序還是要依鑽探取得底部有機物質從事定年來能判定。岩心 MSCL 分析（磁感率、密度、孔隙率、電阻率）的結果對於蒸氣噴發的解釋似乎不大，但對於後續研究古環境和古氣候的解釋則有相當大的用處。故目前這些資料只用於呈現資料，合乎計畫的要求。 目前對於蒸氣噴發的監測還未有明確的技術和項目。還是因循過去火山的監測方法，建議應該與科技部、TVO 和學術界共同合作，以防災觀點出		
---	--	--	--	--

目、方法，以及後續可行之研究案與內容。		發並注意國外的發展，以建立蒸氣噴發的技術。		
主席 曾偉宏 處長： 1.依「災害防救法」第3條第1項第1款規定，火山災害中央災害防救業務主管機關為內政部。火山災害防救業務計畫亦於107年5月25日由中央災害防救會報第38次會議核定後實施。相關權責由科技部整合交通部中央氣象局、中央研究院、經濟部、內政部，並設立大屯火山觀測站。期末報告初稿文末建議的部分，火山災害業務非國家公園權責，應釐清與修正。 2.國家公園對於火山議題的主要任務為解說及教育部分。	P.337	遵照處長的建議，參考「災害防救法」，修改中長期建議項目(3)和(4)的內容。 遵照處長的建議，後續與處裡同仁合作，把本研究計畫成果轉為較科普和通俗的內容，以供火山解說及教育之用。	P.339	

勘誤				
1.p.27 第 12 行，此 「斷」可能…應 為「斷層」。	P.27	已修正	P.29	
2.p.34 第 1 行，XRD 重複，請再確認 修正。	P.34	已修正	P.34	
3.p.99 第 5 行，水 「非」應為水 「韭」。	P.99	已修正	P.101	
4.p.307 倒數第 7 行，「眼」字刪除。	P.307	已修正	P.309	
5.p.337 「修」防署 應為「消」防署。	P.337	已修正	P.340	
6.御「岳」山應為御 「嶽」山，全文請 在檢查修正。		已修正		
7.p.88 倒數第 8 行， 張裂帶「知」裂 隙，應為「之」。	P.88	已修正	P.90	
8.p.175 鑽井成果 與 p.184 鑽井成 果 章節名重複， 建議修正。	P.175&P.184	已修正	P.175	
9.p.184 最後一行多 個字「8」，應刪 除。	P.184	已修正	P.186	
10.p.310 第 8 行，炸 「列」應為炸	P.310	已修正	P.313	

「裂」。				
11.p.322 第3行，炸 「列」應為炸 「裂」。	P.322	已修正	P.325	
12.p.323 第2行，木 「曾」御嶽山應 為木「曾」御嶽 山。	P.323	已修正	P.325	
13.p.335 第3行，火 山「知」比較應為 火山「之」比較。	P.335	已修正	P.338	
14.部分內文字大小 不一及錯落字， 請再次檢查更 正。		已修正	全文	

七星山張裂帶爆裂口之研究—通俗文章

整合大屯火山群過去的地質、地球物理和地球化學的研究成果，以及依據國際火山學會對活火山經驗和現象的定義：一萬年內仍有火山活動和地下存在岩漿庫，大屯火山群已被認定為一座活火山，故科技部在大屯火山群設立『大屯火山觀測所(TVO)』，以及內政部立法訂定『火山災害防救業務計畫』，都是為了因應大屯火山群未來可能的噴發活動和伴隨所產生的災害，尤其類似 2014 年日本御嶽山的蒸氣噴發所造成無預警的人命傷亡。

從 LiDAR 地形判釋七星山火山體東、西兩側各有一條地形陷落帶(張裂帶)，其內分布各有數個爆裂口，這些爆裂口(火山窪地)可能都是由蒸氣噴發所造成的，且其地形保存相當完整，顯示其形成的年代相當年輕。但過去鮮少有深入探究這些火山爆裂口，若能釐清這些爆裂口的成因、形成年代與噴發機制，將有助於建立大屯火山最近的噴發模式與歷史。鑒於此，本研究計畫針對七星山體東(109 年)、西(110 年)兩側張裂帶中的爆裂口進行分析與研究，透過光達數值地形模型(LiDAR)的應用以及野外踏勘實查，了解爆裂口的分布與地形特徵，並針對爆裂口中的沉積物進行採樣分析；探明其形成年代、機制以及其在大屯火山噴發歷史中的意義，做為未來建立火山噴發行為預警建立，並提供更詳實的大屯火山群地質資料給國家公園未來保育教育及推廣使用之參考。

大屯火山群主要的噴發產物包括有火山泥流、熔岩流、火山碎屑流、火山灰落堆積物、火山穹窿、碎屑崩落和火山泥流等，而晚期的噴發作用以蒸氣噴發為主，噴出大量含石英的火山灰物質分布於大屯火山的山頂上。利用火山爆裂口的地形分析，綜合比較東西兩側斷層上爆裂口之碎形維度，推測可能形成的順序為 $EFC5 < WFC5 < WFC1 < EFC6 < DP < EFC4 < EFC2 < WFC2$ ，顯示東側火山爆裂口形成的年代都較西側年輕。在東西兩側各四個爆裂口從事 10 公尺鑽探連續取芯的工作，獲得堆積於爆裂口的產物主要以有機物質夾有崩落或火山泥流的安山岩塊為主，在東側爆裂口中可見偶夾有石英顆粒富集層，但西側的爆裂口則無石英的發現。利用有岩芯中的有機物質碳 14 定年結果，顯示東側的夢幻湖形成

於距今約 5,600 年前、S-2 爆裂口形成的年代約為 3,800 年、S-3 爆裂口形成的年代約為 1,800 年。但七星山西側爆發口都未鑽獲底部，無法獲得其可能噴發形成的年代，但由底部有機物質的碳 14 定年，推測西側四個爆裂口的噴發形成年代可能都老於 7,400 年前。此定年結果與由碎形維度分析的結果相符合。

綜合野外觀察、地形分析、產物特徵和參考是節其它火山噴發的例子，分布於七星山東西兩側的爆裂口是由蒸汽噴發所形成的。一般而言，蒸氣噴發有兩種模式：一為岩漿侵入火山地下深處，高溫解壓的火山氣體從岩漿離溶上升侵入具有黏土(矽質)覆蓋層的火山地熱系統累積氣體壓力，當累積的壓力超過上覆岩石的強度就發生蒸氣型噴發。另一為岩漿侵入火山地下深處，岩漿體結晶釋放出大量高溫的火山氣體侵入火山口湖底部，導致湖底受壓水層的氣化累積增加氣體壓力而噴發。七星山蒸氣型噴發是屬於地下有熱液儲集層、累積氣體壓力後噴發形成。比較世界其他蒸氣型噴發作用的例子，如 Mt. Ontake、Inyo Craters 與 Tarawera Rift，可發現以下共通點：(1)皆形成於張裂環境；(2)可能皆由地底下沿著斷層或裂隙形成的岩脈或岩漿侵入為熱源；(3)都有地下水、湖泊、熱液等水源。而七星山亞群爆裂口的地質和形成機制和 Mt.Ontake 較為相似。