

大屯火山群環境監測計畫

受委託者：中華民國地球物理學會

研究主持人：林正洪（中央研究院地球科學研究所）

共同主持人：楊燦堯（台灣大學地質科學系）

共同主持人：陳洲生（中央大學地球物理研究所）

共同主持人：江協堂（台灣大學海洋研究所）

陽明山國家公園管理處委託調查報告

中華民國九十八年十二月

學明一國本也

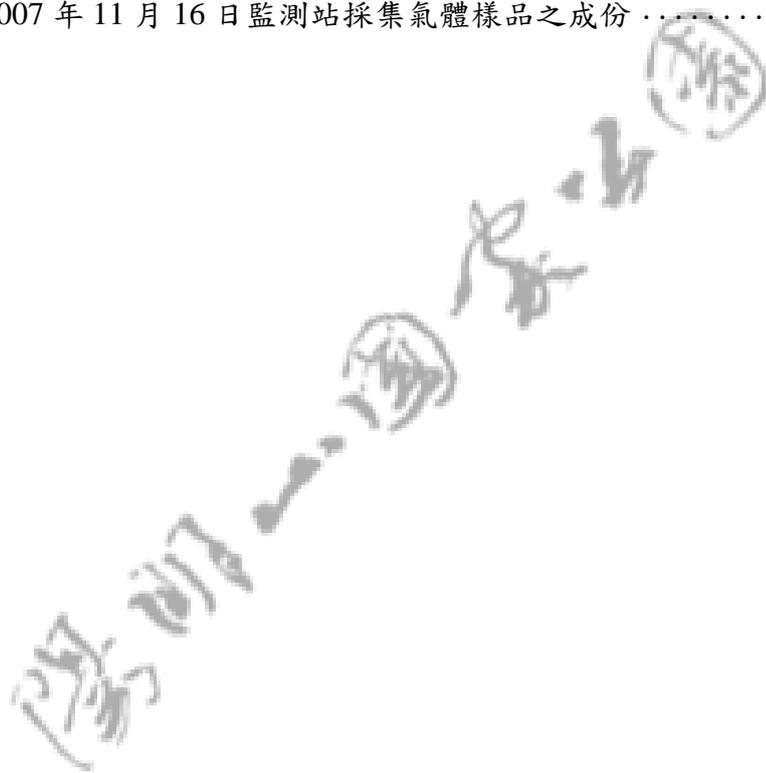
目次

表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 前言	1
第二章 研究方法與測站設置	9
第一節 土壤氣體	9
第二節 地殼變形	9
第三節 大地電磁法	35
第四節 地溫監測	40
第三章 調查結果與討論	49
第一節 土壤氣體	49
第二節 地殼變形	61
第三節 大地電磁法	74
第四節 地溫監測	78
第四章 結論	83
第五章 建議	87
附錄	89
附件一 期初審查會議記錄	89
附件二 期中審查會議記錄	92
附件三 期末審查會議記錄	95
附件四 研究報告中各種測站分布圖	98
參考書目	99



表次

表一 監測站內不同孔洞採集氣體樣品之成份	21
表二 大屯山地區 GPS 觀測站	34
表三 大地電磁法在不同頻率及電阻率下之測深	37
表四 本(98)年度與去年度大地電磁法施測比較	38
表五 大地電磁法資料二維模型逆推參數設定	40
表六 土壤氣通量初步量測結果	50
表七 2007 年 11 月 16 日監測站採集氣體樣品之成份	52





圖次

圖一 全球火山分佈(紅色三角)	2
圖二 台灣北部的地體構造簡圖與大屯火山群主要的火山噴氣孔與溫泉位置分佈圖	2
圖三 大屯火山地區氣體樣品之 He-Ne 三端元成份投影圖	4
圖四 大屯火山群各地噴氣之平均氦同位素比值分佈圖	5
圖五 大屯山地區過去數年中之微震活動分布	7
圖六 土壤逸氣通量量測之儀器設備	13
圖七 小油坑噴氣孔附近土壤氣採樣及通量測量點位置分佈圖	15
圖八 使用密閉氣罩法及套裝通量測量設備之工作情形	16
圖九 第 06 採樣點位置靠近小油坑主要遊客步道且周遭有景觀設計	16
圖十 第 07 採樣點位置適中，溫度、通量及氣體成份均適合監測站設立	17
圖十一 第 08 採樣點已相當靠近噴氣孔，溫度及氣體成份均對儀器有害	17
圖十二 火山氣體監測站之配置圖	18
圖十三 火山氣體監測站之外觀	19
圖十四 火山氣體監測站位於小油坑噴氣孔附近	20
圖十五 火山氣體監測站之內預留不同深度的孔洞，可供二氧化碳與氬氣分析儀使用	20
圖十六 監測站內 1 米鐵管孔洞採集氣體樣品之氬氣濃度分析結果 ($>20,000\text{Bq/m}^3$)	22
圖十七 監測站內 1 米 PVC 管孔洞採集氣體樣品之氬氣濃度分析結果 ($\sim 8,200\text{Bq/m}^3$)	22
圖十八 監測站內 2 米 PVC 管孔洞採集氣體樣品之氬氣濃度分析結果 ($\sim 7,800\text{Bq/m}^3$)	23
圖十九 2007-2008 年監測期間台北地區的有感地震	26-27
圖二十 2009 年監測期間大屯火山地區的有感地震	28-29
圖二十一 計算地球上的位置之參考座標示意圖	31
圖二十二 陽明山國家公園大屯火山地區之竹子湖 GPS 觀測站 (YM01) 之外觀	32
圖二十三 陽明山國家公園之竹子湖 GPS 觀測站 (YM01) 之記錄儀器	33

圖二十四 陽明山國家公園大屯火山地區之菁山 GPS 觀測站(YM02) 之外觀	33
圖二十五 陽明山國家公園大屯火山地區之萬里 GPS 觀測站(YM03) 之外觀	34
圖二十六 大地電磁法原理圖	35
圖二十七 大地電磁儀系統	37
圖二十八 陽明山國家公園大地電磁法測站及剖線位置圖	38
圖二十九 小油坑噴氣孔溫度監測站的位置	42
圖三十 小油坑火山噴汽遠觀。圖中下方的房子為小油坑遊客中心	42
圖三十一 小油坑的地表噴氣。白色的岩層為熱水換質作用後的黏土	43
圖三十二 小油坑的噴氣孔和硫磺結晶	43
圖三十三 噴氣孔附近的小泥漿池	44
圖三十四 噴氣孔溫度監測系統示意圖	46
圖三十五 溫度感應器設置位置圖	46
圖三十六 電纜線沿步道埋設，深度約 20 公分	47
圖三十七 埋設鐵弗龍電纜線情形	47
圖三十八 噴氣孔之溫度展示區位置。	48
圖三十九 被噴氣腐蝕的不銹鋼管。下圖為全新的不銹鋼管	48
圖四十 連續分析五小時的土壤氣體濃度變化資料	51
圖四十一 2007 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果	52
圖四十二 2007 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果	53
圖四十三 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果	54
圖四十四 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果	54
圖四十五 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳期間之雨量變化	55
圖四十六 2008 年連續監測期間出現異常高值時段以及氬氣測量時段	56
圖四十七 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果	57
圖四十八 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果	57
圖四十九 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳期間之雨量變化	57
圖五十 2009 年連續分析土壤氣體通量和雨量結果	58
圖五十一 2009 年連續測量土壤溫度結果	60
圖五十二 台灣北部地區地殼水平變形每年之平均速度	62

圖五十三 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼水平變形每年之平均速度	62
圖五十四 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼垂直變形每年之平均速度	63
圖五十五 大屯山地區 GPS 觀測站(YM01)位置隨時間變化情況	63
圖五十六 大屯山地區 GPS 觀測站(YM02)位置隨時間變化情況	64
圖五十七 大屯山地區 GPS 觀測站(YM03)位置隨時間變化情況	65
圖五十八 大屯山地區 GPS 觀測站(YM04)位置隨時間變化情況	66
圖五十九 大屯山地區 GPS 觀測站(YM05)位置隨時間變化情況	67
圖六十 民國九十六年大屯山地區水平向平均速度分布	68
圖六十一 民國九十七年大屯山地區水平向平均速度分布	68
圖六十二 民國九十八年大屯山地區水平向平均速度分布	69
圖六十三 民國九十六年大屯山地區垂直向平均速度分布	69
圖六十四 民國九十七年大屯山地區垂直向平均速度分布	70
圖六十五 民國九十八年大屯山地區垂直向平均速度分布	70
圖六十六 大屯火山地區從 2007/8 至 2009/3 期間水準測量路徑分布圖	71
圖六十七 大屯火山地區從 2007/8 至 2009/3 期間水準測量之結果	71
圖六十八 大屯山地區過去數年中之微震活動分布	72
圖六十九 大屯山地區過去數年之每個月微震個數統計分布	73
圖七十 東西向剖面 TM 模式電阻率觀測值與其二維逆推後之比較	76
圖七十一 東西向剖面 TE 模式電阻率觀測值與其二維逆推後之比較	77
圖七十二 測區七星山-大油坑附近二維電性構造剖面圖	77
圖七十三 小油坑噴氣孔溫度時序圖	79
圖七十四 小油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析	80
圖七十五 小油坑噴氣孔溫度與竹子湖氣象觀測站氣溫圖	80
圖七十六 小油坑噴氣孔溫度與竹子湖氣象觀測站雨量圖	81



摘要

關鍵詞：大屯火山、火山氣體、地殼變形、大地電磁法、地溫監測

一、研究緣起

陽明山國家公園內之大屯火山群，為台灣唯一具有火山自然景觀之國家公園。雖然過去人類歷史上大屯火山群並無噴發之記錄，但是地表地熱與微震活動還是很明顯。此外，最近噴氣所含氦同位素之分析研究，證實部分大屯火山群之噴氣來自岩漿源，這強烈的暗示台灣北部地底下依舊存在有岩漿庫之可能性。故大屯火山群是否再度活動的可能性，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。

二、研究方法與過程

本計畫主要將整合台灣現有之主要火山監測專家與學者，分別利用(1)土壤氣體監測、(2)地表地殼變形、(3)大地電磁法及(4)地溫監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群進行調查研究。

三、重要發現

依據上述四種火山監測與分析方法基本上說明，再整合過去其他相關之研究，大屯火山地區之地表火山活動之特性依舊明顯存在。其中特別是地震活動與地球化學隨時間常有顯著之變化。雖然大地電磁法觀測結果顯示，可能是淺部地殼之岩漿庫，大約六公里深度附近，可能屬於冷卻中之岩漿，但這並不能白排除其他深部岩漿存在之可能性。此外最近之火山灰之研究強烈建議大屯火山最後一次活動為五千多年前。如此對大屯火山地區進行更深入之研究與監測，已成為政府與學術單位一個重要議題。

四、主要建議事項

對於火山活動的監測是長久的，建議管理處於本計畫執行同時，亦能同時訓練相關人員，能夠進行後續的維護與資料解讀，並於後續能夠編列經費設置多個觀測站，形成一個觀測網，如此於本計畫結束後，便能夠更有效地長期連續監測本地區的火山活動。同時全球能源逐漸枯竭，而地熱是未來可能加以利用的能源。政府單位通盤考慮於大屯火山區利用地熱能源的可行性。

ABSTRACT

Keywords: Tatun Volcano, crustal deformation, magnetotelluric survey, geothermal observation.

1. Background

The Yangmingshan National Park is the only area where has actively volcanic features in the island of Taiwan. Although there was no historical record to show Tatun volcanoes has erupted, there are still a lot of geothermal and micro-earthquake activities near the surface. A recent study of Helium isotope ratios indicates some magma chambers might exist beneath the Tatun volcanoes. Therefore, it is not only an interestingly scientific topic but also strongly social impact in Taipei if there is any potential volcanic activity in the Tatun area.

2. Methodology

We have integrated four different methods to study the Tatun volcanoes. They include soil gas monitoring, crustal deformation survey, magnetotelluric measurement and geothermal observation in the Tatun volcanic area.

3. Results

Combining the results obtained from soil gas monitoring, crustal deformation survey, magnetotelluric measurements and geothermal observations with other previous studies, we have concluded that some

volcanic activities in the Tatun volcanic area still exist. Among them, temporal variations of micro-earthquakes and geochemical monitoring are significant. Although the magnetotelluric results suggest the possible magma chamber at the shallow crust might be cooling now, the possibility of other deep magma sources can be not totally excluded. A recent study from volcanic ashes collected in the Tatun volcanic area indicates that the last eruption might be around 5,500 year ago. Thus, it becomes a very important issue for the government and academic units to carefully investigate and monitor the Tatun volcanic area now.

4. Suggestions

Some further investigations have to be done to improve the understanding of the potential activities in the Tatun volcanic area. Also, the geothermal resource might be obtained from the Tatun volcanic area in the future.

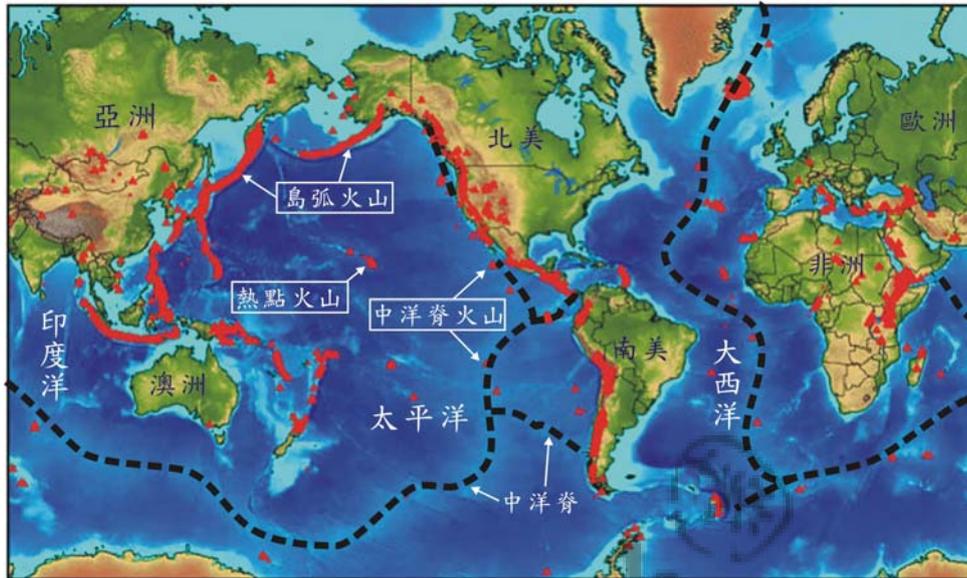


第一章 前言

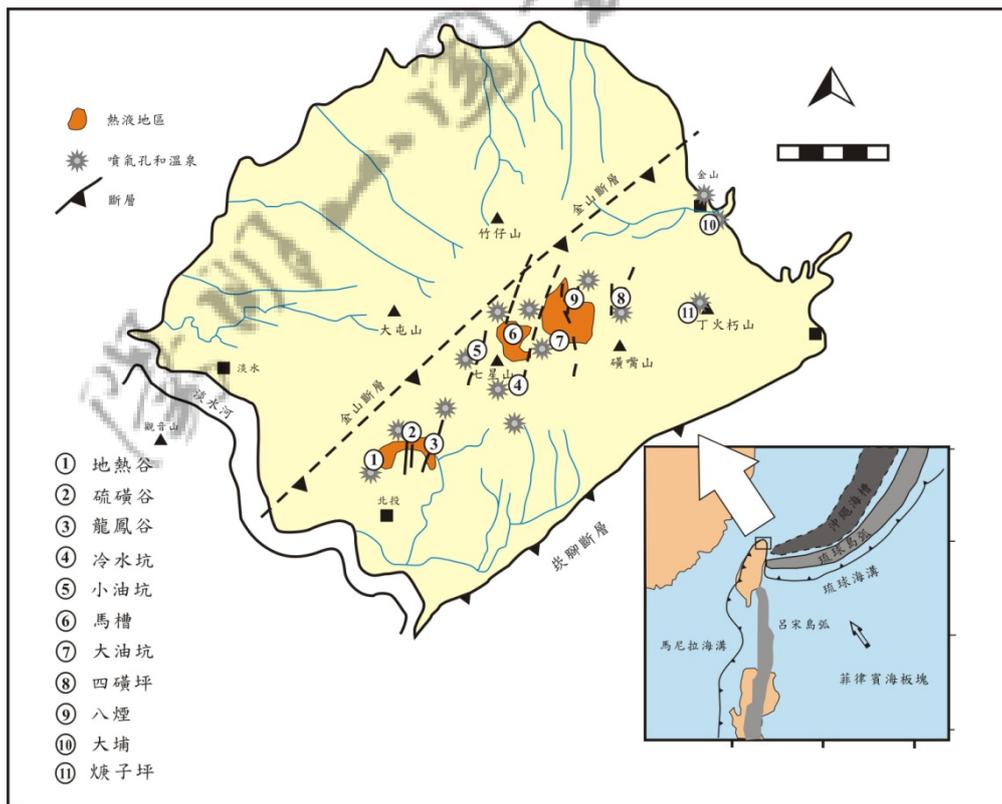
從古至今火山噴發給人類帶來了可怕之災難。例如，大約兩千年前意大利維蘇威(Vesuvius)火山噴發，當時繁華的龐貝古城瞬間被火山灰掩埋。希臘桑托林(Santorin)島的火山噴發，並同時觸發一次駭人聽聞的大海嘯(波高超過60米)，導致公元前1470年間米諾斯文明突然消失。一兩百年前印度尼西亞坦博拉(Tambora)火山猛烈大噴發，造成的直接死亡人數約1萬人，噴發次年全球氣候異常，有8.2萬人死於噴發後的飢荒和疫病。即使21世紀的今天，地球上仍有因板塊活動所造成之活火山活動(圖一)，隨時可能會再對人類文明造成威脅。

地處西環太平洋火山地震頻繁帶的大屯火山群(圖二)，其與岩漿活動有關的地熱活動仍然十分頻繁，由火山噴發記錄看來，大屯山最近的一次噴發是在十萬年前，故而可以將之歸類為休眠火山。傳統上地質學家認為台灣北部大屯山與東北外海之諸火山島，是屬於琉球島弧西延的一部份(如：莊文星與陳汝勤，1989；陳正宏，1990)；而Teng et al. (1992) 與Teng (1996) 則更進一步推測，台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。最近Wang et al. (1999, 2002) 的研究，則開始挑戰傳統認為台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, 2002) 指出這些岩漿活動，可能與台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，則傳統認為大屯山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，因為台灣北部的張裂活動現正逐步加強發育當中，若是地殼下方有火山岩體存在，則隨時有可能提供管道給岩漿噴發至地表。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

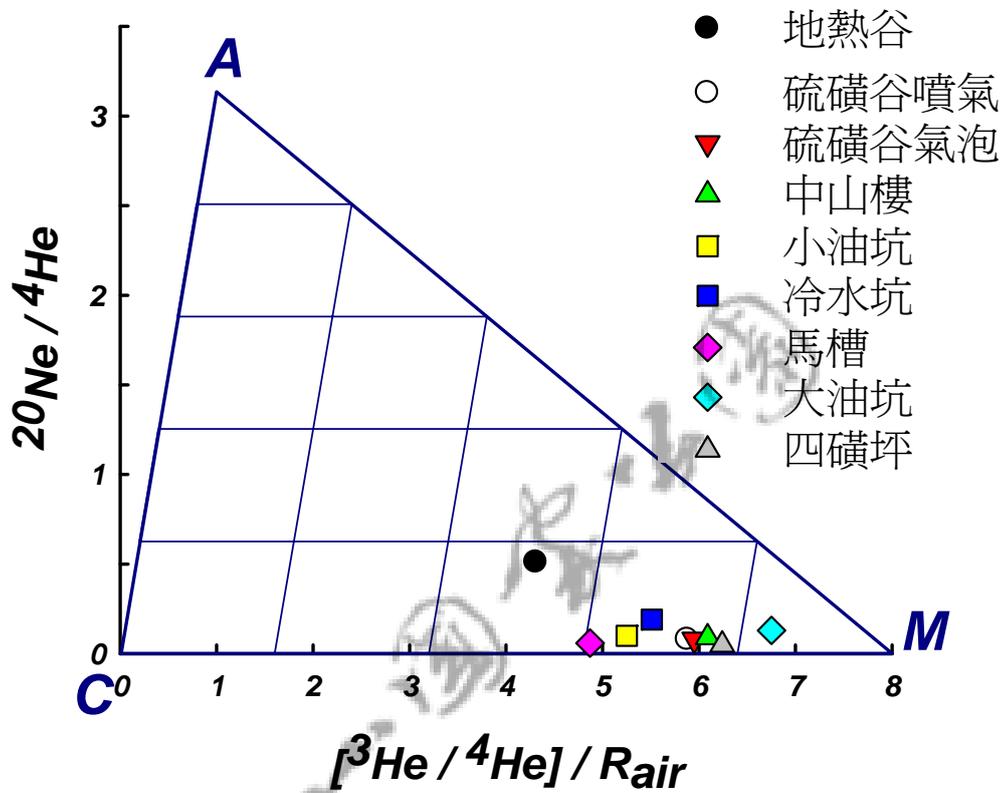


圖一 全球火山分佈(紅色三角)。

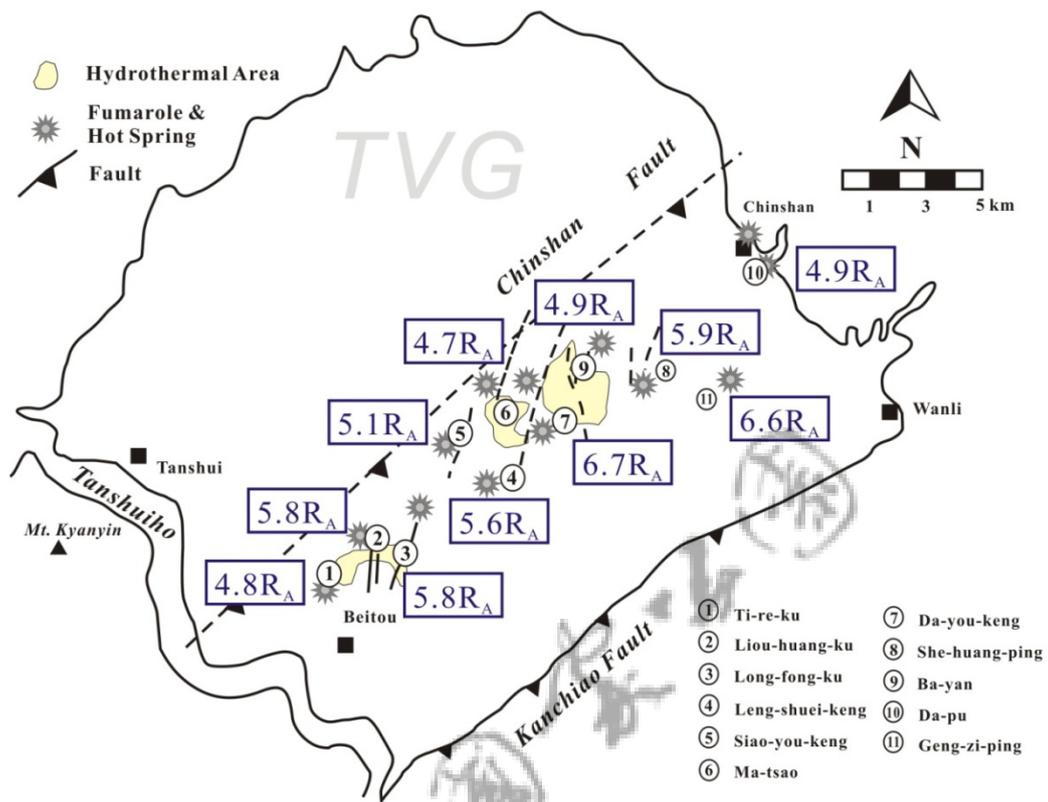


圖二 台灣北部的地體構造簡圖與大屯火山群主要的火山噴氣孔與溫泉位置分佈圖。

最近初步的氦同位素研究結果顯示，大屯山地區的噴氣與溫泉氣仍有大於 60% 源於深部地函源的氣體組成（圖三，Yang et al., 1999; 2005；楊燦堯，2000；楊燦堯等，2003），暗示台灣北部地底下仍有非常大可能性有岩漿庫的存在，其最可能之岩漿庫位置可能在有最高氦同位素比值火山氣體成份的大油坑底下（圖四）；Song et al. (2000) 更據此推論大屯火山群可能為一活火山。Chen and Lin (2002) 最近由台北盆地之鑽井岩芯中，發現在松山層中夾有原生火山灰薄層，且推論其最有可能為大屯火山群之噴發產物，假設松山層最老的沈積年代為兩萬年以前，所以他們推論大屯火山群最近的一次噴發紀錄應該年輕於兩萬年前。此一年輕的噴發記錄，又加強了大屯山底下可能仍有岩漿庫活動的說法。



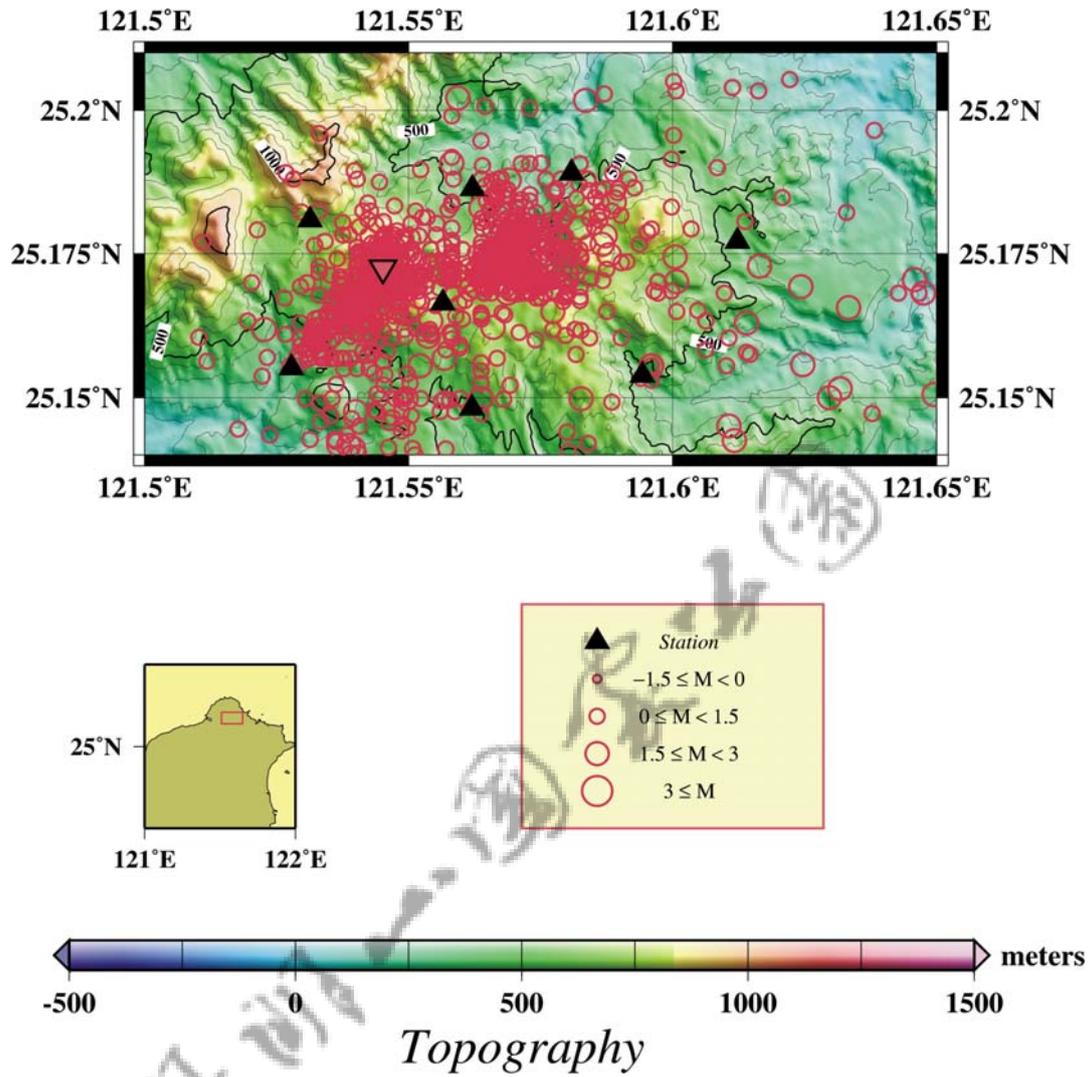
圖三 大屯火山地區氣體樣品之 He-Ne 三端元成份投影圖。A：空氣；C：地殼；M：地函端成份。除了地熱谷外，大屯火山群之氣體成份皆有大於 60% 之地函源氣體成份；而大油坑氣體則有最大之地函源比例（~90%）。（楊燦堯等，2003）



圖四 大屯火山群各地噴氣之平均氦同位素比值分佈圖。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值從大油坑沿著金山斷層向北向南逐漸減少，高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值指示此處 He 來自上部地函。其中大油坑有最高之氦同素比值，推測為最有可能存在岩漿庫的位置。圖修改自 Yang et al. (2003)。

故而對大屯火山活動之長期監測，為一重要而急迫的工作項目；最近 Lin et al. (2005a, b) 的地震監測資料分析結果顯示，在七星山底下確有異常的地震活動（圖五），可能與岩漿熱液活動所引發的微震有關，非常值得持續對當地的可能岩漿活動進一步監測。

故大屯火山群是否復活的可能性，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。本計畫主要將整合台灣現有之主要火山監測專家與學者，包括台灣大學地質科學系楊燦堯教授、中央大學地球物理研究所陳洲生教授、台灣大學海洋研究所江協堂先生及中央研究院地球科學研究所林正洪博士等研究團隊。同時利用(1) 土壤氣體監測、(2) 地表地殼變形、(3) 大地電磁法及(4) 地溫監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群進行調查研究。



圖五 大屯山地區過去數年中之微震活動分布。

陽明山國家公園

第二章 研究方法與測站設置

利用科學方法瞭解火山體地下物質、情況的途徑有很多種。根據日本、美國、紐西蘭和菲律賓等國家，監測火山活動的經驗得知，除了地表的地質調查、溫泉水成份分析、氣體採集分析、岩石礦物定年研究外，利用地球物理的方法（微震觀測、震波測勘、重力、磁力測量、電磁波測勘、大地電阻法等），推估地下構造也是近年來常被採用的方式。因為火山如果復活，其岩漿流動必然會產生火山性的地震，也可能會改變地形、重力、地磁力、地下溫度場及地熱氣和溫泉水中化學物質的濃度。其中為了瞭解地下岩層的物理性質，利用火山地區之地震活動資料，所獲得震源時空分佈與速度構造特性，並配合其他相關證據解釋，可以幫助我們了解大屯火區淺部地殼的地熱分佈、地下火成岩體的範圍、破裂岩層與熔融物質等。

本計畫主要將整合台灣現有之主要火山監測專家與學者，包括台灣大學地質科學系楊燦堯教授、中央大學地球物理研究所陳洲生教授、台灣大學海洋研究所江協堂先生及中央研究院地球科學研究所林正洪博士等研究團隊。分別利用(1)土壤氣體監測、(2)地表地殼變形、(3)大地電磁法及(4)地溫監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群進行調查研究。

第一節 土壤氣體

土壤氣體監測原理：土壤氣體是存在於地下的氣體，可能由生物或是地質等作用產生；由於氣體密度低而經由土壤中的裂隙擴散至地表。土壤氣體的成分與大氣有顯著的差異，藉由成份的分析及各種性質的探討，給予我們許多地質意義上的解析。根據許多研究顯示，土壤氣體檢測在許多調查工作上，是相當可靠的方法。應用範圍包括：礦床、地熱及石油蘊藏的分佈、地震預測及新構造的研

究等(King et al., 1996; Klusman, 1993; Lombardi and Reimer, 1990; Schumacher, 1991)。礦床學上，土壤氣體早已被應用於礦藏的探勘。近年來，更被應用於環境污染的偵測。加上分析儀器的進步，不僅可以迅速且有效率地分析氣體成份，加上土壤氣體檢測可以克服許多地形、地質環境難以設站的問題，使其應用更為廣泛。在火山調查與監測的應用方面：不論火山處於活動或休眠狀態，只要有岩漿活動，大量的火山氣體就會由火山地區釋放到大氣中。因此利用觀測火山氣體的釋放，來監測火山活動，是相當重要的火山預報機制。以往量測火山氣體通常使用相對光譜儀(correlation spectrometer, 簡稱 COSPEC)測量二氧化硫通量(e.g. Rose et al., 1986; Symonds et al., 1994)。火山氣體中，去水後之氣體成份以二氧化碳含量較高，同時也是岩漿上升過程中，首先脫離的氣體之一(e.g., Giggenbach, 1996; Symonds et al., 1994; Yang et al., 2003; Lee and Yang, 2004)。不僅在火山口及火山噴氣口的氣體中含有大量的二氧化碳，在遠離火山口的地區也可以量測到高於空氣濃度的火山氣體(Allard et al., 1991)。因此藉由土壤氣中二氧化碳通量的測量，可以讓科學家在安全的距離內監測火山活動；此外，藉由繪製通量等高線圖，可提供辨識火山特徵及未來可能噴發點的資訊。這樣的優點，在噴發前和噴發期間更顯重要。

土壤氣體通量量測的方法：若忽略氣體及固體表面的交互作用，總通量(ϕ_{tot})代表對流作用通量及擴散作用通量的和。而總通量中，主要仍以對流作用為主，擴散只佔少部分。若以擴散方式通過均質土壤，根據 Fick 第一定律有下列關係式：

$$\phi A = -vD(dC/d\lambda) \quad v: \text{土壤孔隙率} \quad D: \text{土壤的擴散係數} \quad (1)$$

相對的，對流則包含了因為壓力梯度而產生的作用力。根據 Darcy 定律：

$$\phi a = (\kappa/\mu)(dP/d\lambda) \quad \kappa: \text{土壤滲透係數} \quad \mu: \text{流體的黏滯度} \quad (2)$$

雖然式(2)是經由穩定系統實驗而得，但仍廣泛應用於各方面，包括受壓流

體的對流等。

參考國外學者量測通量的方法主要如下：

1. 間接量測法：根據二氧化碳濃度決定通量。量測不同深度的二氧化碳濃度來計算通量，因為難以估算(1)中的 v 、 D ，所以本方法只能使用於氣體擴散速率穩定的地區。
2. 直接量測法：直接法需要動態平衡的過程，包括量測已知土壤的進氣與抽氣量，而得 CO_2 通量。將一直徑 1.3 公分、50 公分長的金屬管打入土壤，利用抽氣速率固定的幫浦，由管子的底部持續抽出二氧化碳並量測其含量。被吸出的氣體，以空氣進入取代，如此可以估算出通量。經過一段時間，二氧化碳濃度達一定值時，其濃度為“動態濃度(C_d)”，與土壤二氧化碳通量成比例。為了計算 $\phi_{\text{soil}} \text{CO}_2$ ， C_d 必需考慮實驗設計、實驗情形與土壤的物理性質等參數。且所有動態平衡的過程，都可能因為實驗裝置設計，或操作人員對空氣通量的選擇，造成氣體通入壓力過高或過低的影響。
3. 靜態吸收法：許多研究者利用鹼液和二氧化碳平衡的方法計算通量。例如利用鹼液吸收待測容器中的二氧化碳，而後由分析石灰水的濃度得到二氧化碳的增加量。此方法可以測出微小到 $0.7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 的差異，但收集時間長，缺乏效率。
4. 密閉氣罩法(Closed-chamber method)：由義大利科學家 Chiodini 發展出的通量研究方法：在土壤表面蓋上一密閉容器，利用二氧化碳濃度的增加速率計算通量。這個方法已經成功的應用在農業科學上，用以測量土壤代謝效率 及測量土壤中其他氣體的通量，例如。

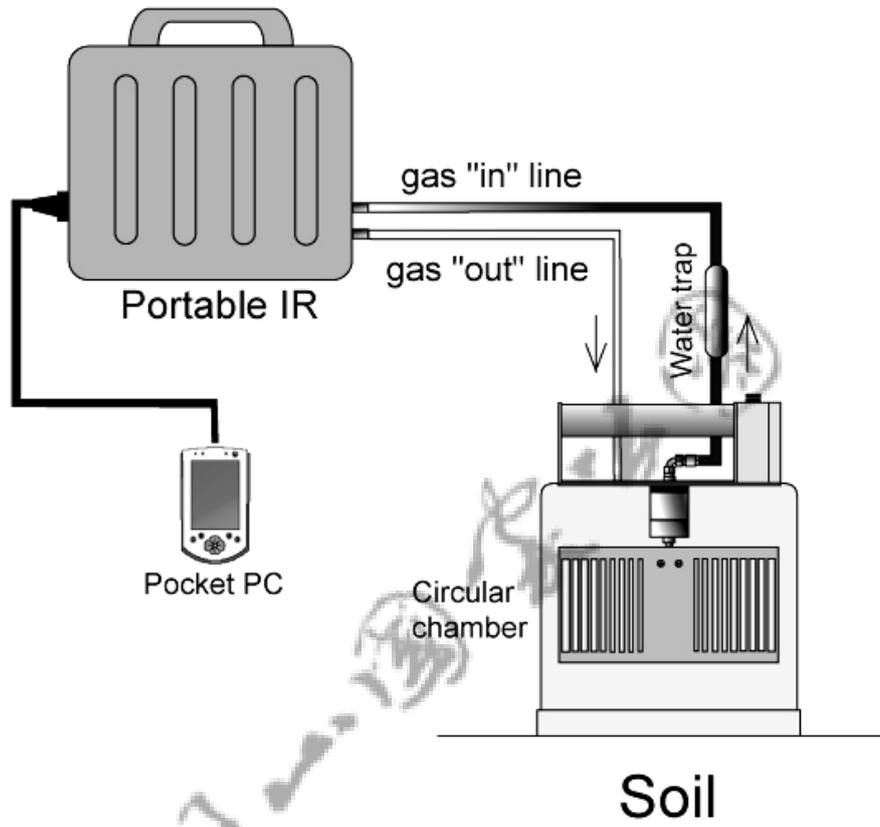
量測的方法及設備：我們採用近來最常被使用的密閉氣罩法，並使用義大利 WEST SYSTEM 所製造的可攜式裝備，進行土壤氣體二氧化碳濃度測量。

儀器主要分為三部分（圖六）：

(1) 遠紅外線光譜儀：配備有兩個氣體偵測器，LICOR LI820 非擴散性遠紅外線光譜儀，偵測範圍 0-20000 ppm 及硫化氫偵測儀，偵測範圍 0-50 ppm。

(2) 循環氣罩(Circular chamber)：為一完全密閉的金屬罩，內部總體積 6.2×10^{-3} 立方公尺，高 20 公分，底面積 314 平方公分。有進氣及出氣口連接光譜儀，使管路成為循環系統。毛細管裝置使內外壓平衡，但不會造成氣罩內外氣體的交換。若沒有毛細管會使氣罩內壓漸漸升高而影響通量值。由於二氧化碳密度較空氣大，易沉降於低處，造成濃度不均勻；因此氣罩內部有一轉速固定的風扇，用以均勻混合空氣及二氧化碳。為防止水氣進入儀器造成誤差及儀器的損壞，進入儀器前的管路加裝乾燥劑。經測試，分子塞(molecular sieve)的除濕效果好、易更換，是相當合適的乾燥劑。另外，進行量測前，應將氣罩邊緣以土壤覆蓋妥當；以避免外部空氣進入，造成誤差。在風較大的狀況下更應小心氣罩的密閉。再者需要確定氣罩內的二氧化碳濃度已經與空氣相當後，再開始測量，否則初始值會高於真正土壤的二氧化碳濃度，造成量測時間加長。

(3) 掌上型電腦：儀器的控制及數據儲存均利用掌上型電腦進行。由掌上型電腦內建的程式可以馬上得到通量值數據（單位: ppm/s），即時得到數據可以立刻確知實驗的正確與否，而決定是否從新測試，是相當便利、有效率的方法。



圖六 土壤逸氣通量量測之儀器設備。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

土壤氣體通量的計算：由計算二氧化碳質量的增加來求得通量(ϕ)，必須固定氣罩的體積；並於固定時間間隔量測二氧化碳濃度。可得到以下的關係式：

$$V_C C_{CO_2,t+dt} = V_C C_{CO_2,t} + \phi_{inp} A_C C_{soil} CO_2 dt - \phi_{out} A_C C_{CO_2,t} dt \quad (3)$$

A_C 為 chamber 底面積， V_C 為 chamber 體積， $C_{CO_2,t+dt}$ 為二氧化碳於 dt 時間內增加的濃度。 V_C 與 $C_{CO_2,t+dt}$ 相乘即為在 $t+dt$ 內二氧化碳增加的質量。這個值與 t 時刻 chamber 內二氧化碳質量($V_C C_{CO_2,t}$)加上 dt 時間內，由外界進入的質量($\phi_{inp} A_C C_{soil} CO_2 dt$)，並減去流出 chamber 的質量後($\phi_{out} A_C C_{CO_2,t} dt$)應相等。而氣體進出氣罩的速率(ϕ_{inp} 、 ϕ_{out})由儀器控制，兩者應相等，因此沒有壓力不等的問題。又 V_C/A_C 即為氣罩的高，因此(3)可寫成：

$$dC_{CO_2}/(C_{CO_2,t} - C_{soil} CO_2) = -(\phi_{inp}/H_C) dt \quad (4)$$

(4)恰為帶有常數的一次線性微分方程式，計算後可寫成：

$$C_{CO_2,t} = C_{soil} CO_2 + (C_{air} CO_2 - C_{soil} CO_2) \exp(-t \phi_{inp} H_C) \quad (5)$$

若於初始狀態($t \rightarrow 0$)，(4)可以寫成：

$$\phi_{inp} (C_{soil} CO_2 - C_{air} CO_2) = (dC_{CO_2}/dt)_{t \rightarrow 0} H_C \quad (6)$$

火山及地熱地區的土壤氣二氧化碳濃度通常會遠大於空氣二氧化碳濃度($C_{soil} CO_2 \gg C_{air} CO_2$)，因此：

$$\phi_{soil} CO_2 = \alpha H_C \quad (7)$$

要計算 $\phi_{soil} CO_2$ 須先確定 α 值，而 α 決定於開始量測通量前 $C_{CO_2}-t$ 的斜率。此斜率在實際狀況下是很難評估的；但只要經實驗矯正就可以克服這樣的問題。

為瞭解土壤氣體成份，並辨別氣體來源，採取土壤氣體進行氣體成份分析及

氮同位素分析。使用長1公尺、內徑1公分的不鏽鋼管打入土壤至少50公分深，並使用鉀玻璃真空瓶採取土壤氣體樣本，攜回實驗室利用四極桿質譜儀分析氣體成份；並使用磁場式氣態離子源稀有氣體質譜儀(MM5400, Micromass, England)進行氮同位素比值分析。

野外初步探勘結果顯示，七星山附近地區以小油坑噴氣口附近最為適合設置連續監測站。除了有強烈持續的火山噴氣活動值得連續監測其活動以外，更因為鄰近遊客中心，有容易維護與設置的優點，且未來更具有教育大眾的附加價值。故而本計畫以本地區為首選設置連續監測站的位置。

本計畫於本地區之調查，以土壤氣體通量測量配合土壤氣體採樣，在使用不銹鋼管打入土壤採樣前後各進行二氧化碳及硫化氫通量測量，以比較打穿土壤表層前後通量的差異。

通量測量與土壤氣體採樣點共計十一個點，分佈於遊客中心附近、噴氣口周圍與遊客中心停車場（如圖七）。



圖七 小油坑噴氣孔附近土壤氣採樣及通量測量點位置分佈圖。



圖八 使用密閉氣罩法及套裝通量測量設備之工作情形。



圖九 第06採樣點位置靠近小油坑主要遊客步道且周遭有景觀設計。



圖十 第 07 採樣點位置適中，溫度、通量及氣體成份均適合監測站設立。

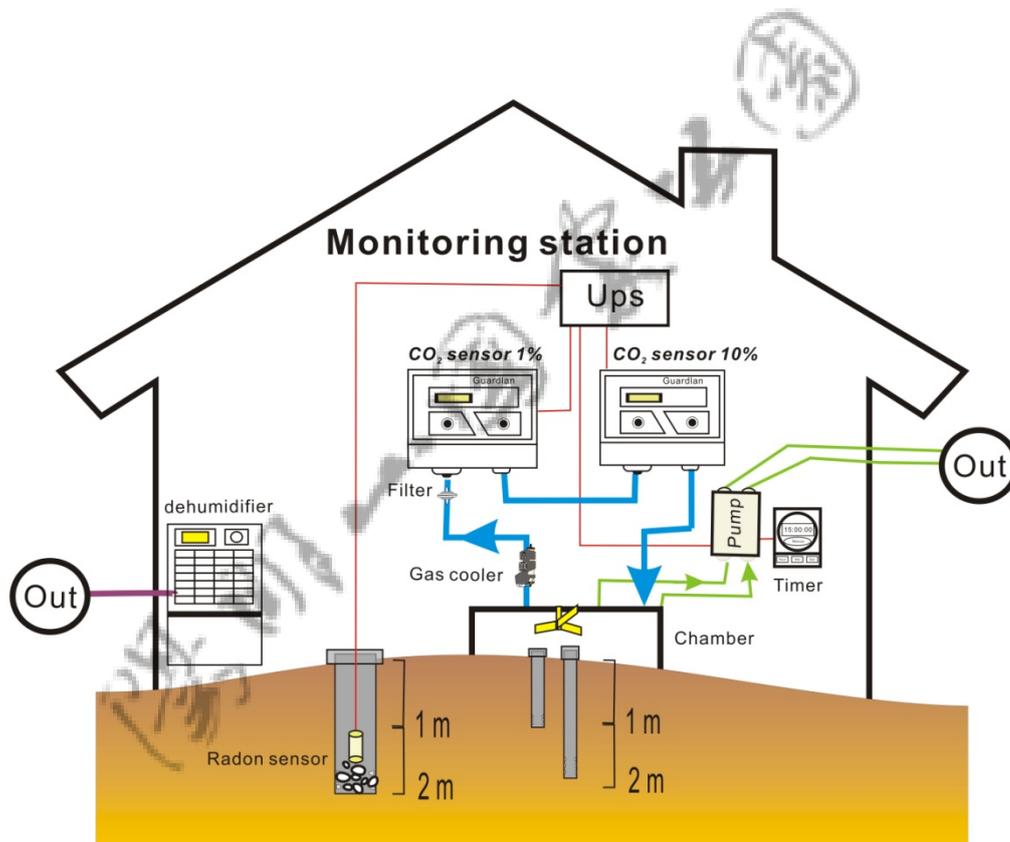


圖十一 第 08 採樣點已相當靠近噴氣孔，溫度及氣體成份均對儀器有害。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

監測站之設置: 於設站位置, 分別利用兩米與一米長的鐵管打入土壤層, 測試有足夠的氣體由地底逸散出來後, 罩上氣罩, 經過氣體冷卻器除水後, 氣體樣品便可以導入二氧化碳偵測儀, 而可量得其成份的變化。

於監測站內部, 並預留兩個分別為一米與兩米身的孔洞, 以供往後設置氦氣分析儀使用, 以資與二氧化碳的成份變化相比對。



圖十二 火山氣體監測站之配置圖。

目前監測站已設置完成, 如圖十三所示。目前以可以正式的連續分析土壤二氧化碳的氣體成份與通量變化。



圖十三 火山氣體監測站之外觀。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查



圖十四 火山氣體監測站位於小油坑噴氣孔附近。



圖十五 火山氣體監測站之內預留不同深度的孔洞，可供二氧化碳與氬氣分析儀使用。

分別採集不同孔洞的氣體樣品進行分析，其中深度兩米的鐵管居然僅有微量的土壤氣體可以抽取出來，而無法分析到氣體組成。可能因為此深度剛好打到不透水的黏土層，致使透氣率較差，使得深處的氣體無法逸散至地表來。

表一 監測站內不同孔洞採集氣體樣品之成份

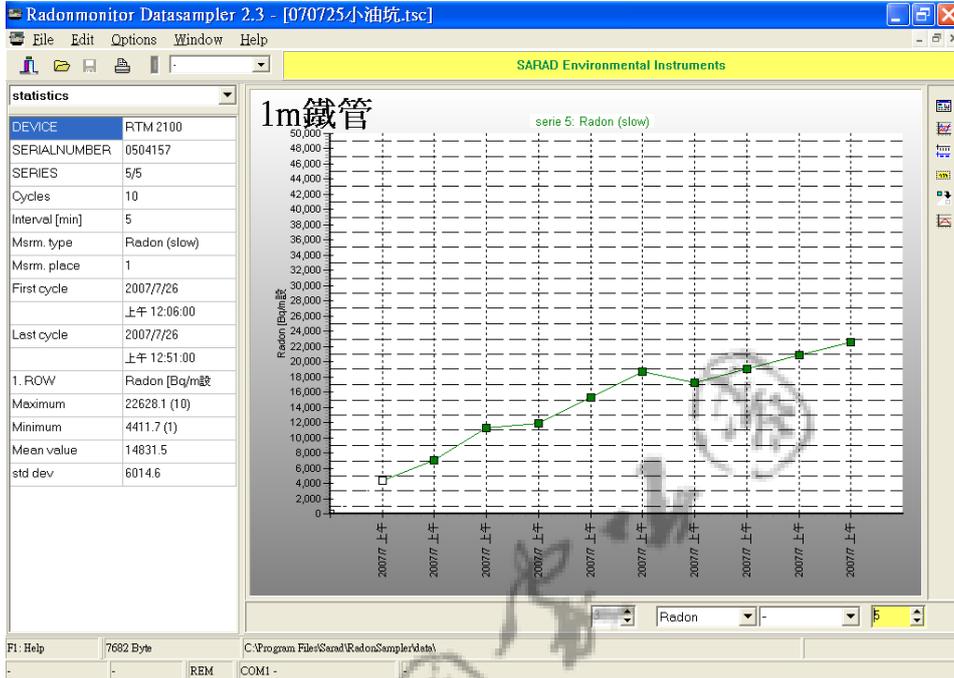
	CH4	N2	O2	H2S	Ar	CO2	SO2	Total
SYK PVC 1M	0.00%	76.54%	18.55%	0.09%	0.825%	3.92%	0.02%	100.00%
SYK PVC 2M	0.08%	69.65%	17.71%	0.06%	0.954%	11.50%	0.00%	100.00%
SYK 鐵管	2.13%	4.49%	0.44%	6.26%	0.014%	86.53%	0.04%	100.00%

由表一可以看出，由一米深鐵管所採集到的氣體樣品，與火山氣體樣品成份最為接近（有最高的二氧化碳與硫化氫氣體濃度），可以作為本地區火山氣體的替代樣品，用於監測本地區的火山活動。

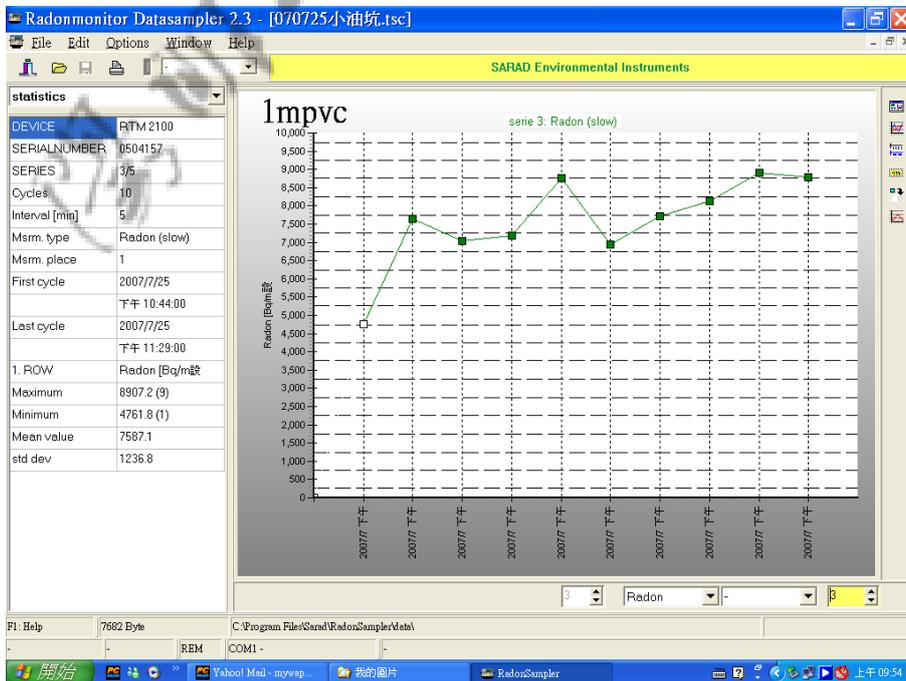
而由 PVC 管所採集的樣品，因為孔徑較大，故而有較多的空氣混染情形（明顯較高的氮氣與氧氣含量）；不過 2 米深孔洞所採集的樣品，比由 1 米深孔洞所採集的樣品有較高的二氧化碳濃度，可以作為往後不同深度氮氣濃度通量的量測，以資跟二氧化碳資料相比對。

圖十六至 4-7 為不同孔洞樣品之氬氣濃度分析結果。其中 PVC 管不同深度的樣品有相近且較低的氬氣濃度，約 8,000 Bq/m³；而一米鐵管孔洞的樣品，則明顯有較高的氬氣濃度，>20,000 Bq/m³。此結果與主要氣體成份分析結果相符，即由鐵管孔洞所採集的樣品有較高比例的火山氣體成份，有較高二氧化碳、硫化氫與氬氣濃度，可以作為往後監測火山活動的監測指標。

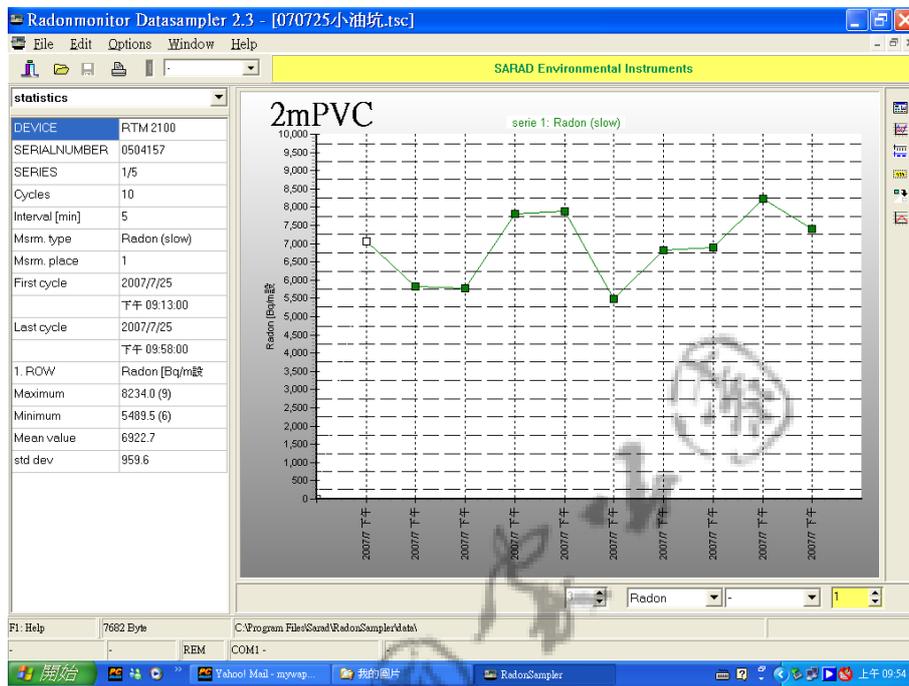
大屯火山群土壤氣體之觀測調查



圖十六 監測站內 1 米鐵管孔洞採集氣體樣品之氡氣濃度分析結果 (>20,000Bq/m³)。



圖十七 監測站內 1 米 PVC 管孔洞採集氣體樣品之氡氣濃度分析結果 (~8,200 Bq/m³)。



圖十八 監測站內 2 米 PVC 管孔洞採集氣體樣品之氡氣濃度分析結果（ $\sim 7,800 \text{ Bq/m}^3$ ）。

我們採用近來最常被使用的密閉氣罩法進行二氧化碳濃度的測量 (Chiodini et al., 1998)。本觀測站主要配置的儀器為 EDINBURGH 所製造的二氧化碳分析儀，使用 NDIR 紅外線感測器，偵測範圍為 0-10%，內建幫浦其流速為 1 L/min。密閉容器的總體積為 1.12×10^{-2} 立方公尺，高 21.5 公分，底面積為 5.23×10^{-2} 平方公尺，容器上有四個可供氣體進出的連接孔，為了避免內部壓力過大而影響氣體通量的變化，於是我們加裝毛細管以維持內外壓力平衡，免除壓力造成的影響。此外，由於二氧化碳密度較空氣大，易沈降於低處而造成濃度不均勻，因此於容器內部裝置一轉速固定的風扇，用以均勻混合空氣與二氧化碳。為防止水氣進入儀器造成損壞或誤差，容器管線連接至儀器前加裝一乾燥器，氣體在進入二氧化碳分析儀後，出氣端再將氣體導回密閉容器形成一迴路。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

於本分析系統中，設置有定時開關。我們設定分析時間為每 5 分鐘一筆資料，可 24 小時連續分析。而每經過 1 小時，定時器則開始動作，同時開啟容器另外兩接口的抽氣幫浦，將容器內部的氣體排出觀測站，在定時器啟動後的 5 分鐘，抽氣幫浦停止動作，使得容器內部的氣體可繼續增加，以計算其通量變化。

目前結果顯示大屯火山群小油坑地區的二氧化碳逸氣通量有明顯的變化並非穩定的逸散通量，可能與氣體來源有關，冷卻的火山岩體並非穩定且持續的釋放二氧化碳；從二氧化碳濃度資料顯示，當出現低濃度時大多是受到環境因素的影響。若氣體來源是穩定的，可能是受到土壤性質的影響；小油坑地區下有一層黏土層，黏土質地細密孔隙度較小而氣體在上升的過程中受到阻礙比較不易逸散甚至開始累積，當氣量累積到一程度及有足夠的力量突破阻礙逸散至地表。於是造成變異性大的逸氣通量。

在 2008 年 10 月開始二氧化碳通量有變大的趨勢。自 2007 年底本監測站開始運作至今，二氧化碳濃度增高，這一年半的時間內我們更換了三台二氧化碳分析儀，從偵測極限適用於低濃度的 1% 換成 10% 如今已增加至 30% 的分析儀，未來不排除更換更大偵測範圍的可能性。這意味著小油坑地區的土壤逸氣越來越旺盛，濃度越來越高，因此大屯火山群的岩漿活動可能越來越趨於活躍。但這些推論都需要更長期的資料累積才能進一步的證實。

雨量資料是採用距離本監測站最近的陽明山竹子湖氣象觀測站所紀錄的每日雨量做為本監測站的雨量資料。比對二氧化碳通量與降雨量資料後，結果顯示二氧化碳通量與當地的降雨有密切關係，當有驟雨發生，土壤氣通量明顯降低。顯示因降雨會使得土壤滲透度改變（孔隙度）降低，造成逸氣通道不順暢；或是二氧化碳與通道中水作用溶於其中，使得逸氣通量明顯降低。

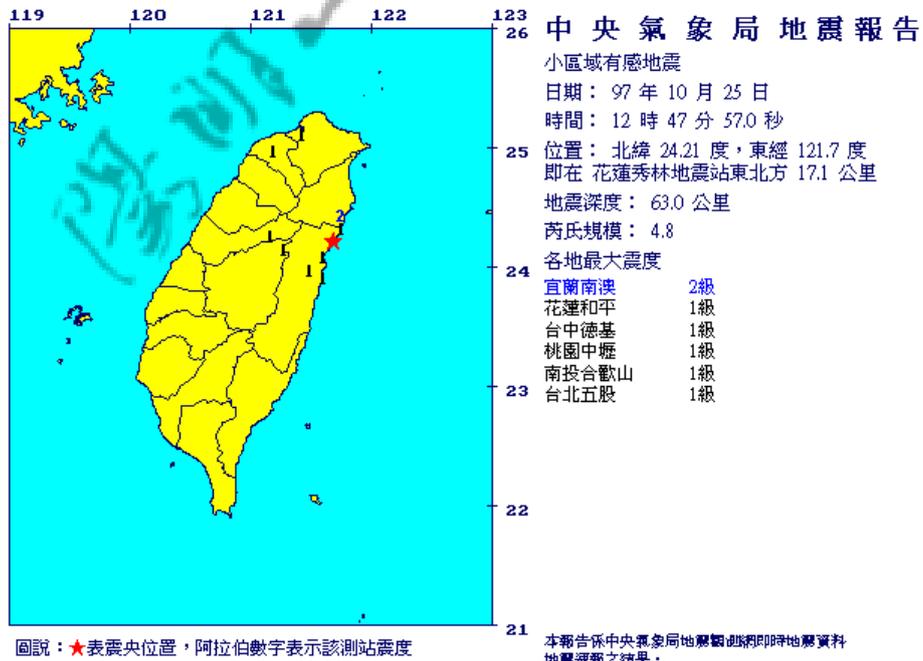
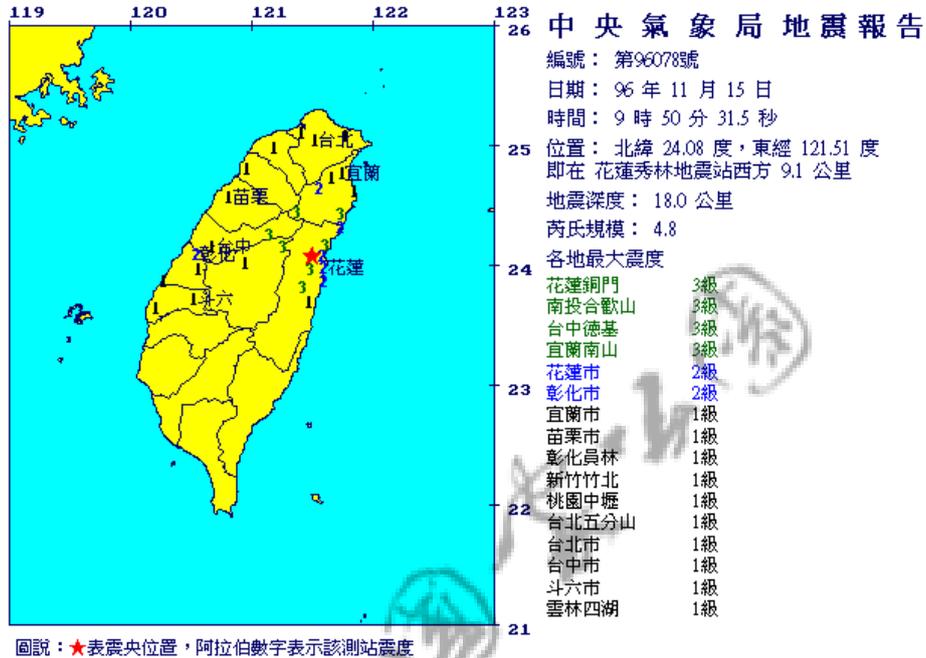
由於小油坑地區位於地勢高處且天氣變化萬千，加上距離竹子湖氣象站有些距離，故竹子湖氣象站的雨量資料無法完全代表小油坑地區的雨量資料。因此當二氧化碳通量降低且沒有降雨記錄時，有可能是受到火山活動趨緩影響，但還是有可能受到當地雨量的影響只是竹子湖氣象站沒有雨量記錄。未來可以考慮在小油坑地區增設雨量計，可更清楚釐清二氧化碳和雨量之間的關連性。

由監測發現，本地區有很大的逸氣變化。造成大幅逸氣通量變化原因，有可能是地底下的岩漿活動、或者是區域的地殼活動造成地層孔隙度改變所造成的。在監測期間中央氣象局所發布的有感地震活動記錄少有對大屯火山造成影響，在 2007 年 11 月 15 日、2008 年 10 月 25 日以及 2008 年 10 月 28 日各有一起對大屯火山地區產生有震度 1 的地震；但在 2008 年 10 月 26 日當天的雨量也很大，在雙重的影響下無法確認土壤逸氣量是否受到地震的影響。相隔一年 2009 年 10 月 20 日大屯山地區再次出現有感地震，這次受到影響的鞍部測站更加靠近大屯火山岩漿活動旺盛地區。

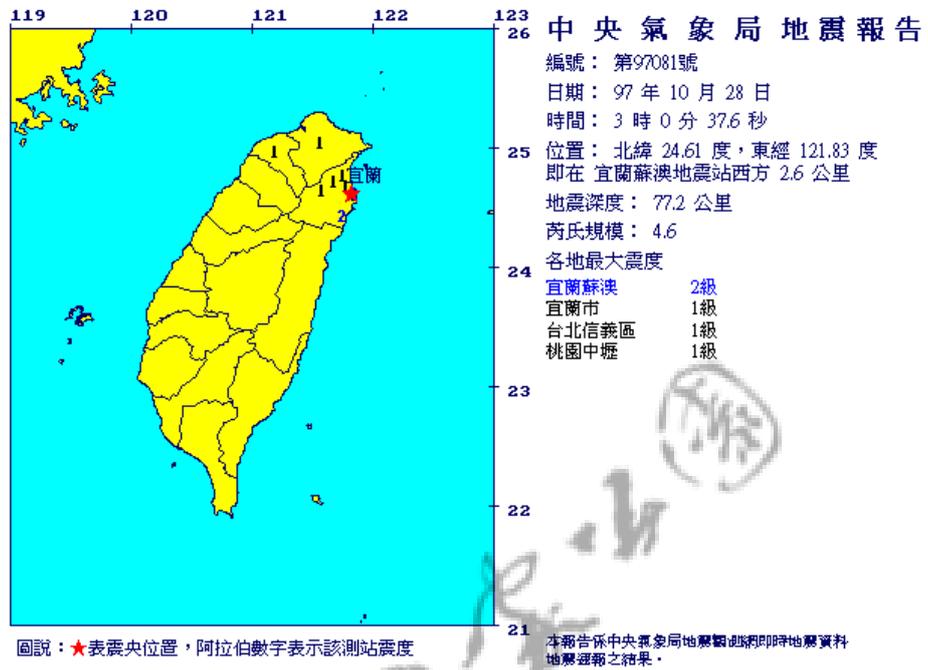
根據量測數據顯示二氧化碳濃度在 2009 年 10 月 18 日明顯上升，代表當時的氣量應該相當的大才能突破黑色泥狀物質而向上逸散至地表，地底逸氣量大量變化。中央氣象局發布 2009 年 10 月 20 日在大屯山鞍部地區自 13:40 至 14:32 間發生四起有感地震，其規模分別為 3, 3.4, 3.5 和 3.6 而其震度為 1, 2, 2 和 2 詳細資料如圖二十。大膽推測這段期間的二氧化碳濃度明顯上升是受到地震活動的影響，根據彈性活跳理論地震的發生是因為能量的累積造成形變，當無法繼續承受形變則會產生破裂，而破裂的瞬間即為地震發生的時候。在受應力累積產生形變的過程中，周圍的流體也會因此受到擠壓而改變流動方向，我們在 2009 年 10 月 18 日測得二氧化碳濃度明顯升高，可能地體構造是受到擠壓流體朝低孔隙度的地方流動而濃度集中。緊接著兩天後地震就發生了，這段

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

濃度升高的期間或許可視為地震的前兆。

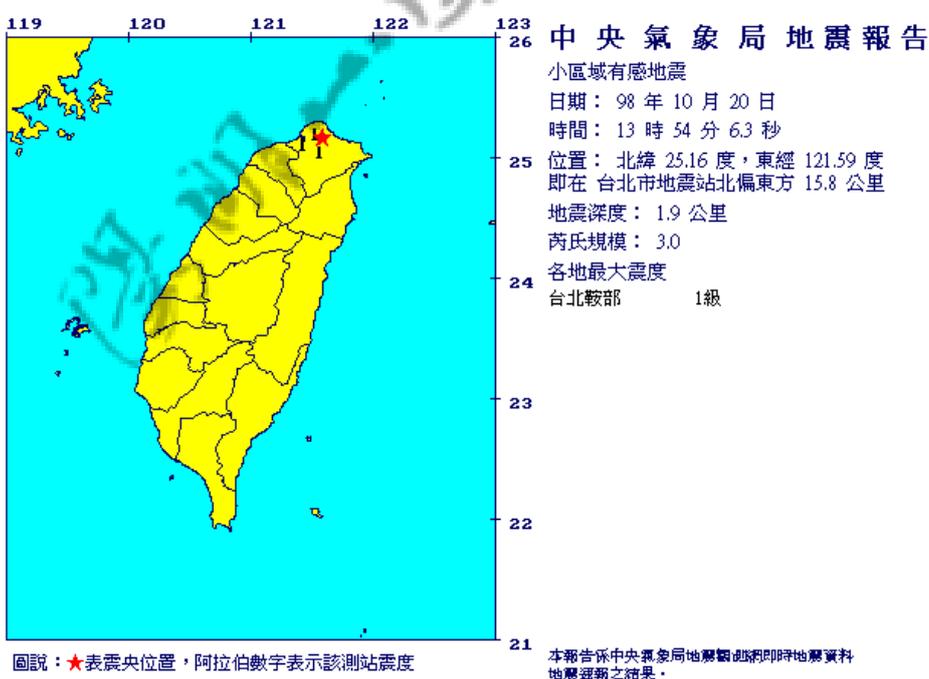
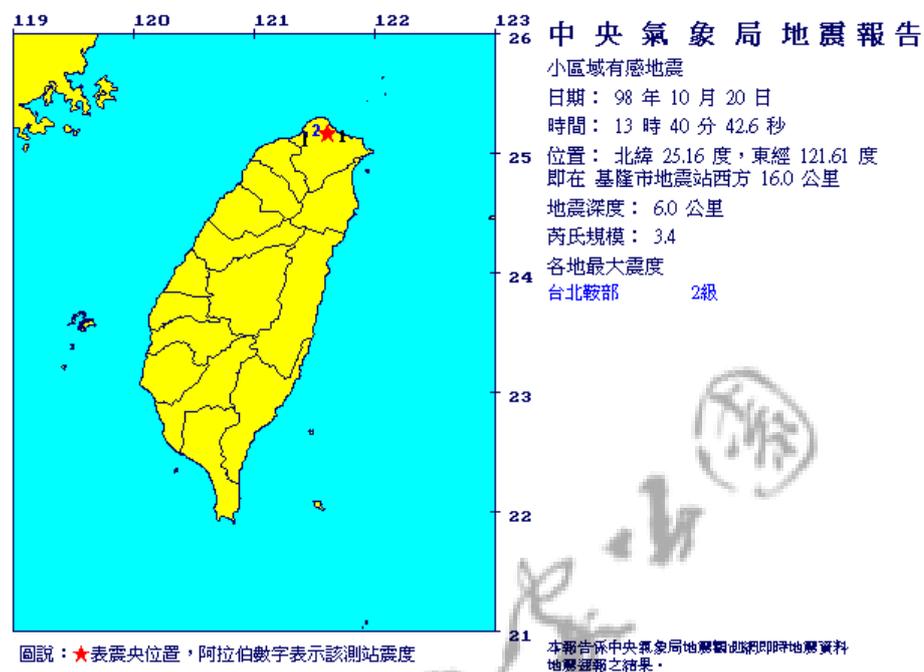


圖十九 2007-2008 年監測期間台北地區的有感地震。

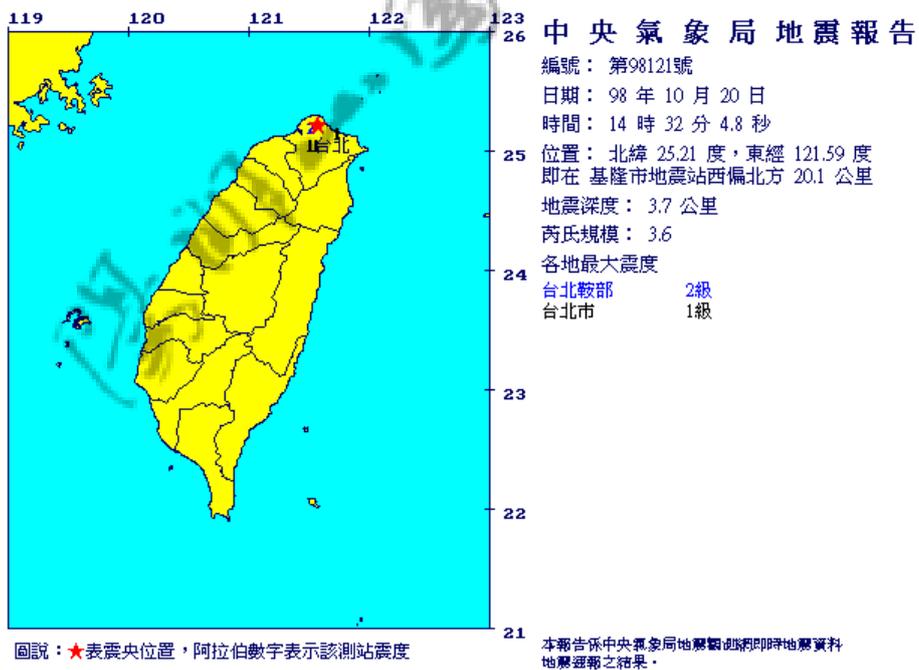
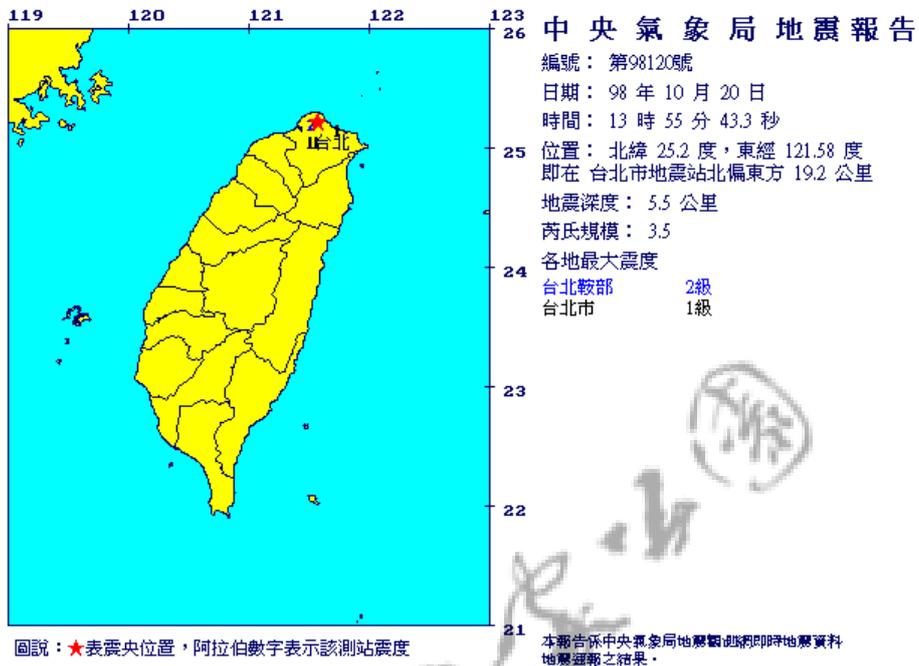


圖十九（續） 2007-2008年監測期間台北地區的有感地震。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查



圖二十 2009年監測期間大屯火山地區的有感地震。



圖二十（續） 2009年監測期間大屯火山地區的有感地震。

第二節 地殼變形

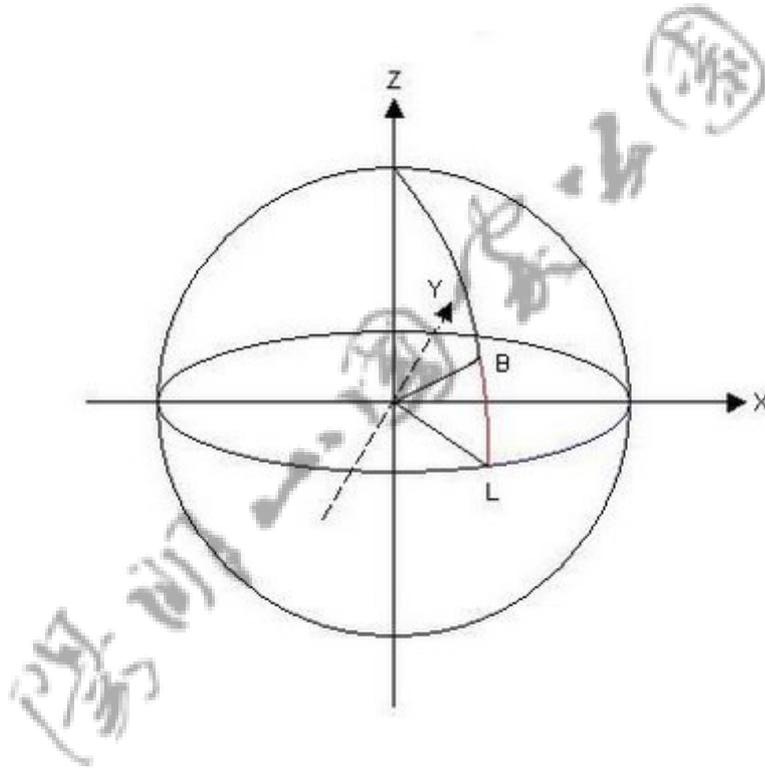
本計畫以精密的全球定位系統儀器，測量微小地殼變形。所謂全球定位系統（Global Positioning System，通常簡稱 GPS）是一個中距離圓型軌道衛星導航系統。它可以為地球表面絕大部分地區提供準確的定位。該系統利用地面上 GPS 站來接收用太空中 24 顆 GPS 衛星之訊號，來計算地球上 GPS 站所處的位置及海拔高度。最少只需其中 4 顆衛星，就能迅速確定用戶端在地球上所處的位置及高度。地球上任何一點均能觀測到 6 至 9 顆衛星。所能收聯接到的衛星數越多，解碼出來的位置就越精確。使用者只需擁有 GPS 接收機，無需另外付費。GPS 系統擁有如下多種優點：全天候，不受任何天氣的影響；全球覆蓋（高達 98%）；三維定速定時高精度；快速、省時、高效率；應用廣泛、多功能；可移動定位。

GPS 衛星是由洛克菲爾國際公司空間部研製的。在星體底部裝有 12 個單元的多波束定向天線，能發射張角大約為 30 度的兩個 L 波段（19 公分和 24 公分波）的信號。在星體的兩端面上裝有全向遙測遙控天線，用於與地面監控網的通信。此外衛星還裝有姿態控制系統和軌道控制系統，以便使衛星保持在適當的高度和角度，準確對準衛星的可見地面。由 GPS 系統的工作原理可知，星載時鐘的精確度越高，其定位精度也越高。1981 年，休斯公司研製的相對穩定頻率為 10 - 14/秒的氫原子鐘使 BLOCK IIR 型衛星誤差僅為 1 公尺。

GPS 定位原理：

以地心為三度空間座標上原點(圖二十一)，XY 軸在赤道平面上，X 軸貫穿經度 0 度與 180 度，Y 軸貫穿東西經 90 度，Z 軸貫穿南北兩極，距離地心半徑 R 的球體方程式如下：

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2$$



圖二十一 計算地球上的位置之參考座標示意圖。

利用全球共有 24 顆 GPS 衛星，分佈在六條相交 30 度的軌道上，任何地方只要能接收四顆衛星資料，就可以計算出在地球上的位置(圖二十一)。GPS 衛星傳遞的訊號包括衛星自身 (a, b, c) 座標資料以及發射時間，那麼 GPS 接收器就可以利用這些資訊計算位址。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

本計劃於陽明山國家公園內設置一個共有五個地殼變形觀測站(Global Positioning System, 通常簡稱 GPS), 來監測七星山附近之火山活動可能引起之地殼變動。主要工作包括進行資料收集、資料分析、專題研究、報告和儀器維修等工作。

地殼變形觀測站(GPS)之選定是最重要且耗時之工作。由於主要大屯火山區屬於陽明山國家公園保護管理範圍, 相關的法令規定、土地之地目、電力與電話配線等限制必須優先考量。又因為測站要儘量避免人為與自然界的干擾, 以提高儀器效率。在測站均勻分佈的原則下, 我們先在地圖上, 標示出可能設置地殼變形監測站的位置, 然後攜帶儀器前往測試。經過分析比較後, 依交通、電力配線狀況, 及雜訊的高低排列設站地點的順序。經過多方面的努力交涉, 終於在地主和陽明山國家公園管理處的同意下, 在本計畫於竹子湖(YM01)、菁山(YM02)、萬里(YM03)、八煙(YM04)、冷水坑(YM05)等五個站(如圖二十二至二十五所示)。測站相關的資料詳列於表二。



圖二十二 陽明山國家公園大屯火山地區之竹子湖 GPS 觀測站(YM01)之外觀。



圖二十三 陽明山國家公園之竹子湖 GPS 觀測站 (YM01) 之記錄儀器。



圖二十四 陽明山國家公園大屯火山地區之菁山 GPS 觀測站 (YM02) 之外觀。



圖二十五 陽明山國家公園大屯火山地區之萬里 GPS 觀測站 (YM03) 之外觀。

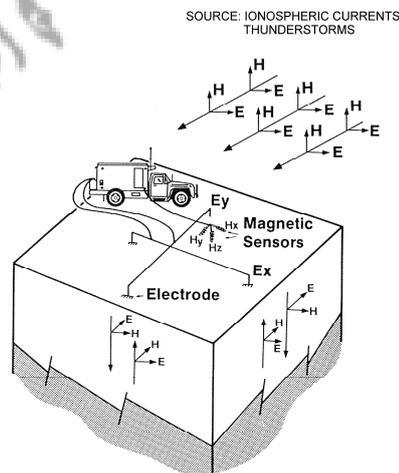
表二 大屯山地區 GPS 觀測站

站名	經度(E)	緯度(N)	高度(m)
竹子湖 (YM01)	121.53954	25.17888	710
菁山 (YM02)	121.56069	25.14838	545
萬里 (YM03)	121.60490	25.14661	431
八煙 (YM04)	121.58547	25.18760	368
冷水坑 (YM05)	121.56548	25.16400	744

第三節 大地電磁法

大地電磁法是以地球外部天然交變電磁場為場源，量測此電磁場進入地層後之感應訊號，在地面上一點或多點同時觀測互相垂直的電磁場水平分量，可以測獲地球內部的電性構造(圖二十六)，這是法國學者 Louis Cagniard (1953)所創，成為一種研究地球深部電性構造的新方法。

天然交變電磁場，具頻寬大、能量強、場源豐富等特性，高頻段(>1 Hz) 主要由大氣層中雷電效應所引起，低頻段(<1 Hz) 則是與太陽帶電粒子擾動地球磁層有密切的關係。不同頻率的電磁場訊號，具有不同的穿透深度(表三)，頻率越低穿入地層越深，研究不同的頻率響應，即可獲得不同深度的地下電阻率分佈情形。



圖二十六 大地電磁法原理圖：以天然交變電磁場為場源，量測此電磁場進入地層後之感應訊號，在地面上一點或多點同時觀測此互為垂直的電磁場水平分量，可以測獲地球內部的電性構造。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

1. 野外施測

大地電磁測深法屬於頻率測深的一種技術，利用天然交變電磁場為場源，但天然電磁場的不穩定性，且在某些頻段上先天不足、訊號微弱，容易受人為活動干擾(在幾十 Hz 到 1Hz 範圍內，人文活動的電磁場干擾特別嚴重)，故大地電磁法野外作業時，必須針對測點位置作詳細篩選，避免設站於人為干擾區域，如：道路、變電所，高壓電線、人文活動頻繁地區等等，以提高大地電磁法資料品質。

此外遠距參考點(Gamble et al., 1979)之設置及運用，也是攸關資料品質好壞的重要因素。

本實驗主要採用的儀器設備，是由加拿大鳳凰公司所製造之 MTU-5A 大地電磁測深儀(圖二十七)，收訊頻寬範圍約 1/1800 Hz ~384 Hz。有關大地電磁測深法之實務及其資料處理，有興趣者可參考加拿大鳳凰公司網站 <http://www.phoenix-geophysics.com> (Phoenix Geophysics Ltd., Canada)。

表三 大地電磁法在不同頻率及電阻率下之測深 (m)

測深(m)	ρ (Ωm) 電阻率	f (Hz)					
		0.1	1	10	100	1000	10000
1000		5.03	15.9	50.3	159	503	1,591
100		15.9	50.3	159	503	1,591	5,030
10		50.3	159	503	1,591	5,030	15,910
1		159	503	1,591	5,030	15,910	50,300
0.1		503	1,591	5,030	15,910	50,300	159,100
0.01		1,591	5,030	15,910	50,300	159,100	503,300
0.001		5,030	15,910	50,300	159,100	503,300	1,591,000



圖二十七 大地電磁儀系統: MTU-5A，包括主機其收訊頻寬範圍約 1/1800 Hz ~384 Hz，電場感測器，磁場感測器以及衛星全球定位系統(GPS)。

2. 測站配置

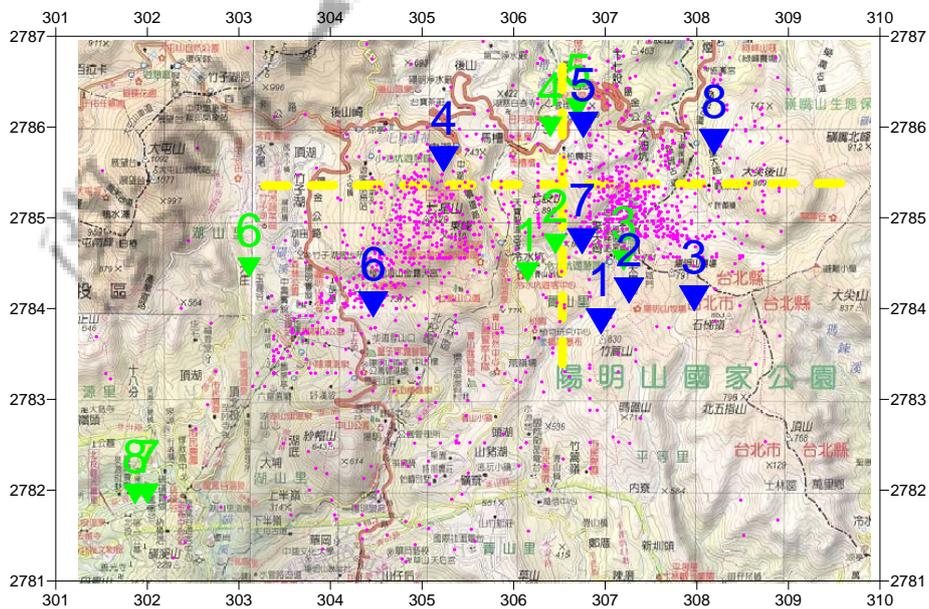
本研究以探測大屯山地區是否有岩漿庫存在之可能為主要目的。為觀測來自地下深部之電磁訊號，測站位置要儘量避免人為的電磁干擾，才能紀錄到來自深部的微弱電磁訊號。在考慮測站均勻分佈的原則下，我們先在地圖上，標示出可能設置測站的位置，然後攜帶儀器前往測試。經過分析比較後，依交通、電力配線

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

狀況，及雜訊的高低排列設站地點的順序，基本上是以七星山為中心，測點編號依序從 1 排至 8，共 8 個大地電磁法測點(圖二十八)，於測點配置圖中，亦將去(97)年度測點附上並將兩者比較列於下表四。

表四 本(98)年度與去年度大地電磁法施測比較

	97 年度	98 年度
測站數目	8 站	8 站
各測站記錄時間	一天	三天
遠距參考站	大屯火山區內測站	澎湖西嶼垃圾場附近
結果比較	淺部之解析度 98 年度較 97 年度大為提高；深部之電阻率兩者相似，屬偏高之電阻值。	



圖二十八 陽明山國家公園大地電磁法測站(藍: 98 年度;綠: 97 年度)及剖線(黃虛線)位置圖。座標系統為二度分帶。粉紅點:微震(林正洪等, 2007)。每方格為 1 km²。

3. 資料處理

應用大地電磁測深法研究電性構造，最主要目的是尋找地下岩層的電阻分佈，尤其是發現與岩漿庫位置或熱水分佈相關之低電阻層。當電磁波通過高導層(意即低電阻層)時，能量大部分被散射，無法穿透高導層，因此，可以在地表偵測該高導層的散射波能量而推斷其存在。本研究採用二維非線性共軛梯度演算法(Rodi and Mackie 2001)與有限差分法(finite different method)為基礎，利用觀測資料並假設一初始理論模型，進而逆推得到最佳擬合解。

大地電磁法資料收集採用張量施測方式，亦即各測點同時量測兩組互相垂直之視電阻率 ρ_{xy} (平行電性地層走向之視電阻率稱為 TE 極化模式)和 ρ_{yx} (垂直電性地層走向之視電阻率稱為 TM 極化模式)，以及垂直地表之磁場變化之觀測資料 H_z (有利於解析側向不均性)。此為大地電磁法標準的施測方式，可彌補傳統直流電阻法一維施測之不足。

二維平滑逆推程式會盡可能的擬合觀測資料與初始設定模型，此逆推演算法會決定每個測站的靜態偏移參數。為了避免資料中少數資料點具有極小的觀測誤差值影響逆推結果(常發生於受電力線影響之測點)，特別在資料中設定 30-20%的雜訊門檻(noise floor)。起始模型設為由 100ohm-m 組成的均勻半空間，模型地表為水平，暫不考慮地形效應。併合 TM 和 TE 以及 H_z 模式資料進行逆推，其均方根 (Root Mean Square, RMS)誤差約小於 2。所述逆推之主要相關參數設定，整理於表五。

表五 大地電磁法資料二維模型逆推參數設定

模 式 參數	TE 極 化 模 式	TM 極 化 模 式	TM +TE 極 化 模 式	TM + TE + Hz 極 化 模 式
旋轉方位角	主 軸	主 軸	主 軸	主 軸
背景電阻 率 (Ωm)	10 0	100	100	100
誤差底限 (%)	30-	30-	30-2	30-2
(電阻率-相 位角)	20	20	0	0
靜態修正	是	是	是	是
模型平順度	5	5	5	5
均方根 (RMS)	< 2	< 2	< 2	< 2
模型逆推次 數	10 0	100	100	100

第四節 地溫監測

地溫監測可用來探討火山的活動 (Tillting, 1989)，火山地區地底下如有岩漿庫、殘餘的岩漿或有後火成活動，則通常在地表附近可發現較高的地溫，地底下的地溫梯度也會偏大，並呈現較高的熱流值 (Zeni et al., 2007)，然而測量這些溫度參數並無法探討火山的活動性，要了解地底下火山的活動情形，必須對地表的地溫做長期的監測，從溫度的變化趨勢才能進一步推測地下火山活動的異常變化(Sudo and Hurst, 1998)。監測地溫的變化除了有學術上的研究價值外，若能將監測資料隨時展示在公共場所（如遊客中心），讓遊客可以隨時了解這些訊息，亦是一項富有教育意義的工作。

小油坑位於大屯火山區七星山的西側（圖二十九），該地區具強烈的後火山活動 (Song, 2000)，噴氣孔噴出的蒸氣可綿延數十公尺高，從遠處

即可看到高聳的白煙（圖三十），小油坑的噴氣孔分佈非常發達，從遊客中心步道入口處附近即可在地面上發現許多小型的噴氣孔（圖三十一），噴氣孔周圍常有黃色的硫磺結晶（圖三十二），噴氣孔附近的岩石受熱換質作用變成黏土，岩石強度降低，用鐵鎚輕敲即會破碎，若有地下水通過，水與黏土會混和成滾燙的泥漿池（圖 5），噴氣孔的噴汽是後火山活動的流體，其溫度的變化可能跟地下的流體有關，監測噴氣孔溫度的變化將有助於我們了解地底下流體的活動情形。

一般遊客中心的位置如果與噴氣孔距離太遠，則不容易設置溫度展示看板，小油坑遊客中心距離這些噴氣孔僅約 100-250 公尺，平常遊客也很多，很適合將噴氣孔溫度的變化訊號傳到遊客中心內，以提高遊客對噴氣孔景觀的觀察興趣。另外，噴氣孔含硫量高，設計放置於野外的儀器必須考慮抗高溫、抗腐蝕等問題，研究團對在溫度監測方面有多年經驗，已發展出適用於深海、溫泉（陸上和海底）、地熱等不同環境之熱流量測或溫度監測儀器，本研究之噴氣孔溫度監測系統是工作團隊獨立設計建造的系統，亦是國內第一個將火山地溫資料即時展示於公共場所之案例，未來若有機會可於其他遊客中心、管理處或需要的位置建造類似之溫度觀測站，在廣泛收集各地區之地溫資料後，更能討論整個大屯火山區地下火山活動的情形。



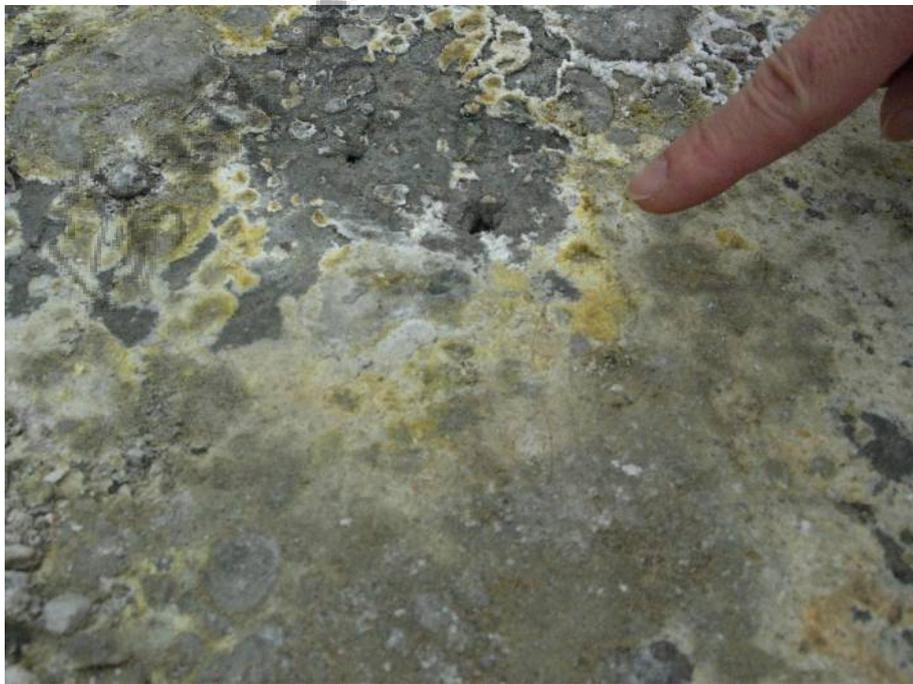
圖二十九 小油坑噴氣孔溫度監測站的位置。



圖三十 小油坑火山噴汽遠觀。圖中下方的房子為小油坑遊客中心。



圖三十一 小油坑的地表噴氣。白色的岩層為熱水換質作用後的黏土。



圖三十二 小油坑的噴氣孔和硫磺結晶。



圖三十三 噴氣孔附近的小泥漿池。

溫度監測方法及步驟: 一般溫度監測的方法係將溫度感應器和記錄器安置在監測的地點, 但因噴氣孔的溫度可能都在 80、90°C 以上, 常用的電子式溫度記錄器無法耐此高溫, 因此溫度感應器和溫度記錄器、資料儲存設備等必須分開, 此即所謂的差分式溫度記錄器 (differential temperature logger), 本研究於 2009 年 4 月開始設計一套差分式溫度記錄器, 溫度感應器放在噴氣孔上, 溫度訊號則連接至遊客中心的大型螢幕上, 整個監測系統設施如圖三十四所示。溫度感應器內含一顆白金電阻, 外部以一長 40 公分、直徑 0.6 公分不銹鋼管保護, 不銹鋼管插在噴氣孔上 (圖三十五), 使溫度感應器深入地表約 40 公分, 由於小油坑現場許多噴氣孔都有坍塌現象, 為安全起見, 所選的噴氣孔位在步道的下方, 該區域坡度較穩定, 岩層不易崩落。考慮小油坑附近的岩層都具有強酸的地下水, 溫度感應器之訊號以抗腐蝕性的鐵弗龍電纜線, 連接至遊客中心內, 鐵弗龍電線已在實驗室內以高濃度硫酸試驗過, 可抗強酸, 品質相當可靠, 為保持國家公園原有的自然景觀, 電纜線沿步道的下方埋入地表下約 20 公分 (圖三十六), 至遊客中心前, 均未露出地表, 不會妨礙景觀, 電纜線外部以 PV

塑膠管保護之（圖三十七），遊客中心內設置一部溫度記錄器、個人電腦和 26 吋平面顯示器，以儲存和展示噴氣孔溫度資料，考慮遊客中心的裝潢格局和色調，我們與該裝潢公司討論顯示器擺放的位置，以及置放電腦所使用的櫥櫃之顏色、形狀，最後選擇位於大門的右側（圖三十八），該處既不妨礙原裝潢設計的格局，又方便遊客觀察溫度資料。

本研究於 4 月完成監測系統之設計工作，並於 4 月底完成現場施工，監測系統包括溫度感應器之埋設在噴氣孔旁、訊號電纜線從噴氣孔沿步道連接至遊客中心內、訊號紀錄器和展示螢幕等設備安置在遊客中心展示廳內等，原預計 5 月初可以進行儀器之測試並開始溫度之監測工作，但因遊客中心內部仍在裝潢整修，暫時無法完成安裝，最後延至 6 月中下旬才開始進行噴氣孔溫度之監測工作。本套地溫監測系統之工作原理為：溫度感應器內安放一顆高品質白金電阻，由於電阻與溫度有一定之關係函數，藉由測得電阻的變化可得知環境溫度的高低，白金電阻穩定性高，以溫度解析度 0.1°C 而言，並不需要經常進行溫度校正，溫度感應器感應到的溫度資料，則經由電纜線傳到溫度記錄器內，其運作方式是記錄器在電纜線中傳出一固定電流，量測流經白金電阻兩端之電壓即可得知白金電阻的大小，再將電阻大小換算成溫度值，記錄器內的溫度值以同步傳入電腦中，電腦除了可以長期儲存資料外，並可將溫度訊號運算，呈現於 26 吋的看板螢幕上，此套系統對溫度資料之記錄和展示皆採全自動化，無須人員操作。

經 4 個月的監測作業發現，遊客中心因無避雷設施，夏季山區多雷，常造成長時間停電，以致資料常常中斷，雷擊結果也造成記錄器和電腦各短路過一次，經維修和更換設備後已恢復正常，為預防雷擊影響，除在電路上加裝避雷器外，所有電器也做好接地保護。另外保護溫度感應器的不銹鋼管於 8 月被噴氣腐蝕（圖三十九），經改採鈦合金管替代不銹鋼管後，目前未發現有腐蝕現象。遊客中心內資料展示區所顯示之資料頻率每秒鐘一筆、每兩分鐘儲存一次，螢幕上展示的內容除目前即時溫度外，也包括過去 6 小時內溫度的變化圖，所有監測資料將於期末計畫結束後交給陽明

山國家公園管理處。



圖三十四 噴氣孔溫度監測系統示意圖。藍色實心圓為溫度感應器，紅色實線為防腐蝕性電纜線，電纜線長度約 150 公尺，為傳輸溫度訊號用，綠色方塊為溫度記錄器和溫度展示螢幕（位於遊客中心內）。



圖三十五 溫度感應器設置位置圖。長 40 公分的溫度感應器插入噴氣孔，溫度訊號經由纜線（圖中綠色鐵弗龍為保護訊號纜線之外殼）傳回至遊客中心。



圖三十六 電纜線沿步道埋設（箭頭處），深度約 20 公分。



圖三十七 埋設鐵弗龍電纜線情形。



圖三十八 噴氣孔之溫度展示區位置（圖中左方紅色框）。展示區位於遊客中心一進大門的右側，暗棕色木箱內置電腦和溫度紀錄器，木箱上置放此系統之解說牌，牆壁上的26吋螢幕則展現噴氣孔之即時溫度。



圖三十九 被噴氣腐蝕的不銹鋼管（上圖）。下圖為全新的不銹鋼管。

第三章 調查結果與討論

第一節 土壤氣體

土壤氣體通量測量結果如表六所示。大部分較遠離噴氣口的採樣點，無論在打入不銹鋼管前後，通量都沒有太大的改變（如第 02~05 採樣點），硫化氫含量也未達到儀器的最小偵測值。第 01 採樣點與一般觀察較不同，在打穿土壤之前的通量頗高，但打穿後通量卻與一般無異，顯示其氣體逸散通量可能不穩定，加上氣體成份並沒有代表性，因此排除在其上設立監測站的可能性。

靠近停車場的兩個採樣點（10 及 11）在打穿土壤後，雖然通量增加量較遊客中心附近的點都來得高，但成份仍屬典型的土壤氣體，無法適當反映火山活動，因此也將其排除。

第 06、07、08 採樣點在通量及氣體成份上均具有適合監測站設立之條件：氣體通量達到一定量且氣體成份可以適當反映火山活動。

第 06 採樣點在打穿土壤後，通量由 $37.6 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 遽增至 $565 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 且通量穩定，但其位置就位於小油坑主要遊客步道上，加上附近有解說牌及石頭等景觀設計，基於小油坑整體景觀與監測站的安全性，第 06 採樣點並非最恰當的位置。

第 07 與 08 採樣點均位在靠近噴氣口的區域，第 07 點在遊客步道旁邊的草叢中，而第 08 點就在噴氣口旁禁止遊客進入的圍欄旁。但是 08 可能因為太過於靠近噴氣口，其土壤氣體成份幾乎與火山氣體成份相當，且土壤表面溫度高達 55 度；其氣體硫含量及溫度都會造成儀器損傷，因此 08 點也不適合設立監測站。

第 07 採樣點為本監設站首選位置，因為其二氧化碳通量夠大、硫化氫等可能損害儀器之成份低，且氣體成份具有火山氣體代表性，加上位置適中，設立監測站不會對遊客或是景觀造成太大的影響。

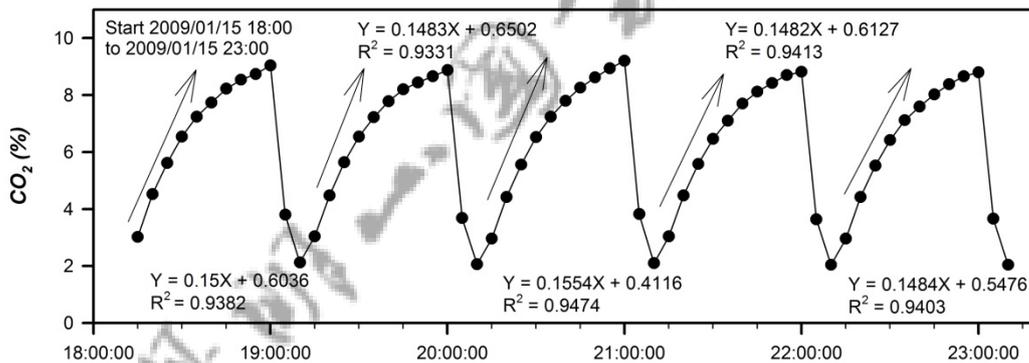
基於以上種種考量，第 07 採樣點為設立土壤氣體監測站的最佳位置。

表六 土壤氣通量初步量測結果

Sample	P (mbar)	T (°C)	Flux (ppm/s)	K	CO ₂ Flux (mole/m ² /day)	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	H ₂ S Flux (mole/m ² /day)	H ₂ S Flux (g/m ² /day)	X (WGS84)	Y (WGS84)
syk-1-1	924.6	20	2.059	0.700	1.44	63.4	nd	nd	E121.54673	N25.17628
syk-1-2	924.6	20	2.196	0.646	1.42	62.4	nd	nd		
syk-2-1	924.3	20.4	1.708	0.645	1.10	48.5	nd	nd	E121.54683	N25.17626
syk-2-2	924.3	20.4	1.433	0.645	0.92	40.7	nd	nd		
syk-3-1	924.3	19.3	2.035	0.647	1.32	58.0	nd	nd	E121.54670	N25.17644
syk-3-2	924.3	19.3	1.928	0.647	1.25	54.9	nd	nd		
syk-4-1	924.2	18.3	0.851	0.650	0.55	24.3	nd	nd	E121.54689	N25.17626
syk-4-2	924.2	18.3	0.555	0.650	0.36	15.9	nd	nd		
syk-5-1	923.7	17.8	0.351	0.650	0.23	10.0	nd	nd	E121.54700	N25.17602
syk-5-2	923.7	17.8	0.517	0.650	0.34	14.8	nd	nd		
syk-6-1	923.6	25.7	1.351	0.633	0.86	37.6	nd	nd	E121.54706	N25.17615
syk-6-2	923.6	25.7	20.310	0.633	12.9	566	nd	nd		
syk-7-1	923.6	23.3	1.219	0.638	0.78	34.2	nd	nd	E121.54724	N25.17605
syk-7-2	923.6	23.3	37.370	0.638	23.8	1049	nd	nd		
syk-8-1	923.3	55.4	20.330	0.576	11.7	515	nd	nd	E121.54754	N25.17585
syk-8-2	923.3	55.4	48.850	0.576	28.1	1237	0.001	0.04		
syk-9-1	922.7	22	0.544	0.640	0.35	15.3	0.003	0.11	E121.54677	N25.17658
syk-9-2	922.7	22	0.739	0.640	0.47	20.8	0.002	0.07		
syk-10-1	922.7	26.8	1.146	0.630	0.72	31.8	0.002	0.06	E121.54755	N25.17686
syk-10-2	922.7	26.8	3.694	0.630	2.33	102	0.003	0.11		
syk-11-1	922.8	18.8	0.299	0.647	0.19	8.52	nd	nd	E121.54722	N25.17694
syk-11-2	922.8	18.8	3.964	0.647	2.57	113	nd	nd		

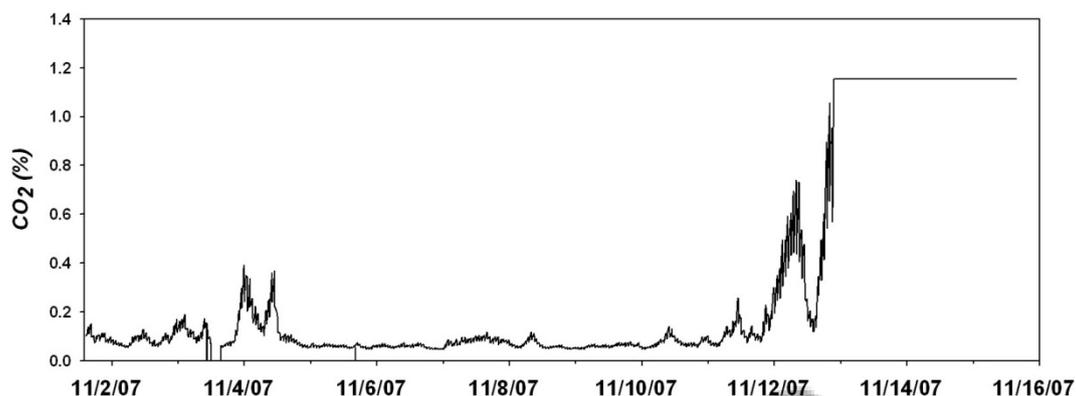
備註：-1 為打穿土壤前通量，-2 為打穿土壤後通量測量

本監測站之分析系統中設定分析時間為每 5 分鐘一筆資料，可 24 小時連續分析。而每經過 1 小時，開啟容器另外兩接口的抽氣幫浦，將容器內部的氣體排出觀測站。經過 11 分鐘，幫浦便停止動作不再抽氣，使得容器內部的氣體可繼續累積。我們利用回歸線得到二氧化碳每分鐘的平均增加量之方法以計算其通量變化。以圖四十的分析數據為例，由於我們設定整點啟動抽氣幫浦將密閉容器中的二氧化碳排出，於是在第五分鐘和第十分鐘所紀錄到的數據是呈現下降的；從第十五分鐘開始累積二氧化碳直到六十分鐘止為一循環。我們利用線性迴歸方式，求得此段時間內二氧化碳增加的回歸方程式，該方程式中的斜率即代表此段時間內二氧化碳的通量。再經過單位換算，我們可以得到國際間常用的通量單位數值（如 $\text{mole/m}^2/\text{day}$ 或 $\text{g/m}^2/\text{day}$ ）。



圖四十 連續分析五小時的土壤氣體濃度變化資料。

經過儀器測試與校正後，本監測站於 2007 年 11 月 1 日開始連續分析；圖四十一顯示由 2007 年 11 月 1 日至 11 月 15 日的土壤二氧化碳濃度連續分析結果。



圖四十一 2007 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果。

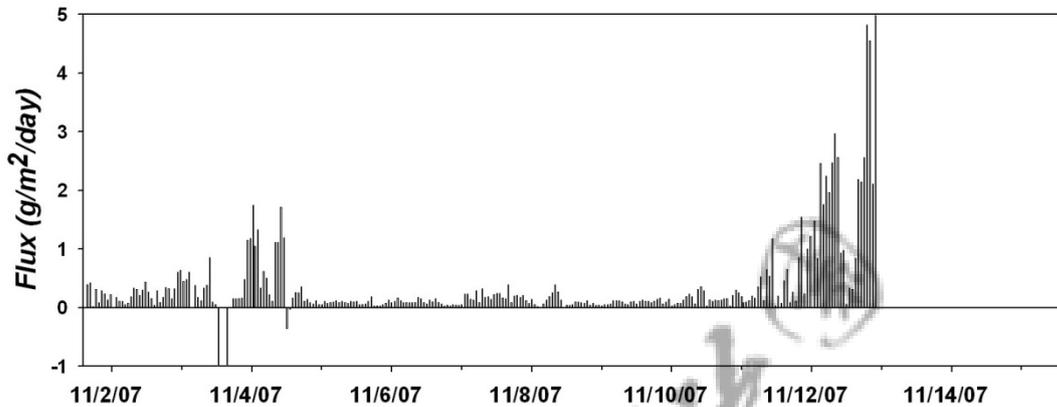
由圖四十一連續分析結果顯示，於此段監測期間，本地區的二氧化碳濃度有非常顯著的變化。其中 2007 年 11 月 4 日、11 月 11 日、與 11 月 12 日有明顯逸氣濃度增加的情形，直至 11 月 12 日晚間，濃度大幅增加，以致於二氧化碳濃度超出儀器偵測極限（1%），而無法分辨其濃度與通量的變化。故而我們於 11 月 16 日趕赴監測站採集容器內的氣體樣品，帶回實驗室分析其成份（表七），結果顯示其二氧化碳濃度約為 2%，與監測站的分析結果（> 1%）相同。

表七 2007 年 11 月 16 日監測站採集氣體樣品之成份

	CH4	N2	O2	H2S	Ar	CO2	SO2	Total
071116-SYK-1	0.00%	76.61%	20.22%	0.14%	0.96%	2.07%	0.00%	100.00%
071116-SYK-2	0.00%	76.68%	20.16%	0.14%	0.94%	1.960%	0.00%	100.00%
SYK 鐵管*	2.13%	4.49%	0.44%	6.26%	0.014%	86.53%	0.04%	100.00%

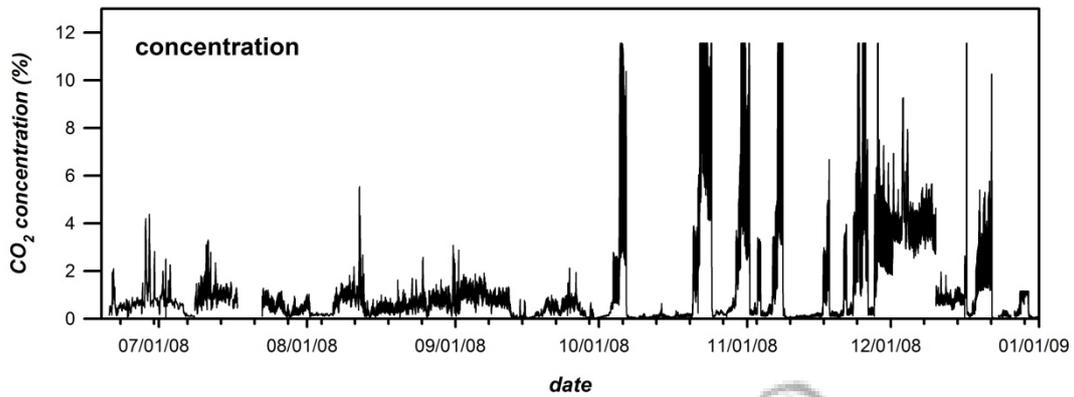
*為設站之前的土壤氣體分析結果

將所有分析的二氧化碳濃度資料，轉換成通量資料（圖四十二），亦顯示出於監測期間有相當大的二氧化碳逸氣通量的變化，其通量由 $-4.00 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 至 $>5 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 。

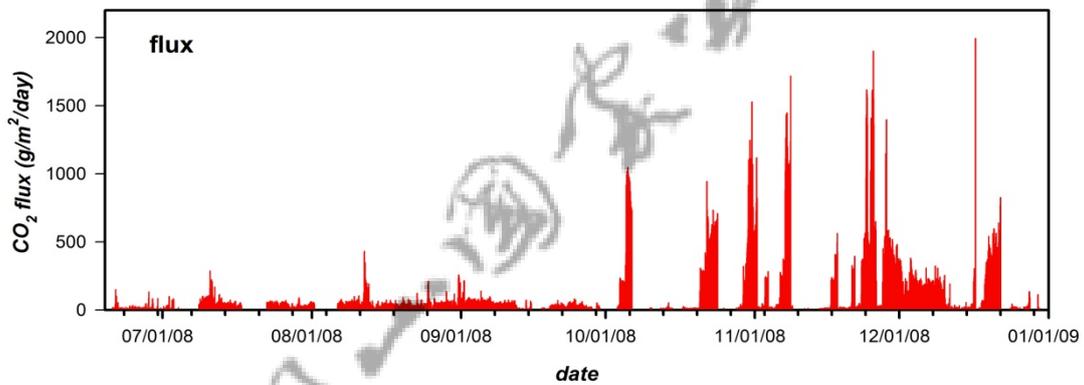


圖四十二 2007 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果。

經觀察發現二氧化碳析儀的偵測範圍太小，常會超出偵測極限而導致無法量測到真正的數值，於是我們決定增設一組偵測上限為 10% 的二氧化碳氣體分析儀。經校正測試後於 2008 年 6 月 21 日放置監測站進行連續分析，每五分鐘連續分析二氧化碳濃度變化。每組分析數據中，我們可以由線性回歸得到二氧化碳每分鐘的平均增加量。為了取得更加精確的數值，我們在監測站中放置兩台不同偵測極限的二氧化碳分析儀，分別為 1% 與 10%。基於靈敏度的關係，當數值低於 1% 時我們採信偵測極限為 1% 儀器的數值；反之若高於 1% 則採信偵測極限為 10% 儀器的數值，加以統整後得到濃度變化(圖四十三)和每小時逸氣通量結果(圖四十四)。

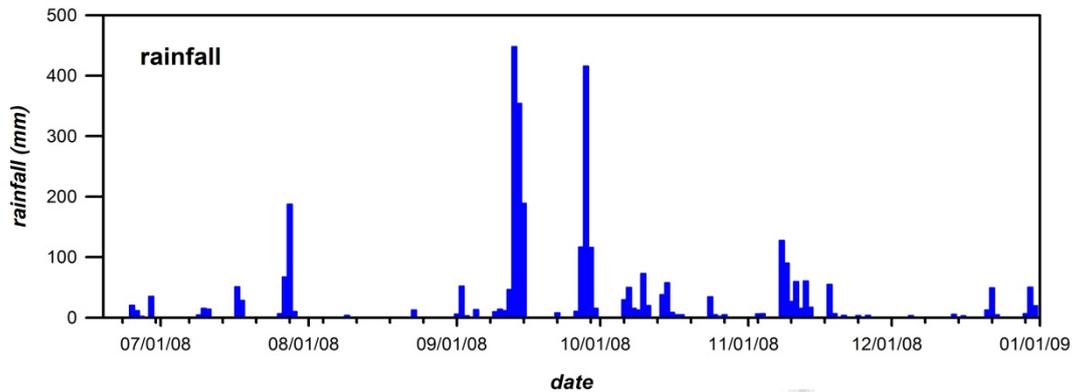


圖四十三 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果。



圖四十四 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果。

監測期間內有許多的颱風侵襲，造成陽明山地區雨量增多。結果顯示，二氧化碳通量與當地的降雨有密切關係，當有驟雨發生時，土壤氣通量明顯降低。顯示因降雨會使得土壤滲透度（孔隙度）降低，造成逸氣通道不順暢，使得逸氣通量明顯降低。

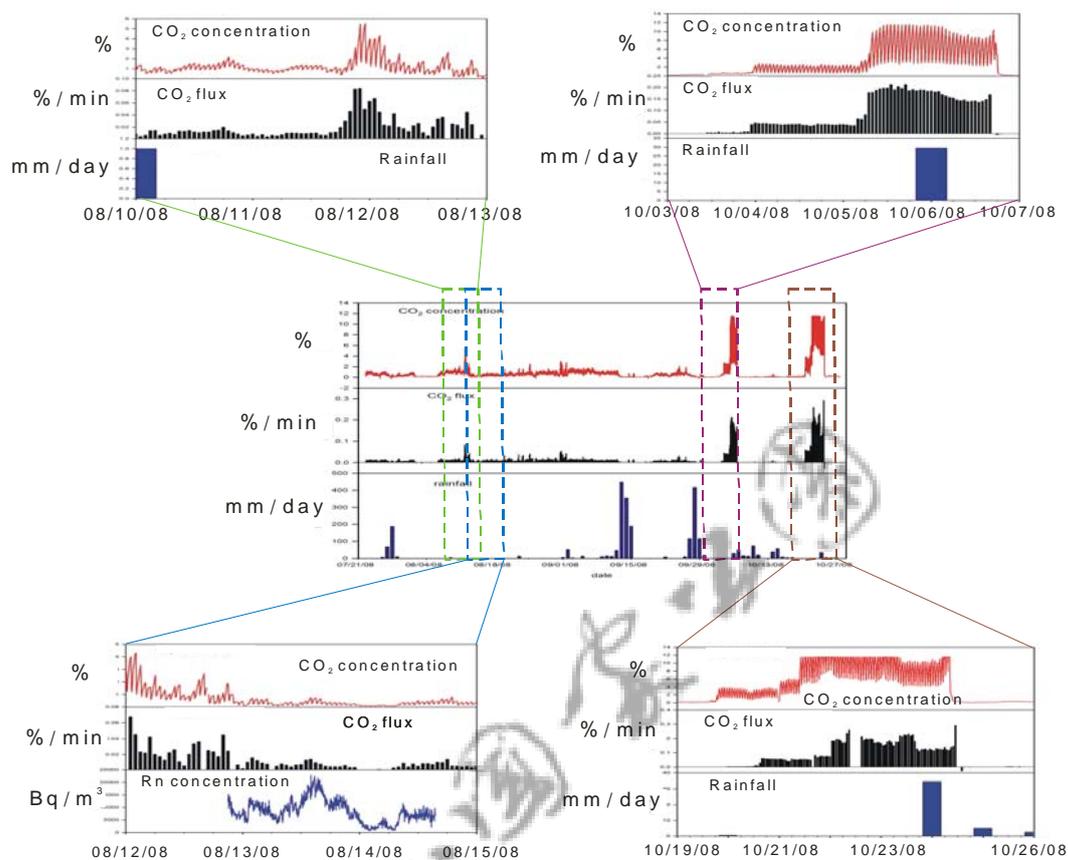


圖四十五 2008 年連續分析土壤氣體二氧化碳期間之雨量變化。

由圖四十四分析結果顯示，2008 年監測期間有三個時段二氧化碳濃度顯示較為異常。如圖四十六示，8 月 10 日至 8 月 13 日，10 月 3 日至 10 月 7 日，以及 10 月 19 日至 10 月 26 日，且未受雨量影響。其中以 10 月 20 日至 26 日時段中，在 10 月 25 日和 10 月 28 日在台北各有一起震度為 1 的地震，但在 10 月 26 日當天的雨量也不小，在雙重的影響下無法確認此異常的氣體通量是否只受到地震的影響。需要藉由微震資料加以釐清當時是否為漿庫活動的訊號。

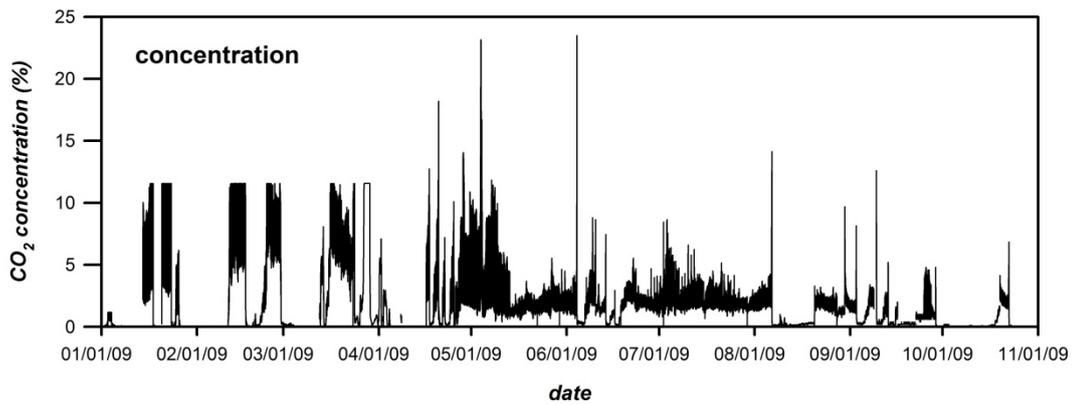
在 2008 年 8 月 13 日，我們嘗試將氬氣分析儀放進監測站測試，所顯示的結果氬氣與二氧化碳的濃度變化有著相當好的關係，這也證明著二氧化碳是氬氣自土壤向上逸氣的攜行載氣。不過因監測站土壤氣中含硫化氫導致儀器易被腐蝕損毀，致只能收集到有限的氬氣資料，有待以後加以改善儀器設置。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查

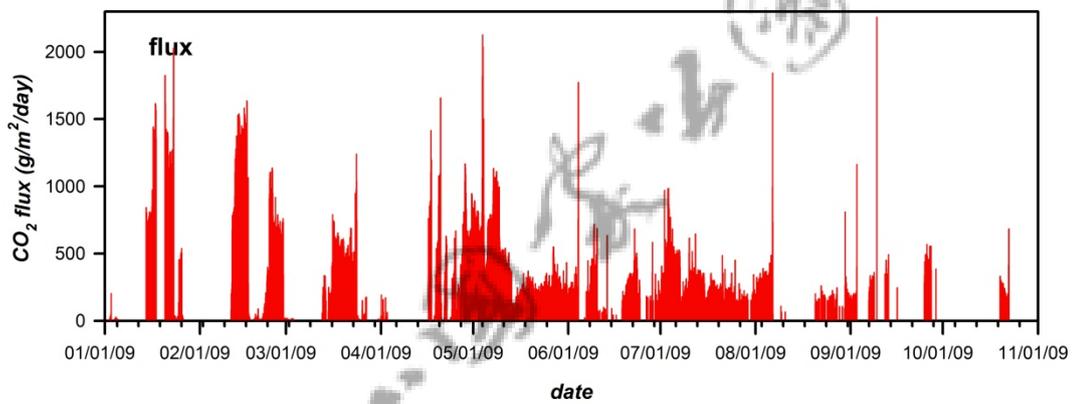


圖四十六 2008 年連續監測期間出現異常高值時段以及氡氣測量時段。

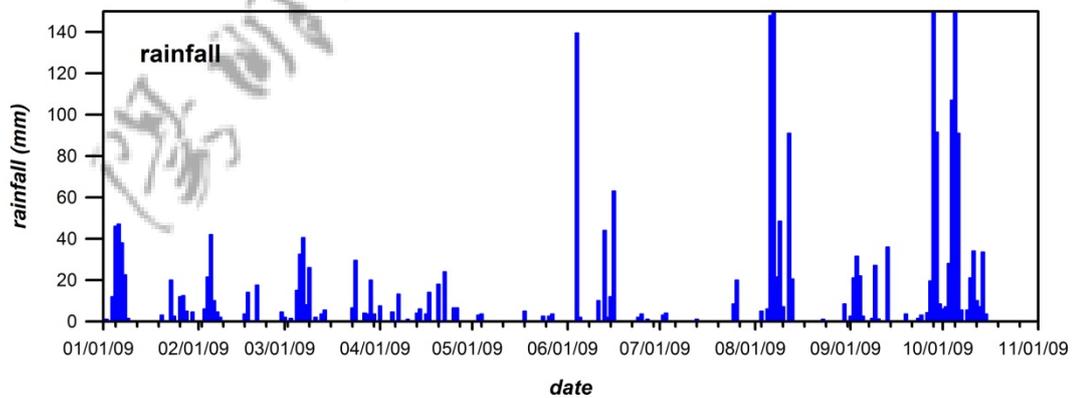
自 2008 年 10 月起陸續發生二氧化碳超出偵測極限的現象，不但使得我們無法紀錄到切確的數值而導致無法計算其通量；更意味著小油坑地區土壤中的二氧化碳逸氣量大，於是我們決定擴大二氧化碳分析儀的偵測極限至 30% 以達較精確與完整的數值記錄。分析儀在經過測試與校正後，在 2009 年 4 月 22 日放置監測站並開始連續分析至現今。圖四十七顯示由 2009 年 1 月 1 日至 2009 年 10 月 23 日的土壤二氧化碳濃度連續分析結果。



圖四十七 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳濃度變化結果。

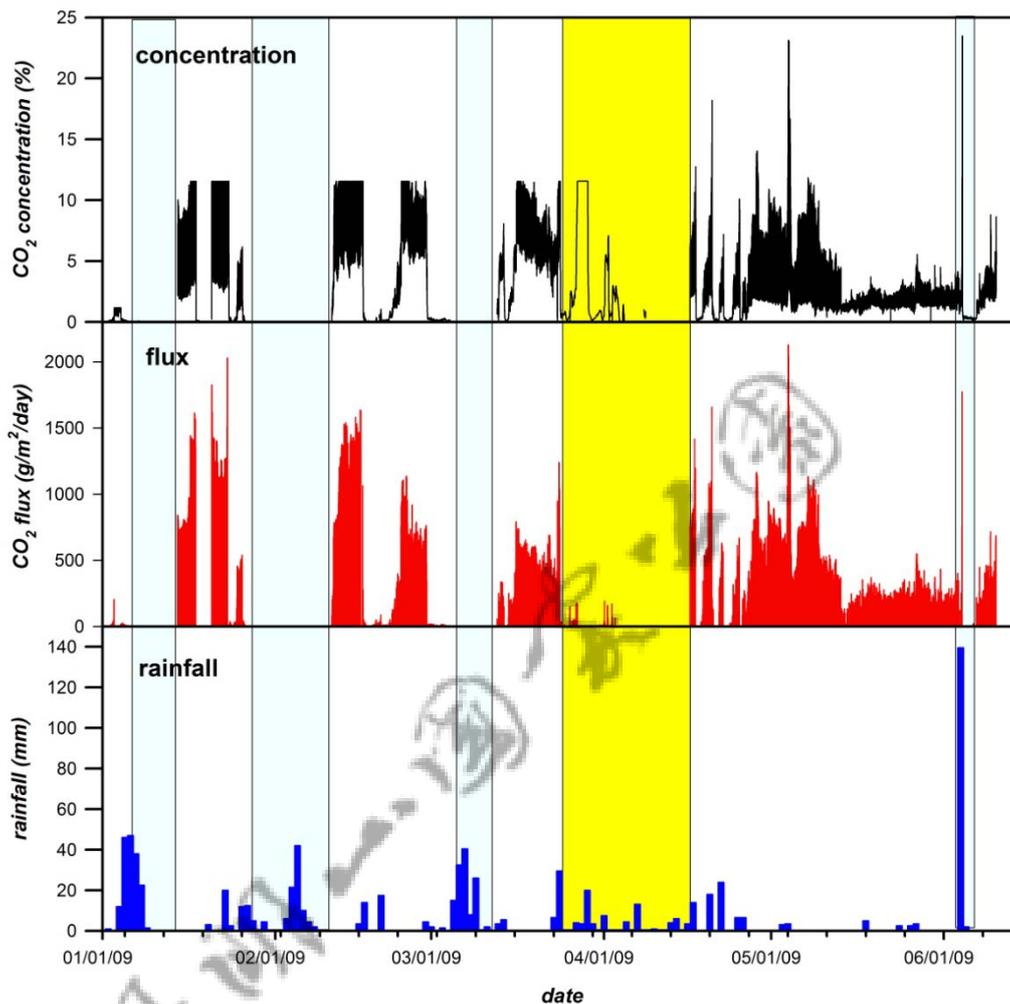


圖四十八 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量結果。



圖四十九 2009 年連續分析土壤氣體二氧化碳期間之雨量變化。

當二氧化碳濃度過低或是氣量小的時候，分析儀將無法測量其濃度值因而導致監測資料的中斷。為了探究二氧化碳濃度以及逸氣量降低的原因，我們將竹子湖氣象站的雨量資料與二氧化碳通量加以比對(圖五十)，結果發現沒有濃度資料的時段皆有雨量的記錄，如圖五十中藍色底圖區間，藉而推論本監測站的二氧化碳逸氣與雨量間呈負相關。



圖五十 2009 年連續分析土壤氣體通量和雨量結果。

圖五十中的黃色底圖區間沒有數據是因為儀器故障而造成資料中斷，並非土壤逸氣停止。2009 年 3 月 24 日至 2009 年 4 月 9 日，兩台二氧化碳分析儀所記錄到的數值出現不一致的現象。偵測極限為 10% 的分析儀記錄到極低趨近於零的濃度，而偵測極限為 1% 的分析儀卻記錄到大於 1% 的濃度。在持續追蹤觀察下，發現是偵測極限為 10% 的分析儀故障了，於是在這段期間所記錄到的資料並非全部皆可使用，經過仔細的比對篩選後我們只保留些許可性的資料進行通量的換算。2009 年 4 月 9 日至 2009 年 4 月 22 日，此期間監測站內設置每小時將氣密罩中的氣體抽離並排出監測站的抽氣幫浦發生故障；故這段期間的數據皆無法進行二氧化碳通量的計算導致資料中

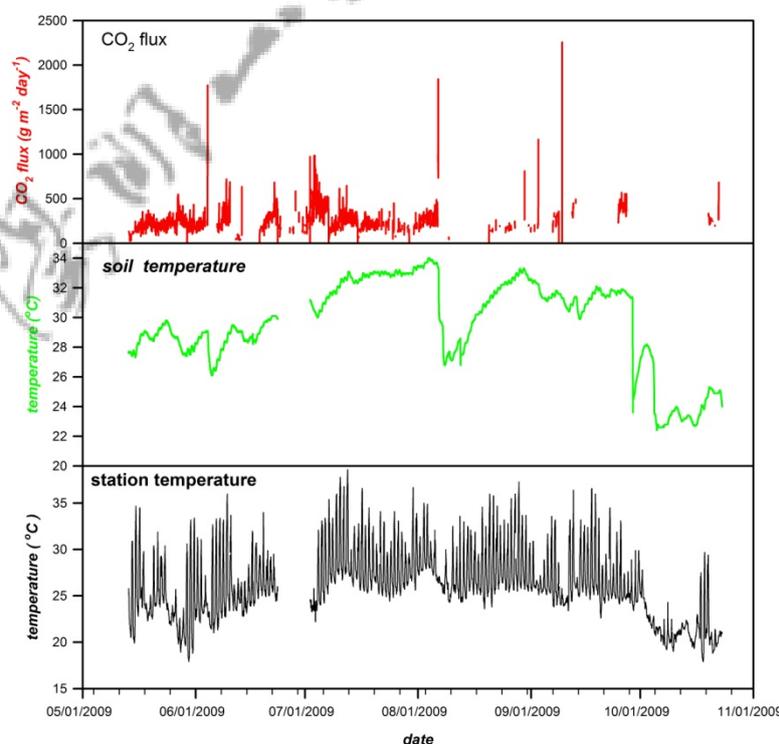
斷。經過處理後，我們在 2009 年 4 月 22 日將抽氣幫浦送回監測站繼續運作，於是我們的資料又可以重新連續記錄。

2009 年 10 月 1 日 例行性的到測站下載資料並採集氣體樣本，我們使用預先抽真空的玻璃瓶收集氣體樣本，利用手動幫浦將土壤氣體強制從土壤中順沿鐵桿抽至地表面進行氣體樣本採集，在採樣的過程中發現桿內沒有任何氣體故無法採樣，同時也沒有抽到水，可初步排除鐵桿受到水的阻塞而使氣體無法逸散至地表。相同的狀況也發生在 2009 年 10 月 9 日，我們再次無法進行氣體的採集，從下載的資料發現自 2009 年 10 月 1 日起至 2009 年 10 月 9 日二氧化碳濃度皆顯示為 0，這意味著這段期間氣體逸散至地表的含量和濃度都很低，低到無法偵測或是氣體被不明物質堵塞而無法逸散至地表。由於無法得知此狀況是否屬正常自然狀態，故我們決定再觀察一陣子再作處理，以免破壞真實的逸氣環境並決定若下次仍無法採樣我們將用細桿清除鐵桿內部堵塞物。2009 年 10 月 19 日雖然可以採集樣本但氣體流動不像以往順暢，於是我們還是利用細桿將鐵桿內部堵塞物疏通以恢復其順暢通道供氣體上升至地表。發現鐵桿內部有黑色泥狀物質存在，故加深了前陣子氣體濃度低是因為氣體通道被黑色泥狀物質堵塞而無法逸散至地表的可能性。參考中央氣象局的雨量資料發現自九月底至十月中大屯山地區一直都在下雨，甚至出現豪大雨和大雨。由土壤溫度資料顯示，2009 年 9 月 28 日土壤溫度開始急速下降，降至量測以來的最低溫(22.4°C)但不太可能是受天氣的影響而使土壤溫度在一天內下降 6°C 之多；推測是有一溫度較低的流體存在土壤的孔隙中，而使得土壤逐漸冷卻降溫。根據雨量和土壤溫度資料推測當時因瞬間降雨量過大，無法立即將水排出於是開始累積在土壤的孔隙中，造成水面上升同時伴隨著黑色泥狀物進入鐵桿中。當水褪散後，黑色泥狀物質卻依舊殘留在鐵桿內阻礙氣體的向上逸散。

2009 年 10 月 22 日二氧化碳濃度明顯升高，同一天雨量紀錄高達 73 公厘和土壤溫度出現下降的趨勢，初步判定是受到雨量的影響，雨水向下滲透將氣體向上排擠於是我們量測到將高的二氧化碳濃度以及逸氣通量

為了更加清楚了解到二氧化碳濃度與逸氣量受環境因子影響程度，我們

在監測站中加裝了土壤溫度計。此裝置可同時紀錄室內溫度以及土壤溫度，土壤溫度是利用長十公分的探針插入土壤所量測到的。初步結果在圖五十一顯示，室內溫度有日夜變化的現象且溫度趨勢與土壤溫度相似。將二氧化碳逸氣通量與土壤溫度作比較發現他們之間有相似的趨勢，當溫度升高時逸氣通量也增加。最有可能的解釋為，當地底的火山岩體活動時，所釋放出的二氧化碳會較平時增多也會較快速的逸散至大氣，且因為上升的速度較快所以熱量較不易損失故地表的溫度也會較高。在監測的期間出現三次逸氣通量異常高值依序為 2009 年 6 月 4 日、2009 年 8 月 6 日以及 2009 年 9 月 9 日，當逸氣量達到該區間的相對高值時，隨後立即下降甚至無法計算；同時其土壤溫度也有相同的型態達到同一區間的相對高值且隨後立刻下降。此種情況可能是受到雨量的影響而造成的，在短時間內雨量激增，無法快速排除於是向下滲透累積存在於土壤孔隙中。雨水的溫度較低，且大量存在於土壤最終使得土壤溫度下降



圖五十一 2009 年連續測量土壤溫度結果。

第二節 地殼變形

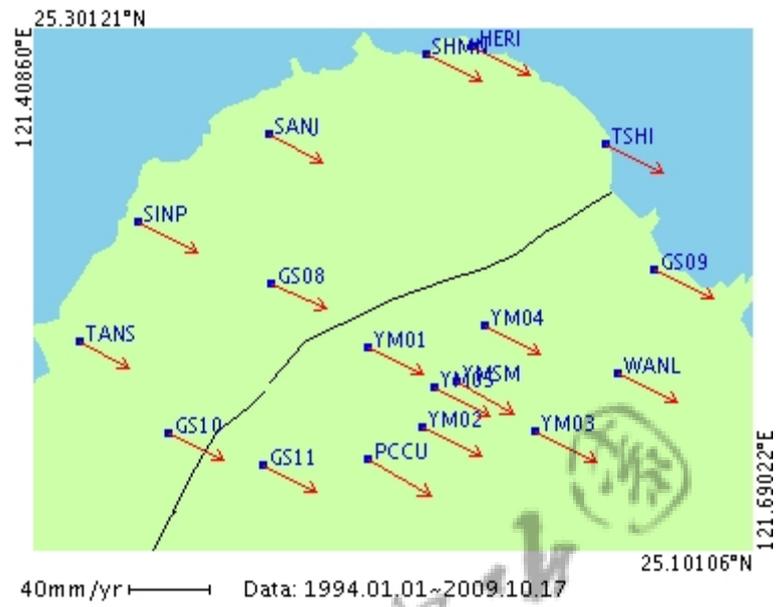
利用大屯山地區五個地殼變形監測站(YM01 – YM05)，來監測陽明山國家公園內之大屯火山地區之地殼變形。大屯山地區與台灣北部地區，過去十年來每年之平均地殼變形之速度大約以 2 到 3 公分左右向東南方向移動(圖五十二)，此變形速度值是相對於球坐標反應歐亞板塊在台灣地區之運動方向。大屯山地區五個地殼變形監測站觀測之結果在水平地殼變形長期速度非常相似(圖五十三)，垂直地殼變化一般均很小(圖五十四)。每一測站之地殼變形監測結果可由圖五十五至五十八中迴歸直線來獲得。

為了進一步了解每一地殼變形監測站，過去三年內(2007 至 2009)之水平及垂直變化關係，分別於圖六十至六十五表示。基本上地殼變形大致相同，唯獨值得注意是 2009 年在 YM04 測站之垂直地殼變形有明顯的抬升現象，大約為每年 1 至 2 公分左右，這是否與水準測量於擎天崗路徑之結果有關係(圖六十六至六十七)，仍有待進一步追蹤分析。但這些結果均說明大屯山地區地殼隨時間仍有些局部性之地殼變形。

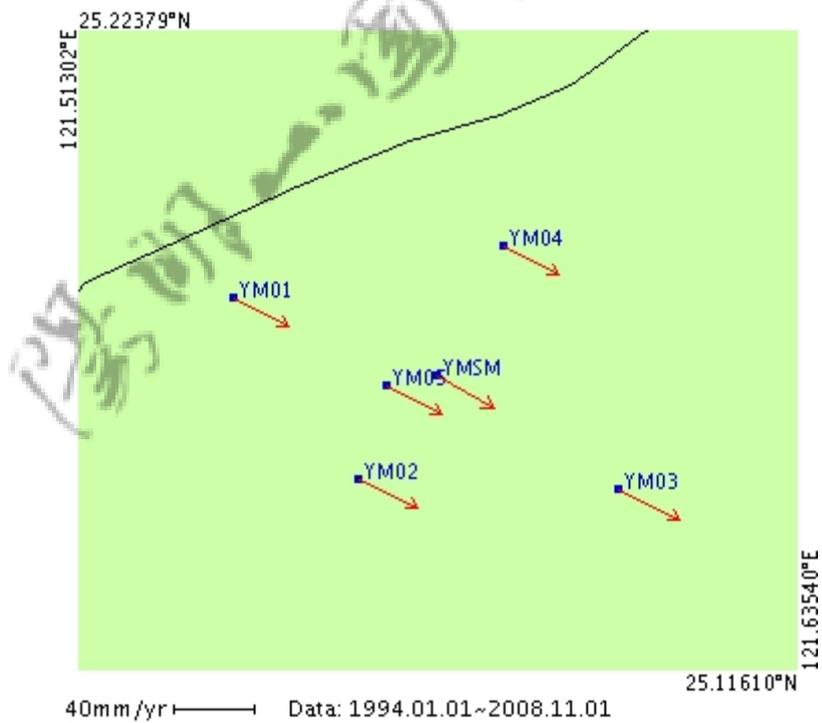
除此之外，每一測站並發現有些地殼變形監測站隨時間之有明顯之變化，可能解釋之原因可包括：季節性之變化，地震活動度有關(圖六十八至六十九)，或其他未知之因素，均有待進一步監測與分析。

雖然目前結果已有些探討之價值，但必須更長期之監測，方能有更可靠之科學意義，故建議政府相關部門與學術單位，能持續進行長期觀測與分析研究，以達火山活動評估與規劃可能災害之準備與應變對策。

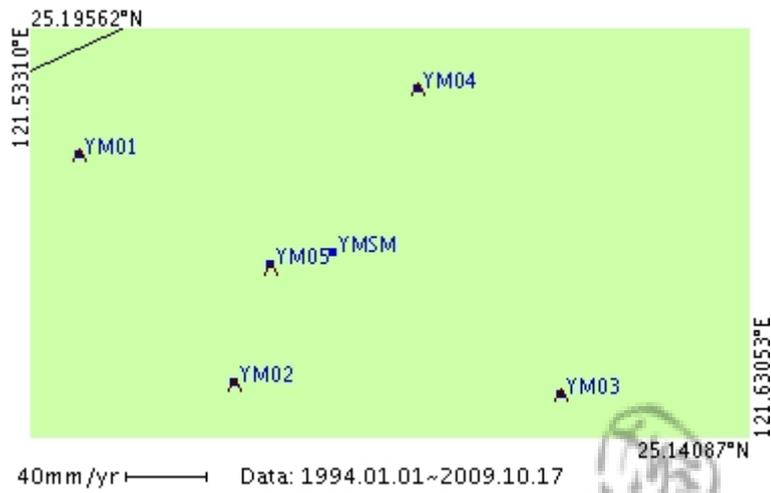
大屯火山群土壤氣體之觀測調查



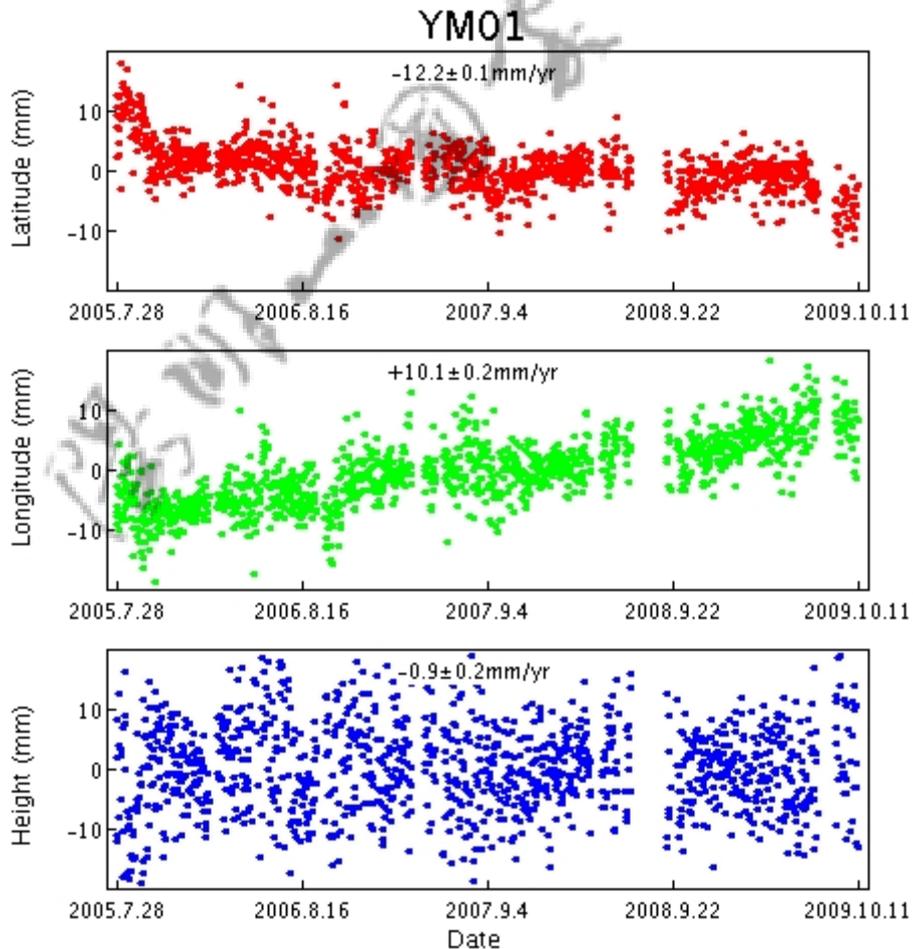
圖五十二 台灣北部地區地殼水平變形每年之平均速度。



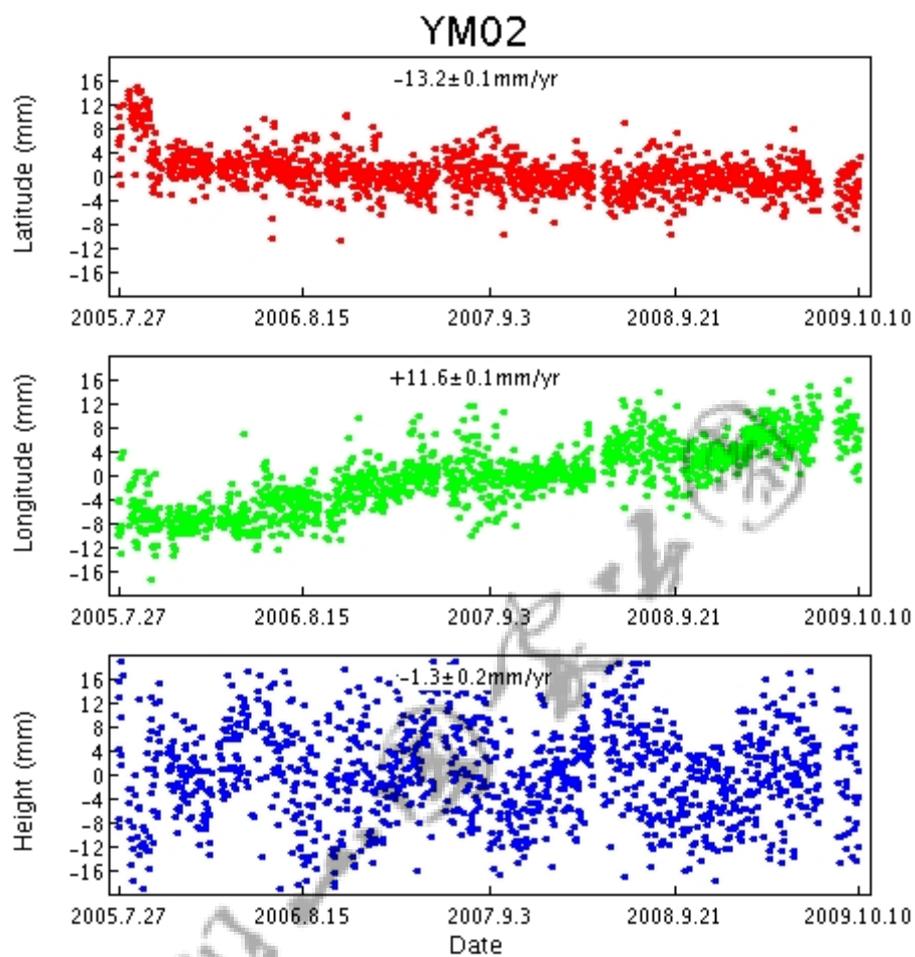
圖五十三 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼水平變形每年之平均速度。



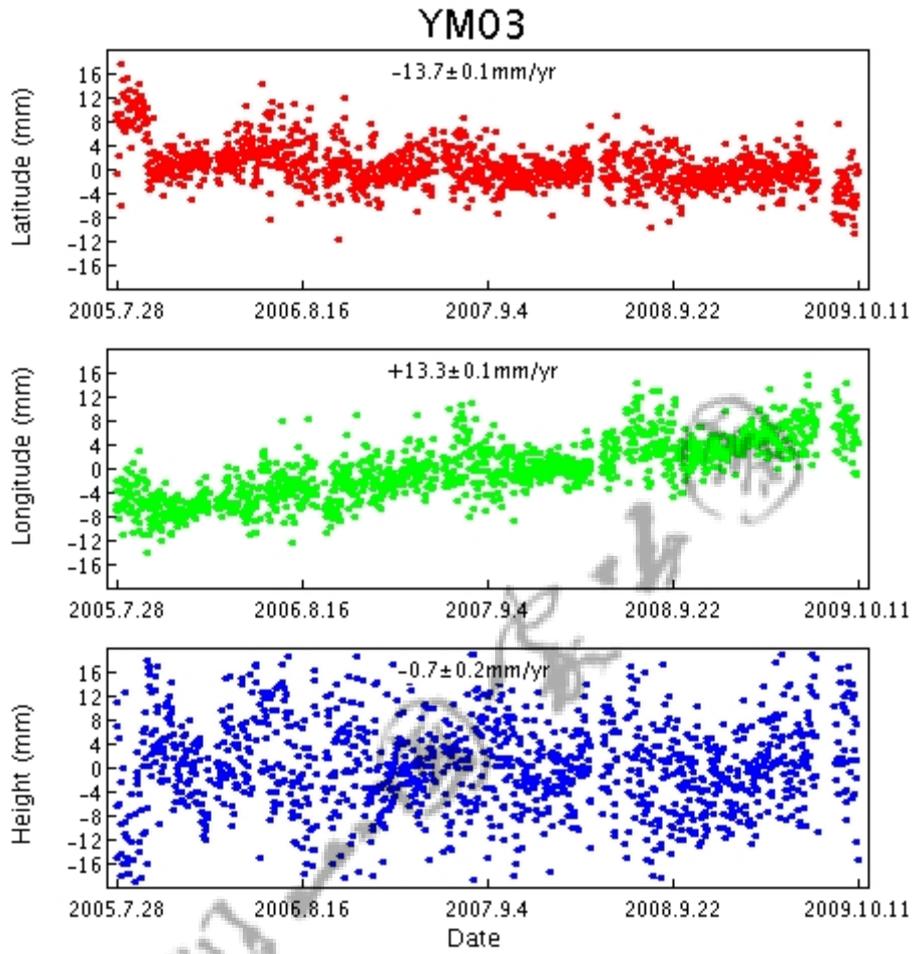
圖五十四 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼垂直變形每年之平均速度。



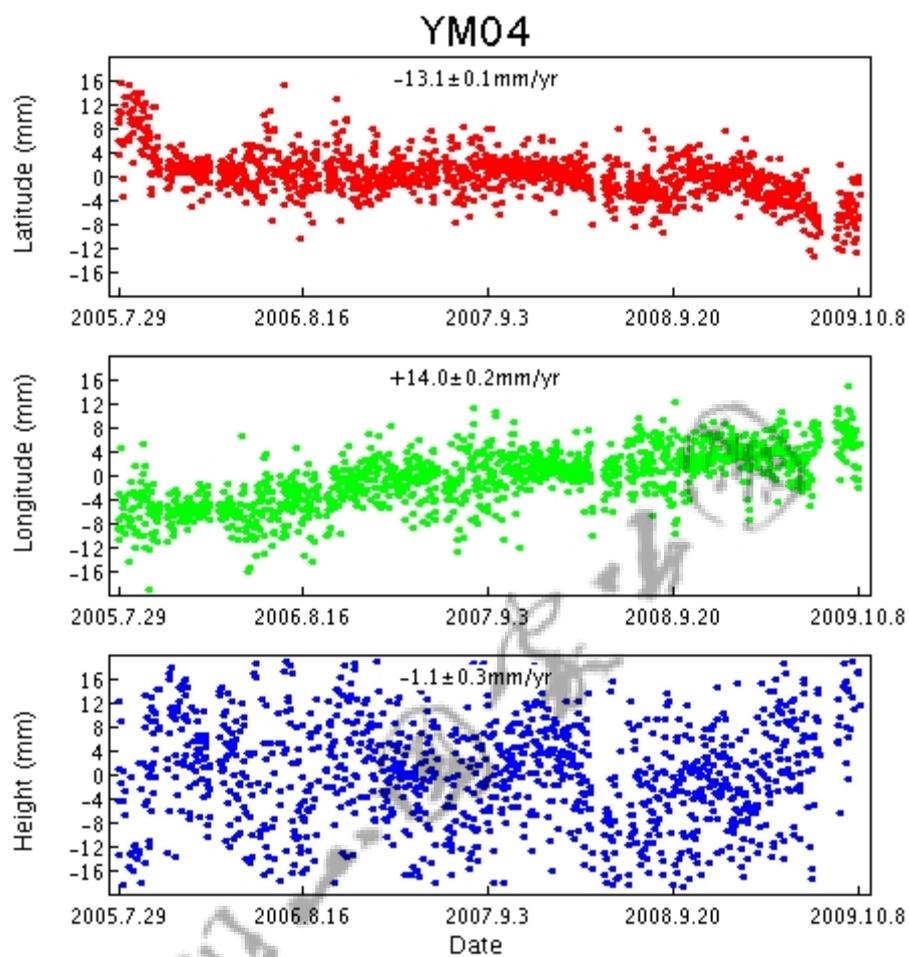
圖五十五 大屯山地區 GPS 觀測站(YM01)位置隨時間變化情況。



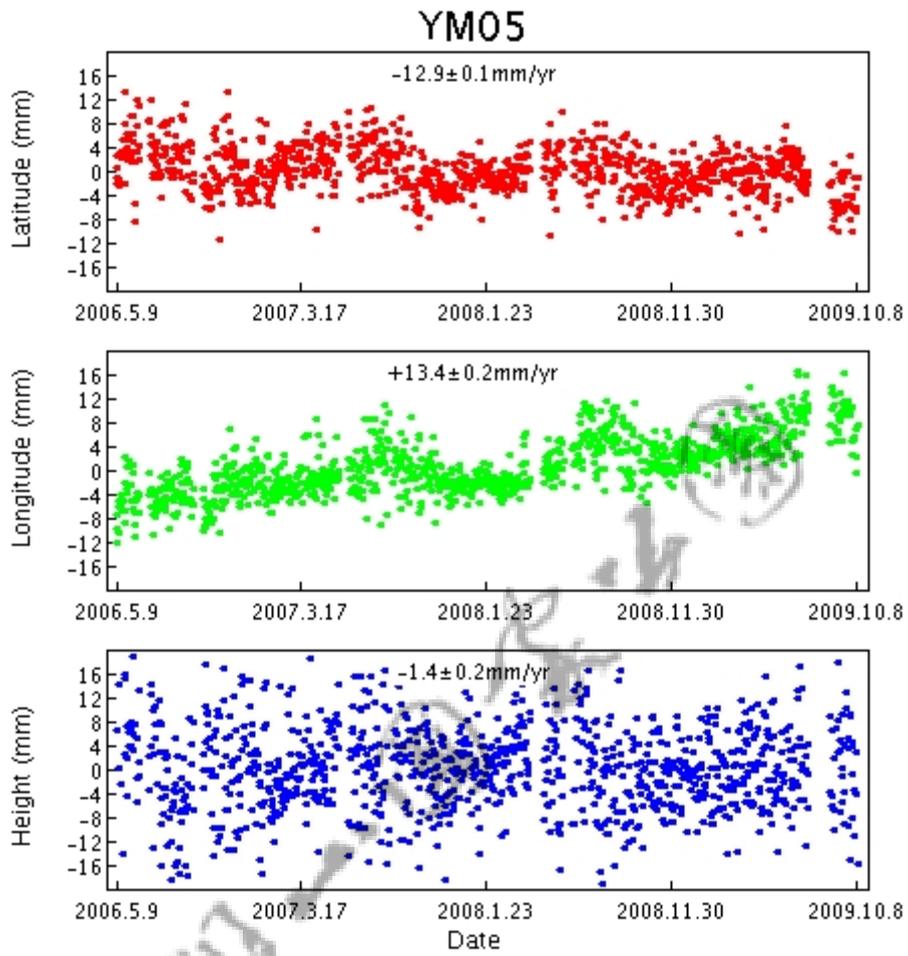
圖五十六 大屯山地區 GPS 觀測站(YM02)位置隨時間變化情況。



圖五十七 大屯山地區 GPS 觀測站(YM03)位置隨時間變化情況。

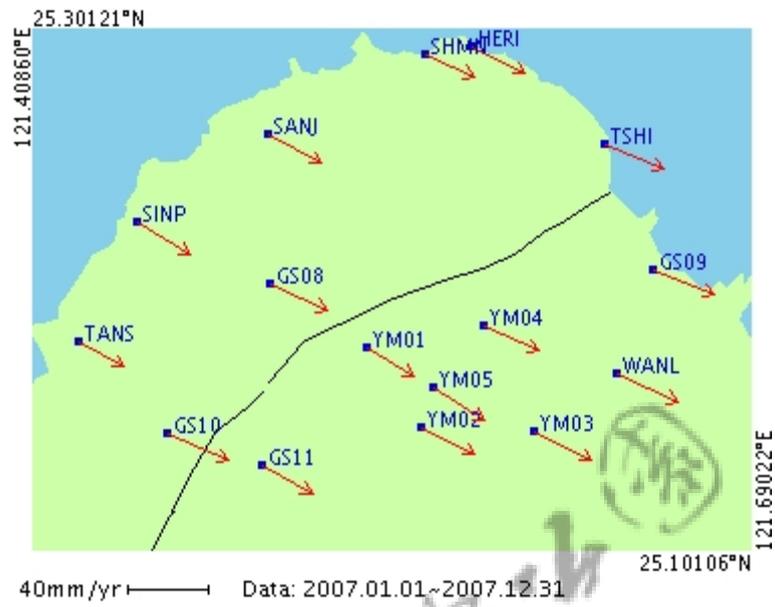


圖五十八 大屯山地區 GPS 觀測站(YM04)位置隨時間變化情況。

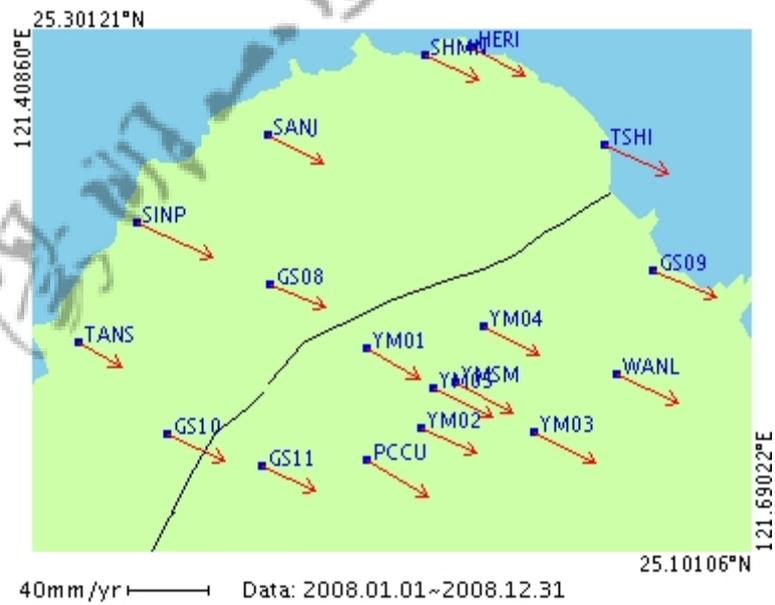


圖五十九 大屯山地區 GPS 觀測站(YM05)位置隨時間變化情況。

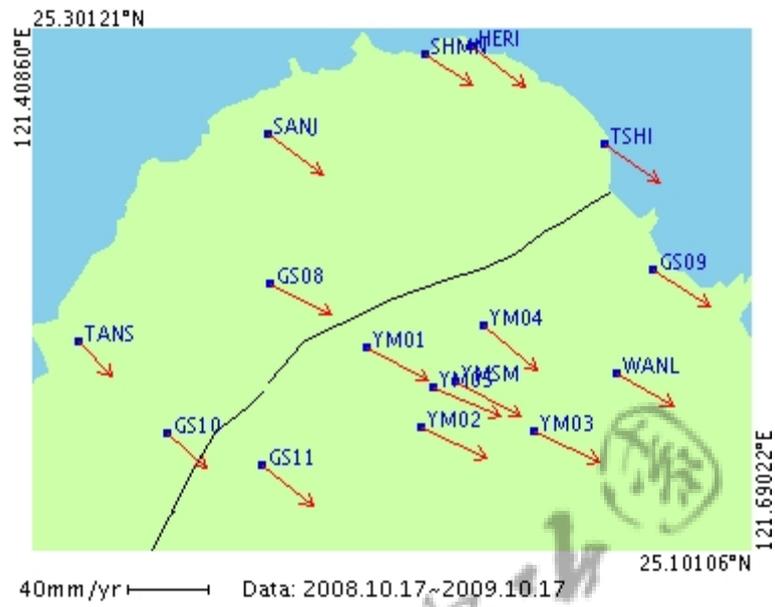
大屯火山群土壤氣體之觀測調查



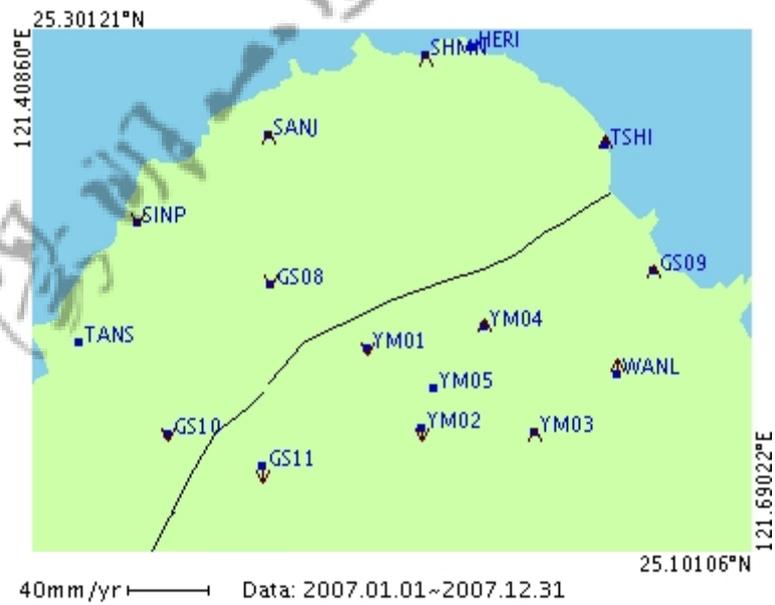
圖六十 民國九十六年大屯山地區水平向平均速度分布。



圖六十一 民國九十七年大屯山地區水平向平均速度分布。

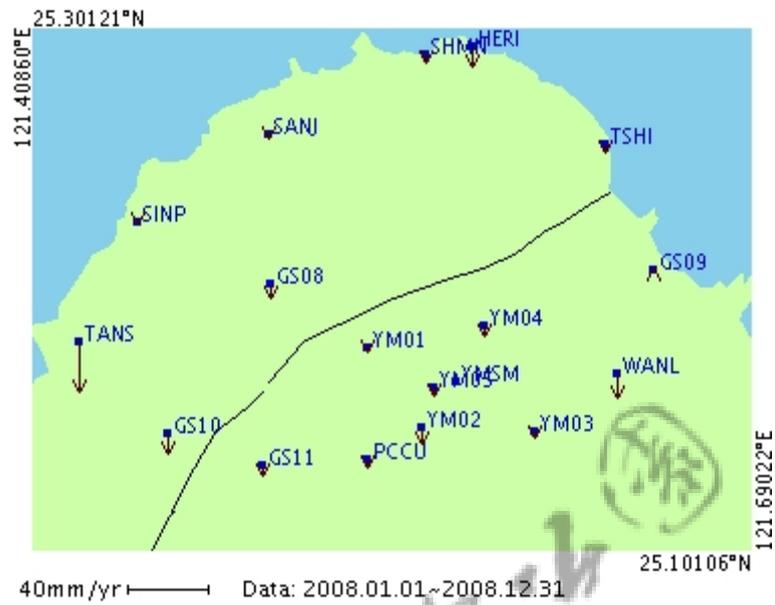


圖六十二 民國九十八年大屯山地區水平向平均速度分布。

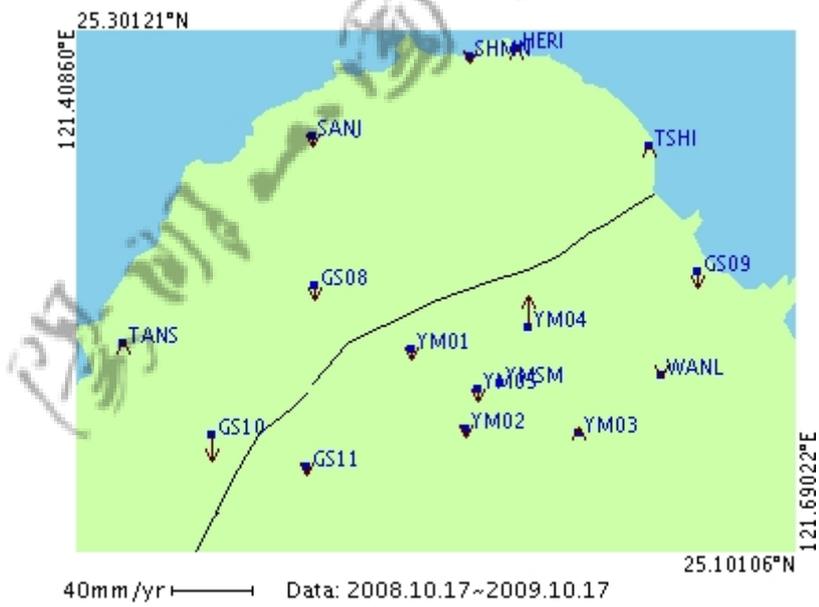


圖六十三 民國九十六年大屯山地區垂直向平均速度分布。

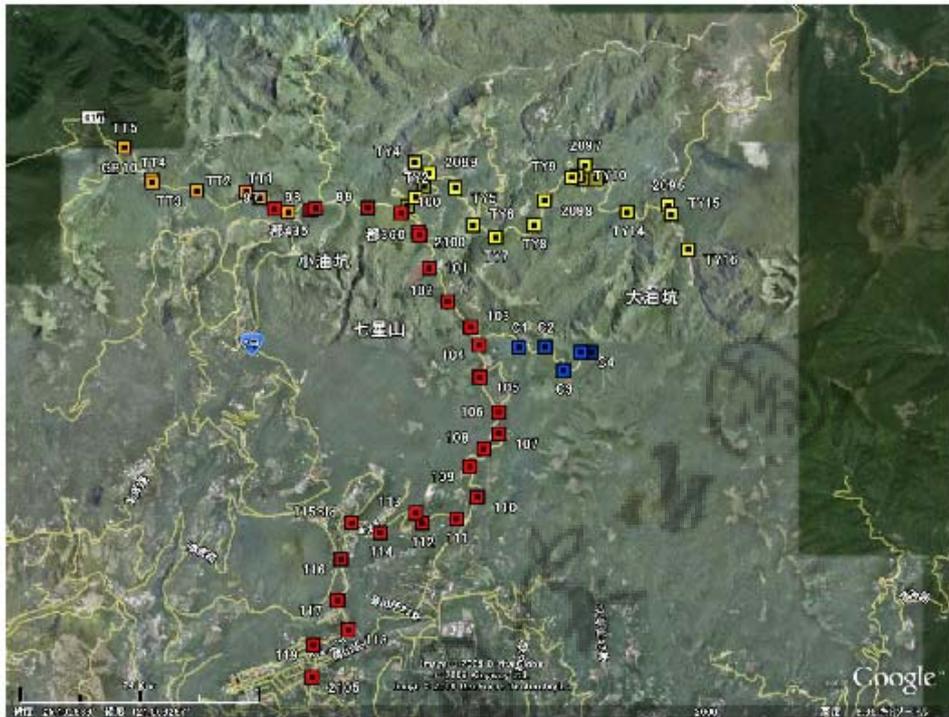
大屯火山群土壤氣體之觀測調查



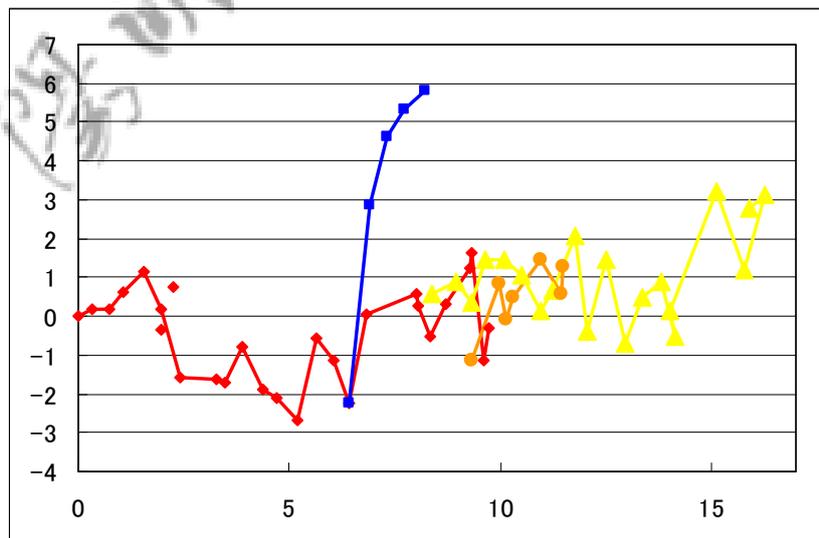
圖六十四 民國九十七年大屯山地區垂直向平均速度分布。



圖六十五 民國九十八年大屯山地區垂直向平均速度分布。

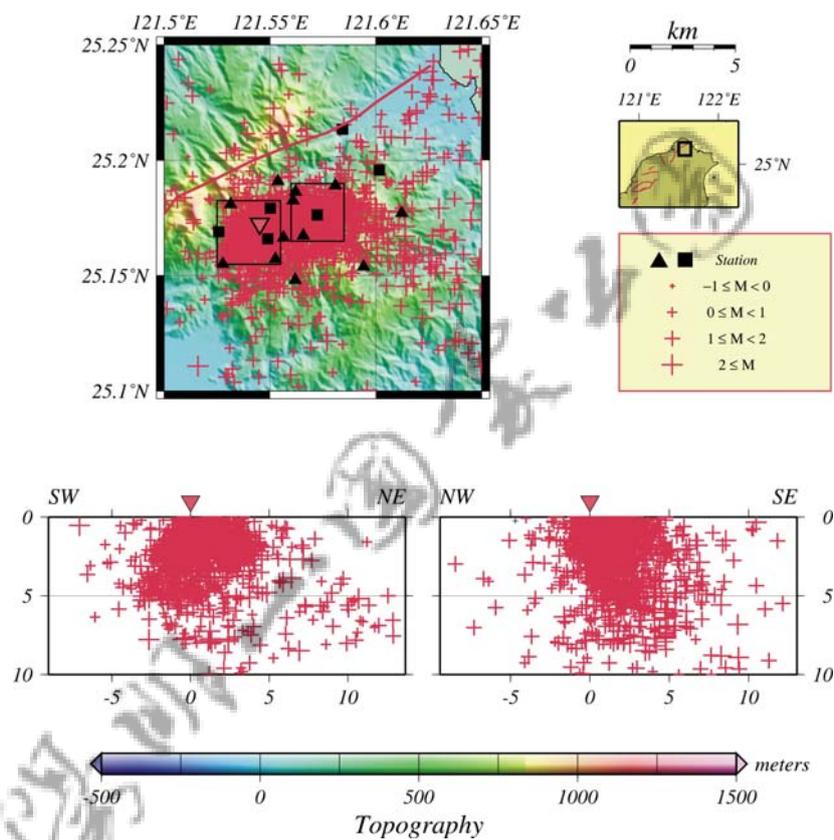


圖六十六 大屯火山地區從 2007/8 至 2009/3 期間水準測量路徑分布圖。

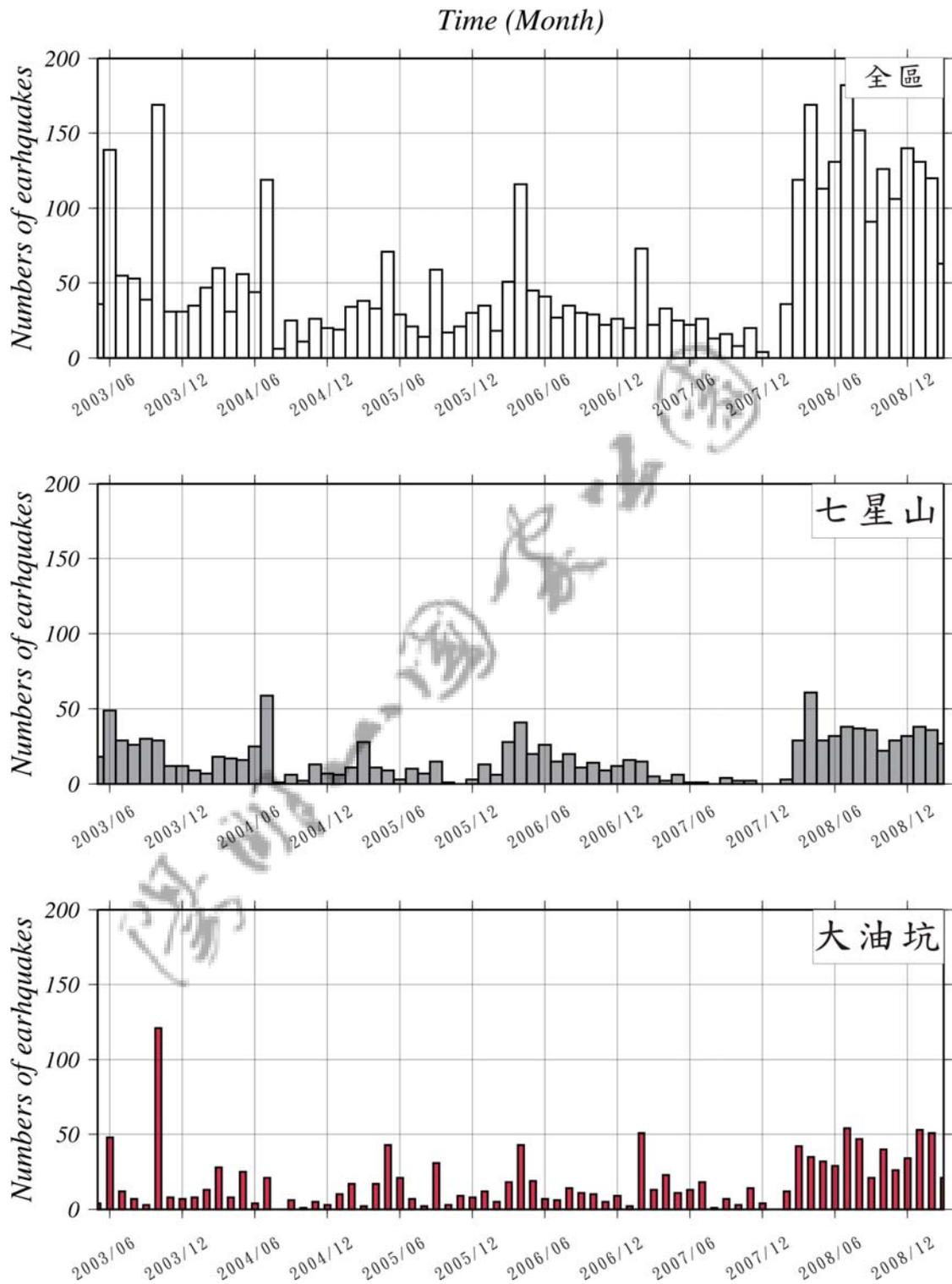


圖六十七 大屯火山地區從 2007/8 至 2009/3 期間水準測量之結果，不同顏色相對應於圖六十六中之路徑。

大屯火山群土壤氣體之觀測調查



圖六十八 大屯山地區過去數年中之微震活動分布。



圖六十九 大屯山地區過去數年之每個月微震個數統計分布。

第三節 大地電磁

大地電磁逆推後的最佳模型理論值符合大部分觀測之TM和TE模式資料亦分別示於圖七十與圖七十一。從七星山到大油坑之地表下，東西向之二維電性構造剖面(圖七十三左)，在10公里深度內，大至呈現背斜之構造，亦即中央高區(測點4與5間，約在冷水坑附近)向周圍傾斜之構造，電性地層呈層狀分佈，大致可分成三層，由淺而深依序為小於25 ohm-m之表層，介於25-250 ohm-m之電阻率層以及高於250 ohm-m 之深部層。表層係良導體(電阻率 < 25 ohm-m)，厚約500 m，東西延伸至少 2 km，而南北約為 1.5 km (圖七十二右)。配合地表之噴氣、熱泉、微震等熱水活動現象推斷，此地表岩層屬良導體之主要原因可能是火山之熱水對流所致，進一步從此低阻層之電性結構均質現象也可以合理的推論，此 500 m厚之岩層之孔隙率相當高。

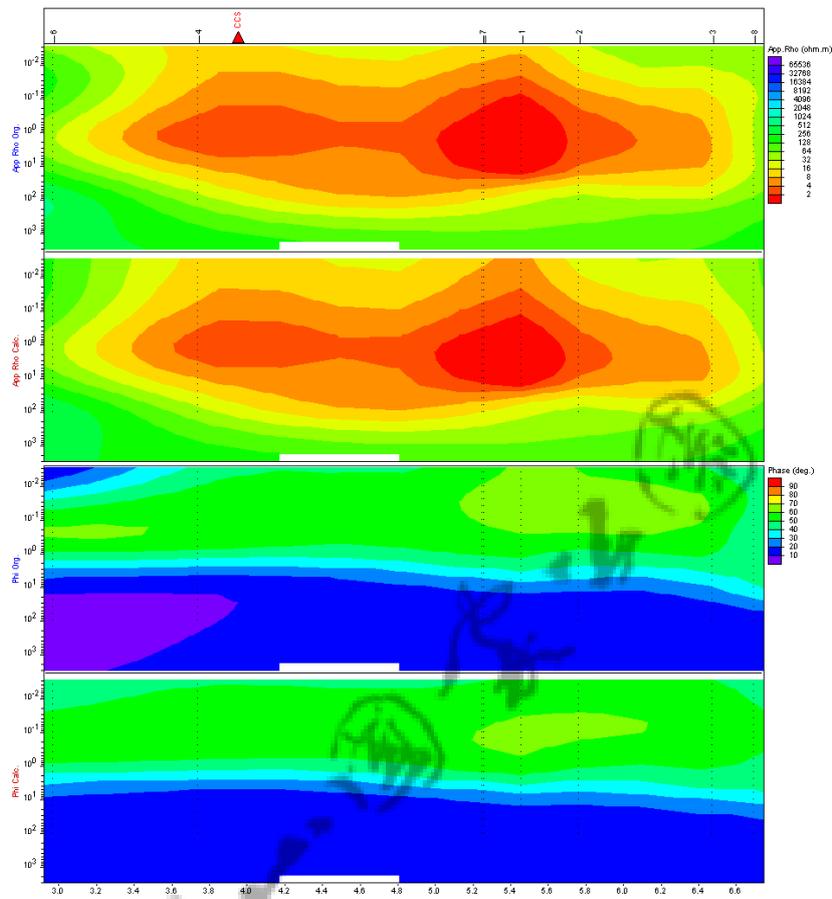
在表層下2 至5 Km處是微震活動密集帶，該處之電阻率較表層為高，可能反應該處之岩層含水量較小、或含氣量較高、或岩層結構較緻密等等因素，從微震活動密集研判，該處應屬於較緻密岩層結構。一般微震之來源與發生機制，可以用岩層裂縫內液體或氣體，因壓力突增或突減所造成之震動來解釋，由於該處之電阻率較高，推論可能以氣體壓力造成之震動為主。

在地下約 6 Km 深處，發現一高電阻區(電阻率 > 250 ohm-m)，東西寬約 2 Km，向下延伸 10 Km 以下，從其形貌近似球狀判斷，有可能屬於岩漿庫構造，再從其偏高之電阻值研判，岩漿庫可能屬於冷卻中之岩漿，否則岩漿之高溫應呈現極低電阻反應。值得一提的是，測線東西兩端之電性地層構造，由於缺乏地表之測點控制，屬外差之結果，尚不足以解釋大油坑以及七星山之構造細節。

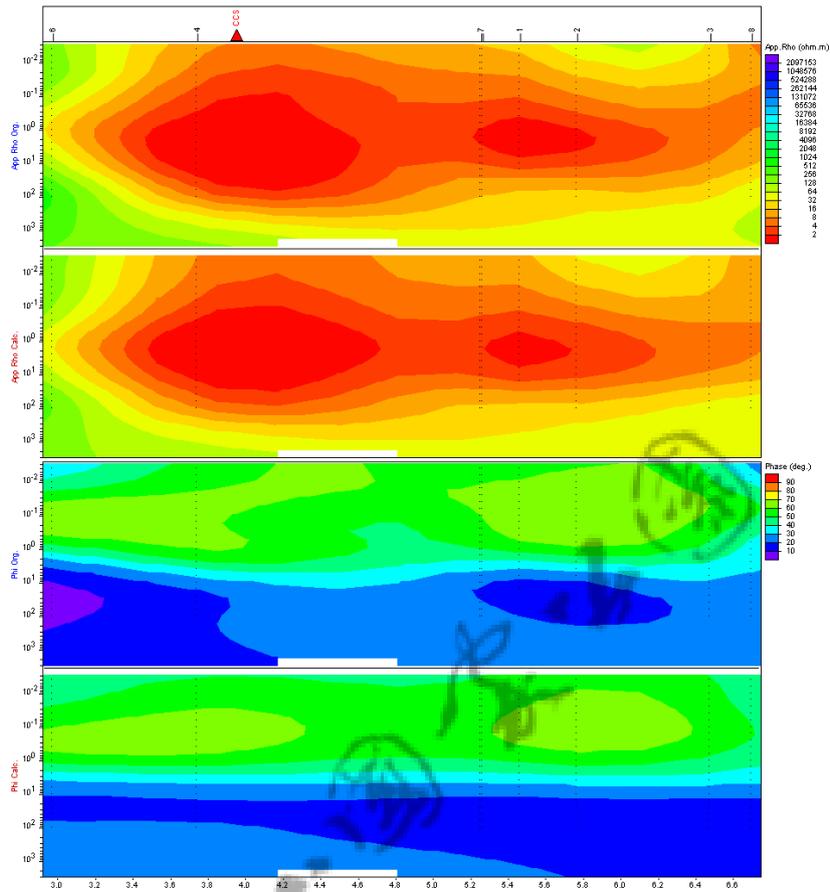
七星山下南北向之二維電性構造剖面與東西向構造類似，說明了深部隆起構造係一3D構造，但是主要之不同點有二：(1)隆起構造在七星山處較接近地表，此態勢亦說明了七星山地區之微震震源深度小於大油坑附近震源深度之關測結果，推測兩地屬於同一震源機制。(2)隆起構造之南北向(2 Km)較東西向(1.5 Km)

為長，推測可能是長期受到來自東側之大地應力推擠所致。根據大地電磁法資料分析，深度6公里下有一冷卻中岩漿庫，則此岩漿庫將逐漸死亡，大屯火山群將不是活火山，但是台灣北部因碰撞作用所生成的造山崩解張裂活動亦逐步加強發育當中(Wang et al., 1999)，張裂活動隨時有可能提供充分管道給岩漿噴發至地表，大地電磁法資料並未完成排除此可能，因此，七星山地區觀測到類似岩漿相關活動，如噴氣、微震活動等，大屯火山群持續進一步監測有其必要。

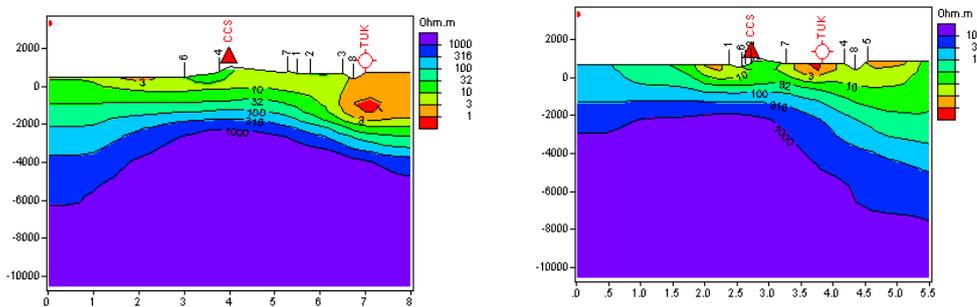




圖七十 東西向剖面(圖二十八)TM 模式電阻率觀測值與其二維逆推(圖七十二)後之比較。由上而下依序為觀測視電阻率、圖二十三視電阻率、觀測相角和圖二十三相角圖。當觀測圖與逆推圖越接近時，逆推結果越可靠。各圖之縱軸為週期(s)，橫軸表距離(km)，資料點為黑色。



圖七十一 東西向剖面(圖二十八)TE 模式電阻率觀測值與其二維逆推(圖七十二)後之比較。由上而下依序為觀測視電阻率、圖二十三視電阻率、觀測相角和圖二十三相角圖。當觀測圖與逆推圖越接近時，逆推結果越可靠。各圖之縱軸為週期(s)，橫軸表距離(km)，資料點為黑色。



圖七十二 測區七星山-大油坑附近二維電性構造剖面圖。(左圖)東西向剖面；(右圖)南北向剖面。電性構造紅色表低電阻區、藍色表高電阻區。CSS:七星山; TUK:大油坑; 數字: 大地電磁法測點。

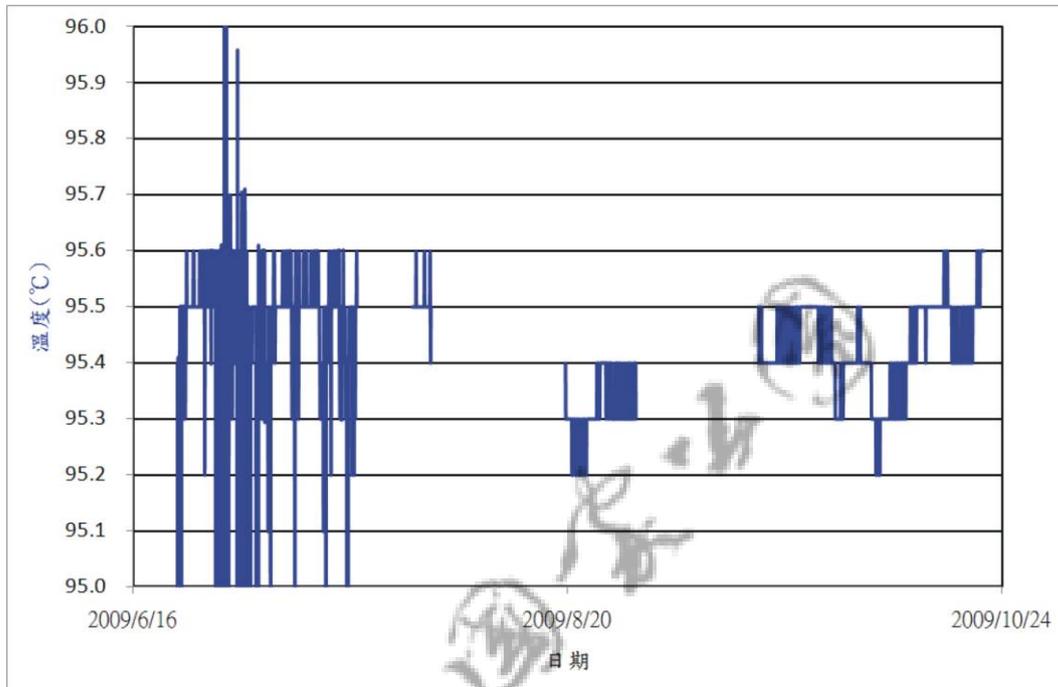
第四節 地溫監測結果與分析

小油坑噴氣孔自 6 月開始監測，初期的一個月，因電路未裝設避雷設施，以及不銹鋼管可能已有部分遭腐蝕，紀錄器紀錄的電壓訊號受雷擊或者降雨影響（雨水滲入溫度感應器內，造成電壓下降），紀錄的雜訊很大，溫度的變化可於數分鐘內從 95°C 快速下降至約 50°C，七、八月期間受雷擊嚴重影響甚至造成電腦和紀錄器零件燒毀，中斷紀錄資料 3 次，後經加裝避雷器、接地設施以及更換鈦合金管後，溫度監測系統才漸趨穩定，在火山地區，由於監測環境惡劣，儀器易被腐蝕而故障，儀器外殼最好選用鈦合金材料，方能增加儀器的壽命。

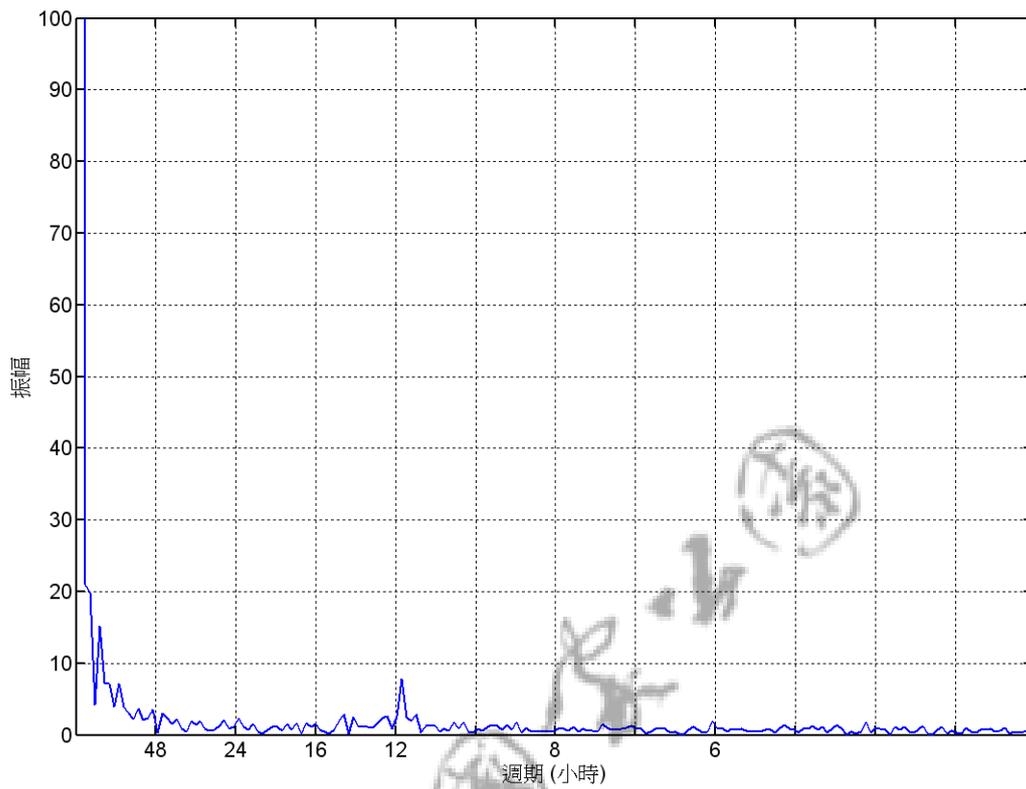
監測溫度顯示，小油坑噴氣孔的溫度非常穩定，溫度值約 95.2-95.6°C（圖七十三），經頻譜分析結果，溫度變化具有 12 小時週期但無 24 小時週期（圖七十四），經與竹子湖氣象觀測站之雨量和氣溫資料比對，發現噴氣孔溫度與雨量或氣溫幾乎不相關（圖七十五、圖七十六），此現象與目前大屯山三口地溫監測井（菁山、竹子湖和擎天崗測站）淺部地溫的變化完全不同，根據該三口地溫井之監測結果，地底下 10 幾公尺內的溫度受地表氣溫的影響都有很強烈的年變化週期，表土的溫度則跟氣溫的變化一致，有強烈的日週期和年週期現象，小油坑噴氣孔的溫度變化無 24 小時週期，顯示地表氣溫日變化訊號往地下傳遞的深度無法到達 40 公分（溫度感應器的位置），此原因可能是表層土的熱導係數很小，氣溫訊號傳至 40 公分深後已變成非常微弱，微弱的訊號在頻譜分析中因功率譜太小並無法呈現，另外，噴氣的溫度可能在地表附近形成一高溫區，高溫的熱體使氣溫變化影響的訊號相對減小，也會減弱其頻率域中的功率譜。至於雨量無法影響噴氣孔溫度的原因，可能是噴氣孔有較高的氣壓，雨水不容易滲入地下。

噴氣孔溫度有 12 小時週期現象，實屬特殊，過去少有研究發現地溫的變化具此週期，由於 12 小時週期係地潮週期，推測噴氣孔的溫度變化可能跟地潮有關，但其機制目前尚不清楚，有可能是地潮影響地層應力的分佈或者地下水位的起伏，使噴氣孔的大小或噴氣速率產生變化，而引起噴氣溫度的改變，如能長期監測噴氣孔的溫度變化，有機會建立溫度變化與大地應力的關

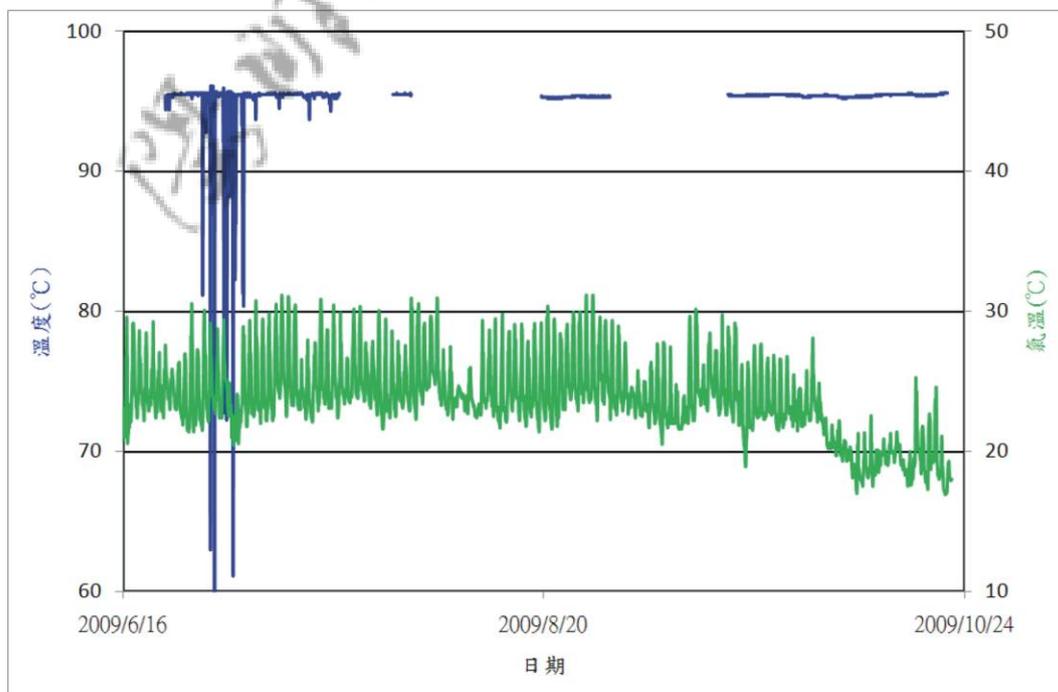
係，則對地底下火山活動的研究有莫大的助益。



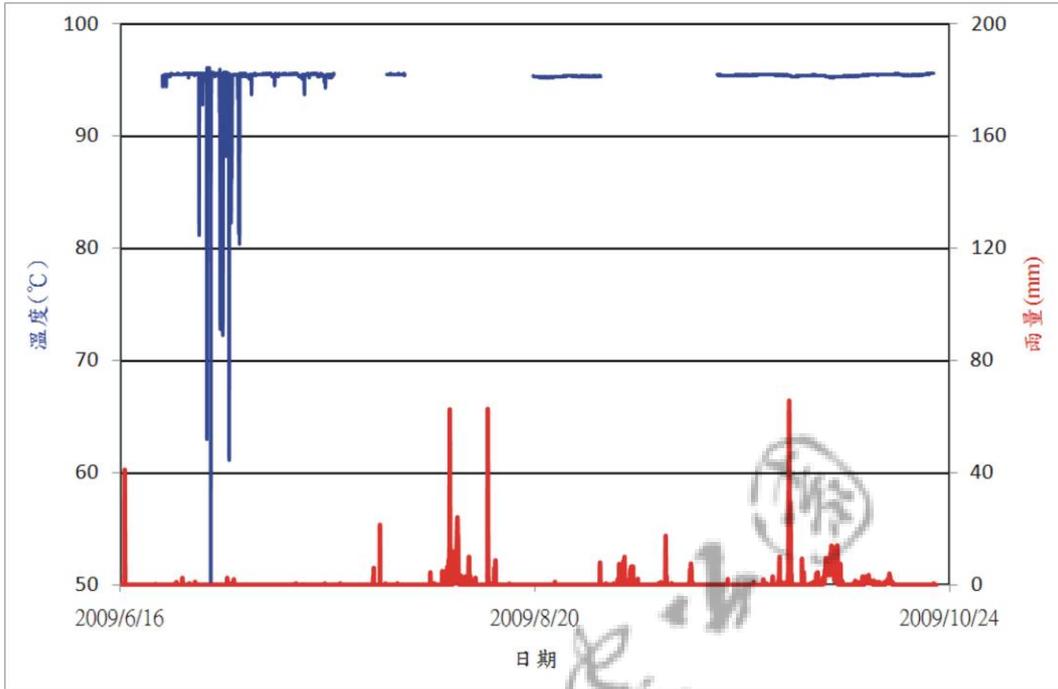
圖七十三 小油坑噴氣孔溫度時序圖。圖中 6-7 月的資料有強烈的雜訊，係雷擊和降雨造成儀器的不穩定，8 月以後溫度維持非常穩定，溫度值約 95.2-95.6°C。



圖七十四 小油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析。圖中顯示溫度變化具有 12 小時週期。



圖七十五 小油坑噴氣孔溫度 (上方曲線, 左側垂直座標) 與竹子湖氣象觀測站氣溫 (下方曲線, 右側垂直座標) 圖。



圖七十六 小油坑噴氣孔溫度（上方曲線，左側垂直座標）與竹子湖氣象觀測站雨量（下方曲線，右側垂直座標）圖。

陽明山國家公園

第四章 結論

自 2008 年 6 月 20 日至 2009 年 10 月 23 日止，土壤氣體監測連續分析結果顯示，本地區的二氧化碳濃度介於 0.02% 至 23.5%，逸氣通量介於 1 至 2259 g/m²/day。不論是濃度或是逸氣通量變異性大，可能代表著小油坑熱液地區的岩漿活動並非穩定。新添增土壤溫度計以了解環境因素對逸氣通量間的相關性，初步結果顯示土壤溫度與逸氣通量成一正相關性。2009 年 10 月 20 日在鞍部地區發生四起有感地震，二氧化碳濃度在 2009 年 10 月 18 日從 0.1% 增加至 4%。可能是受到應力擠壓而使氣體濃度異常增加。此外，二氧化碳通量與當地的降雨有密切關係，當有驟雨發生時，土壤氣通量明顯降低。顯示因降雨會使得土壤滲透度（孔隙度）降低，造成逸氣通道不順暢，使得通量明顯降低。連續觀測資料中常出現二氧化碳通量異常高值，沒有影響當地的地震紀錄不過有雨量的記錄，所以隨後通量就下降。推測是受到降雨的影響，過多的雨水向下滲透將原本存在土壤孔隙中的氣體向上排擠逸散至地表而造成逸氣通量大量增加，但雨水繼續留在孔隙中使得氣體無法向上逸散而造成通量降低。未來可將監測結果與本地區的微震資料和地表變形做比較，以更加了解本地區土壤逸氣與岩漿活動之關連。在火山地區中，二氧化碳通量變化可代表火山活動，但也會受環境因子的影響。其中包含大氣壓力、雨量和風速風向等。本研究報告中我們初步討論雨量、土壤溫度以及地震活動，未來希望可增加其他觀測項目，使監測站功能更加完整，有更多的資料可以討論二氧化碳通量的變化情形。

利用大屯山地區五個地殼變形監測站(GPS)獲知大屯山地區與台灣北部地區之地表地殼變形，每年之平均地殼變形之速度大約以 2 到 3 公分左右向東南方向移動。大屯山地區五個地殼變形監測站觀測之結果在水平地殼變形速度非常相似，但在垂直地殼變形速度卻也有些差異。此外並發現有些地殼變形監測站隨時間之有明顯之變化，可能解釋之原因可包括季節性之變化，地震活動度有關及其他未知之因素，這些均有待進一步監測與分析。雖然目前結果已有些探討之價值，但必須更長期之監測，方能有更可靠之科學意義，故建議政府相關部門與學術單位，能持續進行長期觀測與分析研究，以達火山

活動評估與規劃可能災害之準備與應變對策。

大地電磁法觀測結果顯示，從七星山到大油坑之地表下10公里大至呈現背斜似之構造，電性地層呈現層狀分佈。七星山到大油坑之表層約500公尺厚，係良導體，主要原因可能是火山之熱水對流所致，此岩層之孔隙率相當高。七星山到大油坑之地表下2至5公里處是微震活動密集帶，該處屬於緻密岩層結構，微震之來源，可能主要是火山氣體突增或釋放所造成。七星山到大油坑之地下約6公里深處，發現一形貌近似球狀構造，可能是岩漿庫，從該構造偏高之電阻值研判，可能屬於冷卻中之岩漿。一般而言，電阻率與地體構造相對應的關係與特性為：對應低電阻區，通常大地熱流值較高，因為高溫熱流會使岩層電阻降低，因此可以從由淺而深所呈現低電阻分佈，推斷深部可能具高熱流值，七星山區符合此一通則，屬於高熱流值地區。本研究之初步發現：從七星山到大油坑之地下約6公里深處存在疑似冷凝中之岩漿庫，則此岩漿庫將逐漸死亡，大屯火山群將不是活火山，但是台灣北部張裂活動隨時有可能提供充分管道給岩漿噴發至地表，致七星山地區觀測到類似岩漿相關活動，如噴氣、微震活動等，故更進一步仔細探查岩漿庫及其流體管道之真實性有其必要。

本研究於大屯山小油坑遊憩區建立一套噴氣孔溫度監測系統，從6月至10月的監測結果發現，野外儀器會受酸性流體腐蝕，儀器外殼需使用鈦合金材料方能抵抗其侵蝕力，通過噴氣孔區的電纜線也宜採用抗腐蝕的鐵弗龍材質，監測地區夏季時常打雷，易造成電路中斷或燒毀儀器內部零件，可在電路上加裝避雷器以及將儀器接地，避免雷電引發瞬間的強烈電流損壞儀器。連續的噴氣孔溫度資料顯示，在監測初期一個月內的資料，因系統不穩定，雜訊很多，經在電路上加裝避雷器以及監測儀器採用鈦合金材質後，資料變的非常穩定，資料穩定期間所顯示的噴氣孔溫度一直維持 95.2-95.6°C，溫差只有 0.4°C，溫度的變化有 12 小時週期，經與當地雨量和氣溫比對結果，均無顯著的相關性，顯示小油坑噴氣孔的溫度不受氣溫或雨量等氣候因子的影響，至於溫度訊號中含有 12 小時的週期，目前推測可能與地潮有關，是否地潮引起地層應力的改變或地下水位的升降而影響噴氣孔的噴氣速度，進一步

引發溫度上的週期性變化，值得進一步研究。由於本研究之觀測結果相當有趣，不管在科學教育或學術研究上都有其價值，建議陽明山國家公園管理處可針對其他後火成活動也十分強烈地區（如馬槽、大油坑、硫磺谷等）建立相同的溫度監測裝置，則將來可同時比對這些地區的噴氣孔溫度變化，此舉對大屯山地底下的火成活動勢必會引起更多的討論空間。

依據上述四種火山監測與分析方法基本上說明，再整合過去其他相關之研究，大屯火山地區之地表火山活動之特性依舊明顯存在。其中特別是地震活動與地球化學隨時間常有顯著之變化。雖然大地電磁法觀測結果顯示，可能是淺部地殼之岩漿庫，大約六公里深度附近，可能屬於冷卻中之岩漿，但這並不能排除其他深部岩漿存在之可能性。此外，最近之火山灰之研究強烈建議大屯火山最後一次活動為五千多年前。如此一來，對大屯火山地區進行更深入之研究與監測，已成為政府與學術單位一個重要議題。

陽明山國家公園

第五章 建議

建議一

火山活動的長期監測：立即可行建議

主辦機關：陽明山國家公園管理處保育課

協辦機關：陽明山國家公園管理處解說課

具體作法：

- 增設火山監測站
- 增強監測站功能
- 加強相關人員之培訓

說明：

對於火山活動的監測是長久的，建議管理處於本計畫執行同時，亦能同時訓練相關人員，能夠進行後續的維護與資料解讀，並於後續能夠編列經費設置多個觀測站，形成一個觀測網，如此於本計畫結束後，便能夠更有效地長期連續監測本地區的火山活動。

建議二

通盤檢討地熱能源應用的可行性：中長期建議

主辦機關：經濟部中央地質調查所

協辦機關：經濟部能源局

具體作法：

全球能源逐漸枯竭，而地熱是未來可能加以利用的能源。政府單位通盤考慮於大屯火山區利用地熱能源的可行性。一方面進行長期深入的研究調查地熱能源之分布情況，另一方面亦可協同相關單位討論如何開放與應用地熱能源的可能，在景觀保護與能源利用間找到平衡點。



附錄

附件一

本處 98 年委託調查計畫「大屯火山群環境監測計畫」期初審查會議簽到簿及會議紀錄

一、時間：98 年 3 月 13 日（星期五）上午 10 時整

二、地點：本處二樓會議室

三、主持人：林處長永發（詹副處長德樞 代） 記錄：

張弘明

四、出席單位及人員：

出席機關（單位）（人員）	職 稱	簽 到 處
台灣大學地質科學研究所陳文山教授		出國請假
中央研究院地球科學所俞震甫研究員	研究員	俞震甫
本處詹副處長德樞	副處長	詹德樞
陳秘書昌黎	秘書	陳昌黎
企劃經理課		
環境維護課		
遊憩服務課	技士	彭坤火
解說教育課	技士	陳彥伯
建管小組	技佐	蘇志成
小油坑管理站	主任	呂理昌
龍鳳谷管理站		

擎天崗管理站		
陽明書屋管理站		
資訊室		
會計室		
人事室	課員	倪寶蓮
行政室		
保育研究課	課長	羅淑英
	約聘研究員	王全田
	技士	張弘明

研究團隊代表：

中央研究院地球科學研究所林正洪研究員	研究員	林正洪
台灣大學地質科學系楊燦堯教授	教授	楊燦堯
中央大學地球物理研究所陳洲生教授	教授	陳洲生
台灣大學海洋研究所江協堂博士		請假

列席機關（單位）（人員）	職 稱	簽 到 處

五、受託單位簡報。（略）

六、審查意見及綜合討論。

- (一) 本整合型監測調查案有必要性。
- (二) 土壤氣體變化的影響因素很多，需長時間觀測，建立背景值、確認異常值後，方能嘗試做些解釋。
- (三) 對「岩漿庫」字眼，要謹慎保守，可用「冷卻的火山岩體」來替代。
- (四) 大屯火山群的基礎資料累積很重要，期望對日後的解說教育能提供重要資料。
- (五) 請於報告書中協助彙整出歷年來有關大屯火山群之相關調查研究成果，並請依契約書相關規定執行本監測計畫案。

七、結論

- (一) 會中相關意見，請受託單位參考。
- (二) 期初審查會議審查通過，請受託單位依計畫執行。
- (三) 以下空白。

八、散會

附件二

本處 98 年委託調查計畫「大屯火山群環境監測計畫」期中審查會議簽到簿及會議紀錄

一、時間：98 年 6 月 23 日（星期二）上午 10 時整

二、地點：本處二樓會議室

三、主持人：林處長永發

記錄：

張弘明

四、出席單位及人員：

出席機關（單位）（人員）	職 稱	簽 到 處
台灣大學地質科學研究所陳文山教授		請 假
中央研究院地球科學所俞震甫研究員	研究員	俞震甫
本處詹副處長德樞	副處長	詹德樞
陳秘書昌黎		
企劃經理課		
環境維護課		
遊憩服務課	課長	王經堂
解說教育課	技士	游淑鈞
小油坑管理站	主任	呂理昌
龍鳳谷管理站	主任	周俊賢
擎天崗管理站		
陽明書屋管理站	主任	李青峰
建管小組		
資訊室		

會計室		
人事室		
行政室		
保育研究課	課長	羅淑英
	技士	張弘明
	約僱	王瑞中

研究團隊代表：

中央研究院地球科學研究所 林正洪研究員	研究員	林正洪
中央大學地球物理研究所 陳洲生教授	教授	陳洲生
台灣大學海洋研究所 江協堂博士	博士	江協堂
台灣大學地質科學系 楊燦堯教授（出國請假）	研究生	溫心怡
台灣大學地質科學系	研究生	李曉芬

列席機關（單位）（人員）	職 稱	簽 到 處

五、受託單位簡報：略。

六、審查意見及綜合討論。

（一）大屯火山群與台灣北部地區，每年平均地殼變形之速度大約以 2 到 3 公分左右向東南方向移動，建請嘗試解釋其原因。

- (二) 水準測量發現七星山至擎天崗方向之地殼抬升現象，是否參考基準點也有抬升或下降？其與微震關係或影響為何？請於期末報告書中一併說明。
- (三) 請幫忙製作小油坑噴氣孔地溫監測系統展示之解說牌。另監測設備儀器未來受酸腐蝕損壞之維修及校正工作，亦請受託單位協助與更新，以期能持續正常進行長期地溫監測工作。
- (四) 擎天崗地溫井溫度高達 106 度，請協助說明其原因及影響因素。
- (五) 請協助提供更多土壤氣體通氣量變化之影響因素，並討論與雨量、季節變化、地震等關聯性說明。
- (六) 對「岩漿庫」字眼，要謹慎保守，可用「冷卻的火山岩體」來替代，用「岩漿活動」取代「岩漿」。不用「背斜」字眼。
- (七) 請於期末報告書中協助彙整出歷年來有關大屯火山群之相關調查研究成果，期望能對日後的解說教育提供重要可用之資料。

七、結論

- (一) 會中相關意見，請受託單位參考，期中審查會議原則通過。
- (二) 請協助提供園區內其他地區可行又急迫之火山地質相關研究及方向。
- (三) 請受託單位依契約書相關規定執行本監測計畫案。
- (四) 以下空白。

八、散會 (11 時 50 分)

附件三

陽明山國家公園管理處 98 年度委託辦理計畫
「大屯火山群環境監測計畫」期末審查會議記錄

壹、宣布開會

貳、業務（承辦）單位報告（略）

參、受託單位報告（略）

肆、討論：

(一) 期末報告書初稿中之英文摘要請修正，關鍵字請多增加。

受託單位代表：感謝建議，報告將作修正。

(二) 第11頁之參考文獻請列入書後之參考書目。報告書中地名之英文拼音請一致。另請參酌本處所提書面意見，修訂補充。

受託單位代表：感謝建議，將會參考修正。

(三) 第50頁表六之K值請說明。

受託單位代表：
$$K = \frac{86400 \cdot P \cdot V}{10^6 \cdot R \cdot T_K \cdot A}$$

，其中P is the barometric pressure expressed in mBar (HPa)

R is the gas constant 0.08314510 bar L K mol

T is the air temperature expressed in Kelvin degree

V is the chamber net volume in cubic meters

A is the chamber inlet net area in square meters.

單位為：
$$K = \frac{\text{moles} \cdot \text{meter}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}}{\text{ppm} \cdot \text{sec}^{-1}}$$

(四) 第21頁PVC管與鐵管口徑及用途等也請一併說明。

受託單位代表：PVC管的口徑為3吋，為測量氮氣用；而鐵管的口徑為0.5cm，主要為測量CO₂通量用。

(五) 第84頁之低電阻位於淺部或深處時，大地熱流值高低之不同，不易了解，請補充說明。

受託單位代表：感謝提問，已於內文中補充說明之。

(六)本計畫第一年屬於試驗階段，第二年就需要微縮聚焦在火山的某一中心目的，針對某一區域(如大油坑)做深入的探討。同時也需考慮斷層活動所造成的影響或地下水、地震...等影響因素。

受託單位代表：目前可考慮在大油坑地區做集中設站監測工作(如土壤氣體測站及地監測裝置)，但難度高，且需穩定的電流方向何設站。

(七)大地電磁法應探討30KM深的地下構造情形，並做垂直斷層線上盤與下盤地層剖面之比較分析。

受託單位代表：為解決長久爭議之岩漿庫問題，更廣的地震網、更深的大地電磁探勘及投下時間的監測，才可直接證實。明年度將有儀器可進度深度20~30KM之大地電磁探勘工作。同時，明年度中央大學大地電磁測深團隊，將移師陽明山地區進行深部50km可能岩漿庫存在之探勘研究。

(八)地殼變形垂直量不大，可否以小區域(如三芝)當地為參考點，比較可以看出地殼抬升情形。

受託單位代表：可以考慮此一建議，但屆時討論的將是地殼的相對變化。

(九)火山活動與斷層活動如何區分？10月20日之地震特別之處及與土壤氣體、地溫變化有何關聯性，請協助說明。

受託單位代表：10月20日之地震很集中(全在大油坑)，有4次規模3左右之有感地震，因此可能並非斷層活動造成的有感地震。

(十)10月20日地震是否與七星山北側後火山熱液換質作用造成岩層侵蝕、塌陷有關？

受託單位代表：由於並非斷層活動造成的地震，極有可能是地下熱源液態或是氣態的力量改變，所造成的地震。

(十一)防災系統或火山教育或相關單位的配合...等建議，是否

也可納入報告書中？

受託單位代表：請參考過去已有的相關資料。

(十二)很多火山裂口(如大油坑)，以環境教育觀點，該如何看待處理或有限度的開放？

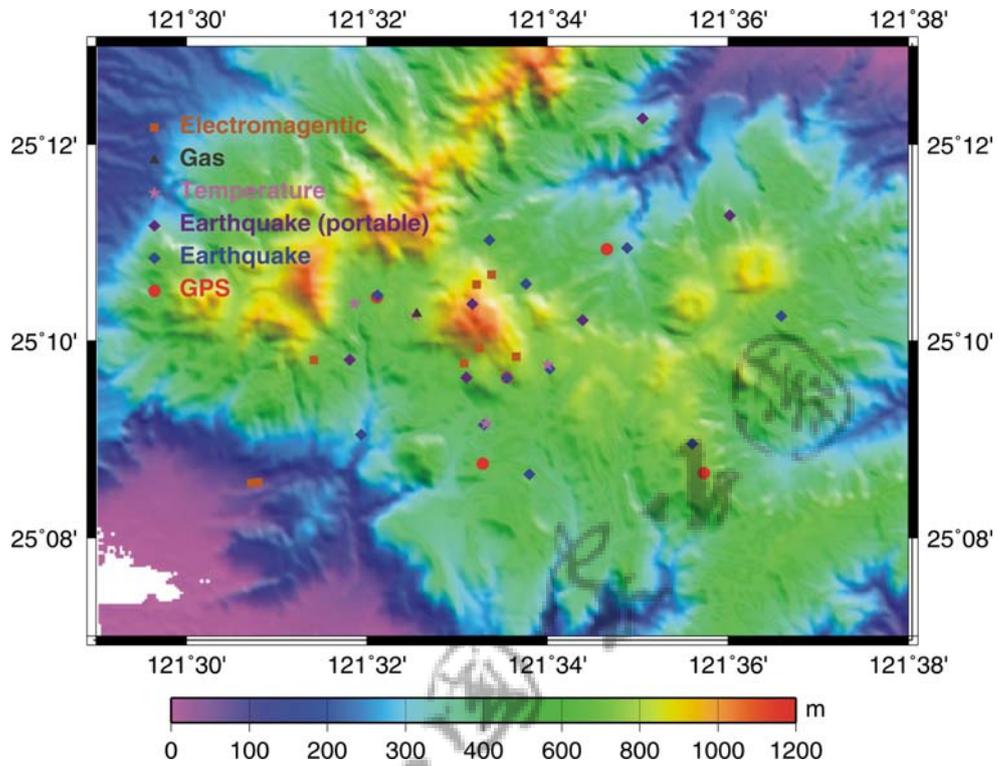
受託單位代表：建議必需考慮安全性後再進行有限度的開放。

伍、結論：

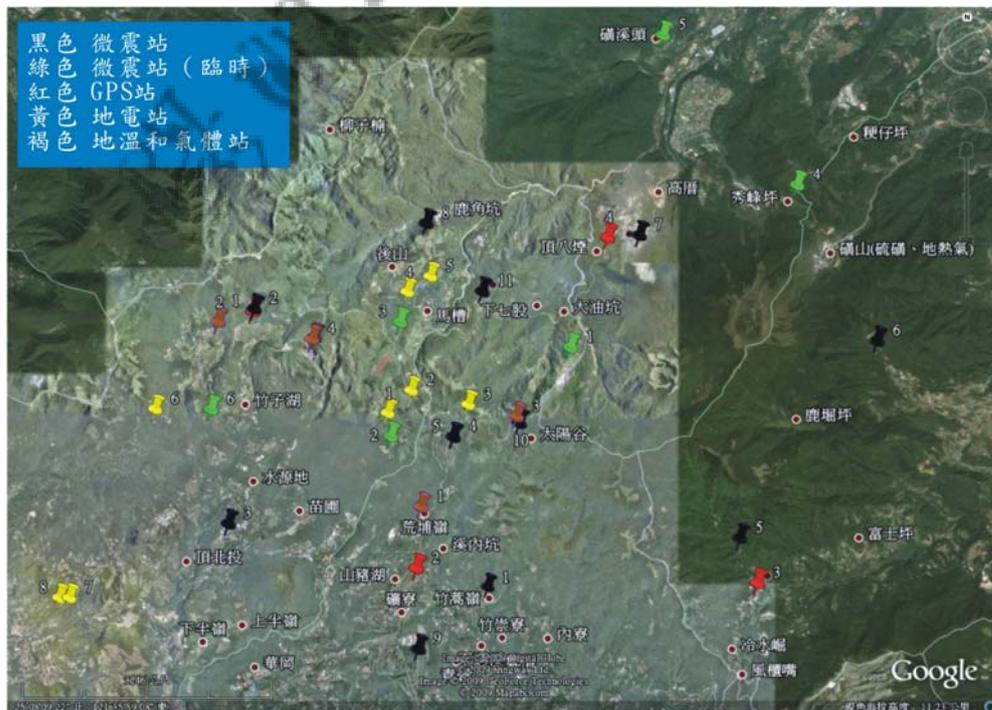
- (一) 請受託單位接續整合本會議所提及之相關意見。
- (二) 大油坑電力部分，儘速與台電接洽處理。
- (三) 請依合約規定辦理後續相關作業程序。

陸、散會（12時00分）

附件四 研究報告中各種測站分布圖



本研究報告中各種測站在大屯山地區（數值地形圖）的分布。



本研究報告中各種測站在大屯山地區（Google Earth）的分布。

參考書目

中文部分

- 江協堂、徐春田、張宏毅，2008。從地溫週期性變化推估現地地層之熱擴散係數，中國鑛冶工程學會九十七年年會。
- 宋聖榮，2007。台灣第四紀火山活動:經濟部中央地質調查所特刊第18號:111-142。
- 林正洪、柯士達、蒲新杰，2007。陽明山國家公園之火山地震活動。國家公園學報，17(1): 87-97。
- 莊文星、陳汝勤，1989。台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，5，125-166頁。
- 陳正宏，1990。台灣的火成岩。經濟部中央地質地質調查所，共137頁。
- 楊燦堯，1999。陽明山國家公園大屯火山群之氦氣及其同位素地球化學之研究，內政部營建署陽明山國家公園管理處委託計畫。
- 楊燦堯，2000。陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究。國家公園學報，10(1)，73-94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，13(1)，127-156頁。

英文部分

- Allard, P., Carbonelle, J., Dajlevic, D., Le Bronce, J., Morel, P., Robe, M.C., Maurenads, J.M., Faivre-Pierret, R., Martin, D., Sabroux, J.C. and Zettwoog, P., 1991, Eruptive and diffusive emissions of CO₂ from Mount

- Etna. *Nature*, 351, 387-391.
- Brantley, S.L. and Koepenick, K.W., 1995, Measured carbon dioxide emissions from Oldoinyo Lengai and the skewed distribution of passive volcanic flux. *Geology*, 23, 933-936.
- Cagniard L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 18: 605-635.
- Chen, C.H, Nakada S., Chen, C. H., Mertzman, S. A., 1996, An unusual volcanic zone behind the southern Okinawa trough (back arc basin)- the western extension of the Ryukyu volcanic arc front?
- Chen, C.H. and Nakada S., 1994, Comparison of late Cenozoic basaltic magma generation in Ryukyu arc, Okinawa Trough and adjoining area (NW kyushu, Japan and N. Taiwan). 1994 8th International Conference on Geochronology, 54.
- Chen, C.H., 1983, The geochemical evolution of Pleistocene absarokite, shoshonite and high-alumina basalt in northern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 5, 85-96.
- Chen, C. H., 1990, Igneous rocks in Taiwan. Central Geol. Surv., MOEA, 137pp.
- Chen, C-H. and Lin, S.B., 2002, Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin. *Western Pacific Earth Sciences*, 2, 191-204.
- Gamble, T.D., Goubau, W M. and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysisc*. 18: 605-635.
- Gerlach, T.M., Delgado, H., McGee, K.A., Doukas, M.P., Venegas, J.J. and Cardenas, L., 1997, Application of the LI-COR CO₂ analyzers to volcanic plumes: a case study, volcan Popocatepetl, Mexico, June 7 and 10, 1995. *J.*

- Geophys. Res.*, 102, 8005-8019.
- Giggenbach, W.F., 1996, Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa. R., Tillin, R.I. (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*. Springer, Berlin, pp. 221-256.
- Gudmundsson, M. T. and Milsom, J., 1997, Gravity and magnetic studies of the subglacial Grímsvötn volcano, Iceland: Implications for crustal and thermal structure, *J. Geophys. Res.*, 102(B4): 7691–7704.
- Harris, D.M., Casadevall, T.J., Rose, W.I. and Bornhorst, T.J., 1981, Emission rates of CO₂ from plume measurements. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1250, 201-207.
- Ho, C.S., 1982, Tectonic evolution of Taiwan explanatory text of the tectonic map of Taiwan. Ministry Econ. affairs, ROC. 126pp.
- Hyndman, R.D., Vanyan, L.L., Marquis, G. and Law, L.K., 1993, The origin of electrically conductive lower crustal continental crust: saline water or graphite? *Phys. Earth Planet. Inter.* 81: 325-344.
- Juang, W.S. and Bellon H., 1984, The Potassium-argon dating of andesites from Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 27, 86-100.
- Kariya, K.A. and Shankland, T.J., 1983, Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*. 48: 52-61.
- King, C.K., King B.S., Evans, W.C. and Zang, W., 1996, Spatial radon anomalies on active faults in California. *Appl. Geochem.*, 11, 497-510.
- Klusman, R.W., 1993, Soil gas and related methods for natural resource exploration. Wiley, England, 483pp.
- Konstantinou, K.L., Lin, C.H. and Liang, W.T., 2007, Seismicity characteristics of

- potentially active Quaternary volcano: The Tatun Tsao, Volcano Group, northern Taiwan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 160: 300-318.
- Lan, T.F., Yang, T.F., Lee, H.F., Chen, Y.G., Chen, C-H., Song, S.R. and Tsao, S., 2007, Compositions and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 165, 32-45.
- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Chen, C-H., Song, S.R. and Tsao, S., 2008, Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 624-635.
- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Song, S.R. and Tsao, S., 2005, Fumarolic gas composition of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 16(4), 843-864.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Liang, W.T., Pu, H.C., Lin, Y.M., You, S.H. and Huang, Y.P., 2005a, Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No.10, L10313, doi:10.1029/2005GL022861.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Pu, H.C., Hsu, C.C., Lin, Y.M., You, S.H. and Huang, Y.P., 2005b, Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 16, 563-577.
- Lin, C.H., Konstantious, K.I., Liang, W.T., Pu, H.C., Lin, Y.M., You, S.H. and Huang, Y.P., 2005a. Preliminary analysis of volcanoseismic signals at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, *Geophysical Research Letters* 32, L10313. doi:10.1029/2005GL022861.
- Lombardi, S. and Reimer, G.M., 1990, Radon and helium in soil gases in the Phlegrean Fields, Central Italy. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 849-952.

- Lombardi, S., Etiope, G., Guerra, M., Ciotoli, G., Grainger, P., Duddridge, G.A., Gera, F., Chiantore, V., Pensieri, R., Grindrod, P. and Impey, M., 1996, The refinement of soil gas analysis as a geological investigative technique. Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology. Final report. EUR 16929 EN.
- Lombardi, S., Pinti, D.L., Rossi, U. and Fiordelisi, A., 1993, Rn-222 in soil gases at Latera geothermal field: a preliminary case history. *Geologica Romana*, 29, 391-399.
- Olhoeft, G.R., 1981, Electrical properties of granite with implications for the lower crust. *J. Geophys. Res.* 86: 931-936.
- Phoenix geophysics, 2005, V5 system2K - MTU/MTUA user guide. <http://www.phoenix-geophysics.com>.
- Rodi, W. and Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*. 66: 174-187.
- Rose, W.I., Chuan, R.L., Giggenbach, W.F., Kyle, P.R. and Symonds, R.B., 1986, Rates of sulphur dioxide and particle emissions from White Island volcano, New Zealand, and an estimate of the total flux of major gaseous species. *Bull. Volcano.*, 48, 181-188.
- Sano, Y. and Wakita, H., 1985, Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Journal of geophysical Research* 90: 8729-87401.
- Schumacher, D., 1991, Soil gas helium concentrations in the vicinity of a uranium deposit, Red desert, Wyoming. US Geol. Survey open-file report, 79-975.
- Shankland, T. J. and Ander, M. E., 1983, Electrical conductivity, temperature, and fluids in the lower crust. *J. Geophys. Res.* 88: 9475-9484.

- Song, S. R., Lo H. J., Chen, C. H., Tsao, S. and Yang, J. J., 1992, cauldron formation and volcanic eruption of the Tatun volcanic group. 4th Symposium Quaternary of Taiwan, 45.
- Song, S.R., Yang, T.F., Yeh, Y.H., Tsao, S. and Lo, H.J., 2000, The Tatun Volcano Group is active or extinct? *Jour. Geol. Soc. China*. 43(3): 521-534.
- Stevens, N.F., Garbeil, H. and Mougins-Mark, P.J., 2004, NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability, *Remote Sensing of Environment* 90, 405–414.
- Sudo, Y and Hurst, A.W., 1998, Temperature changes at depths to 150 meters near the active crater of Aso Volcano: preliminary analysis of seasonal and volcanic effects. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 81, 159-172.
- Suppe, J., 1984, Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Mem. Geol. Soc. china*, 6, 21-33.
- Symonds, R.B., Rose, W.I., Bluth, G.J.S. and Gerlach, T.M., 1994, Volcanic-gas studies: methods, results, and applications. In: Carroll and Holloway (eds.) Volatiles in magmas. *Rev. in Mineralogy*, 30, 1-66.
- Teng, L.S., Chen, C.H., Wang, W.S., Liu, T.K., Juang, W.S. and Chen, J.C., 1992, Plate kinematic model for late Cenozoic arc magmatism in northern Taiwan. *J. Geol. Soc. China*, 35, 1-18.
- Teng, L.S., 1996, Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. *Geology*, 24, 949-952.
- Tilling, R.I., 1989, Volcanic hazards: Short course in geology, volume 1. 28th International Geological Congress, Washington, D.C., 123P.

- Tsao, S. J., 1994, Potassium-argon age determination of volcanic rocks from the Tatun Volcano Group. *Bull. Central Geol. Surv.*, 9.
- Wang, K.L., Chung, C.H., Chen, R.S., Yang, T.F. and Chen, C.H., 1999, Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics* 308: 363-376.
- Wang, K.L., Chung, S.L. and Chen, C.H., 2002, Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the Northern Taiwan Volcanic Zone. *Chem. Geol.*, 182, 513-528.
- Wang, W.H. and Chen, C.H., 1990, The volcanology and fission track age dating of pyroclastic deposits in Tatun volcano group, northern Taiwan. *Acta Geol. Taiwanica*, 28, 1-30.
- Yang, C.H., Shei, T.C. and Luei, C.C., 1994, Gravity and magnetic studies in the Tatun Volcanic Region, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 5, No.4: 499-514.
- Yang, T.F., Lan, T.F., Lee, H.F., Fu, C.C., Chuang, P.C., Lo, C.H., Chen, C.H., Chen, C.T.A. and Lee, C.S., 2005, Gas compositions and helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications. *Geochemical Journal*, 39, 469-480.
- Yang, T.F., Sano, Y., and Song, S.R., 1999, $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of fumaroles and bubbling gases of hot springs in Tatun volcano Group, North Taiwan. *II Nuovo Cimento*, 22c, 281-286.
- Yen, T.P., Tzou, Y.H. and Lin, W.H., 1984, Subsurface geology of the region of the Tatun Volcano Group. *Petrol. Geol. Taiwan*. 20, 143-154.
- Zeni, L., A. Minardo, Z. Petrillo, M. Piochi, R. Scarpa and R. Bernini, 2007, Distributed optical fiber sensors: an approach for monitoring the thermal gradient at the Campi Flegrei caldera, *Geophys. Res. Abs.*, 9, 04074.