

# 大屯火山群潛在岩漿庫研究：大地電磁法探查之初步結果

陳洲生<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中央大學地球物理研究所；<sup>2</sup>通訊作者 ([chusen@earth.ncu.edu.tw](mailto:chusen@earth.ncu.edu.tw))

**[摘要]** 大屯火山群位於台灣北部，根據過去分析噴氣之氦同位素顯示，部分噴氣來自岩漿源，說明台灣北部地下有岩漿庫存在之可能。過去研究地震分佈與震源特性，亦顯示七星山及大油坑附近有明顯的微震活動存在，大多數之微震震源深度集中於二至五公里附近，而七星山地區之微震震源深度小於大油坑附近震源深度。初步推斷此地區之微震可能是岩層裂縫中液態或氣態物質之震動所造成，這些現象與國外其他火山地區所觀測之岩漿相關活動類似。為進一步了解大屯火山群可能之岩漿活動，本研究於七星山地區設置8個大地電磁法觀測站，以瞭解本地區之電性構造。由觀測資料逆推出之二維電性構造剖面顯示，七星山及大油坑附近之最上部地殼中所觀測到電阻異常，可能與岩層中之流體及岩漿庫有關：(1)從七星山到大油坑之地表下10公里，大致呈現背斜之構造，電性地層呈層狀分佈；(2)此構造之表層係良導體，厚約500 m，主要可能是火山之熱水對流所致，推測此岩層之孔隙率相當高；(3)在表層下2至5 km 處是微震活動密集帶，推測該處屬於緻密岩層結構，微震之來源可能主要是氣體壓力造成之震動；(4)在地下約6 Km深處，發現一近似球狀構造，可能是岩漿庫，再從其偏高之電阻值研判，岩漿庫可能在冷卻中，大屯火山群將不是活火山，但是有關研究認為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，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，建議大屯火山地區能進一步再加密測點仔細探查，確認岩漿庫存在及其流通管道之真實性。

**關鍵字：**大屯火山群、大地電磁法、電阻率、岩漿庫

## Investigation of Potential Magma Chambers beneath the Tatun Volcanic Area: Preliminary Results of Magnetotelluric Survey

Chow-Son Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, National Central University, <sup>2</sup>Corresponding author ([chusen@earth.ncu.edu.tw](mailto:chusen@earth.ncu.edu.tw))

**ABSTRACT** Previous helium isotope studies indicated that over 60% of the fumarolic gases and vapors originated from deep mantle in the Tatun volcano area. Earthquakes analysis also indicated existing seismicity anomaly beneath Tatun volcano, possibly caused by the fluid activity of the volcano. The chemistry of the fumarolic gases and vapors and seismicity anomaly are important issues in view of possible magma chamber in the Tatun volcano area and the volcano's location in the

vicinity of metropolitan Taipei. In this study eight magnetotelluric (MT) soundings in Yangminshan National Park were deployed to understand the geoelectric structures at depth in this area. An anticline extending more than 10 km beneath the Chih-Shin-Shan and Da-You-Kan areas was recognized. Low resistivity at a shallow and highly porous layer 500m thick might indicate circulation of heated water. However, a high resistivity layer at depth between 2 and 6 km was detected. This layer could be associated with high micro-earthquakes zone. The characteristics of this layer produced by either the magma chamber or other geothermal activity were similar to that of some other active volcanic areas in the world. At 6 km underground was a dome structure of medium resistivity. This structure could be interpreted as a magma chamber in which the magma is possibly cooling down, as judged by its relatively high resistivity. The exact attributes of the magma chamber were not precisely determined from the limited MT soundings. More detailed investigations are recommended to improve the images and confirm the characteristics of the studied magma chamber in the Tatun volcanic area.

**Keywords:** Tatun volcano group, magnetotellurics, resistivity, magma chamber

## 前言

大屯火山群位於台灣北部，涵蓋面積約250平方公里，緊鄰於台北盆地正北方。大屯火山最近的一次噴發大約是一、二十萬年前 (Song et al. 2000, 宋聖榮 2007)，最近在台北盆地鑽井松山層中發現有原生的火山灰源自鄰近大屯火山群推論此一噴發年輕於兩萬年前 (Chen and Lin. 2002)，目前地表地熱活動還是很明顯。根據噴氣所含氦同位素之分析顯示，部分噴氣來自岩漿源(楊燦堯等 2003, Lee et al. 2008)，說明台灣北部地下有岩漿庫存在之可能。

中研院地球所過去幾年也在大屯山地區，設立一個長期性地震觀測網系統，以精密的儀器，測量微小地震的時空分佈，及地震震源特性研究(Lin et al. 2005a, b; 林正洪等 2007, Konstantinou et al. 2007)。透過地震分佈與震源特性之研究顯示，陽明山國家公園內之七星山及大油坑附近，有明顯的微震活動存在，大多數之微震震源深度均集中於二至五公里附近，七星山地區之微震震源深度小於大油坑附近震源深度。初步推斷可能與岩層裂縫中液態或氣態物質之振動所造成，這些現象與國外其他火山地區所觀測之岩漿相關活動類似。

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、大地電磁法等)，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(Stevens et al. 2004)、重力(Yang et al. 1994)、地磁力(Gudmundsson and Milsom. 1997)、及地熱氣和溫泉水中化學物質的濃度(Sano and Wakita 1985)。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，如能配合對岩層流體極為靈敏之地電阻資料，更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、甚至岩漿庫之存在與否。

在火山地區影響岩層導電率的因素，簡單可分為二，亦即岩層含水率與溫度效應。就岩層含水率方面，少量的岩石含水率，足以嚴重影響導電率 (Shankland and Ander 1983)。淺部 (~ 1km) 岩石含水率主要受孔隙率與岩性影響，深部 (> 1 km) 岩石內之水來自脫水作用，因礦物晶格中含有結晶水，當結晶水被束縛在礦物晶格內時，對於岩石的導電率影響很微小 (Olhoeft 1981)，當深部溫度、壓力下，礦物的脫水作用，使晶格中的結晶水離開原本的礦物而形成孔隙水(Hyndman et al. 1993)，此

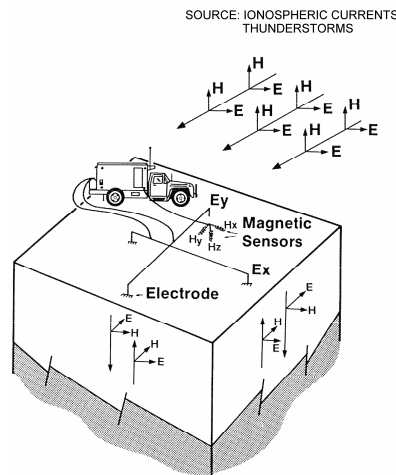


圖 1. 大地電磁法原理圖: 以天然交變電磁場為場源, 量測此電磁場進入地層後之感應訊號, 在地面上一點或多點同時觀測此互為垂直的電磁場水平分量, 可以測獲地球內部的電性構造

為主要影響岩石導電率的因素。至於溫度應, 一般情況下, 導電率隨溫度增加而增加 (Kariya and Shankland 1983)。當溫度高達部分熔融, 岩石礦物的晶體、晶格破壞, 使岩石中離子的電離能降低, 造成離子數目突然增加, 提升導電率, 如果熔融狀態的岩石形成網狀的導電通路, 導電率更會大幅增加。

## 材料與方法

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 1), 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 1), 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。

### 一、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 2), 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 1. 大地電磁法在不同頻率及電阻率下之測深 (m)

f (Hz)	$\rho$ ( $\Omega$ m) 電阻率					
	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 2. 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)

## 二、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 3)，圖中標示聲頻大地電磁法 (AMT)者僅紀錄聲頻段。

各測站紀錄時間上的控制，經由測試分析發現，紀錄天數至少控制在一天以上資料品質才能保障，但越長越好，因此為了時間效益與資料品質，本研究資料收集時間，控制在 1~2 天左右。

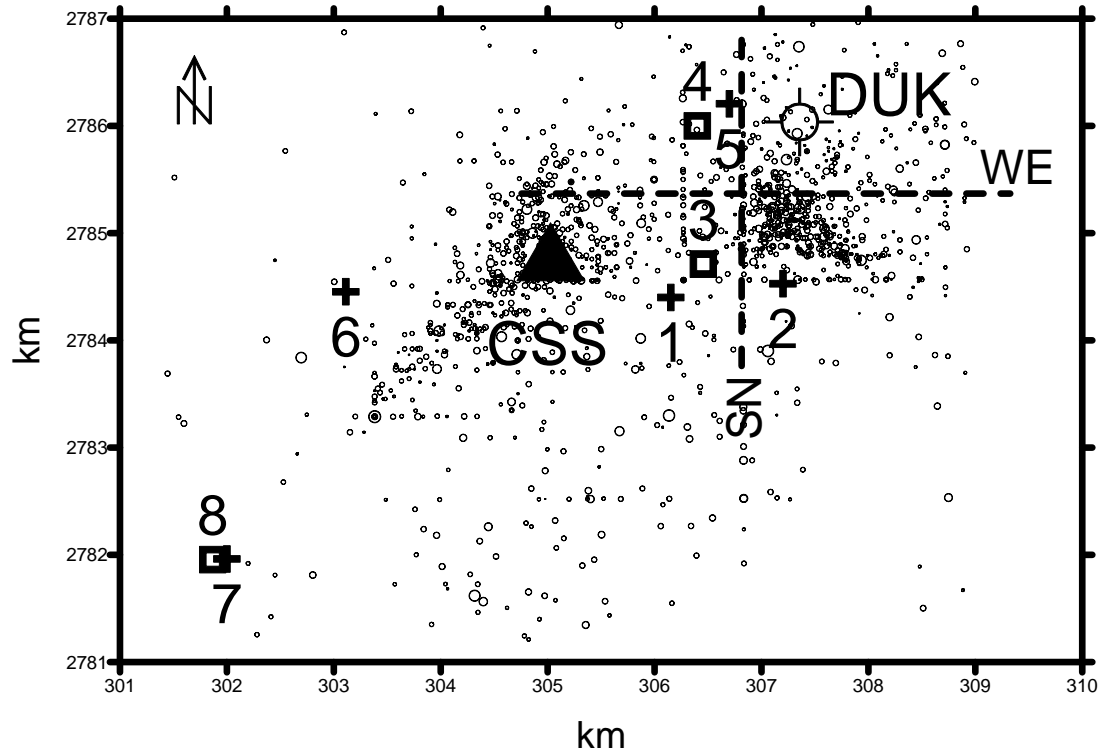


圖 3. 陽明山國家公園 MT(■)、AMT(+)測站及剖線(WE、SN)位置圖。共計 8 個測點，其中測點編號 6、7、8 為遠距參考測點，微震分佈取材自林正洪等(2007)，座標系統為二度分帶，每方格為 1 km<sup>2</sup>。CSS:七星山; TUK:大油坑; 數字: 大地電磁法測點

### 三、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  $\rho_{xy}$  (平行電性地層走向之視電阻率稱為

TE 極化模式)和  $\rho_{yx}$  (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 2。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 4 與圖 5。

## 結果與討論

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6)，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7)。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(圖7)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。

表 2. 大地電磁法資料二維模型逆推參數設定

參數	模式			
	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( $\Omega\text{m}$ )	100	100	100	100
誤差底限(%)(電阻率-相位角)	30-20	30-20	30-20	30-20
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	100	100	100	100

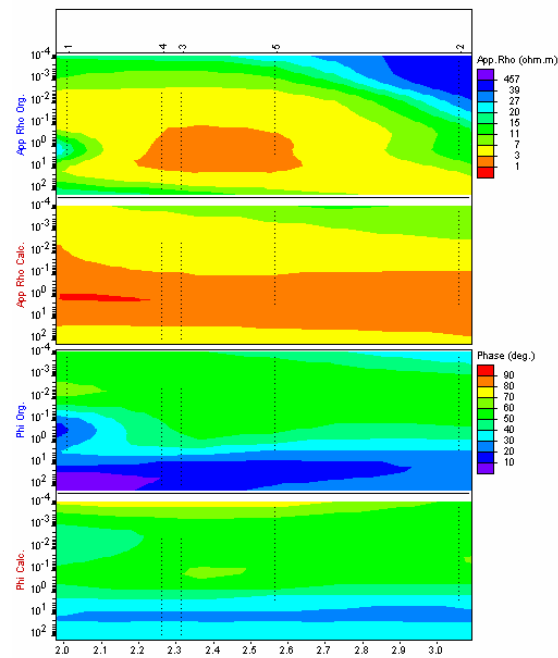


圖 4. 東西向剖面(圖 3)TM 模式電阻率觀測值與其二維逆推(圖 6)後之比較。由上而下依序為觀測視電阻率、圖六視電阻率、觀測相角和圖六相角圖。當觀測圖與逆推圖越接近時，逆推結果越可靠。各圖之縱軸為週期(s)，橫軸表距離(km)，資料點為黑色

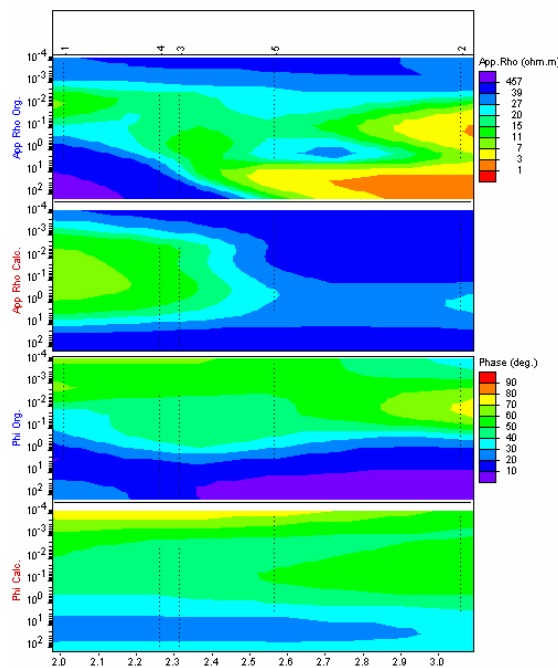


圖 5. 東西向剖面(圖 3)TE 模式電阻率觀測值與其二維逆推(圖 6)後之比較。由上而下依序為觀測視電阻率、圖六視電阻率、觀測相角和圖六相角圖。當觀測圖與逆推圖越接近時，逆推結果越可靠。各圖之縱軸為週期(s)，橫軸表距離(km)，資料點為黑色

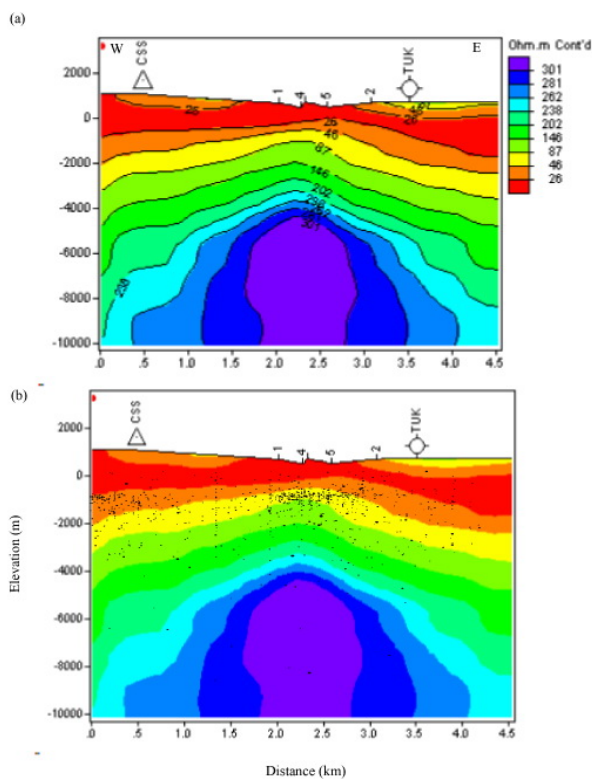


圖 6. (a)測區七星山-大油坑附近東西向二維電性構造剖面圖 (b)套疊微震分佈(林正洪等, 2007)。電性構造紅色表低電阻區、藍色表高電阻區。CSS:七星山; TUK:大油坑; 數字: 大地電磁法測點

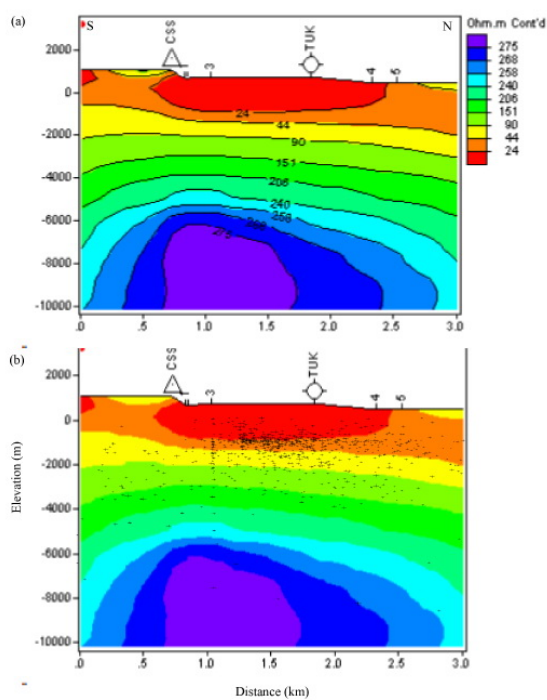


圖 7. (a)測區七星山-大油坑附近南北向二維電性構造剖面圖 (b)套疊微震分佈(林正洪等, 2007)。電性構造紅色表低電阻區、藍色表高電阻區。CSS:七星山; TUK:大油坑; 數字: 大地電磁法測點



## 結論

- 一、從七星山到大油坑之地表下10公里大至呈現背斜之構造，電性地層呈層狀分佈。
- 二、七星山到大油坑之表層約500 m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。
- 三、七星山到大油坑之地表下2至5 Km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。
- 四、七星山到大油坑之地下約6 Km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。
- 五、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。低電阻位於淺部時，大地熱流值越高；低電阻區位於深處時，大地熱流值越低。七星山區符合此一通則，屬於高熱流值地區。
- 六、本研究之初步發現：從七星山到大油坑之地下約6 Km深處存在疑似冷卻中之岩漿庫，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通管道之真實性有其必要。

## 誌謝

本探查能順利完成，感謝內政部陽明山國家公園管理處對本研究經費支持；中央研究院地球科學研究所林正洪博士微震資料之提供、研究生魏多堂協助大地電磁法資料分析及仕弘物探公司先後協助大地電磁法資料之收集；兩位匿名專家審查本文，提供寶貴意見，使本文謬誤減至最少，僅此表示誠摯謝意。

## 引用文獻

- 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。
- 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。
- 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分析。國家公園學報，13(1)：127-156。
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 18: 605-635.
- Chen CH and SB. Lin. 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 TD, WM Goubau, and J Clarke. 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*. 18: 605-635.
- Gudmundsson MT and J Milsom. 1997. Gravity and magnetic studies of the subglacial Grímsvötn volcano, Iceland: Implications for crustal and thermal structure. *J. Geophys. Res.*, 102(B4): 7691-7704.
- Hyndman RD, LL Vanyan, G Marquis and LK Law. 1993. The origin of electrically conductive lower crustal continental crust: saline water or graphite? *Phys. Earth Planet. Inter.* 81: 325-344.
- Kariya KA and TJ Shankland. 1983. Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*. 48: 52-61.
- Konstantinou KL, CH Lin and WT Liang. 2007. Seismicity characteristics of potentially active Quaternary volcano: The Tatun Tsao, Volcano Group, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 160: 300-318.
- Lee HF, TF Yang, TF Lan, CH Chen, SR Song, and S Tsao. 2008. Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 178: 624-635.
- Lin CH, KI Konstantious, WT Liang, HC Pu, YM Lin, SH You and YP Huang. 2005a. Preliminary analysis of volcanoseismic signals at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters* 32, L10313. doi:10.1029/2005GL022861.
- Lin CH, KI Konstantious, HC Pu, CC Hsu, YM Lin, SH You and YP Huang. 2005b. Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 16: 563-577.
- Olhoeft GR. 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 RL Mackie. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*. 66: 174-187.
- Sano Y and H Wakita. 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.
- Shankland TJ and ME Ander. 1983. Electrical conductivity, temperature, and fluids in the lower crust. *J. Geophys. Res.* 88: 9475-9484.
- Song SR, TF Yang, YH Yeh, S Tsao and HJ Lo. 2000. The Tatun Volcano Group is active or extinct? *Jour. Geol. Soc. China.* 43(3): 521-534.
- Stevens NF, H, Garbeil and PJ Mouginiis-Mark. 2004. NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability, *Remote Sensing of Environment* 90, 405-414.
- Wang KL, CH Chung, RS Chen, TF Yang and CH Chen. 1999. Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics* 308: 363-376.
- Yang CH, TC Shei and CC Luei. 1994. Gravity and magnetic studies in the Tatun Volcanic Region, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 5, No.4: 499-514.