

[研究成果報導]

大台北都會區下岩漿庫存在之證據

中央研究院地球科學研究所 林正洪

一、背景

大台北都會區近郊之陽明山國家公園內，地表的地熱活動非常的明顯，例如小油坑、硫磺谷、庚子坪、七股、八煙等等的地區，溫泉、噴氣孔及地熱處處可見，這些現象是因為大屯火山群的火山活動所造成。大屯火山群包括 20 幾個明顯的火山體，包括大屯山、七星山、紗帽山、黃嘴山、小觀音山、大後尖山等等。其中七星山的海拔最高 (1,120 公尺)，因此它不僅是台北市最高的山，同時科學家一般相信它也是最晚期噴發的火山。眾所皆知，大屯火山群緊鄰台北市，其中特別是天母、北投與士林區，更僅位於大屯火山群之山腳下。即使台北市中心的 101 大樓與七星山的距離也小於 15 公里。因此，大屯火山群是否再度的活動，不僅是科學的問題，更是大台北都會區一項重要安全的考量。

根據早期的岩石定年結果，推論大屯火山群最晚期的噴發大約在十萬年到二十萬年前[1]，因此過去大多數人認為大屯火山群應該不會再活動，而目前的地表地熱活動僅是後火山作用的現象。但是近十幾年的研究成果，卻重新判定大屯火山群很可能是屬於活火山，主要的證據包括地球化學、地震活動、地殼變形與火山灰定年等等。首先，氦氣同位素的比值高達 4 到 7 之間，強烈的建議有深部地幔物質由下而上滲入到大屯火山群的現象[2]。在七星山與大油坑附近又偵測到非常集中的群震活動現象[3, 4]，同時偶爾伴隨著典型的火山地震，例如水滴狀、螺絲釘狀、超長週期等等之特殊地震[5, 6]。精密的水準測量發現擎天崗附近地殼明顯的局部抬升[7]。火山灰定年結果認為最後一次噴發可能在幾千年內[8, 9]。所有上述的結果，強烈的建議大屯火山群可能是活火山。因此，政府於民國一百年成立大屯火山觀測站(TVO: Taiwan Volcano Observatory

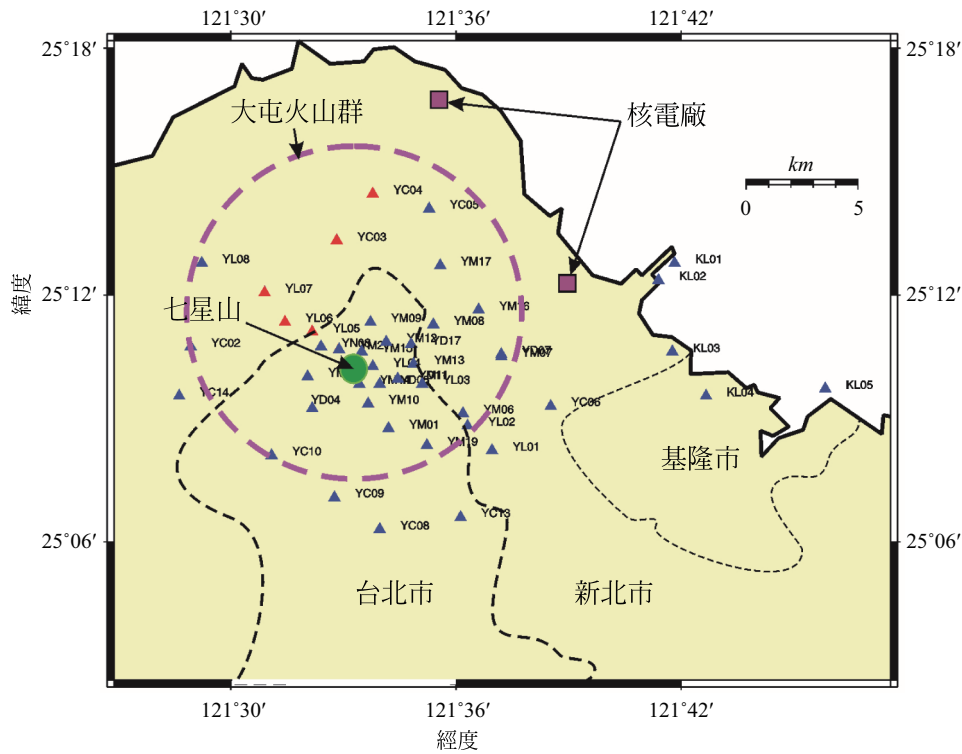
at Tatun)，建立各項即時觀測系統，包括地球化學、地震網、地殼變形、地溫與火山噴氣孔即時影像等，專職負責火山監測之工作[10]，同時對於基礎科學與科普教育也提供更深入完整的資料。

二、原理

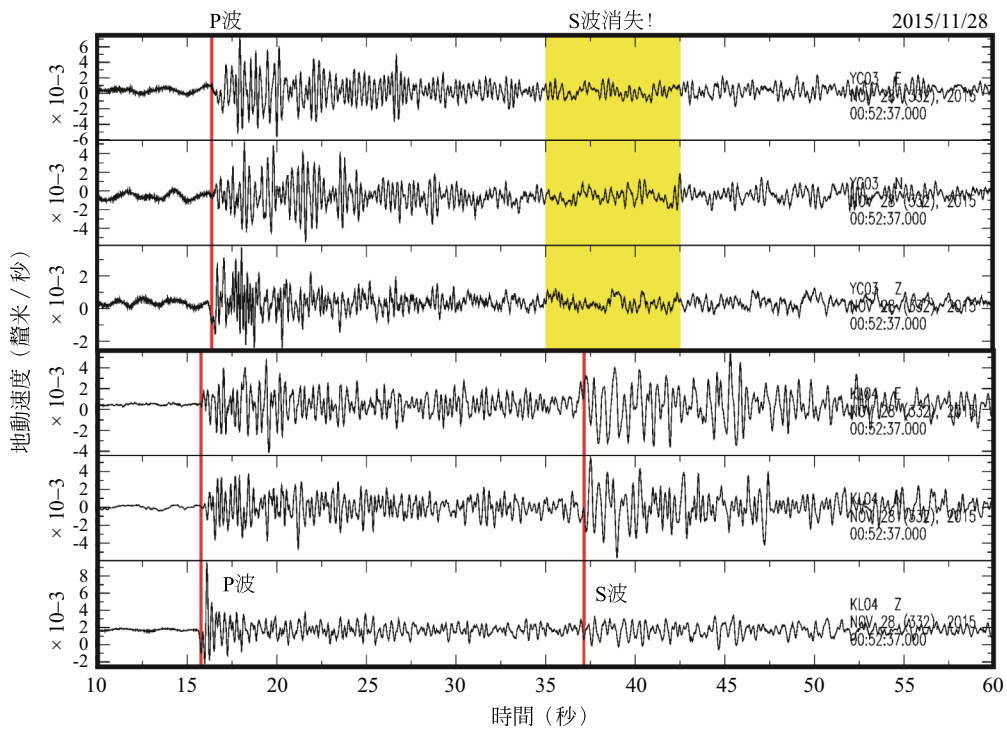
雖然上述的這些觀測結果強烈地建議大屯火山群可能是活火山，但是卻一直沒有任何直接的證據，可以證明大屯火山群底下是否有岩漿庫的存在。為了尋找岩漿庫存與否的科學證據，過去幾年之間大屯火山觀測站，增設密集的地震觀測站（如圖一），主要的研究方向與理論是根據岩漿庫的基本物理特性而設定。顧名思義，岩漿庫是一個液態為主的岩漿體，因此 S 波（橫波或剪切波）是沒辦法穿過岩漿庫。這個道理也是相同於一百多年前，科學家第一次發現地球外核是液態的重要證據，也就是觀測 S 波的陰影來證明外核是液態[11]。事實上，地球的外核與岩漿庫是目前科學界認定地球內部僅有的兩個液態組成。除了觀測 S 波的陰影外，液態的岩漿庫也會明顯地造成 P 波（縱波或壓縮波）的緩達現象。經過仔細地分析大屯火山地震觀測網所有資料，最近終於同時發現 S 波的陰影與 P 波的緩達這兩項重要的證據[12]，詳細分析方法與結果如下節說明。

三、分析方法與結果

為了能夠清楚地檢驗岩漿庫存在的證據，仔細地分析 2015 年 20 個台灣北部版塊隱沒帶的較深且較大之地震，包括深度大於 100 km 以上，規模大於四以上。一般而言，這些較深地震所產生的直接到達地震波（包括 S 波與 P 波），理論上都可以非常清楚地判讀出來，主要原因是地震波的路徑幾乎垂直而上傳，而且主要經過路徑是



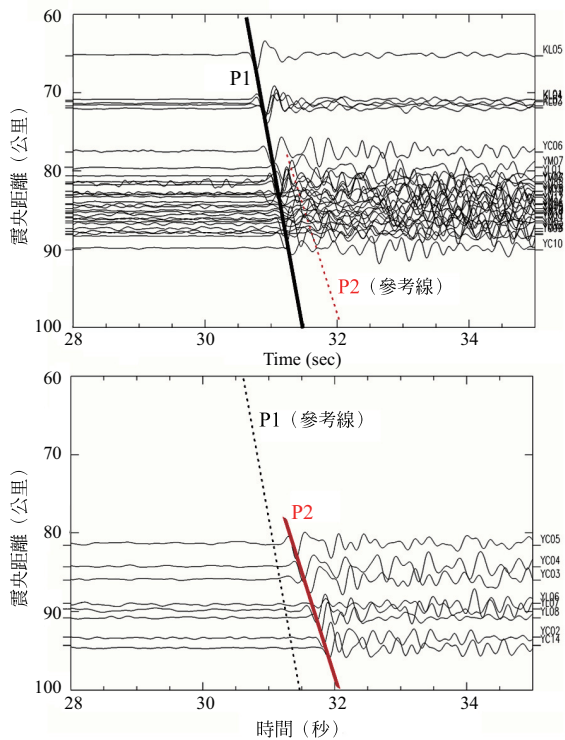
圖一 大屯火山群地震觀測網的測站分佈 (三角形) 與北台灣主要城市位置



圖二 兩個不同地震測站 S 波存在與否的比較，下圖 S 波可以非常清楚辨識，但是上圖 S 波消失

相對均勻的地幔。但是根據大屯火山地震觀測記錄，清楚地發現其中有四個最深的地震（深度超過 200 km 以上），在特殊的五個地震站有明顯的

S 波消失現象（如圖二），而且這些地震站多集中在大屯山的北側特定範圍內，大約 8 km 長與 3 km 寬的地區內。相反地，其他的所有地震觀測

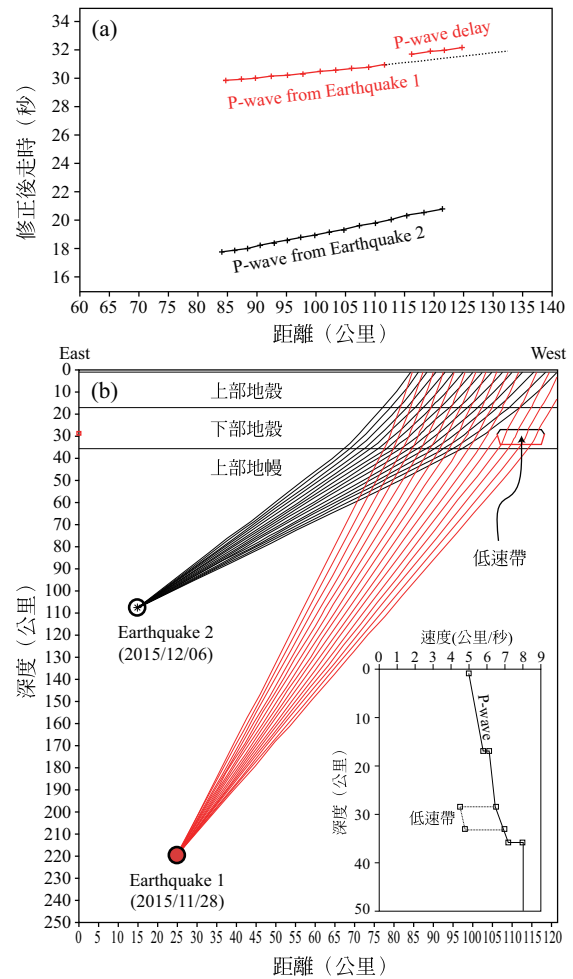


圖三 P 波是否正常到達的比較，上圖所有測站 P 波正常到達(P1)，下圖表示其他測站遲緩到達(P2)

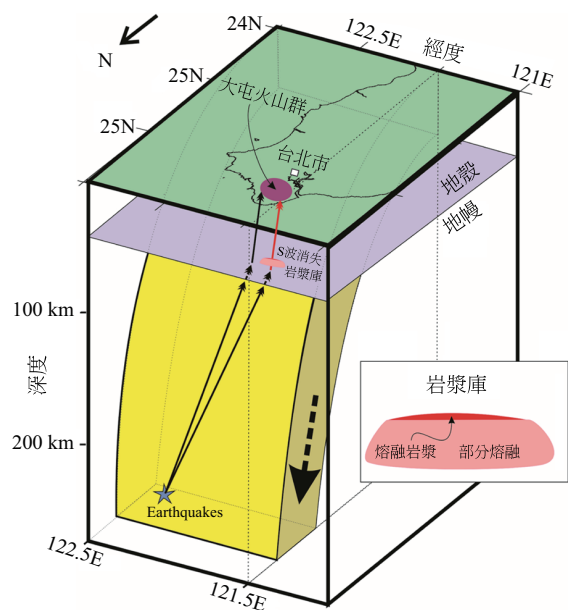
站基本上都可以清楚地辨識地震波的到達時間。此外，同時檢驗 S 波消失現象的這些地震紀錄，也可以非常清楚地發現這些觀測站的 P 波也延遲了大約 0.4 秒左右（如圖三）。事實上，地震觀測站記錄的 P 波延遲範圍，遠比 S 波消失更為廣泛地區，大約 15 km 長與 6 km 寬的地區內。

四、討論

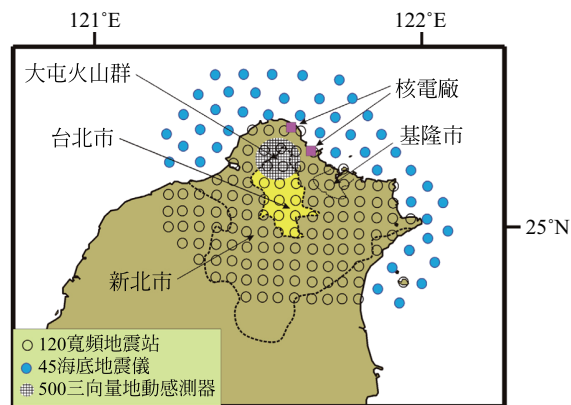
雖然發現 S 波消失的現象，但是仍然無法確定可能岩漿庫的深度是在地殼或是地幔。因此，仔細地檢查其他深度小於 200 km 地震的紀錄，並且發現基本上 S 波消失的現象並不存在。經由交叉比對不同地震深度的震波傳遞路徑（如圖四），可以初步判斷岩漿庫的位置很可能坐落於下部地殼或是淺部地幔。但是因為 S 波消失的範圍非常有限，因此推估岩漿庫應該不會位於地幔的部分，否則岩漿庫的體積會是很小，而且速度要非常的低，才有可能符合 P 波也延遲了大約 0.4 秒左右的觀測結果。此外，根據其他火山的經驗，一般認為岩漿庫位於下部地殼的可能性比較大（如圖五）。



圖四 比對兩個不同深度的地震所產生震波傳遞(a)到達時間與(b)路徑



圖五 利用隱沒帶地震產生的路徑來檢視火山岩漿庫存在的示意圖



圖六 大台北都會附近地區多種高解析度地震觀測陣列分布

爲了進一步估算岩漿庫的體積，假設在下部地殼中存在一個低速帶（如圖四），它的厚度約 6 km，速度比周圍的岩石低了 40%，如此可以合理解釋 P 波也延遲了大約 0.4 秒左右的觀測結果。事實上，低速帶的速度大小可能直接反應火山岩漿庫熔融的百分比。如果假設 34% 熔融岩漿，估算岩漿庫的大小大約 350 立方公里 (3.9 km × 15 km × 6 km)。但是如果假設熔融岩漿只有 14%，估算岩漿庫大約爲 936 立方公里 (10.4 km × 15 km × 6 km)。

五、結果與未來規劃

根據大屯火山觀測站目前設置的地震觀測網，可以清楚地觀測到 S 波的陰影與 P 波的緩達現象，這兩項重要的結果充分地證實台灣北部存在一個岩漿庫。這可能是全世界首次同時利用 S 波陰影與 P 波緩達兩個現象，證實岩漿庫的存在。如果假設岩漿庫內有 34% 熔融岩漿，估算它的大小大約是 350 立方公里。雖然根據目前的資料推估岩漿庫的位置可能是在下部地殼，但是它真正的位置與幾何形貌卻還不能非常清楚地描繪出來。

爲了詳細了解岩漿庫的生成原因與幾何形貌，科技部規劃於民國 106 年到 109 年進行一項“台北都會防災科學任務：確認大屯火山地下岩漿庫的位置與形貌”的科技計劃，準備在北台灣地區設置多種密集地震站陣列，主要的觀測儀器包括寬頻地震儀、三向量地動感測器與海底地震儀（如圖六）。首先，全面性地在台灣北部地區，

設置測站間距大約 5 公里左右的棋盤式寬頻地震網，以期獲得北台灣地區高解析度的深部地下構造。其次，爲了擴張研究的範圍以及北部海底火山的監測能力，同時規劃於台灣北部近海地區設置海底地震儀，增強透視地下構造的範圍與解析度。最後，再於重點的研究區域，例如火山噴口、斷裂帶與活動斷層帶等，設置超高解析度的地動感測點陣列，測點間距大約幾十公尺左右，以期獲取詳細的構造特性，提供評估未來可能的地質災害。相信上述的研究計劃成果，可以更有效地提高了解岩漿庫存在的幾何形貌，作爲未來國家重要的防災參考依據。

致謝

感謝科技部、陽明山國家公園管理處、中央地質調查所、中央氣象局等過去長期的支持。同時感謝中央研究院地球科學研究所、台灣大學地質系、大屯火山觀測站許多參與同仁共同的努力。

參考文獻

- [1] W.H. Wang and C.H. Chen, *Acta Geologica Taiwanica*, **28**, 1-30 (1990).
- [2] T.F. Yang and S.R. Song, *Nuovo Cimento Della Societa Italiana Di Fisica C22 (3-4)*, 281-286 (1999).
- [3] C.H. Lin, K.I. Konstantinou, H.C. Pu, C.C. Hsu, Y.M. Lin, S.H. You and Y.P. Huang. *Terr. Atm. Ocean. Sci.*, **16**, 563-577 (2005).
- [4] H.C. Pu, C.H. Lin, Y.C. Huang, L.C. Chang, H.F. Lee, P.L. Leu, N.C. Hsiao, C.H. Chang and Y.H. Yeh, *Terr. Atm. Ocean. Sci.*, **25**, 625-635 (2014).
- [5] C.H. Lin, K.I. Konstantinou, H.C. Pu, C.C. Hsu, Y.M. Lin, S.H. You and Y.P. Huang. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10313 (2005).
- [6] C.H. Lin and H.C. Pu, *J. Volcan. and Geotherm. Res.*, in press. (2016).
- [7] M. Murase, C.H. Lin, F. Kimata, H. Mori and H.C. Pu, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 30-40 (2014).
- [8] A. Belousov, M. Belousova, C.H. Chen and G.F. Zellmer, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **191**,

205-221 (2010).

- [9] G.F. Zellmer, K.H. Rubin, C.A. Miller, J.G. Shellnutt, A. Belousov and M. Belousov, Chapter in L. Caricchi, & J.D. Blundy (Eds.) *Chemical, Physical and Temporal Evolution of Magmatic Systems*, Geological Society, London, *Special Publications*, **422** (2015).
- [10] 林正洪、李曉芬、黃有志、張麗琴, *陽明山*

國家公園管理處, 共 141 頁。(2014).

- [11] B. Gutenberg, *Phys. Zeitschr.* **14**, 1217-1218 (1913).
- [12] Lin, C.H., Evidence for a magma reservoir beneath the Taipei metropolis of Taiwan from both S-wave shadows and P-wave delay, *Scientific Reports*, **6**, 39500 (2016).